

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MIMO-IP TELSİZ AĞLARDA DÖRTLÜ OYUN UYGULAMALARI
BAŞARIM ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Nevzat PINAR**

Anabilim Dalı : Elektronik Haberleşme Müh.

Programı : Telekomünikasyon Müh.

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Selçuk PAKER

HAZİRAN 2009

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MIMO-IP TELSİZ AĞLARDA DÖRTLÜ OYUN UYGULAMALARI
BAŞARIM ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Nevzat PINAR
504061328

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 Mayıs 2009

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Haziran 2009

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Selçuk PAKER (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. İbrahim ALTUNBAŞ (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Feza BUZLUCA (İTÜ)

HAZİRAN 2009

Canim anneme,

ÖNSÖZ

Bu tezin gerçekleştirilmesinde bilgisi ve tecrübesi ile yol gösteren, destek olan danışman hocam Sayın Doç. Dr. Selçuk Parker'e, bu süre zarfında gösterdikleri engin tahammül nedeniyle ev arkadaşlarıma, çalışmalarımı sürdürmemde bana her türlü imkân ve desteği sağlayan İstanbul Yakası İl Telekom Müdürlüğü Bilişim Ağlarına ve moralimi her zaman yüksek tutmama yardım eden varlığımın sebebi canım anneme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2009

Nevzat Pınar

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TELSİZ AĞLAR.....	5
2.1 Telsiz Ağ Tekniklerinin Getirdikleri	5
2.2 Telsiz Kanal Karakteristiği.....	5
2.3 Sönümlemeli Kanallar.....	7
2.3.1 Geniş ölçekli sönümleme	8
2.3.2 Küçük ölçekli sönümleme.....	8
2.3.3 Düz sönümleme.....	9
2.3.4 Frekans seçici sönümleme	10
2.4 Çeşitleme	10
2.4.1 Frekans çeşitlemesi	11
2.4.2 Zaman çeşitlemesi	11
2.4.3 Uzay (anten) çeşitlemesi	11
2.5 MIMO Sistemler	12
2.5.1 Alıcı-vericide çoklu anten durumları	12
2.5.2 Anten sayısı-hata olasılığı ilişkisi	14
3. MIMO TEKNİĞİ.....	15
3.1 Telsiz Kanalların Kapasitesi.....	15
3.2 MIMO Link Modeli ve Kapasitesi	16
3.3 Antenler ve Alıcı Karmaşıklığı	19
3.4 Arka Plandaki Teknolojiler	20
3.4.1 Ön-kodlama.....	20
3.4.2 Çoklu yol kavramı ve uzaysal çoğullama	20
3.4.3 Hüzme şekillendirme	24
3.4.4 Çeşitleme kodlaması	25
3.4.5 Uzay-zaman kodları	26
3.4.6 İşaret birleştirme	28
3.5 MIMO Uygulamaları.....	29
3.5.1 BLAST	29
3.5.2 GDLS	30
3.5.3 802.11n.....	30
3.5.4 802.16e.....	30
3.5.5 4.Nesil hücresel sistemler	31

4. TELSİZ YEREL ALAN AĞLARI	33
4.1 IEEE 802.11	33
4.1.1 IEEE 802.11a	33
4.1.2 IEEE 802.11b	33
4.1.3 IEEE 802.11g	34
4.1.4 Wi-Fi Alliance.....	34
4.1.5 Diğer standartlar ve 802.11n	34
4.2 Teknoloji ve Radyo Teknikleri.....	35
4.3 Fiziksel Katman.....	35
4.3.1 MIMO-OFDM.....	36
4.3.2 Kanal birleşimi	38
4.3.3 Modülasyon	38
4.4 Ortam Erişim Denetimi Katmanı.....	39
4.4.1 Çerçeve birleştirme	39
4.4.2 Blok onayı	41
4.4.3 Azaltılmış çerçeveler arası boşluk.....	41
4.4.4 Geriye dönük uyumluluk.....	42
4.5 Teorik Maksimum Hız	42
5. TELSİZ METROPOL ALAN AĞLARI.....	43
5.1 IEEE 802.16	43
5.1.1 WiMAX Forum	44
5.2 IEEE 802.16e-2005	45
5.3 Fiziksel Katman.....	45
5.3.1 OFDMA	45
5.3.2 S-OFDMA	46
5.3.3 802.16-2004 fiziksel katman	46
5.3.4 802.16e-2005 fiziksel katman	47
5.4 WiMAX için MIMO Eklentileri.....	48
5.5 Genişbant Telsiz Erişimde Mevcut Durum ve Karşılaştırma.....	51
6. TELSİZ İLETİŞİMDE DÖRTLÜ OYUN UYGULAMALARI	53
6.1 İnternet Protokolü Üzerinden Ses İletimi	53
6.1.1 VoIP kodlama teknikleri	54
6.1.2 İşaretleşme protokolleri.....	55
6.1.3 Ses Kalite Parametreleri	55
6.2 İnternet Protokolü Üzerinden Televizyon	57
6.2.1 IPTV servisleri	57
6.2.2 Taşıma ağları	58
6.2.3 Gelişmiş video kodlama teknikleri.....	59
6.2.4 IP ağları üzerinden çoklu ortam akışı.....	59
6.2.5 Ortam akışı için standart protokoller.....	60
6.2.6 WiMAX QoS.....	61
6.2.7 IPTV’de WiMAX seçimi	62
6.3 Mobilite	62
6.3.1 WiMAX çalışma ve kabul kontrolü kipleri.....	63
7. 802.11n AĞ ANALİZİ.....	65
7.1 Veri İletimi	67
7.2 Ses İletimi.....	71
7.3 Video İletimi.....	72
7.4 Aktarım Testi.....	74
7.5 Sonuçlar ve Yorumlar.....	74

8. 802.16e AĞ BENZETİMİ	77
8.1 Kurulum ve yapılandırma.....	77
8.1.1 Benzetim ortamı değişkenleri	80
8.2 Veri İletim Performansı Benzetimi	82
8.3 Görüntü İletim Performansı Benzetimi	89
8.4 Ses İletim Performansı Benzetimi.....	93
8.5 Aktarım Performansı Benzetimi.....	94
8.6 Sonuçlar ve Yorumlar	96
9. SONUÇ	97
KAYNAKLAR	99
EKLER	105

KISALTMALAR

3GPP	: 3rd Generation Partnership Project
AMC	: Adaptive Modulation and coding
AP	: Access Point
ARQ	: Automatic Repeat Request
AVC	: Advanced Video Coding
AWGN	: Additive White Gaussian Noise
BF	: Beamforming
BPSK	: Bipolar Phase Shift Keying
BS	: Base Station
BU	: Binding Update
CBR	: Constant Bit Rate
CDMA	: Code Division Multiple Access
CINR	: Carrier to Interference-plus-Noise Ratio
CoA	: Care-of-Address
CODEC	: Compression/Decompression
CSI	: Channel State Information
CSMA/CA	: Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DL, UL	: Downlink, Uplink
DSL	: Digital Subscribers Line
DSSS	: Direct Sequence Spread Spectrum
ETSI	: European Telecommunications Standard Institute
FDD	: Frequency Division Duplexing
FDM	: Frequency Division Multiplexing
FEC	: Forward Error Correction
FFT	: Fast Fourier Transform
FHSS	: Frequency-Hopping Spread Spectrum
FTP	: File Transfer Protocol
FTTN	: Fiber To The Node
GPC	: Grants Per Connection
GPSS	: Grants Per Subscriber Station
HA	: Home Address
HDTV	: High Definition TV
HSPA	: High Speed Packet Access
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	: Internet Engineering Task Force
IFFT	: Inverse Fast Fourier Transform
ISI	: Inter Symbol Interference
ISM	: Industrial Scientific Medical
ITU	: International Telecommunication Union
IUC	: Interval Usage Code
LOS	: Line-of-Sight
LTE	: Long Term Evolution
MAC	: Medium Access Control
MIMO	: Multiple Input- Multiple Output

MISO	: Multiple Input- Single Output
ML	: Maximum Likelihood
MN	: Mobile Node
MOS	: Mean Opinion Score
MPDU	: MAC Protocol Data Unit
MPEG	: Motion Pictures Experts Group
MRC	: Maximum Ratio Combining
MS	: Subscriber Station
MSDU	: MAC Service Data Unit
NLOS	: Non-Line-of-Sight
OFDM	: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	: Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PAM	: Pulse Amplitude Modulation
PAPR	: Peak to Average Power Ratio
PHY	: Physical Layer
PMP	: Point-to-Multi Point
PSK	: Phase Shift Keying
PSQM	: Perceptual Speech Quality Measure
PSTN	: Public Switched Telephone Network
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
OFDM	: Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
QoS	: Quality of Service
QP	: QoS Provision
QPSK	: Quadrature Phase-Shift Keying
RTP	: Real-time Transport Protocol
SD	: Sphere Decoding
SDTV	: Standard Definition TV
SIMO	: Single Input- Multiple Output
SIP	: Session Initiation Protocol
SISO	: Single Input- Single Output
SM	: Spatial Multiplexing
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
S-OFDMA	: Scalable OFDMA
SS	: Subscriber Station
STBC	: Space-Time Block Coding
STC	: Space-Time Codes
STTC	: Space-Time Trellis Code
TCP/IP	: Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TDD	: Time Division Duplex
UDP	: User Datagram Protocol
UMTS	: Universal Mobile Telecommunications System
VLAN	: Virtual Local Area Network
VoD	: Video on Demand
VoIP	: Voice over IP
WiMAX	: Worldwide Interoperability Microwave access
WLAN	: Wireless Local Area Network
WMAN	: Wireless Metropolitan Area Network
WRAN	: Wireless Regional Area Network
ZF	: Zero Forcing

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Telsiz yerel alan ağ standartları [30].....	35
Çizelge 4.2 : 802.11n özellikleri [34]	36
Çizelge 5.1 : WiMAX'te kullanılan OFDM parametreleri [1]	47
Çizelge 5.2 : WiMAX'ın diğer genişbant telsiz teknolojileri ile karşılaştırması[1]...48	
Çizelge 6.1 : OSI modeline göre VoIP servisi	54
Çizelge 6.2 : Farklı kodeklerin MOS ve gecikme değerleri.....	56
Çizelge 6.3 : IPTV-İnternet TV karşılaştırması	58
Çizelge 6.4 : QoS kategorileri	61
Çizelge 7.1 : Sinyal gücü ve 1KB paket için ortalama gidiş-geliş süresi.....	67
Çizelge 7.2 : Farklı konumlarda ortalama TCP veri hızları	68
Çizelge 7.3 : 1.konumda farklı sayıda VoIP bağlantısı.....	71
Çizelge 7.4 : 6.konumda farklı sayıda VoIP bağlantısı.....	71
Çizelge 8.1 : Benzetimin yapıldığın donanımın özellikleri.....	78
Çizelge 8.2 : Fiziksel Katman ve kanal modeli parametreleri.....	81
Çizelge 8.3 : Alıcı SNR varsayımları [67]	83
Çizelge 8.4 : IUC değerleri ve kodlama tipleri [67].....	83
Çizelge 8.5 : 3km'de farklı QP değerleri için aşağı ve yukarı bağlantı hızları	85
Çizelge 8.6 : Sunucu ve istemci için SDP tanımları.....	90
Çizelge 8.7 : İki video aktarımının mesafeye bağlı gecikme ve seğirme değişimi	90
Çizelge 8.8 : G.729 VoIP için farklı mesafelerdeki gecikme değerleri.....	93
Çizelge 8.9 : Aktarımın gerçekleştiği ortalama CINR değeri ve aktarım gecikmesi .95	
Çizelge A.1: 802.11n başarımlı analizinde kullanılan cihaz özellikleri	107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Telsiz alan ağı.	1
Şekil 1.2 : 1999-2006 arasındaki mobil telefon, internet kullanımı ve geniş bant erişimi abone sayısının dünya çapındaki artışı [1].	2
Şekil 2.1 : Mesafe-topoloji-segmentler	6
Şekil 2.2 : LOS ve NLOS.	7
Şekil 2.3 : Telsiz haberleşmede kanalın maruz kaldığı bozucu etkiler	8
Şekil 2.4 : Geniş ve küçük ölçekli sönümleme	8
Şekil 2.5 : Küçük ölçekli sönümleme	9
Şekil 2.6 : Düz sönümlenen kanal karakteristiği.	9
Şekil 2.7 : Frekans seçici sönümlenen kanalın karakteristiği	10
Şekil 2.8 : MIMO haberleşmenin gelişimi	12
Şekil 2.9 : Alıcı-vericide farklı anten durumları	13
Şekil 2.10: Farklı sayıdaki çeşitleme yollarının MIMO sistemin ortalama hata olasılığına etkisi [17].	14
Şekil 3.1 : Alıcı-verici anten sayısına 10dB SNR için kapasite değişimi [19]	16
Şekil 3.2 : MIMO kanal modeli	17
Şekil 3.3 : Rankı bire yaklaşık bir sistem	17
Şekil 3.4 : Çoklu yol.	21
Şekil 3.5 : Spektral verimi 3 kat artıran 3x3 uzaysal çoğullama [21]	22
Şekil 3.6 : Uzaysal çoğullamanın matematiksel ifadesi	23
Şekil 3.7 : Yıkıcı girişim, iletimde BF kullanımı (yapıcı girişim).	24
Şekil 3.8 : Hüzme şekillendirme	24
Şekil 3.9 : Basit ikili çeşitlemenin derin sönümlere etkisi.	26
Şekil 3.10: 2x2 STC kullanan bir sistemin blok şeması	27
Şekil 3.11: STC blok diyagramı.	28
Şekil 3.12: BLAST mimarisi	30
Şekil 3.13: Mobil teknolojilerin yakınsaması	31
Şekil 4.1 : Wi-Fi Alliance logoları	34
Şekil 4.2 : M verici N alıcıya sahip bir MIMO-OFDM sistem modeli	37
Şekil 4.3 : FDM-OFDM karşılaştırması	38
Şekil 4.4 : 20 MHz ve 40 MHz kanallar	38
Şekil 4.5 : Paket başlıkları	39
Şekil 4.6 : Yığmanın ağ verimliliğine etkisi	40
Şekil 4.7 : Koruyucu periyod	41
Şekil 5.1 : Kullanılan ve planlanan frekansların dağılımı	43
Şekil 5.2 : WiMAX forumu onaylı ibaresi	44
Şekil 5.3 : OFDMA [1].	46
Şekil 5.4 : WiMAX çoklu anten teknolojisi	48
Şekil 5.5 : MIMO Matris A (STBC)	49
Şekil 5.6 : MIMO Matris B (MIMO-SM)	49
Şekil 5.7 : MIMO adaptif mod seçimi	50
Şekil 5.8 : WiMAX-MIMO kombinasyonları için verim-SNR grafiği [24]	51

Şekil 6.1 : IPTV’de kullanılan protokol yığını	58
Şekil 6.2 : Teke ve çoğa gönderim	59
Şekil 6.3 : Gerçek zamanlı iletişim protokol enkapsülasyonları	61
Şekil 7.1 : Başarım analizinden kullanılan cihazlar ve topoloji	66
Şekil 7.2 : Ölçüm yapılan noktalar ve erişim noktasına uzaklıkları	67
Şekil 7.3 : 802.11g erişim noktası ile TCP performansı	69
Şekil 7.4 : 802.11n erişim noktası ile TCP performansı	69
Şekil 7.5 : 802.11n için UDP seğirme ve paket kaybı değişimi	70
Şekil 7.6 : Video akış sayısı ile değişen gecikme (b) ve kayıp oranı (c)	73
Şekil 8.1 : NCTUns benzetimcisi mimarisi	77
Şekil 8.2 : NCTUns kurulumu sonrası FC9 ve yamalı kernel	78
Şekil 8.3 : <i>Dispatcher</i> ’ın çalıştırılması	79
Şekil 8.4 : <i>Coordinator</i> ’ın çalıştırılması	79
Şekil 8.5 : <i>Nctunsclient</i> ’ın çalıştırılması	79
Şekil 8.6 : Örnek benzetim topolojisi	80
Şekil 8.7 : BS ve MS için SNR değişimi	82
Şekil 8.8 : Mesafeye bağlı DIUC, UIUC değerleri	84
Şekil 8.9 : 100m’de QP ile değişen TCP çıkış hızı	85
Şekil 8.10: Mesafeye bağlı TCP veri hızı	85
Şekil 8.11: Beş kullanıcı için aşağı bağlantı TCP veri hızı	86
Şekil 8.12: UDP iletimde paket kaybı (a) ve gecikme (b)	87
Şekil 8.13: Farklı paket boyutlarında aşağı ve yukarı bağlantıda QP değerine bağlı paket kaybı ve gecikme değişimi	88
Şekil 8.14: Birden fazla kullanıcının aşağı ve yukarı yönde TCP bağlantısı kurma durumu	89
Şekil 8.15: Farklı modülasyon tiplerinde kullanıcı sayısı [68]	89
Şekil 8.16: 200m’de iki video aktarımının zamana bağlı gecikmesi	91
Şekil 8.17: 0,5 Mb/s sürdürülebilir hızda iki video aktarımı için seğirme	91
Şekil 8.18: İkinci video aktarımının 400m’deki istemcinin farklı QP değerleri için zamanla değişen gecikme	92
Şekil 8.19: FTP iletimi esnasında video aktarım gecikmesi ve veri hızı değişimi	92
Şekil 8.20: IPTV kapasitesi [68]	93
Şekil 8.21: 200m mesafede VoIP için zamanla değişen gecikme	94
Şekil 8.22: VoIP kapasitesi [68]	94
Şekil 8.23: PMP ağda aktarım topolojisi	95
Şekil 8.24: İstemcinin aşağı bağlantı veri hızı değişimi	95
Şekil A.1 : Örnek NCTUns çıktısı ...	109

MIMO-IP TELSİZ AĞLARDA DÖRTLÜ OYUN UYGULAMALARI BAŞARIM ANALİZİ

ÖZET

Telsiz iletişim kanalı, yüksek hızlı iletişim için aşılması gereken ciddi sorunlar barındırmaktadır. Vericiden gönderilen sinyalin yansıma, saçılma ve kırınım nedeniyle alıcıya birçok yolu kullanarak ulaşmasından kaynaklanan sönümlenme bunlardan birisidir. Sönümlenmeye karşı geliştirilmiş yöntemlerden birisi alıcı ve vericide çoklu anten kullanımı ile oluşturulan çoklu giriş çoklu çıkış (MIMO) mimarisidir. MIMO kanalın modellenmesi ve geliştirilen bu modellere göre kanal başarımının belirlenmesi günümüzün aktif çalışma konularındandır. Birkaç yıl önce yayınlanan bir dizi enformasyon teorisi makalesi ile beraber MIMO sistemler oldukça hızlı bir gelişme sürecine girmiştir. Bu gelişmeler ile birlikte MIMO kullanan sayısal haberleşme sistemleri günümüzün gelecek vadeden araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. MIMO haberleşme sistemleri verici ve aynı zamanda alıcı uçta çoklu anten kullanımı şeklinde açıklanabilir. Ana fikir iki uçtaki örneklenmiş işaretlerin verimli çoklu veri akışları oluşturacak ve/veya haberleşme sisteminin kalitesini artıracak şekilde birleştirilmesidir.

Şu anda son halini almamış olsa da kısa zamanda en yaygın telsiz yerel alan ağı standardı olması öngörülen 802.11n standardı veri hızını ve erim mesefesini önemli ölçüde artırırken eş zamanlı olarak çoklu veri iletişimi yapılmasına imkan tanıyan MIMO tekniğinden faydalanmaktadır.

Öbür taraftan MIMO; UMTS, WiMAX ve benzeri geniş bant telsiz metropol erişim ağları ile oluşması tahmin edilen iletim kapasitesindeki sıkışmaya da çözüm getirecek en olası teknoloji konumundadır. Bu standartların en önemlilerinden ve en yenilerinden birisi olan IEEE 802.16e standardındaki WiMAX ağlarda MIMO desteği ve gezginlik sunulması için çalışılmaktadır. Çok daha geniş çaptaki alanlarda telsiz geniş bant ağ oluşumuna olanak sağlayan ve telsiz altyapısının büyümesi ve tam-IP hale gelmesi noktasında büyük avantajlara sahip olan bu yeni nesil telsiz ağlar dünyada giderek yaygınlaşmaktadır.

Daha fazla performans sunması için çalışılan bu ağlardan beklenen dört ayrı hizmeti verebilmesidir. Bunlar; genişbant internet erişimi, sayısal TV/video, sabit ses iletişimi ve gezgin iletişimdir. Dörtlü oyun ya da *quadruple-play* başlığı altında toplanan bu uygulamalar son kullanıcıya şimdiye kadar farklı operatörlerden farklı servisler halinde verilmekteydi. Bahsedilen standartlarda bu uygulamaların sağlanması ile tek bir operatörün aynı IP altyapısı üzerinden hizmet alınması mümkün olacaktır.

Bu tezde öncelikle telsiz iletişim kanalının özellikleri ve kısıtları, bu kısıtlara karşı uygulanabilecek yöntemlerin yanısıra alıcı ve vericide çoklu anten kullanımı ile başarımda meydana gelen artış incelenmiştir.

MIMO teknolojisi ve kullanılması planlanan IEEE 802.11n ve 802.16e telsiz sistemleri temel başlıkları ile açıklanıp performanslarının nedenleri araştırılmıştır.

Dörtlü oyun uygulamaları irdelenmiş, bu uygulamaların gereksinimleri ve yüksek servis kalitesi için gerekli parametreler verilmiştir.

Son olarak yakın gelecekte sabit-gezin yakınsaması ile beraber yaygınlaşması öngörülen ve MIMO kullanımı opsiyonel olarak bırakılan IEEE 802.11n ve 802.16e standartlarının dörtlü oyun uygulamaları açısından gösterdiği performans 802.11n için ölçülmüş, henüz donanım bazında yaygınlaşmamış 802.16e için benzetim sonuçları irdelenmiştir.

PERFORMANCE ANALYSIS OF QUADRUPLE-PLAY APPLICATIONS IN MIMO-IP WIRELESS NETWORKS

SUMMARY

In wireless communication channel, there are some serious difficulties, which must be dealt with in high-speed communication. Fading, caused by the arrival of the transmitted signal to the receiver from varied paths due to reflection, scattering and diffraction, is one of these problems. One of the techniques that has been developed to reduce the effects of fading is multiple-input multiple-output (MIMO) architecture which is formed by multiple antennas at the receiver and the transmitter. Modeling and determining the performance of MIMO channels is one of today's popular issues. With recent information theory papers, MIMO systems came into a rapid improvement process. Digital communication systems using MIMO have emerged as a most promising research area with these advances. MIMO communication systems can be explained by considering that multiple antennas are used at the transmitting end as well as at the receiving end. The main idea is that signals sampled at both ends are merged in such a way that they either create effective multiple data streams, and/or add diversity to improve the communication quality.

Even though its final draft has not been ratified, 802.11n which is predicted as the most popular wireless local area standard is taking advantage of MIMO technique to improve throughput and coverage area.

On the other hand, with wireless metropolitan area networks such as UMTS and WiMAX, MIMO is the most likely technology to deal with presumption about transmission capacity bottleneck.

One of the most significant and the newest standards among these is IEEE 802.16e WiMAX standard, the number of studies have been performed to offer MIMO support and mobility. These networks have advantages for expansion of wireless infrastructure and creation of wider full-IP based wireless broadband networks, are increasingly becoming widespread all around the world.

There are four special services that expected by these networks: broadband internet access, digital TV/video, fixed voice communication and mobility. Different operators have served these applications, called as quadruple-play, to the end user until now. With providing these applications under the standards mentioned above, it is feasible to get service with using same IP platform of an operator.

In this thesis, firstly, characteristics and limitations of wireless communication channel, the methods that could be applied against them and also performance improvement with using multiple antennas at both ends are researched.

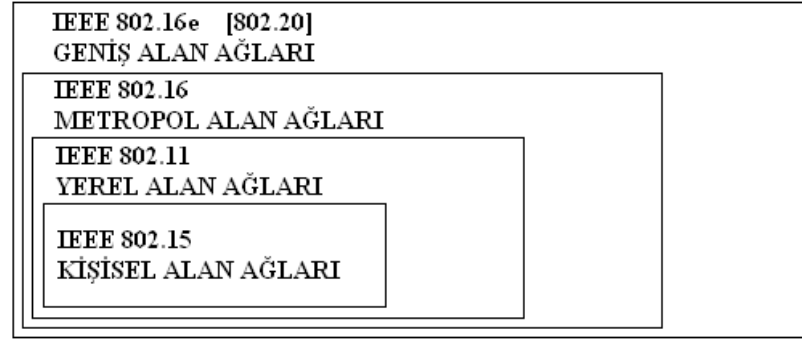
In addition to MIMO technology, IEEE 802.11n and 802.16e wireless systems, which are designed to utilize MIMO, are explained and reasons of their performances are investigated.

Furthermore, quadruple-play applications are studied and also requirements of them and necessary parameters for best service quality are given.

By way of the of fixed-mobile convergence it is expected that 802.11n and 802.16e standards will penetrate the wireless world in the short run. Eventually, from the point of view of quadruple-play, 802.11n's performance, one of these standards, optionally use MIMO, measured in real world. The other one, 802.16e is simulated, and outcomes are checked out.

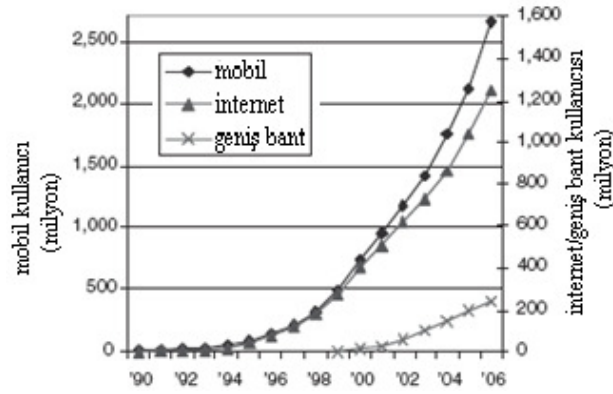
1. GİRİŞ

Telsiz işaret iletim teknolojisi, havada yayılan elektromanyetik dalgalarla bir noktadan başka bir noktaya belirli bir frekans kanalında bilgi iletişiminin sağlandığı bir yöntemdir. Yerel alan ağı standartlarını belirleyen IEEE 802 çalışma grubu tarafından tanımlanan telsiz ağ standartları basitçe arabirimi hava olan telsiz alıcılar arasında yada telsiz bir alıcı ile baz istasyonu veya erişim noktası arasındaki iletişimi belirtir.



Şekil 1.1 : Telsiz alan ağları

Telsiz erişim hizmeti veren operatörler, telsiz kullanımındaki büyüme ve yüksek performanslı bağlantı talebinin artışına ayak uydurmak için şebekelerini ve hizmet kapasitelerini geliştirme konusunda sürekli artan bir baskı altındadır. Yüksek bant genişliğine ihtiyaç duyan zengin medya uygulamalarının tanıtılmasıyla şekilde de görüldüğü üzere daha çok sayıdaki kullanıcı örneğin ses için daha fazla kaynak talep ederken dolayısıyla artan miktarda veri paketi taşınmaktadır. Öbür taraftan daha çok kanal ve kapasite talebi meselesini çözmek için daha fazla site kurulumu çoğunlukla verimsiz ve maliyetli olabilmektedir.



Şekil 1.2 : 1999-2006 arasındaki mobil telefon, internet kullanımı ve geniş bant erişimi abone sayısının dünya çapındaki artışı [1]

Geniş bant telsiz erişim, telsiz iletişime geniş bant imkânı getirerek kullanıcılara benzersiz avantajlar sunmaktadır. Geniş bant telsiz erişim temelde iki çeşit olup ilk tip, geleneksel sabit hat geniş banda benzemekle beraber telsiz iletim ortamını kullanır. Sabit telsiz geniş bant adındaki bu tip DSL veya kablo modeme alternatif bir rakip olarak düşünülebilir. Mobil geniş bant adındaki ikinci tip ise taşınabilirlik ve hareket edebilirlik gibi ek fonksiyonlar sunmaktadır. Örneğin WiMAX teknolojisi sabit ve mobil geniş bant uygulamalarını uzlaştırmak için tasarlanmıştır.

Geniş bant erişim sadece daha hızlı internet ve dosya indirme kolaylığı sağlamakla kalmayıp aynı zamanda gerçek-zamanlı ses ve veri akışı, etkileşimli oyun gibi çeşitli çoğul-ortam uygulamalarını da mümkün kılmaktadır. Ayrıca internet protokolü üzerinden ses (VoIP) teknolojisi ile ses iletimi için de kullanılan geniş bant erişim sistemleri, yüksek tanımlı televizyon (HDTV), isteğe bağlı video (VoD) gibi yüksek kaliteli video servis uygulamalarını mümkün kılarken yakın gelecekte çeşitli yeni uygulamaların ortaya çıkması da olası görünmektedir [1].

Bu tezin amacı, günümüz telsiz haberleşme dünyasında önemli bir konuma gelen MIMO tekniğini ve bu tekniği kullanması düşünülen tam-IP tabanlı 802.11n ve 802.16e standartlarını araştırmaktır. Entegre edilmesi planlanan UMTS vb. gibi diğer teknolojiler tez kapsamı haricinde bırakılmıştır. Sabit-mobil yakınsaması ile son kullanıcı için daha büyük önem arz etmeye başlayan dörtlü oyun uygulamalarına değinilmiş ve bahsedilen standartlar bu uygulamaların gerektirdiği parametreler açısından incelenmiştir.

Tez şu şekilde dñzenlenmiřtir:

Birinci bñlñmde konuya genel bir giriş yapılmış akabinde ikinci bñlñmde telsiz iletişim karakteriştiğinden bahsedilerek zayıflıkları gidecek MIMO sistemlere işaret edilmiştir.

ñçñncñ bñlñmde MIMO tekniği teorik olarak incelenirken dñrdñncñ bñlñmde telsiz yerel alan ağları başlığı altına IEEE 802.11n, beşinci bñlñmde ise telsiz metropol alan ağları kapsamında 802.16e standardı araştırılmıştır.

Altıncı bñlñmde dñrtlñ oyun uygulamalarının gereksinimleri pratikte uygulama òrnekleri işlenmiştir. Gñzñnñnde tutulan nokta bu gereksinimlerin bahsedilen standartlar tarafından karşılanıp karşılanamayacağı olmuştur.

Yedinci bñlñmde bina içi ortamda 802.11n standardının dñrtlñ oyun uygulamaları açısından gñsterdiđi performans òlçñlmñř ve uygunluğu belirlenmeye çalışılmıştır.

Henñz donanım olarak yaygınlaşmamış 802.16e standardı için açık kaynak kodlu bir benzetim yazılımından faydalanılarak dñrtlñ oyun uygulamaları açısından benzetim yapılmıştır. Burada bulunan sonuçlar MIMO çalışan 802.16e-Wave2 standardında gerçek hayatta yapılan bazı çalışmalardaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. TELSİZ AĞLAR

2.1 Telsiz Ağ Tekniklerinin Getirdikleri

Günümüzde kablolu ağ teknolojilerinin kullanıldığı tüm ortamlarda kullanılabilen telsiz ağ teknolojilerinin sahip olduğu üstünlükler şu başlıklar altında toplanabilir:

- **Mobilite:** Kullanıcılar hareket etme özgürlüğüne sahiptirler.
- **Hızlı ve kolay kurulum:** Kablo çekmenin zor olduğu durumlarda iyi bir çözümdür. Her konuma tek tek kablo çekmek yerine bir ya da birkaç tane telsiz erişim noktası ile ağ erişimi düşük maliyetli olarak sağlanabilir.
- **Esneklik:** Telsiz ağlar sayesinde kullanıcılar istediği zaman küçük ağlar kurabilir. Ayrıca telsiz ağlar kolaylıkla genişletilebilir. Geçici internet ve ağ hizmetlerine erişim gerektiği durumlarda telsiz ağ teknolojileri en uygun çözümdür.
- **Maliyet:** Ethernet kablolamada maksimum kablo segment boyu sınırlı olduğu için daha uzak mesafelerde sinyallerin yeniden güçlendirilmesi gerekmektedir. Diğer bir seçenek olarak fiber-optik kablolama tercih edilebilir ancak hem kurulum ve yönetim zorluğu, hem de maliyeti nedeniyle özellikle gigabit mertebelerinde çok yüksek hızlara ihtiyaç yok ise uygun değildir.

Diğer bir yandan ise kablolu sistemlerden aksine telsiz haberleşme sistemlerinin telsiz kanalların doğasından kaynaklanan bazı farklı zorlukları da mevcuttur. Telsiz sinyalin yayılım ortamı, içinde birçok yansıtıcı ve kırıcı ortamı barındıran havadır. Ortamın tam kontrolden yoksun oluşundan dolayı telsiz kanallar zamanla değişen sönümlenen yapıdadırlar. Bundan başka yol kaybı ve gölgeleme nedeniyle, alınan işaret gücü mesafe üzerinde değişmektedir.

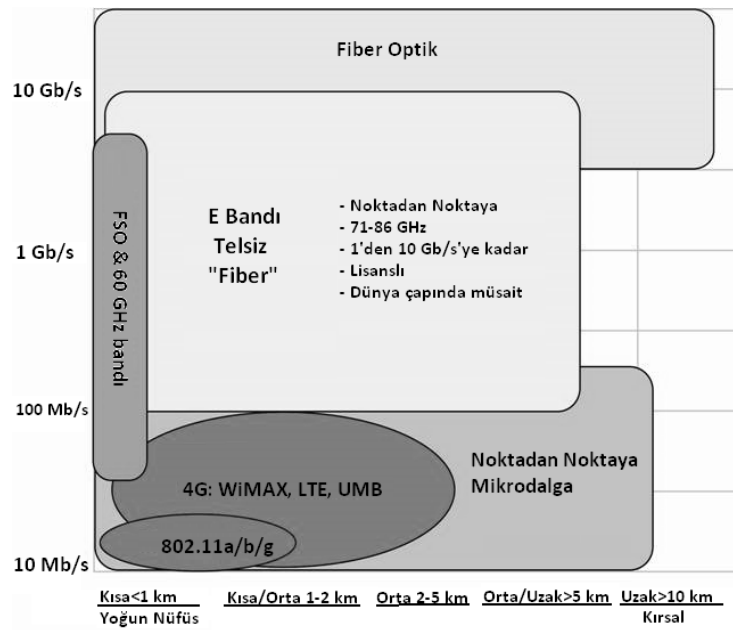
2.2 Telsiz Kanal Karakteristiği

- **Yol kaybı:** Elektromanyetik dalganın havadaki yayılımı boyunca güç yoğunluğundaki azalmadır. Yol kaybı Friis formülüne göre şu şekilde ifade edilir:

$$L(dB) = 92,45 + 20 + \log(F) + 20 \log(d) \quad (2.1)$$

Telsiz sistemlerde kullanılan frekans bandı ve standartların izin verdiği kısıtlı çıkış gücü nedeniyle iletişim mesafesi kısadır. Örneğin 802.11b/g sistemlerinin bina içi erim mesafesi yaklaşık 100m'dir. Fiziksel engeller sonucunda bu mesafe çok daha aza düşebilmektedir.

▪ **Hız:** Klasik telsiz iletişimi kablolu sistemlere oranla daha yavaş bir iletim hızı sağlar. Herhangi bir çeşitleme tekniği içermeyen telsiz sistemler genel olarak telli iletişime oranla daha yavaştır.



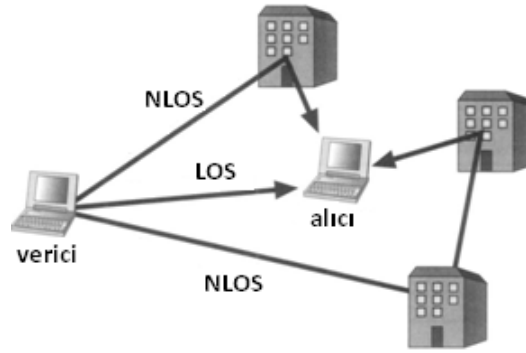
Şekil 2.1 : Mesafe-topoloji-segmentler [2]

▪ **Güvenlik:** İzinsiz kullanım, sızma ve saldırıları önlemek için telsiz sistemlerde çok daha etkili ve güçlü bir güvenlik sistemine ihtiyaç vardır. Çünkü havada serbestçe yayılan radyo dalgasının dinlenmesi, kablolu sistemlere kıyasla, çok daha kolaydır.

▪ **Girişim:** Bütün telsiz sistemler az veya çok girişime açıktır. Frekans bandı özel tahsis edilmiş sistemlerin girişime maruz kalma ihtimali daha düşüktür. Aksine bir örnek olarak 802.11 sistemleri ISM bandını kullandıklarından girişime daha açıktır.

▪ **Çok yollu sönmüleme:** Bir işaretin vericiden alıcıya birçok yoldan ulaşması nedeni ile alıcıda elde edilen işaretin genlik ve fazında değişimlerin meydana gelmesidir.

Telsiz iletişimde genellikle baz istasyonu ile mobil cihaz arasında direk görüş (LOS) olmaması nedeniyle iletilen sinyal birçok farklı yoldan geçerek alıcıda toplanır. Bu sebepten sinyalin farklı genlik, faz ve geliş açılarına sahip kopyaları oluştuğu için gelen sinyallerin alıcıdaki toplamı, alınan sinyalin gücünde sönümlenme olarak adlandırılan dalgalanmalara sebep olur. Özellikle bina içi kullanım alanlarında etkilidir. Alıcıya ulaşan işaretin bu farklı versiyonlarının istenilen düzeyde iletişimin sağlanmasını zorlaştıran olumsuz etkileri vardır [3][4].



Şekil 2.2 : LOS ve NLOS

Geleneksel telsiz sistemlerin karşılaştığı en büyük zorluklardan biri çok yollu sönümlenme ortamlarıdır. NLOS bir ortamda gönderilen bir işaret sayısız engellerden yansıyabilir. Her sıçrama ile işaretin ayrı bir versiyonu zaman farkı ile ayrı bir yoldan gider. Bu birçok yansımış işaret diğerleriyle alıcıdaki işaret seviyesinin düşmesine neden olacak şekilde girişime uğrayabilir

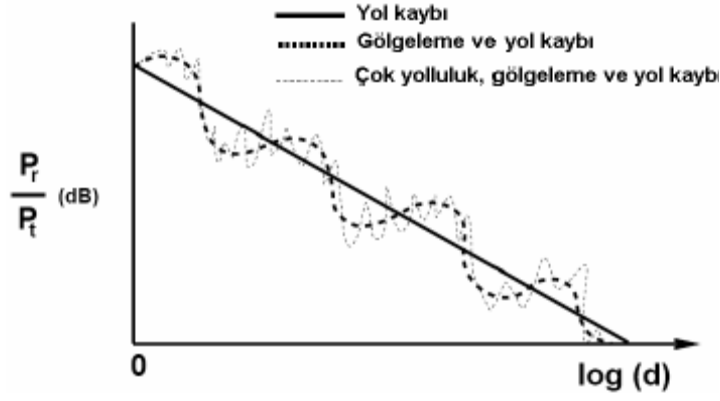
Her ne kadar bir zamanlar çok yollu yayılım koşulları telsiz sistemlere muhalif olarak görülse de, çoklu anten uygulamaları ile birlikte telsiz sistemler daha hızlı ve dayanıklı iletişim kanalı için çoklu-yol kavramından yararlanmaya başlamıştır.

2.3 Sönümlenmeli Kanallar

İşaretin maruz kaldığı bozucu etkiler $r(t)$ alınan, $s(t)$ gönderilen işaret; LP yol kaybı etkisi, $m(t)$ gölgeleme etkisi, $r_0(t)$ işaretin ani değişimi ve $n(t)$ beyaz Gauss gürültüsü olmak üzere şu şekilde gösterilebilir:

$$r(t) = LP \times m(t) \times r_0(t) \times s(t) + n(t) \quad (2.2)$$

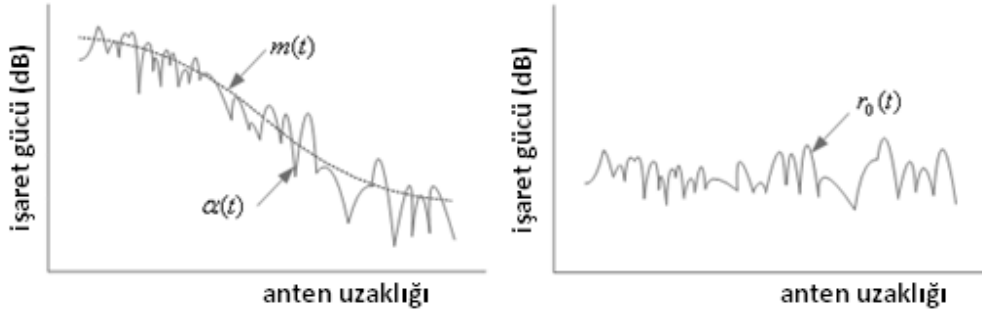
Bu etkilerin işarete nasıl etki ettiği Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.3 : Telsiz haberleşmede kanalın maruz kaldığı bozucu etkiler [3]

2.3.1 Geniş ölçekli sönümleme

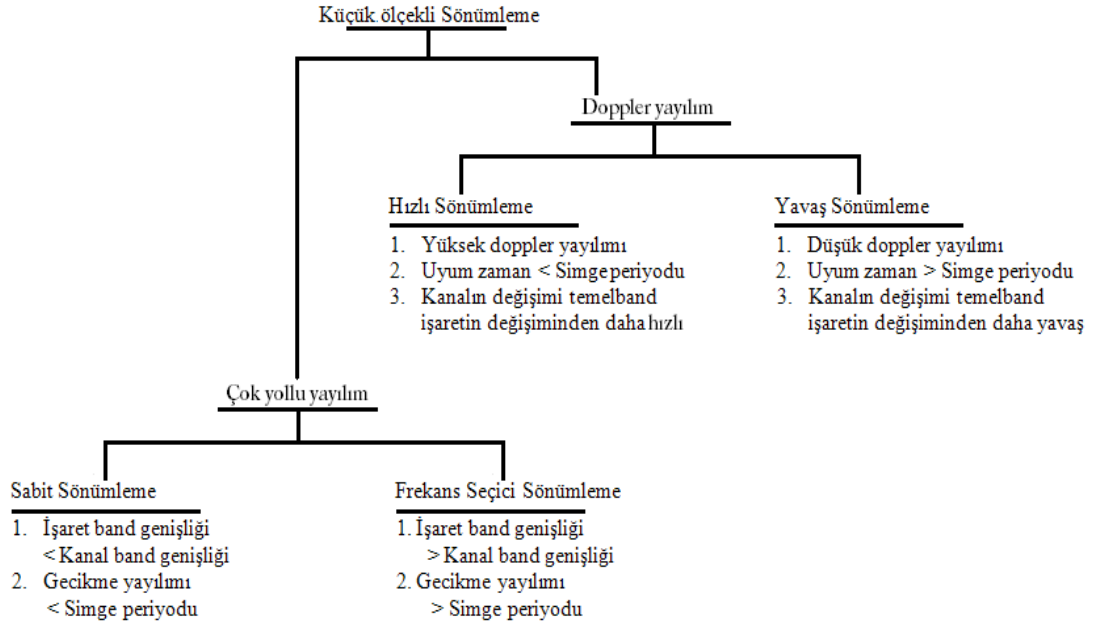
Geniş hareket alanlarındaki yer değiştirmeler sonucu ortalama işaret gücünün zayıflaması ya da yol kaybıdır. Verici ile alıcı arasında bulunan engebeli yeryüzü şekilleri ve çok katlı binalar gibi etkenlerle meydana gelen sönümlemelere gölgeleme adı verilir [5].



Şekil 2.4 : Geniş ve küçük ölçekli sönümleme

2.3.2 Küçük ölçekli sönümleme

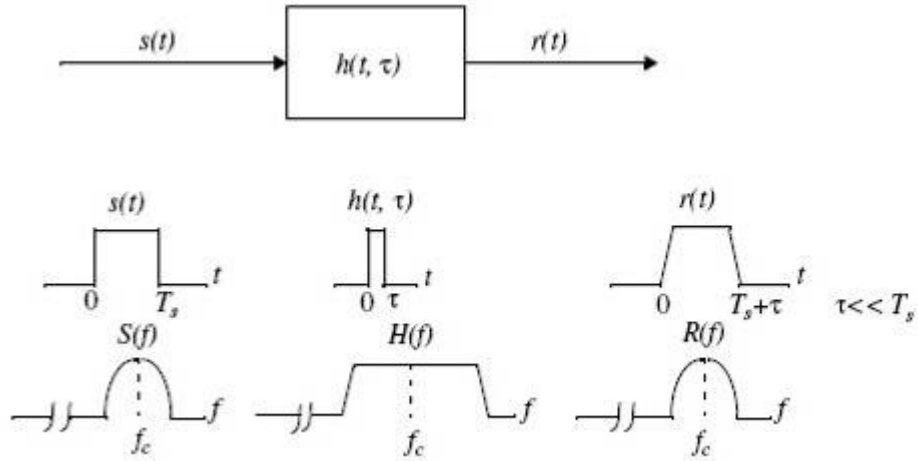
Alıcı-verici arasındaki uzaklığın küçük değişimleri sonucu işaretin genlik ve fazındaki değişimlerdir. İşaretin zaman yayılımı ve kanalın zamanla değişim özelliğinden kaynaklanır [5]. Bandgenişliği, simge periyodu ve kanal parametrelerine bağlı olarak kanaldan iletilen her farklı işaret farklı sönümlemeye uğrar. Çok yollu yayılımı, zaman yayılımı ve frekans seçici sönümlemeye yol açarken Doppler yayılımı, frekans yayılımı ve zaman seçici sönümlemeye yol açar [6].



Şekil 2.5 : Küçük ölçekli sönümleme

2.3.3 Düz sönümleme

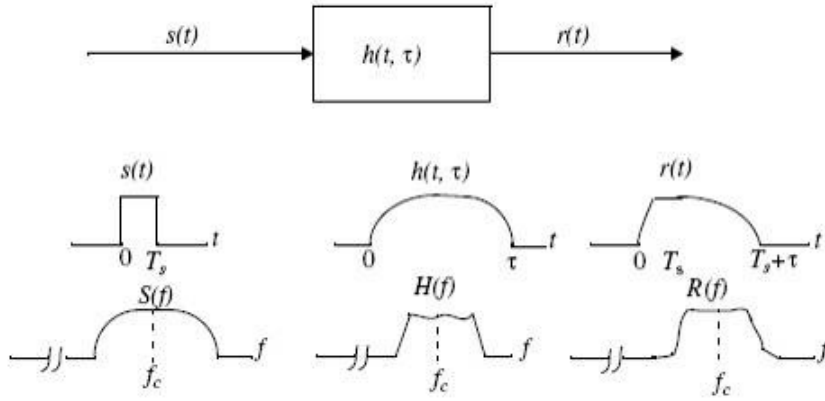
Düz sönümlemeli kanallar genlik değiştiren kanallar olarak bilinir. Telsiz haberleşme kanalı eğer iletilen işaretin bandgenişliğinden geniş, bandgenişliği boyunca sabit kazanç ve doğrusal faz yanıtına sahipse alıcıdaki işaret düz sönümlemeye uğrar. Düz sönümlemede kanalın çok yollu yapısı iletilen işaretin spektral karakteristiğinin alıcıda aynen korunacağı anlamına gelir. Fakat çok sayıda yolun etkisiyle kanalın kazancında değişimler olduğundan alıcıdaki işaretin gücü zamanla değişir [3].



Şekil 2.6 : Düz sönümlenen kanal karakteristiği

2.3.4 Frekans seçici sönümleme

İletilen işaretin band genişliğinin kanalın band genişliğinden büyük olduğu frekans seçici sönümleme, çok yollu gecikmelerin iletilen simgenin periyodunu geçmesi sonucu meydana gelir. Bu durumda kanalın darbe yanıtı iletilen işaretin simge periyodundan daha büyük çok yollu yayılıma sahiptir. Alıcıdaki işaret gönderilen işaretin daha zayıf ve zamanda gecikmiş birçok bileşeninden oluştuğu için işaret alıcıda bozulmaya uğrar. İletilen simgelerin kanal içinde zaman yayılımına uğramalarından dolayı bu kanallar simgeler arası girişime neden olur [3].



Şekil 2.7 : Frekans seçici sönümlenen kanalın karakteristiği

Genişbant uygulamalarda kanal, frekans seçici sönümlemeye maruz kalır. Bu durumda kanal modeli frekansın fonksiyonu $H(f)$ olarak yazılabilir. Burada her bir frekans alt-bandında yeni bir MIMO matrisi belirlenir. Bu çeşit bir model MIMO ile OFDM modülasyonunun kullanıldığı durumda verimlidir. MIMO kapasitesi gerçekte frekans seçiciliğinden yararlanmaktadır çünkü seçiciliği sağlayan ekstra yollar ayrıca daha büyük toplam açısal dağınım getirerek frekanslar arasında MIMO kanalın ortalama rankının gelişmesine neden olur [7].

2.4 Çeşitleme

Aynı işaretin çok sayıda bağımsız kopyasının üretilmesinden kaynaklanan etkidir. Radyo hattını çok-yollu sönümleme ve girişim gibi etkilerden korumak için kullanılmaktadır. Çoklu yolun alıcıda aynı işaretin birçok kopyasını üretmesine dayanır fakat bunlar farklı yer veya zamanlarda farklı genliklerdedirler.

Münferit kopyalar koşullar değıştikçe zayıflayabilir ama bütün kopyaların aynı anda sönümlenmesi daha az olasıdır. Böylece toplam işaret çoklu yol bileşenlerinin hepsi olsa da olmasa da sağlam şekilde kalabilir. Diğer bir deyişle, sönümlemeli çok yollu kanallarda hata olasılığını azaltmak için çeşitleme yöntemleri kullanılabilir. Alıcıda çeşitlilik sağlanarak ve bant genişliğinden taviz vermeden sistem üzerinde kodlama kazancı artırılabilir. Pratikte kolaydır ve telsiz sistemin kapasitesini artırır.

2.4.1 Frekans çeşitlemesi

Aynı işaretin birbirinden bağımsız çok sayıda sönümlemeli versiyonunu elde edebilmek için işareti birbirinden farklı frekanslarda ve frekanslar arası minimum bandgenişliğinin uyum bandgenişliğinden (B_c), fazla olduğu taşıyıcılar ile iletilmesidir [8]. Ayrı alıcı-verici çiftlerinin kullanımıyla farklı frekanslarda sinyaller sağlanır. Aynı bilgiyi taşıyan işaretler farklı yollardan gönderilerek alıcıda bağımsız birçok zayıf kopya elde edilir [4]. Alıcıdaki kopyaların işlenmesi ile iletilen işaret başarıyla yeniden elde edilebilir ve sağlıklı algılama gerçekleştirilebilir. Bu tekniğin dezavantajları ek bandgenişliği gereksiniminin yanı sıra daha fazla iletim gücü gerektirmesi ve kullanılan kanal sayısı kadar alıcı gerektirmesidir [9].

2.4.2 Zaman çeşitlemesi

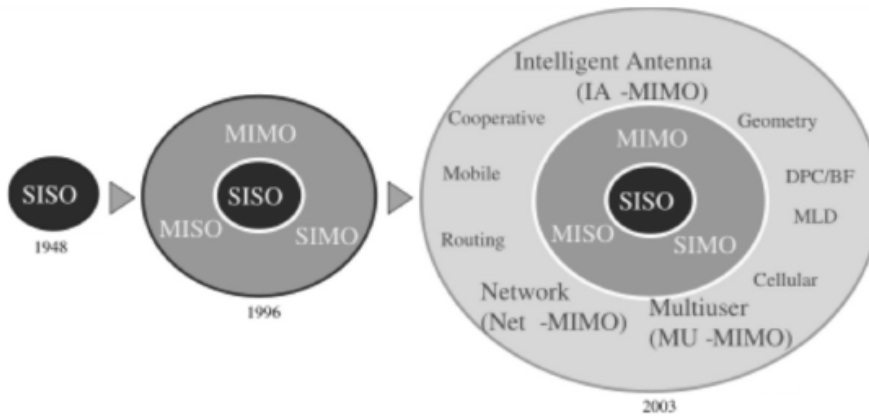
Birbirinden bağımsız sönümlemeye uğramış işaretler elde edebilmek için aynı işaret bilgisi birbirinden farklı zaman dilimlerinde gönderilir. Bu zaman dilimleri arasındaki ayırım kanalın uyum zamanından (T_c) büyük olmalıdır [8]. Uyum zamanı, Doppler kaymasına yani taşıyıcı frekansına ve gezgin birimin hızına bağlıdır. Zaman çeşitlemesi, FEC ve serpiştirme (*interleaving*) işleminde kullanılır [5]. Bu tekniğin gezgin birimin çok yavaş ilerlemesi halinde istenmeyen gecikmelerin olması, düşük hızlı olması ve yüksek iletim gücü gerektirmesi gibi bazı dezavantajları vardır [9].

2.4.3 Uzay (anten) çeşitlemesi

Uzay çeşitlemesinde dikey olarak ayrılmış alıcı antenlerle birden fazla ayrı sinyal yolu sağlanır. Ek frekans spektrumu gerektirmeyen bu teknik hücrel radyo şebekelerinde yaygınca kullanılır. Bağımsız işaret yolları elde edebilmek için antenlerin birbirinden yeteri kadar uzak olmaları gerekir. Baz istasyonları için antenler arası uzaklık en az dalga boyunun on katıdır (10λ).

2.5 MIMO Sistemler

Konu hakkındaki ilk fikirler A.R. Kaye, D.A. George ve W. van Etten'in çalışmalarına dayanmaktadır. Bell Lab's çalışanlarından J.Winters ve J.Salz, hüzme şekillendirme (BF) üzerine çeşitli makaleler hazırladılar. 1993 yılında Paulraj ve Kailath, MIMO kullanan uzaysal çoğullama (SM) kavramını ileri sürdüler. 1996'da G. Raleigh ve G. J. Foschini MIMO teknolojisine yeni yaklaşımlar getirdiler. Bir vericide, eş yerleşimli çoklu verici antenlerin kullanıldığı bu yapılandırmayla link çıkışı etkili bir şekilde artmaktaydı. MIMO sistemler konusundaki araştırmaları aslen tetikleyen unsur ise Bell Lab's araştırmacıları E. Telatar [10] ve J.Foschini [11]'nin Shannon kapasitesi üzerinde ki çalışmaları olmuştur. 1998'de Bell Labs'ta, MIMO iletişim sistemlerinin performansını geliştiren temel teknik olan SM'nin ilk laboratuvar prototipi gösterildi.



Şekil 2.8 : MIMO haberleşmenin gelişimi [12]

Geliştirilen MIMO tekniklerinden en önemlileri şu şekildedir;

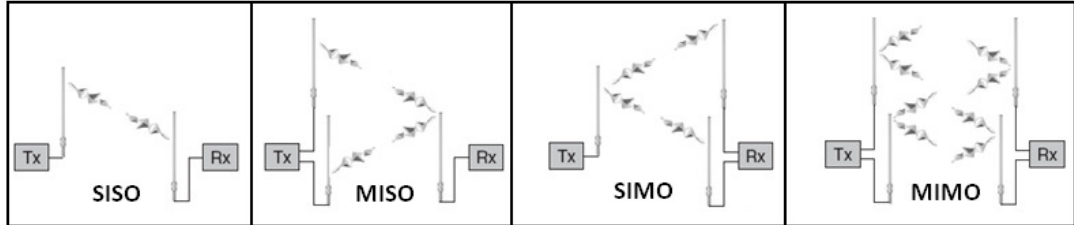
- *Bell Laboratories Layered Space-Time (BLAST)*, G.J. Foschini (1996)
- *Per Antenna Rate Control (PARC)*, Varanasi, Guess (1998), Chung, Lozano (2001)
- *Selective Per Antenna Rate Control (SPARC)*, Ericsson (2004) [12].

2.5.1 Alıcı-vericide çoklu anten durumları

MIMO, alıcı ve vericide birden fazla anten kullanımıyla girişim bastırması gelişmiş, daha büyük erim alanı sağlayan ve yüksek sönüm direnci gösteren, veri kapasitesi ve başarımı artırılmış bir iletişim linkini öngörür [13].

Radyo dalgasında, alıcı-verici arasında kat edilen birçok farklı yolda karşılaşılacak çok yollu sönmüleme nedeniyle sinyal gücünde zayıflama oluşur. MIMO, daha yüksek kapasite sağlamak amacıyla birçok veri akışını, çoklu vericilerden alıcılara göndererek radyo yayılımının bu karakteristiğini avantaja çevirir [14]. Dizi ve çeşitlilik kazancı, girişimin azaltılması gibi performans iyileştirilmeleri ekstra bir iletim gücü ya da bant genişliği gerektirmeden sağlanmaktadır [15]. Bunu daha yüksek spektral verim, link güvenilirliği ve çeşitleme ile başarır [12]. Gigabit mertebesindeki telsiz sistemlerin gerçekleştirilmesinde MIMO teknolojisine önemi üzerine bir çalışmada, spektral verimliliğinin klasik haberleşme sistemlerinden daha iyi olduğu gözlenmiş, hem kapasite hem de çeşitlilik kazancı sağladığı sonucuna ulaşılmıştır [15].

MIMO sistemlerin temelini oluşturan uzay çeşitlemesi Şekil 2.20’de de gösterildiği gibi, vericide, alıcıda ve hem vericide-hem alıcıda çeşitleme olarak üç çeşide ayrılmaktadır [16]. Herhangi bir çeşitlemenin olmadığı, sistemde sadece bir alıcı ve verici antenin bulunduğu sistemler tek-girişli tek-çıkışlı sistemler (SISO) olarak adlandırılır. Eğer sadece alıcıda çoklu anten kullanılmış ve çeşitleme yapılmışsa SIMO, yalnız vericide çeşitleme yapıldığı durumda da MISO, hem alıcıda hem de vericide çeşitlemenin yapıldığı sistemlere de MIMO adı verilir.



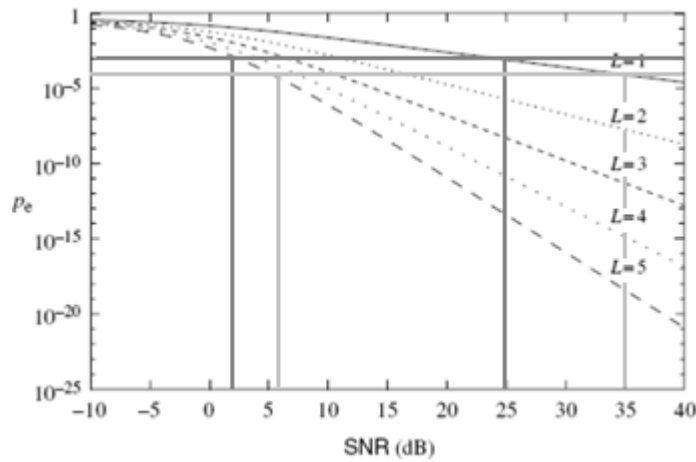
Şekil 2.9 : Alıcı-vericide farklı anten durumları

Eğer yollar eşit şekilde güçlü ve mükemmel olarak ayrılmış iseler, iletişim kanalının toplam kapasitesi kullanılan bağımsız yolların sayısı ile doğrusal olarak artar. M verici ve N alıcının bulunduğu bir sistemde ($M \times N$), bağımsız yolların sayısı M ve N’nin az olanıdır.

Pratikte bütün yollar eşit şekilde güçlü ve kusursuz olarak ayrılmamıştır. Performans, alıcı-verici arasındaki her yolu karakterize eden katsayılar tarafından belirlenir. Bu tekil değerler, her antenden iletilen farklı işaretler esnasında gönderilen, her veri paketinin başlangıcında bulunun kısa bir *training period* işareti ile belirlenir. Bu işaretler iletim kanalı hakkında bilgi (*Channel State Information-CSI*) sağlar ve bu bilgi ile alıcı, veri paketinin geri kalanını çözmek için kullanılan tekil değerleri hesaplayabilir [14].

2.5.2 Anten sayısı-hata olasılığı ilişkisi

Şekilde farklı çeşitleme yolları (L) için SNR'a bağlı hata olasılığı değişiminin grafiği verilmiştir. Görüldüğü üzere L değeri arttıkça hata olasılığı belirgin bir şekilde düşmektedir [17]. Eğrilerin eğimleri artan L değerine bağlı olarak giderek artmaktadır ve bu daha az hatalı yani daha güvenli iletişim vaat etmektedir. Örneğin 10^{-3} , 10^{-4} gibi hücrel sistemlerce güvenilir bulunan hata oranlarına bakıldığında 1 ve 5 yol için SNR değerinde 30 dB iyileşme görülmektedir. Dolayısıyla daha düşük SNR'da daha güvenilir iletişim sağlanabilir.



Şekil 2.10 : Farklı sayıdaki çeşitleme yollarının MIMO sistemin ortalama hata olasılığına etkisi [17]

3. MIMO Tekniği

Bilgi kuramındaki kanal kapasitesi analizi, verilen kanal için iki nokta arasındaki iletişim linkinde gerçeklenebilecek maksimum bilgi transfer hızının belirlenmesinde çok yararlıdır. Ayrıca kanal modeli veya iletim hızını bizzat etkileyecek anten düzeni hakkında bilgi verir. Burada MIMO sistemlerin kapasitesi SISO, SIMO ve MISO sistemlerle karşılaştırarak incelenecektir.

3.1 Telsiz Kanalların Kapasitesi

AWGN ile bozulmuş tek bir kanal verildiğinde ρ , SNR seviyesini göstermek üzere başarılabilecek hız kapasitesi şu şekilde yazılabilir [18]:

$$C = \log_2(1 + \rho) \text{ bit/s/Hz} \quad (3.1)$$

Bu denklemden, her ekstra hertz başına saniye başına bit için SNR değerindeki 3dB artışa gereksinim olduğu görölmektedir. Aslında kanal kapasitesini gerçekleme işi kodlama tarafından yapılır. Sözelimi eğer kanal daha dar bandgenişliğine fakat yüksek SNR'a sahipse daha kompleks bir işaret göndermek mümkündür. Yani her işarete daha fazla bit transfer ederek yüksek SNR'dan faydalanılmış olur [13].

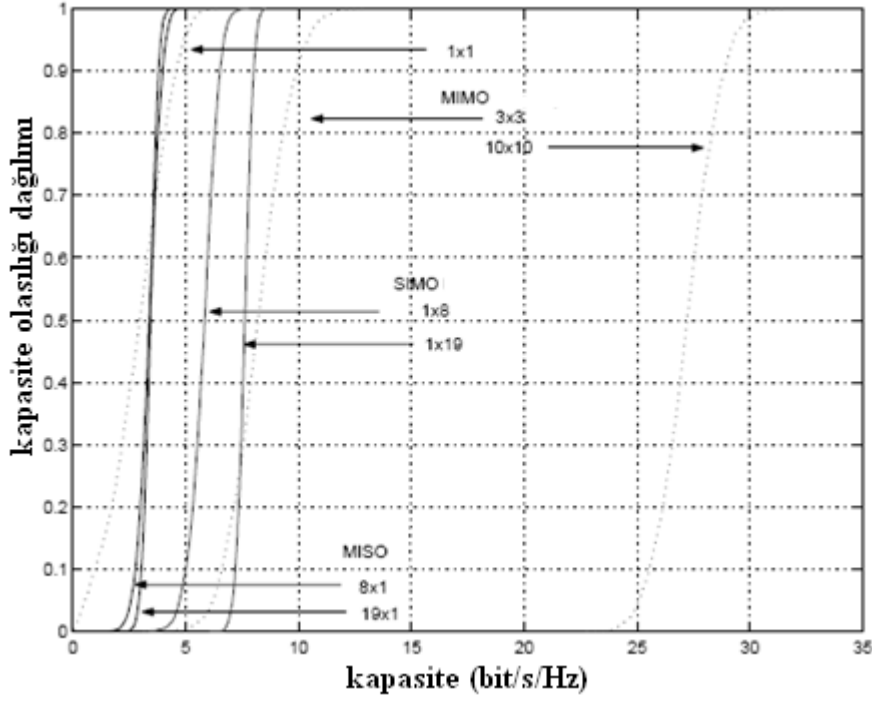
Pratikte telsiz kanallar zamanla değişir ve zayıflamaya maruz kalır. Bu durumda h anlık gözlem için kanalın kompleks Gauss genliği birim gücünü göstermek üzere belleksiz 1x1 SISO sistem kapasitesi şu şekilde verilmiştir [19]:

$$C = \log_2(1 + \rho |h|^2) \text{ bit/s/Hz} \quad (3.2)$$

M antenlik bir gruptan oluşan alıcı sistem verildiğinde, kanal $h = [h_0, h_i, \dots, h_{M-i}]$ olmak üzere M ayrı katsayıdan oluşur. h_i büyüklüğu vericiden i numaralı alıcı antene olan kanalın genliğini göstermek üzere kapasite ifadesi

$$C = \log_2(1 + \rho h h^*) \text{ bit/s/Hz} \quad (3.3)$$

şeklinde genelleştirilebilir [19].



Şekil 3.1 : Alıcı-verici anten sayısına bağlı 10dB SNR için kapasite değişimi [19]

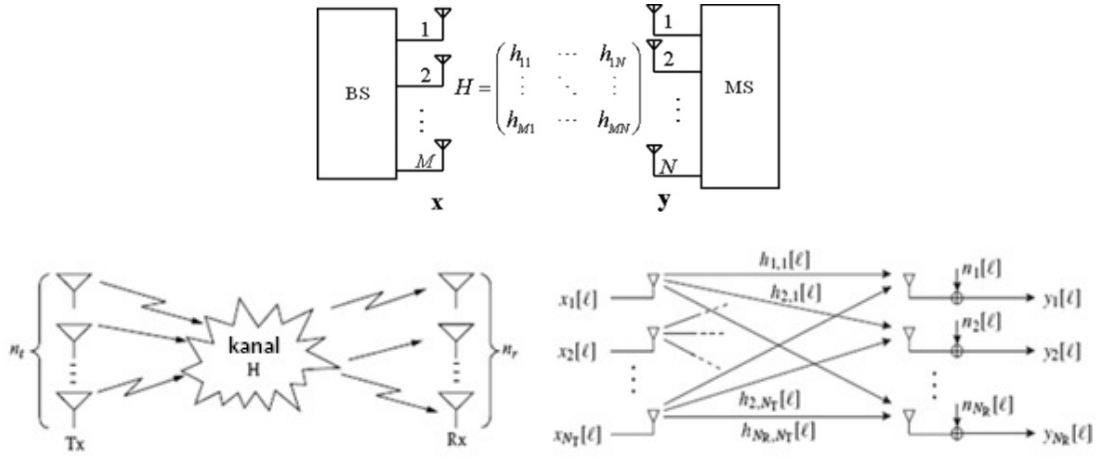
Şekil 3.1’de 8 ve 19 anten durumlarında kapasite dağılımı görülmektedir. Uzaysal çeşitleme ile eğrinin dibi ve ortalama beraber iyileşmiştir. Bu sönümlemenin azalması ve SNR değerinin birleştirilmiş antenler ile artması sayesinde olur. Fakat 8’den 19 antene geçmek görüldüğü gibi önemli bir gelişme sağlamaz. SNR’daki gelişme dolayısıyla ortalama kapasitedeki artış sınırlıdır çünkü SNR yukarıdaki denklemde görüldüğü üzere logaritma fonksiyonu içinde artmaktadır. Özetle bu etki anten sayısı ile belli bir noktada doyuma ulaşır.

3.2 MIMO Link Modeli ve Kapasitesi

MIMO sistemlerde iletilen diziler vericideki çoklu antenler ile alıcıdaki çoklu antenler arasındaki çoklu yollardan oluşan bir matris kanalından geçer. y ve x sırasıyla alıcı ve verici vektörleri, H ve n sırasıyla kanal matrisi ve gürültü vektörü olmak üzere MIMO sistem modeli

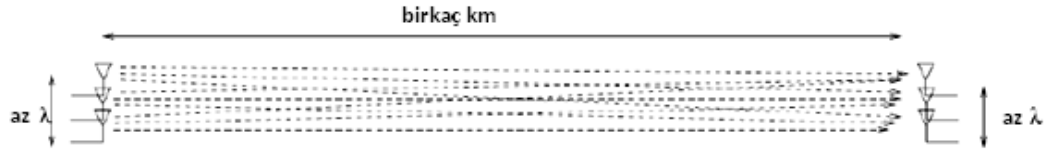
$$y = Hx + n \quad (3.4)$$

şeklindedir [12].



Şekil 3.2 : MIMO kanal modeli

Yüksek kapasite, MIMO kanal matrisinin rankının yanı sıra büyük ölçüde antenler arasındaki ilintisizlik özelliklerine bağlıdır. Eğer kanal rankı bir ise SM tamamen etkisiz hale gelir (Şekil 3.3). Çünkü SM'nin çalışması için çok yollu ortam, yani kanal matrisinin rankının birden farklı olması gerekir. MIMO kanalın rankı bahsedilen doğrusal sistemden çıkan bağımsız denklemlerin sayısı olarak tanımlanır. Rank her zaman verici ve alıcı anten sayısının her ikisinden daha azdır. MIMO sistem üzerinden güvenle iletilebilecek bağımsız işaretlerin sayısı en fazla ranka eşit olabilir.



Şekil 3.3 : Rankı bire yaklaşık bir sistem

$$H \approx \alpha \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Bant genişliği B, olan bir sistemin Shannon kapasitesi

$$C = B \times \log_2(1 + \rho) \text{ bit/s} \quad (3.6)$$

şeklinde verilir. SISO durumunda, alıcı-verici arasında sadece bir kanal var olduğu için bu doğrudan sistemin toplam kapasitesini verir. Fakat M verici N alıcı antene sahip bir MIMO sistem için durum farklıdır.

N adet alıcı anten beraber kullanıldığında SNR değeri N kat artar çünkü çoklu antenlerden gelen işaretler birleştğinde gürültünün aksine sinyal gücünde net artışa neden olur. Her birinden farklı işaret iletilen M verici anten kullanımında ise iki etki vardır: SNR değeri M kez azalır çünkü iletilen her ayrı işaret alıcı antenlerde diğerleriyle girişime uğrar öbür taraftan net bant genişliği M kez artar çünkü M farklı sayısal işaret iletilir. Sonuçta kanal kapasitesi artar. Kanal kapasitesinin asıl formülü kanal matrisini kapsayan kompleks bir fonksiyondur ve $N \geq M$ için yaklaşık olarak şu şekildedir:

$$C = M \times B \times \log_2 \left(1 + (N/M) \cdot \rho \right) \text{ bit/s} \quad (3.7)$$

En sıkça incelenen ve kullanılan durum alıcı-verici anten sayılarının eşit olduğu $M=N$ durumudur. Bu durumda kanal kapasitesi formülü basitçe şöyle yazılabilir:

$$C \approx M \times B \times \log_2 (1 + \rho) \text{ bit/s} \quad (3.8)$$

M antenli bu MIMO sistemin kanal kapasitesi görüldüğü gibi, aynı bant genişliği ve SNR'da çalışan bir SISO sistemin kapasitesinin M katıdır [19]. 4 alıcı ve 4 verici antene sahip 4x4 MIMO sistemi SISO sistemin veri hızının dört katı kadar hız sağlayabilir. Öbür taraftan 3 alıcı 2 verici antene sahip bir 2x3 MIMO sistem eşdeğer bir SISO sistemin iki katı veri hızı sağlarken ekstra alıcı anten, gürültü ve girişime karşı fazladan dayanıklılık sağlar. Denklemden verilen MIMO sistemin teorik kapasitesini pratikte gerçeklerken STC gibi kompleks kodlama metotları, akıllı antenler ve doğru kanal kestirimi ile sayısal modülasyon/demodülasyon işlemi gibi unsurların niteliğini de dikkate almak gereklidir [13]. Şekil 3.1'de 3x3 ve 10x10 MIMO durumlarının sonuçları da çizilmiştir. Grafik aynı zamanda kapasitenin kümülatif dağılımını göstermektedir.

$M \times N$ boyutunda rastgele bağımsız elemanlardan oluşan H matrisi ile ifade edilen [10], [11]'de gösterilen kapasite kanal bilgisi (CSI) bulunmadan aşağıdaki denklemden türetilir:

$$C = \log_2 \left[\det \left(I_M + (\rho/N) H H^* \right) \right] \text{ bit/s/Hz} \quad (3.9)$$

OFDM ile beraber kullanılan bir MIMO sistemde alınan işaret aynı zamanda sembol kestirimi yapılmadan önce belirlenmesi ve ortadan kaldırılması gereken çeşitli bozulmalarının etkilerini de içerir. Böyle bir istemde alınan işaret frekans domeninde şöyle modellenebilir:

$$Y_m(k) = X_m(k - m\gamma - m\omega).H_m(k).F(k).e^{jk\rho}.e^{jk\omega}.e^{j\psi m}.\mu_m(k) + N_m(k) \quad (3.10)$$

Burada m OFDM sembol indeksi, k alt taşıyıcı indeksidir. Diğer parametreler:

ρ : alıcı-verici arasındaki zaman denkleştirme. Alt taşıyıcılar üzerinde doğrusal olarak artan faz kaymasına neden olur ama bir sembolü başkasına dönüştürmez.

γ : her iki taraftaki osilatörler için frekans kayması. Semboller üzerinde değişen faz kaymasına neden olur. Bu sebeple aynı semboldeki bütün alt taşıyıcılar frekans kayması nedeniyle aynı faz kaymasına maruz kalırlar.

ω : alıcı ve vericinin örnekleme saatleri arasındaki tutarsızlık. Bu faz kayması hem alt taşıyıcılarda hem de sembollerde artar.

ψ : vericideki osilatörün kararsızlığından kaynaklanan rastgele faz gürültüsü. Aynı semboldeki bütün alt-taşıyıcılar için aynıdır ama bu kaymanın miktarı faz hatasının rastgeleliği yüzünden semboller arasında değişiklik gösterir.

$F(k)$: alıcı ve vericideki analog filtrelerin frekans cevabı.

$H_m(k)$: kanalın frekans seçiciliği ve zaman bağımlılığı. Frekans seçiciliği yüzünden telsiz kanal, alt taşıyıcıları farklı şekillerde etkileyebilir. Özellikle kanal mobil ise zamanda da değişebilir. Zamanla değişen bir kanal sembolden sembole aynı alt taşıyıcılarda değişikliğe yol açar [20].

3.3 Antenler ve Alıcı Karmaşıklığı

Yüksek spektral verimlilikteki MIMO sistemin gerçekleştirilmesinde anten sayısı ve aralarındaki mesafe önemli parametrelerdir. Antenler arasında büyük mesafe olmasının sebebi baz istasyonlarının genellikle sönmülemeyi ilintisizleştirecek yerel saçıcıların varlığını garanti etmeyen yüksek konumlara kurulmuş olmalarıdır. Çift kutuplu antenler kullanılarak 2 GHz'de çalışan 4 anten 10λ mesafe ile 1,5 cm'lik doğrusal bir alana sığar.

Terminalde makul sayıda ilintisiz sönmülemeyi garantilemek için $0,5\lambda$ mesafe yeterlidir zira terminal yerel saçıcılar arasındadır ve genelde direkt yol yoktur. Çift kutuplu 4 anten laptop kasalarının içine kolayca gömülebilirken el cihazları için iki elemanın sığması bile problem olabilir.

MIMO kanal kestirimi daha fazla karmaşıklığa neden olur çünkü kanal matrisinin tek bir katsayı yerine her yol gecikmesi (ya da OFDM'in her tonu) için izlenmesini gerektirir. Pratik sistemlerin genelde anten sayısını az miktarla sınırlandırması yüzünden bu karmaşıklık bir engel olarak görülmemektedir. Ekstra karmaşıklık fazladan RF donanımı ve karmaşık alıcı ayırma algoritmalarından gelir. Bir MIMO alıcısı MIMO olmayan modu desteklemek için çift modlu olmalıdır. MIMO alıcılar geleneksel alıcılara oranla daha maliyetlidir [21].

3.4 Arka Plandaki Teknolojiler

Çoklu işaretler kanala verilmeden önce iletimde ya da alımda birleştirilir. Amaç zarar verici çoklu sönümlenme ve girişim gibi yayılım koşullarının varlığında daha güvenilir iletişim linki sağlamaktır. Örneğin BF ile enerji arzu edilen yöne odaklanarak ortalama SNR artırılır. Aslında, her anten elemanının istenen iletilen işarete vereceği cevap tahmin edilirse, elemanları, her elemanın cevabının fonksiyonu ile ağırlıklandırarak işareti en uygun şekilde birleştirmek mümkün hale gelebilir. Sonrasında istenen ortalama işaret seviyesi maksimize edilebilirken gürültü, girişim gibi diğer bileşenler minimize edilebilir [21].

3.4.1 Ön-kodlama

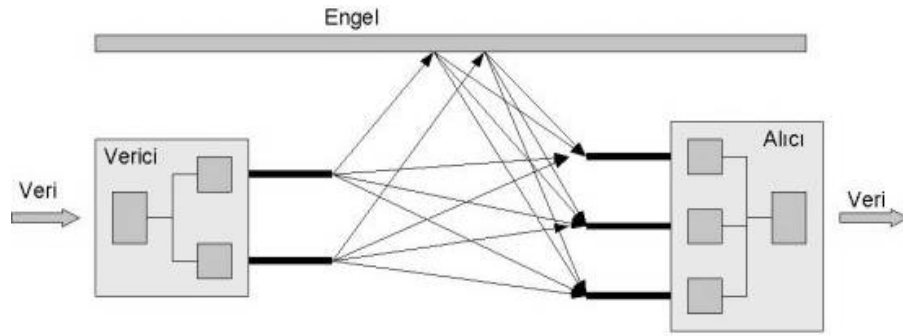
Verici ve alıcı MIMO link kapasitesini başarmak için sırasıyla ön ve son-kodlama teknikleri (*pre, post-coding*) kullanılır. Ön-kodlama, kod çözme aşamasında alınan işaretin kalitesini artıran hüzme şekillendirme ve uzaysal kodlamayı içerir. Uzaysal kodlama SM ile veri çıkışını artırabilir ve uzaysal çeşitleme kullanarak Alamouti kodlama gibi tekniklerle kapsama alanını artırabilir. BF'nin faydaları yapıcı birleştirme ile işaret kazancını artırmak ve çok yollu sönümlenme etkisini azaltmaktır. Alıcıda birden fazla anten olduğunda iletim BF, işaret seviyesini bütün alıcı antenlerde eşzamanlı olarak maksimize edemez ve ön-kodlama kullanılır. Ön-kodlama vericide kanal durumu hakkında bilgi (*CSI*) gerektirir [12].

3.4.2 Çoklu yol kavramı ve uzaysal çoğullama

Tipik bina içi telsiz ağ kurulumlarında radyo işareti vericiden alıcıya en kısa yoldan nadiren direkt olarak alınır. Böyle olmasının nedeni alıcı-verici arasında LOS ortamının nadiren sağlanmasıdır.

İşaret bir alıcıya farklı yollardan gittiğinde işaretin alıcıya ulaşma zamanı kat ettiği yolun uzunluğuna bağlıdır. En kısa yolu kat eden işaret ilk ulaşır. Akabinde kopyalar veya yankıları az bir gecikmeyle ulaşır. Bu gecikme tek bir antendeki işarete önemli bir zayıflamaya yol açacak kadar önemlidir çünkü bütün kopyalar ilk ulaşan işarete girişime neden olur. Anten dizileri kullanımıyla, işareti tümüyle kaybetme olasılığı ilintisiz antenlerin sayısı ile üssel olarak azalır.

Bir MIMO sistemde aynı anda birçok radyo işareti gönderilir ve çoklu yoldan faydalanılır. Her akış kendi vericisini kullanarak kendi anteninden gönderilir. Her işaret bütün antenler arasında mesafe olduğundan alıcıya doğru farklı bir yol izler. Öbür taraftan her verici diğerlerinden farklı veri akışları gönderebilir. Alıcının her biri kendi radyosuna sahip çoklu antenleri vardır. Alıcıların her biri gelen işareti bağımsız olarak çözebilir sonra her radyonun aldığı işaret diğer alıcı radyolardan gelenlerle birleştirilir. Karmaşık matematiksel işlemlerden sonra alınan sonuç daha iyi bir alınan işarettir.

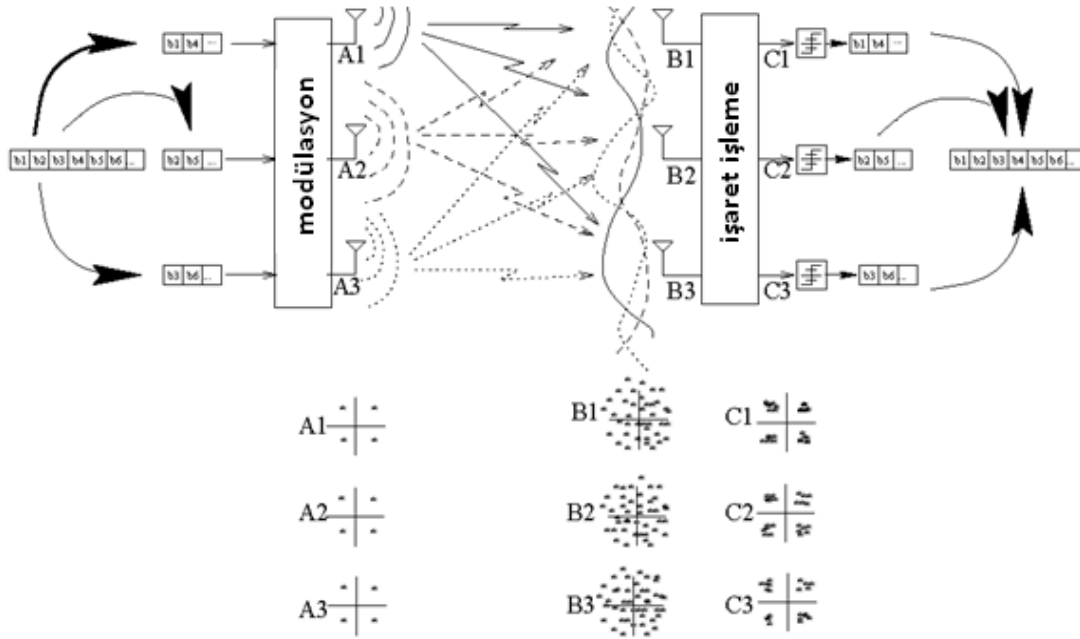


Şekil 3.4 : Çoklu yol ve uzaysal çoğullam

Sistemdeki her ilave verici ya da alıcı SNR'ı artırır. Fakat her ilave verici veya alıcıdan gelen kazanç artışı hızla azalır. SNR'daki kazanç 2×1 'de 2×2 ve 3×2 'ye kadar her adımda büyük ama 3×3 ve ötesinde nisbeten daha düşüktür [22].

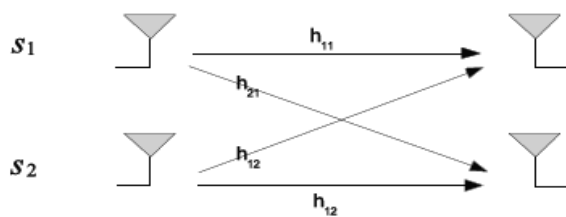
Gerçekte MIMO linkler akıllı antenlerden çok daha fazlasını sunar [23]. Temel avantaj, matris kanalının çeşitli uzaysal modlarında, aynı zaman-frekans slotunda, ilave güç gerektirmeksizin iletim olasılığı altında yatmaktadır. Bunu tam olarak göstermek için belki de en iyi görüş ilk olarak [11,27]'de bahsedilen, MIMO üzerine basit bir örnek olan bir iletişim algoritmasında verilmiştir.

Şekil 3.5'te soldaki yüksek hızlı bit akımı bağımsız üç bit dizisine ayrılmış, akabinde çoklu antenlerden eş zamanlı olarak iletilmiştir. İletimine başlanan bu işaretler aynı frekans spektrumunda iken doğal olarak telsiz kanalda birbirine karışır. Alıcıda kanal matrisinin belirlenmesinden sonra özgün bit dizileri ayrılır ve kestirilir. Ayırıştırma her antenin yeterli derecede ilişkisiz kanallarda olmasıyla sağlanabilir. Bu durum genellikle çoklu yolların bol olduğu durumudur. Son olarak bitler birleştirilir. Örnekte rankın üçe eşit olduğu varsayılmış ve sistem spektrum verim kazancı üç olarak görülmektedir [19].



Şekil 3.5 : Spektral verimi 3 kat artıran 3x3 uzaysal çoğullama [21]

Uzaysal çoğullama MIMO anten yapılandırması gerektirir. SM'de yüksek hızlı işaret çok sayıda daha düşük hızlı akıma bölünür ve her akım aynı frekans kanalında farklı bir verici antenden gönderilir. Bu işaretlerin yeterli farklı uzaysal imzalarla alıcı anten dizisine ulaşması halinde paralel kanallar oluşmuş olur. SM, verici kanal bilgi olsun veya olmasın kullanılabilir [12].



Şekil 3.6 : Uzaysal çoğullamanın matematiksel ifadesi

Şekil 3.6’da verilen 2x2 sistemde antenler tarafından alınan işaretler matematiksel olarak ifade edilecek olursa;

$$\begin{aligned} r_1 &= h_{11}s_1 + h_{12}s_2 + n_1 \\ r_2 &= h_{21}s_1 + h_{22}s_2 + n_2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

şeklindedir. Eşitlikler matris formunda şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

İletilen işaretlerin çözülmesi kanalın yeterli derecede ilintisiz olmasını gerektirir. Çeşitli kod çözücü seçenekleri mevcuttur ve en iyi performans ML kod çözücüsü ile başılır. ML kestiricisi iletilen sembollerin bütün olası değerleri üzerinde ayrıntılı bir arama yapar ve öklit uzaklığını en az yapacak şekilde (s_1, s_2) için karar verir:

$$D(s_1, s_2) = \left\{ |r_1 - h_{11}s_1 - h_{12}s_2|^2 + |r_2 - h_{21}s_1 - h_{22}s_2|^2 \right\} \quad (3.13)$$

ML kestiricinin karmaşıklığı denklem takımının boyutu ile üssel olarak büyür [24].

Zaman ve frekans çeşitlemesine nisbeten uzay çeşitlemesinin faydalarından biri ilave bant genişliği ve güç gerektirmemesidir. SM’nin yararları şu şekilde özetlenebilir.

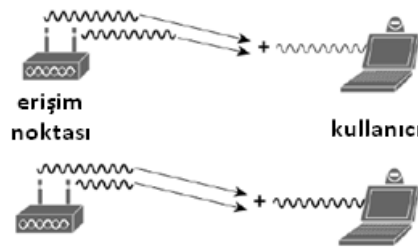
- Dizi Kazancı
- Çeşitleme kazancı ve azalmış hata oranı
- Veri hızı artışı
- Kapsama artışı ve verici gücünde azalma [1]

Bundan başka, uygun BF yöntemiyle, alıcı ve/veya vericideki anten dizileri istenilen sinyalin alıcıda tutarlı olarak toplanmasına izin verebilir. Böylece çoklu antenler SNR artışını sağlayabilir [25].

Öbür taraftan uzay-zaman kodları [4, 26], güvenilir kodlama şemaları için uzayı ve zaman bölmelerini birleştirir ve çeşitlemenin yanı sıra kodlama kazancıda sağlar.

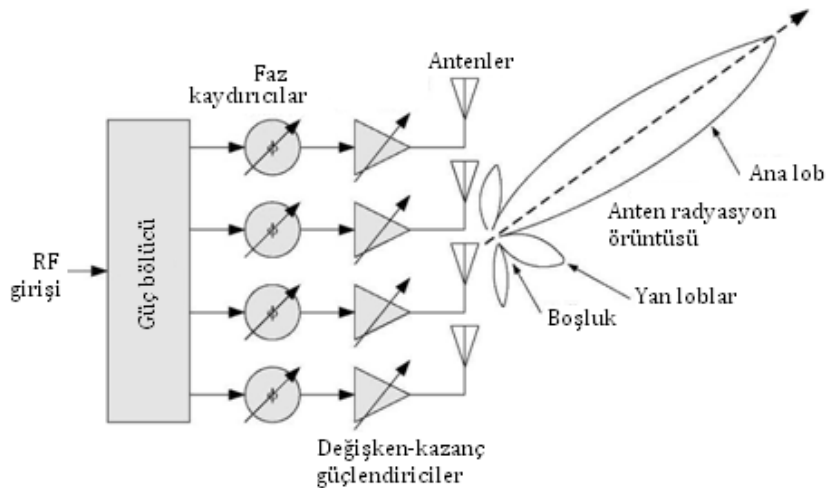
3.4.3 Hüzme şekillendirme

Hüzme şekillendirme (BF), çoklu antenler vasıtasıyla önce bölünen sonrasında faz ve genliği modifiye edilen tek bir işaretin radyasyon formu yönsel antene benzeyecek şekilde ve ışınların spesifik yön veya yayılım modlarında biçimlenmesi işlemidir. Bu sebepten bu yönlerde anten kazancı artar. MIMO teknolojisinin alıcıdaki SNR değerini geliştirmek için faydalandığı bir teknik olan BF'nin kullanılmasıyla farklı antenlerden iki radyo işareti gönderildiğinde bu işaretler alıcının anteninde birbiri ile toplanır (Şekil 3.7). Özetle efektif olarak vericileri tek bir alıcı üzerine odaklar.



Şekil 3.7 : Yıkıcı girişim, iletimde BF kullanımı (yapıcı girişim)

N verici anten ile her biri farklı yönlerde hedeflenmiş ışınlar oluşturmak mümkündür. İstenen yöndeki RF enerji yoğunlaşması, alıcıda hedeflenen işaret seviyesini artırır ve istenmeyen yönlerdeki enerjiyi düşürerek girişimi azaltır. Şekil 3.8'de aynı zamanda fazlı-sıra antenleri olarak bilinen ve uzun süredir radar sistemlerde kullanılan BF süreci şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.8 : Hüzme şekillendirme

Kapalı ortamlarda BF'nin uygun şekilde kullanılması makul ölçüde kanal bilgisi gerektirir [13]. BF, alıcıda alınan işaret hakkında bilgi olmadan vericide kolayca yapılamaz. Alıcıdaki işareti maksimize etmek amacıyla vericinin gönderdiği her işareti ayarlaması için alıcıdan vericiye geri beslemenin gönderilmesi gerekir. Bu geri besleme örneğin 802.11a/b/g cihazlarda olmayıp sadece 802.11n cihazlarda vardır.

BF, özellikle verici antenlerin sayısının alıcı sayısından fazla olduğu durumda MIMO tekniği ile avantajlı bir şekilde birleştirilebilir. Bu durumda uzaysal akımların sayısı vericiden ziyade alıcı anten sayısı ile sınırlı olduğundan sistemin veri kapasitesini artırmak için eldeki verici antenlerden tam olarak yarar sağlanamaz. Ekstra verici antenler ışın oluşturmada kullanılabilir ve dolayısıyla alıcıya daha fazla enerji odaklayabilir. Bu, aynı trafik kapasitesi ve hata oranı için kapsama alanının artmasına veya aynı kapsama alanında hata oranının düşürülmesine neden olacak şekilde alıcıdaki SNR değerinde artışa sebep olur.

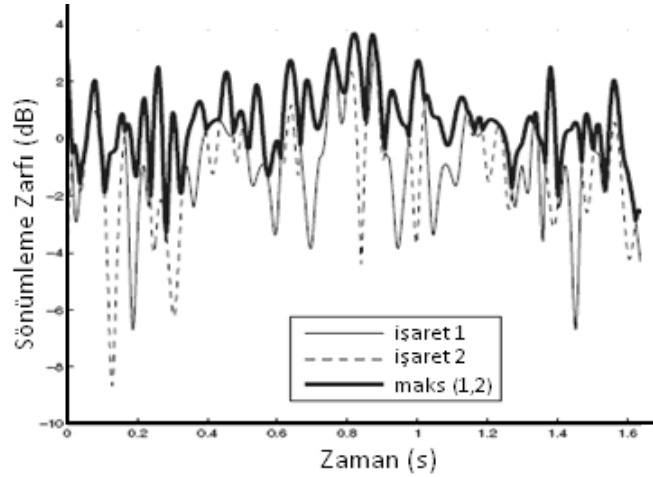
İki teknik karşılaştırıldığında aslında BF sistemleri çok sayıda yakın yerleştirilmiş anten kullanımını konu alırken, MIMO tipik olarak daha az anten ile çalışmaktadır (özellikle istemci tarafında). Diğer taraftan çoğu MIMO algoritması sadece alıcıda ortalama SNR'ı artırma veya girişimi düşürme yerine çeşitleme ya da veri hızı maksimizasyonuna odaklanır. Son olarak BF sistemleri LOS ortamlarda başarılıdır çünkü hüzmeler yüz yerine bir veya iki çoklu yoldan gitmek üzere daha kolay optimize edilebilir. Aksine MIMO sistemler zengin çok yollu ortamı avantaj olarak alırken çoğullamadaki avantajını LOS durumlarda kaybederler [22].

3.4.4 Çeşitleme kodlaması

Çeşitleme kodlama teknikleri vericide kanal bilgisi olmadığında kullanılır. Uzaysal çoğullamadaki gönderilen birçok akımın aksine çeşitleme yöntemlerinde tek bir akış uzay-zaman kodlaması tekniği ile kodlanarak gönderilir. İşaret her antenden dik şekilde kodlanarak gönderilir. SM, vericide kanal bilindiğinde ayrıca ön-kodlama veya çeşitleme kodlaması ile birleştirilebilir [12].

Alıcı veya vericide çeşitleme tekniği genellikle MIMO işlemi ile karıştırılsa da aslında farklıdır. Bir MIMO sistem, SNR değerinin kullanılabilir veri hızı kazançları için çok düşük olduğu bir kapsama alanında ek kazanç için çeşitleme içerebilir.

MIMO daha öncede belirtildiği gibi çoklu yolu kullanarak sistemin net kapasitesini artıran bir çoklu yoldan faydalanma tekniğidir. Buna karşın çeşitleme farklı çoklu yol işaretlerinin birbirlerine girişimde bulunması nedeniyle sönümlere etkileriyle mücadele eder. Birbirinden sabit uzaklıkta konumlanmış birkaç anten için sönümlenmenin bazı antenlerde sinyali düşürmesine rağmen diğerlerinde yükseltmesi gerçeğini temel alır. Burada bazı antenler yeterli gücü sağlayamasa dahi bütün antenlerin beraberce başarısız olması olasılığı çok düşüktür.

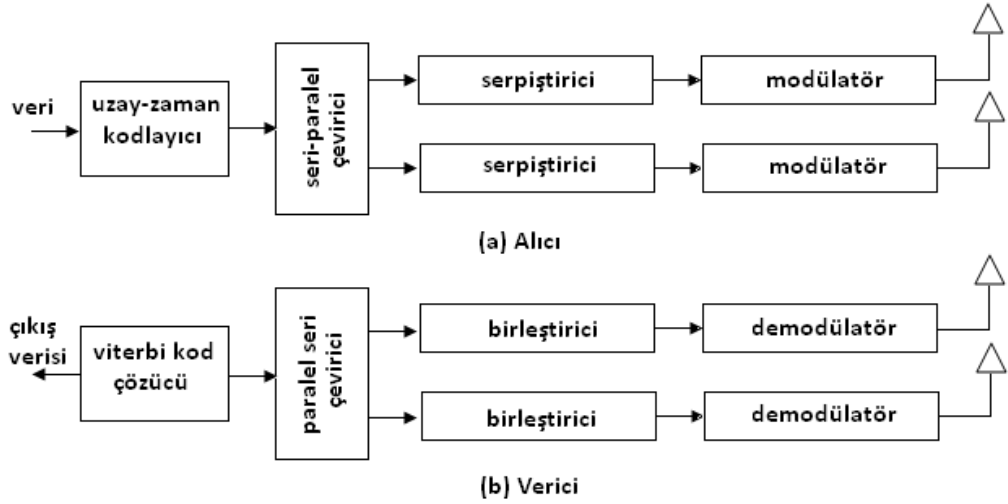


Şekil 3.9 : Basit ikili çeşitlemenin derin sönümlere etkisi

Aynı işaretin birçok kopyasından en güçlü işaretin seçimi çeşitleme birleştirilmesi olarak adlandırılır ve alıcı uçta uygulanmaya daha uygundur. Burada en fazla güce sahip işaret seçilir ve basitçe diğerleri göz ardı edilir. Birleştirme işlemi, MRC gibi işaretin her kopyasını ağırlıklandırıp sonrasında kopyaları tüm işaretin SNR değerini maksimize edecek şekilde toplayan birleştirme fonksiyonları tarafından yapılır.

3.4.5 Uzay-zaman kodları

Çoklu verici antenlerin birlikte kodlanmasını ayarlayıp optimize etmeye imkân sağlayan yöntemlere uzay-zaman kodları (STC) adı verilir. STC kavramının esas gelişimi orijinal olarak alıcıda kod çözmek için çok boyutlu (vektör) Viterbi algoritmasına gerek duyan kafes kodları biçiminde açıklanmıştır [26]. Her ne kadar STC düzenleri asıl olarak MISO sistemler için evrimsel kodlar formunda bilinir hale geldiyse de, bu gibi tekniklerin popüleritesi STBC'nin keşfiyle artmıştır. Çünkü uzay-zaman kafes kodlarında (STTC) gereken Viterbi vektörünün aksine STBC, alıcıda basit doğrusal işleme ile çözülebilir [19].



Şekil 3.10 : 2x2 STC kullanan bir sistemin blok şeması

Günümüz literatüründe uzay-zaman kodlarında kafes bazlı yaklaşıma göre üstün olan yöntem blok yaklaşımı olarak gözükmektedir [21]. STBC konusu ilk olarak 1998’de Alamouti tarafından başlatılmıştır [4]. Bu çalışmada vericide öncü bir kanal bilgisi olmayıp verici tarafta iki, alıcıda yalnız bir anten konumlandırılmıştır. Alamouti yönteminin çok basit yapısı kendisini günümüzde birçok telsiz ağ standardında düşünülen çok cazip bir düzen yapmaktadır.

Alamouti iletim tekniği: Gönderilecek semboller çiftler halinde gruplanır. Çeşitleme düzeni olup hızda artışla sonuçlanmaz. Bir çift sembolü göndermek için s_1 ve s_2 gibi iki sembol süresi alınır. Önce ilk antenden s_1 gönderilirken eş zamanlı olarak ikinciden de s_2 gönderilir. Bir sonraki zaman aralığında ikinciden s_1^* gönderilirken birinci antenden $-s_2^*$ gönderilir. Matris gösteriminde şu şekilde yazılabilir:

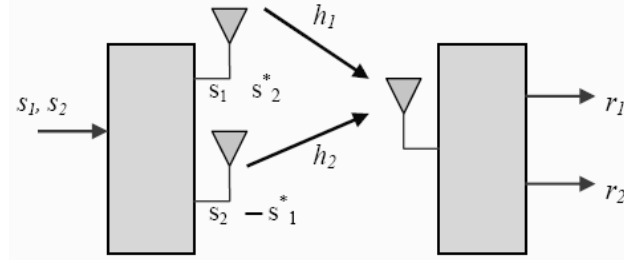
$$C = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

C matrisinin sütunları sembol periyod indekslerini, satırları antenleri belirtir. s_1 , s_2 sembol bloklarının zaman ve uzay üstünden kodlandığı tasarımlara STBC adı verilir.

İki antenden bir alıcıya iki kanal $h = [h_1, h_2]$ vektörü şeklinde gösterilebilir. Alıcı gözlemleri, n gürültü vektörünü gösterirken, $y = hC + n$ veya eşdeğer olarak $s = [s_1, s_2]^T$ olmak üzere $y^* = Hs + n$ şeklinde yazılabilecek bir y vektörü içinde iki zaman çerçevesinde toplar. Burada

$$H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. C ve H matrisinin ortogonal olduğu için semboller gözlenen y vektöründen basit bir şekilde ayrılabilir/çözülebilir.



Şekil 3.11 : STC blok diyagramı

n_1 ve n_2 ilave gürültü terimlerini göstermek üzere sembol periyodlarında alınan işaret örnekleri şu şekilde yazılabilir:

$$r_1 = h_1 s_1 + h_2 s_2 + n_1$$

$$r_2 = h_1 s_2^* - h_2 s_1^* + n_2 \quad (3.16)$$

Alıcı s_1 ve s_2 sembollerini tahmin etmek için aşağıdaki işaretleri hesaplar:

$$\begin{aligned} x_1 &= h_1^* r_1 - h_2 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) s_1 + h_1^* n_1 - h_2^* n_2 \\ x_2 &= h_2^* r_1 + h_1 r_2^* = (|h_1|^2 + |h_2|^2) s_2 + h_2^* n_1 - h_1^* n_2 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Bu ifadeler açıkça göstermektedir ki x_1 ve x_2 , sırasıyla s_1 ve s_2 sembollerini kestirmek için bir eşik değeri algılayıcısına gönderilebilir [24].

İletim çeşitleme kodları esasen her ne kadar çoklu verici ve tek alıcı anten ile tasarlanmış olsa da, aynı fikirler kolayca tam bir MIMO düzeni için genişletilebilir. Örneğin alıcı ve vericide ikişer anten bulunduğu sistem üzerinde uygulanan Alamouti kodu kullanıcıya basit bir kod çözme algoritması olan dördüncü dereceden çeşitleme avantajı sağlayacaktır [19].

3.4.6 İşaret Birleştirme

Alıcıdaki işareten gönderilen işaretin kestirilmesinin birkaç yöntemi vardır. Bu yöntemlerden bazıları şöyledir:

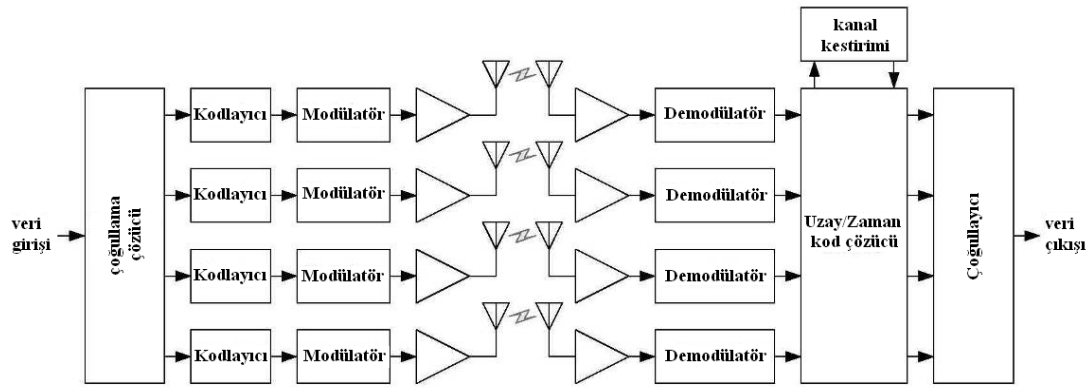
- **Karesel birleştirme:** Birbirinden bağımsız kanallardan dik işaretler gönderilmesi durumunda alıcıda eşzamanlı olmayan demodülasyon uygulanır. Böylece her demodüle işaretin karesi alınıp tüm bileşenler toplanır ve seziciye gönderilir.
- **Seçmeli birleştirme:** Alıcıya ulaşan her işaretin gücüne bakılır ve gücü fazla olan işaret kullanılmak üzere seçilir. Bu tekniğin daha basit uygulaması, demodülasyon ve kestirme için kullanılacak işaretin, gücünün önceden belirlenmiş bir eşik değerinden büyükse seçilmesi şeklindedir.
- **Eşit Kazançlı birleştirme:** Farklı kanallardan gelen işaretlerin demodülasyonundan sonra oluşan faz kaymalarını kestirip düzelterek eşzamanlı demodülasyon ve karar verme yöntemidir. Demodülatör çıkışında fazları düzeltilmiş işaretler toplanır ve karar vericiye gönderilir.
- **Maksimum oran birleştirme:** Ayrı kanallardan gelen işaretlerin seviyeleri kestirilir ve demodülatör çıkışında fazları düzeltilmiş işaretler sahip oldukları güçlerle orantılı olarak genlikleri ağırlıklandırılıp seziciye gönderilir [26].

3.5 MIMO Uygulamaları

IEEE VTC 2007 sonbahar konferansında [28] yayınlanan telsiz haberleşme makalelerinin yaklaşık yüzde otuzu MIMO veya uzaysal işleme hakkındadır. Buradan da anlaşılacağı üzere MIMO teknikleri araştırma ve çeşitli iletişim sahalarında uygulama konusu olarak oldukça popülerdir.

3.5.1 BLAST

İlk MIMO prototipi, G.Foschini öncülüğünde Bell Labs' tarafından 1996'da yapılan BLAST mimarisiydi. Bu yapı çoklu akışların MIMO tarafından sayısal veri iletiminde kullanılmasının ilk pratik yolunu göstermekteydi. Akabinde önemli MIMO uygulamaları bu mimariyi takip etti veya V-BLAST, D-BLAST, SD-BLAST vb. gibi varyasyonları ortaya çıktı. Aşağıdaki şekilde BLAST'ın 4x4 MIMO sistem için basitleştirilmiş bir şeması görülmektedir.



Şekil 3.12 : BLAST mimarisi

Bir $N \times N$ MIMO sistem için BLAST mimarisinde Şekil 3.12’de görüldüğü üzere, verici tarafından gönderilecek sayısal bilgi bitleri öncelikle N akıma bölünür. Sonra uygun uzaysal kodlama bloğuyla kodlanır. Kodlanmış bloklar sonrasında modüle edilerek iletim için N antene gönderilir. Alıcı tarafında N alıcı anten ilintisiz işaretleri toplar. Bu işaretler orijinal N adet kodlanmış akımı ayırma ve çıkarmada kullanılır. N akım orijinal bitlere çevrilmek üzere kod çözücünden geçirilir. Bunlar son olarak tek bir sayısal bilgi akımına çoğullanır [13].

3.5.2 GDSL

MIMO doğası gereği telsiz haberleşmeyle sınırlı değildir. Aynı zamanda kablolu haberleşme içinde kullanılabilir. Örneğin, yeni bir DSL teknolojisi olan Gigabit DSL, Binder MIMO tekniğini baz alarak önerilmiştir [12].

3.5.3 802.11n

MIMO teknolojisinden faydalanan 802.11n standardı, şu anda taslak halinde ve piyasada taslağa ait 802.11n standardında ürünler bulunmaktadır. Üzerinde "*Draft-n*" logoları bulunan bu ürünler 2006 sonlarına doğru satılmaya başlanmıştır. Şu an için IEEE, 802.11n standardında 2. taslağa geçmiş durumdadır. Draft2.0 taslağında özellikle uyumluluk ve performans konusunda iyileştirmeler vardır.

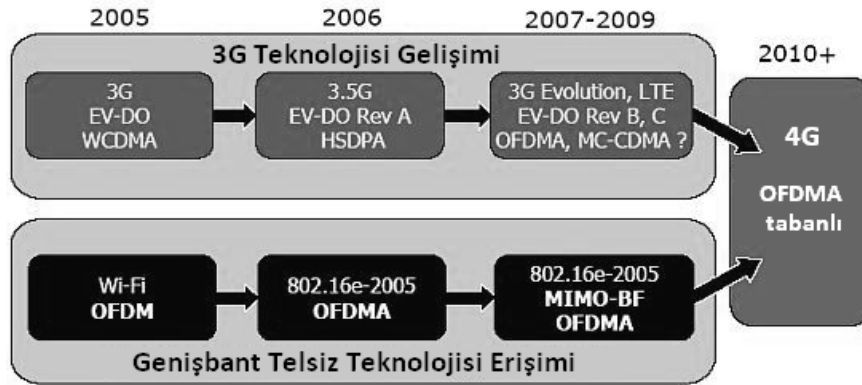
3.5.4 802.16e

Kurulum maliyetinin yüksekliği nedeniyle ulaşılamayan kırsal bölgelerde ve haberleşme konusunda yeterli hizmeti alamayan alanlarda, genişbant erişim için WiMAX’in alternatif olması düşünülmektedir. Yüksek erişim hızı sağlayarak birçok servisin daha kaliteli verilmesini sağlar.

Bir WiMAX uygulaması olarak düşünölen WiBro, IEEE 802.16e TDD OFDMA standartları kullanmakta olup Güney Kore tarafından 3.5G ve 4G şebekelerine alternatif olarak geliştirilmektedir. Baz istasyonundan 1,5 km uzaklığa kadar erişime izin verir. WiBro baz istasyonları 30-50 Mb/s veri hızı ve 1-5 km yarıçapında kapsama alanı sunarak çok yüksek veri aktarım hızına sahip ve performansını kullanıcı hareket ederken koruyabilen bir sistemdir. 120 km/s'e kadar hızla hareket eden cihazlara da mobilite imkanı sağlamaktadır.

3.5.5 4.Nesil hücresel sistemler

4. nesil ağların yüksek hız, yüksek kapasite, bit başına düşük maliyet, IP tabanlı servisler gibi özellikleri içermesi tasarlanmaktadır. 4G ağların amacı, mevcut merkezi hücresel ağları, dünya çapında IP tabanlı tek bir hücresel ağ standardında birleştirmektir. Karşılaşılan en önemli problemlerden biri, farklı teknoloji çok sayıda gezgin ve telsiz ağın arasında erişimin nasıl sağlanacağıdır. 4G ağlarında dörtlü oyun vb. uygulamaların yüksek kalite ile sağlanması düşünülmektedir.



Şekil 3.13 : Mobil teknolojilerin yakınsaması

4. TELSİZ YEREL ALAN AĞLARI

Telsiz yerel alan ağları, geleneksel ağ teknolojilerinin bütün özelliklerini sağlamakla birlikte bu hizmeti kablolarla gerek duymadan verir. Günümüzde 802.11 standartları bina içi ve bina dışı haberleşmede kullanılmaktadır.

4.1 IEEE 802.11

802.11 telsiz iletişim standartlarının ilki olan 1997 yılında piyasaya sürülen *legacy* sürümünde 1 ve 2 Mb/s olmak üzere iki adet veri hızı mevcuttu. Bu sürüm de veri üç şekilde aktarılıyordu. Bunlar sırası ile IR, FHSS ve DSSS idi. Bu üç yöntemde 2.4 GHz ISM bandını kullanmaktaydı. Ortam erişim yöntemi olarak CSMA/CA adında kötü koşullar altında da güvenilir veri aktarımı sağlayan tekniği kullanıyordu.

4.1.1 IEEE 802.11a

802.11 standardında yapılan ilk değişikliktir. Piyasaya 1999 senesinde sürülmüştür. Erişim mesafesinde ve veri hızı aktarımında 54 Mb/s'ye varan ciddi değişiklik getirmektedir. 5 GHz frekansını kullanmasının olumsuz yönü "b" ve "g" sürümlerine nazaran sinyalin erişim mesafesinin daha kısa olmasıdır. Olumlu yanı ise bu frekansta yayın yapan çok fazla cihaz bulunmadığından olumsuz etkilere daha kapalı olması ve bu bantta kullanılabilecek örtüşmeyen kanal sayısının daha fazla olmasıdır. OFDM kullanır. Frekans kanalının müsait olduğu ülkelerde daha popülerdir.

4.1.2 IEEE 802.11b

Üç tanesi örtüşmeyen 11 kanalı bulunan IEEE 802.11b telsiz ağlarda iletim için en fazla veri aktarım oranı 11Mb/s olup DSSS teknolojisini kullanılmaktadır. Dezavantajı bluetooth, mikrodalga fırınlar ve kablosuz telefonlarında çalıştığı girişime müsait 2.4 GHz bandını kullanmasıdır.

4.1.3 IEEE 802.11g

2003 senesinde IEEE, 54 Mb/s aktarım hızı sunan 802.11g standardı duyuruldu. ISM bandını ve OFDM modülasyon tekniğini kullanarak 802.11a ve b'nin avantajlarını birleştirir. 11b ile geriye dönük uyumludur. Ama iletim hızı ve kapsama alanı genişliği bakımından bu standartların artık hiçbiri daha yüksek veri hızı ve mobilite talep eden günümüz ihtiyaçlarına tam anlamıyla cevap verememektedir.

4.1.4 Wi-Fi Alliance

802.11 cihazlar için birlikte çalışabilirlik sertifikasyonu sağlayan Wi-Fi Alliance, 802.11n cihazlar için sertifikasyona Haziran 2007'den itibaren başladı. Sertifikasyonda IEEE 802.11n standardının *Draft2.0* taslağı kullanılmaktadır. Final standardı ve *Draft2.0* arasındaki farkı herhangi bir *Draft2.0* cihazın sadece yazılım değişikliği ile final standardına yükseltilmesini temin etmek için de çalışmaktadır.



Şekil 4.1 : Wi-Fi Alliance logoları

4.1.5 Diğer standartlar ve 802.11n

IEEE 802.11n, önceki 11b ve 11g standartlarına göre ağ performansını maksimum ham fiziksel katman veri hızını 600Mb/s'ye kadar çıkararak önemli ölçüde geliştirecek bir iyileştirmedir. Temel sertifikasyon 20 ve 40 MHz genişliğindeki kanalları ve 20 MHz'de 144Mb/s, 40 MHz'de 300Mb/s maksimum çıkışı için iki 2x2 MIMO sistemi kapsar. Wi-Fi Alliance, sertifikasyon için hali hazırda temelde kapsanmayan daha fazla sayıda uzaysal akım (3 veya 4), BF ve uzay-zaman blok kodlama gibi ilave özellikler hakkında ki meseleleri de araştırmaktadır [30].

802.11n standardı hakkındaki çalışmalar 2004'e kadar gitmektedir. Taslağın bitirilmesi ve Aralık 2010'da ilan edilmesi umulmaktadır. Önceki şartnamelere dayalı “*pre-N*”, “*Draft n*” veya “*MIMO-based*” ibareli ürünler sunulmaktadır.

Çizelge 4.1 : Telsiz yerel alan ağ standartları [30]

802.11 Protokolü	Açıklanma Tarihi	Frekans (GHz)	Tipik Çıkış (Mb/s)	En fazla net bit hızı (Mb/s)	Modülasyon	Bina-içi kapsama (m)	Bina-dışı kapsama (m)
-	1997	2.4	0.9	2	IR/FHSS /DSSS	~20	~100
a	1999	5	23	54	OFDM	~35	~120
b	1999	2.4	4.3	11	DSSS	~38	~140
g	2003	2.4	19	54	OFDM	~38	~140
n	~2010	2.4, 5	74	600	OFDM	~70	~250
y	2008	3.7	23	54	OFDM	~50	~5000

4.2 Teknoloji ve Radyo Teknikleri

802.11n WLAN'ın efektif çıkışını artırmak için radyoya MIMO'ya ilaveten ek değişiklikler getirir. Çizelge 4.2'de belirtilen bu değişikliklerin en önemlileri artırılmış kanal boyutu, daha yüksek modülasyon hızı ve azaltılmış ek yüklerdir [22].

4.3. Fiziksel Katman

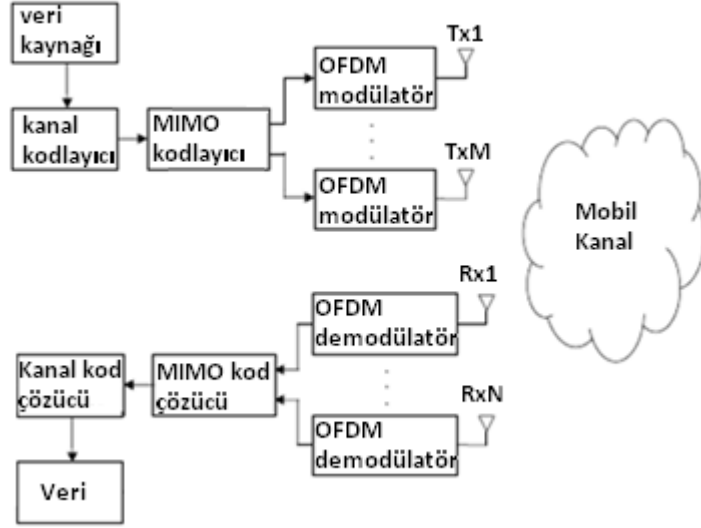
802.11a'da çakışmayan ve frekans kirliliğinden arınmış 18 kanal varken bu sayı 802.11g'de 3 tanedir. 2.4 GHz 'de 3 tane çakışmayan kanal olmasına rağmen günümüzde bir noktada çok sayıda 2.4 GHz'de çalışan cihaz bulunabilmekte bu da erişim kalitesini düşürmektedir. 40 MHz kanal kullanımı için 5 GHz bandı yeterli bandgenişliğini sağlamaktadır. Öbür taraftan frekansın yüksek olması kapsama alanını azaltmaktadır. Bu yüzden yakın mesafedeki cihazlar ile 5 GHz uzaktakiler ise 2.4 GHz ile iletişim kurmak daha uygun gözükmektedir. 802.11n iki frekans bandını da destekler. Halihazırda var olan 802.11b/g cihazları ile uyum sağlamak için 2.4 GHz bandı gerekli olsa da gelecekte daha yüksek performanslı uygulamalar için 5 GHz bandına doğru bir geçiş mümkün gözükmektedir [35].

Çizelge 4.2 : 802.11n özellikleri [34]

Özellik	Tanım	Şartname durumu
<i>Daha iyi OFDM</i>	Daha fazla bant genişliğini destekler; veri hızını 65 Mb/s'e çıkaran daha yüksek kodlama oranı	<i>Zorunlu</i>
<i>Uzay bölmeli çoğullama</i>	Veriyi çoklu antenlerden gönderilen birçok akıma ayırıştırarak performansı artırır	<i>4 uzaysal akışa kadar opsiyonel</i>
<i>Çeşitleme</i>	Kapsamayı ve güvenilirliği artırmak için çoklu antenlerin varlığından yararlanır. Tipik olarak alıcı uçtaki anten sayısının gönderilen akım sayısından fazla olduğunda kullanılır.	<i>4 antene kadar opsiyonel</i>
<i>MIMO güç tasarrufu</i>	Sadece gerekli olduğunda kullanımın sağlanmasıyla MIMO'nun güç tüketimini sınırlar	<i>Gerekli</i>
<i>40 MHz kanallar</i>	Kanal genişliğini 20 MHz'ten 40 MHz'e ikiye katlayarak veri hızınıda efektif olarak ikiye katlar	<i>Opsiyonel</i>
<i>Yığma</i>	Paket başlığı iletişimi arasında çoklu veri paketlerinin iletim patlamalarına izin vererek verimliliği artırır	<i>Gerekli</i>
<i>Azaltılmış çerçeveler arası mesafe (RIFS)</i>	Verimliliği artırmak için tasarlanan birçok Draft-n özelliğinden biri. 11a ve 11g'ye göre OFDM iletimleri arasında daha kısa gecikme sağlar.	<i>Gerekli</i>
<i>Greenfield kipi</i>	Tümü Draft-n çalışan bir ağda 11a/b/g cihazlara desteği çekerek verimliliği artırır	<i>Şu an için opsiyonel</i>

4.3.1 MIMO-OFDM

Bir MIMO-OFDM sisteminde gelen ikili veriler, modülasyon işleminden alıcı ve verici anten sayısına bağlı olarak ayrılmaktadır. Her bir antene bağlı yapıda tek girişli tek çıkışlı OFDM yapısı yer almaktadır. Son yıllarda yüksek hızlarda veri iletimine izin veren OFDM sistemlerinde sönümlemeye karşı daha fazla dayanıklı olan MIMO sistemler tercih edilmektedir. Bu sayede bir MIMO-OFDM sisteminde veri kayıpları en aza indirilerek yüksek kazançlı ve az kayıplı veri iletimleri gerçekleştirilmektedir [36].



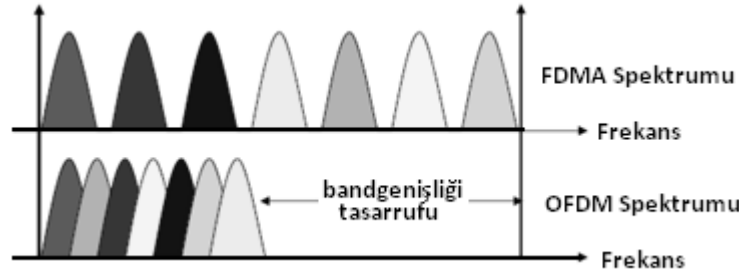
Şekil 4.2 : M verici N alıcıya sahip bir MIMO-OFDM sistem modeli

802.11 a/b/g gibi MIMO olmayan ağlarda, çoklu-yol işaretleri, alıcının işareten mesaj bilgisini geri çözme yeteneğini düşüren girişim olarak algılanır. MIMO, alıcının bu yeteneğini artırmak için çoklu yol işaretinin çeşitlemesini kullanır.

$A \times B : C$ gösteriminde A, radyo tarafından kullanılabilir maksimum verici anteni, B kullanılabilir maksimum alıcı anteni, C ise radyonun kullanabileceği maksimum uzaysal veri akışını gösterir. Örneğin iki verici üç alıcı anten kullanabilen fakat sadece iki veri akışı gönderebilen/alabilen bir radyo $2 \times 3 : 2$ olarak ifade edilir. 802.11n taslağı $4 \times 4 : 4$ 'e kadar izin verir. 11n cihazların yaygın yapılandırmaları $2 \times 2 : 2$, $2 \times 3 : 2$ ve $3 \times 3 : 2$ 'dir [30].

OFDM, veri akışının eşdeğer düşük hızlı alt taşıyıcılara bölerek bu alt taşıyıcılar üzerinden iletilmesini sağlayan çoğullama ve modülasyon türüdür. Yüksek hızlarda veri transferine olanak sağlar. Bu sebeple sayısal ses yayıncılığı (DAP), sayısal-karasal video yayıncılığı (DVB-T), sayısal kullanıcı hatları (DSL) ve telsiz alan ağları gibi çeşitli uygulamalar için standartlarda yerini almıştır [37]. Yüksek hızlı seri bilgi çok sayıda daha az hızlı alt işaretlere bölünerek paralel olarak farklı frekanslarda eşzamanlı olarak iletilir. Burada alt taşıyıcılar aynı zamanda tek bir kullanıcı tarafından kullanılır. Örneğin 802.11a/g de eş yerleşmiş kullanıcılar 20 MHz bant genişliğindeki kanal için yarışıp farklı zamanlarda iletim yaparlar.

OFDM'de alt kanallar birbiriyle örtüşmesine rağmen taşıyıcıların birbirine dik olması sayesinde herhangi bir girişim meydana gelmez. Bu sayede klasik FDM sistemlerine göre bant genişliğinden de tasarruf sağlanmış olur (Şekil 4.3).

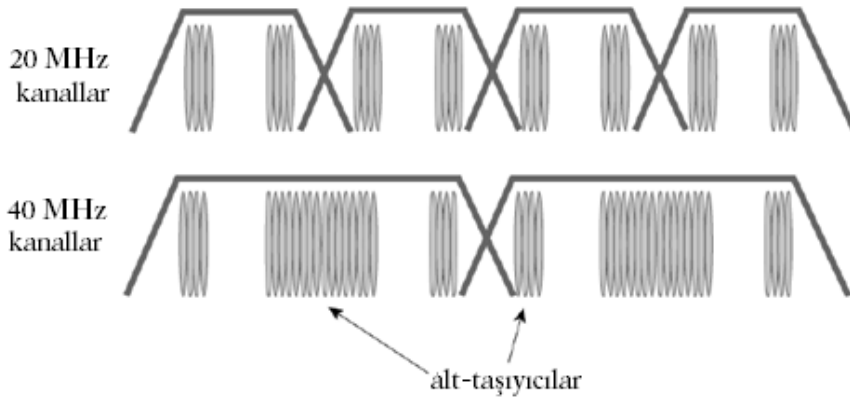


Şekil 4.3 : FDM-OFDM karşılaştırması

4.3.2 Kanal birleşimi

Orijinal 802.11 ve 11b eklentisi 22 MHz genişliğinde radyo kanalı kullanır. 802.11a/g'de ise bu değer 20 MHz'dir. Kanalın boyutu veya bant genişliği, radyo verimliliği için önemli bir ölçüt sunar. Buna spektral verimlilik adı verilir. 11b'nin spektral verimliliği 0,5 b/Hz'dir. 11a ve 11g 54 Mb/s'de 2,7 b/Hz gibi daha yüksek bir spektral verimliliğe sahiptir [34].

802.11n hem 20 hem 40 MHz kanalları kullanır. 40 MHz kanallar iki komşu 20 MHz kanalın birleşimidir. 40 MHz birleştirilmiş bir kanal kullanırken 802.11n, her 20 MHz kanalın komşu kanallarla girişimi azaltmak için üst ve altında rezerve edilmiş koruyucu kanalı kullanmaz. Böylece bu küçük kanallar da veri taşınması için kullanılabilir. İki 20 MHz kanalı bu şekilde daha verimli kullanılarak veri hızı artırılır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 : 20 MHz ve 40 MHz kanallar

4.3.3 Modülasyon

802.11a/g için 800 ns koruyucu aralığı içeren bir sembol 4 μ s sürmektedir. 802.11n, benzer olarak OFDM ve 4 μ s sembol kullanmaya devam eder. Fakat her 20 MHz'de 48 yerine 52 kanal kullanır. 40 MHz kanallar kullanılırken 802.11n alt taşıyıcıların

sayısını 108'e çıkarır. Diğer taraftan farklı uzaysal akımları farklı yöntemler kullanarak modüle etme yeteneğini ilave eder. Bazı uzaysal akımlar QPSK, bazıları 16-QAM, geriye kalanlar 64-QAM kullanabilir [22].

4.4 Ortam Erişim Denetimi Katmanı

Bu katmandaki çerçeveler arası boşluklarda ve gönderilen her çerçevenin onaylarında önemli miktarda sabit ek yük (*overhead*) bulunur. En yüksek veri hızlarında sadece bu başlıklar bile bütün veri çerçevesinden daha uzun olabilir. 802.11n sabit başlık ve çarpışma kayıplarından kaynaklanan verimsizlikleri MAC katmanında yaptığı değişikliklerle çözmeye çalışır.

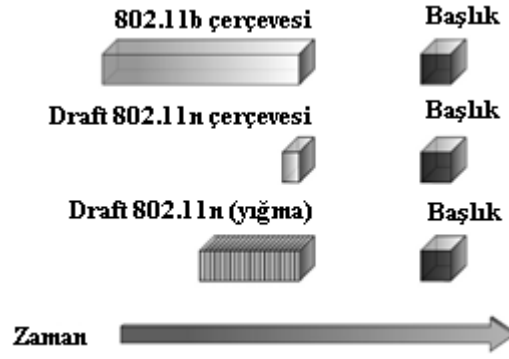
4.4.1 Çerçeve birleştirme

802.11 cihazın efektif çıkışını artırmak için daha yüksek bit hızından fazlası gerekir. Örneğin 802.11 standardındaki paket başlıklarının çoğu azaltılamaz ya da yok edilemez. 802.11a/b/g teknolojilerinde her bir pakette efektif çıkışı sınırlayan sabit uzunlukta ek yük bulunmaktadır (Şekil 4.5). Fiziksel katmandaki veri hızı geliştirmeleri bir noktadan sonra kullanıcı seviyesi çıkışını artırmaz. Bunun sebebi çerçeveler arası boşluklar ve fiziksel katman başlıkları gibi eklentilerdir. Bu durum, veri iletim oranı arttıkça verimliliği azaltmaktadır.

Radyo Öneki	Radyo Başlığı	MAC Başlığı	Veri	FCS
----------------	------------------	----------------	------	-----

Şekil 4.5 : Paket başlıkları

Bu ek yükü azaltmak için 802.11n çerçeve yığma yöntemini getirir. Yığma, birçok MSDU veya MPDU'yu başlıkları azaltmak ve onları çoklu çerçeveler üzerinde toplayarak birlikte paketleme işlemidir ve böylece kullanıcı seviyesindeki veri hızı artırılmış olur (Şekil 4.6). Birçok çerçeve aynı iletimde gönderildiği için potansiyel çarpışmaların sayısı önemli ölçüde azalır. Çerçeve yığmada bir iletime yığılan bütün çerçeveler aynı hedefe gönderilmelidir.



Şekil 4.6: Yığmanın ağ verimliliğine etkisi

MAC katmanında yığmanın iki çeşidi tanımlanmıştır:

- **MSDU-FA:** Teorik olarak MSDU yığması, birçok hedefe giden çerçevelerin iletim için tek bir yığma çerçevesinde toplanmasını sağlar. Aslında pratikte Ethernet çerçevelerini ortak bir hedef için toplar, toplananları tek bir 802.11 çerçevesine paket yapar ve sonrasında bu toplanmış 802.11 paketini gönderir. Ethernet başlığı 802.11 başlığından daha kısa olduğu için bu yöntem MPDU yığmasından daha etkilidir.

- **MPDU-FA:** Bu yöntemde Ethernet çerçevelerini toplanması yerine her Ethernet çerçevesinin 802.11 biçimine dönüştürülmesi ve bu çerçevelerin ortak bir hedef için toplanması esastır. Toplama başka bir 802.11 çerçevesini paketlemeyi gerektirmez çünkü toplanan çerçeveler zaten 802.11 başlığı ile başlamaktadır.

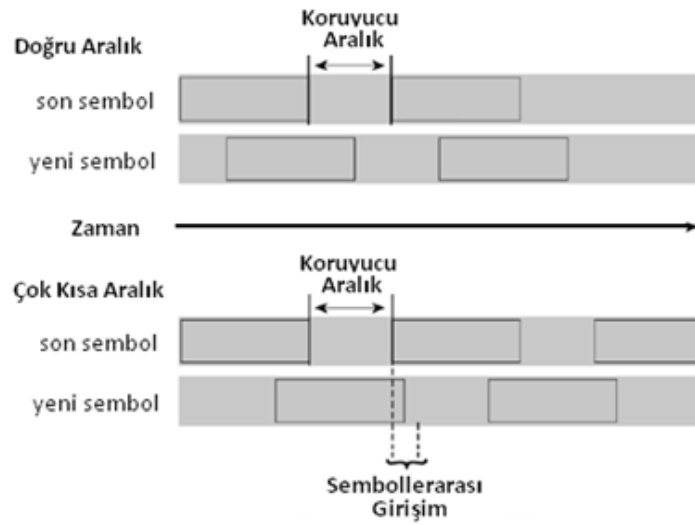
MPDU yığma toplamayı oluşturan bütün 802.11 çerçevelerin aynı hedef adrese sahip olmasını gerektirir. MPDU yığmasının verimliliği her birleşen çerçeve için fazladan başlık yüzünden MSDU yığmasından daha azdır. MPDU yığması 802.11e de tanıtılıp 11n’de optimize edilen tek bir çerçeve yerine bir çerçeve grubunun onaylanmasına izin veren *Block Acknowledgement* kullanımını gerektirir [30].

4.4.2 Blok onayı

Tek bir çerçeve yerine bir grup çerçeveye alındı gönderilmesine izin veren bir özelliktir [39]. Bu, alındısı gönderilmeyen yığılmış çerçevelerin yeniden iletimi hızlı bir mekanizma sağlar. Yüksek hata oranlı ortamlarda bu mekanizması WLAN’ın efektif çıkışında MSDU’ya oranla MPDU tekniğinde bir miktar iyileşme sağlayabilir. Çünkü MSDU’ya nisbeten MPDU ile yığılan çerçevedeki hatadan etkilenen bileşen çerçevelerin yeniden iletimi daha az olur.

4.4.3 Azaltılmış çerçeveler arası boşluk

Her OFDM işaretinin bir parçası olan koruyucu aralıklar semboller arası girişimi minimize etmek için kullanılan bir zaman periyodudur (Şekil 4.7). Yeni sembol alındığında alınması henüz tamamlanmayan gecikmiş sembol yeni sembolden daha uzun bir yol kat eder. Bu durum oluştuğunda girişim SNR'ın düşmesine neden olur. Koruyucu aralığın uzunluğu çok yollu ortamın şiddetine göre seçilir. 802.11a/g'de koruyucu aralık için 800 ns kullanılır.



Şekil 4.7 : Koruyucu periyod

802.11n koruyucu periyod için varsayılan olarak 800 ns kullanır. Fakat eğer çok yollu ortam alıcı-verici arasındaki yollarda daha esnek ise 400 ns boyutunda azaltılmış koruyucu aralıkta sağlayabilir. Bu sembol zamanını 4 ms'den 3.6 ms'ye düşürerek veri hızında artış sağlar [22].

4.4.4 Geriye dönük uyumluluk

802.11n teknolojisinde geriye dönük olarak 802.11a/b/g standardındaki telsiz ağlar desteklenmektedir. Bir 802.11n telsiz ağ cihazı, 802.11n destekleyen ve 802.11a/b/g destekleyen kullanıcılara aynı anda hizmet verebilmektedir. Fakat 802.11 a/b/g bir kullanıcının varlığı ağın performansını ve toplam veri iletim miktarını düşürmektedir. Özellikle 802.11b teknolojisine sahip bir kullanıcı, 802.11n bir ağa girdiğinde, ağın genel performansında ciddi düşüş yaşanır.

Girişim ve çakışmanın yüksek olduğu ortamdaki karışıklıktan kaçınmak için 802.11n cihaz, 802.11a/g cihazlar tarafından çözülebilecek bir radyo başlığı gönderir. Bu eski

standartta çalışan radyolara başka bir iletimin olduğunu ve iletimin ne kadar süreceğini belirtmeye izin vermek için yeterli bilgiyi sağlar [30].

4.5 Teorik Maksimum Hız

Genel olarak 20 MHz band genişliği ve bir uzaysal akış için başarılabilen en fazla fiziksel veri hızı 72,2 Mb/s, 2 uzaysal akım için 144,4 Mb/s, 3 uzaysal akım için 216,7 Mb/s, 4 uzaysal akım (4x4) için 288,9 Mb/s'dir. Fiziksel veri hızı 40 MHz band genişliği kullanıldığında iki katından daha fazlası 600 Mb/s'ye ulaşır [13].

11g'nin maksimum hızı olan 54 Mb/s ile başlanıp adım adım incelinirse:

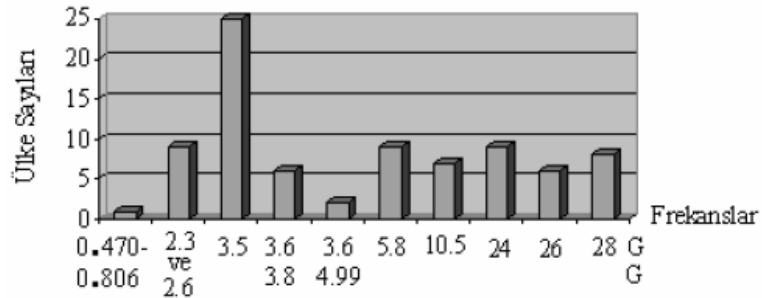
- **Daha fazla alt taşıyıcı:** 802.11g 48 OFDM alt taşıyıcısına sahiptir iken 11n bu sayıyı 52'ye taşıyarak hızı 54'ten 58,5 Mb/s'e çıkarır.
- **FEC:** 802.11g maksimum 3/4 FEC kodlama oranına sahiptir. 802.11n 5/6 kodlama oranı ile daha fazla boşluk sıkıştırır ve link hızını 58,5 Mb/s ten 65 Mb/s'e çıkarır.
- **Koruyucu periyod:** 802.11n 800 ns koruyucu mesafeyi 400ns'ye düşürecek seçeneğe sahiptir. Böylece hız 65 Mb/s ten 72,2 Mb/s'e çıkar.
- **MIMO:** Her uçtaki iki anten çıkışı ikiye, üç anten üçe, dört anten dörde katlar. Alıcı ve verici dizilerindeki maksimum anten sayısı 802.11n tarafından dört olarak belirlenmiştir. Bu eşzamanlı dört 72,2 Mb/s akışa yani toplamda 288,9 Mb/s çıkışa olanak sağlar.
- **40 MHz kanallar:** 802.11n 40 MHz kanal bant genişliğiyle veri alt taşıyıcılarının sayısını 52'den 108'e çıkarır. Bu toplam kanal çıkışını 150 Mb/s yapar. MIMO ile birleştirildiğinde toplam hız 600 Mb/s olur [40].

5. TELSİZ METROPOL ALAN AĞLARI

Bir metropol şehri kapsayacak şekilde yapılandırılmış iletişim ağlarına metropol alan ağları (MAN) adı verilmektedir. Bu tür ağlar, kablo yerine uydu veya RF iletişimi teknolojileri kullanılması durumunda Telsiz Metropol Alan Ağları (WMAN) olarak isimlendirilir. IEEE 802.16 standardı WMAN için geliştirilmektedir.

5.1 IEEE 802.16 Gelişimi

IEEE 1998 yılında 802.16 grubunu oluşturdu. İlk başta bu grup fiber kullanamayan ve yüksek hızda bağlantıya ihtiyaç duyan işletmelerin ihtiyacını karşılamak için 10-66 GHz bandında çözümler geliştirmeye odaklandı. Grup tarafından üretilen ve Aralık 2001’de onaylanan *Wireless MAN-SC* standardında tek taşıyıcılı modülasyon teknikleri kullanan fiziksel katman ve TDD ile FDD’yi destekleyen patlamalı TDM’li MAC yapısı belirtildi. Tamamlanmasının ardından grup standardın NLOS ortamlarda çalışmasını mümkün kılan 2-11 GHz aralığında lisanslı ve lisanssız frekanslarda çalışması için modifiye etmeye başladı. 2003’te tamamlanan 802.16a adındaki bu değişiklikle çok yollu ortamları desteklemek için fiziksel katmanın parçası olarak genişbantta çoklu yolla mücadele etmek için bir yöntem olarak ortaya çıkan OFDM şeması eklendi.



Şekil 5.1 : Kullanılan ve planlanan frekansların dağılımı

802.16a’da, OFDM fiziksel katmanlarının yanında OFDMA için destek içeren ilave MAC katmanı seçenekleri de belirlendi. IEEE 802.16-2004 standardı 802.16, 16a ve

16c'yi tek bir standartta birleştirdi. 2003'te 802.16 grubu taşıtlara ait mobilite uygulamalarına izin veren şartnameler üzerinde çalışmaya başladı. Aralık 2005'te tamamlanan 802.16e adındaki bu revizyon resmi olarak IEEE 802.16e-2005 adında yayınlandı. Fiziksel katman için S-OFDM kullanıp MAC katmanını yüksek hızlı mobiliteye uydurmak için başka değişliklerde yaptı.

IP tabanlı bir teknoloji olması sayesinde de hem kablolu hem de telsiz şebekelere entegre olabildiğinden çeşitli şekillerdeki hizmet ve şebekelerin yakınsamasını da desteklemektedir. Bu da her zaman her yerde uygun erişimle, kullanıcıların çeşitli iletişim taleplerinin karşılanması anlamına gelmektedir. Bu sistemlere örnek olarak gösterilebilecek Kore'de geliştirilen WiBro, 2.3 GHz bandında 1-5 km'ye erim sunabilen gezgin genişbant çözümüdür. şubat 2002'de Kore hükümetinin 100 MHz bant genişliği tahsis etmesi üzerine geliştirilmeye başlanmış ve 2004 sonunda standartlaştırılmıştır. WiBro sistemler şu an son kullanıcılara 512 kb/s'den 3Mb/s'ye değişen veri hızları sunmaktadır. Çoklu erişim metodu olarak OFDMA kullanır. 120 km/s'e kadar mobiliteye izin verir. WiBro teknolojisi IEEE 802.16e-2005 ile uyumludur [1].

5.1.1 WiMAX Forum

Forumun temel hedefi 802.16 standardına dayalı genişbant telsiz erişimi geliştirmek ve bu teknolojiyi içeren tüm ekipmanların birbirleriyle uyumlu çalışabilmelerini sağlamaktır. WiMAX forumu onayladığı ürünlere “*WiMAX Forum Certified*” ibaresi vermektedir (şekil 5.2).



şekil 5.2 : WiMAX forumu onaylı ibaresi

Forumdaki şirketler arasında Wi-Fi için ürettiği *Centrino* platformuyla telsiz erişimde söz sahibi Intel firması sabit bilgisayarlarda kullanılmak üzere ürettiği 802.16-2004 uyumlu *Rosedale* isimli yongasının örneklerini müşterilerinin denemelerine sunmuştur. Intel, *Rosedale 2* yongasını da 802.16e standardıyla

uyumlu hale getirerek mobil bilgisayarlar ve PDA'lara WiMAX erişim özelliğini kazandırmak istemektedir [41].

5.2 IEEE 802.16e-2005

IEEE 802.16e-2005, WiMAX teknolojisi için göçebe ve gezgin uygulamalarda temel oluşturmaktadır ve genelde mobil WiMAX olarak adlandırılır. WiMAX forum iki farklı sistem profiline sahiptir. Biri sabit sistem profili olarak adlandırılan IEEE 802.16-2004, OFDM tabanlıdır ve diğeri ise mobilite sistem profili olarak isimlendirilen IEEE 802.16e-2005 olup S-OFDMA tabanlıdır. Bütün mobilite sertifikasyon profilleri TDD bazlıdır.

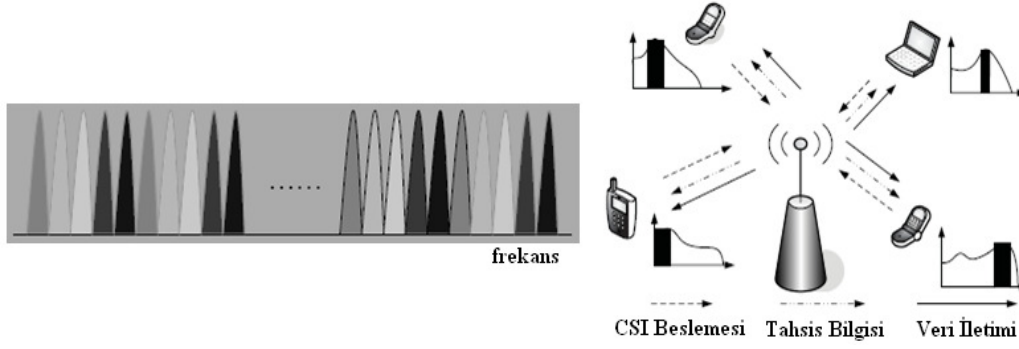
5.3 Fiziksel Katman

WiMAX aynı coğrafi alanda sınırlı bant genişliğinde düşük gecikme süresi ile yüksek veri hızı talep eden birçok kullanıcıya hizmet verme gibi bir problemin üstesinden gelmek zorundadır. Çoklu erişim teknikleri her kullanıcıya toplam sistem kaynaklarının bir bölümünü tahsis ederek aynı bant genişliğinin paylaşılmasına izin verir. Birçok kullanıcı arasında müsait kaynakların bölünmesinin en yaygın yolu frekans, zaman veya kod bölmeli çoklama yoluyladır.

5.3.1 OFDMA

OFDMA yüksek performansını ve birçok kullanıcının esnek uyumunu çoklu kullanıcı çeşitlemesi ve adaptif modülasyon ile gerçekleştirir. Öbür taraftan OFDMA enterfere olan komşu hücreler ve sınırlı toplam çeşitleme kazancı gibi zorluklar getirir. 802.16e-2005'in kullandığı OFDMA yaklaşımıyla kullanıcılar alt taşıyıcıları ve zaman slotlarını paylaşırlar. Bu artmış çoklu kullanıcı çeşitlemesine, kullanıcıları programa koymada ve uygulamada daha başka önemli faydalara izin verir.

OFDMA'nın avantajları frekans çeşitlemesi bakımından tek kullanıcılı OFDM'in avantajı ile başlar. İlaveten OFDMA çok çeşitli uygulama, veri hızı ve servis kalitesi gereksinimleri ile birçok kullanıcıya hizmet ederek esneklik sağlar. Çoklu erişim sayısal domende yapıldığı için IFFT operasyonundan önce dinamik ve verimli bandgenişliği tahsisi mümkündür. OFDMA'nın OFDM'e göre bir önemli avantajı verici gücünü azaltma ve tepe gücü ortalama güç oranı problemini çözme potansiyelidir.



Şekil 5.3 : OFDMA [1]

Aynı renkteki alt taşıyıcılar bir alt kanalı göstermek üzere OFDMA’da baz istasyonu her kullanıcıya alt taşıyıcıların bir bölümünü tahsis eder.

Mobil WiMAX’in üstün performansı geniş ölçüde çokluyol ortamlarına uyumu ile yüksek kapasite ve artan erim alanı sağlayan OFDMA kullanmasına bağlıdır. Diğer taraftan OFDMA’in gelecek nesil ağlar için de tercih edilmesi kuvvetle muhtemeldir. 3GPP, LTE şartnamesinde OFDMA’e yer vermiştir ve 3GPP2’de bu yönde ilerlemektedir [42].

5.3.2 S-OFDMA

S-OFDMA, IEEE 802.16e’de tanımlanan mobil WiMAX’ta kullanılan OFDMA çeşidi olup OFDMA’ya ölçeklendirilebilirlik katar. Ölçeklendirilebilirlik alt taşıyıcı frekans mesafesini sabit tutarken FFT boyutunu kanal bandgenişliğine ölçeklendirir. FFT, WiMAX alıcısında veri akımlarını demodüle etmek için kullanılırken IFFT, WiMAX vericisinde modüle edilmiş veri akımlarından OFDM dalga formu oluşturmak için kullanılır. FFT boyutu alt taşıyıcı sayısına eşittir. Daha küçük FFT boyutu düşük bandgenişliğindeki kanallara verilirken daha büyük FFT boyutu geniş kanallara verilir. 1.25 MHz’den 20 MHz’e kadar kanal bandgenişliğini destekler. Bandgenişliği ölçeklenmesi ile mobil WiMAX farklı frekans düzenlemeleri ile uyum sağlayabilir [43].

5.3.3 802.16-2004 fiziksel katman

WiMAX’in bu versiyonunda veri taşınması için 192 alt taşıyıcı, kanal kestirimi ve senkronizasyon amaçları için 8 pilot alt taşıyıcı ve geri kalanı koruyucu bant alt taşıyıcıları olmak üzere FFT boyutu 256’da sabit kılınmıştır. FFT boyutu sabit

olduğu için alt taşıyıcı mesafesi kanal bant genişliği ile değişir. Daha geniş bant genişliği kullanıldığında alt taşıyıcı mesafesi artar ve sembol süresi azalır.

Çizelge 5.1 : WiMAX'te kullanılan OFDM Parametreleri [1]

	Sabit WiMAX OFDM- PHY	Mobil WiMAX SOFDMA-PHY			
FFT boyutu	256	128	512	1,024	2,048
Kullanılan veri alt taşıyıcısı sayısı	192	72	360	720	1,44
Pilot alt taşıyıcı sayısı	8	12	60	120	240
Boş/Koruyucu band alt taşıyıcı sayısı	56	44	92	184	368
Örnekleme oranı (Fs/BW)	Bandgenişliğine bağlıdır: 256 OFDM için 7/6, 1.75 MHz'in katları için 8/7 ve 1.25 MHz, 1.5, 2, veya 2.75 MHz'in katları için 28/25				
Kanal bandgenişliği (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Alt taşıyıcı frekans mesafesi (kHz)	15.625	10.94			
Kullanışlı sembol zamanı (μs)	64	91.4			
OFDM sembol süresi (μs)	72	102.9			
5 ms çerçevede bulunan OFDM sembol sayısı	69	48.0			

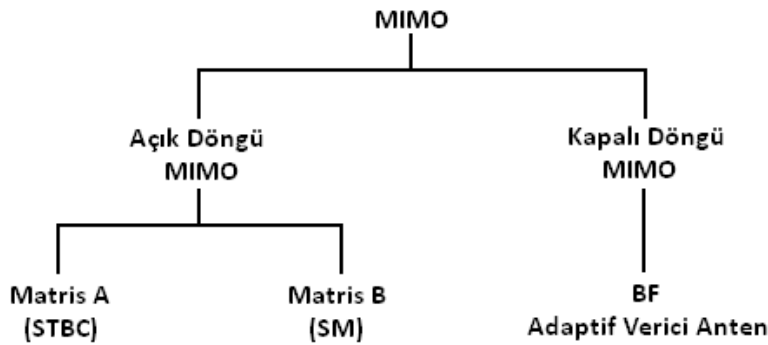
5.3.4 802.16e-2005 fiziksel katman

FFT boyutu 128'den 2048'e kadar değiştirilebilir. OFDM sembol süresini sabit tutulur ve bu yüzden üst katmanlar daha az etkilenir. Ölçeklendirilebilir bir tasarım aynı zamanda maliyetide düşük tutar. Karma sabit ve mobil ortamlarda çalışırken gecikme ve Doppler dağılımı gereksinimleri arasında iyi bir denge sağlaması için alt taşıyıcı mesafesi 10.94 kHz olarak seçilmiştir. Bu alt taşıyıcı mesafesi 20 ns'ye kadar gecikme dağılımını ve 3.5 GHz'de çalışırken 125 km/s'e kadar taşıt mobilitesini destekleyebilir. 10.94 kHz'lik bir alt taşıyıcı mesafesi, kanal bandgenişliği sırasıyla 1.25, 5, 10 ve 20 MHz iken 128, 512, 1024, ve 2048 FFT kullanıldığını gösterir. Faka mobil WiMAX ekstra bandgenişliği profilleri içerebilir. Örneğin WiBro ile uyumlu bir profil 8.75 MHz kanal bandgenişliği ve 1024 FFT kullanır [1].

5.4 WiMAX için MIMO Eklentileri

MIMO ve BF gibi çoklu anten uygulamaları en zorlayıcı ortamlarda bile bina içi nüfuzu, kapsamayı ve kapasiteyi geliştirme yönünde fırsatlar sunmaktadır. WiMAX'ın performans avantajları kompleks anten uygulamaları ile birleştiğinde, WiMAX operatörleri bugün verdikleri hizmetlerdeki değişen ihtiyaçları ve gelecekteki talepleri karşılayacak şekilde optimize edilmiş bir şebekeyi hızlıca kurabilirler.

Teorikte MIMO yapılandırmaları açık veya kapalı döngü olarak sunulmaktadır. Uygulamada, yaygınca kullanılan MIMO terminolojisi genellikle açık döngü MIMO tekniklerinden yanadır. WiMAX standardı Matris A ve Matris B olmak üzere iki çeşit açık döngü MIMO tekniği içerir. Öbür taraftan *Transmitter Adaptive Antenna* olarak bilinen kapalı döngü MIMO tekniklerine basit olarak BF adı verilir [44].



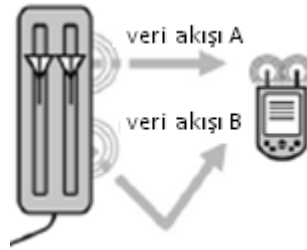
Şekil 5.4 : WiMAX çoklu anten teknolojisi

Kapalı döngü MIMO ile verici hedeflenen alıcıya iletişimi optimize etmek için kanala ilişkin bilgi toplar. Tipik olarak MRT veya istatistiksel BF tekniklerini kullanır. İstatistiksel BF ve MRT, 802.16e standardında opsiyonel özelliklerdir. Statik alıcılar ile iletişim için daha elverişli olan MRT güçlü sistem kazancı vermek için daha kesin ölçüm ve kanal koşullarının anlaşılmasına ihtiyaç duyar. Gezgin alıcılar için kanal koşullarının ölçümü ve hüzmenin şekillendirilmesi arasındaki gecikme gerekli sistem kazancını sağlamak için çok önemli bir etken haline gelir. Böyle ortamlarda istatistiksel BF daha güçlü bir çözümdür.

Açık döngü MIMO ile iletişim kanalı yayılım kanalına ait bilgi kullanmaz. Ortak açık döngü MIMO teknikleri STBC, SM ve *Collaborative Uplink* MIMO'yu kapsar. WiMAX sistemlerde MIMO Matris A, STBC tekniğine ve MIMO Matris B, SM tekniğine işaret eder. MIMO Matris A ve B baz istasyonu ve son kullanıcı cihazında

çoklu anten çalışmasını kontrol eder. WiMAX cihazlar için *WiMAX forum Wave 2* sertifikasyonunda Matris A ve Matris B ile iki anten alıcısı gereklidir.

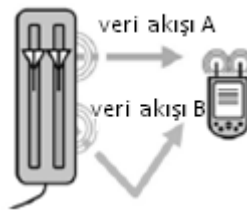
▪ **Matris A:** Tek bir veri akımı çoklu antenler üzerinde kopyalanır ve gönderilir. İyi bilinen ve Alamouti tarafından tanıtılan STC temellidir. Gönderilen her işaret, girişimi azaltacak ve alıcının çoklu işaretleri ayırma kabiliyetini geliştirecek şekilde geri kalanlara dik durumdadır. Kodlanmış veri akımlarının çoklu iletimi ile alıcının fiziksel yoldan kötü olarak en az etkilenmiş en güçlü işareti belirleme fırsatı artırılmış olur. Alıcı daha güçlü bir alım için MRC tekniği kullanabilir.



Şekil 5.5 : MIMO Matris A (STBC)

MIMO Matris A, temelde sistem kapsama alanını geliştirmek için kullanılır. Zengin çoklu yolun en az olduğu ve SNR değerinin muhtemelen daha zayıf olduğu şehir dışı ve kırsal coğrafyalar için iyi bir seçimdir. İlavenen SNR değerinin düşebileceği yüksek hızlı mobil uygulamalar için verimli olabilir. MIMO Matris A'nın iki antenle beraber kullanıldığı bu tip senaryolardaki kurulum, sistem link bütçesini tek antene göre ikiye katlarken kapsama alanını oldukça yükseltir [44].

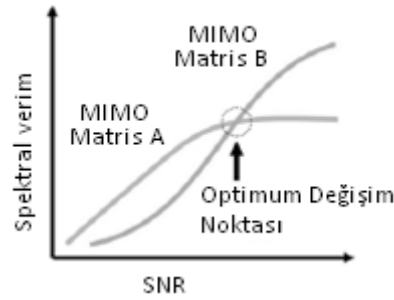
▪ **Matris B:** İletilecek işaret birçok veri akımına bölünür ve her veri akımı baz istasyonunun alıcı için tahsis edilmiş aynı zaman-frekansta çalışan farklı bir verici anteninden gönderilir. Çok yollu ortamının varlığında çoklu işaret, alıcı anten dizisine bu dizileri kolayca ayırt etmeye izin veren farklı uzaysal imzalar ile ulaşacaktır. Kanal kapasitesinin artması anlamında oldukça etkilidir.



Şekil 5.6 : MIMO Matris B (MIMO-SM)

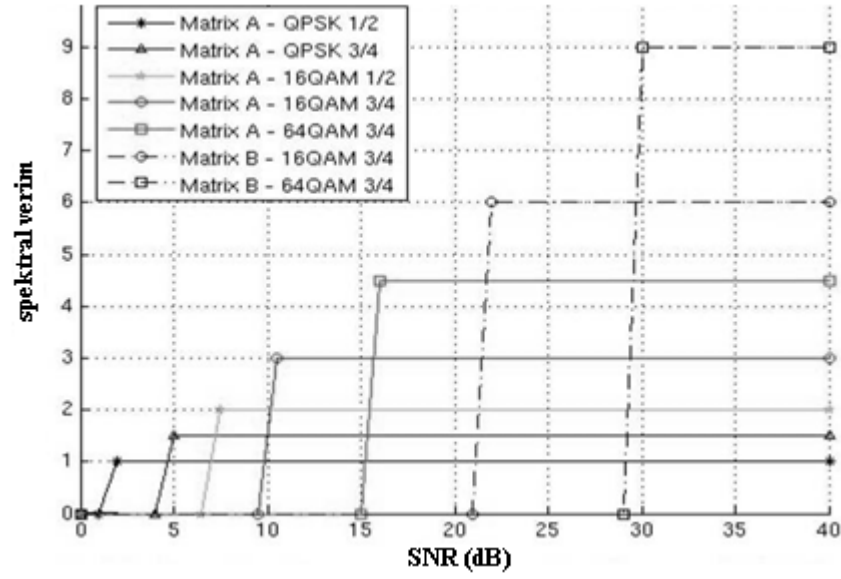
MIMO Matris B zengin çoklu yol şartlarının var olduğu şehir içi ortamlar için oldukça uygun bir seçenektir. Bina içi iletişim de Matris B için iyi bir ortam oluşturur. İki anten kurulumu ile MIMO Matris B çıkış hızını tek antene oranla ikiye katlayabilir [44].

Adaptif mod seçimi, SNR değerinin düşük olduğu hücre sınırı ya da işaretin zayıf olduğu ortamlarda MIMO Matris A ve B'ye göre daha iyi performans gösterir. Sistemin sinyal gücünden ziyade bant genişliği limitinin olduğu daha yüksek SNR'da, MIMO Matris B, A ya göre daha iyi performans gösterir. MIMO tekniğine sahip ideal bir WiMAX sistem Matris A ve B'yi beraber destekleyecektir. Sistem herhangi bir zaman yada konumdan talep edilen gerekli kapsama veya kapasite kazancını sunmak için optimum bir değişim noktası ve iki yaklaşım arasında dinamik değişmeyi hesaplar (Şekil 5.9).



Şekil 5.7 : MIMO adaptif mod seçimi

Matris A öncelikli olarak kapsama kazancı gerçekleştirmek ve Matris B kapasite artırımı sunmak için kullanılsa da ideal bir sistem belirli uygulama, coğrafya veya link koşuluna bağlı olarak dinamik bir şekilde Matris A ve B arasında değişebilir [44]. Farklı kiplerde ve modülasyonlarda elde edilen performans Şekil 5.8'de verilmiştir. Buna göre en yüksek spektral verim Matris B'nin 64-QAM 3/4 ile beraber kullanıldığı durumdur. En yakın değere göre %50 daha fazla verim sunmaktadır. Bu veri hızında kaydadeğer bir artış getirecektir.



Şekil 5.8 : WiMAX MIMO kombinasyonları için verim-SNR grafiği [24]

5.5 Genişbant Telsiz Erişimde Mevcut Durum ve Karşılaştırma

Yeni çıkan ve çıkacak olan geniş bant telsiz standartları için dünya çapında teknoloji seçimi olarak MIMO-OFDM'i adapte etme konusunda hızlı gelişmeler olmaktadır [45]. OFDM çok taşıyıcılı modülasyonunun 4. nesil telsiz sistemleri mümkün kılacak teknik olması umulmaktadır. OFDM'i 4. nesil sistemler için öncelikli seçenek haline getiren özelliklerden birisi MIMO uyumluluğudur çünkü MIMO telsiz sistemleri kapasite, veri hızı ve kapsama alanı yönlerinden önemli potansiyele sahiptir [20]. Eğilim genelde OFDM veya OFDMA modülasyonları ile birleştirilerek çoklu yoldan kaynaklanan problemlerin verimli olarak halledilmesi yönündedir. IEEE 802.16e standardı MIMO-OFDMA içerirken 3GPP, 3GPP2 gibi mobil iletişim standartlarında da kullanılması planlanan MIMO, HSPA ve LTE içinde düşünülmektedir [46].

Gelecekteki bütün sistemlerden öncelikli beklentinin aynı anda çok fazla sayıda kullanıcıya yüksek veri hızı sağlaması olduğundan WiMAX'in hız ve kapasite ihtiyacındaki tatmin edici potansiyeli ile uygun bir aday olacağı düşünülmektedir. Bu düşünceye yol açan önemli etkenlerden bir tanesi WiMAX sistemlerin kapasitesinin MIMO eklenerek daha da geliştirilebilmesidir. MIMO sistemlerde donanım ve hesaplama karmaşıklığı yüksek olsa da spektral verimlilik artırılabilir. Veri hızı, kapasite veya ihtiyaca bağlı kapsama alanının artırımında kullanılabilen bu spektral verim, bant genişliği oburu telsiz uygulamalar için MIMO teknolojisini çekici kılmaktadır [20].

Hücreli sistemlerde MIMO'nun henüz çok az ticari uygulaması mevcut olup şu anda hiçbir 3. nesil MISO çeşitleme çözümleri dışında kurulmamıştır. Öbür taraftan gelmekte olan 4. nesil sistemlerde de MIMO teknolojisine yer vermesi öngörülmektedir.

Çizelge 5.2 : WiMAX'ın diğer genişbant telsiz teknolojileri ile karşılaştırması [1]

	Sabit WiMAX	Mobil WiMAX	HSPA	1xEV-DO Rev A	Wi-Fi
Standart	IEEE 802.16-2004	IEEE 802.16e-2005	3GPP R6	3GPP2	IEEE 802.11a/g/n
Pik aşağı bağ veri hızı	9,4 Mb/s	46 Mb/s	14,4 Mb/s	3,1 Mb/s	11a/g için 54Mb/s, 11n için 100Mb/s en fazla 2.katman hızı
Pik yukarı bağ veri hızı	6,5 Mb/s	7 Mb/s	5,8 Mb/s	1,8 Mb/s	
Band genişliği	3,5 GHz bandında 3,5 ve 7MHz, 5,8 GHz bandında 10 MHz	3,5, 7, 5, 10 ve 8.75 MHz	5 MHz	1.25 MHz	11a/g için 20MHz; 11n için 20/40MHz
Modülasyon	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM	QPSK, 8PSK, 16QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Çoğullama	TDM	TDM, OFDMA	TDM, CDMA	TDM, CDMA	CSMA
Çift yönlü kullanım	TDD, FDD	TDD	FDD	FDD	TDD
Frekans	3.5 ve 5.8 GHz	2.3, 2.5 ve 3.5 GHz	800,900, 1800,1900, 2100 MHz	800,900, 1800, 1900 MHz	2.4 ve 5 GHz
Kapsama alanı	4,8-8 km	<3,2 km	1,6-4,83 km	1,6-4,83 km	<30m bina-içi <300m bina-dışı
Mobilite	Uygulanabilir değil	Orta	Yüksek	Yüksek	Düşük

Dolaşım desteği ve yüksek hızlı taşıt gezginliği desteği anlamında WiMAX'in yapabilecekleri 3G ile karşılaştırıldığında henüz tam olarak kesinleşmemiştir. 3G'de mobilite tasarımının kaçınılmaz bir parçası iken WiMAX sabit bir sistem için tasarlanmış olup mobilite yetenekleri ilave özellik olarak geliştirilmiştir. Özetle WiMAX bir bakıma Wi-Fi ve 3G teknolojileriyle veri hızı, kapsama, servis kalitesi, mobilite ve ücret açısından karşılaştırıldığında ortada yer almaktadır.

6. TELSİZ İLETİŞİMDE DÖRTLÜ OYUN UYGULAMALARI

Genişbant telsiz erişim her yerden her hangi bir zamanda çok daha hızlı internet erişimi vaat eder. Gelişmeler ile beraber artan kullanıcı talebini karşılamak için ses ve veri hizmetleri için tam-IP ağ yapısına geçiş sağlanmalıdır. Günümüzde WiMAX büyük ölçekte Dörtlü Oyun (*Quadruple Play*) teknolojisini (veri, ses, video, gezginlik) tek bir ağ kullanarak sağlayabilecek tek standart olarak gözükmektedir. Dörtlü Oyun servislerinin genişbant telsiz erişim üzerinden verilmesi mevcut telekomünikasyon ve uydu/kablo TV endüstrisi üzerinde oldukça büyük etki bırakacaktır. Çünkü telsiz erişim ağı geleneksel PSTN ve kablo TV ağları ile karşılaştırıldığından çok daha ucuza kurulabilir. Farklı mimarileri destekleme konusunda esnek olup noktadan noktaya ve çok noktaya erişimi sağlar. Donanımı daha basittir ve taşımaya uygun şekilde küçük boyuttur. AES, 3DES gibi şifrelemelerin kullanılmasıyla yüksek güvenlikli bir ağdır [47].

Halen bazı mobil servis sağlayıcıları zaten 2.5G, GPRS ve 3G üzerinden talebe bağlı unicast mobil TV akışı sunmaktadır. Yeni sıkıştırma teknikleri TV kanallarının talebe bağlı akışına izin verir fakat hali hazırdaki hücresel ağlar sınırlı kapasitelere sahiptir. Öbür taraftan tek bir IP ağı üzerinden Dörtlü Oyun servisleri, servis sağlayıcıları tarafından yüksek derecede talep edilmekte olup telsiz ağlar üzerinden IPTV verilmesi açıkça bir zorunluluktur [48].

6.1 Internet Protokolü zerinden Ses İletimi

IP üzerinden ses iletiminin (VoIP) WiMAX uygulamalarının en popülerlerinden biri olması umulmaktadır. VoIP teknolojisinin popülerliğinin en büyük nedeni geleneksel telefon sistemleri ile karşılaştırıldığında maliyetinin oldukça düşük olmasıdır. Sesin veri akışı üzerinde iletimi kavramı IP kullanan herhangi bir cihazda VoIP çalışmasını mümkün kılar. Her ne kadar bağlaşmalı hücresel ses trafiği için tasarlanmamış olsa da servisi kalitesi (QoS) ve düşük gecikme (*latency*) değerlerine bağlı olarak VoIP trafiğine uygun yüksek destek sağlar.

VoIP’te süreç sesin sayısallaştırılması, istenmeyen gürültü işaretlerinden korunması ve sonrasında sıkıştırma algoritmaları kullanılarak ses işaretinin sıkıştırılmasını kapsar. Sıkıştırıldıktan sonra ses, IP ağı üzerinde iletilmek için her biri hedef adres, sıra numarası ve hata denetimi için veri içeren paket haline getirilir. İşaretleşme protokolleri bu safhada eklenir. Bir ses paketi hedefe ulaştığında sıra numarası paketlerin sıraya konulmasını sağlar ve veri paketlerinden geri açılmasını sağlayan algoritmalar uygulanır. Seçirme arabelleği farklı yollardan sırasız ulaşan paketleri depolamak ve geciken paketleri beklemek için kullanılır [47].

Çizelge 6.1 : OSI modeline göre VoIP servisi

Uygulama	Çağrı yöneticisi
Sunum	Kodekler
Oturum	SIP/H.323
Taşıma	RTP/UDP/TCP
Ağ	IP
Veri bağı	ATM, Ethernet, FR
Fiziksel	Ham veri

6.1.1 VoIP kodlama teknikleri

VoIP donanımı ses işaretlerini sayısal bit dizilerine dönüştürme ve tersi için kodek (*Compression/Decompression-CODEC*) teknolojisini kullanır. Ses kalitesi korunurken bant genişliğinden tasarruf etmek amacıyla sıkıştırma teknikleri geliştirilmiştir. Her ne kadar birçok sıkıştırma tekniği var olsa da bugün birçok VoIP cihazı üreticiler arasında birlikte işlerliği tesis eden ITU-T tarafından standardize edilen kodekler kullanılmakta olup en popüler sıkıştırma teknikleri şunlardır:

▪ **G.711:** Temel ve en yaygın olan kodek olup 64 Kb/s standart PCM sıkıştırmasını kullanır. Tipik olarak 8 kHz ile örneklenen işaretler 8 bit ile kodlanarak 64Kb/s’lik veri kanalından iletilir. Alıcı uçta doğrusal ölçeğe geri döndürülür. Düşük hesaplama karmaşıklığının yanı sıra cüzi gecikme ile yüksek ses kalitesi sağlar. Fakat diğerleri ile karşılaştırıldığında yüksek sayılan her yönde 64 Kb/s’lik bir bandgenişliği tüketimi söz konusudur. *A-law* ve *μ-law* kodlama çeşitlerini kapsar. *μ-law* Kuzey Amerika ve Japonya’da kullanılırken Avrupa ve geri kalan dünyada *A-law* kullanılır.

▪ **G.723:** Genel olarak düşük bit hızlarında iletim için kullanılır ve kalite olarak G.711’den kötü olmakla birlikte bant genişliği gereksinimi G.711’in yaklaşık onda biri kadardır. ACELP (6,3 Kb/s) ya da MP-PLQ (5,3 Kb/s) algoritmaları kullanılır.

Düşük bit hızı sistem tasarımcılarına ilave esneklik sağlar. Göreceli olarak daha yüksek gecikme ve orta dereceli işlem karmaşıklığı getirir.

▪ **G.729:** 8 kHz’de süzölmüş ses bandını 16 bit ile örneklerken veri hızı 8 Kb/s’dir. CS-ACELP algoritması kullanılır. Bandgenişliği kullanılan her bağlantıya göre optimize edilir. Göreceli olarak daha düşük gecikme sağlarken yüksek işlem karmaşıklığı getirir [49].

6.1.2 İşaretleşme protokolleri

H.323, SIP işaretleşme protokolleri IP ağı üzerinden iletim için yönlendirmeyi hazırlarken RTP gibi protokollerde veri akışının iletimi için yol kurarlar.

▪ **H.323:** ITU-T tarafından belirlenen orijinalinde LAN üzerinde çoklu ortam konferansı için geliştirilip sonrasında aynı zamanda VoIP için modifiye edilen paket tabanlı çoklu ortam iletişimi standardıdır. Özel olarak VoIP için tasarlanan SIP protokolü daha önde olsa da H.323 var olan ağlarda zaten kurulmuş olduğu için daha çok kullanılmaktadır. Birlikte çalışabilirliği olan standart noktadan noktaya ve çoklu noktaya iletişim yeteneğine de sahiptir [47].

▪ **SIP:** IETF tarafından VoIP işaretleşmesi için tanımlanmış bir protokoldür. SMTP ve HTTP gibi var olan protokolleri temel alır ve HTTP’nin kullandığı web adresleri ile birbirine yakın metin içerikli bir sentaks kullanır. Çoklu ortam ya da ses oturumlarının başlatılması, değiştirilmesi ve sonlandırılması için kullanılır. SIP bir veri taşıma protokolu değildir. Veriyi RTP gibi bir protokolle gerçek zamanlı taşıyabilir [47].

6.1.3 Ses kalite parametreleri

VoIP sistemler PSTN’de görölmeyen, konuşma kodlama düzeni ve paket kaybına bağılı işaret zayıflaması, değişken ve sabit ağ gecikmesi gibi çeşitli bozulmalar gösteren yeni kodlama ve iletim tekniklerini temel alır. Yüksek kalitede ses hizmeti verilmesi için bu bozulmaların etkileri en aza indirilmelidir. VoIP için bağlayıcı QoS gereksinimleri; iyi ses kalitesini yakalamak için sıfır ya da düşük paket kaybı (<%1), interaktif iletişim için düşük gecikme (tercihen <150ms, sınır <400ms) ve kesintisiz çalma için sıfır veya düşük gecikme değişmesidir [50].

▪ **Gecikme:** Telsiz ses iletimi paket gecikmesi gibi büyük bir problem getirir. Yayınım gecikmesi, serileştirme gecikmesi, kanal kodlama gecikmesi ve MAC

katmanında ortam erişim gecikmesi toplam gecikmeyi etkileyen faktörlerdir. Benzer şekilde ağ katmanında yönlendirme ve kuyruklama gecikmeleri olduğu gibi uygulama katmanında paketleme ve paket açma gecikmeleri, algoritmik gecikmeler, kod çözme gecikmeleri hesaba katılır. Çalışmalar göstermiştir ki gecikme 150 ms'nin üzerinde yükseldiğinde ses işareti kullanılmaz hale gelir. Çizelge 6.2'de çeşitli kodekler için MOS (*Mean Opinion Score*) kalite değerleri ve gecikme süreleri gösterilmiştir [47].

Çizelge 6.2 : Farklı kodeklerin MOS kalite değeri ve gecikme değerleri

Kodek	Bit Hızı (Kb/s)	MOS	Gecikme (ms)
G.711	64	4.5	0.125
G.723.1	5.3-6.3	3.6-3.98	30
G.726	16-24-32 (genelde)-40	4.2	0.125
G.728	16	4.2	2.5
G.729	8	4.2	10

▪ **Paket kaybı:** Paket kaybı yeniden iletimin bir seçenek olarak düşünülemeyeceği ses iletiminde, işarete çok fazla zarar verir. Gelişmiş hata tespit ve düzeltme algoritmaları kayıp paketler tarafından oluşan boşlukları doldurmak için kullanılabilir. Kayıp paket durumunda, eğer paket kayıp oranı %1'in altındaysa, kayıp paket yerine son paketin tekrar kullanılması ses kalitesinin bozulmasını engelleyebilir [51].

▪ **Seğirme:** Ulaşan paketlerin farklı yollar veya farklı kuyruklama zamanları sonucunda iletim süresinin değişmesi ile oluşan paket gecikmesindeki değişmelere seğirme adı verilir. Bu değer genelde çoğu servisi için 50 ms'den azdır. Örneğin iyi bir hizmet 20 ms veya daha az seğirmeye sahip olmalıdır [51]. Seğirme sorunu, kendisini ağ üzerinde karşılaşılan gecikmeye göre uyarlayan uyarlamalı seğirme ara belleği kullanılarak çözülebilir. Öbür taraftan aşırı seğirme tampon belleğin taşmasına neden olabilir. Bu ses akışında düşmelere veya video görüntüsünde kopukluğa neden olur.

▪ **Güvenlik:** WiMAX üzerinden VoIP için ses iletişiminin dinlenmesinin ya da kesilmesinin önlenerek güvenliğinin sağlanması büyük bir problemdir. Kimlik denetimi için çift şifreleme işlemi X.509 ve veri akışı için 152-bit AES,3DES veya 56-bit DES, iletimin güvenliğini sağlayıp trafiğin dinlenebilirliğini oldukça zor hale getirir. WiMAX ayrıca aynı baz istasyonundaki birçok kullanıcının ilettiği veri için koruma sağlayan sanal ağ (VLAN) desteğini de içerir [47].

6.2 Internet Protokolü Üzerinden TV

ITU-T'nin IPTV grubu *IPTV Focus Group*'a göre IPTV; televizyon, video, ses, metin, grafik, veri gibi çoklu ortam hizmetlerinin istenen seviyede servis kalitesi, etkileşimlilik ve güvenlik ile IP tabanlı ağlar üzerinde iletilmesi şeklinde tanımlanır.

Genişbant internet erişimindeki ve VoIP teknolojisindeki gelişmeler IPTV'yi internet servis sağlayıcıları için çok çekici bir uygulama haline getirmiştir. IEEE 802.16e ile birlikte genişbant telsiz erişimde IPTV servisinin telsiz ve gezgin şekilde verilmesi durumu söz konusudur. H.264/MPEG4 AVC gibi gelişmiş kodlama teknikleri ile gerçek zamanlı kodlanmış HDTV servisi mümkündür.

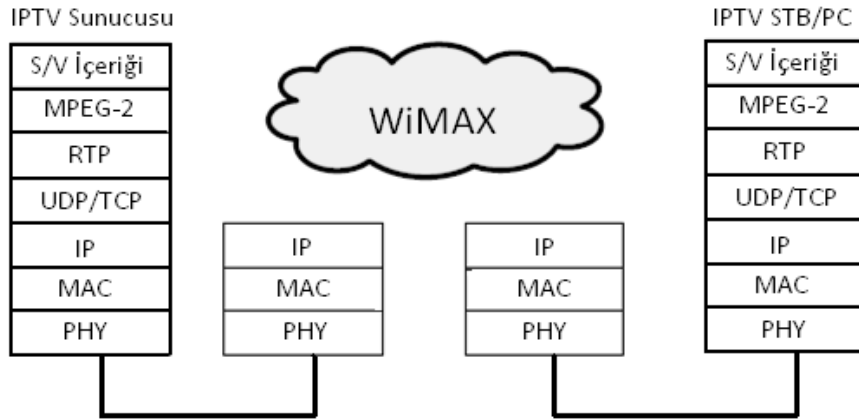
IPTV'nin bandgenişliği tüketen bir hizmet olması nedeniyle noktadan-çoklu noktaya (PMP) kipinde çalışan WiMAX baz istasyonunu kapasite darlığını aşabileceği önerilmektedir. IPTV içerik teslimi için WiMAX PMP kipinde *multicasting* kavramı önemli bir konudur. Bu kavramın değişik servisleri ve yeterli TV kanalını destekleyecek çok kullanıcı ve programlı IPTV altyapısı oluşturmak için gerekli olduğu düşünülmektedir [48]. Çünkü WiMAX'ın büyük özelliklerinden bir tanesi doğasında olan *multicast* yeteneğidir. Bandgenişliği koruyucu bir teknoloji olan *multicast* baz istasyonundan grup iletim için bir grup kullanıcıya paket gönderilmesine izin verir. Öbür taraftan mobil WiMAX'ın taşıt hızındaki iletişimi desteklemesi gerçeği WiMAX'ın bir diğer büyük özelliğidir. Kullanıcılar kablo TV ile mümkün olmayan evleri dışında ya da seyahat eder halde olsalar bile çoğulortam bilgisine erişme kabiliyetine sahiptir.

Bunlardan başka WiMAX çok yüksek veri hızı ve daha yüksek erime sahip olup NLOS ortamlarda çalışabilir. Bandgenişliği ölçeklendirilebilir ve yönetilebilir. İçerikler güvenli iletişim için şifrelenebilir ve taşıt hızlarında gezginlik sağlanabilir. Bu özellikleri dikkate alındığında IPTV hizmetleri video ve ses kalitesi düşürülmeden maliyeti etkin biçimde tasarlanabilir ve yönetilebilir [52].

6.2.1 IPTV servisleri

IPTV servis sağlayıcıları kanal yayıncılarından MPEG-2 biçiminde sabit bit hızında kodlanmış programların direkt olarak alır. MPEG-2 akışı UDP/IP içine paketlenildikten sonra ayrı multicast akışları halinde gönderilir. Bu sırada ayrıca IP QoS uygulanır. Bu akışlar sonrasında IPTV servis sağlayıcısı tarafından telsiz erişim

ile gönderebilir. Servis sağlayıcısı gelen biçimi IP'ye çevirdikten sonra video akışlarını kullanıcıya IP ya da ATM paketlenmiş olarak ulaştırır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1 : IPTV’de kullanılan protokol yığını

Sıkça birbirleriyle karıştırılan herhangi bir üçüncü parti internet servisi üzerinden herhangi bir canlı veya isteğe bağlı video içeriği izlenmesine imkân tanıyan internet TV’de amaç müşterinin *Youtube*, *Google Video* gibi sitelerden direkt olarak video erişimi sağlamasıdır. Çalma kalitesi ve performansı garanti etmez.

Çizelge 6.3 : IPTV-Internet TV karşılaştırması

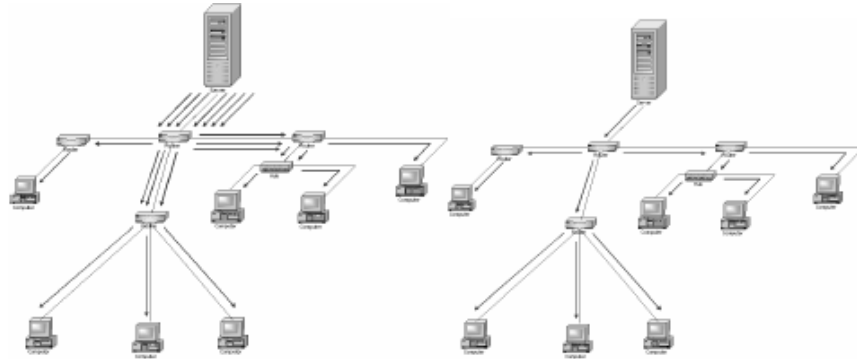
IPTV	Internet TV
Kontrollü Ağ Yapısı	Açık İnternet Ağı
TV Ağırlıklı	PC Ağırlıklı
QoS Garantili	QoS Garantisi Yok
Yayın (<i>Broadcast</i>)	Akış (<i>Stream</i>)
VoD Akışı	İndirme (<i>Download</i>)
EPG	Web Sitesi
İzlediğin Kadar Öde	Bedava

6.2.2 Taşıma ağları

Taşıma ağında genel olarak iki büyük bölüm vardır. İlk olarak yerleşimin boyutuna bağlı olarak erişim ağını müşteriye bağlayan çekirdek taşıma ağı basitçe Gigabit Ethernet olduğu gibi IP/MPLS yanında taşıyıcı seviyede Ethernet kullanan çeşitli dağıtım ağları da olabilir.

İkincisi erişim ağları, bireysel kullanıcıların yerleşimlerine ulaşmakta kullanılır. Günümüzde yaygın olarak başlıca xDSL ve koaksiyel/hibrit fiber kablo veya FTTN gibi fiber teknolojileri kullanılır. Erişim ağlarının bandgenişliği genelde oldukça sınırlı olduğundan bütün kullanıcıların eşzamanlı olarak TV kanallarına erişimini temin etmek için video verisi iletiminde geniş ölçüde *multicast* yöntemi

uygulanmıştır. Bütün taşıma ağı boyunca çoklu canlı içerik akışlarını *unicast* olarak iletme yerine bandgenişliğini koruma ve gereksiz paket kopyalarını engellemek için *multicasting* uygulanır (Şekil 6.2). Burada her bir video verisinin tek bir iletimi aynı canlı içeriği talep eden bir grup istemci tarafından paylaşılır. Verinin başka bir grup kullanıcıya da iletilme gereksinimi durumunda sadece bölgesel sınır yönlendiricileri gibi uygun dallanma noktalarında paket kopyalanır [48].



Şekil 6.2 : Teke ve çoğa gönderim

6.2.3 Gelişmiş video kodlama teknikleri

MPEG-4 bir ISO standardı olup etkileşimli, zengin çoklu ortam sunumlarını belirtir. *Motion Pictures Experts Group* (MPEG) tarafından geliştirilmiştir [53]. En yeni video kodlama standardı olarak bilinen H.264/AVC, Joint Video Team olarak adlandırılan ISO'nun MPEG'i ile ITU-T Video Coding Experts Group işbirliği ile video verisini RTP için kodlamak ve paketlemek üzere tasarlanmıştır. Standart özel olarak paket bağlaşımlı ağlar üzerinden iletim için tasarlanmıştır ve MPEG-2'ye oranla %50 kodlama verimi kazancı sağladığı belirtilmiştir. Ayrıca hata dirençli tasarım ve paket kaybına karşı artmış dayanıklılık getiren önemli parçalarıyla hataya meyilli ortamlarda etkili iletişim ve gelişmiş kaliteyi mümkün kılar [53].

6.2.4 IP ağları üzerinden çoklu ortam akışı

Sıkıştırılmış medya verisi RTP, genelde UDP ve IP başlıklarına paketlenir ve erişim ağı üzerinden iletilir. IP ağları paket kaybı, gecikme ve gecikme seğirmesi getirir ve gecikmedeki değişme ve kayıp paketlerin yeniden iletiminin sağlanması için bir ara belleğe gereksinim duyulur. Diğer taraftan kayıp verinin etkisini hafifletmek için kod çözümü hataya dirençli olmalıdır [53].

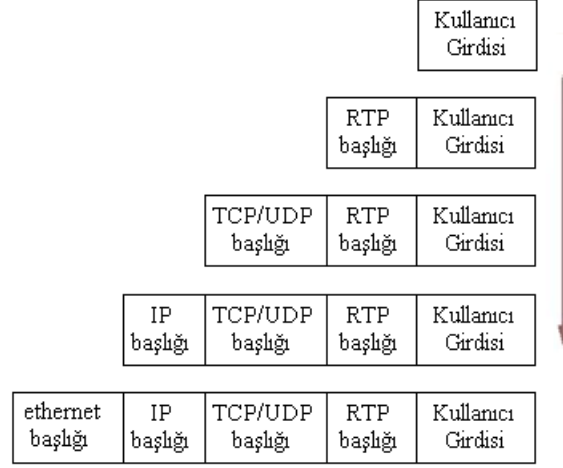
Düşük gecikme kesintisiz akış için gereklidir. [54]'da akıcı bir videonun 50 ms'den daha az seğirmeye, ortalama bir videonun ise 50-300 ms eşikleri arasında olduğu basit bir kalite sınıflandırması öne sürülmüştür.

Örneğin mevcut 802.11a/b/g standartları telsiz kanalın kalitesi zayıf olduğunda modülasyondaki değişmeye bağlı olarak sabit bandgenişliği sağlama yönünde problem çıkarır. Bu IPTV gibi yüksek kalite gerektiren servislerin düzgün çalışması için halledilmesi gereken başlıca meselelerden biridir [50]. Bu yüzden bu tezde en güncel telsiz yerel alan ağı standardı olan 802.11n taslağı üzerinden IPTV test edilmiş ve başarımı ölçülmüştür.

Çeşitli kodlama teknikleri ile SDTV 1-4Mb/s, HDTV 4-12 Mb/s bandgenişliğine gerek duyduğu durumda, her bir evde ortalama 20 Mb/s bandgenişliğine ihtiyaç duyulur. Bu noktada farklı trafik sınıfları arasında bandgenişliği yönetimi kritik bir mesele haline gelmektedir. Bu nedenle WiMAX için etkili bir *multicast* düzeni adaptasyonu oldukça önem arz eder [48].

6.2.5 Ortam akışı için standart protokoller

Gerçek-zaman zorlaması tipik olarak çoklu ortam uygulamalarının iletimi için güvenilirliğe oranla daha önemli bir ihtiyaçtır. Bu yüzden bilhassa gecikmeye yüksek derecede hassas video konferans ve VoIP gibi uygulamalar için bağlantısız ve güvenilir UDP protokolü TCP'ye tercih edilir. Kayıp algılama, hata raporlama ve ortam akışlarının uygun senkronizasyonu gibi özellikler için UDP üzerinde daha sofistike bir protokol gerekir. RTP, *unicast* ve *multicast* uygulamaları destekleyen gerçek-zamanlı medya iletimi için IETF tarafından tasarlanmış bir protokoldür [53]. VoIP verisi IP üzerinde UDP üzerinde RTP kullanılarak iletilir. Bir RTP alıcısı kayıp paketleri saptayabilir ve gönderilen her RTP paketi için bir artan sıra numaralarını kullanarak paketleri yeniden sıralayabilir.



Şekil 6.3 : Gerçek zamanlı iletişim protokol enkapsülasyonları

6.2.6 WiMAX QoS

WiMAX fiziksel katmanda servis önceliklerinin değerlendirmesi için bazı tipler tanımlanmıştır.

▪ **Unsolicited Grant Service (UGS):** Gerçek zamanlı, sabit boyutlu veri paketlerini sabit veri hızında (CBR) temin eder (ör: VoIP).

▪ **Real Time Polling Service (rtPS):** Gerçek zamanlı boyutça farklılık gösteren periyodik aralıklarla üretilen video ve sessizlik bastırılabilir VoIP gibi paket boyutlarının tabiatı gereği değişken olduğu veri paketlerini temin eder.

Çizelge 6.4 : QoS kategorileri

QoS Kategorisi	Uygulamalar	QoS Özellikleri
UGS	VoIP	En fazla sürdürülebilir hız En fazla gecikme toleransı Seğirme toleransı
rtPS	Ses veya video akışı	En fazla rezerve hız En fazla sürdürülebilir hız En fazla gecikme toleransı Trafik önceliği
ErtPS	Hareket algılamalı ses (VoIP)	En fazla rezerve hız En fazla sürdürülebilir hız En fazla gecikme toleransı Seğirme toleransı Trafik önceliği
nrtPS	FTP	En fazla rezerve hız En fazla sürdürülebilir hız Trafik önceliği
BE	Veri transferi, web tarama vb.	En fazla sürdürülebilir hız Trafik önceliği

▪ **Non Real Time Polling Service (nrTPS):** Gecikme gereksinimi olmayan bağlantılar için tasarlanmıştır. Değişken paket boyutu ile gecikme toleranslı veriyi minimum veri hızını belirterek destekler (ör: FTP). nrTPS, BE'ye benzer olup sadece minimum bandgenişliğini garanti etmesi yönünden farklılık vardır.

▪ **Best Effort (BE):** Servis kalitesi için herhangi bir garantide bulunmaz. Minimum servis gerekmeyen veri akışlarını destekler ve paketler mevcut alan tabanlı yürütülür (ör: Web surf).

▪ **Extended real-time variable rate (ertPS):** 802.16e-2005'e eklenmiştir. Garanti edilmiş veri hızı ve gecikmeli gerçek zamanlı uygulamaları destekler. Bu servis rtPS'e abone olup bazen UGS trafiği gibi davranan sessizlik bastırılmalı VoIP gibi uygulamalar içindir [57].

6.2.7 Video akışı kalite değerlendirmesi

Hâlihazırda video kalite değerlendirmesi için standardize edilmiş bir yöntem yoktur. Talebe bağlı video akışında, kullanıcı tarafından görülen video kalitesinde bandgenişliği ve seğirme önemli rol oynar. Video klibi çerçeveleri kullanıcıda düzgün çalma için yeterli hızda ulaşmalıdır. Genelde bu saniyede 25 veya 30 çerçevedir. Bandgenişliği istenen video kalitesini etkileyen ana etkidir. Bir kullanıcının istenilen bit hızında video oynatım süresi miktarı da video kalitesinin bir göstergesidir. Çerçeveler arası seğirme kullanıcı tarafından kolayca algılanabilir. Video çerçeveleri paketler içinden ağ üzerinden iletilirken kayıp veya gecikmiş paketler müşteride çerçeve düşmelerine neden olabilir. Akıcı video akışı için düşük seğirme önemli bir gereksinimdir [57]. Örneğin bir çalışmada [54] akıcı videonun 50 ms'den az, rahatsız edici videonun 300ms'den fazla ve ortalama videonun bu iki eşik değer arasında seğirmeye sahip olduğu seğirmeyi temel alan basit bir kalite sınıflandırması öne sürülmüştür

6.3 Mobilite

802.16e profiliyle birlikte gelen aktarım (*handoff, handover, roaming*) desteği, onun mobil sıfatı taşımamasını sağlayan en önemli özelliklerden biridir. Mobil iletişim sistemlerinde, araç bir hücreden diğerine geçerken taşıyıcının otomatik olarak yeni hücrenin frekanslarından birine geçmesine aktarım adı verilir. 802.16e profili, yumuşak ve sert aktarım (*soft/hard handoff*) olmak üzere farklı aktarma

seçeneklerine sahiptir. Sert aktarım, kurmadan önce kopar (*break-before-make*) yaklaşımını temel alıp kullanıcının aynı anda tek bir baz istasyonuna baēlı kalmasına imkan tanır. Bu yumuşak aktarıma göre daha basit yapı sunsa da gecikme oranı daha yüksektir. Yumuşak aktarım GSM teknolojisine benzer şekilde, koparmadan önce kur (*make-before-break*) yaklaşımı ile yeni bir baz istasyonuyla baēlantı kurulana dek, eski baēlantının kopmasını engeller. Sahip olduēu düşük gecikmeli istasyon deēiřtirme zelliēi sayesinde, VoIP veya çevrim içi oyun gibi gerçek zamanlı uygulamalar için gerekli performansı gösterebilir. Sert aktarım ise dosya aktarımı gibi tipik veri iletimi gerektiren uygulamalar için daha uygundur.

Aktarım esnasında MN kesintisiz hizmet almak istese de baēlantı kaybı yaşayabilir ve ekstra güvenlik tehditlerine maruz kalabilir. VoIP gibi gerçek zamanlı etkileşimli hizmetler durumunda bu toplam IP seviyesi gecikmenin -MN'un IP paketi gönderip alamadıēı zaman aralıēı- aşırı seēirmeyi engellemek için 50ms sınırları içerisinde olmasını gerektirir [59]. Fakat aktarımların büyük oēunluēu paket kaybı ve işaretleşme ve yeniden yapılandırma yüklerinden kaynaklanan gecikmeler nedeniyle bu beklentileri karşılayamamaktadır. Gezgin noktanın hareketi neticesinde erişim noktaları deēiřtiēinde, eēer farklı subnete bir hareket söz konusu ise iletişimin devamı için üçüncü katman IP adreslerinin de deēiřmesi gerekir. Bu sorunu zmek için IETF tarafından *mobil IPv4* ve *mobil IPv6* [60] protokolleri geliştirilmiştir.

Yavaşlamış ya da yarıda kesilmiş aē baēlantılarının uygulamaların sona ermesine veya kullanılmayacak kadar yavaşlamasına neden olmasından dolayı telsiz aēlarda aktarım performansının ölçülmesi önemli bir noktadır. Bu durum UDP ve RTP gibi protokollerin aēırlařmasına, ardı ardına gelen kayıp veri paketleri nedeniyle telsiz aē üzerinden ses iletimi ve ortam akışı gibi uygulamaların düşmesine neden olur.

6.3.1 WiMAX alışma ve kabul kontrolü kipleri

802.16 standardı iki temel topolojik çalışma kipini destekler: PMP ve Mesh (MPMP) alışma kipleri. PMP kipinden abone veya abone istasyonu merkezi bir hub gibi davranan BS ile iletişim kurar. BS kendi ve kümesindeki SS'lerin arasındaki ařaēı ve yukarı baēlantı iletimini düzenler. Mesh alışma kipi ise daha çok multi hop ortam olarak karakterize edilir ki bütün SS'ler diēer SS'lerle olduēu gibi BS ile de iletişim kurabilir.

Bu modlardan ayrı olarak 802.16'da tanımlanan GPC veya GPSS olmak üzere iki kabul kontrol örneği veya trafik verme düzeni vardır. GPC'de bir SS'den ulaşan her bir bağlantı dikkate alınırken GPSS'de her SS, BS'ye bir tek bandgenişliği isteği göndermeden önce kendi bağlantı kabulünü yönetir. Dolayısıyla iki çalışma kipinde iki kabul kontrolü olmak üzere dört farklı birleşim mevcuttur [61].

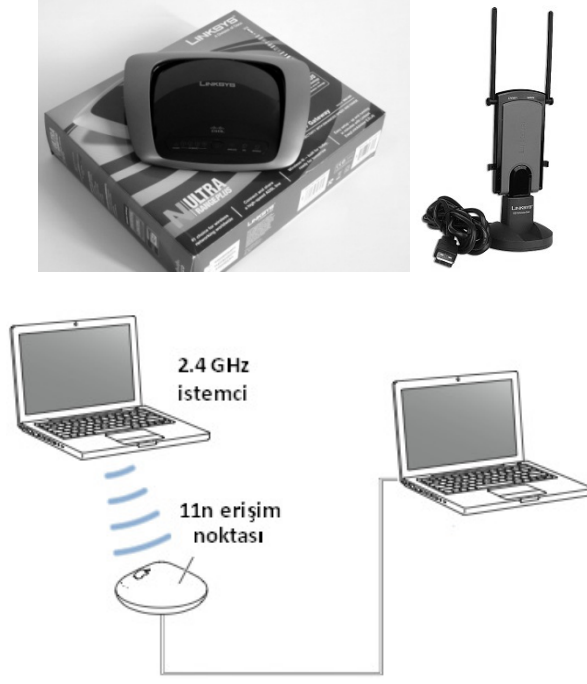
7. 802.11n AĞ ANALİZİ

Bu bölümde, MIMO çalışan 802.11n teknolojisinin başarımı incelenmiştir. Veri, ses ve video analizi için iki istemci ve bir erişim noktası kullanılırken aktarım testi için iki erişim noktasında yararlanılmıştır. Ölçüm için daha önce birçok akademik çalışmada da kullanılmış yazılımlar tercih edilmiştir. İşaret gücü için *NetStumbler* 0.4.0 [69], TCP ve UDP trafik üretici ve analizi için *IPerf* 1.7.0 [70], VoIP testi için *D-ITG* 2.7.0 [71] ve ağ üzerinden video akışı için *VLC* 0.9.9 [72] yazılımlarından faydalanılmıştır.

▪ *NetStumbler*: Telsiz noktaları tespit eden, sinyal gücünü belirleyen ve analizini ayrıntılı bir şekilde görsel arayüzüne aktaran ücretsiz bir yazılımdır. Ayrıca bağlantı kopmalarını, sinyal gücü zayıflamalarını, uygun donanım olması durumunda GPS aracılığı ile yerlerini belirlemeyi, sinyal kalitesini ve mesafesini ölçme gibi çeşitli işlevlere sahiptir.

▪ *D-ITG (Distributed Internet Traffic Generator)*: IPv4 ve IPv6'yı destekleyen açık kaynaklı bir ağ trafiği üreticidir. Bu üretici bütün Linux ve Windows platformları için uygundur ve tek bir istemciden eşzamanlı trafik akışlarını destekler. Trafik akışları TCP, UDP gibi farklı tiplerde de olabilir. VoIP iletişimini benzetebilir. G.711, G.723 ve G.729 gibi bazı kodlama tekniklerini desteklemektedir.

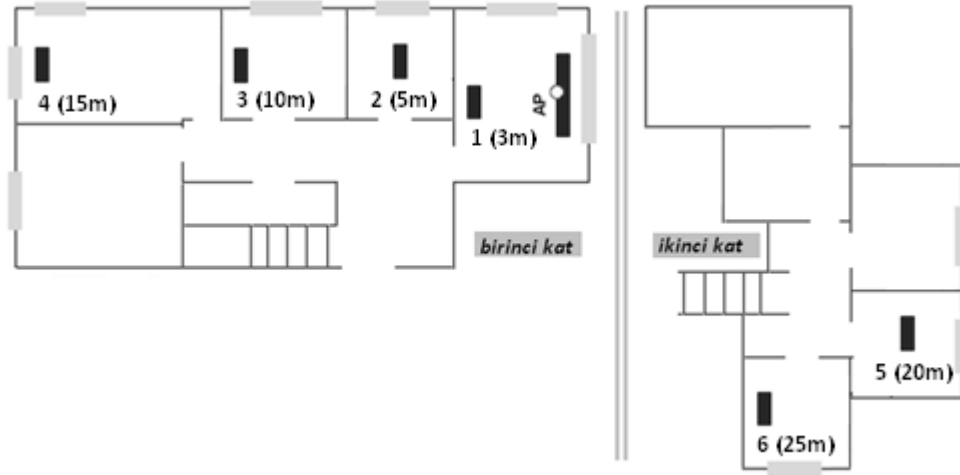
▪ *IPerf*: C++ tabanlı bu yazılım kurulduğu istemci ve sunucu arasında yapay trafik oluşturur. TCP ve UDP için veri hızı, gecikme gibi parametreleri ölçer. Gecikme ölçümü için iki farklı ölçü tanımlanabilir: OWD (tek yönlü gecikme) ve RTT (gidiş dönüş süresi). Zamana bağlı doğru ölçümlerde tek yönlü gecikmenin kullanılması için bütün sistemlerin senkron hale getirilmesi gerekmektedir. Bu yüzden günümüzde kullanılan RTT seçimi daha uygun gözükmektedir.



Şekil 7.1 : Başarım analizinden kullanılan cihazlar ve topoloji

Bu çalışmada yapılan bütün ölçümler Şekil 7.1’de gösterilen 802.11n test ortamında yapılmıştır. Kullanılan cihazların özellikleri Çizelge Ek.1’de verilmiştir. Sunucu bilgisayar Linksys WAG160N erişim noktasının FastEthernet portuna bağlanırken istemci yine aynı üreticinin WUSB300N-RM adaptörü kullanarak 802.11n standardında bağlanmıştır. Erişim noktasında 2 gizli anten bulunurken istemcide de 2 anten bulunmakta böylece 2x2 MIMO iletişim ortamı oluşmaktadır. Etrafta girişime yol açacak telsiz cihazların girişiminden korunmak için uygun koşullar sağlanmış örtüşen yada girişime neden olacak başka ağlar bulunmamıştır. 2.4 GHz bandında çalışan bu cihazlar 802.11n’nin daha öncede bahsedilen bir özelliği olan 40 MHz kanal kullanılmaktadır.

Ölçümler için iki katlı 200 m² ortalama bir ev ortamı kullanılmıştır. Duvarlar tuğla, beton ve demirden inşa edilmiştir. Erişim noktasının ve ölçümlerin yapıldığı noktaların konumları ve uzaklıkları Şekil 7.2’de gösterilmiş ve numaralandırılmıştır. Bütün testler ortalama 2 dakika sürmüştür.



Şekil 7.2 : Ölçüm yapılan noktalar ve erişim noktasına uzaklıkları

7.1 Veri İletimi

Yapılan testlerde öncelikle erişim noktası ile aradaki mesafe arttıkça ve araya engeller girdikçe sinyal seviyesindeki düşüş ve buna bağlı olarak işletim sisteminden görülen teorik hız kaybı üzerinde durulmuştur. Ağ performansını sağlıklı görmek için kolaydan zor koşullara ilerlenerek fark görülmeye çalışılmıştır.

Çizelge 7.1 : Sinyal gücü ve 1KB paketin ortalama gidiş-geliş süresi

Konum	Sinyal gücü (dBm)	PHY hızı (Mb/s)	RTT (ms)
1	-30	300	2
2	-44	270	3
3	-56	243	5
4	-67	162	7
5	-74	81	11
6	-87	27	14

Araya çok sayıda engelin girdiği, sinyal gücünün en düşük seviyeyi gördüğü en uzak konumda bile fiziksel katman hızı klasik 802.11g cihazlara oranla çok daha üstün bir değer olan 27 Mb/s olarak görülmüştür. Bunun üst katmanlarda hangi veri hızına karşılık geldiği sonraki testlerde incelenmiştir. 2.4 GHz bandında çalışması mümkün çok fazla teknoloji olduğu için bir başka alternatif olan 5 GHz frekansının kullanılması girişimi azaltacak ve daha yüksek işaret gücü sağlayacaktır.

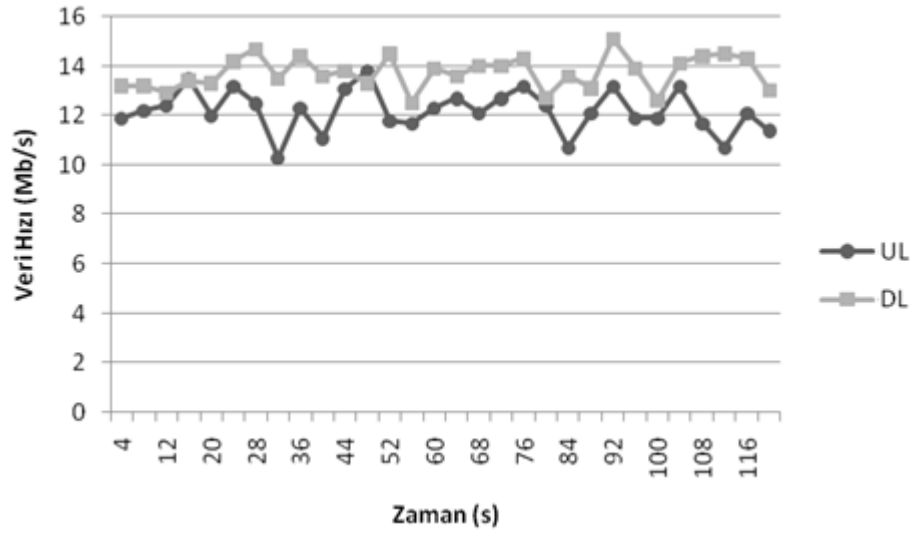
Erişim noktasının yanına aynı frekansta komşu kanalda çalışan 802.11g bir erişim noktası konulduğunda sinyal gücü girişimin etkisiyle 10-15dBm arasında değişen

azalmalara yol açmıştır. Kullanılan 40 MHz'lik kanallar kapasiteyi artırmasının yanısıra başka telsiz aygıtların olduğu bir ortamda çakışma olasılığını artırarak yakın kanallarda girişim gibi sorunları da doğurabiliyor.

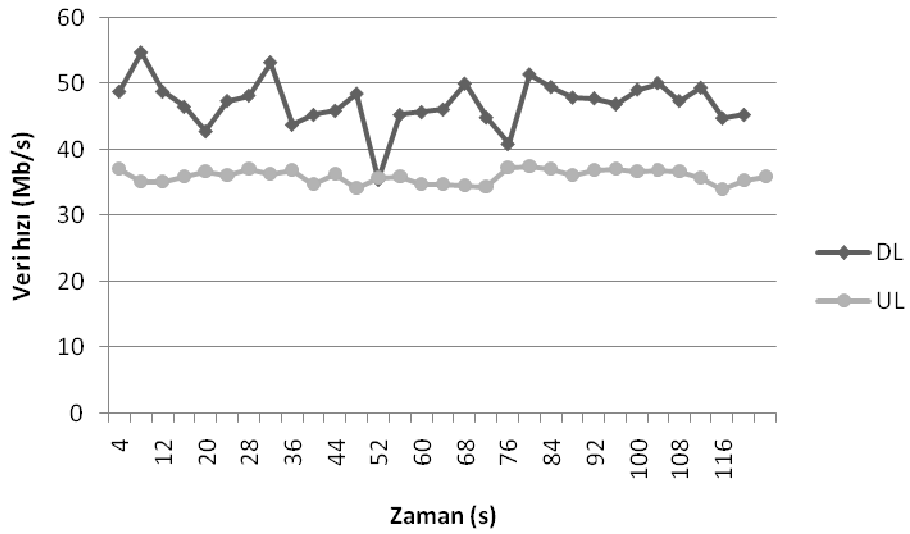
Çizelge 7.2 : Farklı konumlarda ortalama TCP veri hızları

Konum	Alım (Mb/s)	Gönderim (Mb/s)
1	47,3	36,6
2	29,3	25,1
3	27,7	22,8
4	22,6	17,5
5	15,6	2,81
6	6,85	1,5

Mevcut 802.11n telsiz sistemin kabloya göre performansını karşılaştırmak amacıyla öncelikle UTP Cat5e kablo ile 802.3 Ethernet standardının başarımı ölçülerek karşılaştırma için kullanılmıştır. Buna göre kablolu olarak birbirine bağlı sunucu ve istemci arasında IPerf ile kurulan maksimum TCP bağlantı hızı 79,2 Mb/s olarak görülmüştür. Diğer taraftan istemci belirtilen konumlarda telsiz olarak çalıştırılmıştır. Çizelge 7.2'de görülen elde edilmiş değerler ile karşılaştırıldığında mevcut sistemin, arada engel olmaksızın en kısa mesafede yani en iyi şartlarda 22 Mb/s hıza ulaşan yada aynı test ortamında ortalama 13,7-12,2 Mb/s aşağı-yukarı bağlantı performansı sunan 802.11g telsiz sistemlerden çok daha iyi performans gösterdiği ve yakın mesafede kablonun gösterdiği performansa yaklaştığı görülmektedir. Örneğin 4x4 gibi farklı MIMO yapılandırmaları ve önceki bölümlerde bahsedilen 802.11n özelliklerinin kullanılmasıyla çok daha üstün başarımın sağlandığı çeşitli çalışmalarda ifade edilmiştir.



Şekil 7.3 : 802.11g erişim noktası ile TCP performansı

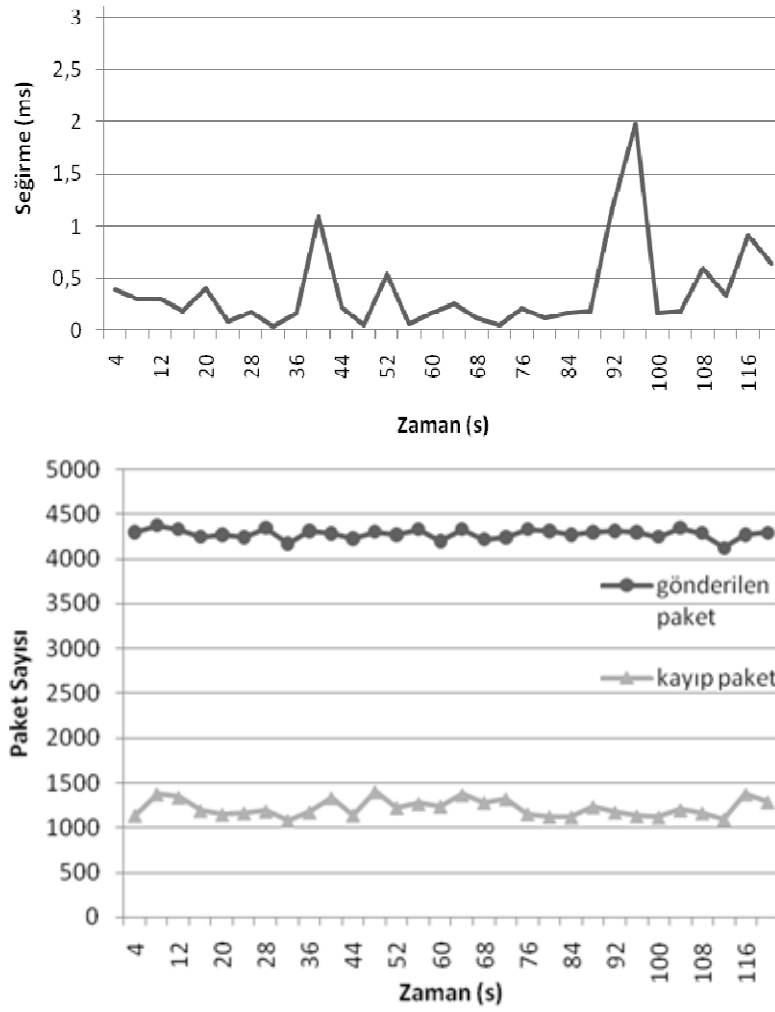


Şekil 7.4 : 802.11n erişim noktası ile ölçülen TCP performansı

Taşıma katmanı protokollerinden bir diğeri olan ve daha çok gerçek zamanlı ses, görüntü akışları için tercih edilen UDP performansı da ölçülerek servis kalitesi için büyük öneme sahip seğirme, gecikme ve paket kaybı oranları verilmiştir. İyi bir bağlantı kalitesi için paket kaybı %1'in altında olmalıdır. Yüksek paket kaybı oranı örneğin TCP için birçok segmentin yeniden gönderimini gerektirecek dolayısıyla bandgenişliğini etkileyecektir. Seğirme basit olarak gecikmenin değişimidir. Gecikme süresine bağlı değildir. Örneğin yüksek gecikme ve düşük seğirmeli

bağlantılar mümkündür. Seğirme değeri aramayı bitirebileceği için özellikle VoIP desteği olan ağlarda daha önemlidir.

Buna göre bandgenişliğinin tam kullanılarak iletimin yapıldığı 1.konumdaki durumda aşağı bağlantıda toplam seğirme değeri 2,85 ms iken paket kaybı %29 olarak ölçülmüştür (Şekil 7.5). Seğirme değeri her ne kadar düşük olsada bu durumda belirtilen değerdeki bağlantı için servis kalitesinin yüksek olmadığı, paket kaybının fazla olduğu görülmektedir. Aynı koşullarda 802.11g için yapılan testte 3,5ms seğirme değeri ve %74 paket kaybı görülmüştür.



Şekil 7.5 : 802.11n için UDP seğirme ve paket kaybı değişimi

7.2 Ses İletimi

Ses iletimi testinde D-ITG yazılımı ile istemciden sunucuya doğru çeşitli sayılarda VoIP iletimi gerçekleştirilmiştir. Ölçüm en iyi ve en kötü durumları görmek amacıyla sinyal seviyesinin en yüksek ve düşük olduğu 1. ve 6. konumlarda yapılmıştır. Kullanılan VoIP testinde kodek olarak saniyede 33 paket gönderilen G.729.3 kullanılmıştır.

Çizelge 7.3 : 1.konumda farklı sayıda VoIP bağlantısı

Akış Sayısı	Ortalama Gecikme (ms)	Ortalama Seğirme (ms)	Ort. Veri Hızı (kb/s)	Ort. Paket Hızı (pkt/s)	Kayıp Paket	%
1	12	0,9	10	33	0	0
5	126	0,8	49	162	0	0
30	209	0,4	285	938	0	0
40	236	0,5	364	1199	47	0,06
50	330	0,5	445	1464	385	0,4
60	385	2,2	504	1658	1224	1,14

Yapılan testlerin sonuçları Çizelge 7.3 ve 7.4'te verilmiştir. Buna göre 1. konumda paket kaybı açısından bakıldığında ve %1 eşik değeri göz önünde bulundurulduğunda 50 kullanıcıya kadar uygun görülmektedir. Fakat gecikme değeri için 200 ms sınır alındığında bu değerin üzerindeki iletimlerde istemci ve sunucu tarafındaki kullanıcıların birbirlerini duymak için çok fazla beklemeleri gerekecektir. Buna göre 30 kullanıcı üzeri uygun gözükmemektedir. Tabii ki bu akışların farklı cihazlar üzerinden üretildiği düşünüldüğünde girişim nedeniyle link kalitesi düşecek buda gecikmeyi artıracaktır. Çeşitli QoS servislerinin entegre edilmesi ile bu değerin düşmesine yardımcı olacaktır. Aynı test 802.11g erişim noktası kullanan sistem ile yapıldığında 30 ve üzeri akışlar için gecikme süresi saniyeler mertebesinde bulmaktadır. Böyle bir durumda ses iletimi yapılması uygun değildir.

Çizelge 7.4 : 6.konumda farklı sayıda VoIP bağlantısı

Akış Sayısı	Ortalama Gecikme (ms)	Ortalama Seğirme (ms)	Ort. Veri Hızı (kb/s)	Ort. Paket Hızı (pkt/s)	Kayıp Paket	%
1	13	0,9	10	33	0	0
5	172	4	49	163	9	0,09
60	884	11,4	490	1611	3266	2,89

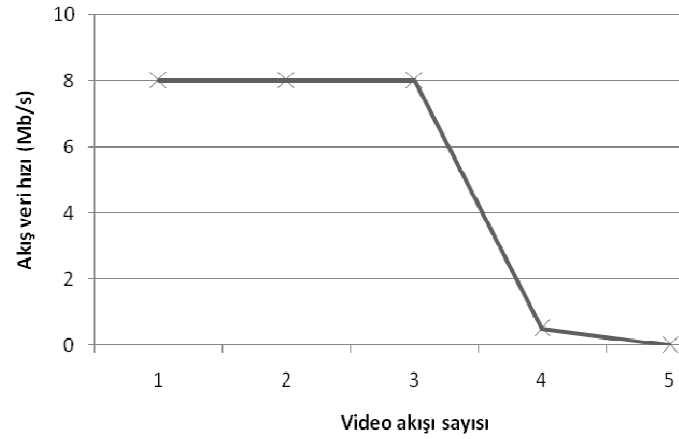
6.konumda yani en düşük sinyal seviyesinde yapılan testte ise en fazla 5 akış için uygun değerler yakalanmış, bunun üzerindeki akışların ses iletimi için uygun olmadığı görülmüştür.

Diğer taraftan aynı anda veri iletiminin olduğu durum oluşturularak bu durumda ses iletiminin gösterdiği başarımlar ölçülmüştür. 1.konumda on VoIP akışının yanında bandgenişliği TCP bağlantısı ile doldurulduğunda 35 Mb/s hıza ulaşılmış, VoIP açısından ortalama gecikme 216 ms, seğirme 7 ms olduğu görülmüştür. Paket kaybı olmamasına rağmen diğer iki parametre eşiğin altında kaldığı için sistemin bu şartlar altında on akıştan daha azına hizmet verebileceği söylenebilir.

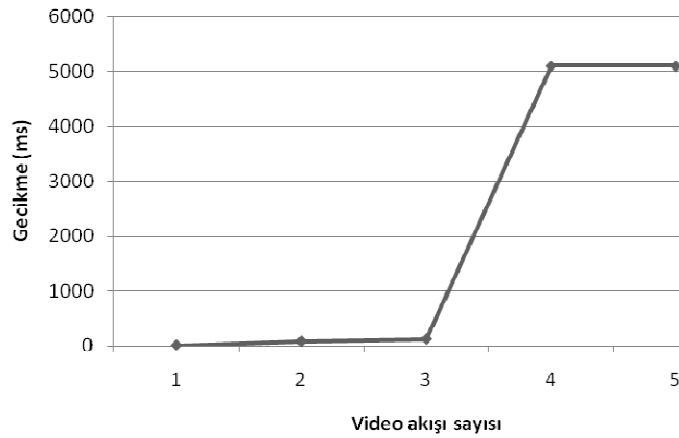
6.konumda 5 eş zamanlı VoIP iletimi başlatılırken aynı şekilde bandgenişliği TCP akışı ile doldurulmuş, 1,4 Mb/s ortalama hıza ulaşılırken VoIP için ortalama 1130 ms gecikme, 120 ms seğirme ve %1,1 oranında paket kaybı görülmüştür. Üç parametre de eşik değerlerin altındadır. Sistem üzerinde gerçek zamanlı veri akışına öncelik sağlayacak QoS ile bu durum çözülebilir. Ara belleğin büyütülmesi ile seğirme oranı azaltılabilir.

7.3 Video İletimi

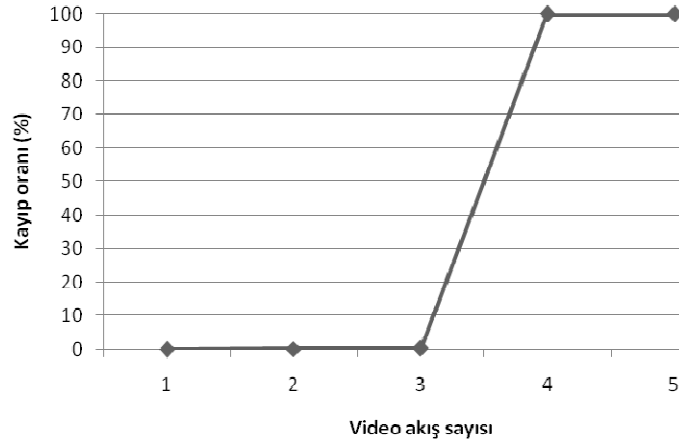
Günümüzde çoğu HDTV yayınları MPEG-2 kullanırken gelecekte daha fazla yayıncının MPEG-4 AVC kullanması öngörülmektedir. MPEG-2 HDTV için 18 Mb/s gerekirken MPEG-4 AVC kullanan HDTV yayını için 8 Mb/s yeterlidir [73]. Her ne kadar 802.11n HDTV gibi video uygulamaları için yeterli bandgenişliğini sağlasa da, bu telsiz ağ üzerinden sağlanabilecek video akışlarının sayısı çerçeve birleştirme gibi özelliklere de yüksek ölçüde bağlıdır. Bu yüzden ölçüm için sunucuda 8 Mb/s bit hızına sahip, 25 fps ve 1266x720 çözünürlükte akışlar istemciye unicast olarak gönderilmiştir. Sunucu ve istemci olarak VLC yazılımı kullanılmıştır. UDP'deki yüksek veri kaybı nedeniyle TCP üzerinden akış sağlanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar Şekil 7.6'da verilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.6 : Video akış sayısı ile değişen gecikme (b) ve kayıp oranı (c)

Video trafiğini arka plan trafiğine göre önceliklendirmek önemli bir fonksiyondur. Kullandığımız telsiz yönlendirici video trafiği için özel bir önceliklendirme sunmamaktadır. Sonucunda video veri hızı arka plan trafiğiyle orantılı şekilde gerilemektedir. Test ortamında 2.konum yani arada bir duvarın bulunduğu ortalama bir yer tercih edilmiş, bu konumda eş zamanlı üç video aktarımının makul sınırlar içinde kaldığı, dördüncü akış ile beraber bütün akışların ciddi şekilde bozularak

izlenemez hale geldiği ve akışların kesildiği gözlenmiştir. Görülen performans 802.11n'nin tüm özellikleri ile kullanıldığı ve ortamda birden fazla istemcinin bulunduğu durumda değişiklik gösterecektir. Dolayısıyla üreticiye fazlasıyla bağlı bu performans için taslağın standart haline gelmesi ile beraber daha doğru ölçümler yapmak mümkün olacaktır.

7.4 Aktarım Testi

Gezginlik testinde 2 adet verici kullanılmış, birisi yönlendirici olarak diğeri ise erişim noktası olarak ayarlanmıştır. İkisinde aynı ağda yer aldığından 3.katman aktarım gecikmesi hariç tutulmuştur. Yapılan ölçümlerde aktarım süresinin hesaplanması ve aktarım işlemine karar verenin gezgin cihaz olması nedeniyle kullanılan telsiz ağ adaptörünün hangi SNR değerinden sonra aktarıma karar verdiğinin bulunması hedeflenmiştir. Aktarımın başlaması için SNR değerinin belli bir seviyenin altına düşmesi gerekmektedir.

İki cihaz arasında çok sayıda aktarım yapılarak NetStumbler aracılığıyla bulunan ortalama sinyal gücü yaklaşık -82 dBm'dir. Özetle kullandığımız ağ kartı yaklaşık olarak bu değerleri gördükten sonra aktarıma karar vermektedir.

Telsiz ağıımızdaki aktarım gecikmesi IPerf ile sunucu ve istemci arasında aktarım yapılarak ve paketler analiz edilerek bulunmuştur. Bu değer ortalama olarak 3,67 saniyedir. Bu sonuç herhangi bir VoIP yada görüntü akışı uygulamasını desteklememektedir. Daha önceden de belirtildiği gibi VoIP uygulamaları içi belirlenmiş kesinti süresi 50 ms'dir.

7.5 Sonuçlar ve Yorumlar

Bu kısımda telsiz yerel alan ağlarında bir sonraki adım olarak gözüken 802.11n taslağında 2x2 MIMO olarak çalışan test ortamında veri, ses, görüntü ve aktarım testleri yapılmıştır. Bina içi ortamda kabloya yakın bir değerde iletişim kurmak ve klasik 802.11a/b/g SISO sistemlerden üstün performans görmek için 802.11n MIMO sistemler tercih edilebilir. Henüz taslak halinde olsada bu sistem ile birlikte çok yollu sönümleme etkisi oldukça azalmakta ve çok daha iyi bir başarımlar görülmektedir. Klasik 802.11g sistemden 4 kat daha iyi veri hızı başarımlar göstermektedir. Bununla

beraber kapsama alanı artmakta, aynı noktada daha yüksek sinyal gücü ile beraber daha hızlı iletişime olanak sağlanmaktadır.

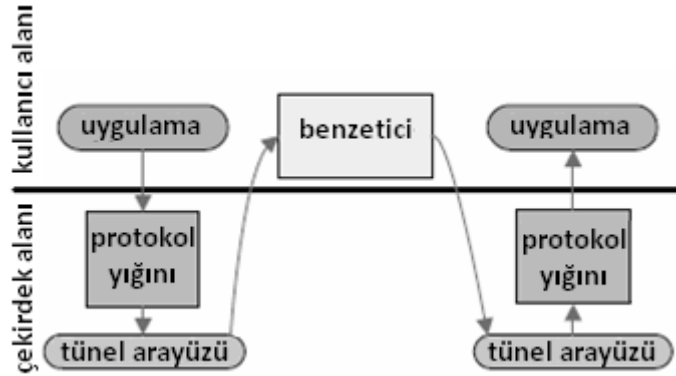
Test edilen taslak 11n donanımının tipik bir ev ortamında video dağıtımı için uygun olduğu ve birden fazla video akışını taşıyabileceği görülmüştür. MIMO paket kaybını azaltarak daha kararlı bir bağlantı getirmektedir. Ses ve video için gerekli QoS yapılarının entegre edilmesi ile beraber çok daha iyi performans gösterebilir.

Aktarım süresi beklenen değerin çok üzerinde çıkmış ve bu taslağın gezginlik desteği için erişim noktaları arası haberleşme için ve hızlı aktarım için 802.11r gibi ek protokollere ihtiyacı olduğu düşünülmektedir.

8. 802.16e AĞ BENZETİMİ

802.16e ve bu teknolojiyi kullanan ürünler henüz ülkemizde yaygın kullanıma sahip olmadığından inceleme NCTUns benzetim yazılımından faydalanılarak yapılmış ve sonuçları irdelenmiştir.

NCTUns: Benzetim için 802.16e desteği sunan açık kaynak kodlu ve grafik arayüzüne sahip NCTUns yazılımının güncel 5.0 sürümü kullanılmıştır. Temel olarak Harvard ağ benzeticisinin geliştirilmesi ile oluşturulan NCTUns, Fedore Core 9 dağıtımında yer alan Linux 2.6.25 kernelini yeniden oluşturup Linux'un gerçek hayatta kullandığı TCP/IP protokol yığınıyla çalışarak yüksek derecede aslına uygun benzetim sonuçları sunmaktadır. C++ dili ile yazılmıştır [65].



Şekil 8.1 : NCTUns benzetimcisi mimarisi

8.1 Kurulum ve yapılandırma

Benzetim yazılımının koşturulduğu bilgisayarın genel özellikleri Çizelge 8.1’de verildiği gibidir. Yazılım güncel versiyonu [65] adresinde paket halinde bulunmaktadır. 2.0 sürümünden itibaren NCTUns’nin desteklediği işletim sistemleri sadece Linux’tur. Güncel sürüm, Linux kernel 2.6.25’i kullanan Red Hat’s Fedora Core 9 dağıtımı desteklenmektedir.

Çizelge 8.1 : Benzetimin yapıldığı donanımın özellikleri

İşlemci	Intel(R) Quad-Core Q6600 CPU @ 2.40 GHz
Anakart yongaseti	Intel Q965 (Broadwater-GC)
Bellek	4096 MB DDR2
Sabit disk	320 GB SATA
Ağ Kartı	Intel(R) 82566DM Gigabit Network Connection
İşletim Sistemi	Fedora 9 Linux kernel 2.6.25.9

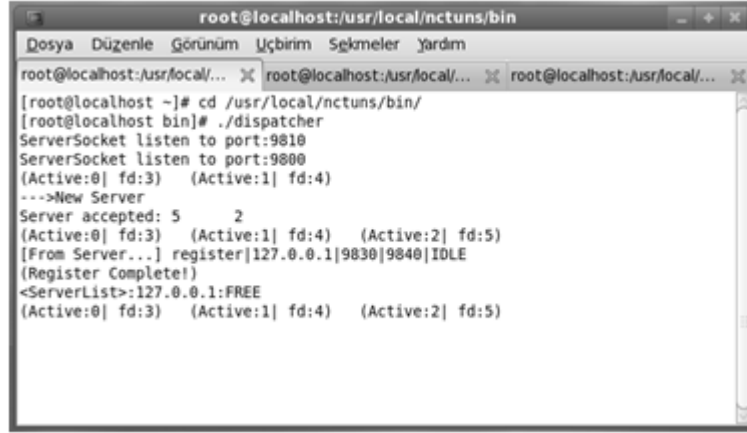
Sıkıştırılmış paket açıldıktan sonra ./install.sh betiği ile kurulumu başlanır. Bu betik NCTUns 5.0 için yamanmış önceden derlenmiş Linux kernel imajını kuracaktır. Ayrıca bütün çalıştırılabilir programlar inşa edilir ve varsayılan alt dizinlerine kopyalanır. /usr/local dizininde nctuns dizini oluşturulur. Bu dizin altında bin, etc, tools, lib gibi alt dizinler oluşturulur.



Şekil 8.2 : NCTUns kurulumu sonrası FC9 ve yamalı kernel

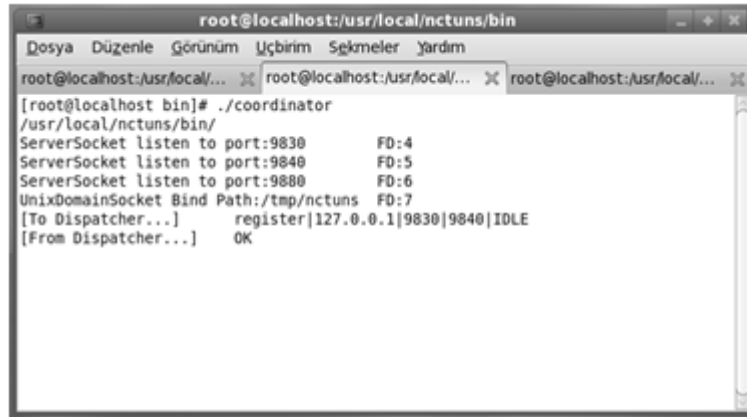
Kurulum tamamlandıktan sonra bilgisayar, yeniden başlatılır ve şekilde de görüldüğü gibi üst sıradaki yamalı kernelden root hesabı alanı açılır. *Dispatcher* ve *coordinator* programları başlatılır. *Coordinator*'un düzgün çalışabilmesi için *dispatcher*'ın iletişim kurması dolayısıyla kullandığı port'u ve IP numarasını bilmesi gerekir. *Dispatcher*'ın *coordinator* ile haberleşmek için kullandığı öntanımlı port 9810, nctunsclient ile 9800 olup, IP adresi 127.0.0.1 olabileceği gibi makinenin geçerli IP'si de olabilir (160.75.73.14 gibi). GUI ise *dispatcher* ile haberleşmek için varsayılan olarak 9800 numaralı portu kullanır. Sırasıyla; /usr/local/nctuns/bin

dizinine girilir, önce *dispatcher* ve *coordinator* çalıştırılır, son olarakta *nctunsclient* çalıştırılarak NCTUns benzetici başlatılmış olur.



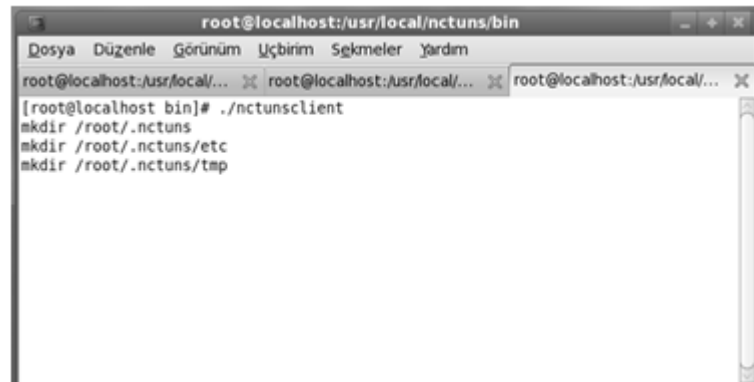
```
root@localhost:usr/local/nctuns/bin
Dosya Düzenle Görünüm Uçbirim Sekmeler Yardım
root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X
[root@localhost ~]# cd /usr/local/nctuns/bin/
[root@localhost bin]# ./dispatcher
ServerSocket listen to port:9810
ServerSocket listen to port:9800
(Active:0| fd:3) (Active:1| fd:4)
--->New Server
Server accepted: 5 2
(Active:0| fd:3) (Active:1| fd:4) (Active:2| fd:5)
[From Server...] register|127.0.0.1|9830|9840|IDLE
(Register Complete!)
<ServerList>:127.0.0.1:FREE
(Active:0| fd:3) (Active:1| fd:4) (Active:2| fd:5)
```

Şekil 8.3 : *Dispatcher*'ın çalıştırılması



```
root@localhost:usr/local/nctuns/bin
Dosya Düzenle Görünüm Uçbirim Sekmeler Yardım
root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X
[root@localhost bin]# ./coordinator
/usr/local/nctuns/bin/
ServerSocket listen to port:9830 FD:4
ServerSocket listen to port:9840 FD:5
ServerSocket listen to port:9880 FD:6
UnixDomainSocket Bind Path:/tmp/nctuns FD:7
[To Dispatcher...] register|127.0.0.1|9830|9840|IDLE
[From Dispatcher...] OK
```

Şekil 8.4 : *Coordinator*'ın çalıştırılması

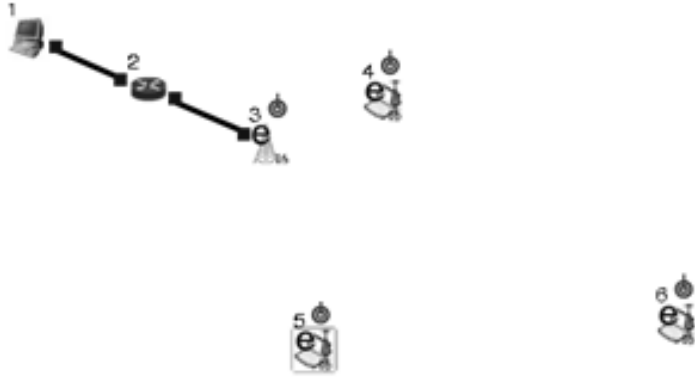


```
root@localhost:usr/local/nctuns/bin
Dosya Düzenle Görünüm Uçbirim Sekmeler Yardım
root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X root@localhost:usr/local/... X
[root@localhost bin]# ./nctunsclient
mkdir /root/.nctuns
mkdir /root/.nctuns/etc
mkdir /root/.nctuns/tmp
```

Şekil 8.5 : *Nctunsclient*'ın çalıştırılması

8.1.1 Benzetim ortamı değişkenleri

802.16e, 802.16d standardından iki yönüyle farklıdır. Birincisi 802.16d OFDM kullanırken 802.16e link bandgenişliği yönetmek için OFDMA kullanır. İkincisi 802.16e zamanlama ayarı, aktarım gibi kullanıcı gezginliğini destekleyen mekanizmalar getirir. NCTUns yazılımı IEEE 802.16e ağını desteklemektedir. Benzetim yazılımının en son sürümü 802.16e Wave1 standardında SISO çalışmakta olup açık ve kapalı döngü MIMO veya BF sistemlerin benzetimini yapamamaktadır. Bu çalışmada SISO sistem çeşitli şartlar altında benzetilmiş olup sonuçları yapılmış çeşitli MIMO (802.16e Wave2) ölçüm ve benzetimleri ile kıyaslanmıştır. Mobil WiMAX sistemin sistem seviyesi benzetimi için aşağıdaki kabul ve parametreler kullanılmıştır.



Şekil 8.6 : Örnek benzetim topolojisi

Çizelge 8.2 : Fiziksel Katman ve Kanal Modeli Parametreleri

Parametre		MS	BS
Taşıyıcı Frekansı (MHz)		2300	
Kanal Bandgenişliği (MHz)		20	
Anten Yapılandırması		1x1 SISO	
FFT		1024	
Örnekleme Frekansı (MHz)		11,2	
Alt-taşıyıcı Frekans Aralığı (kHz)		10,94	
Çerçeve Süresi (ms)		5	
Koruyucu Zaman (ms)		11,4	
OFDMA sembol süresi (ms)		102,9	
OFDMA sembolleri sayısı		48	
QoS Sınıfı		En İyi Efor	
Aşağı Bağlantı (DL)	Boş Alt-taşıyıcılar	184	
	Pilot Alt-taşıyıcılar	120	
	Veri Alt-taşıyıcıları	720	
	Alt-kanallar	30	
Yukarı Bağlantı (UL)	Boş Alt-taşıyıcılar	184	
	Pilot Alt-taşıyıcılar	280	
	Veri Alt-taşıyıcıları	560	
	Alt-kanallar	35	
Anten Örüntüsü (dB)		5	15
Anten Yüksekliği (m)		1	20
İletim Gücü (dBm)		35	43
Alıcı Hassasiyeti (dBm)		-96	-99
FadingVar		10	
Ricean K sabiti		10	
Yayınım Kanal Modeli		COST 231 Hata	
Ort. Bina Yüksekliği (m)		10	
Sokak Genişliği (m)		20	
Ort. Bina Uzaklığı (m)		50	
Yol Kaybı Katsayısı		2	
Standart Sapma		4	
Kablolu Altyapı Bağlantısı (Mb/s)		100	

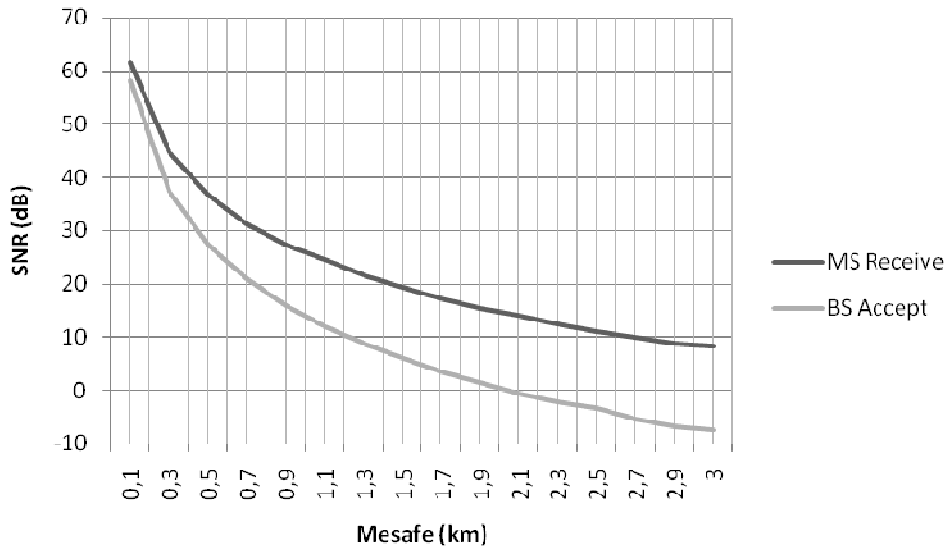
Benzetimde ortamdaki radyo frekans yayını modeli için ETSI'nin ampirik *Cost 231 Hata* modeli kullanılmıştır. Az-yoğun şehir ortamları için elde edilen bu modelden doğan sonuçlar kesin doğru olmamakla beraber sonrasında yapılacak planlama işlemleri için önemli bilgiler vermektedir. Bu model, 100-1500 MHz'i kapsayan Hata modelinin yetersiz kalması üzerine üstteki 2 GHz bandı uygulamaları

için geliştirilmiştir. 2 GHz bandını, 10m'ye kadar gezgin, 100m'ye kadar baz istasyonu anten yüksekliğini ve 20km'ye kadar link mesafesini kapsar [42].

8.2 Veri İletim Performansı Benzetimi

Benzetim topolojisi basitçe çekirdek şebekedeki sunucu ile telsiz olarak sisteme bağlı kullanıcıdan oluşup aralarında TCP ve UDP alış-verişi gerçekleştirilerek mobil WiMAX kullanıcısı açısından sistemin aşağı ve yukarı bağlantı hızları belirlenmiştir. Sunucuda UDP paketleri üretilerek bu paketlerin içindeki zaman damgaları ve iletim sayılarından paket kaybı ve gecikme gibi servis kalitesine direkt etki eden değişkenler belirlenmiştir.

Önce mesafeye bağlı olarak BS ve MS'nin SNR değerleri belirlenerek verilen koşullar altındaki sistemin erim mesafesi belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü üzere sistemin erim alanı yaklaşık 3km'dir. Geleneksel hücresel telefon sistemlerinde erim yeterli ve SNR 9 dB'in üzerinde ise kullanıcılar tatmin edici kalitede aramalar yapabilirler. Eğer kullanıcı 20 dB SNR'a sahip ise arama aynı şekilde çalışır [66]. Kıyaslandığında WiMAX tabanlı bir sistemde 20 dB SNR değeri kullanıcıya işareti çok yüksek veri hızı sağlayacak modülasyon biçiminde almasına izin verir. WiMAX sistemi SNR'ı temel alan adaptif modülasyon kullandığı için 9 dB SNR alındığında bağlantı biraz daha yavaştır.



Şekil 8.7 : BS ve MS için SNR değişimi

QPSK veya 16-QAM almak için gereken SNR değeri 64-QAM'e göre daha düşük olduğundan daha düşük seviyeli modülasyon kullanımı, her alt-taşıyıcıda daha az bit iletildiği için yukarı bağlantı çıkışının azalmasına ve MS'nin BS ile daha az iletim gücü kullanarak iletişim kurmasına sebep olur. Örneğin QPSK 1/2 modülasyonu için gereken SNR değeri 5 dB iken 16-QAM 1/2 için 10,5 dB, 64-QAM 3/4 modülasyonu için 29 dB'dir. Eğer MS, QPSK kullanarak iletme geçerse BS, 16-QAM'e göre 5,5 dB daha işaret gücü kaybını tolere edebilir.

Çizelge 8.3 : Alıcı SNR varsayımları [67]

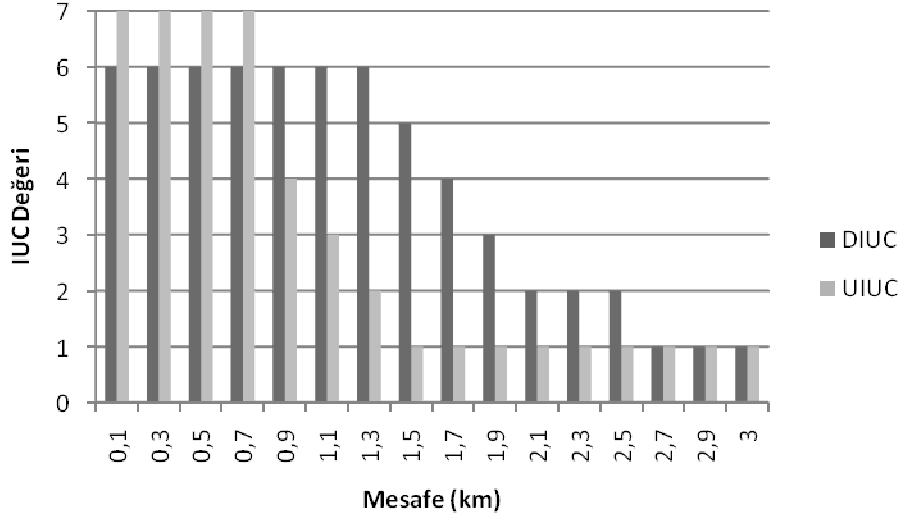
Modülasyon	Kodlama Oranı	Alıcı SNR (dB)
QPSK	1/2	5
	3/4	8
16-QAM	1/2	10,5
	3/4	14
64-QAM	1/2	16
	2/3	18
	3/4	20

Patlama (burst), aynı kanal kodlama ve modülasyon tipine sahip slotların toplamıdır. BS, QPSK 1/2 veya 16-QAM 3/4 ile bir patlama iletimi isteyebilir. MS'ye aşağı veya yukarı bağlantıda bir patlama tahsis edilirken bu bilgi, MS'ye BS tarafından gelen iletimi modüle ve demodüle edebilmesi için iletilmiş olmalıdır. Gerçekte BS, MS'ye tahsis edilmiş patlamayı IUC (*interval usage code*) adı verilen bir değer kullanarak bilgilendirir. Tabloda bu sayılar ve karşılık gelen kod tipleri verilmiştir. Bu değer aşağı yönde olursa DIUC, yukarı yönde olursa UIUC olarak adlandırılır. DIUC ve UIUC değerleri MAC katmanında patlama profilleri ve eşik değerleri ile ilişkilidir.

Çizelge 8.4 : IUC değerleri ve kodlama tipleri [67]

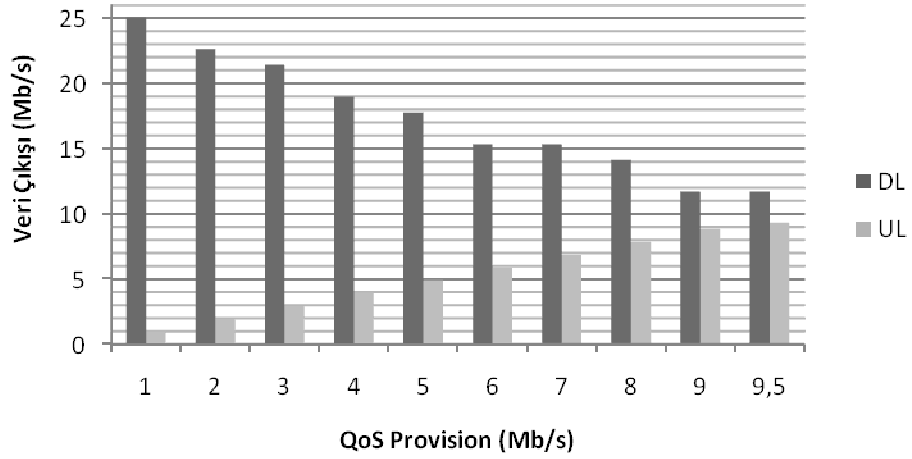
#	Kodlama Tipi
1	BPSK (CC) 1/2
2	QPSK (RS + CC/CC) 1/2
3	QPSK (RS + CC/CC) 3/4
4	16-QAM (RS + CC/CC) 1/2
5	16-QAM (RS + CC/CC) 3/4
6	64-QAM (RS + CC/CC) 2/3
7	64-QAM (RS + CC/CC) 3/4

Şekilde benzetim sonucunda elde edilen 1Mb/s sürdürülebilir hız tanımı altında mesafeye bağlı DIUC ve UIUC değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Buna göre yukarı bağlantı 1,3 km'ye kadar en üst seviyede modüle edilmekteyken sonrasında giderek düşmekte ve 2,7-3 km arasında en düşük seviyesinde bulunmaktadır. Öbür taraftan aşağı bağlantı 700 m'ye kadar en yüksek seviyede modüle edilirken ilerledikçe seviye düşmekte ve 1,5 km'den itibaren en düşük seviyede kalmaktadır.



Şekil 8.8 : Mesafeye bağlı DIUC, UIUC değerleri

802.16e telsiz ağı servis kalitesine duyarlıdır (*QoS-aware*). Bu yüzden benzetime başlanmadan önce benzetilen her MS için QP (*QoS Provision*) değeri belirlenmelidir. NCTUns'deki 802.16e yapısı hâlihazırda sadece en iyi efor (*best-effort*) trafiğini yani garanti edilmeyen servisi desteklemektedir. Bu yüzden her MS için tek gerekli parametre QP altında tanımlanan sürdürülebilir hızdır (*sustained rate*). Bu değer MS'ye kullanması için izin verilen en fazla bağlantı bandgenişliğini ifade eder. WiMAX PMP kipinde sürdürülebilir hızda kısıtlama vardır. Eğer fiziksel katman bunu destekleyemiyorsa bağlantı düşer. Bu, gerçek şartlarda WiMAX'in sürdürülebilir hızı doğru şekilde aşamayacağı anlamına gelir. Sürdürülebilir hız, erim alanı ve kodlama yöntemiyle ilişkilidir. Şekilde BS ile MS arasında 100m olduğu durumda farklı QP değerleri için görülen aşağı ve yukarı yönlü TCP bağlantısı veri hızları görülmektedir. Diğer benzetimde ise erim sınırı olan 3 km'de erişilebilen veri hızlarını bulmak için farklı QP değerleri denenmiş, en fazla 2 Mb/s için sonuç elde edilebilmiştir.



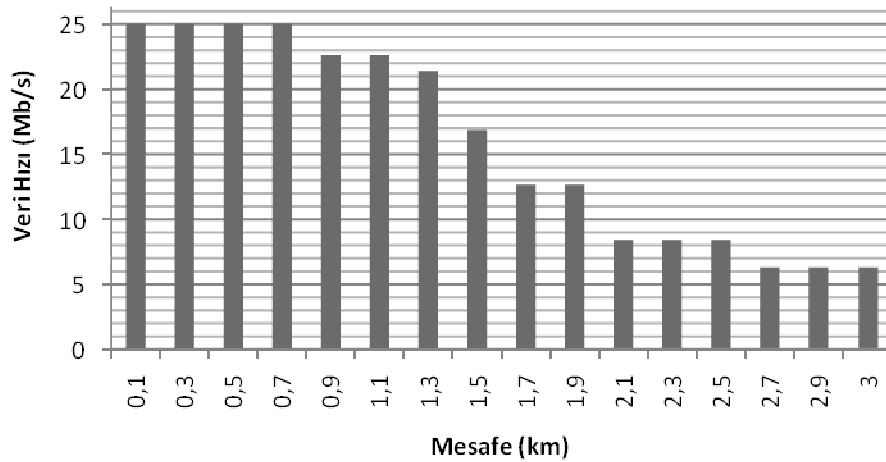
Şekil 8.9 : 100m'de QP ile değişen TCP çıkış hızı

Şekilde de görüldüğü üzere yukarı bağlantı için tahsis edilen bandgenişliği arttıkça aşağı bağlantı hızı düşmekte, aşağı-yukarı oranı 1:1'e yaklaşmakta ve ikisi için toplam hız düşmektedir. Görüldüğü üzere kullanıcılara farklı aşağı-yukarı bağlantı değerlerine sahip hızlar sunulabilir.

Çizelge 8.5 : 3 km'de farklı QP değerleri için aşağı ve yukarı bağlantı hızları

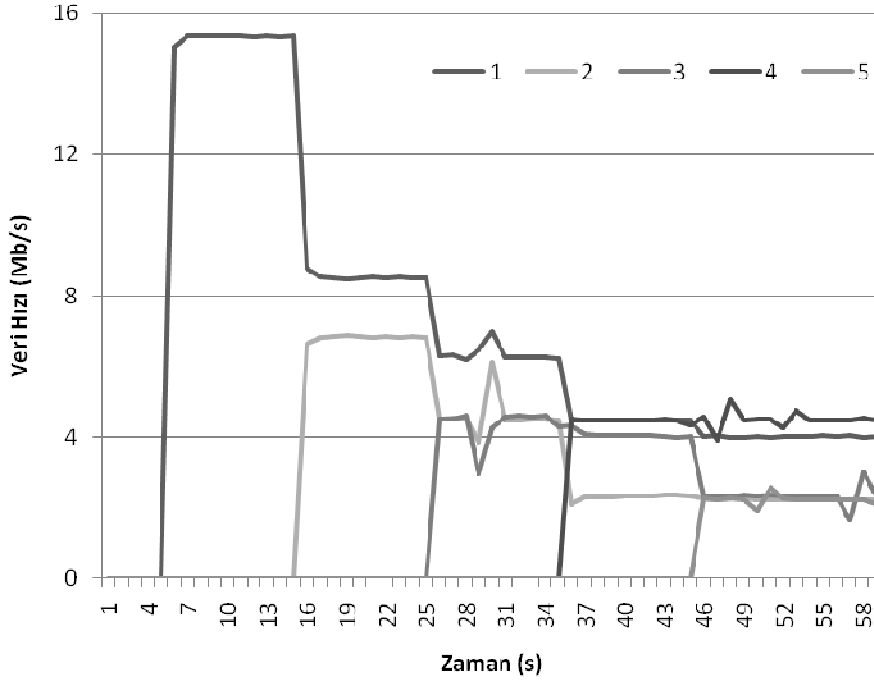
QP (Mb/s)	DL (Mb/s)	UL (Mb/s)
1	6,32	0,97
2	3,89	1,95

Veri iletiminde öncelikle 1Mb/s QP değeri altında mesafeye bağlı FTP trafiği ile TCP performansı ölçülmüştür. Verilen şartlar altına en fazla 700m'ye kadar en fazla aşağı bağlantı hızı olan 25,04 Mb/s görülmüş, bağlantının sürdüğü en uzak mesafe olan 3 km'de 6,3 Mb/s hız elde edilmiştir.



Şekil 8.10 : Mesafeye bağlı TCP veri hızı

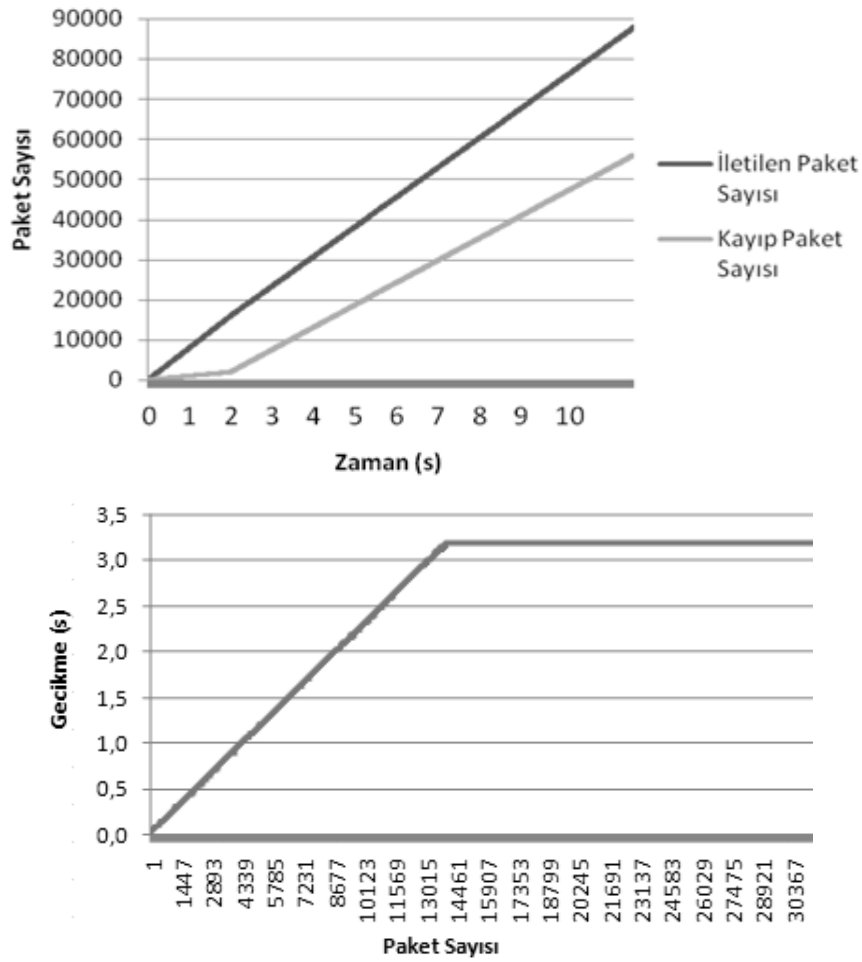
BS'ye 200m'nin katları uzaklıktaki 1Mb/s sürdürülebilir hız tanımlı beş kullanıcının aynı anda TCP iletişimine geçtiği durumdaki zamana bağlı veri hızı değişimi aşağıdaki grafikte gösterilmiştir. Sunucudan geçen toplam trafik yaklaşık 16 Mb/s olup ağda ki her yeni iletim başlangıcında dalgalanmalar görülmektedir. Bağlantı hızı toplamda sabit kalırken ilerleyen zaman içerisinde mesafeye ve QP değerine bağlı olarak değerler yakınsamaktadır.



Şekil 8.11 : Beş kullanıcı için aşağı bağlantı TCP veri hızı

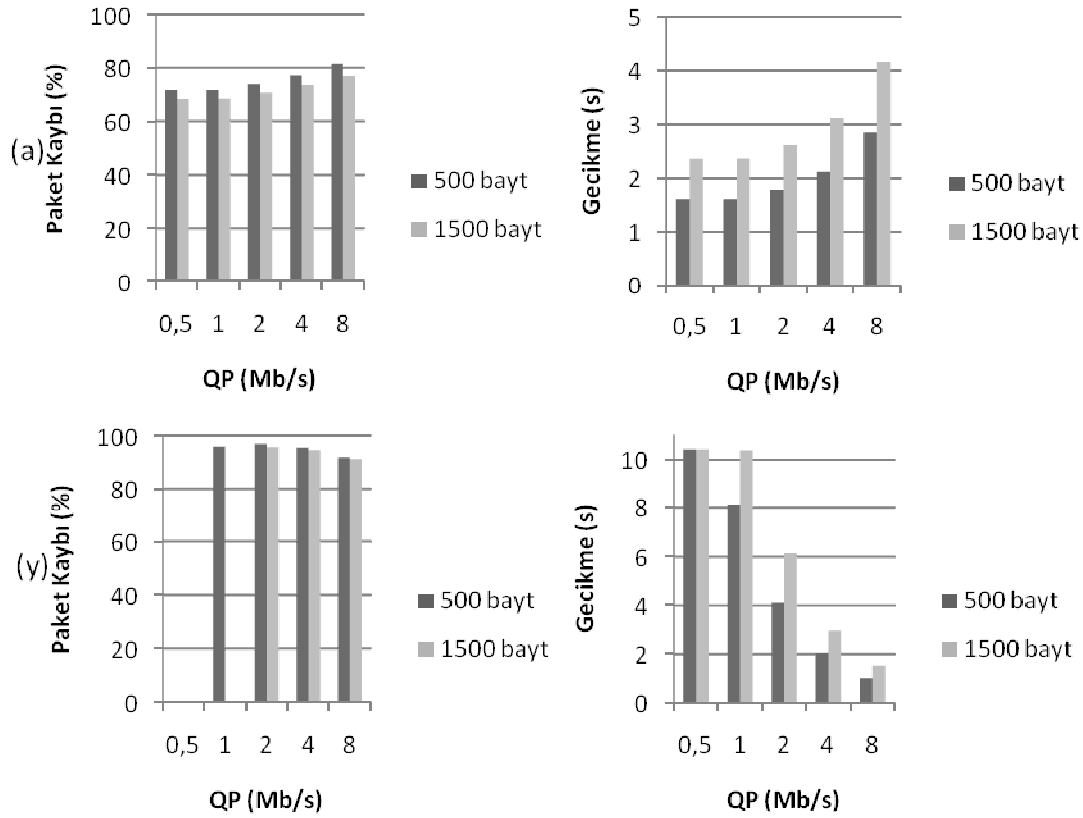
IP üzerinde kullanılan diğer bir taşıma katmanı protokolü de daha çok ses, ortam akışı iletimi için kullanılan UDP protokolüdür. Daha ziyade gerçek zamanlı uygulamalar için tercih edildiğinden gecikme, seğirme ve paket kaybı değerleri büyük önem taşımaktadır. Bu benzetimde MS-BS arası mesafenin 200m olduğu durumda 1 Mb/s sürdürülebilir hız tanımı altında UDP protokolü için aşağı bağlantı performansı incelenmiştir. Paket boyutu maksimum Ethernet paket boyutu olan 1500 bayt olarak verilmiş ve sabit bit hızlı (CBR) UDP trafiği oluşturulmuştur. Bu 802.16e bağlantısında paket kaybı ve gecikmeye bağlı olarak IP performansını vermektedir. Zamana bağlı gönderilen ve kayıp paket sayısı şekilde gösterilmiş olup başarılı iletilen paket sayısına bağlı oluşan gecikme (*Round Trip Time*) değeri bir sonraki şekilde verilmiştir. Buna göre 10 saniye süren bir UDP akışında %60'a varan paket kaybı gözlenmiş, öbür taraftan başlangıç gecikmesinin 3 saniyeyi geçtiği dolayısıyla

kullanılan yazılım ile benzetilen 802.16e ortamının UDP ile gerçek zamanlı ortam akışına uygun olmadığı görülmüştür.



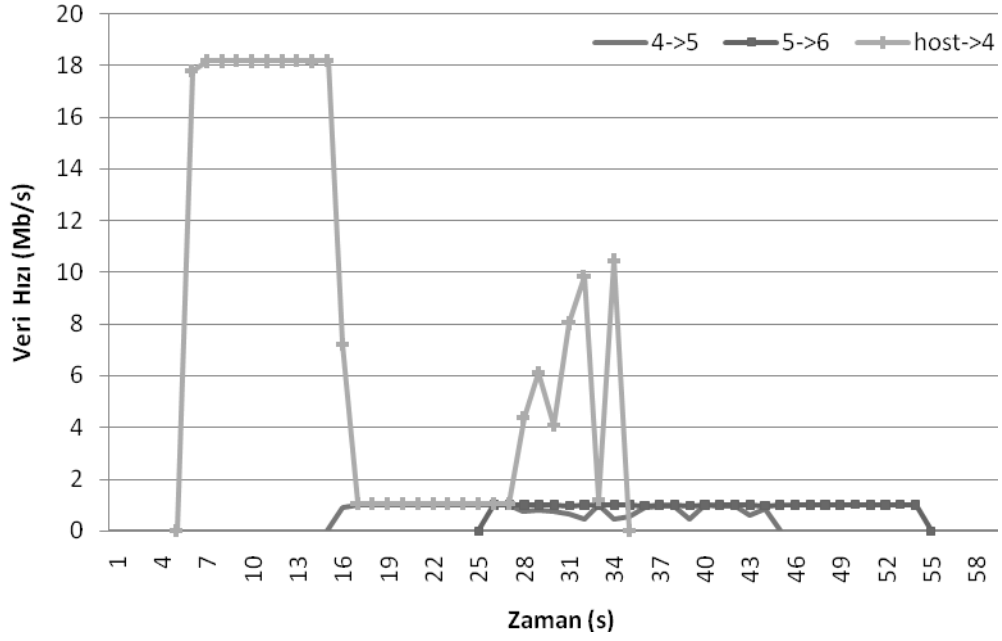
Şekil 8.12 : UDP iletimde paket kaybı (a) ve gecikme (b)

Yine aynı şartlar altında çeşitli QP değerleri için aşağı ve yukarı yönlü bağlantıda ortaya çıkan paket kaybı oranı ve gecikme değişimi incelenmiştir. Şekilde gösterilen sonuçlara göre paket kaybı yüzdesi ve gecikme aşağı yönlü bağlantı için artan sürdürülebilir hız tanımıyla artarken yukarı bağlantı için azalmaktadır. Daha büyük paket boyutu için paket kaybı oranı azalırken gecikmenin yükseldiği gözlenmiştir. Dolayısıyla şartlara ve verilen hizmet tipine göre en uygun paket boyutunun bulunmasının önem arz eder.



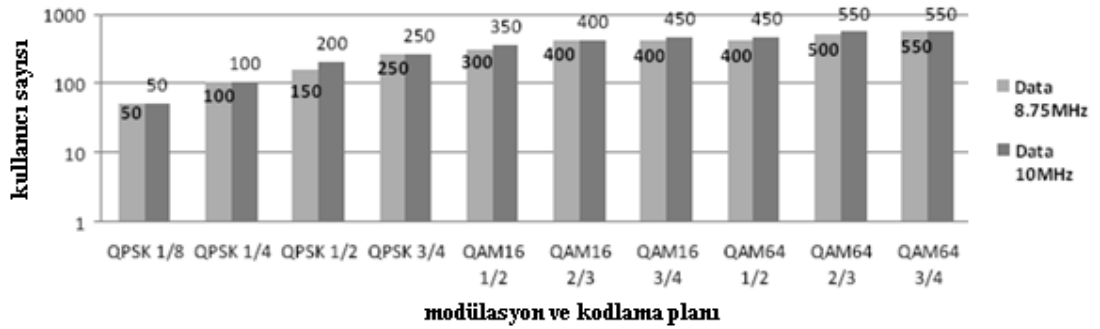
Şekil 8.13 : Farklı paket boyutlarında aşağı ve yukarı bağlantıda QP değerine bağlı paket kaybı ve gecikme değişimi

Bir sonraki benzetimde farklı sürdürülebilir hız tanımlarına sahip, BS'ye farklı uzaklıklardaki üç kullanıcının aşağı ve yukarı TCP iletimi kurması durumunda sistemin gösterdiği performans incelenmiştir. MS4 ve MS5 1Mb/s, MS6 0,5 Mb/s QP değerine sahiptir. Burada sırasıyla MS4 MS5'e, MS5 MS6'ya sunucuda MS4'e veri göndermektedir. Daha öncede görüldüğü üzere 25 Mb/s civarındaki aşağı bağlantı hızına sahip olması beklenen kullanıcı için hız, ortamdaki diğer kullanıcılar veri iletişimi halinde olmasalar dahi 18 Mb/s seviyesine düşmüştür. Kullanıcının aynı anda tam performans ile aşağı ve yukarı bağlantı kurması durumunda hızlar yukarı bağlantı değerinde eşitlenmiş, diğer kullanıcılarında veri iletimine başlamasıyla hızda dalgalanmalar görülmüştür.



Şekil 8.14 : Birden fazla kullanıcının aşağı ve yukarı yönde TCP bağlantısı kurma durumu

[68]'de yapılan bir çalışmanın sonucu gösterilmiş ve bu sonuca göre farklı bandgenişliklerinde çeşitli modülasyon tiplerine göre veri iletimi açısından kullanıcı sayısının değişimi verilmiştir. Buna göre 10 MHz bandgenişliğinde baz istasyonuna en yakıneken işaretin 64-QAM 3/4 ile modüle edildiği bir durumda kullanıcı sayısı 550 iken uzak durumda örneğin QPSK 1/4 durumunda 100 kullanıcı kapasitesine ulaşılmıştır.



Şekil 8.15 : Farklı modülasyon tiplerinde kullanıcı sayısı [68]

8.3 Görüntü İletim Performansı Benzetimi

Bu kısımda kodek olarak H.263 kullanan iki farklı veri hızına sahip video iletimi benzetilmiştir. 60 saniye uzunluğunda iki yönlü 1,45 ve 2,89 Mb/s bağlantı hızı gerektiren saniyede 25 çerçeve sayısına sahip bu veri iletimleri RTP protokolü ile gönderilmekte olup bu protokol de tanım için SDP protokolüne ihtiyaç duymaktadır.

Sunucu ve istemci için tanımlanan SDP içerikleri şekilde verilmiştir. 1,45 Mb/s'lik video aktarımı için 2Mb/s sürdürülebilir hız değeri tanımlanırken, diğer video aktarımı için bu değer 3Mb/s olarak tanımlanmıştır. Benzetim yazılımı RTP protokolü altında taşıma protokolü olarak TCP kullanmakta olup bu yüzden benzetimlerde paket kaybı oranı sıfır görünmektedir. Ortam akışında gecikme ve seğirme değerleri çok daha önem arz ettiğinden bu değerlerin değişimi gözlenmiştir.

Çizelge 8.6 : Sunucu ve istemci için SDP tanımları

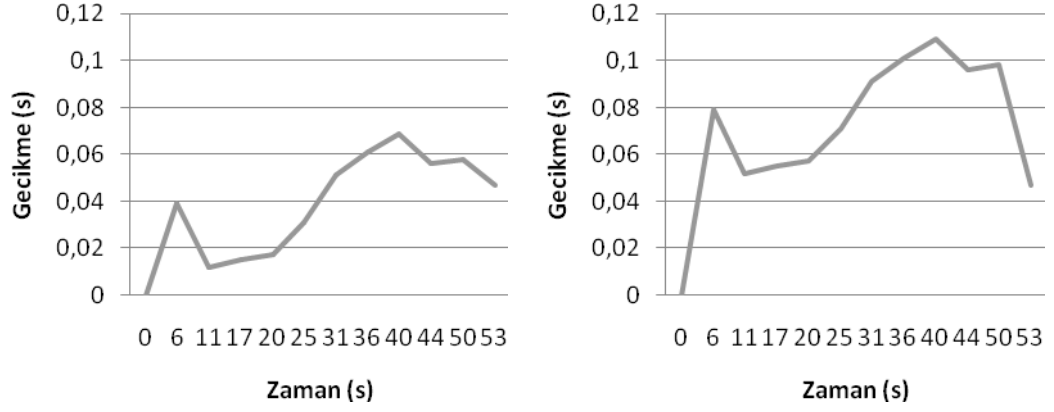
istemci.sdp	sunucu.sdp
b=AS:1600 t=10 80 m=video 5004 RTP/AVP 34 a=rtpmap:34 H263/90000/16 a=framerate:25 c=IN IP4 1.0.1.1	b=AS:1600 t=10 80 m=video 5004 RTP/AVP 34 a=rtpmap:34 H263/90000/16 a=framerate:25 c=IN IP4 1.0.2.2

Çizelge 8.7 : İki video aktarımının mesafeye bağlı gecikme ve seğirme değişimi

Mesafe (m)	Gecikme (ms)	Seğirme (ms)
400	18	11,75
800	22	11,28
1200	38	10,75
1600	38	13,75
2000	38	10,82
2400	46	14,75
3000	71	16,76

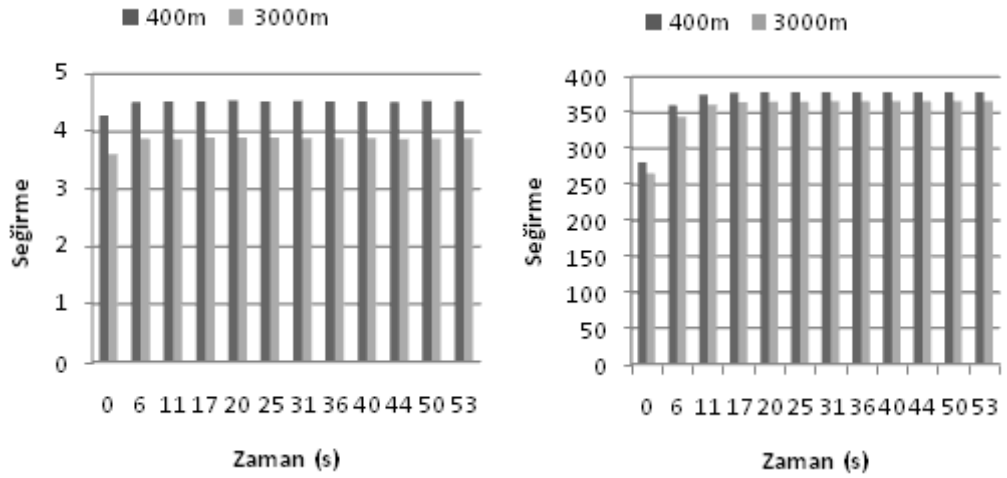
Mesafe (m)	Gecikme (ms)	Seğirme (ms)
400	71,1	53,95
1200	71,1	63,16
2000	71,2	63,96
2800	71,3	83,17

Uygulamaya bağlı olarak tolere edilebilir seğirme miktarı değişkenlik gösterir. Seğirmenin en önemli kısmı ağdaki cihazlar tarafından kaynaklanır. Dolayısıyla trafik, ağı baştan sona geçerken geçtiği cihaz sayısı arttıkça seğirme bakımından daha fazla etkilenir. Bu değer genelde çoğu servisi için 50 ms'den azdır. Örneğin iyi bir hizmet 20 ms veya daha az seğirmeye sahip olmalıdır [51]. Seğirme ayrıca koşullara ve modülasyona göre değişir. Daha yüksek modülasyonlar ve çok sayıda yansımış işaretin değiştiği şiddetli NLOS şartlarında bu değer daha yüksektir. Fakat MIMO tekniğinden faydalanılarak seğirme seviyesi azaltılabilir.

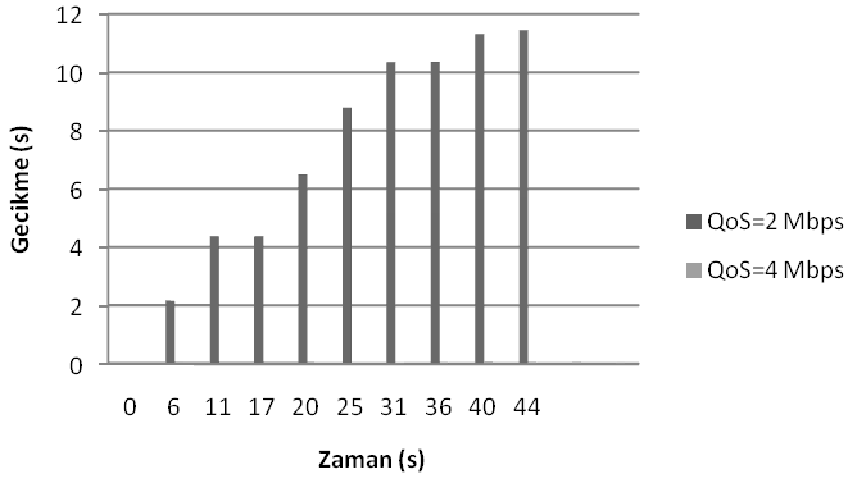


Şekil 8.16 : 200m'de iki video aktarımının zamana bağlı gecikmesi

Diğer taraftan uygun sürdürülebilir hız parametresinin gereken değerin altında tanımlanmaması durumunda karşılaşılan sonuçlar farklı mesafeler için benzetilerek görülmüş ve buna göre artan seçirme değerinden yola çıkarak kullanıcı ihtiyacına uygun hız tanımı yapılmasının veya baz istasyonunda kabul denetimi (*admission control*) servisi kurularak bandgenişiği rezervasyonu yapılması, servis kalitesinin temini için gerekmektedir.



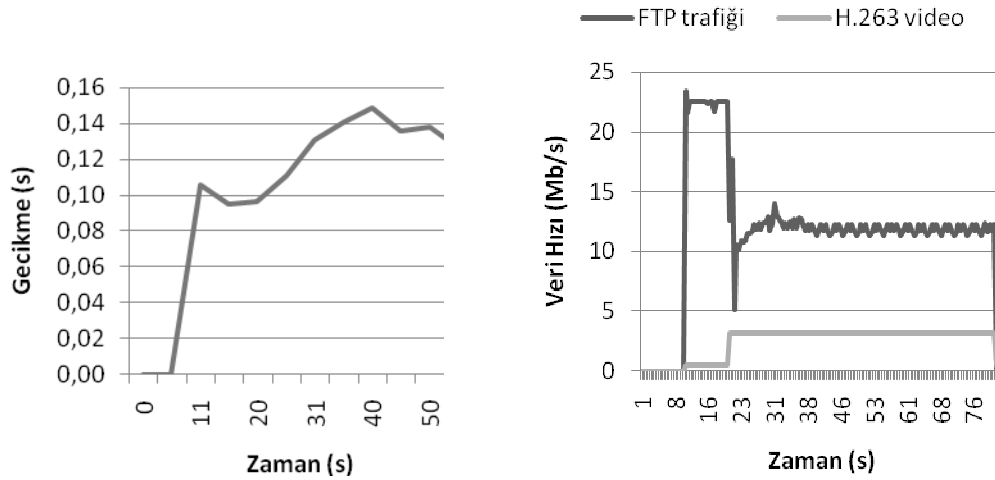
Şekil 8.17 : 0,5 Mb/s sürdürülebilir hızda iki video aktarımı için seçirme



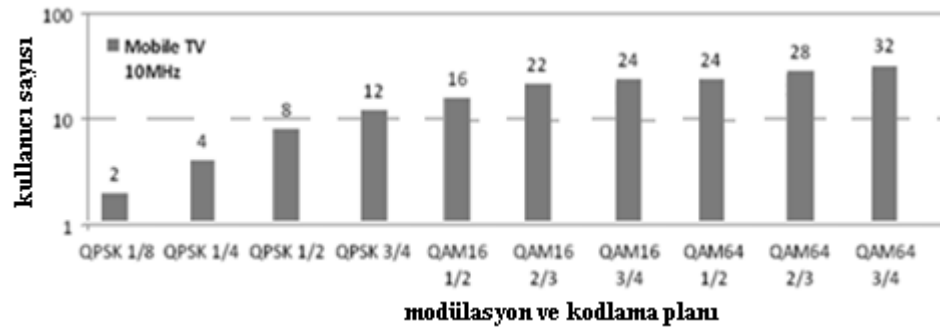
Şekil 8.18 : İkinci video aktarımının 400m'deki istemcinin farklı QP değerleri için zamanla değişen gecikme

Şekil 8.18'de yaklaşık 3 Mb/s veri hızına sahip ikinci video aktarımı için farklı sürdürülebilir hız tanımları için zamana bağlı gecikme süreleri görülmektedir. Burada 4 Mb/s QP değeri için gecikme için milisaniyeler mertebesinde olduğu için grafikte gözükmemektedir. Benzetime göre 4 Mb/s sürdürülebilir hız ideal video aktarımı için uygun gecikme parametrelerini sağlarken 2 Mb/s, 60s uzunluğundaki video aktarımında yaklaşık 15 s'ye varan gecikme ile uygun gözükmemektedir.

Bir diğer senaryoda veri iletimi esnasında video aktarımı başladığı durumda elde edilen sonuçlara göre gecikme değeri ve veri hızı değişimi gözlenmiştir.



Şekil 8.19 : FTP iletimi esnasında video aktarım gecikmesi ve veri hızı değişimi



Şekil 8.20 : IPTV kapasitesi [68]

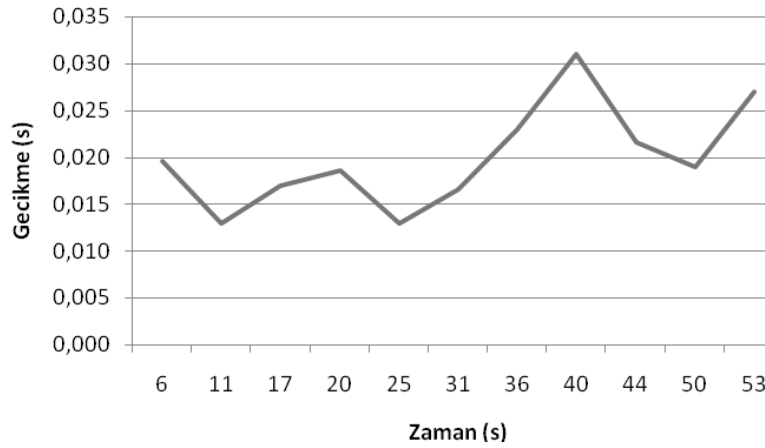
8.4 Ses İletim Performansı Benzetimi

Her ne kadar WiMAX altyapısı, devre bağlaşmalı ve ses iletimi için özellikle tasarlanmış, daha düşük hızlı fakat yüksek erim alanı sunan geleneksel hücresel sistemler gibi olmasa da tam-IP tabanlı olduğu için VoIP'ı kullanarak ses iletimini destekler. Kabul edilebilir servis kalitesine ulaşmak için düşük gecikme, seğirme ve minimal paket kaybı garanti edilmelidir. Bu kısımda öncelikle farklı QP değerleri için farklı mesafelerde ki kullanıcıların arasında kodek olarak G.729 standardını kullanan ve 1 dk. süren bağlantı tanımlanmıştır. Buna göre elde edilen sonuçlar tabloda görülmektedir. Bu sonuçlara göre yaklaşık gecikme 18-19 ms arasında olup ses iletimi için uygun değeri karşılamaktadır.

Çizelge 8.8 : G.729 VoIP için farklı mesafelerdeki gecikme değerleri

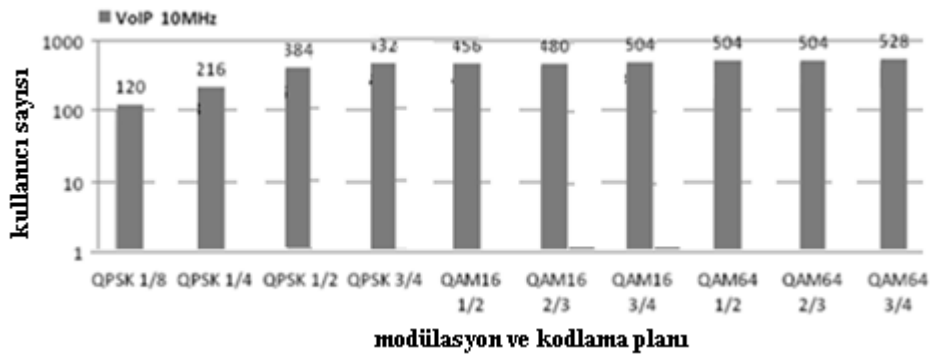
QP (Mb/s)	Gecikme (ms)	
	400 m	2800 m
0,25	18,3	18,3
0,5	18,3	18,2
1	18,3	18,0
2	18,2	17,6
4	18,0	-

Şekilde 60 saniye uzunluğundaki VoIP iletişimin zamana bağlı gecikme değişimi görülmektedir. Gecikme en fazla 32 ms en az 13 ms arasında değişim göstermektedir ki bu iki değerde gereksinimleri karşılamaktadır.



Şekil 8.21 : 200m mesafede G.729 VoIP zamanla değişen gecikme

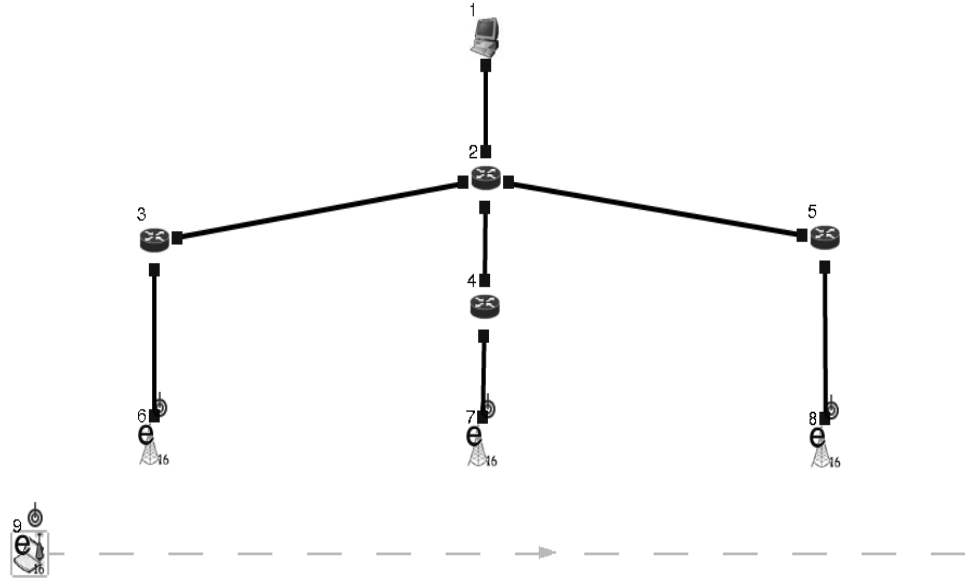
Bekleyen kuyrukları işlemekle görevli zamanlayıcı (*scheduler*) kısmının geliştirilmesi ile özellikle ses iletimi için çok sayıda kullanıcıya hizmet sağlanabilir. Buna göre 10 MHz bandgenişliğinde gelişmiş bir zamanlayıcı kullanılarak elde edilen kullanıcı sayısı değişimi şekilde verilmiştir.



Şekil 8.22 : VoIP kapasitesi [68]

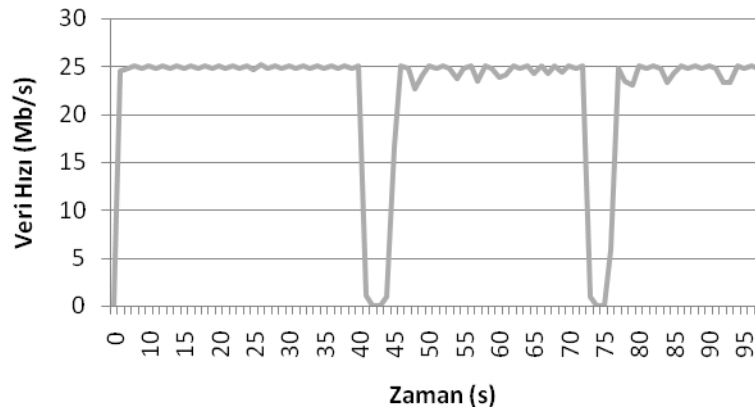
8.5 Aktarım Performansı Benzetimi

802.16e için son olarak gezginlik desteği benzetilmiş, farklı BS'ler arasındaki aktarım durumunda sistemin performansı incelenmiştir. Topoloji PMP kipinde 3 BS ve 1 MS'den oluşmaktadır (Şekil 8.23). Her BS farklı alt-ağda yer almakta ve birbirlerine yönlendiriciler aracılığıyla bağlanmaktadır. Bu benzetim durumunda sunucudan istemciye 90 saniye boyunca TCP bağlantısı kurularak periyodik veri paketleri iletilmiştir. İstemci 10 m/s sabit hızla hareket halindedir. Mevcut şartlarda gezgin IP etkin hale getirilerek MIPv4 altında sistemin performansı görülmüştür. Daha öncede belirtildiği üzere gerçek zamanlı uygulamalar için amaç aktarım gecikmesinin 50 ms'nin aşağısında olmasıdır.



Şekil 8.23 : PMP ağda aktarım topolojisi

Elde edilen sonuca göre aktarım süresince yaşanan bağlantı kopması istemciye göre aşağı bağlantıda ortalama 3,7s yukarı bağlantıda 3,8s sürmektedir (Çizelge 8.9). Dolayısıyla benzetilen standart istenilen hedefler ölçüsünde gezgincilik desteği sağlayamayıp ancak göçebe bir iletişime olanak sağlamaktadır. 802.16e’de MIMO desteği, MIPv6’nın entegre edilmesi ve BS’ler arası istemci bilgisi paylaşan bir haberleşme protokolü ile birlikte bu aktarım süresi daha da düşürülerek yüksek hızlarda da tatmin edici sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 8.24 : İstemcinin aşağı bağlantı veri hızı değişimi

Çizelge 8.9 : Aktarımın gerçekleştiği ortalama CINR değeri ve aktarım gecikmesi

CINR _{KOMŞU BS}	CINR _{MEVCUT BS}	Aktarım Süresi _{DL}	Aktarım Süresi _{UL}
79,5 dB	69,1 dB	3,7 s	3,8 s

8.6 Sonuçlar ve Yorumlar

Alt bölümlerde yapılanların haricinde genel olarak benzetim sonuçlarına bağlı şu çıkarımlar da yapılabilir:

- Aktif oturumların sayısı arttıkça ortalama gecikmede artmaktadır. Gecikmeyi tolere edilebilir sınırlar içinde tutmak için BS’de hız kontrol mekanizmaları kurulabilir, kuyruk boyu (*queue length*) artırılabilir veya bunu kontrol eden zamanlayıcı kullanılabilir.
- Yüksek gecikmenin bir başka sebebi, BS’deki yüksek ara bellek kullanımından kaynaklanabilir. Bu nedenle özellikle video gibi ortam akışı bağlantıları sağlanırken ağ yükü belli bir eşik değerinin üzerinde ise akış zarar görebilir.
- UDP için paket kaybı oranı oldukça yüksektir ve gerçek zamanlı veri akışı için tolere edilebilir sınırın ötesindedir. Yüksek paket kaybı oranının sebebi uygulamanın yüksek bandgenişliği ihtiyacının BS’nin düşük kuyruk boyutuyla birleşmesinden kaynaklanır. Paket kaybı oranı BS’deki ara belleği şekillendirerek veya ayrıca akış bölme teknikleri kullanılarak azaltılabilir.
- WiMAX hücrenin performansı, anten kazancı, MIMO/BF kazancı, BS’nin çıkış gücü, modülasyon tipi, istemci anteni kazancı ve çıkış gücünde uygun değişiklikler yapılarak geliştirilebilir.

9. SONUÇ

Bu tezde ortak noktaları MIMO kullanmaları ve tam IP tabanlı olmaları olan IEEE 802.11n ve 802.16e telsiz ağ standartları dörtlü oyun uygulamaları açısından sınanmıştır. Telsiz ağların karakteristiği ve karşılaştığı sorunlar ele alınmış çözüm olarak MIMO tekniği incelenmiş, MIMO teknolojisinin kapasitesi ve performans sınırlarından bahsedilmiştir. Bu tekniği kullanması opsiyonel olarak bırakılan 802.11n telsiz yerel alan ağı ve 802.16e telsiz metropol alan ağı genel özellikleri ile incelenmiştir.

Yapılan incelemelerden, günümüzde giderek artan ve hareketi destekleyen geniş bant haberleşme ihtiyacının, IEEE 802.11n, IEEE 802.16e gibi protokollerin gerçekleştirilmesi ile karşılanacağı görülmektedir. Bina-içi ortamda başarımlı testi yapılan 802.11n sistemin dörtlü oyun uygulamaları açısından gezginlik hariç tatmin edici sonuçlar verdiği görülmüştür. Taslağın standart haline getirilmesi ile bu teknolojinin daha üstün performans sergilemeye aday olduğu belirtilmiştir.

802.16e için hem basitlik hem de kullanılan benzetim yazılımının elverdiği nispette alıcı ve verici uçlarda birer antenin olduğu SISO duruma odaklanılmıştır. Buradaki analizlerin hepsi aynı zamanda MIMO sistemler için de yapılabilir ve literatürde bu gibi çalışmalar mevcuttur. Örneğin kanal modelinde değişiklik öngörülebilir. Cost 231 yayılım modeli MIMO sistemin daha düşük sönüm varyansında daha iyi yayılım karakteristiği göstermesi nedeniyle bazı ayarlamalar gerektirebilir. VoIP ve IPTV açısından mobil WiMAX'in gelecek vaadeden bir yönde olduğu ve kullanıcılara istenilen yer ve zamanda gezgin olarak üçlü oyun uygulamalarını sağlama yolunda olduğu görülmektedir.

Sonuç olarak performans limitleri hala üzerinde aktif çalışmanın olduğu bir araştırma konusu olan MIMO'nun genişbanttan gigabit hızlarına gelişimi çok kanallı RF sistemlerin ve sayısal işaret işleyicilerin daha makul hale gelmesiyle sadece zaman meselesi olarak gözükmemektedir. 3G, WLAN, WiMAX, 802.20 ve 4G gibi telsiz teknolojilerde yerini alıp önümüzdeki on yılda telsiz endüstrisinin çalışma alanına önemli etki edecektir.

KAYNAKLAR

- [1] **Andrews, J. G., Ghosh, A., Muhamed, R.,** 2007: Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall.
- [2] **Wells, J.,** (2007). The Benefits of E-Band Systems Over Other Wireless Technologies, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.e-band.com/index.php?id=224>
- [3] **Goldsmith, A.,** 2005: *Wireless Communications*, Cambridge University Press, Cambridge.
- [4] **Alamouti, S. M.,** 1998: A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications, *IEEE Journal on Select Areas In Communications*, Vol.16, pp. 1451- 1458.
- [5] **Sklar, B.,** 1997: Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication Systems, *IEEE Communications Magazine*, pp. 90- 109.
- [6] **Stüber, G. L.,** 2000: *Principles of Mobile Communication*, Kluwer Academic Publishers.
- [7] **Bolcskei, H., Gesbert, D., Paulraj, A.,** 2002: On the Capacity of Wireless Systems Employing OFDM-based Spatial Multiplexing, *IEEE Trans. Comm.*
- [8] **Proakis, J. G. ve Salehi M.,** 1994: *Communications Systems Engineering*, Prentice-Hall.
- [9] **Annamalai, A., Tellambura, C. ve Bhargava, V. K.,** 1998: A Simple and Accurate Analysis of Digital Communication Systems with Diversity Reception in Different Fading Environments, *The 9. IEEE International Symposium on Personal Communications*, Vol. 3, pp. 1055- 1060.
- [10] **Telatar, I. E.,** 1999: Capacity of Multi-antenna Gaussian Channels, *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 10, no. 6, pp. 585–595.
- [11] **Foschini, G. J.,** 1996: Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication, *Bell Labs Technical Journal*, Vol. 1, pp. 41– 59.
- [12] MIMO, http://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-input_multiple-output, alındığı tarih 26.04.2009.
- [13] **Tom, A.,** 2007: *Optimizing and Testing WLANs: Proven Techniques for Maximum Performance*, Elsevier/Newnes, Burlington
- [14] **Rackley, S.,** 2007: *Wireless Networking Technology: From Principles to Successful Implementation*, Elsevier.
- [15] **Arogyaswami J. P., Dhananjay A. G., Rohit U. N.,** 2004: An Overview of MIMO Communications-A Key to Gigabit Wireless, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 92, no. 2.

- [16] **Kühn, V.**, 2006: *Wireless Communications over MIMO Channels, Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*, John Wiley Sons, West Sussex.
- [17] **Tse, D., Viswanath, P.**, 2005: *Fundamentals of Wireless Communications*, Cambridge University Press.
- [18] **Proakis, J. G.**, 1989: *Digital Communications*, McGraw-Hill, New York.
- [19] **Gesbert, D., Akhtar, J.**, Breaking the Barriers of Shannon's Capacity: An overview of MIMO wireless systems, *Telenor's Journal-Teletronikk*, January 2002, pp. 1-9.
- [20] **Sahin, M.E., Arslan, H., Singh, D.**, 2007. Reception and Measurement of MIMO-OFDM Signals with a Single Receiver, *Vehicular Technology Conference*, 2007 Fall, IEEE Vol. 66, pp. 666 – 670.
- [21] **Gesbert, D., Shafi, M., Da-shan Shiu**, 2003: From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems, *Communications IEEE Journal*, Vol. **21**, Apr 2003, pp. 281 – 302.
- [22] Cisco Systems, Inc., (2007): White Paper: 802.11n: The Next Generation of Wireless Performance, Retrieved April 26, 2009 from http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod_white_paper0900aecd806b8ce7.pdf
- [23] **Sheikh, K., Gesbert, D., Gore, D., Paulraj, A.**, 1999: Smart Antennas for Broadband Wireless Access, *IEEE Communications Magazine*.
- [24] **Alim, O.A., El Naggary, A.**, 2007: Performance of MIMO Antenna Techniques on IEEE 802.16e, *Information and Communications Technology*, 2007.
- [25] **Bölcskei, H., Gesbert, D., Papadias, C. B.**, 2006: *Space-Time Wireless Systems from Array Processing to MIMO Communications*, Cambridge University Press.
- [26] **Tarokh, V., Seshadri, N., Calderbank, A. R.**, 1998: Space-time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. **44**, Issue 2, pp.744 – 765.
- [27] **Paulraj, A., Kailath, T.**, 1994: Increasing Capacity in Wireless Broadcast Systems Using Distributed Transmission/Directional Reception, *U. S. Patent*, No. 5,345,599.
- [28] <http://www.ieeevtc.org/vtc2007fall/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [29] Sphere Decoding for Multiple Antenna Systems, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.nari.ee.ethz.ch/wireless/education/sada/descriptions/br3.html>
- [30] IEEE 802.11n, http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11n, alındığı tarih 26.04.2009.
- [31] **Lorincz, J., Begusic, D.**, 2006: Physical Layer Analysis of Emerging IEEE 802.11n WLAN Standard, *Proc. of 8th International Conference on Advanced Communication Technology*, Vol. **1**, pp. 189-194, Feb. 2006.

- [32] **Singh, M., et al.**, 2005: WWiSE Proposal: High throughput extension to the 802.11 Standard, IEEE 802.11-04/886r6.
- [33] **Venkatraman, M.**, Marvell Semiconductor, Inc. (September 01, 2006): 802.11n: How Fast? How Far? How Soon?, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.ecnmag.com/802-11n-how-fast-how-far-how.aspx>
- [34] Broadcom Corporation, (April 21, 2006): White Paper: 802.11n: Next-Generation Wireless LAN Technology, Retrieved April 26, 2009 from http://www.broadcom.com/docs/WLAN/802_11n-WP100-R.pdf
- [35] **Geier, J.**, (2008). Which Is Better: 802.11n 2.4 GHz or 5 GHz?, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.linuxplanet.com/linuxplanet/reports/6581/1/>
- [36] **Gordon, L.S., John, R. B., Steve, W. M., Ye, L.**, Broadband MIMO-OFDM Wireless Communications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. **92**, Feb 2004, pp. 271-294.
- [37] **Heiskala, J., Terry, J.**, 2001: *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*, Sams Publishing.
- [38] The status of VoIP, *ITU News Magazine*, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.itu.int/itunews/manager/display.asp?lang=en&year=2007&issue=02&ipage=futureVoice2&ext=html>
- [39] Block Acknowledgement, Retrieved April 26, 2009 from http://en.wikipedia.org/wiki/Block_acknowledgement
- [40] <http://www.wirevolution.com/2007/09/07/how-does-80211n-get-to-600mbps>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [41] <http://doctus.org/makale-wimax-nedir-t264.html>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [42] COST Hata Model, Retrieved April 26, 2009 from http://en.wikipedia.org/wiki/COST_Hata_model
- [43] Study Paper on Scalable OFDM Access (2007). Retrieved April 26, 2009 from <http://www.tec.gov.in/technology%20updates/study%20paper%20on%20s-ofdma-N%20divn.pdf>
- [44] Motorola, Inc., (2007): White Paper: A Practical Guide to WiMAX Antennas, Retrieved April 26, 2009 from http://www.motorola.com/staticfiles/Business/Solutions/Industry%20Solutions/Service%20Providers/Wireless%20Operators/Wireless%20Broadband/wi4%20WiMAX/_Document/StaticFile/A_Practical_Guide_to_WiMAX_Antennas_White_Paper.pdf
- [45] **Mujtaba, S.A.**, 2008: Standardization of MIMO-OFDM Technology, *International Networking and Communications Conference*, 1-3 May 2008.
- [46] <http://www.ist-mascot.org/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [47] **Bakshi, M.**, (April 24, 2006): VoIP / Multimedia over WiMAX (802.16), Retrieved April 26, 2009 from http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/wimax_voip.pdf

- [48] **She, J., Fen, H., Liang-Liang X.**, IPTV over WiMAX: Key Success Factors, Challenges, and Solutions, *IEEE Communications Magazine*, Vol. **45**, August 2007, pp. 87-93.
- [49] BreezeACCESS, (July 2006): White Paper: Implementing VoIP Service Over Wireless Network, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.alvarion.com/upload/contents/291/VoIP%20over%20wireless%20networks%20060706.pdf>
- [50] **Ekling, J., Gidlund, M., Flodin, R.**, (2007): Performance of Triple Play Services in Wireless Meshed Networks, *IEEE International Symposium on Consumer Electronics 2007*, pp. 1-5.
- [51] Spirent Communications, Inc. (May 2007): White Paper: Measuring Jitter Accurately, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.spirent.com/documents/4814.pdf>
- [52] **Retnasothie, F. E., Ozdemir, M. K., Yucek, T.**, Wireless IPTV over WiMAX: Challenges and Applications, *Proc. IEEE WAMICON*, 2006.
- [53] **Hillestad, O. I.**, 2007: *Evaluating and Enhancing the Performance of IP-based Streaming Media Services and Applications*, Doktoravhandling ved NTNU, 2007:112, Retrieved April 26, 2009 from <http://ntnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:122434>
- [54] **Wang, Y., Claypool, M., Zuo, Z.**, (2001). An empirical study of RealVideo performance across the internet, *Proc. ACM Internet Measurement Workshop*, pp. 295-309.
- [55] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands, *IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor 12005*, February 2006.
- [56] **Hasan, M. A.**, (2007): Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer, Helsinki University, Retrieved April 26, 2009 from <http://lib.tkk.fi/Dipl/2007/urn009599.pdf>
- [57] **Halepovic, E., Ghaderi, M., Williamson, C.**, Multimedia Application Performance on a WiMAX Network, University of Calgary, Canada, Retrieved April 26, 2009 from http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~emirh/pub/Halepovic_MMCN09_MMoverWiMAX_pre.pdf
- [58] **Bopping, S., Shea, J. M.**, Superposition coding in the downlink of CDMA cellular systems, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 3-6 April 2006, Vol. **4**, pp. 1978- 1983.
- [59] Mobile IT Forum, 4G mobile system requirements document (ver. 1.1), Retrieved April 26, 2009 from http://www.mitf.org/public_e/archives/4G_req_v110E.pdf
- [60] IETF RFC3775, Mobility Support in IPv6, June 2004, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.ietf.org/rfc/rfc3775.txt>
- [61] **Li, B., Qin, Y., Low, C.P.**, A Survey on Mobile WiMAX, *IEEE Communications Magazine*, Vol. **45**, Dec. 2007, pp. 70-75.

- [62] **Yigal, L., Itzik, K., Yossi, S.**, (May 2004): Handoff Text Clarifications and Enhancements, Retrieved April 26, 2009 from http://wirelessman.org/tge/contrib/C80216e-04_87r1.pdf
- [63] **Başlı, A. B.**, (2006): Mobil IPV6 Ağlarında Aktarım Yöntemlerinin Performanslarının Simülasyon Araçları Kullanılarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi.
- [64] **Bargh, M.S. Hulsebosch, B. Eertink, H.**, Reducing Handover Latency in Future IP-Based Wireless Networks: Proxy Mobile IPv6 with Simultaneous Bindings, *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008*, 23-26 June 2008, pp. 1-10.
- [65] <http://NSL.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [66] **Sanford, J.R.**, (June 2008): Site planning for Mobile WiMAX, Retrieved April 26, 2009 from http://www2.electronicproducts.com/Site_planning_for_Mobile_WiMAX-article-farr_laird_jun2008-html.aspx
- [67] **Demarty, J., Popper, A.**, (January 13, 2005): Operational margins for DL link adaptation, Retrieved April 26, 2009 from http://wirelessman.org/maint/contrib/C80216maint-05_025r1.pdf
- [68] **Jain, R.**, (April 29, 2008): Triple Play Services over Mobile WiMAX, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.cse.wustl.edu/~jain/wimax/3play.htm>
- [69] <http://www.netstumbler.com/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [70] <http://www.noc.ucf.edu/Tools/Iperf/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [71] <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [72] <http://www.videolan.org/vlc/>, alındığı tarih 26.04.2009.
- [73] **Plumb, G.**, The future of HDTV broadcasting, Retrieved April 26, 2009 from <http://www.iee.org/oncomms/pn/visualinformation/Graham%20Plumb.pdf>

EKLER

EK A.1 : 802.11n başarımlı analizinde kullanılan cihaz özellikleri

EK A.2 : NCTUns benzetim yazılımı çıktısı

EK A.1

802.11n Telsiz İstemci	Bilgisayar Türü	ACPI Tek işlemcili Bilgisayar (Mobile)
	İşletim Sistemi	Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3
	CPU Türü	Mobile Intel Pentium M 760, 2000 MHz
	Anakart Çipseti	Mobile Intel Alviso i915PM
	Sistem Belleği	1024 MB (DDR2-533 DDR2 SDRAM)
	BIOS Türü	AMI (11/07/05)
	Görüntü Bağdaştırıcısı	NVIDIA GeForce Go 7300 (256 MB)
	Ses Bağdaştırıcısı	Realtek ALC880 High Definition Audio Controller
	Disk Sürücüsü	FUJITSU MHV2060AT (60 GB, 4200 RPM, Ultra-ATA)
	Ağ Bağdaştırıcıları	Intel(R) PRO/Wireless 2200BG Linksys WUSB300N
802.3 Kablolu İstemci	Bilgisayar Türü	ACPI Tek işlemcili Bilgisayar (Mobile)
	İşletim Sistemi	Microsoft Windows XP Professional Service Pack 3
	CPU Türü	Mobile Intel Pentium M, 1866 MHz
	Anakart Çipseti	Mobile Intel Alviso-G i915GM(S)/910GML
	Sistem Belleği	1024 MB (DDR2-533 DDR2 SDRAM)
	BIOS Türü	Phoenix
	Görüntü Bağdaştırıcısı	Mobile Intel(R) 915GM/GMS,910GML Express
	Ses Bağdaştırıcısı	Intel 82801FBM ICH6-M - AC'97 Audio Controller
	Disk Sürücüsü	TOSHIBA MK6034GSX (60 GB, 5400 RPM, SATA)
	Ağ Bağdaştırıcıları	Realtek RTL8139/810x Family Fast Ethernet NIC Intel PRO/Wireless 2200BG
Erişim Noktası	Standardlar	Draft 802.11n, 802.11g, 802.11b, 802.3, 802.3u
	Portlar	4x100Mbps Ethernet
	Kablo Tipi	CAT 5e
	Anten Sayısı	2
	RF Gücü (EIRP)	14 dBm
	Güvenlik	WEP, WPA, WPA2
İstemci adaptörü	Standardlar	Draft 802.11n, 802.11g, 802.11b, 802.3, 802.3u
	Portlar	USB
	Modülasyon	802.11b: CCK, QPSK, BPSK
		802.11g: OFDM
		Wireless-N: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
	Anten Sayısı	2
	RF Gücü (EIRP)	Wireless-N, 802.11b/g: 14±1dBm
	Alıcı Hassasiyeti	11Mbps @ -86dBm
		54Mbps @ -68dBm
		Wireless-N @ -62dBm
	Güvenlik	WEP, WPA, WPA2

Çizelge A.1: 802.11n başarımlarında kullanılan cihaz özellikleri

EK A.2

```

Successfully Connected to Coordinator!! Socket fd:27
Open signal file /home/nctuns/.nctuns/coordinator/workdir/nctuns-1235238454-job/tcp.sig success
Current Time:    0.00 sec   Event#: <Insert:10, Dequeue:3, Rest:7>
Current Time:    1.00 sec   Event#: <Insert:232, Dequeue:232, Rest:7>
Current Time:    2.00 sec   Event#: <Insert:233, Dequeue:233, Rest:7>
Time:2029661039 MS(3) Receive SNR=58.449439 dB and use diuc=6(fec=6)
Time:2029969837 BS(2) Accept New MS:LinkMode=Auto (SNR=51.759648 dB), DIUC=6 UIUC=7

=====3==IF=PROGRAM=RUN=TO=HERE=THAT'S=NETWORK=ENTRY=OK=====

Current Time:    3.00 sec   Event#: <Insert:241, Dequeue:241, Rest:7>
Current Time:    4.00 sec   Event#: <Insert:235, Dequeue:235, Rest:7>
Current Time:    5.00 sec   Event#: <Insert:233, Dequeue:233, Rest:7>
current ticks= 6000000000, run "3 rtcp -p 9000 -w MNlog"
Log file: /home/nctuns/.nctuns/coordinator/workdir/nctuns-1235238454-job//MNlog
finish
Current Time:    6.00 sec   Event#: <Insert:236, Dequeue:236, Rest:7>
current ticks= 7000000000, run "1 stcp -p 9000 1.0.2.2"
Final buf size is 1048576
tcp buffer 1048576 bytes, writes of 8192 bytes
destination 1.0.2.2 1.0.2.2, port 9000
finish
TOE_TIMEOUT: currentTime_[0] > (te.value*1000)
CurTime 7000000000 readt0e(): TOE_TIMEOUT, te.value = 5705000
Current Time:    7.00 sec   Event#: <Insert:235, Dequeue:234, Rest:8>
Current Time:    8.00 sec   Event#: <Insert:20074, Dequeue:19351, Rest:731>
8089      8          3120 Kbyte/sec ==>  24.381375 Mbit/sec
Current Time:    9.00 sec   Event#: <Insert:20352, Dequeue:20523, Rest:560>
8089      9          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
Current Time:   10.00 sec   Event#: <Insert:20352, Dequeue:20405, Rest:507>
8089     10          3205 Kbyte/sec ==>  25.042750 Mbit/sec
Current Time:   11.00 sec   Event#: <Insert:20355, Dequeue:20379, Rest:483>
8089     11          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
Current Time:   12.00 sec   Event#: <Insert:20349, Dequeue:20378, Rest:454>
8089     12          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
Current Time:   13.00 sec   Event#: <Insert:20238, Dequeue:20233, Rest:459>
8089     13          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
Current Time:   14.00 sec   Event#: <Insert:20355, Dequeue:20369, Rest:445>
8089     14          3205 Kbyte/sec ==>  25.042750 Mbit/sec
Current Time:   15.00 sec   Event#: <Insert:20352, Dequeue:20377, Rest:420>
8089     15          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
Current Time:   16.00 sec   Event#: <Insert:20269, Dequeue:20264, Rest:425>
8089     16          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
current ticks= 17000000000, kill process of pid 8090
Current Time:   17.00 sec   Event#: <Insert:20351, Dequeue:20373, Rest:403>
8089     17          3206 Kbyte/sec ==>  25.054063 Mbit/sec
current ticks= 18000000000, kill process of pid 8089
Current Time:   18.00 sec   Event#: <Insert:569, Dequeue:958, Rest:14>
Current Time:   19.00 sec   Event#: <Insert:231, Dequeue:236, Rest:9>
Current Time:   20.00 sec   Event#: <Insert:233, Dequeue:242, Rest:0>
Simulation is done.
DONE!

```

Şekil A.1: Örnek NCTUns çıktısı

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Nevzat PINAR

Doğum Yeri ve Tarihi: Eskişehir 13.05.1984

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi – Telekomünikasyon Müh.