

Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değıştirme

Muhammed Enes Bayrakdar^{1*}, Ali Çalhan²

10.02.2015 Geliş/Received, 18.03.2015 Kabul/Accepted

ÖZ

Bilişsel radyo, frekans spektrumundaki kullanılmayan boşlukların fırsatçı bir şekilde kullanılmasını sağlayan yeni bir teknoloji olarak geliştirilmiştir. Sabit spektrum tahsisleri, radyo frekans spektrumunda kullanılmayan frekans kanallarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bilişsel radyo teknolojisi, ikincil kullanıcıların ortamı sezerek spektrumun boş ya da kullanılmayan kısımlarından verimli bir şekilde faydalanmasını amaçlamaktadır. Spektrum yönetimi, birincil (lisanslı) ve ikincil (lisanssız) kullanıcılar arasındaki etkileşimi kontrol eden bir tekniktir. İkincil kullanıcıların birincil kullanıcılara girişim oluşturmaması, bilişsel radyo ağlarının başarımı açısından oldukça önemlidir. İkincil kullanıcılara tahsis edilen frekans kanallarının tekrar birincil kullanıcılara tahsisi durumunda ikincil kullanıcıların yeni bir frekans kanalına geçmeleri gerekmektedir. Bu işlem spektrum el değıştirme olarak ifade edilmektedir. Bu çalışmada, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değıştirme olarak bilinen ikincil kullanıcıların kanal değıştirmesi ile ilgili çalışmalar incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: bilişsel radyo, spektrum el değıştirme, spektrum yönetimi

Spectrum handoff in cognitive radio networks

ABSTRACT

Cognitive radio has been developed as a new technology that uses unutilized spectrum holes in an opportunistic manner. Fixed spectrum allocations have caused to reveal unused portions of radio frequencies in spectrum channels. Cognitive radio technology aims to take advantage of unutilized or vacant portions of the spectrum by allowing secondary users to sense the spectrum. Spectrum management is a technique that controls interaction between primary (licensed) and secondary (unlicensed) users. It is very important for performance of cognitive radio networks that secondary users must not cause any interference to the primary users. In case of reallocating the frequency channels that has reallocated to secondary users before, it is required for secondary users to access a new frequency channel. This process is described as spectrum handoff. In this study, the process of channel handoff event for secondary users, known as spectrum handoff, in cognitive radio networks were investigated.

Keywords: cognitive radio, spectrum handoff, spectrum management

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1 Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce -
muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr

2 Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce - alicalhan@duzce.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, kablosuz teknolojilerin artmasıyla birlikte kablosuz ağ kullanıcılarının sayısında da önemli miktarda artış gözlemlenmiştir [1]. Artan kullanıcı sayısına bağlı olarak kablosuz ortamların yetersizliği problemi ortaya çıkmıştır [1]. Kablosuz ortamların yetersizliğinin aslında mevcut spektrumların etkili bir biçimde kullanılmamasından dolayı ortaya çıktığı saptanmıştır [2]. Etkili bir şekilde kullanılmayan ve boş kalan spektrumlara spektrum boşluğu veya beyaz boşluk adı verilmektedir. Mevcut spektrumları daha etkili bir biçimde kullanmak için dinamik spektrum erişimi kavramı ortaya atılmıştır. Günümüzde, dinamik spektrum erişimini sağlayan kablosuz teknolojilerin başında bilişsel radyo gelmektedir [3].

Bilişsel radyo, bir spektrumdaki frekans kanallarının daha verimli bir şekilde kullanılması için geliştirilmiş olup, spektrum kanalındaki lisanslı (birincil) kullanıcılar kendi frekans kanallarını kullanmadığında, bu kanalların lisanssız (ikincil) kullanıcılar tarafından kullanılmasını sağlayan bir teknolojidir. Frekans kanallarının daha etkili bir biçimde kullanılmasını sağlamak amacıyla çeşitli ortam sezme yöntem ve teknikleri bulunmaktadır [3]. Bu sezme teknikleri sayesinde, ortamda lisanslı bir kullanıcı olup olmadığı tespit edilerek, eğer yok ise ortamın lisanssız kullanıcılar tarafından kullanılması sağlanmaktadır.

Bilişsel radyo ağlarında, lisanslı kullanıcıların lisanssız kullanıcılar tarafından herhangi bir girişime (interference) maruz kalmamaları gerekmektedir [4]. Lisanslı kullanıcıların zarar görmemesi, bilişsel radyo tarafından kesinlikle sağlanması gereken bir durumdur. Frekans kanalında lisanssız bir kullanıcı iletim yaptığı sırada, kanal lisanslı kullanıcı tarafından kullanılacaksa ortamın boşaltılması gerekmektedir. Lisanssız kullanıcının frekans kanalını boşaltmak için iletimini kesmesi veya başka bir kanala geçerek iletimine devam etmesi gerekmektedir. Lisanssız kullanıcının frekans kanalını boşaltmak amacıyla bir kanaldan diğer kanala geçerek iletimine devam etmesi spektrum el değiştirme olarak bilinmektedir [5].

Spektrum el değiştirme işlemi için çeşitli yöntem ve teknikler mevcuttur. Bu yöntem ve teknikler sayesinde, lisanssız kullanıcıların iletimleri kesilmeden başka kanallara aktarılmaları sağlanmaktadır. Çalışmamızda, bilişsel radyo ağları için spektrum el değiştirme konusunda detaylı bir tarama gerçekleştirilmiş olup bu alanda yapılabilecek yeni çalışmalara kaynak olabilecek niteliktedir.

Spektrum el değiştirme işleminde, göz önüne alınması gereken bir durum da öncelik sınıflarıdır. Öncelik

sınıfları, kullanıcılar arasında iletim sırasını belirlemektedir. Diğer bir deyişle, önceliği en yüksek olan kullanıcı ilk sırada iletim yapma hakkına sahiptir [6].

Öncelik sınıfları hakkında bilinmesi gereken diğer bir durum da engelli (preemptive) veya engelsiz (non-preemptive) öncelik kullanılmasıdır. Engelli öncelik durumunda, ortamdaki düşük öncelikli iletim kesilerek yüksek öncelikli iletime başlanır. Engelsiz öncelik durumunda ise, ortamdaki düşük öncelikli iletimin bitmesi beklenir ve iletim bittikten sonra yüksek öncelikli iletime başlanmaktadır [7].

İkincil kullanıcılara, ortamda bulunan boş spektrum kanallarından kendi ihtiyaçlarına en uygun kanalın tahsis edilmesi gerekmektedir. Bu durumda, birden fazla kanal içinden en uygun kanalın seçilmesinde belirli parametrelerin ve ikincil kullanıcının iletim ihtiyaçlarının da göz önüne alınması kaçınılmazdır [8]. Bu sebeplerden dolayı kanal özelliklerinin ve kullanıcı ihtiyaçlarının çok parametreliliği karar verme mekanizmaları ile değerlendirmeye alınıp ikincil kullanıcıya en uygun spektrum kanalı tahsisinin yapılması sağlanmalıdır.

Yapay zeka tabanlı yaklaşımlar kablosuz ağlarda karar verme işlemleri için sıklıkla kullanılmaktadırlar [9]. Literatürde spektrum el değiştirme işleminde yapay zeka tabanlı karar verme algoritmaları son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Yapay zeka, insanın düşünme yöntemlerini analiz ederek bunlara benzer yapay yönergeleri geliştirmeye çalışır. Yapay zekadan, insanlara özgü olan algılama, öğrenme, kavramlar arasında ilişki kurma, düşünme, fikir yürütme, sorun çözüme, iletişim kurma, çıkarım yapma ve karar verme gibi fonksiyonları da yerine getirmesi beklenmektedir. Günümüzde kullanılan çok çeşitli yapay zeka teknikleri bulunmaktadır [8]. Bu yapay zeka tekniklerinden başlıcaları; yapay sinir ağları, uzman sistemler, genetik algoritmalar ve bulanık mantıktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatürde, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme konusunda çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tablo 1'de, literatürde yapılan çalışmaların karşılaştırması verilmiştir. Zahed ve arkadaşları, el değiştirme gecikmesi ve toplam servis süresini azaltmak için öncelikli ve önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme karar mekanizması önermişlerdir [3]. Önerilen mekanizma, iletimi kesilen kullanıcılara yüksek öncelik vererek herhangi bir iletimi kesilmeyen ikincil kullanıcıdan önce iletimine devam etmesi için engelsiz

devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk kullanılarak modellenmiştir. Önerilen el değiştirme mekanizmasının başarımı değerlendirilmiş ve mevcut spektrum el değiştirme mekanizmaları ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen mekanizmanın farklı trafik varış oranları ve servis oranları altında ortalama el değiştirme gecikmesi ve toplam servis süresi bakımından mevcut mekanizmalardan daha iyi olduğunu göstermektedir. Liu ve arkadaşları, ikincil kullanıcıların genel spektrum erişim senaryosunu kullandığı bilişsel radyo ortamında spektrum el değiştirmeye odaklanmışlardır [7]. Bulanık mantık kullanılarak kanal tahsis tablosu tahmin edilmekte ve spektrum el değiştirme gerçekleşeceği zaman ikincil kullanıcının hızlı bir şekilde spektrum erişimini seçebilmesi sağlanmaktadır. Giupponi ve Neira, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme çalışmışlardır [8]. İkincil kullanıcılar, frekans kanallarını birincil kullanıcılara oluşturdukları girişim belli bir eşik değerine ulaşmadığı sürece kullanılmaktadırlar. Birincil kullanıcılara zararlı bir girişim oluşturulduğunda veya ikincil kullanıcıya sağlanan servis kalitesi çok iyi değil ise, ikincil kullanıcı kanalı hızlı bir şekilde boşaltmak için spektrum el değiştirme işlemini başlatmaktadır.

Kaur ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında bulanık mantık sistemi kullanarak yeni bir spektrum hareketlilik tekniğinin tasarımını önermişlerdir [9]. Önerilen teknik, ikincil kullanıcıların; birincil kullanıcılar spektruma ihtiyaç duyduğunda veya birincil ve ikincil kullanıcılar arasında girişim oluşturmamak için iletim gücünü ayarlamasını sağlar. Bu teknik kullanılarak, ikincil kullanıcılar iletim güçlerini belirli girişim limitlerinde tutamazlarsa kanallar arasında geçiş yaparlar. Böylece, yapılan çalışma; ikincil kullanıcıların iletim gücünü belirli bir seviyede kontrol etme önceliği ve girişim oluşturmamak için diğer frekans bandına geçiş olmak üzere iki bölüme ayrılmaktadır.

Potdar ve Patil, hareketlilik, servis kalitesi ve önceliğe dayanan yeni bir spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir [10]. Önerilen sistem esas olarak ikincil kullanıcıların hareketliliğine odaklanmaktadır. Hareketliliğe bağlı olarak, ikincil kullanıcılara servis kalitesi sağlamak için hücre içi ve hücrelerarası el değiştirme tanımlanmıştır. El değiştirme işlemindeki bazı kritik durumları öncelik sırasına koymak için yeni bir kaynak kullanım parametresi kullanılmıştır. Ahmed ve arkadaşları tarafından, aday kanalların kazancını tahmin etmek için bulanık mantık tabanlı yeni bir sistem önerilmiştir [11]. Böylece, en avantajlı kanal seçilebilmektedir. Ayrıca, SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) parametresi ile birincil kullanıcı girişim parametresi birleştirilerek el değiştirme kararı verilmektedir. Konishi ve arkadaşları, ikincil kullanıcılar tarafından kullanılan alt kanalların sayısının değişken

olduğu kanal birleştirme yöntemi ile dinamik spektrum el değiştirme tekniğinin performansını analiz etmişlerdir [12]. Çoklu kanal bilişsel radyo ağında bekleme olmayan çok sunuculu öncelikli kuyruk sistemi; engel olma olasılığı (blocking probability), zorunlu sonlandırma olasılığı (forced termination probability) ve ikincil kullanıcıların iş çıkarma oranı türetilerek modellenmiştir. Zorunlu sonlandırma olasılığında iki farklı yaklaşım düşünülmüştür. Bunlardan biri, en fazla sayıda alt kanal kullanan ikincil kullanıcıların iletimlerini sonlandırmaya zorlanmasıdır. Diğeri ise, en az sayıda alt kanal kullanan ikincil kullanıcıların iletimlerini sonlandırmaya zorlanmasıdır.

Han ve arkadaşları, spektrum sezme göz önünde bulundurularak gerçek zamanlı spektrum el değiştirme yapmayı amaçlamışlardır [13]. Gerçek zamanlı spektrum el değiştirmeyi desteklemek için ikinci alıcı ve spektrum havuzu olmak üzere iki farklı yapı önerilmiştir. Sezme aşamasında, sezme kanalını belirlemek için yeniden sezmenin gerekliliği tartışılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada model tabanlı tahmin de ele alınmıştır. Lee ve Jang tarafından, spektrum sezmenin yanlış alarmından kaynaklanan spektrum el değiştirme işlemini göz önüne alan optimizasyon problemi formüle edilmiştir ve en uygun spektrum sezme süreleri bulunmuştur [14]. Pham ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme tekniğini en iyi şekilde kullanmak için kanal durumlarının analizini yapmışlardır ve Hidden Markov modele dayanan spektrum el değiştirme modelini önermişlerdir [15].

Lertsinsrubtavee ve arkadaşları, gecikme sınırı gerekliliğini göz önüne alarak gereksiz el değiştirme işlemlerini azaltmayı hedefleyen yeni bir spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir [16]. İlk olarak, uygulama paketlerinin beklenen gecikmesi kanalla ilişkili kuyruğun bir fonksiyonu olarak hesaplanmaktadır. Bu gecikme, kanalın durumunu ve paket iletimleri için uygunluğunu yansıtmaktadır. İkinci olarak, gereksiz el değiştirmeleri önlemek amacıyla spektrum el değiştirme ve seçim kararına rehberlik eden gecikme ihlal oranını tahmin etmek için beklenen gecikmeler kullanılmıştır. Bunun yanında, hızlı ardışık el değiştirme problemini hafifletmek için ek destek kanallarının kullanımı çalışılmıştır. Yoon ve Ekici tarafından yapılan çalışmada, bilişsel radyo ağları için gönüllü spektrum el değiştirme olarak isimlendirilen yeni bir spektrum yönetim tekniği tanıtılmıştır [17]. Haberleşme kesintisi olmadan alternatif kanalların kurulumunu ve iletişimini kolaylaştırmak amacıyla zorunlu olmayan spektrum el değiştirme olayını başlatmak için gönüllü spektrum el değiştirmeye dayanan yeni bir mekanizma önerilmiştir. Zhang ve arkadaşları, ikincil kullanıcıları sınıf 1 ve sınıf 2 olmak üzere iki farklı sınıfa ayırmışlardır [18]. Sınıf 1

kullanıcıların kanal erişim açısından sınıf 2 kullanıcılara göre üstünlükleri bulunmaktadır. Farklı öncelikli ikincil kullanıcıların birikimli el değiştirme gecikmesini tanımlamak için engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/M/2 kuyruk ağıyla birleştirilmiş Markov geçiş modeli incelenmiştir.

Lertsinsrubtavee ve arkadaşları, el değiştirmenin yapılıp yapılmayacağını ve eğer yapılacaksa nasıl yapılacağını belirlemek için önceden birikmiş ölçümlere dayanan birikimli olasılığın kullanımını önermişlerdir [19]. Gereksiz el değiştirme işlemini önlemek için ikincil kullanıcı, birikimli olasılık tahmini belli bir sınırı aşmadığı sürece aynı kanalda kalmalıdır. Bununla birlikte, önceki gözlemlerin tahmini verimli tahmin modelleri kullanılsa dahi ani kararlarda gerçek davranışlara cevap vermeyebilir. Bu sorunu hafifletmek için, kısa zaman dilimli destek kanallarının kullanımı önerilmiştir. Wang ve arkadaşları tarafından, iki atlamalı seçici röle ağında periyodik spektrum sezme ve spektrum el değiştirme ile kolaylaştırılan fırsatçı spektrum kullanım modeli düşünülmüştür [20]. Çarpışma olasılığı ve ikincil kullanıcıların iş çıkarma oranı ifadeleri türetilerek ikincil kullanıcıların iletimlerinin güvenilirliği çalışılmıştır. Wu ve arkadaşları, bilişsel radyo ağlarında öncelikli iletim için karma engelsiz ve engelli devam eden öncelikli (preemptive and non-preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk modelini önermişlerdir [21]. Gecikmelere duyarlı uygulamalar için önerilen kuyruk modeline bağlı olarak trafik uyarlı spektrum el değiştirme tekniği geliştirilmiştir. Bu spektrum el değiştirme tekniği ikincil kullanıcılar için gecikme duyarlı uygulamaların servis süresini düşürmektedir. Ayrıca, ikincil kullanıcılar arasındaki spektrum el değiştirmelerinden kaçınılarak ağı toplam performansı garanti altına alınmaktadır.

Kim ve Shin, lisanslı kanalların ne kadar sıklıkla ve ne kadar süre boyunca seziyeceği ile ilgili yeni bir yaklaşım önermişlerdir [22]. Önerdikleri yaklaşımı optimize ederek, spektrumdan daha etkili bir şekilde yararlanılmasını sağlamışlardır. Tigang ve Tong, engellenen ikincil kullanıcıları depolamak için sınırlı boyutta tampon kuyruklu dinamik spektrum el değiştirme tekniği önermişlerdir [23]. Sınırlı boyutta tampon kuyruğu çok fazla sayıda gerçek zamanlı trafik yığılmasını önlemektedir. Tampon boyutunu sınırlayarak, gerçek zamanlı olmayan trafiklerin kanal kullanımını için adil bir şansa sahip olmaları sağlanmaktadır. Ek olarak, spektrum sezme ve kanal tahsisi merkezi baz istasyonu tarafından kontrol edilmektedir. Böyle merkezi bir kontrol mekanizması, birden fazla ikincil kullanıcının eş zamanlı olarak aynı spektrum bandına erişme isteğini verimli bir şekilde önleyebilmektedir. Wang ve Wang, bilişsel radyo ağlarında kullanılan spektrum el değiştirme tekniklerini

incelemişlerdir [24]. Yaptıkları çalışmada, önceden tanımsız (reactive) ve önceden tanımlı (proactive) olmak üzere iki önemli spektrum el değiştirme tekniği karşılaştırılmıştır. Önceden tanımsız spektrum el değiştirmenin avantajı, seçilen hedef kanalların doğruluğudur fakat sezme zamanı maliyeti vardır. Buna karşılık, önceden tanımlı spektrum el değiştirme tekniğinde sezme zamanı maliyeti yoktur fakat önceden belirlenen hedef kanallar uygun olmayabilir. Sezme zamanına bağlı olarak hangi durumda önceden tanımsız veya önceden tanımlı spektrum el değiştirme tekniğinin kullanılacağını analiz etmek için engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk ağı kullanılmıştır.

Zhou ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ikincil kullanıcıların baz istasyonunun en geniş kapsama alanını elde etmesi amacıyla nereye yerleştirileceği üzerine odaklanılmaktadır [25]. Bu problemi çözmek için, öncelikle birincil kullanıcılar için girişim kısıtları ve ikincil kullanıcılar için servis kısıtları göz önüne alınarak kapsama alanı elde edilmektedir. İkincil kullanıcı baz istasyonu konumunun, kapsama alanını belirlemede önemli bir rol aldığı görülmüştür. Yayın yapılan bilişsel radyo ağında, kapsama alanının en geniş olması için ikincil kullanıcı baz istasyonunun en uygun konumu türetilmiştir. Wang ve arkadaşları tarafından, bilişsel radyo ağlarında bağlantı tabanlı spektrum el değiştirmenin gecikme performansını değerlendirmek için analitik model sunulmuştur [26]. İkincil kullanıcının iletimi sırasında, birincil kullanıcılardan gelen çoklu kesmeler çoklu spektrum el değiştirmelerle ve spektrum el değiştirme için hedef kanalların önceden belirlenmesine ihtiyaç duyulması ile sonuçlanmaktadır. Hedef kanalların önceden belirlenmesinde kanal etkilerini ölçmek için üç farklı tasarım özelliği düşünülmüştür. Bunlar; birincil ve ikincil kullanıcıların genel servis süresi dağılımı, çoklu el değiştirmelerde farklı iletim kanalları ve çoklu ikincil kullanıcıların kanal çekişmesinden kaynaklanan kuyruk gecikmesidir. Bu üç tasarım özelliği ile spektrum kullanım davranışlarını karakterize etmek için engelsiz devam eden öncelikli (preemptive resume priority) M/G/1 kuyruk ağı modeli önerilmiştir. Shiang ve Schaar, bilişsel radyo ağlarında gecikme duyarlı çoklu ortam uygulamalarını ileten bireysel kablosuz kullanıcılar için yeni bir dinamik kanal seçim çözümü önermişlerdir [27]. Kullanıcılar genellikle farklı frekans kanallarında özel fonksiyonlara, uygulama gereksinimlerine ve çeşitli kanal durumlarına sahiptirler. Mevcut spektrum kaynaklarını merkezi olmayan bir yapıda verimli bir şekilde yönetmek için kullanıcılar arasında bilgi alışverişi yapılması gerekmektedir. Bu yüzden, gerekli bilgi değişimini belirleyen yeni bir öncelikli sanal kuyruk ara yüzü önerilmiştir ve farklı öncelikli trafikler

tarafından maruz kalınan beklenen gecikmeler değerlendirilmiştir.

Kannappa ve Saquib, iki boyutlu Markov zincirini üç durum değişkeni ile tasarlamışlardır [28]. İkincil kullanıcıların başarımlarını ölçütleri olarak, engel olma olasılığı ve tamamlanma olasılığını kullanmışlardır. Ma ve Wang, kuyruk teorisine dayanan kanal değişim isteği

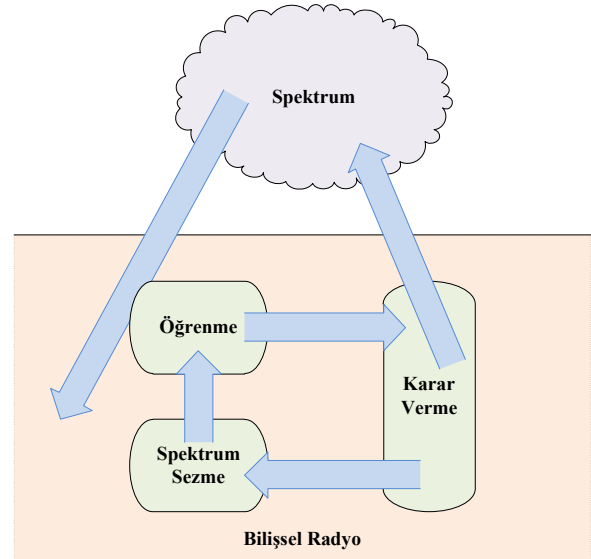
tekniklerini gerçek zamanlı olmayan veri servisleri için kullanmışlardır [29]. Engel olma olasılığı, fazlalık olasılığı ve kanal kullanım oranı da bu çalışmada ele alınmıştır.

Tablo 1. Literatürdeki çalışmaların karşılaştırılması (Comparison of related studies)

Amaç, Parametre	Yöntem	Kaynak
- El değiştirme gecikmesi - Toplam servis süresi	- Önceden tanımlı karar mekanizması (Proactive decision mechanism) - Önceden tanımsız karar yöntemleri (Reactive decision mechanism) - Kuyruk modelleri - Öncelik sınıfları (Priority classes)	[3], [12], [16], [17], [18], [20], [21], [23], [24], [26], [30], [33], [35], [37]
- El değiştirme gecikmesi - El değiştirme kararı - El değiştirme sayısı	- Bulanık mantık karar mekanizması - Yapay zeka karar mekanizmaları	[7], [8], [9], [10], [11]
- Zorunlu sonlandırma olasılığı (Forced termination probability) - İş çıkarma oranı	- Kanal birleştirme (Channel bonding)	[12]
- El değiştirme kararı - Enerji verimliliği	- Spektrum sezme yöntemi - Gizli Markov modeli	[3], [9], [13], [14], [15], [16], [19], [21], [23], [26], [29], [31], [32], [34], [36], [37], [38], [39], [40]

3. BİLİŞSEL RADYO (COGNITIVE RADIO)

Bilişsel radyo, mevcut spektrum boşluklarına dinamik olarak erişim kolaylığı sağlayan yeni bir teknolojidir. Bilişsel radyo, içinde bulunduğu ortam ile sürekli etkileşim halinde olan ve iletişim parametrelerini dinamik olarak değiştirebilen bir sistem olarak tanımlanmaktadır [10]. Bu tanımdan da anlaşılacağı üzere, bilişsel kapasiteye sahip olması ve parametrelerini değiştirebilmesi bilişsel radyonun en temel iki özelliğidir. Bilişsel radyonun bilişsel olması; bilişsel radyo alıcı-vericilerinin çevresindeki radyo ortamını sezmesi, elde edilen bilgileri analiz etmesi ve bunlara göre yapılması gerekenlere karar vermesi yeteneği olarak ifade edilmektedir. Verdiği kararların en başında spektrum bantlarının kullanımı ve en iyi iletim tekniklerini belirlemek gelmektedir. Böyle bir bilişsel kapasite, bilişsel radyonun sürekli olarak dinamik bir şekilde değişen çevreyi gözlemlemesini sağlayarak kullanılacak en uygun iletim planlarına karar vermesini sağlamaktadır. Şekil 1'de de görülen bilişsel radyo döngüsünün en temel üç aşaması; spektrum sezme, spektrum analizi ve spektrum erişim kararları olarak bilinmektedir [11].



Şekil 1. Bilişsel radyo ortamı (Cognitive radio environment)

Spektrum sezme, bilişsel radyonun farklı spektrum bantlarındaki radyo iletimlerinden dolayı meydana gelen elektromanyetik etkileşimleri ölçmesi yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Ortamdaki spektrum kullanım bilgisini sağlamasından dolayı, bilişsel radyonun en önemli fonksiyonu spektrum sezme olarak görülmektedir. Bilişsel radyo, hangi frekans bandının ne

zaman ve ne kadar süre ile sezileceği hakkında gerçek zamanlı kararlar vermelidir. Sezilen spektrum bilgileri, bilişsel radyonun doğru sonuçlara ulaşmasına yeterli olabilecek düzeyde olmalıdır [12]. Ayrıca, spektrum sezme, radyo ortamındaki değişiklikleri izleyebilecek kadar hızlı olmalıdır. Spektrum sezmenin gerektirdiği bu tür işlemler, bilişsel radyo donanım yapısının bant genişliği, işlem hızı gibi özelliklerinin çok iyi olmasını gerektirmektedir. Mevcut spektrum sezme teknikleri, birincil kullanıcıların faaliyetlerine dayanmaktadır.

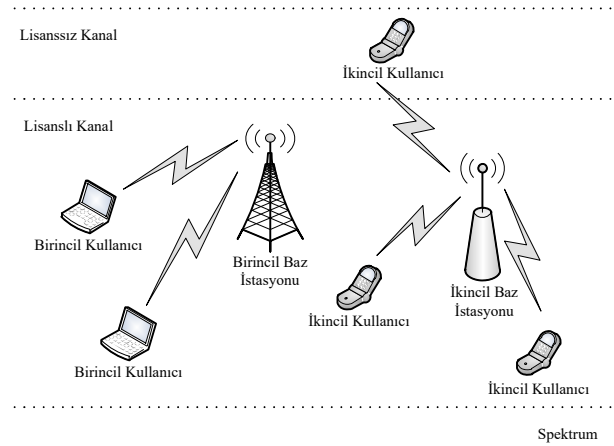
Spektrum analizi, sezilen radyo parametrelerine göre ortamdaki spektrum boşluklarının varlığının tespit edilmesidir [13]. Spektrum boşluğu, belirli bir zaman ve konumda birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan frekans bandı olarak tanımlanmaktadır. Bilişsel radyo döngüsünün son aşamasında, spektrum sezme ve analiz işlemleri sonuçlarına göre iletim faaliyetlerine karar verilmektedir. Frekans bandındaki iletimler için radyo alıcı verici parametrelerini tanımlamak amacıyla, mevcut spektrum boşluklarını göz önüne alarak toplanan bilgileri kullanmaktadır [14]. Sezilen spektrum bilgisi ve alıcı-verici mimarisine göre, bilişsel radyo yeni iletimler için yapılandırılacak olan parametrelerin değerlerini belirlemektedir.

3.1. Spektrum Yönetimi (Spectrum Management)

Bilişsel radyo ağlarında, birincil ve ikincil kullanıcılar olmak üzere iki farklı kullanıcı sınıfı bulunmaktadır. Birincil kullanıcılar, bilişsel radyo ağlarında kullandıkları frekans bandı için lisansa sahiptirler. Bu yüzden birincil kullanıcıların diğer bir adı da lisanslı kullanıcılar [15]. İkincil kullanıcılar, herhangi bir lisansa sahip değildirler. Bu yüzden, frekans bantlarına sadece ortamda birincil kullanıcılar bulunmadığında erişebilirler. İkincil kullanıcılar aynı zamanda bilişsel radyo kullanıcıları veya lisanssız kullanıcılar olarak da bilinmektedirler. Şekil 2'de lisanslı ve lisanssız kanalların birincil ve ikincil kullanıcılar tarafından kullanımı görülmektedir. Birincil ve ikincil kullanıcılar erişim noktaları aracılığı ile kendi aralarında haberleşmektedirler. Birincil kullanıcılar sadece lisanslı kanallarda haberleşme yaparken, ikincil kullanıcılar lisanslı ve lisanssız kanallarda haberleşme yapabilmektedirler.

Gönderici tespiti, bilişsel radyo kullanıcılarının gözlemleriyle birincil göndericinin zayıf sinyallerinin tespitine dayanmaktadır. Eşlemeli filtre tespiti, enerji tespiti ve özellik tespiti olmak üzere üç gönderici tespiti tekniği bulunmaktadır. Birincil kullanıcı sinyal bilgisi, bilişsel radyo kullanıcıları tarafından biliniyorsa en uygun tespit edici eşlemeli filtredir. Alıcı, birincil kullanıcı sinyali hakkında yeterli bilgi sahibi değil ise en uygun tespit edici, enerji tespiti tekniğidir [17]. Özellik tespiti

tekniklerinde, genel olarak modüle edilen sinyaller periyodik olarak karakterize edilmektedir. İşbirlikçi tespit etme girişim olasılığını düşürmesine rağmen spektrum boşluklarını tespit etmenin en verimli yolu bilişsel radyo kapsama alanında veri alan birincil kullanıcıların tespit edilmesidir. Bu yöntem genel olarak televizyon alıcılarının tespitinde kullanılmaktadır [18]. Geleneksel olarak, girişim alıcıda güç ile ve bireysel göndericilerin konumu ile kontrol edilebilmektedir. Bu model spektrum sezme için uygun olmasına rağmen, girişim sıcaklık sınırının doğru bir şekilde belirlenmesi oldukça zordur.



Şekil 2. Bilişsel radyo ağlarında spektrum yönetimi (Spectrum management in cognitive radio networks)

Spektrum sezme tekniklerini geliştirmek için incelenmesi gereken birçok araştırma konusu bulunmaktadır. Birincil ve ikincil ağlar arasında etkileşim olmamasından dolayı, ikincil kullanıcı birincil kullanıcı konumu hakkında kesin bilgiye sahip olamamaktadır. Bu yüzden, yakında bulunan birincil kullanıcıların girişim sıcaklığını ölçmek ya da tahmin etmek için yeni tekniklere ihtiyaç duyulmaktadır. Çok sayıda birincil ve ikincil kullanıcıdan oluşan çok kullanıcılı ağlarda, spektrum boşluklarını sezme ve girişimleri tahmin etmek oldukça zordur. Bu yüzden, spektrum sezme fonksiyonları çoklu kullanıcı içeren ortamları göz önüne alarak geliştirilmelidir. Sezme işlemi paket iletimi sırasında gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple, ikincil kullanıcılar sezme işlemi sırasında iletimlerine ara vermek zorundadır. Bu durum da, spektrum verimlilik oranı düşmektedir [19]. Bu nedenle, spektrum verimlilik oranı ve sezme doğruluğu arasında denge kurmak önemli bir konudur. Diğer taraftan, sezme zamanı doğrudan iletim başarımını etkilediği için, belirli bir sezme doğruluğunda sezme zamanının en aza indirildiği spektrum sezme algoritmaları geliştirilmelidir.

Bilişsel radyo ağları, uygulamaların servis kalitesi gereksinimlerine göre kullanılabilir bantlar arasında hangi spektrum bandının en iyi olduğuna karar verme

yeteneğine sahiptir. Spektrum kararı, kanal özellikleri ve birincil kullanıcıların işlemleri ile yakından ilişkilidir. Ayrıca, spektrum kararı ağda bulunan diğer ikincil kullanıcıların faaliyetlerinden de etkilenmektedir. Spektrum kararı genel olarak iki adımdan oluşmaktadır [1]. Öncelikle, spektrum bandının özellikleri hem ikincil kullanıcıların gözlemleri hem de birincil ağların istatistik bilgilerine göre elde edilir. Daha sonra, bu özelliklere dayanarak en uygun spektrum bandı seçilebilir.

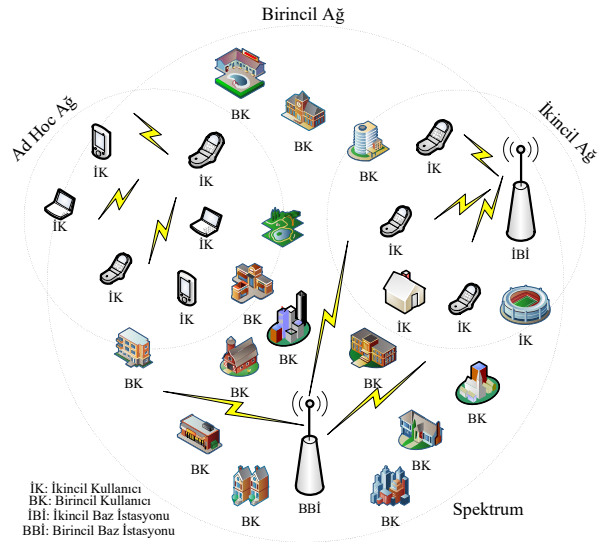
Kablosuz kanalların doğal yapısı, bilişsel radyo kullanıcıları arasında bir iletişim koordinasyonunun yapılmasını gerektirmektedir. Buna bağlı olarak, spektrum paylaşımı daha çok ortam erişim kontrol protokolünün fonksiyonlarıyla ilgilidir [6]. Birincil kullanıcılarla ikincil kullanıcıların aynı ortamda bulunması ve geniş aralıktaki kullanılabilir spektrum bantları gibi bilişsel radyo ağlarının değişik özellikleri spektrum paylaşımı için farklı zorluklar meydana getirmektedir. Spektrum yönetiminin son aşaması spektrum hareketliliği yönetimidir. Bilişsel radyo en iyi kullanılabilir spektrumu yakaladıktan sonra, seçilen spektrumdaki birincil kullanıcı faaliyeti ikincil kullanıcının spektrum bandını değiştirmesini gerektirmektedir [8]. Spektrum hareketliliği, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme olarak bilinen yeni bir çeşit el değiştirmenin ortaya çıkmasını sağlamıştır.

3.2. Bilişsel Radyo Ağları (Cognitive Radio Networks)

Genel olarak bilişsel radyo ağ ortamında, tek bir ikincil ağ ile aynı coğrafi alanda bulunan birincil ağlar bulunmaktadır. Birincil ağ, belirli bir spektrum bandında çalışması için lisansı bulunan mevcut bir ağdır (Örneğin; GSM, UMTS, WiMAX gibi). Bu yüzden, birincil ağın diğer bir adı da lisanslı ağdır. Birincil ağlar, merkezi bir ağ yapısına sahip olabilirler veya tasarsız (ad-hoc) olarak dağıtılmış bir şekilde haberleşebilirler. Birincil ağın kullanıcıları sadece, bu ağa özel olan lisanslı spektrumlara erişebilirler. Birincil kullanıcılar, lisanslı spektrumun tek sahipleri oldukları için spektrum erişim önceliğine sahiptirler [20]. Bu yüzden, birincil kullanıcılar herhangi bir şekilde ikincil ağ ile işbirliği yapmamaktadırlar. Birincil kullanıcıların iletimleri hiçbir şekilde ikincil kullanıcılar tarafından etkilenmemelidir.

Diğer taraftan, bilişsel radyo ağlarının herhangi bir frekans bandında iletim yapması için lisansı yoktur. Bilişsel radyo ağlarında spektrum erişimi, ikincil kullanıcıların tüm birincil ağların bulunduğu spektrumlara fırsatçı (opportunistic) bir şekilde erişmelerine izin vermektedir [21]. Bilişsel radyo kullanıcıları aynı zamanda lisanssız spektrum bantlarına da erişebilmektedirler. Bilişsel radyo ağları, merkezi bir yapıya sahip olabilecekleri gibi tasarsız olarak da

haberleşebilmektedirler. Şekil 3'te; merkezi yapıda birincil ağ, merkezi yapıda ikincil ağ ve ad hoc ağ mimarisinin yer aldığı bir bilişsel radyo ağ yapısı görülmektedir. Merkezi bilişsel radyo ağları, bilişsel radyo baz istasyonunun ikincil kullanıcıların iletimlerini kontrol ettiği ve düzenlediği altyapı tabanlı ağlar olarak bilinmektedir. Bilişsel radyo baz istasyonu, ikincil kullanıcılardan spektrumla ilgili tüm bilgileri toplayarak lisanslı ve lisanssız spektrum bandındaki ikincil kullanıcı iletimlerini kontrol etmektedir. Elde edilen bilgilere göre, baz istasyonu tüm düğümler için spektrum erişim kararları vermektedir. Merkezi altyapı tabanlı bilişsel radyo ağına örnek olarak IEEE 802.22 verilebilmektedir [5]. IEEE 802.22 standardı, kullanılmayan televizyon bantlarında bulunan boşluklardaki haberleşme tekniğinin özelliklerini tanımlamaktadır.



Şekil 3. Bilişsel radyo ağ yapısı (Cognitive radio network structure)

Alternatif olarak, bilişsel radyo ağlarındaki düğümler merkezi bir yapı olmadan tasarsız şekilde lisanslı veya lisanssız frekans bantlarında haberleşebilmektedirler. Altyapı maliyetini düşüren bu tip bilişsel radyo haberleşmesinde karmaşıklık oldukça artmaktadır [22 - 25]. Merkezi bir kontrol yapısı olmadığı için, dağıtılmış bilişsel radyo ağındaki düğümler kendi aralarında uyum içinde olmak için spektrum erişim kararlarını birbirleriyle paylaşmaktadırlar. Ayrıca, toplam ağ başarımını artırmak için dağıtılmış işbirlikçi sezme ve haberleşme teknikleri kullanılmaktadır.

3.3. IEEE 802.22 Kablosuz Bölgesel Alan Ağları (WRAN, Wireless Regional Area Networks)

IEEE 802.22 standardı, TV yayın bantlarının spektrum boşluklarında çalışan bilişsel radyo tekniklerini kullanarak geliştirilen ilk standarttır. IEEE 802.22 sistemleri, kullanılmayan televizyon spektrumlarını

geniş alan haberleşmesinin zor olduğu kırsal alanlarda girişim olmayacak şekilde paylaşmaktadır. IEEE 802.22 standardı, altyapı tabanlı geniş alan ağlarda fiziksel ve ortam erişim kontrol katmanının fonksiyonlarını belirlemektedir. Bu standarda göre, baz istasyonu bilişsel radyo kullanıcıları arasında haberleşmeyi kontrol etmektedir. Bu standarttaki bilişsel fonksiyonlar, dinamik kanal yönetimi prensibine dayanmaktadır [5].

Kablosuz yerel alan ağları ve ad-hoc ağlar gibi geleneksel ağlarda, kanal yönetimi sadece kaynak kullanımı ve servis kalitesiyle ilgilenmektedir. Bilişsel radyo ağlarında ise, kanal yönetimi aynı zamanda birincil kullanıcıların iletimlerinin güvenliğinden de sorumludur. Birincil kullanıcıları korumak amacıyla yapılan ortam sezme, kanal yönetiminin en önemli görevlerindedir. IEEE 802.22 cihazları, televizyon kanallarının özelliklerine bağlı olarak kararlar vermek için bilişsel radyonun yeteneklerinden faydalanmaktadır. Televizyon kanallarının durumu, harici bir veri tabanından veya spektrum sezme yöntemi ile elde edilebilmektedir. Elde edilen bilgilere göre, kullanılabilir kanalların listesi oluşturulmaktadır [23].

IEEE 802.22 işlemleri için kanal uygunluğu birincil kullanıcıların faaliyetlerine bağlı olarak dinamik bir şekilde değişkenlik göstermektedir. IEEE 802.22 sistemi birincil kullanıcıların iletimlerini garanti altına almak için, mevcut kanalı birincil kullanıcı kullanmak istediğinde yeni kullanılmayan bir kanalı seçmektedir. Kanal, IEEE 802.22 cihazı tarafından kullanılmadan önce, dikkat edilmesi gereken birçok durum bulunmaktadır. Yeni bir kanal kararı verilmeden önce, IEEE 802.22 sistemi bilişsel radyo işlemleri için kullanılabilir kanalların listesine sahip olmalıdır [5]. IEEE 802.22 sisteminde hem baz istasyonunun hem de bilişsel radyo kullanıcıların birincil kullanıcı varlığını tespit edebilmelerine rağmen, kanal yönetimi kararları sadece baz istasyonu tarafından verilmektedir.

4. SPEKTRUM EL DEĞİŞTİRME (SPECTRUM HANDOFF)

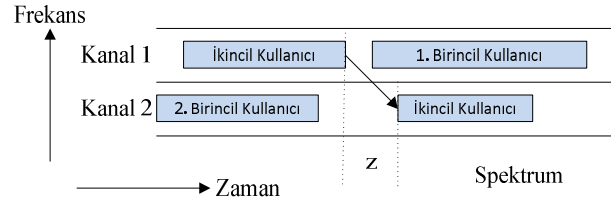
Mevcut spektrum boşluğunda, sezme mekanizması ile birincil kullanıcı haberleşmesi tespit edildiğinde; ikincil kullanıcı birincil kullanıcıya girişimde bulunmamak için kanalı boşaltmalıdır. Bilişsel radyo, bazı kalite parametrelerine göre diğer kanala geçiş sağlar. Haberleşmeyi diğer kanal bandına kaydıran bu mekanizma spektrum el değiştirme olarak bilinmektedir [24]. Bilişsel radyo kullanıcıları kullanacakları spektrum için misafir olarak nitelendirilmektedirler. Bu yüzden, eğer kullanımda olan spektrumun belirli bir kısmı birincil kullanıcı tarafından kullanılacaksa ikincil haberleşmenin

spektrumun başka boş bir kısmında devam etmesi gerekmektedir [25 - 29].

Spektrum el değiştirmenin gerçekleştiği üç farklı özel durum bulunmaktadır. Bunlardan ilki, ortamda birincil kullanıcıların tespit edilmesidir. İkincisi, devam eden haberleşme sırasında kullanıcı hareketliliğinden dolayı ikincil kullanıcıların bağlantılarını kaybetmesidir. Son olarak ise, mevcut spektrum bandının gerekli servis kalitesini sağlayamamasıdır.

Şekil 4'te, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme işleminin nasıl gerçekleştiği gösterilmektedir. Kanal 1 ve Kanal 2, sırasıyla 1. ve 2. birincil kullanıcılar aittir.

Şekil 4'te, öncelikle ikincil kullanıcının boş olan 1. birincil kullanıcının kanalını kullandığı görülmektedir. İkincil kullanıcının başlangıçta bu kanalı tercih etmesinin sebebi 2. birincil kullanıcının kanalının dolu olmasıdır. Sonraki aşamada, ortamdaki 1. birincil kullanıcı faaliyetinden dolayı ikincil kullanıcı Kanal 2'ye geçiş yapmıştır. Bu geçiş sırasında, "z" süre kadar spektrum el değiştirme gecikmesi yaşanmıştır.



Şekil 4. Bilişsel radyo ortamında spektrum el değiştirme işlemi (Spectrum handoff process in cognitive radio environment)

Spektrum el değiştirme sırasında, yeni kullanılabilir spektrum bantları aranması işleminden dolayı geçici haberleşme kesintileri kaçınılmazdır [26]. Kullanılabilir spektrum bantları bitişik olmadığı için ve geniş bir alana yayıldıkları için, bilişsel radyo kullanıcıların frekanslarını değiştirmesi gerekebilmektedir. Bu işlem de oldukça uzun zaman kaybına sebep olmaktadır. Bu nedenle, spektrum el değiştirme iki farklı stratejiye dayanarak gerçekleştirilebilmektedir. Önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirmede, bilişsel radyo kullanıcıları spektrum hareketliliğinden dolayı tespit edilen bağlantı kaybından sonra spektrum değiştirme işlemine başlamaktadırlar. Bu yöntem, herhangi bir zaman ayırmadan anlık spektrum el değiştirme yapılmasını gerektirmektedir. Bu durum, devam eden haberleşme kalitesinde önemli kayıpların yaşanmasına sebep olmaktadır [27]. Diğer yandan, önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirmede bilişsel radyo kullanıcısı mevcut bağlantıdaki gelecek faaliyetleri tahmin etmektedir ve mevcut iletime devam ederken yeni bir spektrum belirlemektedir. Spektrum el değiştirme işlemini de herhangi bir bağlantı kaybı olmadan

gerçekleştirmektedir. Önceden tanımlı el değiştirme işlemi yeni spektrum bandı ararken aynı zamanda mevcut iletimine de devam edebildiği için, spektrum el değiştirme işlemi hızlıdır fakat daha karmaşık algoritmalar gerektirmektedir [28 - 33].

Önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirme genellikle birincil kullanıcı varlığı için kullanılırken, önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme kullanıcı hareketliliği veya spektrum kalitesi düşüşlerinde kullanılmaktadır. Bu olaylar, ani spektrum el değiştirme gerektirmemektedir ve kolaylıkla tahmin edilebilmektedir. Birincil kullanıcı varlığı için de önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme kullanılabilir [29, 34]. Spektrum el değiştirme gecikmesi, spektrum hareketliliği başarımını belirlemede en önemli ölçüttür. Bu gecikme, bilişsel radyo ağlarında belirli işlemlerin gerçekleşmesinden dolayı oluşmaktadır. İlk olarak, protokolün farklı katmanları iletim frekansının kanal parametrelerine uyum sağlamalıdır [16, 35]. Böylece, bilişsel radyo kullanıcısı frekansını değiştirdiğinde, ağ protokolünün iletim parametrelerini ayarlaması gerekmektedir [36 - 38]. Bu durum da, protokol ayarlama gecikmesine sebep olmaktadır. Ayrıca, spektrum sezme zamanı ve el değiştirme zamanı için geçen süre de hesaba katılmalıdır.

Mevcut işlem frekansı bilişsel radyo kullanıcısı tarafından gerçekleştirilen bir haberleşmenin ortasında meşgul olursa, bu düğümde çalışan uygulamalar yeni bir frekans bandına transfer edilmelidir. Bununla birlikte, yeni bir frekans seçimi zaman alabilmektedir. Bağlantı yönetim protokolünün önemli bir gerekliliği, spektrum el değiştirmenin süresi hakkındaki bilgi edinilmesidir [38 - 40]. Gecikme bilgisi hazır olduğunda, bilişsel radyo kullanıcısı her bir protokol katmanındaki geçici bağlantı kesilmesinin etkisi tahmin edilmektedir. Buna göre, her bir protokol katmanı ve hata kontrol tekniğinin ayarlanması yoluyla az bir performans düşüşüyle devam eden haberleşmeyi korumaktadırlar. Sonuç olarak, çok katmanlı el değiştirme yönetim protokolleri spektrum hareketlilik fonksiyonlarını gerçekleştirmek için gereklidir [12]. Bu protokoller, farklı uygulamalar ile uyumlu (adaptive) el değiştirme yönetimini desteklemektedirler. Örneğin, iletim kontrol protokolü bağlantısı spektrum el değiştirme işlemi bitene kadar bekleme durumuna alınmaktadır. Diğer taraftan, spektrum el değiştirme işleminden sonra iletim kontrol protokolü (TCP, Transmission Control Protocol) parametreleri değişeceğinden dolayı yeni parametrelerin öğrenilmesi gerekmektedir ve eski parametrelerden yeni parametrelere geçişin hızlı bir şekilde yapıldığından emin olunmalıdır.

Spektrum el değiştirme işlemi gerçekleştiği sırada meydana gelen spektrum el değiştirme gecikmesi

yönetimi, çözülmesi gereken problemler arasında yer almaktadır. Spektrum el değiştirme gecikmesi, spektrum sezme ve spektrum kararı algoritmalarıyla yakından ilişkilidir. Bunun yanında, güvenilir bir bağlantı yönetimi için spektrum el değiştirme gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Önceden tanımsız (reactive) ve önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme yöntemleri arasında esnek geçişlerin sağlanması da çalışılması gereken konular arasındadır. Bu yöntemler arasındaki geçiş, veri trafiğinin gerçek zamanlı olması veya olmamasına göre değişebilmektedir. Örneğin, gecikme duyarlı gerçek zamanlı uygulamalar için önceden tanımlı (proactive) spektrum el değiştirme yönteminin kullanılması daha mantıklıdır. Diğer yandan, enerji kısıtlılığına sahip algılayıcı düğümler için önceden tanımsız (reactive) spektrum el değiştirme yöntemi daha uygundur. Sonuç olarak diyebiliriz ki, spektrum el değiştirme zamanının en aza indirilmesi ve daha verimli spektrum el değiştirme yöntemlerinin geliştirilmesi, çalışılması gereken konuların başında gelmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bilişsel radyo, frekans spektrumundan fırsatçı bir şekilde faydalanılmasını sağlayan yeni bir ağ teknolojisidir. Bilişsel radyo teknolojisinin en önemli özelliği, ikincil kullanıcıların ortamı sezmesini sağlaması ve gerçek zamanlı değişikliklere adapte olmasıdır. Bu teknoloji sayesinde ikincil kullanıcılar, herhangi bir zamanda lisanslı kullanıcılara girişim oluşturmadan kullanılmayan spektrum kısımlarını kullanabilmektedirler. Spektrum yönetimi, birincil ve ikincil ağlar arasındaki işlem verimliliğini denetleyerek veri iletimini garanti altına alan bir mekanizmadır. Sonuç olarak spektrum yönetiminin asıl görevi, ikincil kullanıcıların birincil kullanıcılara girişim oluşturmadan spektrumdan yararlanmalarını sağlamaktır. Bu çalışmada, bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme ile ilgili yapılan çalışmalar incelenmiştir. Ayrıca, spektrum el değiştirme işleminin gerçekleştiği durumlar ve karar mekanizmaları sunularak bu alanda yapılabilecek yeni çalışmalara temel oluşturulmuştur.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Khattab, A. (2013) Cognitive Radio Networks: From Theory to Practice, New York: Springer Science & Business Media.
- [2] Akyildiz, I. F., Lee, W. Y. and Chowdhury, K. R. (2009) 'CRAHNS: Cognitive Radio Ad Hoc Networks', Ad Hoc Networks Journal, vol. 7, no. 5, July, pp. 810-836.
- [3] Zahed, S., Awan, I. and Cullen, A. (2013) 'Analytical Modeling for Spectrum Handoff

- Decision in Cognitive Radio Networks', Simulation Modelling Practice And Theory Journal, vol. 38, November, pp. 98-114.
- [4] Tragos, E. Z., Zeadally, S., Fragkiadakis and A. G. and Siris, V. A. (2013) 'Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks: A Comprehensive Survey', IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, July, pp. 1108-1135.
- [5] Ko, G., Franklin, A. A., You, S. J., Pak, J. S., Song, M. S. and Kim C. J. (2010) 'Channel Management in IEEE 802.22 WRAN Systems', IEEE Communications Magazine, vol. 48, no. 9, September, pp. 88-94.
- [6] Akyildiz, I. F., Lee, W. Y., Vuran, M. C. and Mohanty, S. (2008) 'A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks', IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 4, April, pp. 40-48.
- [7] Liu, F., Xu, Y., Guo, X., Zhang, W., Zhang, D. and Li, C. (2012) 'A Spectrum Handoff Strategy based on Channel Reservation for Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications, Zhangjiajie, pp. 179 – 182.
- [8] Giupponi, L. and Neira, A. I. P. (2008) 'Fuzzy based Spectrum Handoff in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, Singapore, pp. 1 – 6.
- [9] Kaur, P., Udin, M. and Khosla, A. (2011) 'An Efficient Spectrum Mobility Management Strategy in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE UK-India International Workshop on Cognitive Wireless Systems, New Delhi, pp. 1 – 6.
- [10] Potdar, S. M. and Patil, K. P. (2013) 'Efficient Spectrum Handoff in CR Network based on Mobility, QoS and Priority using Fuzzy Logic and Neural Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Contemporary Computing, Noida, pp. 53 – 58.
- [11] Ahmed, E., Yao, L. J., Shiraz, M., Gani, A. and Ali S. (2013) 'Fuzzy based Spectrum Handoff and Channel Selection for Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Computer, Control, Informatics and its Applications, Jakarta, pp. 23 – 28.
- [12] Konishi, Y., Masuyama, H., Kasahara, S. and Takahashi, Y. (2013) 'Performance Analysis of Dynamic Spectrum Handoff Scheme with Variable Bandwidth Demand of Secondary Users for Cognitive Radio Networks', Wireless Networks Journal, vol. 19, no. 5, July, pp. 607-617.
- [13] Han, H., Wu, Q. and Yin, H. (2010) 'Spectrum Sensing for Real Time Spectrum Handoff in CRNs', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Chengdu, pp. V1-480 – V1-484.
- [14] Lee, D. J. and Jang, M. S. (2009) 'Optimal Spectrum Sensing Time considering Spectrum Handoff due to False Alarm in Cognitive Radio Networks', IEEE Communications Letters, vol. 13, no. 2, December, pp. 899-901.
- [15] Pham, C., Tran, N. H., Do, C. T., Moon, S. and Hong, C. S. (2014) 'Spectrum Handoff Model based on Hidden Markov Model in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Information Networking, Phuket, pp. 406 – 411.
- [16] Lertsinsruttavee, A., Malouch, N. and Fdida, S. (2012) 'Controlling Spectrum Handoff with A Delay Requirement in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Computer Communications and Networks, Munich, pp. 1 – 8.
- [17] Yoon, S. U. and Ekici, E. (2010) 'Voluntary Spectrum Handoff: A Novel Approach to Spectrum Management in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Communications, Cape Town, pp. 1 – 5.
- [18] Zhang, L., Song, T., Wu, M., Guo, J., Sun, D. and Gu, B. (2012) 'Modeling for Spectrum Handoff based on Secondary Users with Different Priorities in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Wireless Communications & Signal Processing, Huangshan, pp. 1 – 6.
- [19] Lertsinsruttavee, A., Malouch, N. and Fdida, S. (2011) 'Spectrum Handoff Strategy using Cumulative Probability in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, Budapest, pp. 1 – 7.
- [20] Wang, S., Cao, F. and Fan, Z. (2013) 'Periodic Partial Soft Sensing and Spectrum Handoff in Cognitive Relay Networks', Conference Proceedings, Conference Proceedings, IEEE International Conference on Communications, Budapest, pp. 2683 – 2688.

- [21] Wu, Y., Hu, F., Kumar, S., Guo, M. and Bao, K. (2013) 'Spectrum Handoffs with Mixed Priority Queueing Model over Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE Global Conference on Signal and Information Processing, Austin, TX, pp. 1194 – 1197.
- [22] Kim, H. and Shin, K. G. (2008) 'Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC Layer Sensing in Cognitive Radio Networks', IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 7, no. 5, May, pp. 533-545.
- [23] Tigang, M. L. and Tong, J. L. (2013) 'Spectrum Handoff Scheme for Prioritized Multimedia Services in Cognitive Radio Network with Finite Buffer', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Chengdu, pp. 410 – 415.
- [24] Wang, L. C. and Wang, C. W. (2008) 'Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks: Reactive Sensing or Proactive Sensing', Conference Proceedings, IEEE International Performance, Computing and Communications Conference, Austin, Texas, pp. 343 – 348.
- [25] Zhou, J., Shen, Y., Shao, S. and Tang, Y. (2012) 'Optimal Location of the Secondary Base Station for Broadcasting Cognitive Radio Networks with Spectrum Underlay', Wireless Personal Communications, vol. 75, no. 2, March, pp. 1331-1342.
- [26] Wang, L. C., Wang C. W. and Chang, C. J. (2012) 'Modeling and Analysis for Spectrum Handoffs in Cognitive Radio Networks', IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 11, no. 9, September, pp. 1499-1513.
- [27] Shiang, H. P. and Schaar, M. V. D. (2008) 'Queueing based Dynamic Channel Selection for Heterogeneous Multimedia Applications over Cognitive Radio Networks', IEEE Transactions on Multimedia, vol. 10, no. 5, August, pp. 896-909.
- [28] Kannappa, S. M. and Saquib, M. (2010) 'Performance Analysis of A Cognitive Network with Dynamic Spectrum Assignment to Secondary Users', Conference Proceedings, IEEE Conference on Communications, Cape Town, pp. 1 – 5.
- [29] Ma, Z. and Wang, H. (2012) 'Dynamic Spectrum Handoff Scheme based on Queueing Theory in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, pp. 1 – 4.
- [30] Hou, L., Yeung, K. H. and Wong, K. Y. (2013) 'Modeling and Analysis of Spectrum Handoffs for Real Time Traffic in Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, International Symposium on Computing and Networking, Matsuyama, pp. 415 – 421.
- [31] Baroudi, U. and Alfadhly, A. (2011) 'Effects of Mobility and Primary Appearance Probability on Spectrum Handoff', Conference Proceedings, IEEE Vehicular Technology Conference, Yokohama, pp. 1 – 6.
- [32] Ren, C., Yu, H., Ma, C., Liu, J. and Guan, Y. (2013) 'An Energy Efficient Spectrum Handoff and Access Mechanism for the WBAN System', Conference Proceedings, IEEE International Workshop on Internet of Things, Xi'an, pp. 125 – 130.
- [33] Li, L., Shen, Y., Li, K. and Lin, K. (2011) 'TPSH: A Novel Spectrum Handoff Approach Based on Time Estimation in Dynamic Spectrum Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, Dalian, Liaoning, pp. 345 – 350.
- [34] Lertsinsruttavee, A., Malouch, N. and Fdida, S. (2014) 'Hybrid Spectrum Sharing Through Adaptive Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks', Conference Proceedings, IEEE Networking Conference, Trondheim, pp. 1 – 9.
- [35] Song, Y. and Xie, J. (2011) 'Performance Analysis of Spectrum Handoff for Cognitive Radio Ad Hoc Networks Without Common Control Channel Under Homogeneous Primary Traffic' Conference Proceedings, IEEE INFOCOM, Shanghai, pp. 3011 – 3019.
- [36] Trigui, E., Esseghir, M. and Boulahia, L. M. (2013) 'Cognitive Radio Spectrum Assignment and Handoff Decision', Conference Proceedings, IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications, London, pp. 2881 – 2886.
- [37] Chengyu, W., Chen, H. and Lingge, J. (2013) 'Spectrum Handoff Scheme based on Recommended Channel Sensing Sequence', IEEE China Communications, vol. 10, no. 8, August, pp. 18-26.
- [38] Nguyen, S. D., Pham, T. L. and Kim, D. S. (2013) 'Dynamic Spectrum Handoff for Industrial Cognitive Wireless Sensor Networks', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Industrial Informatics, Bochum, pp. 92 – 97.

- [39] Trigui, E., Esseghir, M. and Boulahia, L. M. (2013) 'Spectrum Handoff Algorithm for Mobile Cognitive Radio Users based on Agents' Negotiation', Conference Proceedings, IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, Lyon, pp. 750 – 756.
- [40] Duan, J. and Li, Y. (2011) 'An Optimal Spectrum Handoff Scheme for Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks', Advances in Electrical and Computer Engineering Journal, vol. 11, no. 3, August, pp. 11-16.