

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

WRAN SİSTEMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Müh. Serpil İLHAN

Anabilim Dalı: Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Hasan DİNÇER

KOCAELİ, 2009

WRAN SİSTEMİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektronik Müh. Serpil İLHAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Ocak 2009

Tezin Savunulduğu Tarih: 26 Mart 2009

Tez Danışmanı

Üye

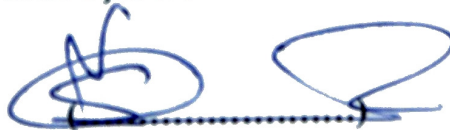
Üye

Prof.Dr.Hasan DİNÇER

Yrd.Doç.Dr.Sıtkı ÖZTÜRK

Yrd.DoçDr.Soner ÖZGÜNEL


(.....)


(.....)


(.....)

KOCAELİ, 2009

6.3. Bilişsel Radyo Fiziksel Mimarisi.....	35
6.4. Bilişsel Radyo RF Uç Birimi.....	36
6.5. Bilişsel Radyo Döngüsü.....	38
6.5.1. Bilişsel kapasite.....	38
6.5.2. Bilişsel radyo döngü fazları.....	39
6.5.2.1. Gözlemeleme (Observe).....	39
6.5.2.2. Yönlendirme (Orient).....	39
6.5.2.3. Planlama (Plan).....	40
6.5.2.4. Karar verme (Decide).....	40
6.5.2.5. Harekete geçme (Act).....	40
6.5.2.6. Öğrenme (Learning).....	40
6.6. Bilişsel Radyo Ağ Mimarisi.....	42
6.6.1. BR ağ işlevleri.....	44
6.6.1.1. Lisanslı banttaki BR ağı.....	44
6.6.1.2. Lisanssız banttaki BR ağı.....	45
6.6.2. BR ağ uygulamaları.....	46
6.7. BR Fonksiyonları.....	47
6.7.1. Spektrum algılama.....	47
6.7.1.1. Verici algılama.....	47
6.7.1.1.1. Uyumlu filtre algılama.....	48
6.7.1.1.2. Enerji algılama.....	48
6.7.1.1.3. Dairesel durağan özellik algılama.....	49
6.7.1.2. Ortak (Cooperative) algılama.....	49
6.7.1.3. Girişim temelli algılama.....	51
6.7.2. Spektrum yönetimi.....	53
6.7.2.1. Spektrum analizi.....	53
6.7.2.2. Spektrum kararı.....	55
6.7.3. Spektrum taşınabilirliği.....	56
6.7.3.1. Spektrum geçişi.....	56
6.7.4. Spektrum paylaşımı.....	57
6.7.4.1. Spektrum paylaşım teknikleri.....	59
6.7.4.2. Ağlar arası spektrum paylaşımı.....	62
6.7.4.2.1. Ağlar arası merkezi spektrum paylaşımı.....	63
6.7.4.2.2. Ağlar arası dağıtık spektrum paylaşımı.....	63
6.7.4.3. Ağ içi spektrum paylaşımı.....	64
6.7.4.3.1. Ağ içi ortak spektrum paylaşımı.....	64
6.7.4.3.2. Ağ içi ortak olmayan spektrum paylaşımı.....	65
6.8. Bilişsel Radyo Üst Katman Konuları.....	66
6.8.1. Ağ katmanı.....	66
6.8.1.1. Topolojinin kurulması.....	66
6.8.1.2. Adresleme.....	68
6.8.1.3. Yönlendirme.....	69
6.8.2. Taşıma katmanı.....	69
6.9. Bilişsel Radyo Çapraz Katman Tasarımı.....	70
6.9.1. Spektrum yönetiminde çapraz katman zorlukları.....	70
6.9.2. Spektrum taşınabilirliğinde çapraz katman zorlukları.....	71
6.9.3. Spektrum paylaşımında çapraz-katman zorlukları.....	71
6.9.4. Üst katmanlarda çapraz-katman zorlukları.....	72
7. SPEKTRUM PAYLAŞIM UYGULAMASI.....	74

7.1. Sistem Modeli	75
7.2. Hesaplama Modeli	77
7.3. Karşılaştır ve Dengele Spektrum Paylaşım Algoritması.....	78
7.4. Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması.....	80
7.5. Yazılım Modeli	81
7.5.1. Algoritmaların gerçekleştirilmesi esnasında karşılaşılan zorluklar	83
7.5.2. Uygulama sonuçları ve karşılaştırmalar	85
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR.....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Örnek IEEE 802.22 yerleşim senaryosu.....	6
Şekil 4.1 WRAN standardının diğer kablosuz standartlarla karşılaştırılması.....	9
Şekil 4.2 Zamanda ve frekans ekseninde TV bant işgali(Cordeiro ve diğ., 2006).....	10
Şekil 4.3 Kanal Bağlama Diagramı(Cordeiro ve diğ., 2006).....	13
Şekil 4.4 Genel üst çerçeve yapısı(Akyıldız ve diğ., 2006).....	14
Şekil 4.5 Mac çerçevesinin Zaman/Frekans yapısı(Akyıldız ve diğ., 2006).....	15
Şekil 4.6 İki aşamalı sessiz periyot mekanizması (Cordeiro ve diğ., 2007)	18
Şekil 5.1 Saklı birincil kullanıcı sistemi senaryosu(Kim ve diğ., 2007).....	24
Şekil 5.2 Belirgin bant dışı sinyalleşme örneği(Kim ve diğ., 2007).....	26
Şekil 6.1 Spektrum kullanımı (Akyıldız ve diğ., 2006).....	27
Şekil 6.2 Yeni nesil ağ haberleşme işlevleri (Hester ve Ridley, 2008)	29
Şekil 6.3 Sayısal, yazılım ve bilişsel radyonun karşılaştırması (Clancy,2006).....	30
Şekil 6.4 BR'nin işlevsel bileşenleri (Clancy, 2006).....	32
Şekil 6.5 Spektrum boşluğu kavramı(Akyıldız ve diğ., 2006).....	33
Şekil 6.6 Spektrum havuzu kavramı(Cabric ve diğ., 2005)	34
Şekil 6.7 Bilişsel radyo fiziksel mimari (Akyıldız ve diğ.,2006).....	36
Şekil 6.8 BR döngüsü(Mitola, 2006)	38
Şekil 6.9 Bilişsel döngü	41
Şekil 6.10 Bilişsel radyo ağı(Akyıldız ve diğ., 2006).....	42
Şekil 6.11 Lisanslı bantta BR ağı(Akyıldız ve diğ., 2006)	45
Şekil 6.12 Lisanssız bantta BR ağı(Akyıldız ve diğ., 2006)	45
Şekil 6.13 Verici algılama problemi (Akyıldız, 2008)	50
Şekil 6.14 Ortak algılama modeli (Akyıldız, 2008)	51
Şekil 6.15 Girişim sıcaklık modeli (Akyıldız ve diğ., 2006)	52
Şekil 6.16 BR ağları için spektrum kararı taslağı(Lee and Akyıldız (2007))	56
Şekil 6.17 Merkezi spektrum paylaşımı (Akyıldız, 2008)	60
Şekil 6.18 Ağlar arası ve ağ içi spektrum paylaşımı(Akyıldız ve diğ., 2006)	63
Şekil 6.19 Ağlar arası merkezi ve dağıtık spektrum paylaşımı(Akyıldız, 2008)	64
Şekil 6.20 Ağ içi ortak ve ortak olmayan spektrum paylaşımları (Akyıldız, 2008)...	65
Şekil 7.1 Deneme-1 için performans karşılaştırma grafiği	87
Şekil 7.2 Deneme-2 için performans karşılaştırma grafiği	88
Şekil 7.3 Deneme-3 için performans karşılaştırma grafiği	88

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 3.1 IEEE 802.22 Sistem Parametreleri(Takado ve Po, 2006)	7
Tablo 5.1 Dinamik frekans seçimi parametreleri(Cordeiro ve diğ., 2007)	21
Tablo 7.1 Karşılaştır ve Dengele Algoritmasının Sözde Kodu	79
Tablo 7.2 Monte Carlo algoritması.....	81
Tablo 7.3 Deneme-1.....	85
Tablo 7.4 Deneme-2.....	86
Tablo 7.5 Deneme-3.....	86

KISALTMALAR

ADC	: Analog Digital Converter
ADP	: Asynchronous Distributed Pricing
AGC	: Automatic Gain Control
ATSC:	: Advanced Television Systems Committee
AWGN:	: Additive White Gaussian Noise
BR:	: Bilişsel Radyo
CORVUS	: Cognitive Radio Approach for usage of Virtual Unlicensed Spectrum
CPE:	: Customer Promise Equipment
CSCC:	: Common Spectrum Coordinated Channel
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
DFS	: Dynamic Frequency Selection
DHCP	: Dynamic Host Configuration Protocol
DSAP	: Dynamic Spectrum Access Protocol
DSP	: Digital Signal Processor
DTV	: Digital TV
EIRP	: Equivalent Isotropically Radiated Power
FCC	: Federal Communications Commission
FFT	: Fast Fourier Transform
FPGA	: Field Programmable Gate Array
HDL	: Hardware Description Language
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	: Intermediate Frequency
ISM	: Industrial, Scientific and Medical
LAN	: Local Area Network
LNA	: Low Noise Amplifier
MAN	: Metropolitan Area Network
MAC	: Medium Access Control
NPRM	: Notice of Proposed Rule Making
NTSC	: National Television System Committee
OFDMA	: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
OSI	: Open Systems Interconnection
PAN	: Personal Area Network
PC	: Personal computer
PLL	: Phase Locked Loop
PHY	: Physical Layer
QAM	: Quadrature Amplitude Modulation
QPSK	: Quadrature Phase Shift Keying
RF	: Radio Frequency
SNR	: Signal to Noise Ratio
SDR	: Software Defined Radio
SPS	: Spectrum Policy Server
TV	: Television

TCP	: Transport Control Protocol
US	: United States
UHF	: Ultra High Frequency
UDP	: User Datagram Protocol
VCO	: Voltage Controlled Oscillators
VHF	: Very High Frequency
Wi-Fi	: Wireless Fidelity
WRAN	: Wireless Regional Area Network
UNII	: Unlicensed National Information Infrastructure

WRAN SİSTEMİ

Serpil İLHAN

Anahtar Kelimeler: WRAN IEEE 802.22, Bilişsel Radyo, FCC, Dinamik Spektrum Erişimi, Spektrum Paylaşımı, Dağıtık Spektrum Paylaşımı, Spektrum Algılama, Spektrum Yönetimi, Spektrum Taşınabilirliği, Nash Dengesi

Özet: IEEE 802.22, TV frekans spektrumunda Federal Haberleşme Komitesi(FCC) tarafından tahsis edilen boş kanalları kullanarak kablosuz bölgesel alan ağlarını(WRAN, Wireless Regional Area Network) kurmayı hedefleyen IEEE 802 LAN/MAN standart komitesinin yeni bir çalışma grubudur. WRAN sisteminin fiziksel ve özellikle Mac katmanı tasarımının temeli, etrafındaki spektrumu algılayabilen ve buna göre dinamik olarak radyo çalışma parametrelerini ayarlayabilen Bilişsel Radyo teknolojisidir. Dinamik spektrum erişim teknikleri bilişsel radyonun en uygun kanalı seçmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, ilk olarak WRAN sistemi ve bilişsel radyo detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonra dinamik spektrum erişimi için kullanılan bilişsel radyo işlevleri ve bu konularda karşılaşılan zorluklar açıklanmıştır. Özellikle Mac katmanının çok önemli bir konusu olan spektrum paylaşımı ele alınmıştır. WRAN sistem tasarımı için kritik olan bazı teorik yaklaşımların uygulanabilirliğini kanıtlamak amacıyla, dağıtık spektrum paylaşım tekniğinde yük dengelenmesini temel alan ve bilişsel radyoların kanal tahsisi için kullanılan Karşılaştır ve Dengele Spektrum Paylaşım Algoritması ile proje kapsamında geliştirilen ve merkezi spektrum paylaşım tekniğini kullanan Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması C++ dili kullanılarak uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır.

WRAN SYSTEM

Serpil İLHAN

Keywords: WRAN IEEE 802.22, Cognitive Radio, FCC, Dynamic Spectrum Access, Spectrum Sharing, Distributed Spectrum Sharing, Spectrum Sensing, Spectrum Management, Spectrum Mobility, Nash Equilibrium

Abstract: IEEE 802.22 is a new working group of IEEE 802 LAN/MAN standards committee which aims at constructing Wireless Regional Area Network (WRAN) utilizing white spaces (channels that are not already used) in the allocated TV frequency spectrum. Phy and particularly Mac layer design is based on Cognitive Radio which dynamically adapt its radio operating parameters by sensing spectrum. Dynamic spectrum access techniques provides cognitive radios to sense the most available channel. In this thesis firstly WRAN system and cognitive radio are investigated in detail. Then, cognitive radio functions and challenges about these functions which are used for dynamic spectrum access are specified. Especially, spectrum sharing which is a critical issue of MAC layer is discussed. With the aim of proving the applicability of some theoretical approaches that are critical for WRAN system design, an implementation based on distributed spectrum sharing is executed. Therefore, Compare and Balance Spectrum Sharing Algorithm which is used for distributed spectrum sharing and load balancing for channel allocation of cognitive radios and Monte Carlo Spectrum Sharing Algorithm which is used for centralized spectrum sharing are implemented and their performances are compared by using C++ language.

1. GİRİŞ

Mobil haberleşme, kamu güvenliği, Wi-Fi (Wireles Fidelity) ve TV (Television) yayını gibi kullanımlar için kablosuz hizmetlerin ve cihazların çoğalması modern toplumun radyo spektrumuna ne kadar bağlı hale geldiğinin tartışmasız bir göstergesidir. Uzak mesafelere genişbant kablosuz erişim, sağlık hizmetleri, kablosuz PAN (Personal Area Network)/LAN (Local Area Network)/MAN (Metropolitan Area Network) ve kablosuz telefonları içeren yeni uygulamaların yaygınlaşmasından sonra özellikle lisanssız bantlar (ISM,Industrial, Scientific and Medical ve UNII, Unlicensed National Information Infrastructure gibi) bu kablosuz ekosistemde önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Lisanssız işlemlerin bu büyük başarısı ve bundan kaynaklanan teknolojideki birçok gelişme ile, düzenleyici idareciler (Federal Haberleşme Komisyonu-FCC, Federal Communications Commission gibi) daha uzak bantları lisanssız kullanıma açmaya karar vermiştir. Oysa ki, spektrum doluluk oranı ölçümleri, TV bantları gibi lisanslı bantların da olması gerektiğinden daha az kullanıldığını göstermektedir.

Bilişsel Radyo (çalışmanın geri kalanında BR şekline isimlendirilmiştir) teknolojisi, radyo spektrumunun az kullanımı için bir çözüm olarak görülmüştür. BR, etrafındaki spektrum kullanımını sezebilen, çalışma ortamını algılayabilen, bunlarla birlikte dinamik bir yapıda ve otomatik olarak radyo çalışma parametrelerini ayarlayabilen bir teknolojidir. BR'ler, kullanılmayan spektrumun geniş bir bölümünü lisanslı frekans bantlarında çalışan diğer zorunlu cihazlarla girişime neden olmadan kullanabilme kapasitesine sahiptir. BR'ler radyo teknolojisindeki hızlı ve önemli ilerlemelerle (yazılım tanımlı radyo,frekans çevikliği, güç kontrolü gibi) kullanılabilir hale gelmiştir ve geniş-bant spektrum algılama, gerçek zamanlı spektrum tahsisi ve kazanımı gibi karmaşık teknolojilerden yararlanma ile tanımlanabilirler.

Bütün bu gelişmeler ve altyapılar ile, TV bant NPRM (Notice of Proposed Rule Making), FCC tarafından atılan bir sonraki adım olmuştur. NPRM Mayıs 2004'de ortaya çıkmıştır ve lisanssız kullanıcıların zarar verici bir girişime neden olmadan TV yayın bantlarında çalışmasını izin vermeyi amaçlanmaktadır

IEEE 802.22 aktivitesi, dünya çapında ilk kez TV kanallarının fırsatçı yaklaşımla ve girişime neden olmayacak şekilde kullanımı için standartlaştırılmış bir hava ara yüzü olarak tanımlanmıştır. Bu standart Kablosuz Bölgesel Alan Ağlarını (WRAN, Wireless Regional Area Network) kurmayı hedeflemiştir. IEEE'nin 802.22 standardına en yakın standardı 802.16'dır. Fakat aralarında çok bariz farklar vardır. 802.22 standardı kırsal ve uzak mesafeleri hedef almıştır. Kapsama alanı da 802.16'ya göre oldukça geniştir. Ayrıca 802.16, lisanslı bantlar da çalışmak için zorunluların korunması tekniklerini kapsamamaktadır.

Bu çalışmanın İkinci Bölümü'nde IEEE 802.22 standardının ön hazırlıklarından bahsedilmektedir. Sistemin hedefleri ve düzenleyici taslağı üzerinde durulmaktadır.

Çalışmanın Üçüncü Bölümü'nde sistemin genel yapısından bahsedilmiştir. Sistem topolojisi, bu topolojide yer alan elemanlar ve bunların arasındaki ilişkiler vurgulanmaktadır. Ayrıca sistem tasarımı için önemli olan kapasite ve kapsama alanı konuları da bu bölümün kapsamı içindedir.

Çalışmanın Dördüncü Bölümü'nde ise Birinci Bölüm'de bahsedilen hedeflere ulaşmak için İkinci Bölüm'de bahsedilen sistem parametrelerini kullanan esnek ve uyarlanabilir yapıya sahip 802.22 hava ara yüzü ele alınmaktadır. Ayrıca bu esnekliği ve uyarlanabilirliği destekleyen fiziksel katman ve MAC katmanı tasarımları üzerinde durulmaktadır. Fiziksel katman tasarımının temelini oluşturan OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) modülasyonu ve daha fazla bant genişliği sağlamayı amaçlayan TV kanallarını bağlama mekanizması konuları anlatılmaktadır. MAC tasarımı bölümünde ise üst çerçeve ve çerçeve yapısı detaylandırılmakta ve ayrıca birincil kullanıcıların tespiti için kullanılan iki aşamalı sessiz periyot mekanizması anlatılmaktadır.

Bir sonraki Beşinci Bölüm'de WRAN sistemi için yine çok kritik bir konu olan birlikte var olma (coexistence) üzerinde durulmaktadır. Dinamik frekans seçimi gibi birincil ve ikincil kullanıcıların birlikte olması için geliştirilen teknikler ve bunları gerçekleştirme aşamasında karşılaşılan zorluklar anlatılmaktadır.

Altıncı Bölüm'de ise WRAN sisteminin anahtar teknoloji ve temeli olan bilişsel radyo detaylı bir şekilde incelenmektedir. İlk olarak BR gelişimi, fiziksel mimarisi, RF uç birimi anlatılmaktadır. Ayrıca BR'nin çalışma prensibini sonlu durum mekanizması şeklinde özetleyen BR döngüsünün bütün durumları ayrı ayrı incelenmektedir. Daha sonra BR ağ mimarisi, ağ işlevleri, uygulamaları açıklanmıştır. Bu bölümde üzerinde durulan bir diğer önemli konu, BR işlevleridir. Bu işlevler spektrum algılama, yönetimi, taşınabilirliği ve paylaşımı olarak özetlenip ve bunları gerçekleştirmek için sunulan çözümlerden ve karşılaşılan zorluklardan bahsedilmektedir.

Yedinci Bölüm'de spektrum paylaşım algoritmalarından proje kapsamında geliştirilen Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması ile Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında geliştirilen Karşılaştır ve Dengele Spektrum Paylaşım Algoritmalarının nasıl gerçekleştirildiği detaylı şekilde anlatılırken karşılaştırılmaları da bu bölümde yapılmıştır.

Sonuç Bölümü'nde ise Yedinci Bölüm'de detaylı olarak anlatılan algoritmaların karşılaştırılması yapılmıştır. Performans değerlendirilmeleri sonucunda proje kapsamında geliştirilen Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması'nın, Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında geliştirilen Karşılaştır ve Dengele Spektrum Paylaşım Algoritma'sına göre daha doğru sonuçlar verdiği ortaya çıkmıştır.

Kısaca bu tez çalışması, WRAN IEEE 802.22 sisteminin ve onun anahtar teknoloji olarak kabul edilen BR'nin detaylı bir şekilde incelenmesinden oluşmaktadır. Ayrıca burada yer alan teorik çalışmaların uygulamaya geçirilebileceğini göstermek amacıyla, C++ dili kullanılarak BR'nin en temel işlevlerinden birisi olan spektrum paylaşımı konusu dahilindeki iki algoritmanın uygulaması yapıp ve performansları incelenmektedir.

2. IEEE 802.22 ÖN HAZIRLIKLARI

1930'lardan bu yana FCC, radyo frekans spektrumunu kontrol etmektedir. FCC belirli coğrafik alanlardaki belirli kullanıcılara spektrum bölümlerini kullanmaları için lisans vermektedir. Daha sonra, güç kurallarına uyulduğu sürece bazı lisanssız bantların kullanımına izin vermiştir. Kişisel kablosuz teknolojiye patlama ile birlikte bu lisanssız bantlar kalabalıklaşmaya başlamıştır.

FCC, bu kalabalıklaşma ile mücadele etmek amacıyla RF (Radio Frequency) kaynaklarını yönetmek için yeni yollar araştırmaya başlamıştır. Bu araştırmaların temelini oluşturan fikir, birincil lisans sahiplerinin algıladığı girişimin minimum olması koşuluyla, lisanslı bantların kullanımına izin vermektir.

Bu bölümde, 802.22 standartının özelliklerine geçmeden önce ilk olarak hedefleri ele alınmıştır. Uygulamalar ve marketlerden ve daha sonra düzenleyici taslaktan bahsederken Cordeiro ve diğ. (2006)'nin çalışmasından faydalanılmıştır.

2.1. Uygulamalar ve Marketler

802.22 WRAN sisteminin en önemli hedef uygulaması, kırsal ve uzak alanlardaki kullanıcılara internet ve multimedya (çoklu ortam) hizmetlerine erişmelerini sağlamaktır. Son beş yılda US (United States) geniş bant ile popülasyon paylaşımı ve bu bağlantıların hızı açısından üçüncü sıradan on altıncı sıraya gerilemiştir. Genişbant erişiminin mümkün olması kentsel alanlar için çok fazla kritik değilken, US popülasyonunun yarısının toplandığı (özellikle Güney Amerika, Afrika ve Asya gibi diğer ülkelerde de benzer durum vardır) kırsal ve uzak alanlar için oldukça kritiktir. Bu yüzden, FCC yeni teknolojilerin gelişimini teşvik etmeye başlamıştır.

FCC bu tür hizmetler için uygun yayılım özelliklerinden dolayı TV bantlarını seçmiştir. Ayrıca, spektrum bandında birçok TV kanalının çok fazla meşgul olmadığı

fark edilmiştir. Bu da birçok ailenin ve iş yerinin uydu ve kablolu TV servislerine güvendiğini gösterir. TV bantlarındaki 802.22 cihazlarının diğer bir avantajı lisanssız olmasıdır, bu da ücreti düşürmesi açısından önemli bir avantajdır. 802.22 ağları tarafından işaret edilen diğer anahtar marketler, tek ailelik konutları, çoklu konut birimlerini, sohoları, küçük işletmeleri, çoklu kiracı binalarını, ve genel ve özel kampüsleri kapsar. 802.22 ağı, işitsel ve görsel trafiğin dışında uygun servis kalitesiyle ses ve veri gibi servisleri de sağlayacaktır.

2.2. Düzenleyici Taslak

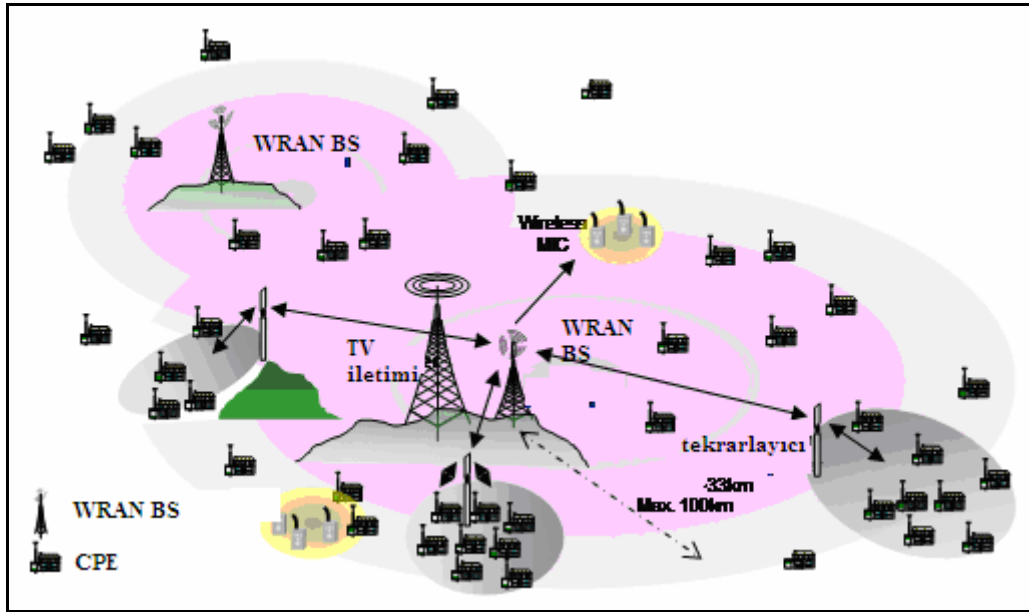
Daha önceden de bahsedildiği gibi 802.22 standardı, BR temelli lisanssız işlemler için, TV servislerine ayrılmış olan spektrumun kullanıma açılmasını öneren FCC'nin hazırladığı NPRM'in ışığında oluşmuştur. US'de TV istasyonları VHF(Very High Frequency)'de 2'den 69'a kadar olan kanallarda çalışır. Bütün bu kanallar 6 MHz genişliğindedir ve 54-72 MHz, 76-88 MHz, 174-216 MHz ve 470-806 MHz frekans aralıklarına yayılmış durumdadır. TV servislerine ek olarak , birincil servisler olarak da adlandırılan kablosuz mikrofonlar gibi diğer servislerin de FCC tarafından boş TV kanallarında çalışmasına izin verilmiştir. TV yayın bantlarındaki lisanssız işlemler için FCC tarafından henüz duyurulmuş olan son kurallar, IEEE 802.22 çalışma grubu tarafından da kabul edilmiştir.

3. IEEE 802.22 SİSTEMİ

BR'lerin ticari gelişimi için önemli atılım US'den gelirken, IEEE 802.22 standardının amacı herhangi bir düzenleyici rejim içinde çalışabilecek uluslararası bir standart tanımlamaktır. Bu yüzden çalışma frekans mesafesini 41-910 MHz arasına çıkarmak için devamlı tartışmalar olurken şu anki 802.22 projesi için Güney Amerika frekans çalışma mesafesi 54-862 MHz arası olarak saptanmıştır. Ayrıca standart 6, 7 ve 8 MHz'lik bant genişliklerindeki çeşitli uluslararası TV kanallarını barındıracaktır.

3.1. Topoloji, Elemanlar ve İlişkileri

802.22 sistemi, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi baz istasyonunun kendisine ait hücreyi ve CPE(Customer Promise Equipment)'leri yönettiği, sabit noktadan-çok noktaya (point-to-multipoint P-MP) yapısındaki kablosuz hava arayüzüne sahiptir.



Şekil 3.1. Örnek IEEE 802.22 yerleşim senaryosu

IEEE 802.22 WRAN sisteminin parametreleri Tablo 3.1’de özetlenmiştir. Genel olarak Takado ve Po (2006)’da yer alan bilgiler ışığında topoloji yapısından bahsedilecek olursa, IEEE 802.22 baz istasyonu kendi hücrelerini ve kendisine bağlı CPE’leri yönetir. IEEE 802.22 baz istasyonu CPE’lerinin modülasyon, kodlama ve çalışma frekansları gibi bazı RF özelliklerini kontrol eder. Ayrıca baz istasyonu, farklı CPE’lere dağıtık ölçüm aktivitelerini yapmaları ve daha sonra bunlardan elde ettikleri raporları kendisine iletmeleri için talimat verir. CPE’lerle arasında olan bu ilişkiden dolayı baz istasyonu, CPE’nin iletim yapmak için izinli olup olmadığına karar verecektir.

Tablo 3.1 IEEE 802.22 Sistem Parametreleri(Takado ve Po, 2006)

Frekans İşlemi	617 MHz (54 to 862 MHz)
Kanal bant genişliği	6 MHz (6/7/8 MHz)
Spektral verimlilik	0.5 bit/s/Hz to 5 bit/s/Hz
Veri hızı	1.5 Mbps (yukarı yön) 384 Mb (aşağı yön)
BS EIRP	100 W
CPE EIRP	4 W
BS yüksekliği	75 m
CR yüksekliği	10 m
Kapsama alanı	33 Km

3.2. Servis Kapasitesi

802.22 sistemi için spektral verimlilik aralığı 0.5-5 bit/sec/Hz olarak belirtilmiştir. Eğer ortalama olarak 3 bit/sec/Hz kapasite düşünülürse, bu verimlilik toplam 6 MHz’lik bir TV kanalı için 18 Mbps’lik bir veri hızına karşılık gelir. 802.22 sisteminde baz istasyonu birçok sayıda CPE’e servis sağlamak için yeterli kapasiteye sahip olmalıdır. Her CPE, aşağı yönde 1.5 Mb/s’lik yukarı yönde ise 384 kb/s’lik veri hızına ihtiyaç duyar.

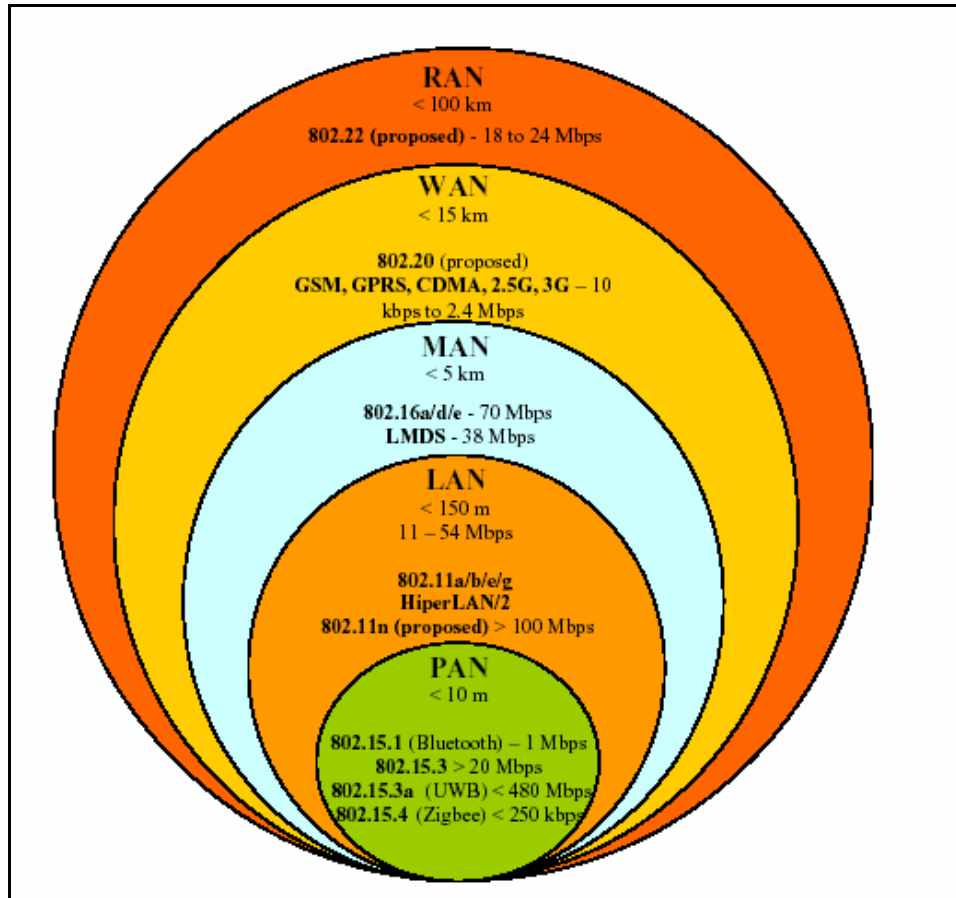
3.3. Servis Kapsama Alanı

802.22 sisteminin var olan IEEE 802 standartlarına kıyasla diğer bir ayırt edici özelliği ise baz istasyonu kapsama alanıdır. Güç sorun olmadığı sürece (şu anki belirtilen 4 Watt CPE EIRP'sinde kapsama alanı 33 km'dir) kapsama alanı 100 km'e kadar çıkmaktadır. Sekil 4.1'de görüldüğü gibi WRAN günümüz ağlarından daha geniş kapsama alanına sahiptir, bu da öncelikle yüksek gücünden ve TV frekans bantlarının elverişli yayılım özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Bu geliştirilmiş kapsama mesafesi benzersiz teknik fırsatlar ve meydan okuyuşlar sunar.

4. 802.22 HAVA ARAYÜZÜ

802.22 sisteminin birincil kullanıcıların(incumbents) korunmasının kesinlikle gerekli olduğu spektrumda çalışmasından dolayı, 802.22 hava arayüzü için ayırt edici ve en kritik gereksinim esneklik ve adapte olabirliktir.

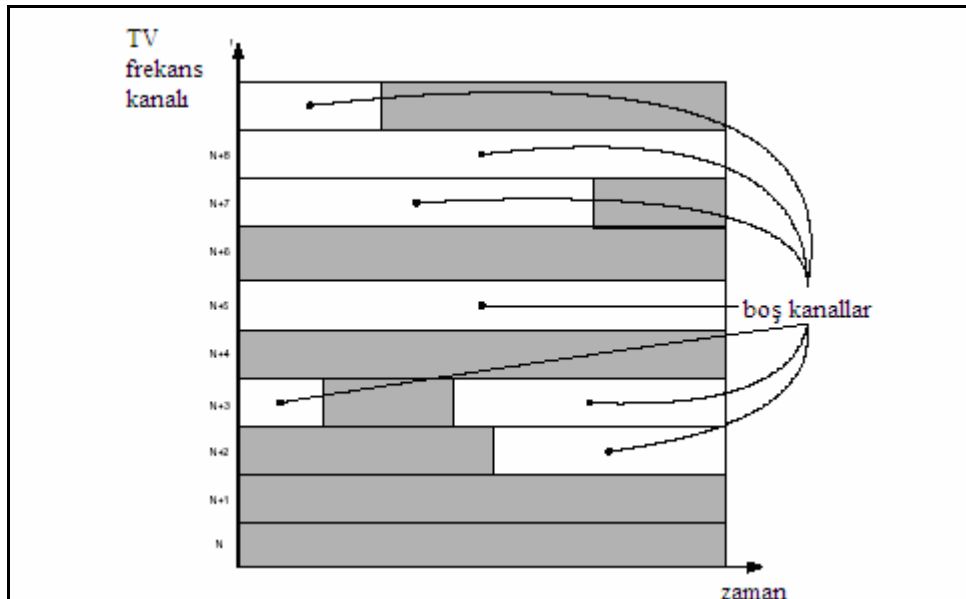
IEEE 802.22 standardı ile diğer 802 standartlarının karşılaştırması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu esnekliği ve adapte olabirliği destekleyen Phy ve MAC tasarımı konusu bir sonraki bölümde, Cordeiro ve diğ. (2006) ve Sengupta ve diğ. (2007) çalışmalarından yararlanılarak ele alınmıştır.



Şekil 4.1 WRAN standardının diğer kablosuz standartlarla karşılaştırılması

4.1. Fiziksel Katman (Phy)

Şekil 4.2’de zamanda ve frekansta zorunlular tarafından TV kanallarının doluluk oranının nasıl olabileceği gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 802.22 baz istasyonu ve CPE’lerin iletim fırsatları genellikle hem MAC (Medium Access Control) katmanını hem de Phy (Fiziksel katman) katmanını etkileyen rasgele bir davranış sergiler. Phy tasarımında hedef alınan konu, karmaşıklığı azaltırken yüksek performans sunmaktır. Buna ek olarak yeterli performans, kapsama alanını ve veri hızını sağlamak için uygun frekanstan yararlanması gerekir. WRAN uygulamaları, kullanıcıların farklı büyüklüklerdeki bağlantı hızlarını desteklemek için aşağı yönde esnekliğe gereksinim duyarken yukarı yönde ise çoklu erişime gereksinim duymaktadır. Çok-taşıyıcılı (multi-carrier) modülasyon, sinyali hem frekans hem zaman alanında kontrol etmeyi sağladığı için oldukça esnektir. Şu anki 802.22 taslağı aşağı yönde (downstream) ve yukarı yönde (upstream), çok taşıyıcılı modülasyon olan OFDMA(Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) modülasyonu üzerine temellenirken kanal bağlama gibi bazı teknolojileri de kullanır. Ayrıca, WRAN uzun gecikme yayılımlarıyla birlikte nitelendirilir. Bu yüzden, 40 mikro sanyelik dairesel(cyclic) ön ek kullanımına gereksinim duyar. Dairesel ön ekten dolayı yükün etkisini azaltmak için bir TV kanalında yaklaşık olarak 2K taşıyıcılar kullanılır.



Şekil 4.2 Zamanda ve frekans ekseninde TV bant işgali(Cordeiro ve diğ., 2006)

4.1.1. Dikgen frekans bölmeli çoklu erişim

Haberleşme için her sembol zaman diliminde tek bir taşıyıcının iletilmesi yerine birden fazla taşıyıcının iletilmesi mümkündür. İletim için birden fazla taşıyıcının kullanılması, çok taşıyıcılı modülasyon olarak adlandırılmaktadır. Birden fazla taşıyıcının aynı anda iletiminin gerçekleşmesi için haberleşme sisteminin bant genişliği, taşıyıcı sayısı kadar alt banda ayrılmaktadır. OFDM aslında hem bir modülasyon hem de bir çoğullama yöntemidir. Bu yöntem ile dikgen taşıyıcılar kullanılarak belirli bir frekans bandından daha fazla taşıyıcı iletebileceği için spektrumun daha verimli kullanılması ve iletim kapasitesinin artırılması mümkün olmaktadır. OFDM sistemi, yüksek iletim hızlarına erişebilmesi, mevcut bant genişliğini etkin bir şekilde kullanabilmesi ve simgelerarası karışma gibi bozucu etkilere karşı dayanıklı olması nedeniyle sayısal abone hatları (DSL), sayısal televizyon (DTV) ve yeni nesil geniş bantlı kablosuz haberleşme sistemleri için verimli bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

OFDM ile taşıyıcıların frekans spektrumunda çakışmalarına izin verildiği için bant genişliğinden kazanç elde edilir. Taşıyıcıların frekans spektrumunda çakışmalarına rağmen birbirini etkilemeden alıcıda doğru olarak çözümlenebilmesi taşıyıcıların dikgen olması ile sağlanmaktadır. OFDM sisteminde taşıyıcıların oluşturulması için hızlı Fourier dönüşümü (FFT) tekniği kullanılmaktadır.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) sistemi uyumlu ve esnek olma gibi avantajlarından dolayı bilişsel radyo temelli sistemler için de düşünülmüştür. Teorik olarak OFDM temelli bilişsel radyo sistemi, 802.22 Phy modülasyon ve kodlama açısından yüksek esneklik sağlar. Örneğin, Sekil 3.1'deki gibi CPE'lerin baz istasyonundan farklı mesafelere yerleşebildiği ve bu yüzden farklı sinyal gürültü oranı (SNR) kalitesinin görüldüğü bir senaryo farz edilirse, bu olayın üstesinden gelmek ve sistem verimliliğini artırmak için baz istasyonunun bant genişliğini, modülasyonu ve üzerindeki kodlamayı dinamik olarak ayarlama kapasitesine sahip olması gerekir. OFDMA, alt taşıyıcıların verimli tahsisine izin verdiği için CPE'lerin gereksinimlerinin karşılanması konusunda mükemmel uyum sağlar. Şu anki teklif, aboneleri 48 alt kanala bölmeyi içerir. Modülasyon şemaları,

1/2, 3/4, 2/3'lük hızlardaki konvülyasyon kodlama şemalarıyla birlikte dikgen faz otelemeli anahtarlama (QPSK), dikgen genlik modülyasyonu 16-QAM, 64-QAM olarak belirlenmiştir. Bu da yeterli esnekliği sağlayarak alt kanal başına bir kaç Kbps'den başlayan ve her TV kanalı başına 19 Mbps'e kadar çıkan veri hızı ile sonuçlanır.

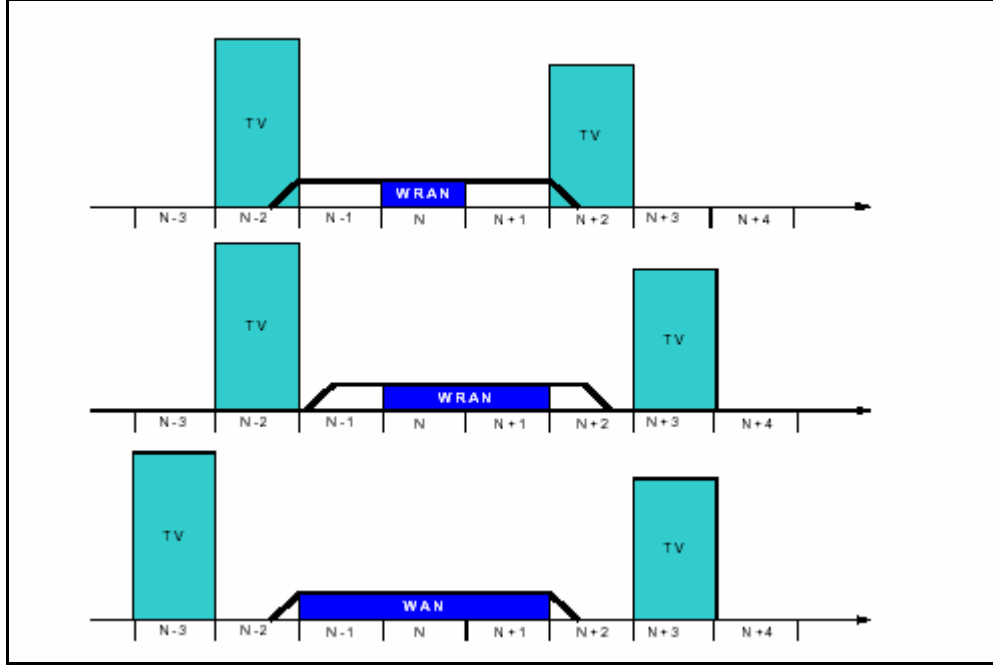
4.1.2. Kanal bağlama

Genellikle daha geniş bant genişliği, frekans seçici olmayan (frequency-non-selective) düz sönümlenmeyi azaltır ve frekans seçici sönümlenme (fading) kanal ortamı içinde daha fazla frekans çeşitliliği sağlar. Ayrıca daha geniş bant genişliği daha büyük kapasite sağlamaktadır. Böylece, spektrum uygun olduğu zaman daha geniş bant genişliği kullanmak yararlı olacaktır. Böylece uygun geniş spektrum, veri hızı için uzaklıktan fedakarlık etmek için kullanılır. Örneğin baz istasyonuna uzak olan cihazlar çok yollu çeşitlilikten (multi-path diversity) dolayı daha fazla iletim ve alım gücünden yararlanırken, yakın olan cihazlar yüksek kapasiteden yararlanabilirler.

İlk bağlantı bütçe analizleri, iletim için sadece bir TV kanalı kullanmanın, 802.22 gereksinimlerini karşılamak için yeterli olmadığını göstermiştir. Bitişik kanalları biraraya getirerek kanal bağlamanın kullanımı, bu gereksinimin karşılanması için ortaya atılmıştır. İki tane kanal bağlama şeması vardır: bitişik ve bitişik olmayan kanalların bağlanması. Şu anki 802.22 taslağı her iki şemayı da desteklemektedir.

Şekil 4.3, kanal bağlama şemasının basit bir diyagramını göstermektedir. Prensipite mümkün olduğunca fazla kanal bağlamak istenilen bir durumdur. Fakat pratik uygulamalar, kaç kanalın bağlanabileceği konusunda kısıtlamalar getirmektedir. Uygulama amaçları için, haberleşme sisteminin RF uç biriminin bant genişliğini sınırlandırmak istenilen bir durumdur. Şu anki US TV tahsisi, ayrılmış olan komşu TV kanallarının aralarında en az 2 boş kanal bulunması konusunda kısıtlama getirmektedir. Bu kısıtlama, yüksek güçlü bir TV kanalının diğerleriyle girişimini azaltmak için düşünülmüştür. Böylece WRAN cihazının çalışması için gerekli olan minimum boş TV kanal aralığı, 3 TV kanalı olacaktır. Buna dayanarak, RF bant

genişliği sadece 3 bitişik kanalla sınırlandırılmıştır. 6 MHz TV kanalı için bu durum 18 MHz'lik RF bant genişliği anlamına gelmektedir.



Şekil 4.3 Kanal Bağlama Diagramı(Cordeiro ve diğ., 2006)

Uygulamayı basitleştirmek için, şu anki kanal bağlama şeması sabit taşıyıcılar arası aralığı kullanmaktadır. Bu sayede, alıcı-verici, bağlanan kanal sayısına gore sistem saatini değiştirmek zorunda olmadığı gibi uygulama da kolaylaşmıştır. Bu yaklaşımla kanallar bağlandıkça daha fazla FFT (Fast Fourier Transform) işlemine(bins) gereksinim duyulacaktır. İki kanal bağlandığı zaman, yaklaşık 3.4K alt taşıyıcı aktif hale gelecektir ve geri kalan dıştaki taşıyıcılar sifıra ayarlanacaktır. 7 ve 8 MHz'lik kanallar için de taşıyıcılar arası aralık buna gore ayarlanacaktır. Bununla birlikte, bağlama yaklaşımı 6 MHz'lik TV kanallınıninki ile aynı olacaktır.

Bir cihaz senkronize olmaya başladığında, bağlanacak kanalları önceden bilemez. İlk senkronizasyona yardımcı olması açısından, bir st ereve (superframe) yapısı tanımlanmıştır. Bu sterevenin başlığı 6 MHz modunda iletilir. Yeni aygıt taramaya 6 MHz modunda başlayabilir. Bir st ereve başlığı bulunduğunda, st çerçeveyi takip eden bilgi çerçevelerini alır. st ereve başlığı yaklaşık 5 MHz bant genişliğine gore temellendirilmiştir. Bu sayede komşu kanallardan gelecek girişimleri azaltmak için kullanılacak olan filtreleme gereksinimini ortadan kaldırır.

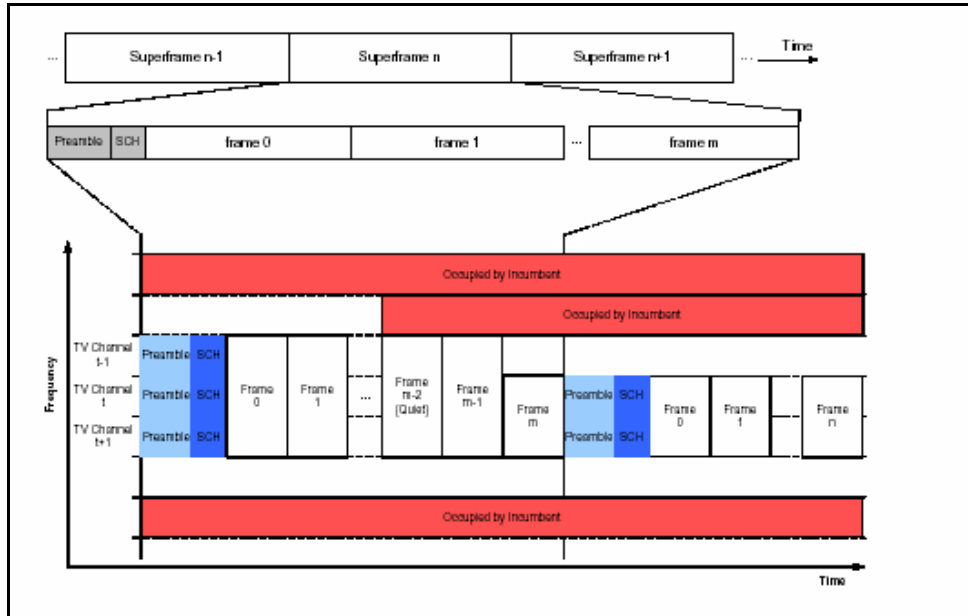
Başlığın içerisinde zaman senkronizasyonunu, Otomatik Kazanç Kontrolü (AGC- Automatic Gain Control) ayarlarını ve kanal kestirimini yapmak için bir başlık bilgisi bulunmaktadır. Başlık bilgisinin ardından bir sembollük gerçek bilgi bitlerini taşıyan başlık gelir. Bağlanan tüm TV kanalları için aynı bilgi tekrar tekrar iletilir.

4.2. MAC (Medium Access Control) Katmanı

BR temelli MAC'in çalışma ortamındaki değişikliklere çabuk cevap verebilmesi için oldukça dinamik olması gerekir. 802.22 MAC katmanı, geleneksel MAC servislerini sağlamanın yanında paylaşılan TV bantlarında etkin çalışma sağlayacak yeni işlevler de sunacaktır.

4.2.1. Üst çerçeve (Superframe) ve çerçeve (frame) yapısı

Şu anki 802.22 MAC taslağı Şekil 4.4'de gösterilen üst çerçeve yapısını kullanmaktadır.

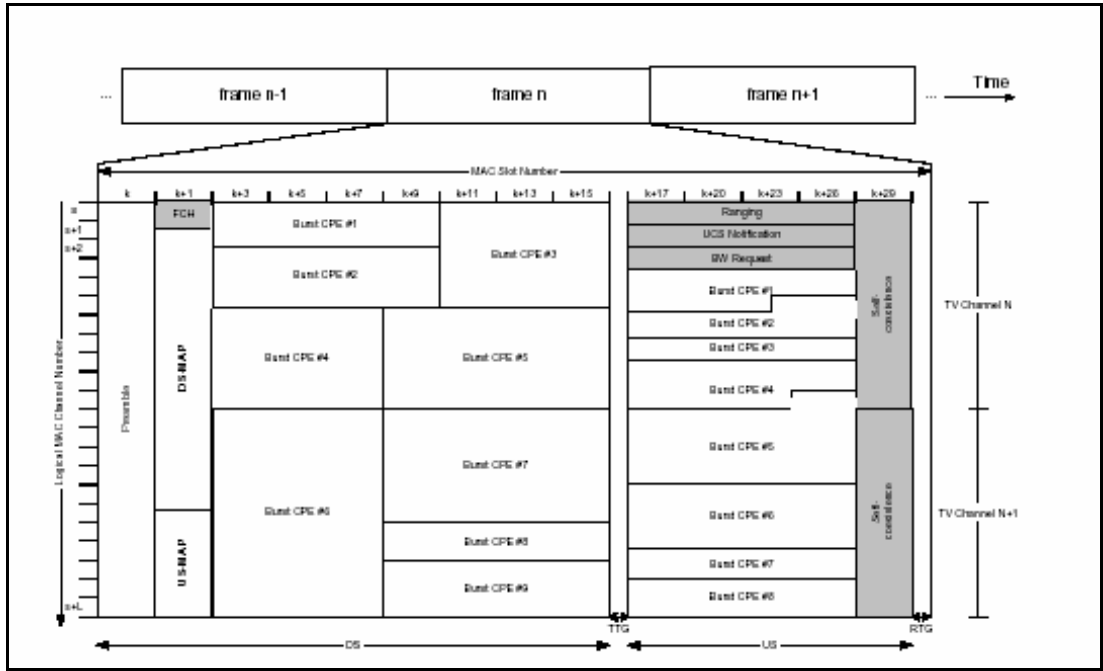


Şekil 4.4 Genel üst çerçeve yapısı(Akyıldız ve diğ., 2006)

Baz istasyonu, her üst çerçevenin başında haberleşme için kullanılacak olan her TV kanalı boyunca özel başlık bilgisi ve üst çerçeve kontrol başlığı gönderir. Bu kanallardan herhangi birisine ayarlanmış, üst çerçeve başlığını alan ve senkronize

olan CPE'ler, baz istasyonuyla ilişkilendirilmeleri için gerekli olan bütün bilgiyi elde edebilirler. Bir üst çerçevenin yaşam süresi boyunca, birçok kanala yayılabilen birçok MAC çerçevesi gönderilir ve bu sayede daha fazla kapasite, mesafe, çok yönlü çeşitlilik ve veri hızı sağlanabilir. Fakat, MAC esneklik sağlamak amacıyla çoklu kanallar ya da tek bir kanal üzerinde çalışabilen CPE'lere destek verir. Baz istasyonu, herbir MAC çerçevesi boyunca aşağı ya da yukarı yönde yönetme sorumluluğuna sahiptir, ayrıca bu sorumluluğa olağan haberleşme, ölçüm aktiviteleri, birlikte var olma (coexistence) işlemleri de dahil olabilir.

MAC çerçevesi yapısı Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi çerçeve iki kısımdan oluşmaktadır: Aşağı yönde (AY) alt çerçeve ve yukarı yönde (YY) alt çerçeve.



Şekil 4.5 Mac çerçevesinin Zaman/Frekans yapısı(Akyıldız ve diğ., 2006)

Aşağı yönde(AY) alt çerçeve ve yukarı yönde(YY) alt çerçeve segmentleri arasındaki sınır uyarlamalıdır ve bu sayede yukarı yönde ve aşağı yönde kapasite kontrolü kolaylıkla yapılabilir. Aşağı yöndeki alt çerçeve birlikte var olma amaçları için mümkün olan çekişme aralıklarıyla (contention intervals) birlikte sadece bir tane aşağı yönde fiziksel katman veri birimi (PHY PDU) içerir. Yukarı yöndeki alt çerçeve, ilk kullanıma hazırlama (initialization), bant genişliği isteği, acil birlikte var

olma durumu bildirimini ve mümkün olan birlikte var olma (coexistence) amaçları için planlanmış çekişme aralıklarını içerir.

4.2.2. Ağ girişi ve ilk kullanıma hazırlama

Genel olarak herhangi bir MAC protokolünde erişim için merkezi bir baz istasyonu güvencesi varsa ağ girişi kolay bir işlemdir. Fakat ortak bantta ve Şekil 4.2’de gösterildiği gibi fırsatçı temel üzerinde çalışırken durum bu şekilde değildir. Var olan diğer kablosuz teknolojilerin tersine, CPE’nin baz istasyonunu aramak için kullanabileceği önceden belirlenmiş bir kanal (burada kanal ile aynı zamanda frekans, zaman, kod, ya da bunların kombinasyonu kastedilebilir) yoktur. Bu yüzden, MAC ağ girişini adresleyecek şekilde tasarlanmalıdır, bu da var olan kablosuz MAC protokollerinde oldukça basit bir işlemdir.

802.22 MAC taslağında, CPE, başlatıldığı zaman ilk olarak TV kanallarını (belki hepsi) tarar ve her bir kanal için zorunluların tespit edilip edilmediğini belirten bir spektrum işgal haritası oluşturur. Bu bilgi daha sonra baz istasyonuna taşınabilir ve ayrıca CPE tarafından hangi kanalların boş olduğunu belirlemek için kullanılabilir.

Daha sonra CPE, bu boş kanallarda baz istasyonundan iletilen üst çerçeve kontrol başlığı için tarama yapar. CPE’nin bir kanalda kalma süresi, en az üst çerçevenin yaşam süresine eşit olmalıdır. CPE üst çerçeve kontrol başlığını aldığı zaman ağ girişini ve ilk kullanıma hazırlanmayı (initialization) gerçekleştirmek için kullanacağı kanalı ve ağ bilgisini elde etmiş olur.

4.2.3. Ölçümler ve spektrum yönetimi

802.22 MAC taslağının bilişsel özelliklerinin önemli bir bölümünü oluşturan bileşenlerinden birisi ölçüm ve kanal yönetimi ile ilgilidir. Baz istasyonu, CPE’lerine bant içi ya da bant dışı periyodik ölçümlerini yapmaları için talimat verir, bu sayede 802.22 hücresi birincil kullanıcılara (incumbent) zarar vermeden çalışabilir. Bant içi ölçümler, CPE’lerle haberleşmek için baz istasyonu tarafından kullanılan kanallara aitken, bant dışı ölçümler diğer kanallarla ilgilidir.

Baz istasyonu, bant içi ölçümler için periyodik olarak kanalı sessizleştirir, böylece zorunluların algılanması gerçekleştirilebilir. Bu durum bant dışı ölçümler için aynı değildir. 802.22 cihazlarının, zorunluların varlığından emin olmak için çok düşük SNR (Signal to Noise Ratio) değerlerindeki sinyalleri doğru bir şekilde tespit etmeleri gerekir. Bu ölçümlerin düşük SNR değerlerinde yapılması gerektiğinden, TV sinyallerinin tespitinin evreuyumsuz (non-coherent) şekilde yapıldığı farzedilir.

CPE'ler, farklı zorunlu algılama algoritmaları kullanabilecekleri için, ölçümler de farklı sürelerde tamamlanacaktır. Ayrıca baz istasyonu, hangi CPE'lerin hangi kanalları ne kadar süreyle ölçeceğini belirtmelidir. Ek olarak, baz istasyonunun her CPE için aynı ölçümleri yürütmesine gerek yoktur. Bunu yapmaktansa, CPE'ler üzerindeki ölçüm yükünü dağıtacak algoritmaları içerebilir ve bu ölçülen değerleri bütün bir hücrenin spektrum doluluk haritasını oluşturmak için kullanabilirler. CPE'ler tarafından ölçülen değerler aynı zamanda baz istasyonuna geri dönmelidir.

Şuanki 802.22 MAC taslağı bütün bu görüşleri desteklemektedir. Aynı zamanda spektrumun etkili bir şekilde yönetilmesini sağlayacak bir çok işlevi de içerir. Kanalların anahtarlanması, kanal çalışmasını askıya almak/yeniden başlatmak, kanal ekleme/çıkarma gibi işlemler, MAC'ın zorunluları korumasını ve bir arada var olmayı garantilemek için kullandığı yöntemler arasındadır.

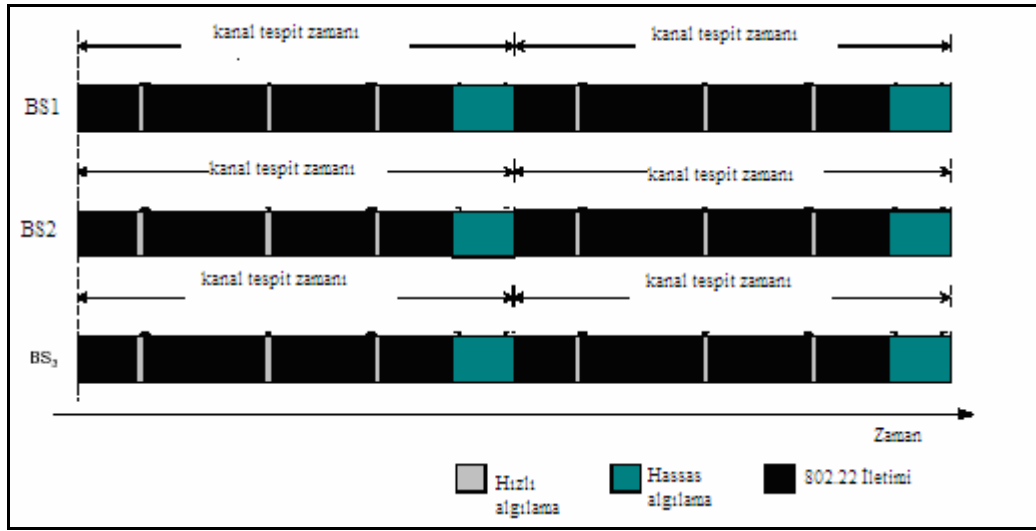
4.2.4. Zorunluların tespiti için periyotları sessizleştirmek

802.22 MAC taslağı, bant içi kanallar için Şekil 4.6'de gösterilen sessiz periyot mekanizmasını kullanır. Bu mekanizma farklı zaman ölçeklerine sahip iki aşamadan oluşur. Bunlar hızlı algılama ve hassas algılama aşamalarıdır. Bu iki aşamalı mekanizma için yapılan incelenme için Cordeiro ve diğ. (2007) ve Cordeiro ve diğ. (2006) çalışmasından yararlanılmıştır.

4.2.4.1. Hızlı algılama

Hızlı algılama aşaması Şekil 4.6'de de görüldüğü gibi bir ya da daha fazla hızlı algılama periyodundan oluşmaktadır. Bu aşama süresince, hızlı algılama algoritması

kullanılır (örneğin basit enerji tespiti). Tipik olarak, bu oldukça hızlı (1 ms/kanal'ın altında) ve verimli bir şekilde yapılabilmektedir. Bu aşama süresince baz istasyonu ve CPE'ler tarafından yapılan ölçümlerin sonucu, baz istasyonda birleştirilir ve baz istasyonu buna göre hassas algılamanın gerekli olup olmayacağına karar verir. Örneğin, eğer hızlı algılama aşaması süresince, etkilenen kanaldaki enerji her zaman eşik değerinin altındaysa, baz istasyonu sıradaki planmış olan hassas algılamayı iptal edebilir veya hızlı algılama aşamasında CPE'lerden toplanan bilgileri yeterli görmezse hassas algılamanın gerekli olacağına karar verebilir.



Şekil 4.6 İki aşamalı sessiz periyot mekanizması (Cordeiro ve diğ., 2007)

4.2.4.2. Hassas algılama

Baz istasyonu, bu aşamanın gerçekleşmesine bir önceki hızlı algılama aşamasının sonucuna göre dinamik olarak karar verir. Bu aşama süresince, hedef kanallarda çok daha ayrıntılı bir algılama gerçekleştirilir. Tipik olarak, bu aşamada algoritmaların gerçekleştirilme süresi her bir tek frekans için mili saniyeler cinsinden olabilir, çünkü bu algoritmalar birincil kullanıcının iletilen sinyalinin özel işaretlerini beklerler. TV istasyonlarının sık sık hava üzerinden gelmediğinin düşünülmesine rağmen bu mekanizma oldukça verimlidir. Kesinlikle, aynı coğrafik alanda birçok üst üste binen 802.22 baz istasyonunun olma olasılığı bu iki aşamalı sessiz periyot yaklaşımına zarar verir. 802.22 sistemi, bu problemin üstesinden gelmek için çoklu üst üste binen hücreleri dinamik olarak senkronize edebilecek bir yöntemi kullanır.

5. IEEE 802.22 SİSTEMİNDE BİRLİKTE VAR OLMA (COEXISTENCE)

Birlikte var olma 802.22 hava arayüzü için kritik bir konudur. Bu amaçla, dağıtık (distributed) spektrum algılama, ölçümleri, tespit algoritmaları ve spektrum yönetimi aracılığıyla BR teknikleri 802.22 kapsamı içinde yer alır. Bu bölümde anlatılacak olan birlikte var olma konusu için temel olarak Corderiro ve diğ. (2006) ve Sengupta ve diğ. (2007) çalışmaları yol gösterici olmuştur.

5.1. Antenler

IEEE 802.22 sistemi, her bir CPE radyosu için iki ayrı antene ihtiyaç duyar: bir tane tek yönlü bir tane de tüm yönlü anten (0 dBi ya da daha yüksek kazançlı). CPE'ler tek yönlü anteni genellikle baz istasyonu ile haberleşmek için kullanır. Tek yönlü antenler, enerjiyi istenmeyen yönlere yaymamak gibi avantajlı bir özelliğe sahiptirler ve bu özellikleri sayesinde girişimi en aza indirebilirler. Diğer taraftan tüm yönlü antenler öncelikle algılama ve ölçümleri gerçekleştirmek için kullanılırlar. Bu yüzden, bu antenin güvenilir bir algılamayı gerçekleştirmesi için büyük olasılıkla dış mekanda kurulması gerekir.

5.2. TV ve Kablosuz Mikrofonlarla Birlikte Var Olma (Coexistence)

802.22 sisteminde baz istasyonları ve CPE'ler zorunlu korumasından sorumludurlar. Tek bir CPE'nin yaptığı ölçüm çok fazla güvenilir olmayacağı için baz istasyonu tarafından periyodik dağıtık algılama mekanizması kullanılır.

5.2.1. Algılama eşikleri

802.22 sisteminde baz istasyonları ve CPE'ler lisanslı iletimleri algılamaktan sorumludurlar. Baz istasyonu, aşağıdaki eşik değerlerinin üzerinde lisanslı kullanıcı tespit ederse, kanal boşaltılır.

Sayısal televizyon (DTV): 6 MHz kanal üzerinde -116 dBm'dir. Örneğin ATSC (Advanced Television Systems Committee) için bu, toplam DTV gücünün -11.3 dB altındaki DTV sinyalinin pilot taşıyıcını algılamak için spektrum analiz teknikleri kullanılarak yapılır(farklı sayısal TV sistemlerini korumak için farklı eşik değerleri gerekli olabilir). Burada şunu not etmek gerekir ki; 802.22 çalışma grubu, eğer kanal N koruma hattı içerisinde iken zorunlular tarafından meşgul ediliyorsa, kanal N ya da N+1'de bu standartın çalışmaması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Analog televizyon: NTSC (National Television System Committee) resim taşıyıcısının en tepe senkronizasyonunda ölçülen değeri -94 dBm 'dir.

Kablosuz mikrofon: 200KHz bant genişliğinde ölçülen değer -107 dBm'dir.

5.2.2. Dinamik frekans seçimi(DFS) zamanlama gereksinimleri

En uygun çalışma ortamını belirleyebilmek için yakınındaki vericilerin sinyallerini sezebilme yeteneğidir. (Belirleme ve diğer sistemlerle çakışmayı önleme işlevleri için kolaylaştırmayı sağlayacak tekniklerin genel adıdır.) Son zamanlarda DFS (Dynamic Frequency Selection) parametreleri birlikte var olma çözümlerinin tasarım temelini oluşturur. Tablo 5.1, FCC tarafından 5 GHz bandı için düzenlenen DFS modeline dayanan anahtar DFS parametrelerini göstermektedir. Bunun için Cordeiro ve diğ.(2007) çalışması referans alınmıştır. Bu tablodaki anahtar parametrelerden birisi, zorunlu çalışmasının girişime 802.22 sisteminin tespitinden önceki dayanma zamanı anlamına gelen Kanal Tespit Zamanı (Channel Detection Time)'dır. Başka bir deyişle, bu parametre 802.22 sisteminin zorunluları ne kadar iyi ve ne kadar çabuk şekilde tespit edebildiğini gösterir.

5.2.3. Kablosuz mikrofon tespiti

TV iletiminin tersine kablosuz mikrofonlar daha az güç ilettikleri (tipik olarak 100 m kapsama mesafesi için 50 mW) ve daha az bant genişliği kullandıkları için bunların tespiti çok daha zordur. Bu yüzden bu servisi korumak için iki seçenek düşünülmüştür: sıradan algılama ve işaretçiler (beacons). DFS modeline dayanan

algılama Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Ek olarak, diğer seçenek kablosuz mikrofon operatörlerinin, çalışılan kanalda işaretleri iletecek olan özel cihazları taşıması içindir. Örneğin, kablosuz mikrofonların kullanıldığı bir konserde, bu özel cihazlar kanal C içinden periyodik olarak işaretleri iletecektir. Bu işaretleri kanal C içinden alan 802.22 baz istasyonları ve CPE’leri bu kanalı boşaltacak ve böylece girişimi engellemiş olacaktır.

Tablo 5.1 Dinamik frekans seçimi parametreleri(Cordeiro ve diğ., 2007)

Parameter	Value for Wireless Microphones	Value for TV Broadcasting
Kanal erişilebilirlik Kontrol süresi	30 sn	30 sn
Boş kalma periyodu	10 min	10 min
Kanal tespit süresi	≤ 2 sn	≤ 2 sn
Kanal kurulum zamanı	2 sn	2 sn
Kanal açılma iletim zamanı	100 msn	100 msn
Kanaldan ayrılma süresi	2 sn	2 sn
Kanal kapanma iletim süresi	100 msn	100 msn
Girişim tespi eşiği	- 107 dBm	-116 dBm

5.2.4. Spektrum kullanım tablosu

802.22 MAC taslağının diğer bir işlevselliği, kanalların işgal edilmiş, erişilebilir ve engellenmiş (hiçbir şekilde 802.22 tarafından kullanılamaz) olma durumlarını belirten bir tablo tutmaktır. Bu tablo, ya sistem operatörü ya da 802.22 sisteminin kendi algılama mekanizması tarafından güncellenir.

5.3. Kendi Kendine Birlikte Var Olma(Self Coexistence)

Bu ve bir sonraki bölümde anlatılacak olan kendi kendine birlikte var olma (self-coexistence) ve saklı zorunlu sistem problemi IEEE 802.22 MAC katmanının temel sakıncalarındandır. Kendi kendine birlikte var olma (Self-coexistence) konusu için Sengupta ve diğ. (2007)'nin çalışmasından yararlanılmıştır.

Var olan diğer IEEE 802 standartlarına göre kendi kendine birlikte var olma (self-coexistence) genellikle standart sonuçlandıktan sonra düşünülmüştür. 802.22 standartında diğerlerinin aksine 802.22 çalışma grubu ileriye yönelik bir yaklaşım sergilemiş ve kendi kendine birlikte var olma (self-coexistence) protokollerini ve algoritmalarını standart tanımının bir parçası olarak kabul etmiştir.

IEEE 802.22 gibi lisanssız kullanıcıların spektrumu lisanslı kullanıcıların varlığı altında paylaştıkları bir sistemde, üst üste keşisen bir bölgede IEEE 802.22 operatörleri arasında kendi kendine birlikte var olma (self-coexistence) konusu oldukça önemlidir. Analog/sayısal TV iletiminin ve kablosuz mikrofon servisinin fazla olduğu alanlarda, kullanılmayan kanallar halihazırdaki talep malıdır. Bu yüzden, birçok lisanssız operatör küçük bir frekans bandını kullanarak çalışırken bu operatörlerin uygun bant genişliğini kullanma şansı vardır. Bütün operatörler uygun bantı kullanmak için hevesli davranacağı için bu durum IEEE 802.22 ağları arasında girişime neden olabilir. Bu nedenle en az girişimle kanalları kullanmak için verimli kanal tahsisi methodunu kullanmak gerekir.

5.4. Saklı Zorunlu Sistem Algılaması

WRAN sisteminin zorunlulara girişim oluşturmaması için haberleşme süresince kanalı algılaması ve zorunluların belirmesi durumunda kanalı değiştirmesi gerekir. WRAN baz istasyonu ve CPE'ler kullandıkları algılama mekanizmalarını kullanarak zorunlu sinyaller ile diğer lisanssız sinyalleri ayırt edebilirler. WRAN sisteminin çalıştığı kanalda zorunluların belirmesi durumunda sistem bu kanalı kullanmayı bırakır ve zorunlularda girişim oluşturmamak için kanalı değiştirir.

5.4.1. Kanal algılama ve frekans değiştirme işlemi

Bu bölümde anlatılan saklı zorunlu problemi için Sengupta ve diğ. (2007)'nin ve Kim ve diğ. (2007)'nin çalışmasından yararlanılmıştır.

Daha önceden de bahsedildiği üzere WRAN sisteminde zorunlu sistemi girişimden korumak için kanal algılama ve frekans değiştirme işlemlerinin yürütülmesi gerekir. Kanal algılama işlemi basitçe şu Şekilde zetlenebilir:

1. WRAN baz istasyonu, WRAN CPE'lerine aşağı yöndeki (downstream) periyot ve süre (duration) değerlerini içeren bazı parametreleri göndererek kanalları algılamalarına izin verir.
2. WRAN CPE'leri sessiz periyotlar süresince veri göndermeyi durdurduktan sonra kanalları algılayabilirler.
3. WRAN CPE'leri, bazı faktörleri de içeren algılama sonuçlarını WRAN baz istasyonuna geri gönderirler.

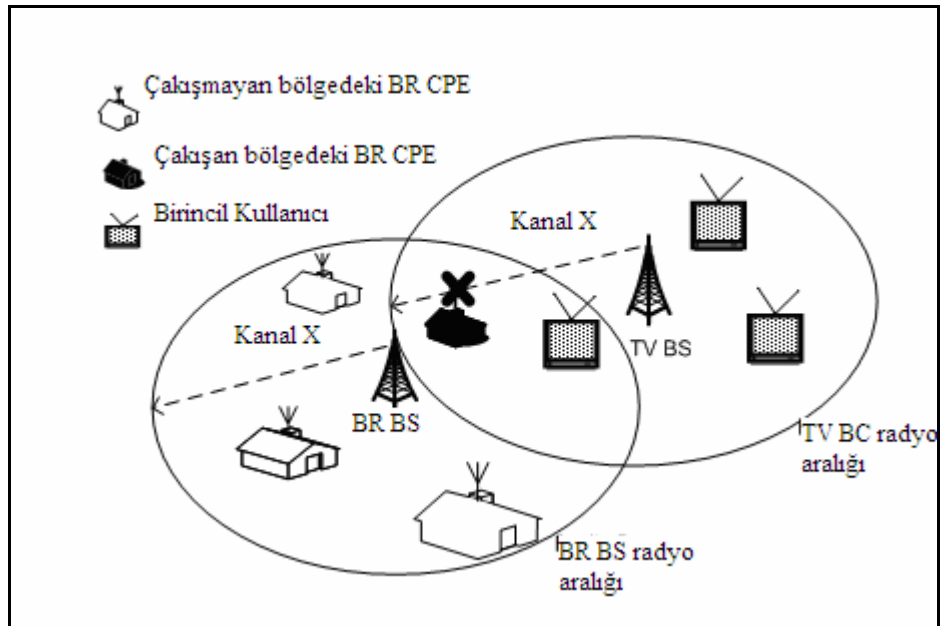
Genel kanal değiştirme adımları ise aşağıdaki gibidir:

1. Zorunlular tarafından kullanılmak üzere olan kanalı kullanan WRAN CPE'leri, algılama sonuçlarını baz istasyonuna gönderirler ve taşınacak hedef kanalı ve aday kanal listesini içeren bant değiştirme mesajını beklerler.
2. Bant değiştirme mesajını alan WRAN CPE'leri kanalı kullanmayı bırakırlar ve WRAN baz istasyonuna cevap dönerler.
3. WRAN CPE'leri parametrelerini kanal ortamına uygun olarak değiştirdikten sonra yeni kanalla ilgili düzenleme işlemini gerçekleştirirler ve WRAN baz istasyonu ile haberleşmeye başlarlar.

5.4.2. Saklı birincil kullanıcı problemi

WRAN sisteminde baz istasyonu, birincil kullanıcı sinyalini algılayamayabilir ya da zorunlu sinyalin varlığından haberdar olmayabilir. Bu durum birincil kullanıcı sinyali WRAN baz istasyonuna ulaşmadığı zaman ortaya çıkar ve bu yüzden baz istasyonu bu durumu algılayamaz. Bu durumda, normal algılama ve kanal değiştirme işlemi çalışmayabilir. Hem baz istasyonunun hem de birincil kullanıcı sisteminin kapsama alanı içinde olan CPE'ler, yüksek girişimden dolayı WRAN'nın aşağı yöndeki (downstream) sinyalini çözemedikleri için bu üst üste binmeyi baz istasyonuna raporlayamazlar. Bu problem 'saklı birincil kullanıcı problemi' olarak adlandırılır.

WRAN baz istasyonunun bazı kanalları algıladığı ve sonuç olarak kanal x'in haberleşme için uygun olduğunu belirlediği farz edilsin. Birincil kullanıcı sisteminde, belirlenen x kanalında servise başladığı zaman baz istasyonu bu birincil kullanıcı sisteminin varlığından haberdar olamaz. Böylece, Şekil 5.1'de görüldüğü gibi WRAN ve zorunlu sistemin üst üste gelen alanında WRAN CPE'leri bulunur ve bunlar güçlü zorunlu sistem girişimi yüzünden WRAN aşağı yön sinyalini çözemezler. Baz istasyonu kanal x'de servisini sürdürecektir ve bu yüzden bir süre birincil kullanıcılarda girişime neden olacaktır.



Şekil 5.1 Saklı birincil kullanıcı sistemi senaryosu(Kim ve diğ., 2007)

Saklı birincil kullanıcı sistem problemi birincil kullanıcılarda girişim oluşturmak gibi bazı problemlere yol açabilir. Bazı WRAN CPE'leri WRAN baz istasyonu ile haberleşemezler. Bu saklı birincil kullanıcı sistemi durumu sadece herhangi bir servis periyodunda oluşmaz aynı zamanda WRAN baz istasyonu başlangıç durumuna getirme periyodu (servis başlama zamanı) süresince de oluşabilir. Birincil kullanıcı sistemleri herhangi bir zamanda herhangi bir uyarı olmadan yada WRAN veritabanında saklanan servis modelini önemsemeden servislerini başlatabilirler. Bu nedenle, WRAN baz istasyonu yanlışlıkla servis kanalını zorunlu sistem tarafından kullanılmakta olan kanal ile değiştirebilir.

5.4.3. Bant içi sinyalleşme

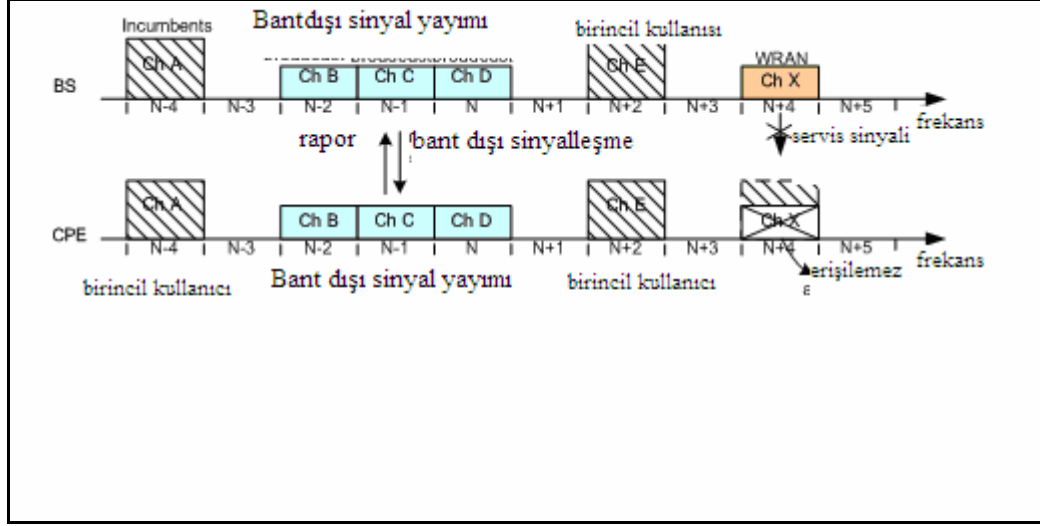
WRAN sisteminin, saklı birincil kullanıcı sistemini algılamak için kullandığı bazı yöntemler vardır. WRAN sistemi, saklı birincil kullanıcı sisteminin kullandığı kanalı kullanmaktan kaçınırlar. Bu bölümde anlatılan bant içi sinyalleşme yöntemi ile, WRAN CPE'lerinin o an kullanılan kanal vasıtasıyla birincil kullanıcıların belirmesi durumunu raporlamaları sağlanır. Bant dışı sinyalleşmesi yöntemiyle ise WRAN CPE'lerinin aday kanal listesindeki kanallar vasıtasıyla zorunluların belirmesi durumunu raporlamaları sağlanır.

5.4.4. Bant dışı sinyalleşme

Bant içi sinyalleşme yöntemi, WRAN sistemi birden çok kanalla birlikte çalıştığı zaman kullanılabilir. Fakat, WRAN baz istasyonu, yeterli boş bant olmadığı için ya da başka sebeplerden dolayı tek bir kanal kullanırsa ve saklı birincil kullanıcı sistemi o an ki kanalda belirirse, bu problem bant içi sinyalleşme ile çözülemez. Baz istasyonu periyodik olarak WRAN baz istasyonunun o anki kanalları ile ilgili bazı bilgileri içeren bant dışı sinyali bazı işgal edilmemiş bantlar (aday kanallar gibi) vasıtasıyla yayar.

5.4.5. Saklı birincil kullanıcı sisteminin tespit edilmesi

Saklı birincil kullanıcı sisteminin algılanması için bant dışı sinyalleşme işlemleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Belirgin bant dışı sinyalleşme örneği(Kim ve diğ., 2007)

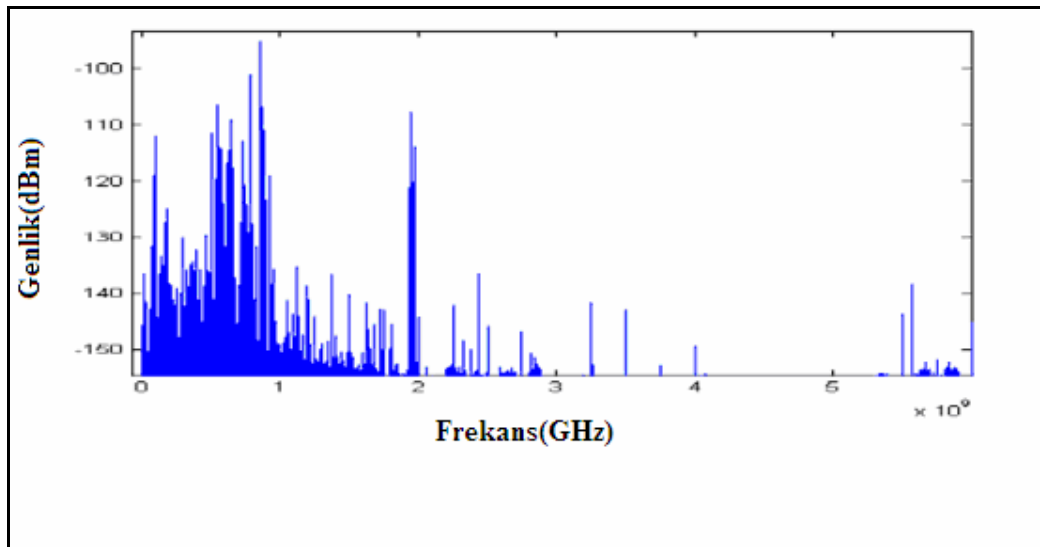
Şekil 5.2’de gösterilen bant dışı sinyalleşme işlemleri şu şekilde özetlenebilir:

1. WRAN sistemi CPE’lerine kanal x’de servis sağlar ve kanal x’i kullanan CPE’ler bu kanalda birincil kullanıcı sisteminin belirmesi ile bloke olma durumuna geçerler.
2. WRAN baz istasyonu periyodik olarak bant dışı kanal setinin{B, C, D} içine belirgin(explicit) bant dışı sinyaller yayar.
3. Aniden baz istasyonundan gelen sinyalleri çözemeyen CPE’ler baz istasyonu ile haberleşebilmek için diğer kanalları algılamaya başlarlar.
4. Belirgin bant dışı sinyalleri alan WRAN CPE’leri kanal algılama periyodu süresince C kanalının uygun olduğunun farkına varırlar ve baz istasyonuna saklı birincil kullanıcı sisteminin belirlediğini raporlarlar.

6. IEEE 802.22 WRAN SİSTEMİNİN ANAHTAR TEKNOLOJİSİ

Önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere günümüzde kablosuz ağlar belirli spektrum atama politikalarınca düzenlenmekte ve devletle ilgili acenteler tarafından geniş coğrafik alanlar için uzun süreli olarak lisans sahiplerine ve servislerine atanmaktadır. Fakat, Şekil 6.1’de görüldüğü gibi atanmış spektrumun geniş bir bölümü tek düşük kullanılmaktadır. Spektrum kullanımı, belirli alanlarda yoğunlaşırken çok büyük bir alanda kullanılması gerektiğinden çok daha az kullanılmaktadır. Federal Haberleşme Komisyonu (FCC) tarafından yapılan ölçümlere göre atanmış spektrumun kullanımındaki zamansal ve bölgesel değişim %15 ile %85 arasındadır. Sabit geleneksel spektrum atama politikaları genellikle geçmişte iyi iş görmesine rağmen, son yıllarda mobil hizmetlerin artmasıyla etkinliği azalmıştır.

Erişilebilir spektrumun sınırlı olması ve spektrum kullanımındaki verimsizlik nedeniyle var olan kablosuz spektrumdan fırsatçı bir şekilde yararlanmak için yeni bir haberleşme paradigmasına ihtiyaç duyulmuştur. Sonuç olarak dinamik spektrum erişimi, spektrum verimsizliği sorunlarını çözmek için önerilmiştir.



Şekil 6.1 Spektrum kullanımı (Akyıldız ve diğ., 2006)

Bilişsel radyo ağları olarak da bilinen yeni nesil haberleşme ağları, dinamik spektrum erişim tekniklerini ve heterojen kablosuz mimarileri kullanarak mobil kullanıcılara geniş bir bant erişimi sağlayacaktır. Ayrıca, var olan spektrumun verimsiz kullanımı, lisanslı kullanıcılarda girişime neden olmadan fırsatçı erişimlerle artırılabilir. Yeni nesil ağlar, farklı kalite servisi gereksinimleri kadar geniş mesafe, erişilebilir spektrum gereksinimleri yüzünden de birçok araştırma zorluklarına yol açmıştır.

Yeni nesil haberleşmeyi gerçekleştirecek anahtar teknoloji bilişsel radyodur. Bilişsel radyo tekniği spektrumun fırsatçı anlamda kullanımı ve paylaşımını sağlar. BR dinamik spektrum erişim teknikleri, çalışmak için en uygun kanalı belirler.

Bilişsel radyo teknikleri ilk önce, lisanssız kullanıcıların lisanslı bantta çalışırken lisanslı kullanıcıları tespit etmelerini ve böylece spektrumun hangi bölümlerinin erişilebilir olduğunu belirlemelerini sağlar (spektrum algılama). Ayrıca kullanıcıların en uygun kanalı seçmelerini (spektrum yönetimi), diğer kullanıcılarla bu kanala erişimlerinin düzenlenmesini (spektrum paylaşımı), ve bu kanalda lisanslı bir kullanıcı tespit edildiği zaman kanalın boşaltılmasını sağlar (spektrum taşınabilirliği).

Bundan sonraki bölümlerde BR teknoloji üzerinde ayrıntılı olarak durulacaktır. Bunun için temel olarak, Akyıldız ve diğ. (2006) araştırması referans seçilmiştir. Bilişsel radyo en uygun kanalı seçtikten sonra, sıradaki zorluk bu erişilebilir kanal için ağ protokollerini uyarlanabilir hale getirmektir. Bu yüzden, yeni nesil ağlarda bu uyarlamayı desteklemek için yeni işlevsellikler gerekecektir. Kısaca, yeni nesil ağlarda bilişsel radyonun temel işlevleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Spektrum Algılama (Spectrum Sensing): kullanılmayan spektrumu algılamak ve diğer kullanıcılarla girişime neden olmayacak şekilde bu spektrumu kullanmaktır.

Spektrum Yönetimi (Spectrum Management): kullanıcının haberleşme gereksinimlerini karşılamak için en uygun kanalı yakalamaktır.

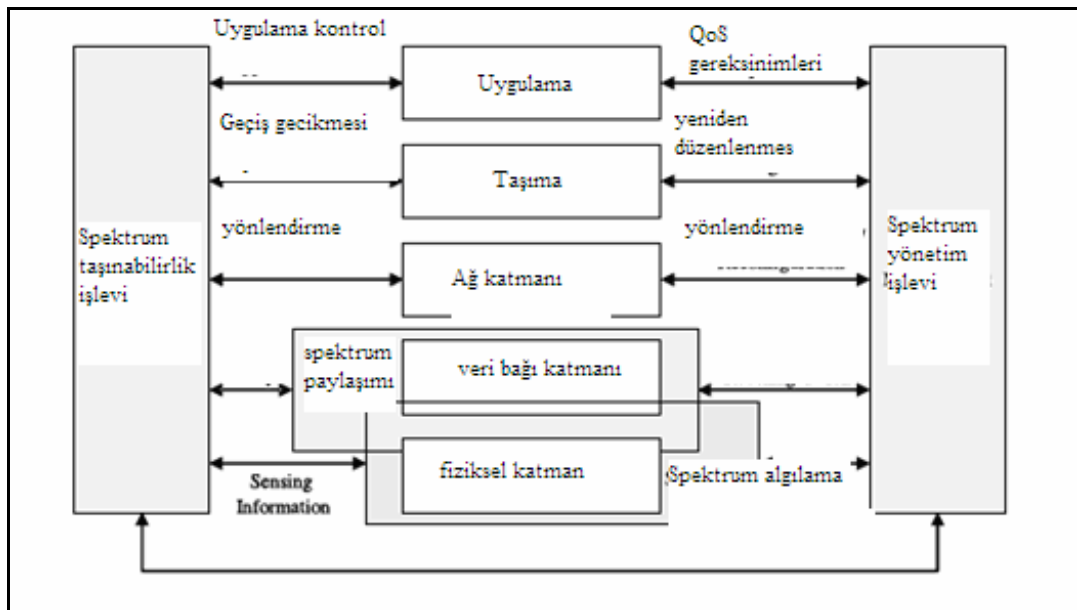
Spektrum Taşınabilirliği (Spectrum Mobility): daha uygun bir kanala geçiş sırasında kusursuz haberleşme gereksinimlerini korumaktır.

Spektrum Paylaşımı (Spectrum Sharing): birlikte var olan yeni nesil kullanıcılar arasında eşit spektrum planlamasını sağlamaktır.

Yeni nesil ağların bu işlevleri, spektrumdan haberdar olan haberleşme protokollerinin kullanılmasını gerektirir. Spektrumun dinamik kullanımı, haberleşme için sabit frekans bandı kullanımı düşünülerek geliştirilmiş olan geleneksel haberleşme protokollerinin performansını olumsuz etkiler. Yeni nesil ağın (BR ağı olarak da ifade edilebilir) haberleşme bileşenleri ve bunların etkileşimleri aşağıdaki şekilde belirtilmiştir.

Buradaki etkileşimlerden de anlaşıldığı gibi yeni nesil ağ işlevleri çapraz-katman (cross layer) tasarımını gerektirir. Özellikle, spektrum algılama ve paylaşımı spektrum verimliliğini artırmak için işbirliği içinde çalışırlar.

Spektrum yönetimi ve taşınabilirliği işlevleri için ise, uygulama, iletim, yönlendirme, ortam erişimi ve fiziksel katman işlevleri işbirliği içinde gerçekleşir. Çapraz katman tasarımından ve zorluklarından Bölüm 6.8’de ayrıntılı olarak bahsedilmiştir. Bilişsel radyo ağlarında çapraz katman tasarımı, Hester ve Ridley (2008) çalışmasında yer alan Şekil 6.2’de görüldüğü gibi özetlenmiştir



Şekil 6.2 Yeni nesil ağ haberleşme işlevleri (Hester ve Ridley, 2008)

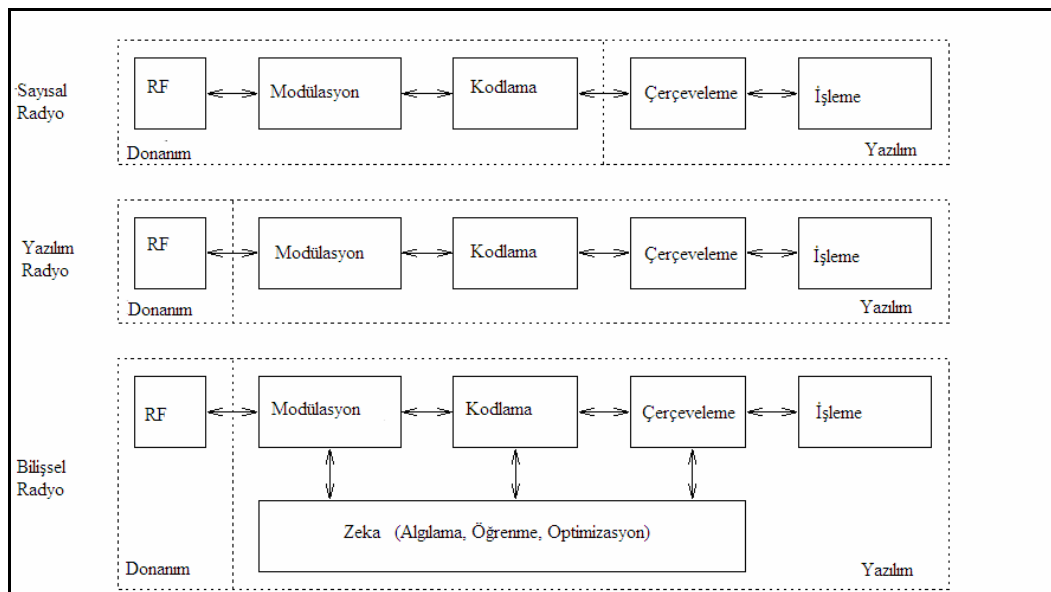
6.1. Bilişsel Radyonun Gelişimi

Bu bölümde yer alan BR kavramının ortaya çıkışı ve gelişimi için Clancy (2006) çalışmasından yararlanılmıştır. Son yıllarda radyolar saf donanım tabanlı olmaktan uzaklaşıp yazılım ve donanımın birlikte var olduğu bir yapıya dönüşmeye başlamıştır.

1990'ların başlarında, Joseph Mitola 'Yazılım Tanımlı Radyo' fikrini tanıtmıştır. Bu radyo tipik olarak yazılım-kontrollü bir alıcıyla birlikte bir RF uç birimine sahiptir. Temel bant sinyalleri analog-dijital dönüştürücüden geçer. Daha sonra, sayısallaştırılan temel bant sinyali yeniden yapılandırılabilen bir cihaz (FPGA-field-programmable gate array, DSP- digital signal processor, PC- personal computer gibi) içinde demodüle edilir.

2000 yılındaki tezinde, Mitola (Mitola,2000), bilişsel radyo terimini ortaya atarak yazılım tanımlı radyo (SDR,software defined radio) konseptini bir adım ileriye taşımıştır. Aslında bilişsel radyo, yapay zekası, algılama yeteneği ve çevresine adapte olabilmesi ile bir 'Yazılım Tanımlı Radyo' dur.

Şekil 6.3'de, geleneksel radyo, yazılım radyo ve bilişsel radyonun karşılaştırması gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Sayısal, yazılım ve bilişsel radyonun karşılaştırması (Clancy,2006)

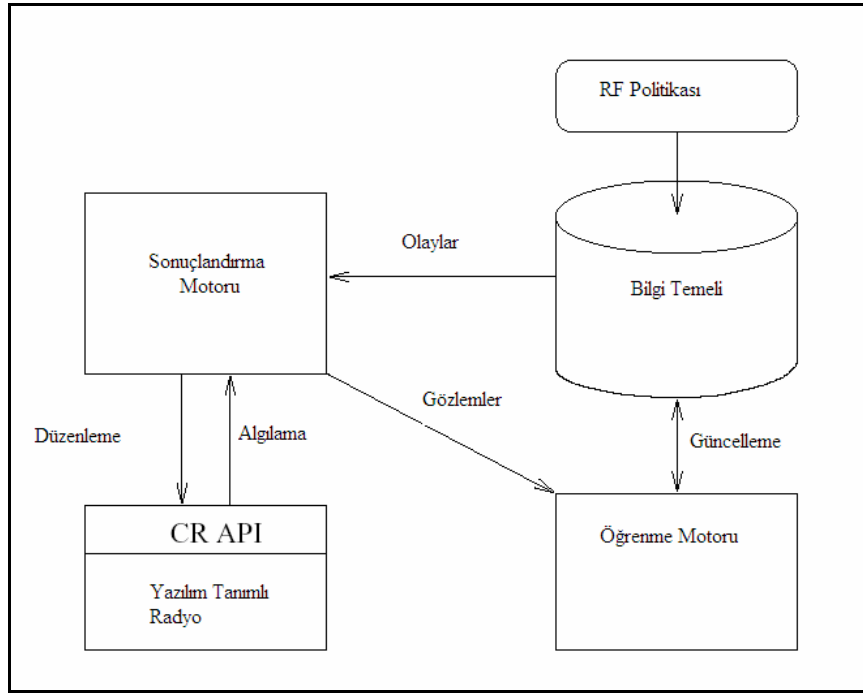
Son beş yılda bilişsel radyo ile ilgili birçok farklı yorum geliştirilmiştir. Bazı uç açıklamalar olabilir, örneğin askeri radyo operatörün sesindeki acilliği sezebilecek ve servis kalitesini buna göre ayarlayabilecek olması gibi. Diğer bir örnek ise, konuşmalarınızı dinleyebilen bir cep telefonu ve bu sayede eğer arkadaşınıza taksi çağırıp şehri gezmeye çıkacağınızı söylemişseniz, cep telefonunuz öncelikle gerekli frekans değişimlerini tespit etmesi gibi.

Bu yorumlar, Mitola'nın orijinal araştırması yönünde de olsa henüz fazla çağın ötesindedir. Daha genel açıklamalar, radyonun bilişselliğini daha pratik sensörlü girişlerle sınırlamaktadır. Bir radyo bulunduğu spektral ortamı algılayabilir ve güçleri, bant genişlikleri ve modülasyonlarıyla birlikte önceden iletilen ve alınan paketleri saklayabilecek bir hafızaya sahip olabilir. Bu sayede radyo, bazı kapsamlı hedefler için nasıl optimize etmesi gerektiği hakkında en iyi kararı verebilir. Buradaki mümkün hedefler, optimum ağ kapasitesine erişmek, girişimi en aza indirmek, güvenliği sağlamak yada parazit yapmayı engellemek olabilir.

Açıklamalardaki bir diğer tartışmalı farklılık ise yazılım tanımlı radyo (SDR-Software Defined Radio) ile BR arasındaki sınırı çizmektir. Çoğu zaman, belirli bir seviyede akıllı frekans-atik SDR'lar BR olarak isimlendirilirler. Fakat, bazılarınca SDR'ın BR altyapısı içinde sadece bir araç olduğuna inanılır. Uzak bilgisayarlar SDR performansını analiz edebilirler ve SDR'ı anında yeniden programlayabilirler. Örneğin bu uzak beyin SDR modülasyon şemalarından hiçbirinin buldukları ortam için yeterli olmadığına karar verebilir. Anında yeniden bir şema yaratabilir, donanım açıklamalı dil (HDL-Hardware Description Language) ve yeni Alan Programlanabilir Kapı Dizi (FPGA, Field Programmable Gate Array) yükleri oluşturabilir ve bu yeni işlevsellik için bunları ağ üzerinden yeniden yükleyebilirler.

Şekil 6.4'de, daha somut bir BR mimarisinin işlevsel bileşenleri gösterilmektedir. SDR'a, BR makinesinin radyoyu yapılandırmasını ve çevreyi algılamasını sağlayan BR API (Application Programming Interface)'si vasıtasıyla erişilir. Plan-temelli makine, RF spektrum erişim fırsatları hakkında yargılar oluşturmak için gerçekleri bilgi temelinden ve bilgiyi çevreden alır.

Basit kural-temelli makineye ek olarak öğrenen makine, radyonun davranışını ve sonuçta oluşan performansını gözlemler ve buna göre davranışını ayarlar. Akıllı radyo teknolojisindeki bu gelişmelerle birlikte FCC, BR'lerin lisanslı kullancılarda girişime neden olmadan lisanslı bantları kullanabilmeleri yolunda araştırmalara başlamıştır. Sonuç olarak, bunun için sunulan önerge FCC tarafından kabul edilmiştir ve BR'lere belirli frekans bantlarında çalışmalarını için izin verilmiştir.



Şekil 6.4 BR'nin işlevsel bileşenleri (Clancy, 2006)

6.2. Bilişsel Radyo Tanımı

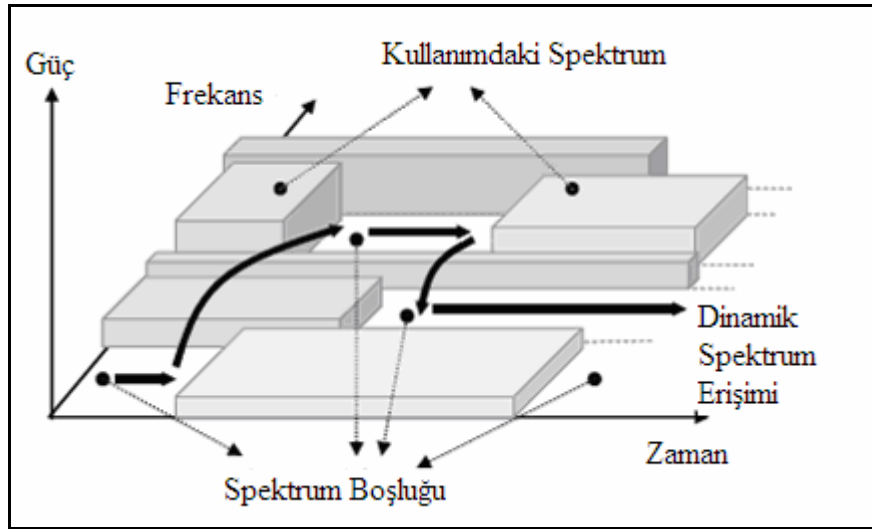
BR teknolojisi, BR ağının spektrumu dinamik olarak kullanmasını sağlayan anahtar teknolojidir. Bilişsel radyo kavramı ilk defa 1990'ların sonlarında Joseph Mitola'nın çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır. Çalışmalarında kavramsal çalışmayı uygulama katmanında planlamıştır.

2000'li yılların başlarında DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) yeni nesil program çalışmalarıyla bu kavramı genişletmiştir. Son zamanlarda Virginia Teknoloji merkezi bilişsel radyo kavramını Mac ve fiziksel(Phy) katmanlarına kadar genişletmiştir.

Joseph Mitola'nın tanımına göre bilişsel radyo, çalıştığı radyo ortamından haberdar olan ve radyo ortamını algılayabilen, buna göre çalışma parametrelerini dinamik olarak ayarlayabilen radyodur. Bu tanımdan yararlanarak bilişsel radyonun iki temel karakteristiği aşağıdaki gibi verilebilir:

Kavrama Yeteneği: radyo ortamından bilgiyi sezme ve yakalama yeteneğidir. Bu yetenek belirli frekans bantlarındaki gücü görüntüleyerek basitçe gerçekleştirilemez, daha karmaşık tekniklere ihtiyaç duyulur. Bu yetenek sayesinde belirli zaman ve belirli bölgelerdeki kullanılmayan spektrum bölümleri belirlenebilir. Böylece en uygun spektrum ve çalışma parametreleri seçilebilir.

Yeniden Düzenlenebilme: radyo ortamına göre dinamik olarak programlanmayı sağlar. Özellikle bilişsel radyo çeşitli frekanslarda sinyal alıp vermeyi sağlayacak ve donanım tasarımı tarafından desteklenen farklı iletim erişim tekniklerini kullanabilecek şekilde programlanabilmelidir.

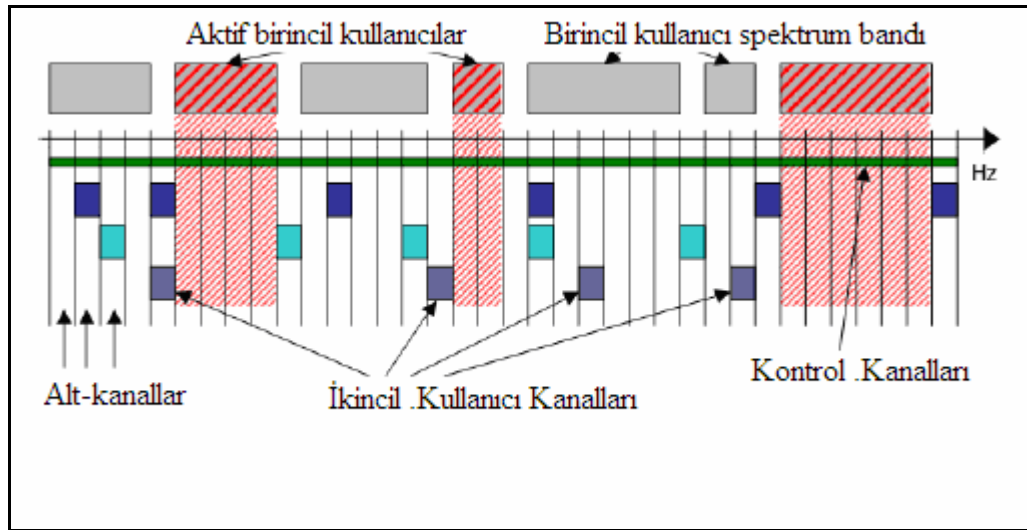


Şekil 6.5 Spektrum boşluğu kavramı(Akyıldız ve diğ., 2006)

Spektrumun büyük bir bölümü tamamen atanmış olduğu için, lisanslı spektrumun lisanslı kullanıcılarla girişim yapmadan kullanımı Şekil 6.5'de gösterilmiştir. BR kullanılmayan spektrumun (spektrum boşluğu) geçici olarak kullanımını sağlar. Bu bant daha sonra lisanslı bir kullanıcı tarafından kullanılacak olursa BR başka bir spektrum boşluğuna geçer ya da iletim güç seviyesini ya da modülasyon şemasını

değiştirerek aynı bantta kalır. Brodersan ve diğ. (2005) ve Cabric ve diğ. (2005) çalışmalarında özetlenen sistem yapısına göre ikincil kullanıcılar(bilişsel radyo kullanıcıları yani lisanssız kullanıcılar) haberleşmelerini yürütmek için ikincil kullanıcı gruplarını oluştururlar. İkincil kullanıcı grubuna ait üyeler sinyalleşme için ortak bir kontrol kanalı kullanırlar ve birbirleriyle dağıtık ad-hoc modda ya da merkezi bir erişim noktası vasıtasıyla haberleşebilirler. İki mod için de hem ikincil kullanıcılar arasındaki hem de ikincil kullanıcılar ile merkezi erişim noktası arasındaki haberleşmenin unicast olduğu farz edilir. Farklı ikincil kullanıcı gruplarına ait ikincil kullanıcılar arasındaki noktadan noktaya haberleşme ya da broadcast haberleşme desteklenmez.

İkincil kullanıcıların haberleşme trafiğini desteklemek için CORVUS (Cognitive Radio approach for usage of Virtual Unlicensed Spectrum), spektrum havuzu üzerinde çalışmaktadır. Spektrum havuzu kavramı da BR kavramı gibi ilk defa Mitola (2000)'de tanımlanmıştır. CORVUS yaklaşımına göre her bir spektrum havuzu kavramı N- tane alt kanala bölünecektir, daha sonra bu kanallar algılama ve iletim için kullanılacaktır. Şekil 6.6'da CORVUS'da belirtilen spektrum havuzu sistemi gösterilmiştir. Birincil kullanıcılar spektrumun farklı bölümlerine sahiptirler, fakat bu kullanıcılar belirli zamanlarda aktif olmayabilirler. Şekilde gösterilen gölgeli frekans bantları birincil kullanıcıların o an spektrumlarını kullandığını belirtir ve bu nedenle bu kısımlar ikincil kullanıcılar tarafından kullanılamaz.



Şekil 6.6 Spektrum havuzu kavramı(Cabric ve diğ., 2005)

CORVUS'a göre, ikincil kullanıcılar kontrol ve algılama bilgilerinin değiş tokuşu için atanmış mantıksal kanalları kullanırlar. İki çeşit mantıksal kontrol kanalı düşünülmüştür: Evrensel Kontrol Kanalı ve Grup Kontrol Kanalları. Evrensel kontrol kanalı tektir ve bütün uygun bantta çalışan ikincil kullanıcılar tarafından bilinmek zorundadır. Evrensel kontrol kanalının esas amacı yeni gelen kullanıcıların bir gruba dahil olmaları için onlara uygun iletim parametrelerini vermek ve bu durumu var olan gruplara duyurmaktır. Ayrıca yeni bir grup oluşturmak isteyen ikincil kullanıcılar, yerel birincil kullanıcının o kanaldaki kapladığı alanı öğrenmek isteyebilir. Haberleşme mesafesinin global olarak tek olmasına rağmen, ikincil kullanıcı grupları yerel bir alana sınırlandırıldıkları için ikincil kullanıcılar haberleşme mesafesini yerel olarak sınırlandırabilirler. Evrensel kontrol kanalından başka her bir grubun bir tane mantıksal grup kontrol kanalı vardır. Bu kanalı grup kontrol ve algılama bilgilerinin değiş tokuşu için kullanırlar.

6.3. Bilişsel Radyo Fiziksel Mimarisi

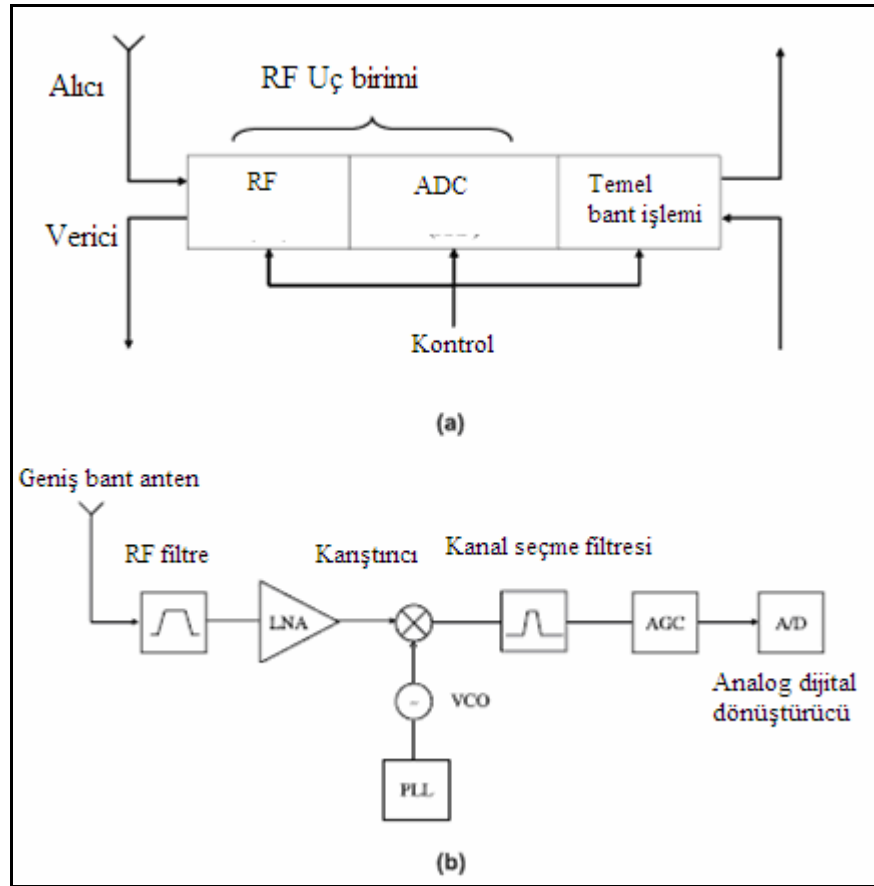
Bilişsel radyonun genel alıcı verici mimarisi aşığıdaki Şekil 6.7'de görüldüğü gibidir. Bu mimari yaklaşım için Akyıldız ve diğ. (2006), Wild ve Ramchandran (2005), Cabric ve diğ. (2005b) çalışmaları yol gösterici olmuştur.

Bilişsel radyo alıcı-vericisinin iki temel bileşeni radyo uç birimi ve temel bant işlemcisidir. Her iki bileşen de RF ortamına uyum sağlamak için ana denetim yolu vasıtasıyla yeniden yapılandırılabilirler. RF uç biriminde alınan sinyal yükseltilir, çarpılır ve bu sinyalin A/D(Analog/Dijital) dönüşümü yapılır.

Temel bant işlemcisinde, sinyal modüle/demodüle etme ve kodlama/kod çözme işlemleri gerçekleştirilir. Temel bant bölümü var olan alıcı vericilerinkine benzerdir, asıl yenilik RF uç birimdedir. BR alıcı vericisinin yeni özelliği, RF uç biriminin geniş bant algılama yeteneğine sahip olmasıdır. Bu işlevi RF donanım teknolojileriyle ilgilidir, geniş bant anten, güç yükselticisi ve uyarlamalı filtresi gibi RF donanım parçalarının frekans bandının herhangi bir bölümüne ayarlanabilir olması gerekir.

6.4. Bilişsel Radyo RF Uç Birimi

Bilişsel radyonun gelecekte çalışacağı iki tane frekans bandı vardır: 400–800 MHz(UHF TV bantları) ve 3-10 GHz. FCC, düşük UHF bantlarında her coğrafik alanın hemen hemen 6 MHz'lik geniş kullanılmayan TV bandına sahip olduğunu belirtmiştir. Bu frekans bantları iyi yayılım özelliklerinden dolayı uzun mesafe haberleşmesi için cazip gelmektedir. Çalışma frekans mesafesi önemsenmeden, bilişsel radyo geniş bant RF uç birimi Şekil 6.7' deki gibi bir mimariye sahip olabilir.



Şekil 6.7 Bilişsel radyo fiziksel mimari (Akyıldız ve diğ.,2006)

RF Uç biriminin bileşenleri kısaca aşağıdaki gibidir:

RF filtresi: alınan RF sinyalini bant geçiren süzgeçten geçirerek istenilen bandı seçer.

LNA (Low Noise Amplifier): düşük gürültü yükseltici, gürültü bileşenini azaltarak istenilen sinyali yükseltir (amplify).

Karıştırıcı (Mixer): karıştırıcıda alınan sinyal yerel osilatör tarafından üretilen RF frekansıyla çarpılır ve temel bant ya da ara frekansa dönüştürülür.

VCO (Voltaj Denetimli Osilatör): gelen sinyalle çarpmak üzere, verilen bir voltaj değeri için belirli bir frekansta sinyal üretir.

PLL (phase-locked loop-faz kilitlemeli çevrim): sinyalin belirli bir frekansa kilitlemesini garantiler ve iyi çözünürlüklü tam doğru frekanslar üretmek için kullanılır.

Kanal seçme filtresi: istenilen kanalı seçmeyi ve yan kanalları reddetmeyi sağlar.

AGC (Otomatik Kazanç Kontrolörü): yükseltecin çıkış gücünü ve kazancını korumayı sağlar.

Bu mimaride, geniş bant sinyali RF uç birimi tarafından alınır, yüksek hızlı ADC (Analog Digital Converter) ile örneklenir ve lisanslı kullanıcıların tespiti için ölçümler yapılır. Geniş bant anten farklı güç seviyelerinde ve bant genişliklerinde çalışan vericilerden gelen sinyalleri toplar. Sonuç olarak RF uç birimi geniş dinamik mesafede zayıf sinyali tespit edebilme kapasitesine sahip olmalıdır. Bu özellik yüksek çözünürlüklü çoklu GHz mertebesinde ADC'leri gerektirir, bu da imkânsız olabilir.

Yüksek hızlı ADC'ye olan gereksinim, sinyalin dinamik mesafesinin A/D dönüşümünden önce azaltılmasını gerektirir. Bu azaltma güçlü sinyalleri filtreleyerek yapılır. Güçlü sinyaller spektrumun herhangi bir yerine yerleşebileceği için ayarlanabilir filtreler kullanılmalıdır. Diğer bir yaklaşım çoklu anten kullanmaktır. Böylece sinyal filtreleme frekans bölgesinde değil uzay bölgesinde olur. Çoklu antenler hüme şekillendirme (beamforming) tekniklerini kullanarak sinyalleri süzerler. Daha önce de belirtildiği gibi asıl kritik uğraş, geniş spektrum bandında lisanslı kullanıcıların zayıf sinyallerini tespit edebilmektir. Bu yüzden RF uç birimi, ADC uygulamaları BR ağları için önemli konulardır.

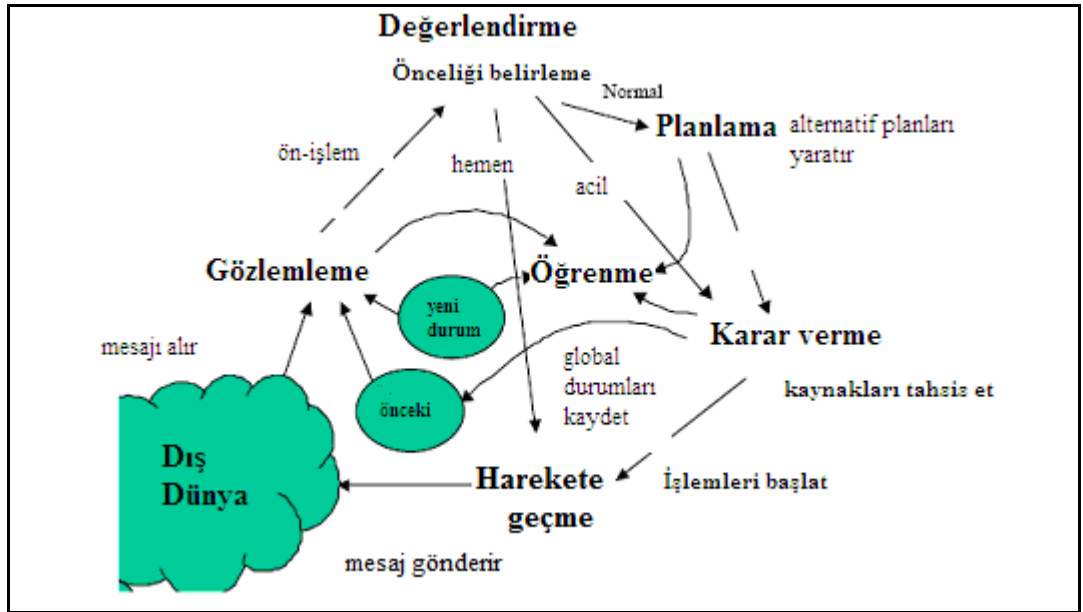
6.5. Bilişsel Radyo Döngüsü

Bilişsel radyonun çalışma mekanizmasını özetlemek için farklı sonlu durum mekanizmaları oluşturulmuştur.

6.5.1. Bilişsel kapasite

Bilişsel kapasite dinamik radyo ortamına adapte olmak ve uygun haberleşme parametrelerini belirlemek için radyo ortamıyla gerçek zamanlı bir etkileşim içinde olmayı sağlar.

Bilişsel kapasitenin oluşma prensibini, sonlu durum mekanizması şeklinde özetlemek için Şekil 6.8’de gösterilen BR döngüsü kullanılmıştır.



Şekil 6.8 BR döngüsü(Mitola, 2006)

Bilişsel radyo döngüsünde radyo, sinyalleşme ya da gözleme ile çalışma ortamıyla ilgili bilgiyi dış dünyadan (Outside world) alır. Daha sonra bu bilginin değerlendirmesini yapar (Orient). Bu değerlendirmeye dayanarak radyo alternatiflerini belirler (Plan) ve belirlediği alternatiflerden bir tanesini seçer (Decide). Daha sonra radyo kaynaklarını ayarlayarak ve uygun sinyalleşmeyi gerçekleştirerek seçtiği alternatifi gerçekleştirir (Act). Sonuç olarak bu değişimler BR tarafından, dış

dünyada (Outside world) girişim profilinde yansıtılır. BR bu işlem boyunca yeni modelleme durumları yaratarak, yeni alternatifler oluşturarak ya da yeni değerlendirmeler yaparak çalışmasını iyileştirmek için bu gözlemleri ve kararları kullanabilir (Learn).

6.5.2. Bilişsel radyo döngü fazları

Şekil 6.8 göre bilişsel radyo döngü fazları; gözleme, yönlendirme, planlama, karar verme, harekete geçme, öğrenme durumlarından oluşur.

6.5.2.1. Gözleme (Observe)

İdeal BR (iBR) birçok farklı yerden gelen dürtüleri kabul ederek ve bu dürtüleri önceki deneyimlerle birleştirerek birlikte ya da küçük kümeler halinde, ortamı algılar ve fark eder. Böylece iBR zamanla dürtüleri tespit edebilir ve sonuç olarak planlarını oluşturabilir.

Böylece iBR devamlı olarak deneyimlerini bir araya getirir ve öncekilerle karşılaştırır. Şimdiki deneyimini daha önceden bildikleriyle bağdaştırmak için kullanacağı sayısal mimari bilişsel radyo mimarisinin çekirdek kapasitesidir.

6.5.2.2. Yönlendirme (Orient)

Bu aşamada, daha önceden bilinen dürtülerle gözlemler bağlanarak bir gözlemin önemi belirlenebilir. Ayrıca bu faz kısa vadeli hafızaya eşdeğer teşkil edilen dâhili veri yapılarını içerir. İnsanlar genellikle bilginin uzun vadeli olarak saklanması için tekrarlamalara ihtiyaç duyar. Doğal çevre de kısa vadeli hafızadan uzun vadeli hafızaya geçiş için gerekli olan bilgi fazlalığını sağlar.

Güncel dürtüleri kayıtlı deneyimlerle eşleştirmek 'dürtü tanıma' ya da 'bağdaştırma' ile gerçekleştirilebilir. Yönlendirme fazı aktivitenin bilişsel bileşende ilk toplandığı fazdır.

6.5.2.3. Planlama (Plan)

Birçok dürtü ‘tepkisel’ den ziyade ‘bilinçli ’ olarak ele alınır Gelen ağ mesajı ile bir plan oluşturulur Ayrıca plan fazı zamanla ilgili nedenleri de içerir.

Tipik olarak, tepkisel cevaplar ağ tarafından önceden programlanır ya da tanımlanır. Bir dürtü basit bir plan ile ilişkilendirebilir. Açık kaynak planlama araçları bilişsel planlama alt sistemlerini radyo mimarisi içine gömmeyi mümkün kılar.

6.5.2.4. Karar verme (Decide)

Karar verme fazında aday planlar arasından bir tanesi seçilir. Radyonun kullanıcıyı gelen mesaja karşı uyarmak (örneğin çağrı cihazı gibi davranır) ya da kesmeyi sonraya ertelemek için (örneğin önemli bir toplantı sırasında çağrıları süzen sekreter gibi) kullanabileceği bir tane seçimi olmalıdır.

6.5.2.5. Harekete geçme (Act)

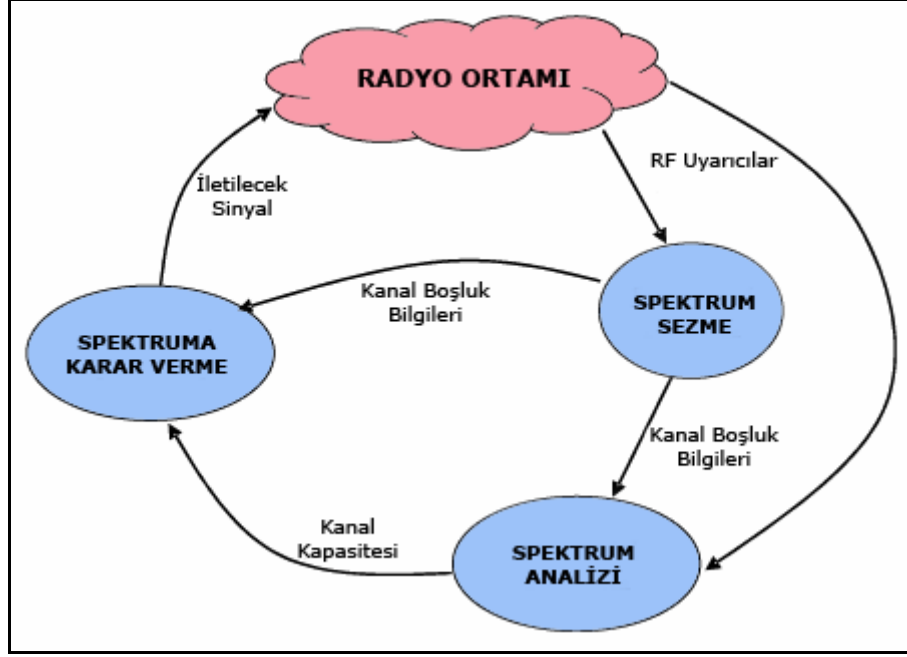
Seçilen işlemler dengeleyici modüller kullanarak başlatılır. Dengeleyiciler dış dünyaya ya da BR’nin iç durumlarına erişirler.

6.5.2.6. Öğrenme (Learning)

Öğrenme algıların, gözlemlerin, kararların ve eylemlerin bir fonksiyonudur. Öğrenme ayrıca yeni dahili modüllerin var olan modüllere tanıtımıyla da oluşur.

BR döngüsünün bir başka yorumu için ise Akyıldız ve diğ (2006)’dan yararlanılmıştır. Burada BR döngüsü, aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi ‘spektrum algılama’ , ‘spektrum analizi’ , ‘spektrum kararı’ fazlarından oluşan başka bir sonlu durum makinesi kullanılarak yorumlanmıştır.

Şekil 6.9’da fazlar arasında geçişlerin neye göre olduğu altı çizilerek gösterilirken bilişsel radyonun çalışma mantığı farklı bir bakış açısıyla ele alınmıştır.



Şekil 6.9 Bilişsel döngü

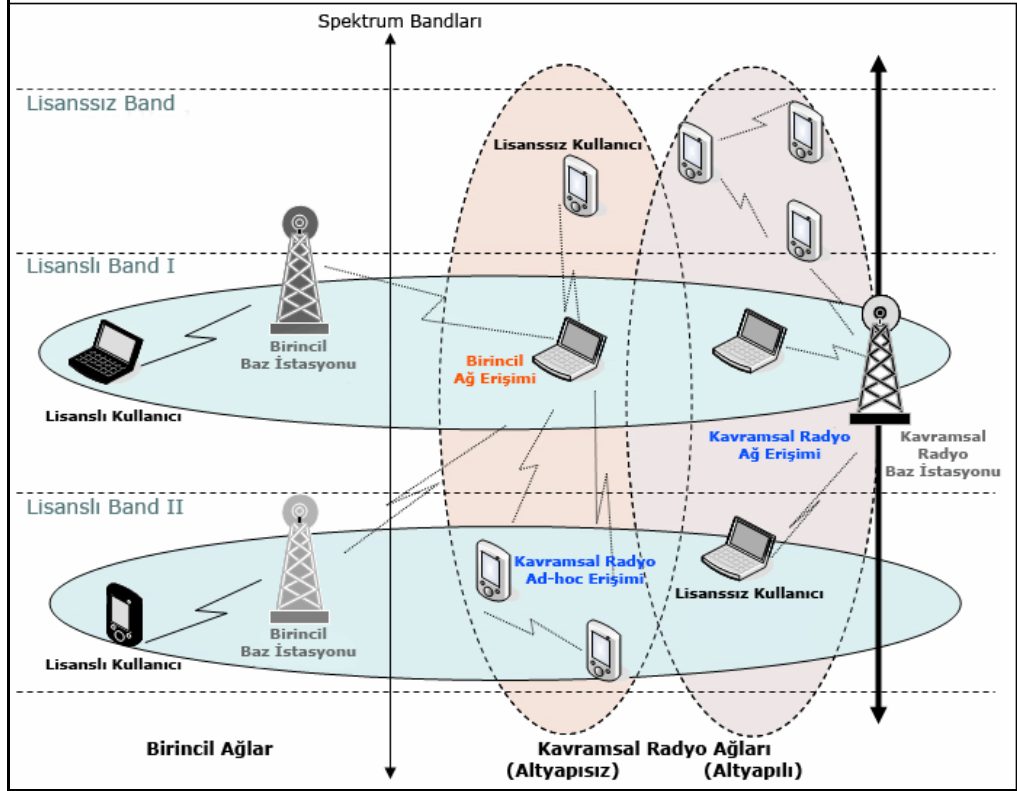
Bilişsel döngünün fazları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Spektrum Algılama (Sezme): BR uygun spektrum bantlarını izleyebilmeli, bu bantlardan bilgi edinebilmeli ve böylece spektrum boşluklarını yakalayabilmelidir.
2. Spektrum Analizi: Spektrum algılama aşamasında elde edilen spektrum boşluklarının özelliklerini değerlendirilir.
3. Spektruma Karar Verme: BR veri hızını, iletim modunu ve bant genişliğini belirler. Sonra spektrum özelliklerine ve kullanıcı gereksinimlerine göre uygun spektrum bandını seçer.

Spektrum bandı belirlendikten sonra haberleşme bu spektrum bandında gerçekleştirilebilir. Fakat, radyo ortamı zamanla değişime uğradığı için, BR bu değişiklikleri izlemeyi sürdürür. Kullanımdaki bu spektrum bandı erişilemez hale gelirse, spektrum taşınabilirliği işlevi gerçekleştirilir. Birincil kullanıcıların ortaya çıkması, kullanıcıların yer değiştirmesi ya da trafik değişimi gibi iletim sırasındaki herhangi bir çevresel değişiklik bu ayarlamayı tetikleyebilir.

6.6. Bilişsel Radyo Ağ Mimarisi

Var olan kablosuz ağ mimarileri, heterojenliği hem spektrum politikaları hem de haberleşme teknolojileri bakımından kullanır. Bazı spektrum bantları farklı amaçlar için lisanslanmışken bazı bantlar lisanssız kalmıştır.



Şekil 6.10 Bilişsel radyo ağı (Akyıldız ve diğ., 2006)

Yeni nesil ağ mimarisinin bileşenleri Şekil 6.10'da gösterildiği gibi birincil ağ ve ikincil ağ (yeni nesil ağ) olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Bu sınıflandırma incelemesi için Akyıldız ve diğ. (2006) çalışmasından yararlanılmıştır.

Birincil(Primary) Ağ: belirli bir spektrum bandına erişmek için özel bir hakka sahip olan ağıdır. Örnek olarak ortak hücreli ve TV yayın ağları verilebilir. Birincil ağ elemanları ise şu şekilde tanımlanabilir:

Birincil kullanıcı: birincil kullanıcı(lisanslı kullanıcı) belirli bir spektrum bandında çalışmak için lisansa sahiptir. Bu erişim sadece birincil baz istasyonu tarafından kontrol edilir ve diğer lisanssız kullanıcıların çalışmalarından etkilenmemelidir.

Birincil baz-istasyonu: birincil baz-istasyonu(ya da lisanslı baz-istasyonu) bir hücrenel sistemdeki baz-istasyonu alıcı-verici sistemi gibi spektrum lisansına sahip sabit alt yapı ağı bileşenidir. Prensip olarak, birincil baz istasyonu spektrumu diğer yeni nesil kullanıcılarla kullanmak için herhangi bir yeni nesil kapasiteye sahip değildir. Fakat, birincil baz istasyonu yeni nesil kullanıcıların birincil ağı erişimleri için yeni nesil protokollere sahip olmayı isteyebilir.

Yeni nesil (BR) ağı: yeni nesil ağı(ya da bilişsel radyo ağı, Dinamik Spektrum Erişim ağı, ikincil ağı, lisanssız ağı) istenilen bantta çalışmak için lisansa sahip değildir. Bu yüzden, spektrum erişimi ancak fırsatçı yaklaşım ile sağlanır. Yeni nesil ağlar hem altyapı ağı(merkezi) hem de ad-hoc ağı olarak yerleştirilebilir. Yeni nesil ağı elemanları ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Yeni nesil (BR) kullanıcı: yeni nesil kullanıcılar spektrum lisansına sahip değildir. Bu yüzden, lisanslı spektrum bandını paylaşmak için ek özelliklere gereksinim duyarlar.

Yeni nesil (BR) baz-istasyonu: yeni nesil baz istasyonu yeni nesil kapasitelerle birlikte sabit bir altyapı bileşenidir. Yeni nesil baz istasyonu, kullanıcılara spektrum erişim lisansı olmadan tek sekme(single hop) bağlantısı sağlar. Bu bağlantı ile yeni nesil kullanıcılar başka ağlara erişebilirler.

Spektrum simsarı(broker): farklı spektrum ağları arasında spektrum kaynaklarının paylaşılmasında rol oynayan merkez ağı elemanıdır. Spektrum simsarı çoklu yeni nesil ağların birlikte var olmasını sağlamak için her bir ağı bağlanabilir ve spektrum bilgi yöneticisi olarak çalışabilir.

Şekil 6.10'da gösterildiği gibi yeni nesil ağı mimarisi farklı tipte ağları içerir: birincil ağı, alt yapı temelli ağı (merkezi) ve ad-hoc ağı. Yeni nesil ağlar lisanslı ve lisanssız bantlardan oluşan karışık spektrum ortamı altında çalışmaktadırlar. Ayrıca, yeni nesil kullanıcılar ya birbirleriyle çoklu sekmeli (multi-hop) usulle ya da baz istasyonu vasıtasıyla haberleşebilirler. Bu yüzden, yeni nesil ağlarda, BR ağı erişimi, BR ad-hoc erişimi ve Birincil ağı erişimi olmak üzere üç farklı ağı erişim şekli vardır.

1. BR ağ erişimi: BR kullanıcıları kendi baz istasyonlarına hem lisanslı hem lisanssız spektrum bantlarından erişebilirler.
2. BR ad-hoc erişimi: BR kullanıcıları, ad-hoc bir ağda lisanslı ve lisanssız spektrum bandlarını kullanarak iletişim kurabilir ve birbirlerine erişebilirler.
3. Birincil ağ erişimi: Lisanssız kullanıcılar lisanslı bantları kullanarak birincil baz istasyonlarına da erişebilirler.

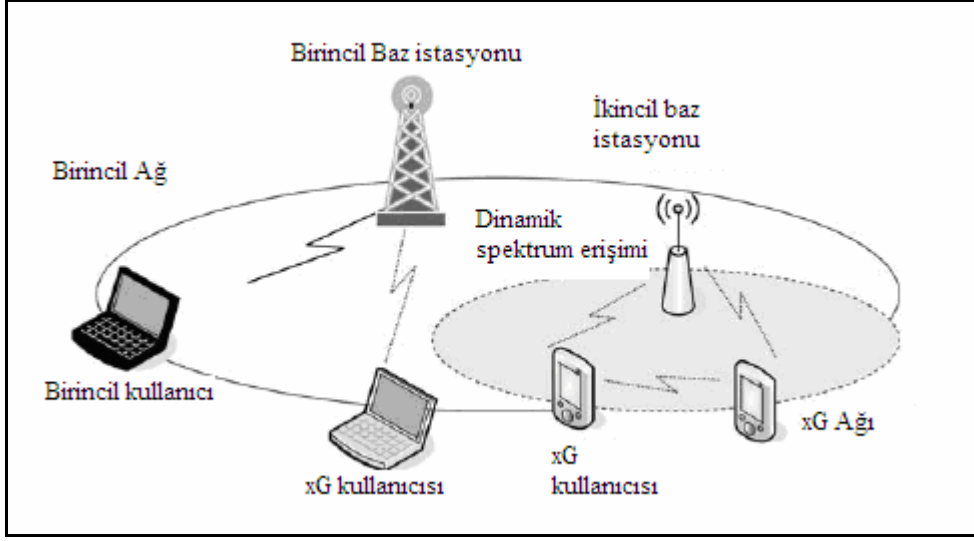
Yukarıdaki referans mimariye göre yeni nesil ağlarda heterojenliği sağlamak için birçok farklı işleve ihtiyaç vardır. Bir sonraki bölümde heterojenliği sağlamak için gerekli yeni nesil ağ fonksiyonları açıklanmıştır.

6.6.1. BR ağ işlevleri

Daha önce de bahsedildiği gibi, BR ağı hem lisanslı hem de lisanssız bantta çalışabilir. Bu yüzden işlevselliği lisanslı ya da lisanssız banda göre farklılık gösterir. Lisanslı ve lisanssız bantlardaki BR ağ işlevlerini incelerken Akyıldız ve diğ. (2007) çalışması yol gösterici olmuştur.

6.6.1.1. Lisanslı banttaki BR ağı

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi lisanslı bantta geçici olarak kullanılmayan spektrum boşlukları bulunur. Bu yüzden BR ağı, bilişsel haberleşme tekniklerini kullanarak bu spektrum boşluklarından yararlanacak şekilde yerleştirilebilir. Bu mimari şekil 6.11’de gösterilmiştir. Bu şekilde de görüldüğü gibi yeni nesil ağ (BR ağı) birincil ağ ile aynı bölgede ve aynı spektrum bandı üzerinde bulunabilir. BR ağının ana amacı en uygun spektrumu belirlemek olmasına rağmen, lisanslı banttaki BR işlevleri birincil kullanıcıların varlığını tespit etmeye odaklanmıştır. Spektrum boşluklarının kanal kapasitesi komşu birincil kullanıcılardaki girişime bağlıdır. Bu yüzden girişime engel olmak mimarideki en önemli konulardandır. Eğer birincil kullanıcılar BR kullanıcılarının işgal ettiği spektrum bandında yeniden görünürse, BR kullanıcıları bandı boşaltır ve yeni bir spektrum boşluğuna geçerler, buna spektrum geçişi (handoff) denir.

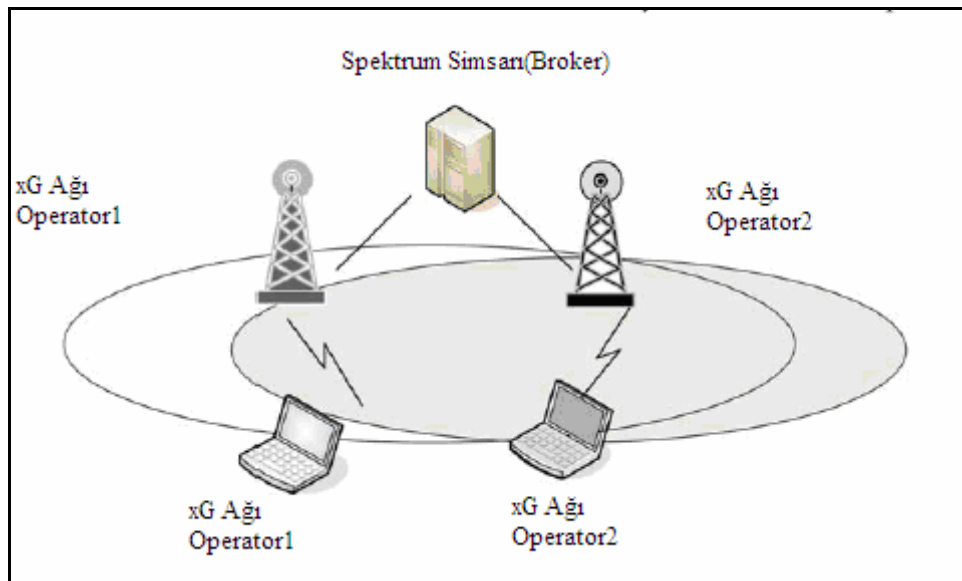


Şekil 6.11 Lisanslı bantta BR ağı(Akyıldız ve diğ., 2006)

6.6.1.2. Lisanssız banttaki BR ağı

Bu mimaride BR kullanıcı, diğer BR kullanıcıların iletimini tespit etmeye odaklanmıştır. Lisanslı banttaki işlemlerden farklı olarak, spektrum geçişi birincil kullanıcıların görülmesiyle tetiklenmez.

Bütün BR kullanıcıları, spektruma erişmek için eşit hakka sahip olduğu için aynı lisanssız bant için birbirleriyle rekabet ederler.



Şekil 6.12 Lisanssız bantta BR ağı(Akyıldız ve diğ., 2006)

6.6.2. BR ağ uygulamaları

BR ağları aşağıdaki durumlar için uygulanabilirler:

Kiralık ağ (Leased Network): BR ağı, birincil kullanıcının servis kalitesini de göz önüne alarak lisanslı spektruma fırsatçı erişimi sağlamak için kiralık ağ sağlar. Örneğin BR ağı, spektrum erişim hakkını mobil sanal ağ operatörüne kiralayabilir. Ayrıca BR ağı, spktrum erişim haklarını geniş bant erişim amacı için bölgesel bir topluluğa da sağlayabilir.

Bilişsel rg (mesh) ağı: Kablosuz rg ağları, geniş bant bağlantı için uygun maliyetli bir teknoloji olarak ortaya çıkmışlardır. Fakat, ağ yoğunluğu arttı ve uygulamalar daha yüksek veri hızına(throughput) ihtiyaç duyduka örgü ağ uygulamalarının gereksinimlerini karşlamak için daha yüksek kapasiteye ihtiyaç duyulmuştur. BR teknolojisi daha geniş spktruma erişimi mümkün kıldığı için, BR ağları yoğun kentsel bölgelerde konuşlandırılmış örgü ağlar için kullanılabilir. Örneğin, rg kablosuz omurga ağ altyapı bağlantıları bilişsel erişim noktaları ve sabit bilişsel aktarma düğümleri üzerine kurulduğu zaman BR ağının kapsama alanı artabilir. İnternete kablolulu geniş bant erişim ile bağlı olan bir bilişsel erişim noktasının kapasitesi sabit bilişsel aktarma düğümlerinin yardımıyla geniş alana dağıtılabilir.

Acil (emergency) ağ: halk güvenliği ve acil ağlar BR ağlarının uygulanabildiği alanlardan bir diğeridir. Var olan haberleşme altyapısını yıkabilecek ya da devre dışı bırakabilecek doğal felaket durumlarında, acil ağ kurmak için acil personel çalışanlarına ihtiyaç vardır. Acil ağlar kritik bilgilerle ilgilendiği için güvenilir haberleşme minimum gecikmeyle garantilenmelidir. Ayrıca, acil haberleşme, ses, video ve veriyi de içine alan yüksek trafik yoğunluğunu yürütmek için belirli oranda radyo spektrumuna gereksinim duyulur. BR ağları, var olan spektrum kullanımını, altyapıya gereksinim duymadan ve haberleşme önceliğini ve tepki zamanını koruyarak sağlayabilir.

Askeri ağ: BR ağının en ilginç potensiyel uygulamalarından birisi askeri radyo ortamındadır. BR ağları, askeri radyoların ara frekans (IF) bant genişliğini,

modülasyon ve kodlama şemalarını rasgele seçmelerini sağlayabilir. Ayrıca askeri ağlara güvenlik ve haberleşmenin korunması için de gereksinim duyulur. BR ağları, kendileri ve müttefikleri için güvenli spektrum bantları bulmak amacıyla askeri personelinin spektrum geçişini (handoff) gerçekleştirmelerine izin verirler.

6.7. BR Fonksiyonları

Bölüm 6'nın giriş kısmında kısaca özetlenen BR işlevleri bu bölümde detaylı olarak açıklanacaktır.

6.7.1. Spektrum algılama

Spektrum algılama BR ağının önemli bir gereksinimidir. Daha önceden de bahsedildiği gibi BR çevresindeki değişikliklerin farkında olmak ve bunlara karşı duyarlı olmak için tasarlanmıştır. Spektrum algılama işlevi, BR'nin spektrum boşluklarını tespit ederek çevresine adapte olmasını sağlar.

Spektrum boşluklarını tespit etmenin en verimli yolu, bir BR kullanıcısının haberleşme mesafesi içerisinde veri almakta olan birincil kullanıcıları belirlemesidir. Gerçekte, BR için birincil alıcı ve verici arasındaki kanalın ölçümüne sahip olmak zordur. Bu yüzden, en son çalışmalar, BR kullanıcılarının yerel gözlemlerini temel alan birincil verici algılama üzerine odaklanmıştır.

Genel olarak, spektrum algılama teknikleri verici algılama, ortak algılama, ve girişim temelli algılama olarak sınıflandırılır. Sonraki bölümlerde bu methodların temellerinden bahsedilmiştir. Bunun için genel olarak Akyıldız ve diğ. (2006), Akyıldız (2008), Cabric(2004), han ve diğ. (2006), Cabric ve diğ. (2005b), Hester ve Ridley (2008) çalışmalarından yararlanılmıştır.

6.7.1.1. Verici algılama

BR, kullanılan ya da kullanılmayan spektrum bantlarını ayırt edebilir. Bu sayede, BR birincil verici sinyalinin belirli bir spektrumda bulunup bulunmadığını belirleyebilir. Verici algılama yöntemi birincil vericilerin zayıf sinyalinin tespiti üzerine dayanır.

Bu yöntem için Ghasemi ve Sousa (2005) çalışmasında belirtilen temel model şu şekilde ifade edilebilir:

$$\begin{aligned} x(t) &= n(t) & H_0 \\ x(t) &= hs(t) + n(t) & H_1 \end{aligned} \quad (6.1)$$

$x(t)$ BR kullanıcılarından alınan sinyal, $s(t)$ birincil kullanıcı tarafından iletilen sinyal, $n(t)$ AWGN (Additive White Gaussian Noise) ve h kanalın genlik kazancını ifade eder. H_0 durumu, belirli bir spektrum bandında lisanslı kullanıcı sinyalinin olmadığı durumu, H_1 durumu ise lisanslı kullanıcıların mevcut olduğu durumu ifade eder. Verici algılama üç farklı metotla uygulanabilir. BR ağında verici algılaması için uyumlu filtre algılama, enerji algılama, dairesel-durağan özellik algılama teknikleri önerilmiştir.

6.7.1.1.1. Uyumlu filtre algılama

Birincil kullanıcının bilgisi BR kullanıcısı tarafından bilindiği zaman, durağan Gaussian gürültüsü içinde, alınan SNR değerini yükseltiği için optimum detektör, uyumlu filtredir. Uyumlu filtrenin esas avantajı yüksek işlem kazancına erişmek için daha az zamana ihtiyacı olmasıdır, fakat bunun yanında birincil kullanıcı hakkında modülasyon tipi, darbe şekli ve paket formatı gibi bir ön bilgiye sahip olması gerekir. Bu yüzden, bu bilgi doğru değilse, uyumlu filtre hatalı bir şekilde gerçekleşmiş olur. Fakat, birçok kablosuz ağ sistemi pilot, başlangıç, senkronizasyon kelimesine sahip olduğu için bunlar tutarlı bir algılama için kullanılabilir.

6.7.1.1.2. Enerji algılama

Eğer alıcı birincil kullanıcı hakkında yeterli bilgi toplayamazsa en uygun algılama enerji algılamasıdır. Enerji algılama basit bir yöntemdir ve FFT (Fast Fourier Transform) algoritması ile uygulanabilir. Fakat bu yöntemin bazı sakıncaları vardır. Birincisi, karar verme eşik değerinin, değişen SNR değerine bağlı olmasıdır. İkincisi, girişimi, kullanıcı sinyalinden ayırt edememesidir. Ayrıca, sinyal gücü geniş banda yayılmış sinyaller için verimli bir yöntem değildir.

6.7.1.1.3. Dairesel durağan özellik algılama

Dairesel durağan özellik algılaması alternatif bir algılama metodudur. Modüle edilmiş sinyaller genellikle sinüs dalga taşıyıcıları, darbe trenleri, tekrar eden yayılımlar, dairesele nekler ile birleştirilir. Bu modüle edilmiş sinyallerin ortalamaları ve otokorelasyonları periyodiklik sergilediği için dairesele-durağan olarak karakterize edilirler. Bu zellikler, spektral korelasyon fonksiyonu analiz edilerek algılanır. Spektral korelasyon fonksiyonunun esas avantajı gürültü enerjisini module edilmiş sinyal enerjisinden ayırt edebilmesidir. Bu da, module edilmiş sinyallerin dairesele durağanken gürültünün geniş anlamda durağan bir sinyal olmasından kaynaklanır. Bu yüzden dairesele durağan özellik algılama, gürültü gücündeki belirsizliklere karşı dayanıklı olduğu için gürültüyü ayıklamada enerji algılamasından daha iyi performans gösterir.

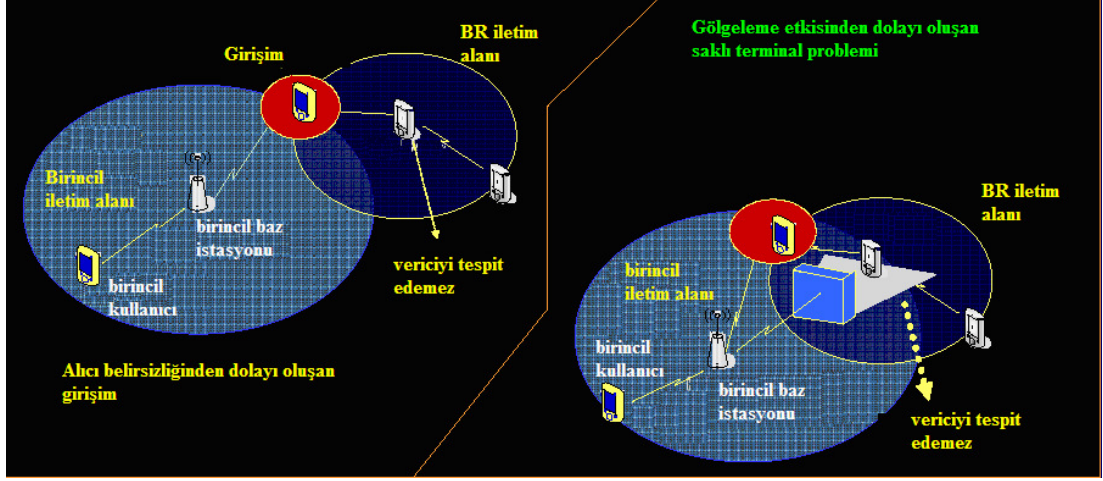
Bu metod birçok avantaja sahip olmasına rağmen hesaplamadaki karmaşıklık gerçekleştirilmesini zorlaştırır. Spektral korelasyon fonksiyonunu oluşturmak için bütün frekanslar arandığı için hesaplama karmaşıklığı enerji algılama metoduna göre daha fazladır.

Bu yöntemde üç aşama vardır. İlki, bütün tespit edilen bant genişliği aranarak alınan sinyalin spektral korelasyon fonksiyonu oluşturulur. İkinci adımda bir değerli dairesele frekanslar aranır. Arama sonuçlarına göre son adımda bir algılama kararı verilir. Algılama kararını vermek için bir değerli dairesele frekanslar aranır. Daha önce de açıklandığı gibi gürültü dairesele-durağan özellik göstermez. Bu yüzden, eğer bir değerli dairesele frekans bulunmamışsa bu bantta sinyal yok demektir. Aksi takdirde bant birincil kullanıcılar tarafından kullanılıyor anlamına gelir.

6.7.1.2. Ortak (Cooperative) algılama

Birincil verici algılama varsayımına göre birincil alıcıların yerleri, birincil kullanıcılarla BR kullanıcıları arasında sinyalleşmenin olmamasından dolayı bilinmez. Bu yüzden bilişsel radyonun zayıf birincil verici sinyallerine güvenmesi gerekir. Bazı durumlarda BR ağı birincil ağdan fiziksel olarak ayrıdır, yani aralarında

bir etkileşim yoktur. Bu yüzden şekil 6.13 (a)'da görüldüğü gibi verici algılaması ile BR kullanıcısı birincil alıcı bilgisayarının eksikliğinden doğan girişime engel olamaz.



Şekil 6.13 Verici algılama problemi (Akyıldız, 2008)

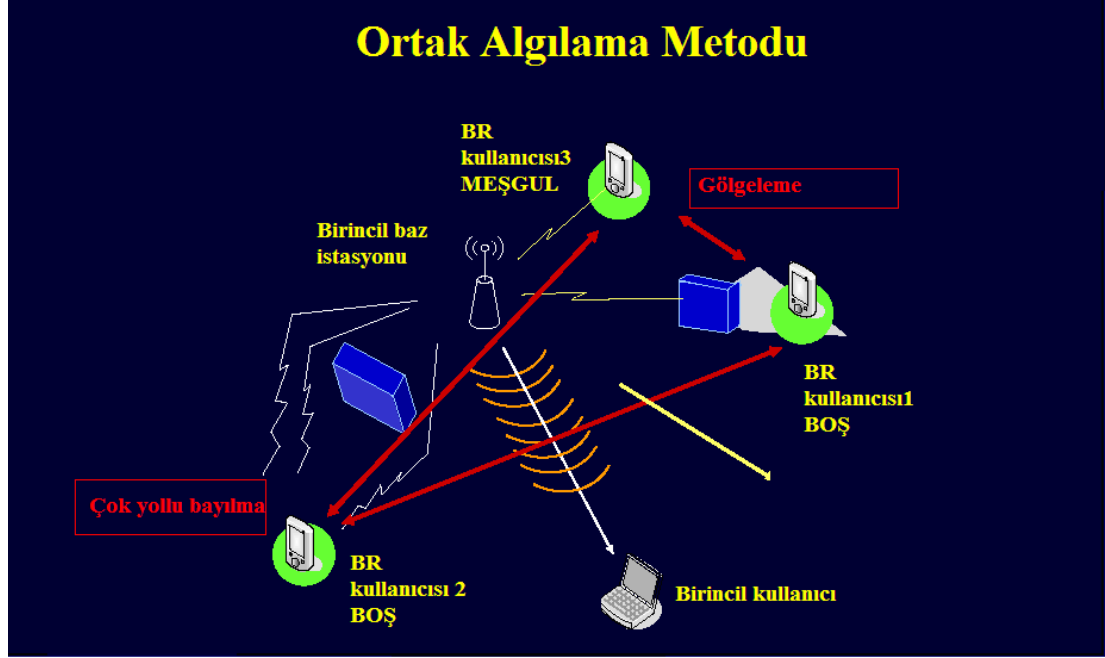
Ayrıca verici algılama modeli saklı terminal problemini önleyemez. Bir BR kullanıcısı alıcıyla iyi bir görüş doğrultusuna (line-of-sight) sahip olabilir, fakat şekil 6.13 (b)'de görüldüğü gibi vericiyi gölgeleme etkisinden dolayı tespit edemeyebilir. Sonuç olarak, daha doğru bir algılama için diğer kullanıcıların algılama bilgisine ihtiyaç duyulur.

Ortak olmayan algılama modellerinde, BR kullanıcıları yerel gözlemleriyle birincil verici sinyalini algırlar. Şekil 6.14'de gösterildiği gibi ortak algılama modelinde ise, birincil kullanıcı tespiti için birçok BR kullanıcılarından gelen bilgi birleştirilir.

Ortak algılama metodu hem merkezi hem de dağıtık şekilde gerçekleştirilir. Merkezi metotta, BR kullanıcılarından algılama bilgisini toplayan ve spektrum boşluklarını tespit eden BR baz istasyonudur. Dağıtık metotta ise, BR kullanıcıları arasında gözlemlerin karşılıklı olarak değiştirilmesi gerekir.

Lisanssız kullanıcılar arasında ortak algılama modeli teorik olarak daha doğru sonuç verir, çünkü bu yolla tek bir kullanıcı algılamasının belirsizliği en aza indirilir. Ayrıca gölgeleme ve çok yollu sönümlenmeler (multi-path fading) birincil kullanıcı

algılama modellerinin performansını düşürür. Fakat ortak algılama modeli çok yollu sönümlerinin ve gölgelemenin etkisini azaltır.



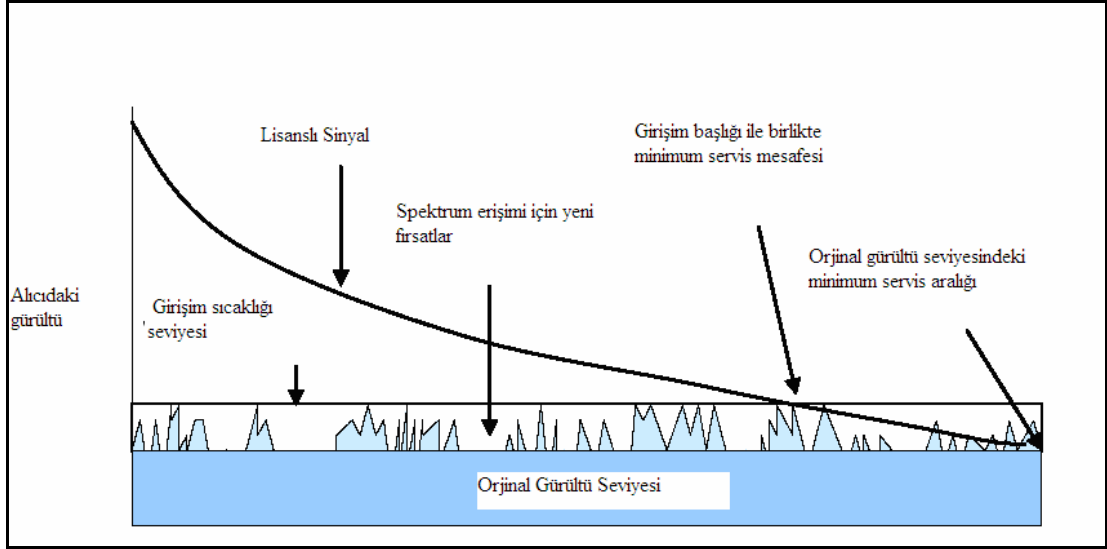
Şekil 6.14 Ortak algılama modeli (Akyıldız, 2008)

Ortak algılama yaklaşımları daha doğru sonuçlar verirken, ek işlemler ve ek trafik yükü nedeniyle sınırlı kaynaklı ağlarda tercih edilmezler. Ayrıca, birincil alıcının yerinin bilinmemesinden kaynaklanan birincil alıcı belirsizliği problemi ortak algılama modelinde de çözülememiştir.

6.7.1.3. Girişim temelli algılama

Girişim tipik olarak verici merkezli bir yolla düzenlenir, bu da girişimin ışına gücü, bant dışı emisyonlar ve vericilerin yerleri kullanılarak vericide kontrol edildiği anlamına gelir. Fakat, girişim ağaşındaki şekilde de görüldüğü gibi aslında alıcıda yer alır. Bu yüzden son zamanlarda FCC, girişimi ölçmek için Şekil 6.15’de gösterilen girişim sıcaklığı isimli yeni bir model ortaya koymuştur. Bu model açıklanırken özellikle Akyıldız ve diğ. (2006), Akyıldız (2008) ve Hester ve Ridley (2008) çalışmaları referans alınmıştır. Bu model, alıcı gücünün gürültü tabanı seviyesine yaklaştığı mesafede çalışmak üzere tasarlanmış radyo istasyon sinyalini gösterir. Ek girişim sinyalleri ortaya çıktıkça, şekildeki orijinal gürültü tabanının üstündeki

tepelere gösterildiği gibi gürültü tabanı birçok noktada artmaya başlar. Geleneksel verici merkezli yaklaşımlardan farklı olarak girişim sıcaklık modeli, alıcının tolere edebileceği girişim miktarı olarak temsil edilen girişim sıcaklığı sınırını kullanarak girişimi alıcıda yönetilir. BR kullanıcıları bu sınırı geçmediği sürece bu spektrum bandını kullanabilirler.



Şekil 6.15 Girişim sıcaklık modeli (Akyıldız ve diğ., 2006)

Fakat girişim sıcaklığı ölçümünde bazı sınırlamalar mevcuttur. Brown (2005)'de girişim birincil kullanıcılarla BR işlemlerinin engellediği servislerin kesri olarak ifade edilmiştir. Bu method lisanssız kullanıcıların sinyal modülasyonu, antenleri, aktif lisanslı kanalları algılama yeteneği, güç kontrolü, lisanslı ve lisanssız kullanıcıların etkinlik seviyeleri gibi faktörleri dikkate alır. Fakat, bu model tek bir BR kullanıcılarının engel olduğu girişimi açıklar, çoklu BR kullanıcılarının etkisini dikkate almaz. Ayrıca, BR kullanıcıları yakındaki birincil kullanıcılarının yerlerinin farkında değilse, gerçek girişim bu modelle ölçülemez.

Wild ve Ramchandran (2005)'de , birincil alıcının RF uç biriminin yaydığı yerel osilatör sızıntı gücünün birincil alıcıları algılamak için kullanıldığı doğrudan alıcı algılama metodundan bahsedilmiştir.

Yerel osilatörün sızıntı gücünü tespit etmek için birincil alıcıların yakınlarına düşük maliyetli sensör noktaları yerleştirilebilir. Bu sensör noktaları, birincil kullanıcıların

kullandığı kanalları belirlemek için yerel osilatör sızıntı gücünü algırlarlar ve lisanssız kullanıcılar bu bilgiyi çalışma spektrumunu belirlemek için kullanırlar.

6.7.2. Spektrum yönetimi

BR ağlarında, kullanılmayan spektrum bantları lisanslı ve lisanssız bantları da kapsayan geniş bir frekans aralığına yayılmış olacaktır. Spektrum algılama ile tespit edilen kullanılmayan spektrum bantları, sadece zamanla değişen radyo ortamına göre değil aynı zamanda çalışma frekansı ve bant genişliği gibi spektrum bandı bilgisine göre de farklı özellikler gösterirler.

BR ağlarının gerekli servis kalitesini karşılamak için en uygun kanala karar vermeleri gerektiği için bu ağlar için yeni spektrum yönetim fonksiyonları gereklidir. Bu fonksiyonlar spektrum algılama, spektrum analizi ve spektrum kararı olarak sınıflandırılabilir. Bir önceki bölümde bahsedildiği gibi spektrum algılama öncelikle bir fiziksel katman konusudur, spektrum analizi ve kararı ise daha üst katmanları ilgilendiren konulardır. Bu bölümde spektrum analizi ve spektrum kararı incelenmiştir.

6.7.2.1. Spektrum analizi

BR ağlarında, spektrum boşlukları zamanla değişen özellikler gösterirler. BR kullanıcıları, bilişsel radyo temelli fiziksel katmanla donatıldığı için farklı spektrum bantlarının özelliklerini anlamaları gerekir. Spektrum analizi farklı spektrum bantlarını karakterize etmeyi sağlar, bu da kullanıcı gereksinimlerine uygun spektrum bandını elde etmek için kullanılır.

BR ağının dinamik niteliğini açıklamak için her bir spektrum boşluğu, sadece zamanla değişen radyo ortamı değil aynı zamanda birincil kullanıcı aktivitesi ve frekans, bant genişliği gibi spektrum bilgisi de dikkate alınarak karakterize edilmelidir. Bu nedenle, girişim seviyesi, kanal hata oranı, yol kaybı, bağlantı katmanı gecikmesi ve tutma süresi gibi parametreleri tanımlamak önemlidir.

Girişim: bazı spektrum bantları diğerlerine göre çok daha kalabalıktır. Bu nedenle kullanımda olan spektrum bandı kanalın girişim niteliklerini belirler. Birincil alıcıdaki girişim miktarından, kanal kapasitesinin hesaplanmasında kullanılan BR'nin izin verilen gücü elde edilir.

Yol kaybı: yol kaybı çalışma frekansı arttıkça artar. Bu yüzden, eğer BR kullanıcısının iletim gücü aynı kalırsa, yüksek frekanslarda iletim mesafesi artar. Benzer şekilde, eğer iletim gücü yol kaybını telafi etmek için arttırılırsa bu durum diğer kullanıcılar için yüksek girişimle sonuçlanır.

Kablosuz bağlantı hataları: spektrum bandının modülasyon şemasına ve girişim seviyesine göre kanalın hata oranı değişir.

Bağlantı katmanı gecikmesi: farklı yol kayıplarına, kablosuz bağlantı hatasına ve girişime hitap etmek için farklı spektrum bantlarında farklı bağlantı katmanı protokollerine ihtiyaç duyulur. Bu da farklı bağlantı katmanı paket gecikmeleri ile sonuçlanır.

Tutma süresi: birincil kullanıcıların aktiviteleri BR ağlarında kanal kalitesini etkileyebilir. Tutma süresi ile, lisanslı bir bandın kesilmesinden önce BR kullanıcısının bu bandı meşgul edebileceği zaman aralığı kastedilmiştir. Tutma süresi ne kadar fazla olursa daha iyi kalite sağlanacaktır. Sık sık meydana gelen spektrum geçişleri(hadnoff) tutma süresini azaltabildiği için uzun tutma süreli BR ağları tasarlanırken bu geçişler dikkate alınmalıdır.

Yukarıdaki parametrelerle elde edilebilecek olan kanal kapasitesi spektrum niteliğini belirlemek için gerekli olan en önemli faktördür. Genellikle alıcıdaki SNR(Signal to Noise Ratio) değeri kapasite tahmini için kullanılır. Fakat, SNR BR kullanıcılarının sadece yerel gözlemlerini dikkate aldığı için birincil kullanıcılarda oluşacak girişime engel olamaz. Bu yüzden, spektrum niteliğini belirleme lisanslı alıcıdaki girişime dayanan kapasite tahmini üzerine odaklanmıştır. Bu yaklaşım için girişim sıcaklık modeli kullanılabilir. Girişim sıcaklık sınırı bantta oluşabilecek potansiyel RF

enerjisi üzerindeki üst sınırı gösterir. Sonuç olarak izin verilen girişim miktarı kullanılarak BR kullanıcısının maksimum izin verilen iletim gücü belirlenebilir.

Son zamanlardaki spektrum analizi çalışmaları spektrum kapasitesi üzerine odaklanmıştır. Fakat, kapasitenin yanında gecikme, bağlantı hata oranı, tutma süresi gibi diğer faktörlerinde servis kalitesi üzerinde önemli bir etkisi vardır. Ayrıca kapasite girişim seviyesi ve yol kaybı ile de yakından ilişkilidir. Sonuç olarak farklı tipteki uygulamalarda en uygun spektrum bandına karar vermek için yukarıda tanımlanan niteliklendirme parametrelerini birleştirerek spektrum bantlarını tanımlamak gerekir.

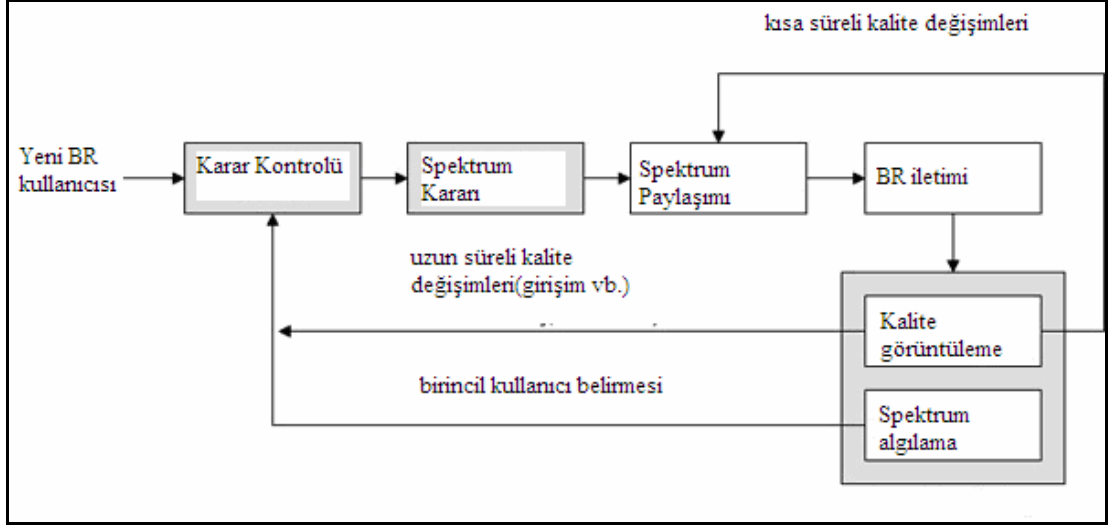
6.7.2.2. Spektrum kararı

Bütün erişilebilir spektrum bantları karakterize edildikten sonra servis kalitesi gereksinimleri ve spektrum nitelikleri dikkate alınarak o anki iletim için en uygun spektrum bandı seçilecektir. Bu yüzden, spektrum yönetim işlevleri servis kalitesi gereksinimlerinden haberdar olmalıdır.

Kullanıcı gereksinimlerine dayanarak, veri hızı, kabul edilebilir hata oranı, gecikme sınırı, iletim modu ve bant genişliği belirlenebilir. Daha sonra, karar verme kuralına göre uygun spektrum bantları seçilebilir. Şekil 6.16, spektrum kararının nasıl ve ne zaman gerçekleştiğini açıklamaktadır. Lee and Akyıldız (2007) çalışmasında incelenen bu taslak şu şekilde özetlenebilir.

Yeni bir BR kullanıcı sisteme ilk girdiği zaman spektrum algılamayı ve servis kalite kontrolünü gerçekleştirerek giriş kontrolünü yapar. Spektrum bantlarını bu işlemlerle karakterize ettikten sonra spektrum kararını verir. Bunu gerçekleştirdikten sonra spektrum paylaşımı işlemi yapılır. Bu işlemin de gerçekleşmesiyle artık BR iletimi yapılabilir.

İletim sırasınca spektrum algılama ve servis kalitesi kontrolü devam eder. Bunlarda gerçekleşebilecek bir değişim, örneğin bir sonraki bölümde anlatılacak olan spektrum geçişlerine neden olabilir ve böylece spektrum kararı tekrar verilmek zorunda kalınır. Bu döngü bu şekilde devam eder.



Şekil 6.16 BR ağları için spektrum kararı taslağı(Lee and Akyıldız (2007))

6.7.3. Spektrum taşınabilirliği

BR ağlarının hedefi, en uygun frekans bandında çalışmak için bilişsel radyo terminallerine izin vererek spektrumunu dinamik bir biçimde kullanmaktır. Bu da haberleşme amaçları için “en uygun kanalı elde et” kavramını mümkün kılar. Bu kavramı gerçekleştirmek için BR kullanıcısı en uygun spektrumunu yakalamalıdır. Spektrum taşınabilirliği, BR kullanıcısı çalışma frekansını değiştirdiği zamanki işlem olarak tanımlanır. Bir sonraki bölümde spektrum geçişi kavramından bahsedilmiştir. Bu incelemede Akyıldız ve diğ. (2006) çalışması yol gösterici olmuştur.

6.7.3.1. Spektrum geçişi

BR ağlarında spektrum taşınabilirliği, o an kullanılan kanalın durumu kötüleşmeye başladığı zaman ya da o kanalda birincil kullanıcı ortaya çıktığı zaman meydana gelir. Spektrum taşınabilirliği BR ağlarında, spektrum geçişi olarak tanımlanan yeni bir geçiş tipine neden olmuştur.

Daha önceki bölümlerde belirtildiği gibi, bilişsel radyo çalışma frekansına adapte olabilmektedir. Bu yüzden, BR kullanıcısının, çalışma frekansını değiştirdiği her seferde ağ protokollerinin çalışma modu bir moddan başka bir moda geçer. BR kullanıcılarının üzerinde çalışan uygulamaların spektrum geçişi sırasında minimum

performans kaybına uğraması için bu geçişlerin rahat ve mümkün olduğunca çabuk olması gerekir. Spektrum taşınabilirliği yönetimi için spektrum geçiş süresinin önceden öğrenilmesi önemlidir. Bu bilgi algılama algoritmaları ile sağlanır. Taşınabilirlik yönetim protokolleri, bu gecikme süresini öğrendikten sonra devam eden haberleşmesinin minimum performans kaybına uğramasını sağlayacaktır.

Sonuç olarak, çok katmanlı hareketlilik yönetim protokolleri, spektrum taşınabilirlik işlevlerini gerçekleştirmek için gereklidirler. Bu protokoller farklı tipteki uygulamalara uyumlu olan taşınabilirlik yönetiminini desteklerler. Örneğin, bir TCP (Transport Control Protocol) bağlantısı, spektrum geçiş bitinceye kadar bekleme durumuna geçebilir.

Ayrıca, spektrum geçişinden sonra TCP parametreleri değişeceği için, yeni parametreleri öğrenmek ve eski parametrelerden yenilere geçişin hızla gerçekleştiğinden emin olmak gerekecektir. FTP gibi bir veri haberleşmesi için, hareketlilik yönetim protokollerinin spektrum geçişi sırasında iletilen paketlerin depolanmasını sağlayacak bir mekanizma uygulamaları gerekirken, gerçek zamanlı uygulamalarda paketleri depolamaları gerekmez.

6.7.4. Spektrum paylaşımı

BR ağları için, spektrum kullanımında çözülmeyi bekleyen konulardan birisi de spektrum paylaşımıdır. Spektrum paylaşımı var olan sistemlerdeki genel MAC problemlerine benzer kabul edilebilir. Bu bölümde ilk olarak spektrum paylaşımı adımlarından ve bunları gerçekleştirmekte kullanılan farklı çözümlerden bahsedilmiştir. Bunun için esas olarak Akyıldız (2007), Akyıldız ve diğ. (2006), Wild ve diğ. (2007) ve Berlaman (2006)'dan yararlanılmıştır.

Spektrum paylaşımı işlemi beş ana adımdan oluşmaktadır.

1. Spektrum algılama: bir BR kullanıcısı, spektrumun belirli bir bölümü başka bir lisanssız kullanıcı tarafından kullanılmıyorsa, spektrumun bu bölümünü tahsis edebilir. Daha önce Bölüm 6.7.1'de bu problem için önerilmiş olan çözümlerden

bahsedilmiştir. Buna göre, bir BR kullanıcısı paket göndermek isterse, öncelikle çevresindeki spektrum kullanımından haberdar olması gerekir.

2. Spektrum tahsisi: spektrumun erişilebilirliğine göre BR kullanıcısı kanal tahsis edebilir. Bu tahsis sadece spektrum erişilebilirliğine dayanmaz, aynı zamanda iç politikalara(ve muhtemelen dış politikalara) da dayanır. Bu nedenle, spektrum tahsisinin tasarımı kullanıcının performansını artırmak için gerekli olan oldukça önemli bir araştırma konusudur.

3. Spektrum erişimi: bu adımda spektrum paylaşımın diğer bir sorunu gündeme gelmektedir. Spektruma erişmeye çalışan birden fazla BR kullanıcısı olabileceği için bu erişimin spektrumun üst üste binen kısımlarında çoklu kullanıcıların çarpışmasını önleyecek şekilde tasarlanması gerekir.

4. Alıcı-verici el sıkışması: haberleşme için bir spektrum bölümü belirlenir belirlenmez bu haberleşmedeki alıcıya da seçilen spektrum belirtilmelidir. Bu nedenle, BR ağlarında alıcı-verici el sıkışması verimli bir haberleşme için önemlidir. El sıkışma kavramı hiçbir suretle alıcı verici arasındaki bu protokolü kısıtlamaz. Merkezi istasyon gibi üçüncü partiler de buna dahil olabilir.

5. Spektrum taşınabilirliği: BR kullanıcıları tahsis ettikleri spektrumun ziyaretçileri olarak kabul edilirler. Bu nedenle, lisanslı kullanıcının kullandığı spektrum bölümüne ihtiyaç duyarsa, haberleşmenin, diğer bir boş bölümde devam etmesi gerekir. Sonuç olarak, spektrum taşınabilirliği BR kullanıcıları arasında başarılı bir haberleşmenin gerçekleşmesi için önemlidir.

BR ağlarındaki spektrum paylaşımı ile ilgili var olan çalışmalar, yukarıda açıklanan adımların herbiri için çözümler sunmayı amaçlamıştır. Bölüm 6.7.4.1'de BR ağlarındaki spektrum paylaşımı teknikleri sınıflandırılmış ve bu tekniklerle ilgili temel sonuçlar açıklanmıştır. Daha sonra bölüm 6.7.4.2'de ve 6.7.4.3'de birlikte var olan çoklu BR ağları arasındaki spektrum paylaşımı ve bir BR ağı içindeki paylaşımından bahsedilmiştir.

6.7.4.1. Spektrum paylaşım teknikleri

Akyıldız ve diğ. (2006) çalışmasında BR ağlarındaki spektrum paylaşımı için var olan çözümler üç kategoride sınıflandırılmıştır: mimari yaklaşımlarına, spektrum tahsis davranışlarına ve spektrum erişim tekniklerine göre. Bu bölümde bu üç sınıflandırma incelenmiştir.

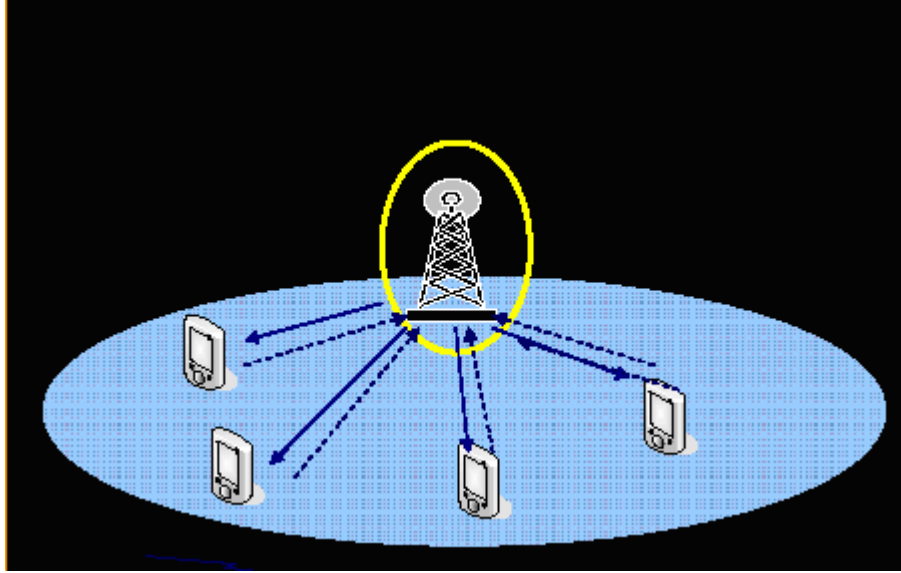
Mimari üzerine dayanan sınıflandırma için iki farklı çözüm önerilmiştir:

1. Merkezi spektrum paylaşımı: merkezi çözümlerde Şekil 6.17'de görüldüğü gibi merkezi bir eleman spektrum tahsisini kontrol eder.
2. Dağıtık spektrum paylaşımı: dağıtık çözümler esasen altyapı yapımının tercih edilir olmadığı durumlar için önerilmiştir. Buna göre, her kullanıcı spektrum tahsisinden sorumludur ve spektrum erişimi yerel politikalar üzerine dayanır.

Merkezi spektrum paylaşımı için Dinamik Spektrum Erişim Protokolü (DSAP, Dynamic Spectrum Access Protocol) isimli bir protokol önerilmiştir (Brik ve diğ., 2005). Bu protokolde, koordinasyonu sağlaması için merkezi bir elemana yetki verilmektedir ve bu şekilde verimli kaynak paylaşımı ve kullanımını sağlanmaktadır. DSAP bir parça, ağdaki ana bilgisayarlar IP adresi kiralanmasını sağlayan Dinamik İstemci Ayarlama Protokolüne (DHCP, Dynamic Host Configuration Protocol) benzetilebilir. DSAP da ev ya da ofis gibi sınırlı coğrafik alanlardaki kablosuz cihazlara spektrum kiralanmasını sağlar. Brik ve diğ. (2005)'deki çalışmasında lisanssız bantlar üzerinde durulmuştur ve DSAP'ın spektral kaynakların verimli bir şekilde nasıl paylaşılmasını sağladığından bahsedilmiştir.

Ağ hakkında detaylı bilgiye sahip merkezi bir spektrum erişim yöneticisine sahip olmak verimli bir ağ konfigürasyonunun gerçekleşmesi için önemlidir. Birçok kullanıcının bulunduğu dinamik ortamlarda bir kullanıcının çevresiyle ilgili tam ve güncel bilgiye sahip olması zordur. Bu türlü bir bilgi olmadan da optimum kablosuz konfigürasyonun olması imkansız olabilir. Bu yüzden DSAP'da merkezi eleman olarak çalışan DSAP sunucusu spektrum hakemi görevini görür. Sunucu,

kullanıcıları ile ilgili bilgileri ve kanal durumlarını radyo haritası olarak adlandırılan bir veri tabanında saklar. Devam eden kullanıcı haberleşmelerinde, DSAP sunucusu radyo haritasına ve yönetici-tanımlı ilkelere göre kullanıcılar arası optimum radyo spektrumu dağılımını belirler.



Şekil 6.17 Merkezi spektrum paylaşımı (Akyıldız, 2008)

DSAP kullanıcısı haberleşmeye başlamadan önce DSAP sunucusundan bir kanal isteminde bulunur. DSAP sunucusu kullanıcılardan gelen spektrum istemlerini kabul eder, o anki spektrum atamalarını, radyo haritasını ve veri tabanı ilkelerini dikkate alarak spektrum tahsisi cevaplarını döner.

Spektrum paylaşımı için önerilen ikinci sınıflandırma erişim teknikleri üzerinedir. Bunun için de iki farklı çözüm önerilmiştir:

1. Ortak spektrum paylaşımı: ortak çözümlerde bir kullanıcının diğer kullanıcılar üzerindeki etkisini dikkate alınır. Diğer bir deyişle, her bir kullanıcının girişim ölçümü diğer kullanıcılar arasında paylaşılır. Ayrıca spektrum paylaşımı algoritmaları da bu bilgiyi dikkate alırlar. Sahip oldukları bu avantajlar sayesinde, yapılan uygulamalarda ortak spektrum paylaşımı ortak olmayan spektrum paylaşımına göre daha iyi sonuçlar vermektedir. Bütün merkezi çözümler ortak kabul edilirken, aynı zamanda dağıtık ortak çözümler de vardır.

2. Ortak olmayan spektrum paylaşımı: ortak çözümlerin tersine ortak olmayan çözümler el altındaki kullanıcıyı dikkate alırlar. Ortak olmayan çözümler spektrum kullanımının azalması ile sonuçlanırken, diğer kullanıcılar arasındaki minimum haberleşme gereksinimleri pratik çözümler için bir değiş tokuşu (tradeoff) ortaya çıkarır.

Açık spektrum sistemlerindeki esas problem ikincil kullanıcılar arasındaki spektrum yönetimidir. Kullanımı artırmak birincil hedefken, girişimi azaltmak ve kullanıcılar arasında eşitlik sağlamak da iyi bir spektrum paylaşımı için önemlidir. Ortak spektrum paylaşım çözümleri, genel sistem yararı için kullanıcıların yerel performanslarında biraz özverili olmasını gerektirir. Ayrıca kullanıcılar arasında koordinasyon ve sık bilgi değişiminin de olması gereklidir.

Zeng ve Cao (2005)'deki çalışmasında, kullanıcıların yerel gözlemleri üzerine dayanarak bağımsız hareket ettikleri bir dağıtık ortak spektrum paylaşımı çözümü önermiştir. Cihaz merkezli spectrum yönetimi isimli şemada, beş farklı sistem kuralı ile spektrum tahsisi için haberleşme ek yükünü en aza indirmiştir. Sonuç olarak kullanıcılar, diğer kullanıcılarla işbirliği yapmak yerine yerel gözlemlerine dayanarak oluşturdukları kurallara göre kanalları tahsis etmektedir. Birden fazla kullanıcının aynı kanalı seçmesi durumunda, çarpışmaları gidermek için rastgele erişim teknikleri kullanılır. Bu şema ortak çözüm şemaları ile karşılaştırılınca daha kötü performans göstermiştir. Fakat bununla beraber, haberleşme ek yükünü oldukça azalttığı görülmüştür.

Son olarak belirlenen üçüncü sınıflandırma, erişim teknolojileri üzerinedir ve bunun için de iki çeşit çözüm önerilmiştir.

1. Overlay spektrum paylaşımı: overlay spektrum paylaşımında, lisanslı kullanıcı tarafından kullanılmayan spektrum bölümünü kullanılarak ağa erişilir. Sonuç olarak birincil sisteme karşı oluşan girişim azaltılmış olur.

2. Underlay spektrum paylaşımı: underlay spektrum paylaşımında hücresele ağlar için geliştirilmiş olan spektrum yayılma(spread) teknikleri kullanılır. Spektrum tahsis

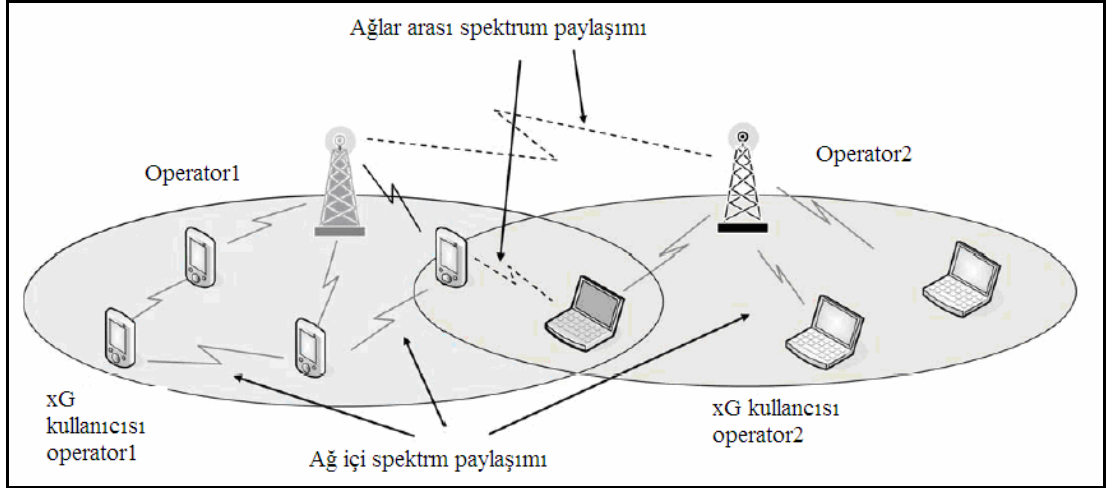
haritasi elde edilir edilmez, BR kullanıcısı iletme başlar öyle ki bu kullanıcının spektrumun belirli bir bölümündeki iletim gücü lisanslı kullanıcılar tarafından gürültü olarak kabul edilir. Bu teknik karmaşık spektrum yayılma tekniklerini gerektirir ve overlay teknikleri ile karşılaştırılınca daha fazla bant genişliği kullanılabilir.

Bu iki yaklaşım karşılaştırılacak olursa, kullanıcılar arasında girişim yüksek olduğu zaman overlay yaklaşımının underlay yaklaşımından daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır. Kullanıcılar arasında bir ortaklığın olmaması overlay yaklaşımını gerektirir. Karşılaştırmalı değerlendirmeler ortaklığın olmamasından kaynaklanan performans kaybının küçük olduğunu ve artan SNR değeri ile bunun ortadan kaybolduğunu göstermektedir(Etkin ve dig., 2005).

BR ağlarındaki spektrum erişimi üzerine yapılan teorik çalışmalar spektruma erişim protokolleri için önemli değiş tokuşlar ortaya çıkarmıştır. Ortak spektrum paylaşım teknikleri kurallar uygunluğunu artırdığı gibi spektrum kullanımını da artırır. Fakat, kullanıcılar arasındaki sık bilgi değişiminden dolayı ortak çalışmanın maliyeti düşünülürse bu avantaj o kadar da yüksek olmayabilir. Diğer taraftan, spektrum erişim tekniğinin, overlay ya da underlay olması, performansı etkilemektedir. Overlay teknikleri spektrumdaki boşluklara odaklanırken, underlay teknikleri için dinamik yayılma teknikleri gerekmektedir. Sistem karmaşıklığı ve performansı arasındaki değiş tokuşlar dikkate alınarak spektrum paylaşımı için karma teknikler belirlenebilir. Sonraki iki bölümde bu bölümde açıklanan üç sınıflandırmanın birleşimi olan spektrum paylaşım teknikleri anlatılmıştır.

6.7.4.2. Ağlar arası spektrum paylaşımı

BR ağları lisanssız kullanıcıları kullanarak lisanslı kullanıcılara fırsatçı erişim sağlamak üzere planlanmıştır. Bu ayarlamalar Şekil 6.18'de görüldüğü gibi üst üste binen alanlarda ve spektrumda geliştirilmiş olan çoklu sistemlerin çalışmasını mümkün kılar. Bu nedenle bu sistemler arasındaki spektrum paylaşımı BR ağlarında önemli bir araştırma konusudur. Şimdiye kadar, ağlar arasındaki spektrum paylaşımı statik frekans atama ile düzenlenmiştir.



Şekil 6.18 Ağlar arası ve ağ içi spektrum paylaşımı(Akyıldız ve diğ., 2006)

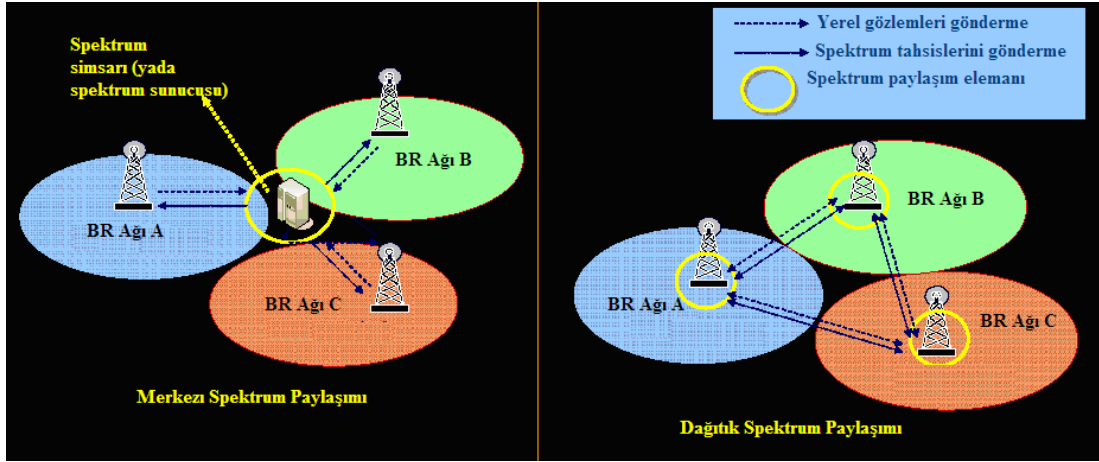
6.7.4.2.1. Ağlar arası merkezi spektrum paylaşımı

Ileri ve diğ. (2005)'deki çalışma, ağlar arası merkezi spektrum paylaşımının incelendiği bir örnektir. Kısaca bu çalışmada, birçok BR kullanıcıdan gelen spektrum istemlerini düzenleyecek merkezi bir spektrum sunucusu(SPS-Spektrum Policy Server) önerilmiştir. Bu şemada her operatör, kullanım süresi için ödeyeceği maliyeti bildirerek spektrum için teklifte bulunur. Daha sonra SPS bu tekliflerden en yüksek yararı sağlayacak şekilde spektrum tahsisini yapar. Operatörler, kullanıcılar için de bir öneri belirtirler ve buna göre kullanıcılar operatörlerini seçerler.

6.7.4.2.2. Ağlar arası dağıtık spektrum paylaşımı

Ağlar arası dağıtık spektrum paylaşımına örnek olarak Jing ve Raychaudhuri (2005) çalışması verilebilir. Bu çalışmada, IEEE 802.11b ve 802.16a ağlarında birlikte var olma konusu için Ortak Spektrum Koordinasyon Kanalı (CSCC-Common Spectrum Coordinated Channel) isimli bir protokol önerilmiştir. Bu protokol lisanssız frekans bantlarında radyo haberleşme cihazlarının verimli koordinasyonu için sunulmuştur. Önerilen bu protokol, IEEE 802.11x, 802.15.x, Bluetooth, Hiperlan gibi farklı radyo teknolojilerini kullanan kablosuz cihazların spektrum koordinasyonu için kullanılır. CSCC, spektrum koordinasyonu sağlamak için paylaşılan dar bantlı bir kontrol kanalıdır. Her cihaz CSCC kanalı üzerinden kontrol bilgisini değiş tokuş etmek için ekstra dar bantlı bir kanala sahiptir. Farklı kullanıcılar spektrumunu kullanacağı zaman,

bütün kullanıcılar spektrum kullanım bilgilerini yayarlar. Bu CSCC duyuruları ile yeni kullanıcılar girişime neden olmayacak şekilde erişilebilir kanalları seçebilirler. CSCC yayımları talep üzerine gönderilir, yani spektrum isteminde bulunan cihazlar ya da iletim yapan cihazlar CSCC mesajları ile spektrum bilgilerini gönderirler. Diğer kullanıcılar sessiz kalırlar ve bu mesajları dinlerler. Ağlar arası spektrum paylaşım çözümleri spektrum tahsisinin belirlenmesi için belirli operatör ilkelerini de kapsayarak spektrum paylaşımı çözümüne geniş bir bakış kazandırmıştır.



Şekil 6.19 Ağlar arası merkezi ve dağıtık spektrum paylaşımı(Akyıldız, 2008)

6.7.4.3. Ağ içi spektrum paylaşımı

Spektrum paylaşımı hakkındaki çalışmalar daha çok ağ içi spektrum paylaşımı üzerine odaklanmıştır. Ağ içi spektrum paylaşımında BR kullanıcıları birincil kullanıcılarla girişime girmeden spektruma erişmeye çalışırlar. Bu bölümde bu konuda yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir.

6.7.4.3.1. Ağ içi ortak spektrum paylaşımı

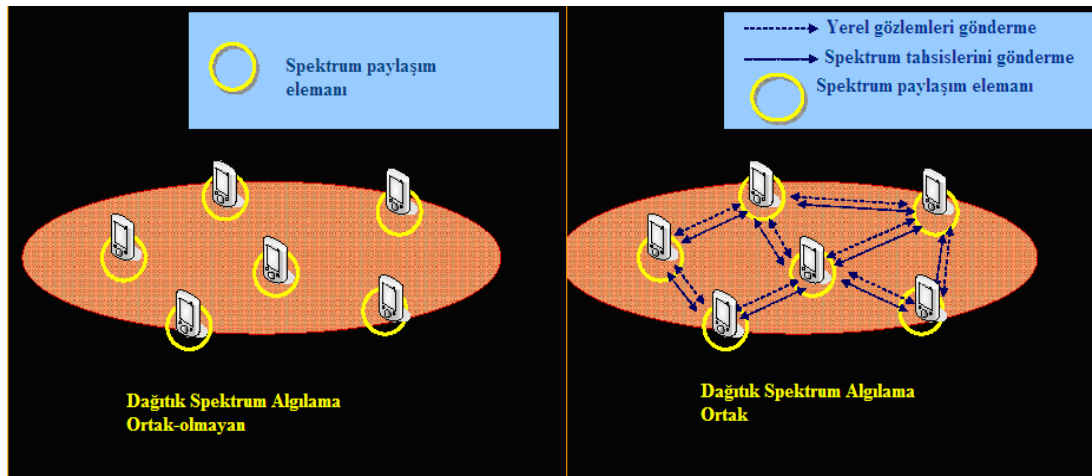
Ağ içi ortak spektrum paylaşımı hem merkezi hem de dağıtık olabilir. Merkezi çözüm için Bölüm 6.7.4.1’de bahsedilen DSAP protokolü çözümü bir örnek olabilir. Huang ve dig. (2005) çalışması ise dağıtık ortak spektrum paylaşımı çözümü önermiştir. Bu çalışmada düşünülen spektrum paylaşım senaryosunda her bir kablosuz verici erişilebilir kanallar arasından seçim yapabilir. Her verici hangi kanalı

kullanacağını ve ne kadar güç(power) ileteceğini belirler. Bu karar sadece her banttaki SINR (Signal to Interference Plus Noise Ratio) değerine bağlı değildir, aynı zamanda diğer kullanıcıların neden olduğu girişime de bağlıdır. Bu nedenle, bu şemada kullanıcılar birbirlerine girişim ücretlerini bildirirler. Girişim ücreti kavramı ise, girişimdeki marjinal artış yüzünden faydadaki marjinal kayıp anlamına gelmektedir. Kullanıcılar bu bilgiyi kullanarak ilk olarak bir kanal tahsis edebilir daha sonra iletim gücünü belirler. Kullanıcılar bu ücretleri ve güçleri asenkron olarak güncelledikleri için bu algortimaya Asenkron Dağıtık Ücretlendirme (ADP, Asynchronous Distributed Pricing) denilmiştir. Kullanıcılar ayrı kanalları kullandıkları gibi birden fazla kullanıcı iletim güçlerini ayarlayarak aynı kanalı kullanabilirler.

ADP algoritması, kullanıcıların komşularının girişim seviyesini bilmeden en uygun kanalı seçtiği bencil algoritmalarla karşılaştırılınca kullanıcılarına daha yüksek hızlar sağladığı görülmüştür. Ayrıca, önerilen bu algoritma girişimin fazla olduğu durumlarda underlay tekniklerini daha iyi gerçekleştirir.

6.7.4.3.2. Ağ içi ortak olmayan spektrum paylaşımı

Ağ içi merkezi spektrum paylaşımları ortak çözümler olarak da kabul edilebilir. Ortak olmayan çözümler ise sadece dağıtık olabilir. Zeng ve Cao (2005)'deki çalışmada ortak olmayan spektrum paylaşımına verilmiş bir örnek bulunmaktadır.



Şekil 6.20 Ağ içi ortak ve ortak olmayan spektrum paylaşımları (Akyıldız, 2008)

6.8. Bilişsel Radyo Üst Katman Konuları

Spektrum algılama, yönetimi, taşınabilirliği ve paylaşımı gibi fiziksel ve MAC katmanını ilgilendiren konulardan başka yönlendirme, akış kontrolü ve tıkanma kontrolü gibi üst katman konuları da dinamik spektrum ağlarının gerçekleştirilmesi için önemlidir. Bu bölümde bu konuda karşılaşılan zorluklardan ve çözümlerden bahsedilmiştir. Bu konu için Hester ve Ridley (2008) ve Akyıldız ve diğ. (2006) çalışmaları yol gösterici olmuştur.

6.8.1. Ağ katmanı

BR ağları geleneksel kendini örgütleyen kablosuz ad hoc ağlara benzemez. Tek bir frekans bandında çalışmak üzere tasarlanmamışlardır. Haberleşme için çeşitli spektrum boşluklarından ve beyaz alanlardan (white spaces) yararlanabilirler. Ağ katmanının temel işlevleri topolojiyi kurmak, adreslemek ve yönlendirmektir.

6.8.1.1. Topolojinin kurulması

Topolojinin kurulması spektrum algılama, komşu keşfi ve topoloji yönetimi konularını kapsar. BR ağının kurulmasındaki ilk adım bilişsel yetenek olarak da adlandırılan spektrum doluluk oranının haritalanmasıdır. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi bu yetenek radyonun çevresi ile ilgili bilgiyi algılamasıdır. Spektrum algılama ile boşluklar bulunduktan sonra nitelendirmenin yapıldığı spektrum analizi işlemi gerçekleştirilir. Spektrum analizi sırasında, çalışma frekansı, bant genişliği, birincil kullanıcı etkinliği gibi spektrum bant bilgileri ile boşluklar tanımlanır. Ayrıca daha önceden bahsedildiği üzere girişim seviyesi, yol kaybı, kablosuz bağlantı hataları, gecikmeleri ve tutma süresi gibi parametreler de spektrum bölümünü nitelendirme de kullanılır.

BR, paket iletimi için kullanacağı spektrum boşluğunu seçmeden önce bant genişliği, veri hızı ve iletim modu gibi üst katman gereksinimlerini de elde etmelidir. Sonuç olarak kullanıcı gereksinimlerinin ve spektrum nitelendirmesinin birleşimi uygun spektrum bandının seçilmesi ile sonuçlanır. Bu işlem spektrum kararı olarak bilinir.

Genellikle radyo düğümleri bir diğeri kanal tarama yoluyla ya da bir kontrol kanalı üzerinden dinleyerek keşfeder. Bu kontrol kanalı merkezi eleman tarafından üretilmiş evrensel bir kanal ya da cihazlar tarafından yaratılmış yerel bir kanal olabilir.

Henüz ağ ile ilişkilendirilmemiş bir radyo düğümü var olan ağ radyoları ile anlaşır. Genelde, ağ radyolarından gönderilen işaret ya da pilot mesajlarını dinler. Bu işaretler sadece fiziksel katman bilgisiyle ilgili değildir, aynı zamanda çalışma frekansı, iletim gücü, modülasyon, veri hızı gibi ağ durum bilgileriyle de ilgilidir.

Herhangi bir ağın bulunmadığı durumda ise, bilişsel radyo bir küme oluşturarak kendi ağını kurmaya başlar. Bir yada daha çok BR'nin bulunduğu bir küme bütün bir ağın temel birimidir. Komşu düğüm gruplarının paylaştığı ortak kanallar ile oluşturulmuş bir alt-ağdır ve küme lideri olarak seçilen bir eleman tarafından koordine edilir. Bu durumda kümeyi başlatan BR düğümü küme lideri olur.

BR küme oluşturma algoritması, bir parça var olan küme oluşturma algoritmalarına benzer, fakat tipik veri ve muhtemel kontrol kanallarında daha fazla kanal kullanır. Bu bilişsel algoritmalar fiziksel topoloji değişikliklerine uyum sağlarlar ve ille de bütün topoloji bilgisine gereksinim duymazlar. Kendi kümesini oluşturan düğüm aynı kanalı paylaşan komşu düğümleri kümesine katılmaları için davet eder.

Radyoların küme oluşturmak için birleşmeleri gibi, bütün bir radyo ağı da bu kümelerin birleşmesiyle oluşur. Çoğu kez, bu kümelerin birleşmesi ile oluşan radyo ağında, iki ayrı kümeye sınır koyan ve ağ geçiti ya da köprüsü olarak davranan BR'lere gereksinim vardır. Bu köprülemenin oluşmasının nedeni birçok kümenin, üyelerinin erişebildiği fakat diğer sınır küme elemanlarının erişemediği farklı frekanslarda çalışabilecek olmasıdır. Üst üste binen BR'ler her iki kümedeki spektruma da erişebilirler ve bu nedenle kümeleri birleştirmek için bir aracı gibi davranabilirler.

Ağ katmanındaki bir diğer işlev topoloji yönetimidir. Ağdaki kümelerin topolojileri durağan değildir, bu yüzden global ağ zamanla yeniden yapılandırılmalıdır. Topolojideki bu değişkenlik birçok farklı nedenden olabilir. BR ağlarında

kullanıcılar için uygun olan kanallar radyo ortamına göre değişmektedir. Kullanıcılar, çevresinde birincil kullanıcının belirmesiyle bulunduğu kümeyi terk edebilir ve kullandıkları kanalı boşaltmak zorunda kalabilirler.

Bölüm 6'nın giriş kısmında anlatılan çapraz-katman spektrum işlevleri, fiziksel ve mac katman bilgisinin eş zamanlı olarak ağ katmanı ile değiştirilmesine izin verir. Böylece ağ katmanı, ağın yeniden yapılandırılması için OSI(Open Systems Interconnection) yığının ayrı katmanlarından gelen kaynakları sıralayabilir. Bu bilgi ile çalışma parametrelerini anında iletim için ayarlayabilir.

Yeniden yapılandırılabilirlik değişiklikleri, çapraz-katman bağlantıları ile yerine koyulur, böylece gerekli olan değişiklik donanım bileşenlerinde herhangi bir değişim neden olmadan yapılmış olur. Örneğin, ağ katmanı, gecikmeye duyarlı bir uygulama için veri hızının hata oranından daha kritik olduğuna karar verebilir. Bu bilgi spektrum yönetim işlevleri ile fiziksel katmana taşınabilir böylece daha yüksek spektral verimliliği sağlayacak olan modülasyon şeması seçilebilir. Ayrıca, BR ağları sürekli değişen raydo ortamına adapte olabilmek için öğrenme yetenekleri ile deneyimlerinden faydalanarak altyapılarını yeniden kurabileceklerdir.

Ağ protokolleri için önemli olan diğer bir konu da spektrum taşınabilirliğidir. BR işlevlerinden birisi olarak Bölüm 6.7.3'de bahsedilmiş olan spektrum taşınabilirliği, BR kullanıcısının birincil kullanıcının belirlediği spektrumunu boşaltması gerektiği zaman oluşur. Ağ protokollerinin de bir kanaldaki bir operasyon modundan diğer bir kanaldaki operasyon moduna geçmeleri anlamına gelen spektrum geçişlere karşı dayanıklı olmaları gerekir.

6.8.1.2. Adresleme

Ağ katmanı seviyesi adreslemeler sabit ya da dinamik adreslemeyi kullanır. Sabit adres methodları bilişsel radyonun fiziksel MAC adreslerinin uzantılarını ya da merkezi kontrol elemanı tarafından yapılan hard-coded adres atamalarını içerir. Dinamik adres metodları ise DHCP gibi uygun adresleme servislerini kullanarak kullanıcı tanımını ataması yapması için küme liderine güvenir.

6.8.1.3. Yönlendirme

BR ağları, çoklu-sekme (multi-hop) gereksinimleri ile alışılmamış yönlendirme algoritmalarına ihtiyaç duyarlar. Genel olarak ad-hoc ağlarda düğümler, paketleri iletmek için düğümler arası çoklu-sekme yönlendirmesini kullanarak birbirlerinin yerine paketleri yönlendirirler. BR ağlarındaki uygun spektrum bantları, her bir sekme için farklı olduğu için BR, paketleri bir kanal üzerindeki bir radyo çiftinden başka bir kanal üzerindeki diğer bir çifte iletir. BR'ler arası yönlendirme belirli kaynaklardan gelen kontrol bilgisinden etkilenirler.

Düğümler üzerlerinde çalışan uygulamalardan trafik uygulama bilgisini, fiziksel katmandan bağlantı kapasite bilgisini, MAC katmanından tıkanma durumu bilgisini alabilirler. Bütün bu bilgilere göre düğümler paketleri iletmek için en uygun yolu belirlerler. Yönlendirme protokollerinin, çoklu-sekme yollarını ayırt etmeleri gerekir. BR ağlarında yönlendirme kararı, topoloji üzerine, MAC tıkanması ve bağlantı kalitesi/güvenilirliğine dayanarak verilir.

6.8.2. Taşıma katmanı

Taşıma katmanı akış ve tıkanma kontrolünden sorumludur. Taşıma katmanı daha çok spektrum taşınabilirliğinden ve MAC performansından etkilenir. Var olan taşıma protokollerinden TCP'nin performansı paket kaybı olasılığına ve paket gidiş dönüş zamanına bağlıdır. Kablosuz bağlantı hataları ve paket kaybı olasılığı sadece erişim teknolojisine bağlı değildir aynı zamanda frekansa, girişim seviyesine ve bant genişliğine de bağlıdır. Bu yüzden, var olan kablosuz erişim teknolojileri için tasarlanmış TCP ve UDP (User Datagram Protocol) protokolleri dinamik spektrum atamasına dayanan BR ağlarında kullanılamaz.

Diğer taraftan, TCP bağlantısındaki paket gidiş dönüş zamanı dolaylı biçimde çalışma frekansına bağlıdır. Örneğin, eğer paket hata oranı belirli bir frekans bandında daha yüksekse, başarılı bir paket iletimi için daha çok bağlantı katmanı yeniden iletimi gerekir. Ayrıca BR ağlarında, kablosuz kanal erişimi gecikmesi çalışma frekansına, girişim seviyesine ve ortam erişim kontrol protokolüne bağlıdır.

Bu faktörler TCP bağlantısının paket gidiş dönüş süresini etkiler. Bu yüzden çalışma frekansına bağlı olarak, TCP protokolünün gözlemlediği paket gidiş dönüş süresi ve paket kaybı olasılığı değişecektir. Bu nedenle, taşıma protokolleri bu değişimlere uyum sağlayacak şekilde tasarlanmaları gerekir.

BR'nin çalışma frekansı spektrum geçişinden dolayı zamanla değişebilir. BR terminali çalışma frekansını değiştirdiği zaman yeni frekans kullanıma hazır oluncaya kadar belirli bir gecikme yaşanır. Spektrum geçiş gecikmesi paket gidiş dönüş zamanında da artışa sebep olur, bu da yeniden iletimlerin zaman aşımına uğramasına yol açar.

Geleneksel taşıma protokolleri bu paket gidiş dönüş süresini paket kaybı olarak algılayabilir ve tıkanmayı önleyen mekanizmalarını çalıştırabilir. Spektrum taşınabilirliğinin olumsuz etkilerini gidermek için taşıma protokollerinin spektrum geçişlerinden fazla etkilenmeyecekleri şekilde tasarlanmaları gerekir.

6.9. Bilişsel Radyo Çapraz Katman Tasarımı

Yukarıda bahsedilen haberleşme zorlukları, BR ağlarında spektrumdan haberdar olacak şekilde tasarlanmış yeni haberleşme protokollerini gerektirecektir. Daha önceden de bahsedildiği gibi BR ağlarındaki ağ performansı direk olarak kullanımda olan spektrum bandının özelliklerine dayanmaktadır. Bu direk ilişki BR ağında çapraz-katman tasarımını gerektirir. Bu tasarım Akyıldız ve diğ. (2006), Jing ve Raychaudhuri(2005) ve Hester ve Ridley (2008) çalışmalarından faydalanarak incelenmiştir.

6.9.1. Spektrum yönetiminde çapraz katman zorlukları

BR ağlarında haberleşme protokollerinin kablosuz kanal parametrelerine uyum sağlaması gerekir. Ayrıca, her bir protokolün davranışı bir diğerini etkiler. Örneğin, BR ağlarında kullanılan farklı ortam erişim teknikleri direkt olarak taşıma protokollerinin paket gidiş dönüş süresini etkiler. Benzer şekilde, spektrum taşınabilirliğinden kaynaklanan bağlantı bozukluklarından dolayı yeniden

yönlendirme yapılırsa, paket gidiş dönüş süresi ve hata olasılığı da buna göre değişir. Hata olasılığındaki değişim aynı zamanda ortam erişim protokollerinin performansını da etkiler. Sonuç olarak bütün bu değişimler kullanıcı uygulamalarının kalitesini etkiler. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi spektrum yönetimi (spektrum management) işlevleri haberleşme protokolleri ile işbirliği yapar. Spektrum yönetimi uygun spektrum bandına karar vermek için servis kalitesi gereksinimi, taşıma, yönlendirme, zamanlama ve algılama ile ilgili bilgilere ihtiyaç duyar. Haberleşme yığınındaki işlevsellikler arasındaki bu bağıllık ve bunların fiziksel katman ile olan yakın bağlantısı çapraz katman spektrum yönetimini gerektirir.

6.9.2. Spektrum taşınabilirliğinde çapraz katman zorlukları

Spektrum taşınabilirliği gecikme ile sonuçlanır, bu da haberleşme protokollerinin performansını etkiler. Bu yüzden spektrum taşınabilirliğindeki esas zorluk spektrum algılama için gecikmeyi azaltmaktır. Spektrum geçişi gecikmesinin taşıma protokollerinin performansı üzerinde olumsuz etkileri vardır. Ayrıca spektrum geçişi sırasında yol kaybı, girişim, bağlantı hatası ve bağlantı katmanı gecikmesi gibi kanal parametreleri spektrumun dinamik kullanımını etkilenir. Diğer taraftan fiziksel ve mac kanalı parametrelerindeki değişimler spektrum geçişini başlatabilir. Ayrıca kullanıcı uygulaması daha iyi bir spektrum bandı bulmak için spektrum geçişine ihtiyaç duyabilir. Şekil 6.2’de görüldüğü gibi spektrum taşınabilirliği işlevleri spektrum yönetimi ve spektrum algılama işlevleri ile işbirliği içindedir. Spektrum geçişi gecikmesinin etkisini tahmin etmek için bağlantı katmanı ve algılama gecikmeleri hakkında bilgiye gerek duyulur. Taşıma ve uygulama katmanının da ani kalite bozulmasını azaltabilmek için bu gecikmelerden haberdar olması gerekir. Bu nedenlerden dolayı spektrum geçişi bütün haberleşme katmanlarındaki çalışmalar ile yakında ilgilidir.

6.9.3. Spektrum paylaşımında çapraz-katman zorlukları

BR kullanıcılarının spektrum paylaşım performansları direkt olarak spektrum algılama kapasitelerine dayanır. Spektrum algılama öncelikle bir fiziksel katman konusudur. Fakat, ortak algılama durumunda, BR kullanıcıları algılama bilgisinin

değiş tokuşu için ad hoc bağlantıyı kullanmalıdırlar. Bu da spektrum paylaşımı ve algılaması arasında çapraz-katman tasarımını gerektirir. Haberleşme protokollerinin performansının spektrum algılaması üzerine dayandığı açıktır. Bu konuda iki temel zorluk bulunmaktadır.

Birincisi girişimi azaltmaktır. Alıcıda girişim olduğu zaman spektrum tarama sadece vericiler hakkında bilgi sağlayabilir(Jing ve Raychaudhuri, 2005). Bu yüzden, hem kullanıcılarda hem de alıcıda oluşan girişimi hesaba katmak için vericileri gerektiren ortak tekniklere ihtiyaç duyulur.

Spektrum algılama konusundaki diğer bir zorluk ise spektrumun tümünün her zaman algılanamamasıdır. Özellikle, BR ağları için öngörülen çok büyük mesafeli spektrumdan dolayı tüm spektrumu algılamak için ciddi bir zamana ihtiyaç vardır. Spektrum algılama enerji harcadığı için bu işlemin dikkatli şekilde planlanması gerekir. Sonuç olarak kullanıcının spektrum hakkında her zaman doğru bilgiye sahip olmadığı düşünülürse bu kullanışlı olmayabilir. Ayrıca şu anki radyo teknikleri, eğer bir cihaz üzerinde tek bir radyo yerleştirilmişse sürekli spektrum algılamasına engel olurlar. Haberleşme sırasında, gerekli kanala anahtarlamak ve burada haberleşmeyi sağlamak için spektrum algılama durdurulmalıdır. Bu nedenle, bu işlem fiziksel katman ve üst katmanlar arasında çapraz-katman ilişkisini gerektirir.

6.9.4. Üst katmanlarda çapraz-katman zorlukları

Çoklu-sekme haberleşmeleriyle BR ağlarındaki spektrum bantları herbir sekme için farklı olduğundan dolayı spektrum algılama bilgisi topoloji düzenlemesi için gereklidir. Ayrıca, BR ağlarında yönlendirme için yapılacak temel tasarım seçimi yönlendirme ve spektrum kararının ortak çalışması yönünde olacaktır. Eğer bir BR kullanıcılarından diğerine giden optimum yol birincil kullanıcılarda girişime neden oluyorsa, uçtan uca gecikme ya da paket kayıpları bundan etkilenirler. Bu bozulmayı azaltmak için, ara düğümlerde çoklu spektrum arayüzleri seçilebilir. Bu yüzden uçtan uca yol, farklı spektrum bantlarından geçen çoklu sekmelerden oluşur. Son olarak, yeniden yönlendirmenin çapraz katman yaklaşımı ile gerçekleştirilmesi gerekir. Eğer spektrum taşınabilirliğinden dolayı bağlantı hatası meydana gelirse, yönlendirme

algoritmasının bu hatayı düğüm hatasından ayırt etmesi gerekir. Ayrıca, ara BR kullanıcıları spektrum algılama ile elde edilen spektrum bilgisinden yararlanarak yeniden yönlendirmeyi gerçekleştirebilirler.

BR ağlarında dinamik frekans işleyişi yüzünden, paket gidiş dönüş süresi ve paket kayıp oranları değişir, bu da paket iletim gecikmelerinde değişmelere yol açar. Ayrıca ortam erişim şemaları da erişim gecikmesine uğrarlar. Bütün bu faktörler, bir bağlantının gidiş dönüş süresini etkiler ve bu da taşıma protokollerinin performansını etkiler. Diğer taraftan spektrum geçişiyle ilgili olan gecikme, paket iletiminin anlık gidiş dönüş süresini artırır. Sonuç olarak, BR ağları için taşıma protokolleri, diğer haberleşme katmanları ile ortak çalışmayı öne süren spektrumdan haberdar olma yaklaşımına göre tasarlanmalıdır.

7. SPEKTRUM PAYLAŞIM UYGULAMASI

Son zamanlarda, BR ortamındaki fırsatçı spektrum erişimini modellemek için oyun teorisinden yararlanılmaktadır. Oyun teorisi, belirli bir hedefe yönelik karar verme gücüne sahip birimlerden (oyunculardan) oluşan sistemlerde, oyuncuların azami kazanç elde etme çabası içindeyken karar verme durumlarını inceleyen, uygulamalı matematikte ve ekonomide kullanılan bir yöntemdir. Daha öncesinde bazı gelişmeler olmuşsa da, oyun kuramı, 1944 yılında çıkan John von Neumann ve Oskar Morgenstern tarafından yazılmış olan Theory of Games and Economic Behavior (Oyunların ve Ekonomik Davranışın Kuramı) adlı kitapla başlamıştır. 1950'li yıllarda ünlü matematikçi John Nash'ın 21 yaşında hazırladığı doktora tezi, John von Neumann'ın icadı olan oyun teorisindeki sorunları çözüp kullanılır hale getirdi. Oyun kuramının geleneksel uygulamaları bu oyunlarda denge bulmaya çalışır. Bu fikri gerçekleştirmek üzere birçok denge kavramları geliştirilmiştir. Bunlardan en ünlüsü Nash dengesidir. Oyun teorisinde, Nash dengesi iki ya da daha fazla oyuncunun oluşturduğu bir oyunun çözüm kavramıdır. Her oyuncunun diğer oyuncuların denge stratejisini bildiği varsayılıarak oyunculardan hiçbirinin kendi stratejisini değiştirerek kazanç sağlayamadığı duruma Nash dengesi ismi verilmektedir. Diğer bir deyişle, Nash dengesinde olmak için her oyuncunun şu soruya olumsuz cevap vermesi gerekir: Oyundaki diğer oyuncuların stratejilerini bilerek ve bu stratejilerin sabit olduğunu düşünerek, kendi stratejimi değiştirirsem bir kazanç sağlayabilirmiyim?

Aslında BR ağlarıyla ilgili iki ayrı kanal tahsisi problemi vardır. Birincisi, ikincil kullanıcıların uygun spektrum boşluklarını nasıl tespit edeceğidir. İkincisi, ikincil kullanıcıların uygun kanalları nasıl paylaşacağıdır. Spektrum paylaşımı, esas olarak bir yük dengeleme ve kaynak tahsisi problemidir ve eğer bir merkezi ağ birimi yoksa bu dengeleme işi oldukça zordur. Fischer ve diğ. (2007) çalışması bu kanal problemi için bir yük dengeleme çözümü ortaya koymuştur. BR kullanıcılarının kullanacağı kanallar için bir yük dengelemesi sunan bu çalışma, iki tane algoritma geliştirmiştir. Tezin bu bölümünde ilk olarak oyun teorisini temel alan bu algoritmaları

gerçekleştirmek için düşünülen sistem ve hesaplama modelinden bahsedilmiştir. Daha sonra yük dengeleme için sunulan bu iki farklı algoritma sözde kodları ile açıklanmıştır. Son olarak, C++ dili kullanılarak gerçekleştirilen bu algoritmaların performansları değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

7.1. Sistem Modeli

Sistem modelini basit ve anlaşılır bir şekilde ifade etmek için, n tane topun (BR kapasitesine sahip kullanıcılar) ve m tane kovanın (kanallar ya da frekanslar) olduğu düşünülür. Ayrıca toplarında aynı büyüklükte olduğu varsayılmıştır, yani bütün kullanıcılar sisteme eşit trafik yükü uygularlar ve aynı radyo teknolojisini kullanırlar (WRAN gibi).

Her radyo bir frekans ile atanır ve i ($i \in m$) kovasındaki topların sayısı yani i kanalındaki BR kullanıcı sayısı olarak düşünülen n_i i kanalının yükünü ifade eder. BR kullanıcıların farklı olmadığı kabul edildiği için sistem bütün olarak $n = (n_i) i \in [m]$ durum vektörü ile tanımlanabilir.

Her kova kendisine özgün kapasite sınırına sahiptir ve bu kapasite δ_i şeklinde ifade edilmiştir. Her top maksimum sistem performansını sağlamak için bulunduğu kovada kalacağına ya da kovasını değiştireceğinin kararını vermelidir. Ayrıca her top Poissonian yaşama süresine sahiptir. Ayrıca, sisteme yeni toplar (kullanıcılar) girebilir ve bir kanal elde etmeye çalışırlar. Bu da şu anlama gelir, herhangi bir i kanalına ait n_i (kullanıcı sayısı) zamanla değişebilir.

Her bir $i \in [m]$ bir maliyet(cost) fonksiyonu ile ilişkilendirilir ve bu maliyet fonksiyonu c_i olarak ifade edilir. $C_i(n_i)$ değeri i kovasını seçen bütün topların maruz kaldığı maliyeti belirtir.

Maliyet fonksiyonu için daha sonra açıklanacak olan kullanıcıların minimize etme amacının olduğu (gecikme gibi) faydalardan herhangi birisi seçilebilir. Eğer seçilecek fayda, kullanıcının maksimize etme amacının olduğu faydalardan biriye sistem tam tersi şekilde modellenir. $C_i(n_i)$ fonksiyonunun maksimum değeri 1,

minimum değeri 0 olarak kabul edilmiştir. (7.1) denklemleri ile belirtilen bu değer bütün kullanıcıların desteklediği ortalama maliyeti belirtir. Bu modelin bir oyun kuramı modeli olması nedeniyle elde edilmesi gereken sonuçta bir dengeye erişilmesi gerekir.

$$C(n) = \sum_{i \in [m]} (n_i / n) * c_i(n_i) \quad (7.1)$$

Bu modeldeki dengeli durumlar nelerdir? Burada topların bulunduğu kovadan bir başka kovaya geçme dürtüsü vardır. Eğer kullanıcılar böyle bir dürtüye sahip değilse n durumunun dengeli olduğu düşünülebilir. Bu kavram oyun kuramında da belirtilen Nash dengesi ile formüle edilebilir.

Bu oyun modelinde ifade edilen Nash dengesi şu şekilde tanımlanabilir: bütün makineler için i ve j, $n_i > 0$ ile birlikte $c_i(n_i) < c_i(n_j + 1)$ 'i sağlayan bir n durumu Nash dengesindedir. Daha açık bir şekilde anlatmak gerekirse; bir BR kullanıcısının o an için seçtiği kanal diğer kullanıcıların seçtikleri kanallar karşılaştırıldığında kullanılabilir (maliyet anlamında) en iyi kanal ise ve bu durum tüm BR kullanıcıları için sağlanıyorsa, bu sistem Nash dengesine erişmiştir.

Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında amaç Nash dengesine ulaşan topların (BR kullanıcılarının) dağıtık algoritmalarının tasarlanmasıdır. Nash dengesi tüm sistemin performansını optimize etmek zorunda değildir.

Kovalardaki topların faydalı işlevlerine geçmeden önce bu modeldeki varsayımlar ele alınacaktır. Sistemde kanal içi girişimin olmadığı varsayılmıştır. Bu da üst üste binen kanalların etkisinin yok sayıldığı anlamına gelir. Ayrıca topların, belirli bir kovadaki n_i sayıdaki topu örnekleme kapasitesi vardır.

Genel olarak aynı frekans kullanan kaç radyonun olduğunu bilmek zordur. Yayılma (radiation) gücü ölçülebilir ve böylece n_i tahmin edilebilir. Bu sadece zayıf bir varsayımdır, bu çalışmada uygulanan dağıtık kanal tahsis algoritmaları için kesin bir bilginin gerekli olmadığı gösterilmiştir. Burada kurulan oyunu oluşturmadaki amaç olarak kullanılabilir faydalar aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Fayda 1: Girişimi azaltmak: amaç her bir kovadaki topların sayısını azaltmaktır. Daha kompleks şekilde ele alınırsa, kanal içi girişim düşünöldüğü zaman n_i sayısının yanında $(i - 1)$ ve $(i + 1)$ numaralı kovalardaki top sayısı da azaltılmalıdır.

Fayda 2: Veri hızını (throughput) artırmak: veri hızını artırmak girişimi azaltmakla ilgilidir. Tahmini olarak, daha aza top hem girişimi azaltacak hem de veri hızını artıracaktır.

Fayda 3: Gecikmeyi azaltmak: daha çok sesli aramalar gibi zamana duyarlı uygulamalar için seçebilecek doğru kriterdir.

7.2. Hesaplama Modeli

Bu bölümde Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında yer alan merkezi olmayan yaklaşımla yük uyarlamalı kanal tahsisi algoritmaları tanıtılacaktır.

Yerel kontrol: algoritmalar yerel olarak kablosuz cihazlar tarafından gerçekleştirilecektir. Bunlar baz istasyonu ya da seçilen bir düğüm tarafından sağlanan merkezi bir koordinasyona bel bağlamazlar. Özellikle diğeri düğümlerin aynı algoritmayı gerçekleştirdiği varsayımına da bel bağlamazlar.

Yerel bilgi: algoritmalar sadece toplayabildikleri ya da otomatik olarak algılayabildikleri bilgiye bel bağlarlar.

Basitlik: ayrı ayrı düğümlerde gerçekleşen hesaplama basit ve koşulsuzdur. Bu da düğümlerin, yeniden başlatmaya (reinitialization) gerek olmadan ağı her hangi bir zamanda katılmalarını ya da ağdan ayrılmalarını sağlar.

Verimlilik: enerji tüketimi minimuma indirilmelidir.

Bencillik: kullanıcılar sistemin genel faydasından çok kendi faydalarını artırma çabası içinde olmalıdır.

Genel olarak, kanal i 'i kullanan kullanıcı kolaylıkla kendi maliyetini $c_i(n_i)$ (veri hızını ölçerek) belirleyebilmelidir. Daha önceden belirtildiği gibi BR'ler spektrumu algılayarak her kanaldaki kullanıcı sayısını tahmin edebilirler. Bu noktada algoritmalar, n_i yani kullanıcı sayısını dönen YÜK_HESAPLA(i) fonksiyonunu kullanırlar.

Bir BR kullanıcısının bulunduğu kanaldan başka bir kanala geçip geçmeyeceğine karar vermek için aday hedef kanalın faydasının bilinmesi gerekecektir. Bu faydayı hesaplamak için deneme maksatlı olarak hedef kanala geçilebilir, fakat masarflı bir yoldur. Bunun için hedef kanala geçmek yerine, bu kanalı kullanan kullanıcıların aldığı faydayı tahmin etmek için hedef kanal üzerinde paket başlıklarını çözebilir. Bunu da algoritmalarındaki $c_i(n_i)$ değerini dönecek olan MALİYET_HESAPLA(i) fonksiyonu yerine getirecektir.

7.3. Karşılaştır ve Dengele Spektrum Paylaşım Algoritması

Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında geliştirilen bu algoritma dağıtık spektrum paylaşımını temel alır.

Yük dengeleme temel alınarak geliştirilen bu algoritmada MALİYET_HESAPLA(i) fonksiyonu her hangi bir kanala uygulanabilir. i kanalını kullanan bir BR kullanıcısı düşünölsün.

Belirli aralıklarla bu kullanıcı iki adımı gerçekleştirir. Birincisi YÜK_HESAPLA(i) ile n vektörünü belirler ve sonra rastgele başka bir kullanıcıyı örnekler. Burada örnekleme derken karşılaştırmak için sistemdeki başka bir kanalın seçilmesi kast edilmiştir.

BR kullanıcı karşılaştırma için bir j kanalı seçtikten sonra bu j kanalının maliyeti ile kendi bulunduğu i kanalının maliyetini karşılaştırır. Ve eğer bu kanalın maliyeti kendi bulunduğu kanalın maliyetinden daha düşükse yani $c_i < c_j$ sağlanıyor ise, BR kullanıcısı ($c_i - c_j$) olasılığı ile bu kanala geçer. 'Karşılaştır ve Dengele' adı verilen bu algoritmanın sözde kodu Tablo 7.1'deki gibidir.

Tablo 7.1 Karşılaştır ve Dengele Algoritmasının Sözde Kodu

```
c ← MALİYET_HESAPLA(kanal)
  for (bütün kanallar için i ∈ [m]) do
    ni ← YÜK_HESAPLA(i)
  end for
n ← ∑i ∈ [m] ni
rastgele bir j kanalı seç P[j] = nj / n
c' ← MALİYET_HESAPLA(j)
if c' < c then
  c – c' olasılığı ile : kanal ← j
end if
```

Bu algoritma sisteme giren her BR kullanıcısı tarafından çalıştırılacaktır. Bu algoritma ilk bakışta beklenenin aksine görünebilir. Bir kanalın karşılaştırma için seçilme olasılığı, bu kanalı o anda ne kadar çok kullanıcı kullanıyorsa o kadar çöktür. Bu durum asıl amaç olan yük dengeleme ile çelişiyor gibi görülebilir. Fakat, bu yaklaşım için teorik bazı temel sebepler vardır.

Sezgisel olarak, diğer kanalların karşılaştırma için seçilmesinin nedeni şu olabilir, bir kanalın bir çok kullanıcı tarafından kullanılıyor olması o kanalın faydasının çok olduğunun bir göstergesidir. Bunu daha kesin olarak belirtmek için, algoritma tarafından önceden Nash dengesinde olan bir n^* atamasının bilindiği farzedilsin. Bu durumda, kanal i örnekleme n_i^* / n olasılıkla optimum olacaktır, çünkü bu şekilde örnekleme yapmak kullanıcıların tek bir turda Nash dengesine ulaşmasını sağlayacaktır. Genelde n^* durumu önceden bilinmediğinden dolayı, n^* durumu için bir kestirimci bulunmalıdır. Maliyet fonksiyonlarının doğrusal olduğu düşünülürse, s_i değerinin kanalın veri hızını gösterdiği durumda; maliyet fonksiyonu, $c_i(n_i) = n_i / s_i$ şeklinde formüle edilebilir. Nash dengesi durumunda bütün $c_i(n_i)$ değerleri yaklaşık olarak aynı olacağı için n_i^* değeri de s_i değeri ile orantılı olacaktır. Bu durum kanalların örnekleme yani karşılaştırma için seçilmesinin veri hızları ile orantılı olduğunu ortaya çıkarır. Pratikteki uygulamalarda s_i değeri kullanıcılar tarafından bilinmeyebilir ya da doğrusal olmayan maliyet fonksiyonları için var olmayabilir. Bu

durumda, n_i^* değerini tahmin etmek için n_i kullanılabilir. Kestirimci, sistem dengeye geldikçe çok daha başarılı tahminler yapacaktır.

Yük orantılı örneklemenin kullanışlı olmasının ikinci bir sebebi vardır. Kanalların sabit bir olasılıkla yani o anki yüküne ya da faydasına bağlı olmadan örneklendiği düşünölsün. Bu durumda en fazla $1/m$ örnekleme olasılığına sahip bir kanalın varlığı ortaya çıkar. Bu sebeple, Nash dengesine erişebilmek ya da yaklaşabilmek için ihtiyaç duyulan zaman en az m ile orantılı olur, çünkü her hangi bir kullanıcının daha iyi bir kanal bulması için ihtiyaç duyduğu zaman en az m kadardır.

7.4. Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması

Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması olarak isimlendirilen bu algoritma Monte Carlo metodundan yola çıkılarak geliştirilmiştir. Monte Carlo metodu, tekrarlanan rastsal değerlerden belirli sonuçlar çıkarabilmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir. Adını Monako'daki Monte Carlo casino'larından almıştır. İlk defa 1949 yılında John von Neumann ve Stanislav Ulam tarafından ortaya atılmıştır.

Monte Carlo metodu tek bir metodu ifade etmek yerine, büyük ve geniş çaplı yaklaşım sınıflarını ifade eder. Fakat bu yaklaşımlar aşağıda belirtilen belirli bir şemayı takip eder:

1. Olası girdiler için bir küme belirlenir.
2. Bu kümeden girdiler rastgele oluşturulur.
3. Bu girdiler kullanılarak algoritmik hesaplamalar gerçekleştirilir.
4. Sonuç elde etmek için ayrı ayrı yapılan hesaplamaların sonucu birleştirilir.

Örneğin Monte Carlo metodu kullanılarak pi sayısının değeri yaklaşık olarak hesaplanabilir:

1. Yere bir kare, içine de bir daire çizilir.
2. Karenin içine rastgele nesnelere atılır (örneęin piriń taneleri)

3. Dairenin içindeki nesnelere sayılır, dörtle çarpılır ve karenin içindeki nesnelere sayısına bölünür.
4. Daire ile karenin içindeki nesnelere sayılarının oranı yaklaşık olarak $\pi/4$ 'e denk gelecektir. Bu da dairenin alanının karenin alanına oranıdır.

Benzer bir yaklaşım bu çalışmada gerçekleştirilen algoritmada kullanılmıştır. Algoritmanın temel amacı, istemcilere kullanabilecekleri bir kanal bulmaktır. İstemciler doğaları gereği belirli bir rassallıkta yaşam sürelerine sahip olacaklardır. Yaşam sürelerindeki bu rassallık Monte Carlo metodlarının ilk adımının problem içinde kendi kendine atıldığı anlamına gelmektedir (ilk adım hatırlanacağı üzere rasgele seçimler yapmaktır). Bu durum göz önüne alındığında geliştirebilecek Monte Carlo metodlarının probleme uygun çözümler getireceği fark edilmiştir. Böylece dağıtık spektrum paylaşımını temel alan Karşılaştır ve Dengele Algoritmasına alternatif olan merkezi spektrum paylaşımını Monte Carlo metodu ortaya çıkmıştır. Geliştirilen bu algoritmanın sözde kodunun açıklaması Tablo 7.2'deki gibidir.

Tablo 7.2 Monte Carlo algoritması

1. Sisteme giren her ajan merkezi birime kanal talebini bildirir.
2. Merkezi birim, her yeni yaratılan ajan için bütün kanalların yeni maliyetini hesaplar.
3. Bu maliyetleri karşılaştırır.
4. En düşük maliyetli kanalı seçer.
5. En düşük maliyet değerine sahip birden fazla kanal varsa düşük CostSeed değerine sahip olan kanalı seçer.
6. Bu kanaldaki en eski ajanı seçer.
7. Bu ajanı en düşük ikinci CostSeed değerine sahip olan kanala yerleştirir.

7.5. Yazılım Modeli

Yazılımda temel alınan yaklaşım, algoritmanın gerçek dünyada bu algoritmaları çalıştıran BR'lerin nasıl davranacağı göz önüne alınarak şekillendirilmiştir. Örneğin, pratikte algoritmaları çalıştıran BR'ler sürekli bir yarış halinde olacak ve eş zamanlı

olarak kanal bulmaya çalışacaklardır. Bu eş zamanlı olarak koşulan yarış durumunun bilgisayar simülasyonu ortamında en iyi şekilde temsili, iş parçacıklarının (thread) kullanılmasıyla sağlanmıştır. Gerçek hayatta kullanıcı (ya da BR) olarak isimlendirilen nesnelere, çözüm domeninde ajan (agent) olarak isimlendirilmiş ve her biri ayrı iş parçacığı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Ajanların yaratıldığı, çalıştırıldığı kısaca kontrol edildiği bir yapıya ihtiyaç duyulmuştur. Bu yapının pratikteki karşılığı, BR'lerini açıp onlarla iletişim kurmaya çalışan kullanıcılarıdır. Yazılımda ise bu yapı, ajan sürücüsü (agent driver) olarak isimlendirilmiştir. Ajan sürücüsü de ayrı bir iş parçacığı olarak gerçekleştirilmiş olup ajanların doğru çalışıp ölmelerini kontrol etmektedir. Yazılımda en fazla kaç ajanın aynı anda eş zamanlı çalışacağı, toplam kaç ajanın yaratılacağı gibi parametrelerin kontrolü hep bu iş parçacığı tarafından kontrol edilmektedir.

Ajanların temel çalışma maksadının kanalları ele geçirmek olduğundan sistem modeli kısmında bahsedilmişti. Algoritmanın detaylarını verirken ajanların kanallar hakkında bilgi (kanaldaki toplam yük ve toplam maliyet gibi) toplamaları gerektiği aşikardır. Bu bilgileri yazılım içerisinde tutacak veri yapısı 'kanal' olarak isimlendirilmiştir.

Kanal sınıfı içerisinde, kanalın niteliklerini ve çalışma anındaki durumunu tutabilmek için bir takım değişkenler kullanılmıştır. Bunlar arasında, kanalın hangi frekans aralığında olduğunu tutan 'm_Frequency' değişkeni; kapasitesini tutan 'm_Capacity' değişkeni; kanaldaki maliyetin hesaplanmasında kullanılan 'm_CostSeed' değişkeni ve belli bir anda kanalı kullanan ajanların listesini tutan 'm_AgentList' değişkeni yer almaktadır.

Nasıl ki ajanları yöneten bir yapıya ihtiyaç duyulduysa kanalların da yaratılmasından ve listelenmesinden sorumlu bir sınıfa ihtiyaç duyulmuştur. Bu sınıf ise 'Media' (ortam) olarak isimlendirilmiştir. Yaratılan her ajan hangi ortamdaki kanalları kullanacağını bilmelidir. Örneğin bizim örneğimizde ajanlar hava ortamında yer alan frekans kanallarını kullanıyor olacaklardır. 'Media' sınıfı aracılığıyla kanallar liste

halinde tutulmaktadır. Bu sayede, ajanların istedikleri özel bir kanala erişimi yine 'Media' sınıfını kullanarak gerçekleştirebilirler.

Her ajan, ajan sürücüsü tarafından yaratıldığında kendisine bir yaşam süresi biçilir. Bu süre 'm_TimeToLive' değişkeninde tutulur. Her ajan bu süre dolduğunda çalışmasını sonlandırır. Ajanlar, sürekli olarak kanal tahsisine çalışmayacaktır. Açıkça ortadadır ki ajanların yapması gereken asıl iş veri iletişimidir. Pratikteki bu yapıyı yazılıma aktarmak için ajanların kanal aramayı periyodik olarak yapması sağlanmıştır. Kanal arama periyodu ise, 'm_RefreshTime' değişkeni içerisinde tutulmaktadır. Yani her ajan 'm_RefreshTime' kadar süre boyunca veri iletişimini sürdürür. Belirlenmiş olan bu sürelerin dolmasıyla ajanı uyaracak olan veri yapısı ise zamanlayıcılardır (timer). Her ajanın kendine ait 'trigger' isminde bir zamanlayıcısı vardır. Zamanlayıcıya verilen süre dolduğunda, daha önceden belirlediğimiz 'EndOfLife' fonksiyonunu çağırır. Yazılımda veri iletişimi yapıldığı kısım süresi boyunca ajanlar uyumaktadırlar. Süre dolduğunda ise algoritmalarını çalıştırıp kanal aramaya devam ederler. Her ajan belli bir anda hangi kanalda olduğunu bilmek durumundadır, bu bilgiyi ise 'm_CurrentChannel' değişkeninde tutmaktadır.

Ajanlar algoritmalarını çalıştırlarken, olasılıksal bazı seçimler de yapmak zorundadırlar. Örneğin kanalları sahip oldukları yüklerle orantılı olarak örneklemeleri gerekmektedir. Yazılım içerisinde bu ajanların bu tip seçimleri yapmalarına yardımcı olması için 'RandomSelector' isimli bir sınıf oluşturulmuştur.

7.5.1. Algoritmaların gerçekleşmesi esnasında karşılaşılan zorluklar

Algoritmanın bir simulasyon benzeri uygulama içerisinde gerçekleşmesi esnasında bir takım zorluklarla karşılaşmıştır. Bu zorluklar, algoritmanın detaylandırıldığı makalede açıklanmadıysa da (belki öngörülmemiş ya da önemsenmemiş olabilir) aslında algoritmanın çalışmasını ve performansını doğrudan etkileyecek seçimler yapılmasına neden olabilmektedir. Örneğin verilen algortmada ajanların ilk defa yaratılıp ortama erişmeye çalıştıklarında hangi kanalda olmaları gerektiği konusunda bir açıklama yapılmamıştır.

Ajanların kendilerine rasgele bir başlangıç kanalı seçmesi mümkün olabileceği gibi, algoritma genişletilerek ajanlar henüz bir kanal üzerinde değillerken onlara hızlıca uygun bir kanal bulunması sağlanabilir. CogNet ismini verdiğimiz uygulama geliştirilirken rasgele başlangıç kanalı atanması uygun görülmüştür (yazılıma daha tasarım aşamasındayken CogNet ismini verdikten sonra bu isimde başka projelerin de olduğunu farkettim, ama onları inceleme fırsatım olmadığı gibi bilişsel radyo ağ simülasyonu gerçekleyen yazılımıma bu ismin uygun olduğunu düşündüğüm değiştirme gereği duymadım).

Çok sayıda ajanın (yani iş parçacığının) aynı anda belirli kaynaklara erişmeye çalışması halinde yarış durumu oluşacaktır. Örneğin ajanlardan biri kendisini bir kanala atarken, diğer bir ajan aynı anda o kanalın toplam yükünü veya maliyetini sorgulayabilir. Bu işlemlerin eşzamanlı olması yazılımda sorunlara sebep olmamalıdır. Bunu sağlamak için iş parçacıklarının eş zamanlı olarak erişebilecekleri kaynakların kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu kontrol işlemi, Mutex (Mutual Exclusion yani karşılıklı dışlama kelimesinin kısaltılmış halidir) ismi verilen veri yapıları kullanılmıştır.

Örneğin her kanal sınıfının bir listede kendisini kullanan ajanların tümünü tuttuğundan daha önce bahsedilmişti. Ajanların algoritmayı çalıştırma esnasında kanallardan bir takım bilgiler isteyebilirler, örneğin ajanlar kanalların toplam maliyet, yük bilgisini vermelerini isteyebilirler. Bunların dışında ajanların kanallara giriş veya kanaldan ayrılma talepleri de olabilir. Bu işlemlerin hepsi de kanal içerisinde yer alan ajan listesi yapısı üzerinde çeşitli işlemler gerektirmektedir. Farklı iş parçacıkları şeklinde eşzamanlı çalışan ajanlar bu kanal listesi yapısını aynı anda farklı ekleme/silme işlemleri yaparak bozmamalıdır. Kanallar, 'm_ChannelMutex' ismini verdiğimiz bir Mutex'i kullanarak kritik bölge işlemlerini gerçekleştirir ve bu sayede kanal listesi koruma altına alınır. Yazılımın gerçekleşmesi esnasında bilgisayar bilimlerinin 30 yıldır üzerinde çalıştığı iş parçacıkları, mutex, timer gibi kavram ve problemlerin baştan çözülmesine gerek görülmemiş olup, bu sorunları düzgün şekilde çözdüğü otoritelerce kabul edilmiş açık kaynak kodlu PTLib (Portable Toolkit Library) kütüphanesinden faydalanılmıştır.

7.5.2. Uygulama sonuçları ve karşılaştırmalar

Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında dağıtık spektrum paylaşımı için geliştirilmiş olan Karşılaştır ve Dengele algoritması ve tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan Monte Carlo algoritması C++ dili kullanılarak uygulanmıştır. Bu uygulamalar sonucu elde edilen veriler aşağıdaki tablolarda yer almaktadır.

1. denemede başlangıç parametreleri şu şekilde seçilmiştir:

Ajan sayısı: 5

Kanal sayısı: 3

Ajanların maksimum yaşam süresi: 60 sn

Ajanların yaratılma periyodu: 5 sn

Ajanların kanal arama periyodu: 5 sn

Tablo 7.3’de, 1.denemede yer alan parametrelerle Karşılaştır-Dengele ve Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritmalarının beşer kere koşturulmaları sonucu elde edilen kanalların ortalama hızını temsil eden değerler yer almaktadır.

Tablo 7.3 Deneme-1

koşturma	1.Algoritma	2.Algoritma
1	0.051	0.053
2	0.066	0.052
3	0.029	0.052
4	0.020	0.053
5	0.070	0.052

2. denemede başlangıç parametreleri şu şekilde seçilmiştir:

Ajan sayısı: 10

Kanal sayısı: 5

Ajanların maksimum yaşam süresi: 60 sn

Ajanların yaratılma periyodu: 5 sn

Ajanların kanal arama periyodu: 5 sn

Tablo 7.4’de, 2.denemede yer alan parametrelerle Karşılaştır-Dengele ve Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritmalarının beşer kere koşturulmaları sonucu elde edilen kanalların ortalama hızını temsil eden değerler yer almaktadır.

Tablo 7.4 Deneme-2

koşturma	1.Algoritma	2.Algoritma
1	0.103	0.104
2	0.030	0.105
3	0.087	0.084
4	0.06	0.103
5	0.069	0.105

3. denemede başlangıç parametreleri şu şekilde seçilmiştir:

Ajan sayısı: 15

Kanal sayısı: 5

Ajanların maksimum yaşam süresi: 60 sn

Ajanların yaratılma periyodu: 5 sn

Ajanların kanal arama periyodu: 5 sn

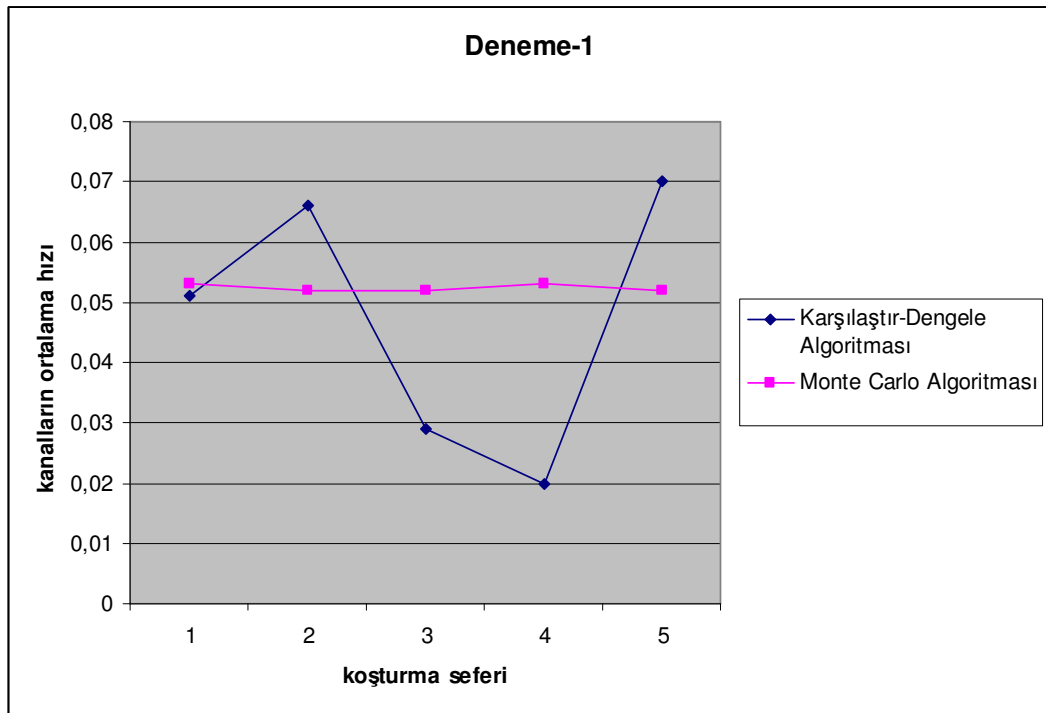
Tablo 7.5’de, 3.denemede yer alan parametrelerle Karşılaştır-Dengele ve Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritmalarının beşer kere koşturulmaları sonucu elde edilen kanalların ortalama hızını temsil eden değerler yer almaktadır.

Tablo 7.5 Deneme-3

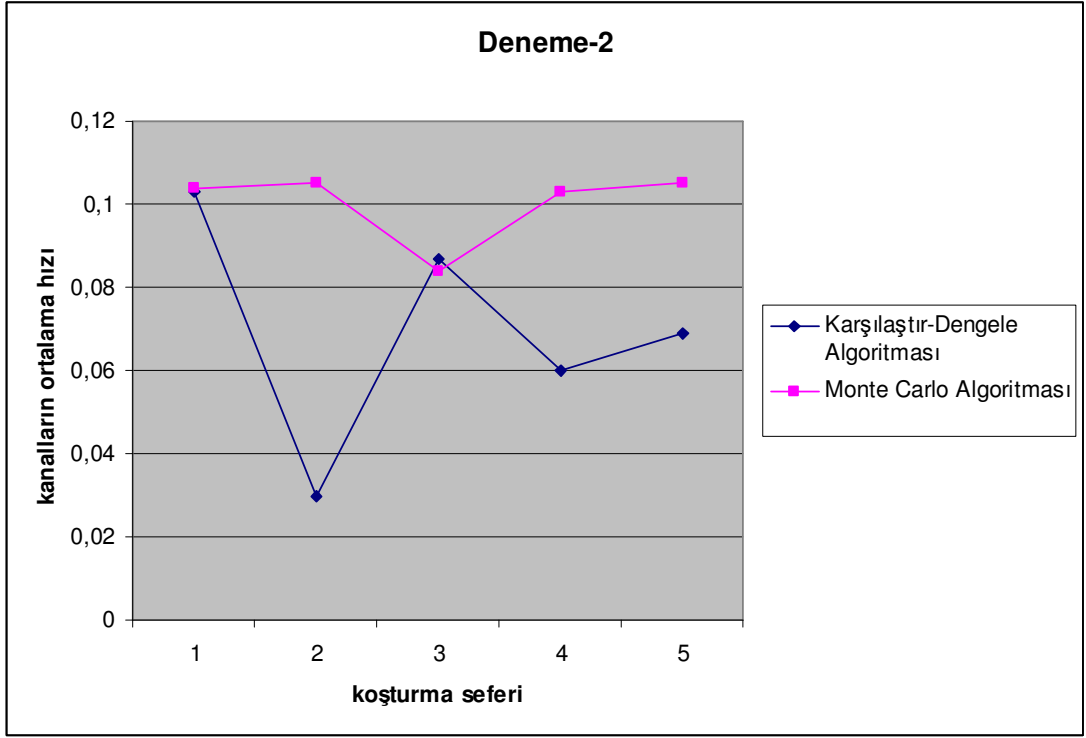
koşturma	1.Algoritma	2.Algoritma
1	0.127	0.060
2	0.082	0.059
3	0.030	0.047
4	0.039	0.051
5	0.053	0.064

Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında dağıtık spektrum paylaşımı için geliştirilmiş olan Karşılaştır-Dengele algoritması ve tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan Monte Carlo algoritmalarının bu tablolarda ortaya çıkan sonuçlarını karşılaştırmak için iki farklı kriter seçilmiştir. Birinci kriter, algoritmaların beşer sefer koşturulmaları sonucu ortaya çıkan kanal hızlarının birbirine yakın olma durumu yani sistemin kararlılığıdır. İkinci kriter ise ortalama kanal hızlarıdır.

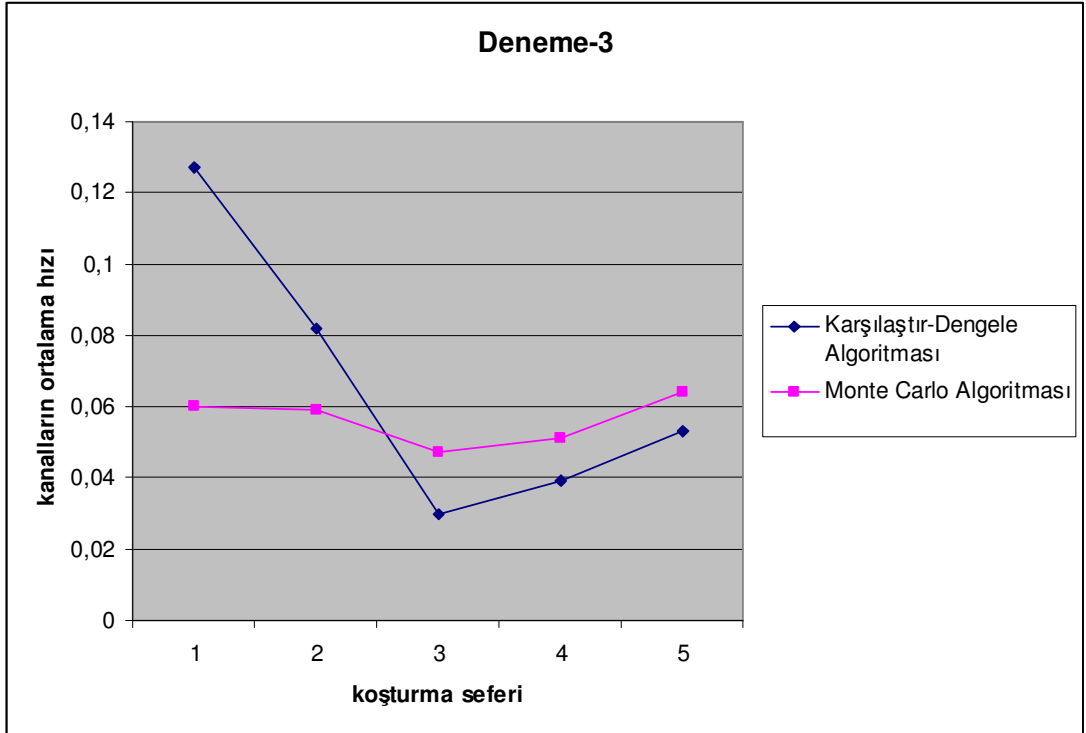
Karşılaştır-Dengele ile Monte Carlo algoritmalarının karşılaştırması Deneme-1, Deneme-2 ve Deneme-3 için sırasıyla Şekil 7.1 , Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de yapılmıştır. Bu grafiklerde de görüldüğü gibi Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması diğer algoritmaya göre daha kararlı sonuçlar vermektedir. Bu grafiklerde ortaya çıkan diğer bir sonuç ise sistemdeki ortalama kanal hızlarının Monte Carlo algoritmasında daha yüksek değerler vermiş olmasıdır. Kısacası performans değerlendirilmesi için seçilmiş olan iki kritere göre bu tez kapsamında geliştirilmiş olan ve merkezi spektrumun paylaşımını esas alan Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması daha iyi sonuçlar vermiştir.



Şekil 7.1 Deneme-1 için performans karşılaştırma grafiği



Şekil 7.2 Deneme-2 için performans karşılaştırma grafiği



Şekil 7.3 Deneme-3 için performans karşılaştırma grafiği

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada ilk olarak WRAN IEEE 802.22 sistemin hedeflerinden, topolojisinden, elemanlarından bahsedilmektedir. Ayrıca fiziksel ve mac katmanı tasarımlarında hedef alınan konular incelenmektedir. Bu incelemelere göre WRAN'ı diğer kablosuz ağ teknolojilerinden ayıran en önemli özelliği, 54MHz-862MHz gibi düşük bir frekans bandında çalışmasıdır. Bunun için 6, 7 ve 8 MHz'lik bant genişliklerindeki çeşitli uluslararası TV kanallarını kullanacaktır. Spektral verimlilik aralığı ise 0.5-5 bit/sec/Hz olarak belirlenmiştir. Böylece 6 MHz'lik bir TV kanalı için 18 Mbps'lik bir veri hızını hedeflemiş olmaktadır.

IEEE 802.22 topolojisinde baz istasyonu kendi hücrelerini ve kendisine bağlı CPE'leri yönetmektedir. Baz istasyonu birçok sayıda CPE'e servis sağlamak için yeterli kapasiteye sahip olmalıdır. Her CPE aşağı yönde 1.5 Mb/s'lik yukarı yönde ise 384 kb/s'lik veri hızı veri hızına ihtiyaç duymaktadır.

Bu incelemelere göre şu anki 802.22 taslağı aşağı yönde (downstream) ve yukarı yönde (upstream) OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access) modülasyonu üzerine temellenirken kanal bağlama gibi bazı teknolojileri de bant genişliğini artırmak için kullanılmaktadır. Modülasyon şemaları, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{2}{3}$ 'lik hızlardaki konvülyasyon kodlama şemalarıyla birlikte QPSK, 16-QAM, 64 QAM olarak belirlenmiştir.

Bütün bu sistem tasarımlarının temelinde yatan teknoloji ise etrafındaki spektrum kullanımını sezebilen, çalışma ortamını algılayabilen, bunlarla birlikte dinamik bir yapıda ve otomatik olarak radyo çalışma parametrelerini ayarlayabilen Bilişsel Radyo'dur. Bu teknoloji kullanılarak WRAN sisteminde çalışma frekansları olarak seçilen 54-862 MHz bantlarındaki boş TV kanalları algınabilecek ve bu kanallar birincil (lisanslı) kullanıcılara zarar vermeden kullanılacaktır.

Bilişsel radyo alıcıları ilk olarak kullanılmayan bandı bulmak için spektrum algılamayı gerçekleştirirler. Daha sonra yer bilgisi ile birlikte gerçekleştirdiği bütün spektrum ölçüm bilgilerini bağlı olduğu baz istasyonuna iletirler. Buna göre baz istasyonu spektrum yönetimini gerçekleştirir ve BR'nin iletim yapısı yapmayacağına karar verir.

Spektrum BR'ler tarafından algılandıktan sonra bu boş spektrum bantlarının BR'ler arasında adilce paylaşılması gerekmektedir. Bunun için çok farklı yöntemler sunulmuştur. Bu çalışmada da alternatif spektrum paylaşım yöntemlerinden birisi olan dağıtık spektrum paylaşımı konusunda, Fischer ve diğ. (2007) çalışmasında geliştirilmiş olan ve BR'ler arasında kanal tahsisi için oyun kuramını temel alan Karşılaştır ve Dengele adı verilen yük dengeleme algoritması incelenmiştir. Merkezi spektrum paylaşımı konusunda ise Monte Carlo metodunu temel alan alternatif bir spektrum paylaşım algoritması geliştirilmiştir. Daha sonra bu iki farklı spektrum paylaşım tekniğini kullanan algoritmalar C++ dili kullanılarak uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır.

Performans karşılaştırması için iki farklı kriter seçilmiştir. Bu kriterler sistemdeki kanalların ortalama hızları yorumlanarak seçilmiştir. Birinci kriter ortalama kanal hızlarının kararlılığıdır. İkinci kriter ise ortalama kanal hızlarının değerleridir. Bu iki kriterler göz önüne alınarak yapılan performans değerlendirmelerine göre Monte Carlo Spektrum Paylaşım Algoritması, Karşılaştır-Dengele Spektrum Paylaşım Algoritması'na göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Kısaca; bu karşılaştırma sonunda merkezi spektrum paylaşım algoritmasının karar mekanizması olan merkezi birimin, sistemdeki elemanların bireysel olarak erişebileceği bilgilerden çok daha fazlasını kullanarak daha etkili kararlar verebildiği görülmüştür.

KAYNAKLAR

Akyıldız I.F., “Spectrum management in cognitive radio networks”, *Network Operations and Management Symposium*, IEEE, Salvador, Bahia, Brazil, 7-11 April (2008)

Akyıldız I.F., “Spectrum, network and operations management in cognitive radio networks”, *Network Operations and Management Symposium*, IEEE, Salvador/Bahia, 7-11 April (2008)

Akyıldız I.F., Lee W.Y, Vuran M.V., Mohanty S., “NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey”, *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, 50, 2127 – 2159 (2006)

Akyildiz I.F., Won-Yeol L., Vuran M.C., Mohanty, S. “A survey on spectrum management in cognitive radio networks”, *IEEE Communications Magazine*, 46, 40-48, (2008)

Berlemann L., “Distributed Quality-of-Service Support in Cognitive Radio Networks”, *Wissenschaftsverlag Mainz*, 23-32, (2006)

Brik V., Rozner E., Banerjee S., Bahl P., “DSAP: a protocol for coordinated spectrum access”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, IEEE, Baltimore/USA, 611-614, 8-11 November (2005)

Brodersen R. W., Wolisz A., Cabric D., Mishra S. M., Willkomm D., *UC Berkeley White Paper*, IST Mobile and Wireless Communications Summit, (2004)

Cabric D., Brodersen R.W., *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications International Symposium*, IEEE, Berkeley Wireless Research Center, University of California at Berkeley, USA11-14 September (2005)

Cabric D., Mishra M. S., Willkomm D., Brodersan R., Wolisz A., *UC Berkeley White Paper*, IST Mobile and Wireless Communications Summit (2005)

Cabric D., Mishra M. S., Brodersan R.W., “Implementation Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios”, *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, IEEE, 772-776 USA, 7-11 November (2004)

Cao L., Zheng H., “Distributed spectrum allocation via local bargaining”, *Distributed spectrum allocation via local bargaining Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, IEEE, 475- 486, 26-29 September (2005)

Clancy T.C., “Dynamic spectrum access in cognitive radio networks”, Doctoral Thesis, *University of Maryland at College Park*, College Park/USA, (2006)

Cordeiro C., Challapali K., Birru D., “IEEE 802.22: An Introduction to the First Wireless Standard based on Cognitive Radios”, *IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks(DySPAN)*, IEEE, 328 – 337, November (2006)

Cordeiro C., Ghosch M., Cavalcanti D., Challapi K., “Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access of TV Bands”, *2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, IEEE, 225-233 Orlando/USA, 1-3 August (2007)

Cordeiro C., Challapali K., Chosh M., “Cognitive PHY and MAC Layers for Dynamic Spectrum Access and Sharing of TV Bands”, *TAPAS(Workshop on Technology and Policy for Accessing Spectrum)*, ACM, Boston, August (2006)

Etkin R., Parekh A., Tse D., “Spectrum sharing for unlicensed”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Baltimore/USA, 251-258, 8-11 November (2005)

Fette B., “Cognitive Radio Technology”, Second Edition, Newness, USA (2006)

Fischer S., Petrova M., “Distributed Load Balancing Algorithm for Adaptive Channel Allocation for Cognitive Radios”, *2nd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, IEEE, 508-513 Orlando/USA, 1-3 August (2007)

Ghasemi A., Sousa E.S “Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, IEEE, 131 – 136, 8-11 November (2005)

Han N.; Shon S., Chung J.H., Kim J. M., “Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems”, *The 8th International Conference on Advanced Communication Technology(ICAT)*, IEEE, Korea, 20-22 February (2006)

Hester L., Ridley A.D., “Cognitive Radio Networks: Not Your Father’s Wireless Network”, *The Telecommunications Review*, 19 (2008)

Hu W., Willkomm D., Chu L., Murad A., Gross J., Vlantis G., Gerla M., Wolisz A., “Dynamic Frequency Hopping Communities for Efficient IEEE 802.22 Operation”, *IEEE Communications Magazine*, 80-87, (2007)

Huang J., Berry R.A., Honig M.L., “Spectrum sharing with distributed interference compensation”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, IEEE, Baltimore/USA, 88-93, 8-11 November (2005)

Ileri O., Samardzija D., Mandayam N.B., “Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, IEEE, Baltimore/USA, 194-202, 8-11 November (2005)

Jing X., Raychaudhuri D., “Spectrum co-existence of IEEE 802.11b and 802.16a networks using the CSCC etiquette protocol”, *First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, IEEE, Baltimore/USA, 2443-250, 8-11 November (2005)

Kim H.J., Jo K.J., Hyon T.I, Kim J.M. Yoo S.J, “Cognitive Radio MAC Protocol for Hidden Incumbent System Detection”, *International Conference on Information Networking*, Estoril/Portugal, 23-25 January (2007)

Lee W. Y., and Akyildiz I. F., “A Spectrum Decision Framework for Cognitive Radio Networks”, **Submitted for journal publication**, IEEE, November 2007

Mitola J., “Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio”, Third Edition, Doctoral Thesis, *Royal Institute of Technology*, Sweden, (2000)

Mitola J., “Cognitive radio: making software radios more personal”, *IEEE Personal Communications*, 8, 13-18 Stockholm, (1999)

Prasad, R.V.; Pawelczak, P.; Hoffmeyer, J.A.; Berger, H.S., “Cognitive functionality in next generation wireless networks: standardization efforts”, *IEEE Communications Magazine*, 46, 72-78, (2008).

Po K., Takada J., “Study of Protection Criterion and Signal Detections based on Cognitive Radio Techniques for IEEE 802.22 Wireless Regional Area Network (Rural FWA) in Japan”, *IEICE Technical Report*, Tokyo, (2006)

Rajbanshi R., “OFDM-Based Cognitive Radio for DSA Networks”, *The University of Kansas Information & Telecommunication Technology Technical Report*, September (2007)

Raychaudhuri D., Mandayam N.B., Evans J.B., Ewy B.J, Seshan S, Steenkiste P., “CogNet – An Architecture for Experimental Cognitive Radio Networks within the Future Internet”, *Mobility In The Evolving Internet Architecture*, 1-59593-566-5, (2006)

Raychaudhuri D., Jing X., “A spectrum etiquette protocol for efficient coordination of radio devices in unlicensed bands”, **14th IEEE Proceedings on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications**, IEEE, 172-176 Beijing, China, 7-10 September (2003)

Sengupta S., Brahma S, Chatterjee M., Shankar S., “Enhancements to Cognitive Radio Based IEEE 802.22 Air-Interface”, *IEEE International Conference on Communications ICC apos*, IEEE, Glasgow, 24-28 June (2007)

Shah S.F.A., Tewfik A.H, “Efficient design of OFDMA-based programmable wireless radios”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 22, (2008)

Yuan Y., “Enabling dynamic spectrum allocation in cognitive radio networks”, Doctoral Thesis, *University of Maryland*, College Park/ USA, (2007)

Weiss T.A, Jondral F.K., “Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency”, *IEEE Communications Magazine*, 42, 8-14, (2004)

Wild B., Ramchandran K., “Detecting Primary Receivers for Cognitive Radio Applications”, *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks International Symposium*, DySPAN, Baltimore/USA, 8-11 November (2005)

ÖZGEÇMİŞ

Serpil İLHAN, 1981 yılında Isparta'da doğdu. 2004 yılında Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinden mezun oldu. Mezuniyetinden bir sene sonra Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde yüksek lisans eğitimine başladı. Halen Nortel Netas, Sip Lines & Sip Pbx grubunda yazılım ve haberleşme mühendisi olarak görev yapmaktadır.