

TDMA-tabanlı bir bilişsel radyo ağının sonlu birincil ve ikincil kullanıcılar için modellenmesi, benzetimi ve çağrı başarımları için analizi

Modeling, simulation and call performance analysis of a TDMA-based cognitive radio network with finite primary and secondary users

Sedat ATMACA* 

Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 48000, Muğla

• Geliş tarihi / Received: 22.06.2023

• Kabul tarihi / Accepted: 31.10.2023

Öz

Bu makalede; TDMA-tabanlı bir bilişsel radyo ağı modellenmiş ve ağdaki ikincil kullanıcıların (İK'ların) çağrı başarımları farklı birincil ve ikincil kullanıcı trafik parametreleri ile farklı zaman dilimi sayıları için analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen modelde birincil kullanıcılar, ortam erişim kontrol mekanizmasında klasik çözümlerden farklı olarak Zaman Bölmeli Çoklu Erişim tekniği kullanmakta, ayrıca ikincil kullanıcılar, birincil kullanıcılar tarafından kullanılmayan zaman dilimlerinden fırsatçı bir yaklaşımla yararlanmaktadır. Geliştirilen ağ modelinde, birincil kullanıcıların kanala erişimde ikincil kullanıcılara göre yüksek önceliğe sahip oldukları ve ikincil kullanıcıların kanal kullanımından etkilenmedikleri varsayılmaktadır. Bilişsel radyo ağının başarımları iki boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıkları açısından analitik olarak detaylıca analiz edilmiştir. Ayrıca, ilgili ağ modelinin Monte-Carlo benzetimi gerçekleştirilmiş ve benzetim sonuçları analitik sonuçlar ile doğrulanmıştır. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, İK varış hızı $\lambda_s = 0,07$ ve zaman dilimi sayısı $N = 4$ olduğunda İK çağrı-tıkanma olasılığı 0,0347 iken $N = 6$ için bu değer %95 iyileşerek 0,00172 değerini ve $N = 8$ için ise %99 iyileşerek 0,00034 değerini aldığı görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Bilişsel radyo, Markov zinciri, TDMA

Abstract

In this article, a TDMA-based cognitive radio network is modeled and the call performance of secondary users in this network is analyzed for different primary and secondary user traffic parameters and for different numbers of time slots. In our model, primary users utilize Time Division Multiple Access technique as the media access control mechanism, differing from well-known classical approaches, and by means of an opportunistic approach, secondary users take advantage of time slots not used by primary users. In addition, in the proposed network model, it is assumed that primary users have higher priority in accessing the channel than secondary users and are not affected by secondary users' channel occupation. The performance of the cognitive radio network is analyzed in detail in terms of call-block and call-drop probabilities using a two-dimensional continuous Markov chain. In addition, the Monte-Carlo simulation of the proposed network model has been performed, and the obtained analytical results have been verified by the simulation results. According to the simulation results obtained, when the SU (secondary user) arrival rate is $\lambda_s = 0,07$ and the number of time slot is $N = 4$, the call block probability of SU is 0.0347, when the number of time slot is $N = 6$, this value is improved by 95% to 0.00172 and when the number of time slot is $N = 8$, value is improved by 99% to 0.00034.

Keywords: Cognitive radio, Markov chain, Time Division Multiple Access

* Sedat ATMACA; sedatatmaca@mu.edu.tr

1. Giriş

1. Introduction

Yeni nesil iletişim sistemleri ve teknolojileri benzeri görülmemiş bir hızla ortaya çıktıkça, kablosuz iletişim sistemleri giderek daha yaygın hale gelmektedir. Kablosuz cihazların ve sistemlerin bu hızlı gelişimiyle birlikte, spektrum kıtlığı sorunu açığa çıkmıştır. Geleneksel kablosuz spektrum tahsis tekniklerinde, sabit veya statik kanal tahsis yaklaşımı benimsendiğinden, bir kablosuz iletişim sistemi, belirli spektrum kaynaklarının özel kullanım hakkına sahiptir (Mitola & Maguire, 1999; Haykin, 2005; Bayrakdar & Çalhan, 2015; Bayrakdar & Çalhan, 2017). Bununla birlikte, birincil kullanıcı (BK) olarak da bilinen lisanslı kullanıcılara tahsis edilen spektrum kaynaklarının bazı bölümleri uygulamaların özelliklerine de bağlı olarak verimli bir şekilde kullanılamamaktadır. Ayrıca, lisanslı spektrumun kullanımı da konuma veya zamana bağlı olarak değişmektedir (Sridhara vd., 2008; Zhao & Sadler, 2007; Zhonggui & Hongbo, 2012). Bu nedenle, sınırlı olan ve BK'lar tarafından verimli şekilde faydalanılamayan spektrumun kullanımını üst düzeye çıkarmak için yeni yöntem ve teknikler geliştirilmektedir. Bilişsel Radyo (BR); verimsiz olarak kullanılan lisanslı spektrumdan yararlanmanın bir yolu olarak ön görülmekte ve kablosuz iletişim için spektrum kıtlığı sorununu hafifletme amacıyla temel bir teknoloji olarak kabul edilmektedir (Sridhara vd., 2008; Zhao & Sadler, 2007; Namdar & Başgmüş, 2017). BR ağları, BK'lara müdahale etmeden lisanslı spektrumu geçici olarak başkaca kullanıcılara tahsis ederek spektrumun verimliliğini önemli ölçüde artırabilmektedir. Bu ağlar, ikincil kullanıcı (İK) olarak da bilinen BR kullanıcılarına, BK'lar aktif iletim durumunda değilken, mevcut spektrum boşluklarından (spectrum holes) yararlanma fırsatı sağlar. İK'lar, BK'ların iletişimine müdahale etmeden, spektrum boşlukları olarak da bilinen spektrumun boş kısımlarını dinamik olarak belirler ve bunlara erişir. Bu nedenle, BR ağları sayesinde, spektrumdaki boşlukların geçici olarak kullanılmasını sağlanarak mevcut spektrumdaki kanal kullanım oranları artırılmaktadır.

Son yıllarda BR ağlarının başarımları hakkında çok sayıda araştırma yapılmıştır. Hassani ve Berangi (2019), İK çağrı-tıkanma (call blocking) olasılığını belirlemek için bilişsel radyo duyurucu ağında (BRDA) ayrık zamanlı bir Markov zinciri modeli geliştirmiş ve modelden elde edilen sonuçları ns-2 benzetim programıyla doğrulamıştır. Sunulan bu modelde, birincil ve ikincil kullanıcıların varış-oranları (arrival rates) ve servis-oranları (service rates) dikkate alınarak İK'ların çağrı-tıkanma olasılıkları hesaplanmıştır. Ancak, İK çağrı-düşme (call drop) olasılıkları incelenmemiştir. Salameh vd. (2020), BR ağlarının başarımlarını değerlendirmek için dört boyutlu bir sürekli Markov zinciri modeli sunmuştur. Sunulan model, BK'lar için yoğun (bursty) varış-süreci ile yanlış-alarm (false alarm) ve hatalı-sezme (miss detection) olasılıklarını değerlendirmelerde dikkate alınmıştır. Makalede hem birincil hem de ikincil kullanıcılar için çağrı-tıkanma olasılıkları incelenerek ikincil kullanıcılar için ortalama gecikme (mean delay) başarımlarının esas alındığı analizler yapılmaktadır. Salameh vd. (2017)'nin yaptığı çalışmada, reaktif karar verme ile spektrum el-değiştirme (spectrum hand-off) yaklaşımı kullanılarak BR ağlarındaki İK başarımları incelenmiştir. Çalışmada kullanılan ana başarımlar İK ortalama gecikmesi, İK kesintisi-olasılığı (interruption probability), İK atılma-olasılığı (discard probability) ve İK çağrı-tıkanma olasılığıdır. İK başarımları üzerindeki algılama zamanı (sensing time) ve algılama oda boyutu (sensing room size) gibi parametrelerin etkisini incelemek için iki farklı sürekli zamanlı Markov zinciri modeli geliştirilmiştir. Değerlendirilen sonuçlara göre, İK başarımları özellikle BK varış-sürecindeki yoğunluk (bursty) derecesine göre belirlenmektedir. Chu vd. (2014), öncelikli trafiklerin düşünüldüğü BR ağlarında İK çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıklarını hesaplamak için üç boyutlu bir Markov zinciri modeli geliştirmiştir. Bu çalışmada, İK'ların başarımları çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıkları elde edilerek değerlendirilmiştir. Park vd. (2016)'nın yaptığı çalışmada, spektrum el-değiştirme (hand-off) özelliği olmadan BRDA'da öncelikli dinamik kanal tahsisli bir dinamik spektrum erişim (DSE) yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen çözümde tek öncelik derecesine sahip BK'lar ve iki farklı önceliğe sahip İK'lar bulunmaktadır. Çalışmada çağrı-tıkanma olasılığı, zorla çağrı-sonlandırma olasılığı (forced call termination probability) ve çağrı-tamamlama oranı (call completion rate) açısından başarımların analizleri sunulmuştur. İki farklı lisanslı spektrum havuzundan oluşan heterojen lisanslı bantlarda BR tasarsız (Ad-Hoc) ağlarında çalışan bir spektrum yönetim tekniği üç boyutlu (3D) Markov zinciri kullanılarak Jee vd. (2020) tarafından modellenmiştir. Geliştirilen model ile havuz-ıçi (inter-pool) ve havuzlar-arası (intra-pool) spektrum el-değiştirme kavramları sunulmakta ve heterojen lisanslı spektrum ortamlarında İK'ların başarımlarını hesaplamak için çağrı-tıkanma olasılığı, çağrı-tamamlanmama olasılığı (call non-completion probability) ve iş çıkarma oranı (throughput) metrikleri hesaplanmaktadır. Değerlendirilen sonuçlar, BR tasarsız ağlarda başarımların açısından önemli bir iyileşme elde edildiğini vurgulamaktadır. Tang vd. (2006), BR başarımlarını analiz etmek için üç boyutlu bir Markov zincir modeli önermiştir. Ayrıca, ikincil kullanıcı çağrılarının zorla sonlandırma olasılığını (forced termination probability) azaltmak için yeni bir kanal rezervasyon planını da dikkate

almışlardır. [Tumuluru vd. \(2012\)](#), iki farklı İK önceliği düşünerek dinamik spektrum erişimi gerçekleştiren BR ağlarında çağrı-tıkanma olasılığı, zorla çağrı sonlandırma olasılığı, çağrı tamamlama oranı ve ortalama el-değiştirme gecikmesi gibi başarımleri kullanılarak İK'ların başarımlarını değerlendirmişlerdir. [Qiming vd. \(2010\)](#) sonlu sayıda BK ve sonsuz sayıda İK düşünülen bir BR ağ modelinde, üç farklı kanal tahsis tekniğinin çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme başarımlerini sürekli zamanlı Markov zinciri kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, rasgele ve rasgele olmayan kanal tahsis tekniklerinde en düşük çağrı-tıkanma olasılığının elde edilebileceği, rezervasyona dayalı kanal tahsis tekniğinde ise en düşük çağrı-düşme olasılığının elde edilebileceği gösterilmiştir.

Yukarıda kısaca özetlenen ilgili bazı önemli çalışmalardan farklı olarak bu makalede sunulmakta olan çalışmada ise merkezi ağ topolojisi kullanan, BK ve İK olmak üzere iki farklı kullanıcı sınıfı içeren ve zaman paylaşımli ortak bir iletişim kanalını kullanan bir kablosuz ağ modeli esas alınmaktadır. Geliştirilen ağ modelinde BK'lar, ilgili zaman diliminin (time slot) lisanslı kullanıcılarıdır ve kanala erişim için İK'lara göre yüksek önceliğe sahiptir. BK'lar, kanala erişmek için ortam erişim kontrol mekanizması olarak klasik yaklaşımlardan farklı olarak Zaman Bölmeli Çoklu Erişim (Time Division Multiple Access - TDMA) ([Bandırmalı vd., 2005](#)) tekniğini esas alırken, İK'lar ancak BK'lar tarafından kullanılmayan ve boşta kalan kanalları kullanabilmektedir. Geliştirilen BR ağ modelinin başarımlarını değerlendirmek ve analiz etmek için 2-boyutlu sürekli Markov zinciri modeli önerilmektedir. Ayrıca, ilgili ağ modelinin Monte-Carlo benzetimi Python programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Yukarıda ele alınan bazı çalışmalarda ([Tang vd., 2006](#)) kullanılan 3-boyutlu Markov zincirlerinde 3. boyut, ağda meydana gelen özel durumları (çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme) göstermek için kullanılmıştır. Bu gösterim, ilgili durumların hesaplanmasını kolaylaştırmaktadır. Ancak bu makale çalışmasında, ilgilenilen özel durumlara ait hesaplamalar Markov zincirindeki bu durumlar kullanılarak da elde edilebildiğinden, 2-boyutlu Markov zinciri tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın literatürde sunulan benzerlerinden iki önemli farkı bulunmaktadır: (1) BK ve İK'lar TDMA ortam erişim tekniğini kullanan merkezi ağ topolojisine sahiptir. (2) Literatürde sunulan çoğu çalışmada BK ve/veya İK sayılarının sonsuz olduğu kabul edilmektedir. Bu makalede sunulan çalışmada ise hem BK sayısının hem de İK sayısının sonlu olduğu gerçeğe daha yakın bir bilişsel radyo ağ modeli üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. Başarımlar değerlendirilmelerinde çağrı-tıkanma olasılığı ve çağrı-düşme olasılığı metrikleri kullanılmıştır. Birincil ve ikincil kullanıcıların, değişken varış-hızları, servis-hızları ve kanal sayıları için İK çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıkları karşılaştırmalı olarak analiz bölümünde sunulmaktadır.

Makale beş ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2'de geliştirilen BR ağ modeli ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Geliştirilen ağ modeli esas alınarak BR kullanıcılarının başarımlerini analizleri Bölüm 3'te yapılmaktadır. Sayısal sonuçlar Bölüm 4'te verilerek sonuçlar Bölüm 5'te sunulmaktadır.

2. Önerilen bilişsel radyo ağ modeli

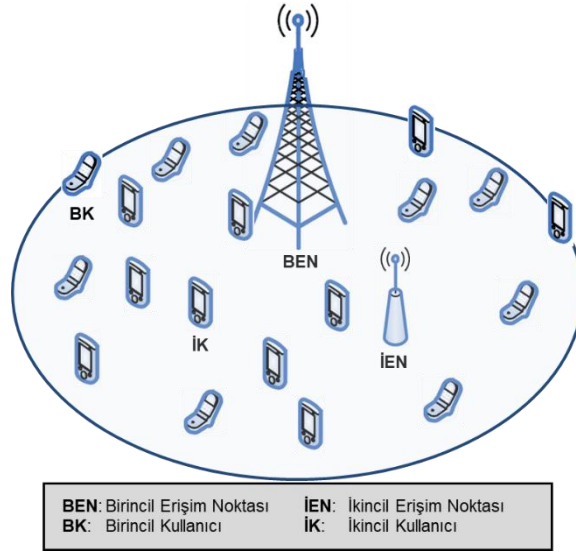
2. Proposed cognitive radio network model

Bu makalede, BK'lar ve İK'lar ile bunlara ait erişim noktalarının aynı iletişim alanında bir arada bulunduğu merkezi yapıda bir bilişsel radyo ağ modeli hedeflenmektedir. Geliştirilen bilişsel radyo ağ modeli Şekil 1'de görülmektedir. BK'lar, yasal kanal kullanım yetkisine sahip kullanıcılarıdır ve ortam erişim tekniği olarak Zaman Bölmeli Çoklu Erişim kullanarak haberleşirler. TDMA tekniğinde kullanıcılar bir zaman çerçevesinde (time frame) kendilerine tahsis edilen tek bir zaman diliminde (time slot) iletişimlerini gerçekleştirirler. Gerçekleştirilen modelde İK'lar, BK'lar ile hassas zaman senkronizasyonuna sahiptirler ve BK'lar tarafından kullanılmayan boş zaman dilimlerini kullanarak haberleşirler.

İletişim alanı içinde, birisi BK'lar diğeri İK'lar için olmak üzere iki erişim noktası bulunur. Birincil erişim noktası, sadece birincil kullanıcılara tahsis edilen zaman dilimlerini tutmak için, ikincil erişim noktası ise hem birincil hem de ikincil kullanıcılara ait zaman dilimlerini tutmak için zaman dilimi tahsis tablosu oluştururlar. Birincil erişim noktası, herhangi bir zaman dilimi (kanal) talep eden bir birincil kullanıcıya zaman dilimi tahsis tablosunu kullanarak boşta olan zaman dilimlerinden (eğer varsa) birisini rastgele tahsis eder. Birincil erişim noktası ikincil kullanıcıların kanal kullanım kayıtlarını tutmaz ve bağlantı isteğinde bulunan bir BK'ya, İK tarafından kullanılıyor olsa bile rastgele bir zaman dilimi tahsis eder.

İK erişim noktası ve kullanıcıları spektrum sezme yeteneğine sahiptir ve önerilen bilişsel radyo ağ modeli kapsamında İK'ların spektrum boşluklarını hatasız belirledikleri kabul edilmektedir. İK erişim noktası,

çerçevdeki boş zaman dilimlerini belirlediğinden dolayı kanal isteğinde bulunan bir İK'ye eğer varsa boş olan (kullanılmayan) kanallardan birini tahsis eder.



Şekil 1. Önerilen bilişsel radyo ağ modeli
Figure 1. Proposed Cognitive Radio network model

2.1. Önerilen bilişsel radyo ağ modelinde kullanılan çerçeve yapısı

2.1.1. The frame structure of the proposed cognitive radio network model

Şekil 2'de ağ modelinde kullanılan çerçeve yapısı ile İK çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme durumları gösterilmektedir. Şekil 2.a'da verilen çerçeve süresi (frame time) N eşit boyutlu zaman diliminden oluşmaktadır. Çerçevdeki bir zaman dilimi herhangi bir BK veya herhangi bir İK tarafından kullanılabilir veya hiçbiri tarafından kullanılmadan boşta (idle) kalabilir (Şekil 2.b). Bir zaman dilimi herhangi bir BK veya İK tarafından kullanılıyorsa "aktif zaman dilimi" (active time slot), kullanılmıyorsa "boş zaman dilimi" (idle time slot) olarak tanımlanır. Bir zaman dilimi boşta ise, bu durum İK'lara yararlanma fırsatı sunar. Şekil 2.b'de BK'lara tahsis edilen zaman dilimi mavi çerçeveyle, İK'lara tahsis edilen zaman dilimi gri dokulu çerçeveyle ve kullanılmayan çerçeveler ise boş gösterilmiştir.

2.2. Önerilen bilişsel radyo ağ modelinde kullanılan kanal tahsis algoritması

2.2.1. The channel allocation algorithm used in the proposed cognitive radio model

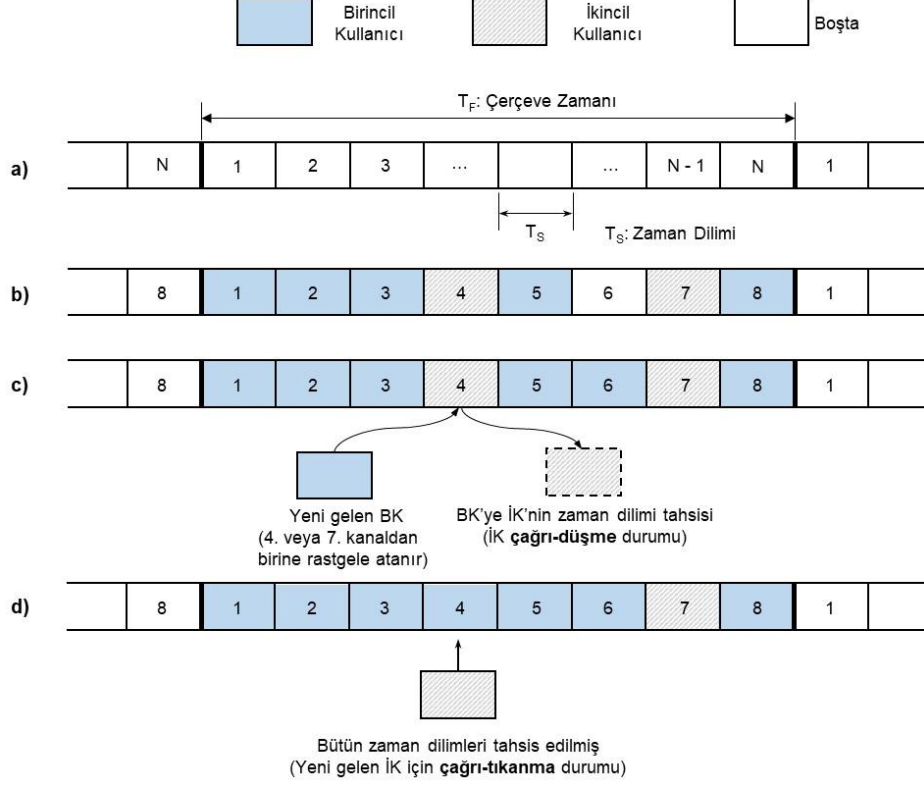
Geliştirilen BR ağ modelinde "rassal kanal atama" algoritması esas alınmıştır. Bu algoritmaya göre birincil erişim noktası, kanal isteğinde bulunan yeni bir BK için boşta veya İK tarafından kullanılan bir kanalı rastgele tahsis eder. Birincil erişim noktası bir çerçeve boyunca sadece BK'lara tahsis edilen zaman dilimlerinin kaydını tuttuğundan İK'lara tahsis edilen zaman dilimlerinden habersizdir. Diğer bir ifadeyle, yeni gelen bir BK'ye İK'nin mevcut kullandığı bir zaman dilimi de tahsis edilebilir. Bu durumda İK için bir çağrı-düşme durumu meydana gelir (Şekil 2.c). Bu algoritmaya göre, ikincil erişim noktası da kanal isteğinde bulunan yeni bir İK için sadece boşta olan kanallardan birini rassal olarak tahsis eder.

Bir çerçevdeki tüm zaman dilimleri birincil veya ikincil kullanıcılar tarafından kullanıldığında ve boşta zaman dilimi olmadığında ise doğal olarak yeni gelen İK için bir zaman dilimi tahsis edilemez. Bu durumda, yeni gelen İK kullanıcı için çağrı-tıkanma durumu oluşur (Şekil 2.d).

Geliştirilen modelde esas alınan rassal kanal atama algoritmasında BK'ların ve İK'ların zaman dilimi kullanımına ilişkin özel durumlar aşağıda sıralanmıştır;

- (i) Tüm zaman dilimleri yalnızca BK'lar tarafından kullanılıyorsa, yeni gelen bir kanal kullanım isteği, ister birincil kullanıcılardan ister ikincil kullanıcılarından olsun, çağrı-tıkanma (call block) durumu oluşur (yani kanal isteğinde bulunan kullanıcıya kanal tahsisi gerçekleştirilemez).

- (ii) Tüm zaman dilimleri birincil ve ikincil kullanıcılar tarafından kullanılıyorsa, yeni gelen ikincil kullanıcılar için kanal tahsisi yapılamaz ve bu kullanıcılar için çağrı-tıkanma durumu oluşur. Bu durum İK'lar için çağrı-tıkanma olarak tanımlanır.
- (iii) İK'lar tarafından kullanılan bir zaman dilimi, BK'lardan gelen yeni bir çağrı isteği için tahsis edilebilir (overlay). Bu durumda İK'nin bağlantısı düşer. Bu durum ikincil kullanıcılar için çağrı-düşme (call drop) olarak tanımlanır.



Şekil 2. Önerilen modelde kullanılan çerçeve yapısı ve çağrı-tıkanma ile çağrı-düşme durumları
Figure 2. The frame structure of the proposed cognitive radio network model and call block and call drop cases.

3. Önerilen bilişsel radyo ağ modelinin başarımlı analizi

3.1. Performance analysis of the proposed cognitive radio network model

Önerilen bilişsel radyo ağ modelinin başarımlı analizinde iki boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılmıştır. Ağ modelinin Monte-Carlo benzetimi Python programlama dili ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te ağ modelinde kullanılan "rassal kanal tahsis" algoritmasının 4 kanal için Markov zinciri modeli görülmektedir. Markov zincirinde her bir durum (i, j) ikililerinden oluşmaktadır (Qiming vd. 2010). Bu durumda Markov zincirine ait durum uzayı S aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$S = \{(i, j) | 0 \leq i, j \leq N \text{ ve } i + j \leq N\} \quad (1)$$

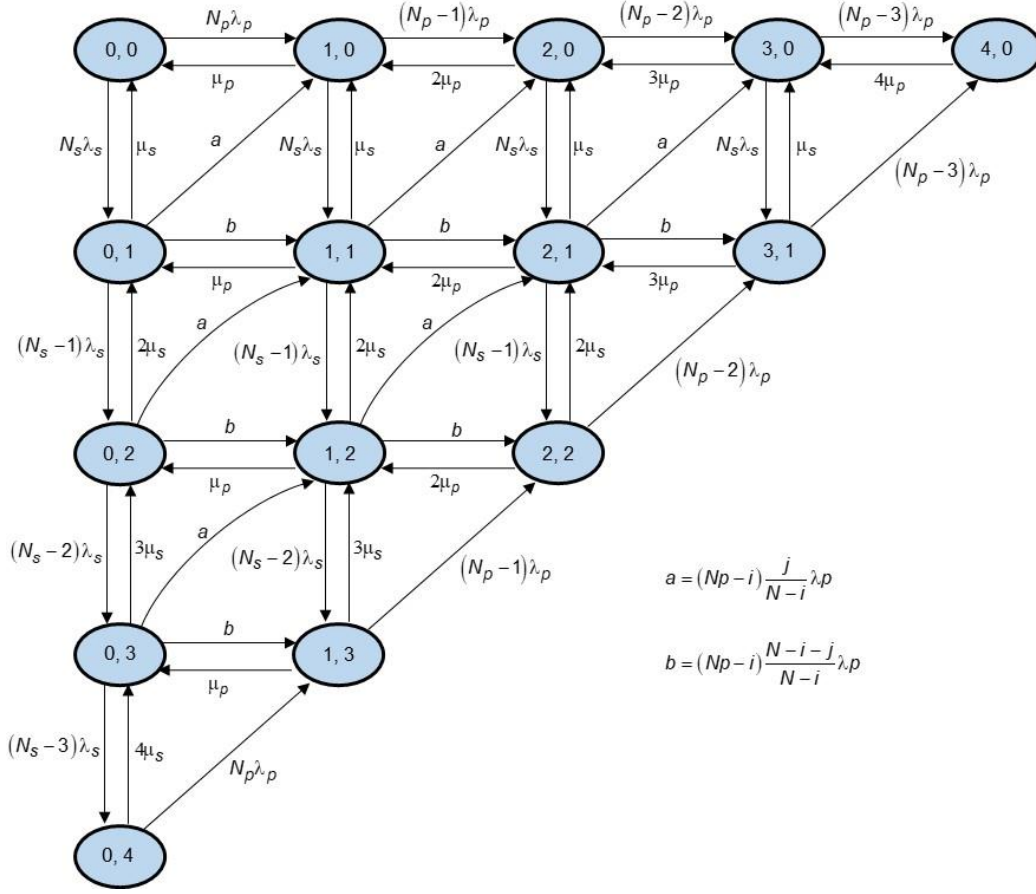
Markov zinciri modelinde görülen "a" geçişi, sisteme yeni gelen bir BK için mevcut durumda İK tarafından kullanılan bir kanal tahsis edildiğini ve bu andaki İK çağrı-düşme durumunu, "b" geçişi ise yeni gelen bir BK için mevcut durumda İK tarafından kullanılmayan bir kanal tahsis edildiğini göstermektedir.

Markov zincirine ait $i = 0, j = 0$; $i = 0, j = N$; $i = N, j = 0$ durumları için denge eşitlikleri sırasıyla Denklem (2), Denklem (3) ve Denklem (4) te verilmektedir.

$$P(i, j)(N_p \lambda_p + N_s \lambda_s) = P(i + 1, j) \mu_p + P(i, j + 1) \mu_s \quad (2)$$

$$P(i, j)(N_p \lambda_p + N_s \mu_s) = P(i, j - 1)(N_s - (j - 1)) \lambda_s \quad (3)$$

$$P(i, j) \mu_p = P(i - 1, j + 1)(N_p - (i - 1)) \lambda_p + P(i - 1, j)(N_p - (i - 1)) \lambda_p \quad (4)$$



Şekil 3. Kanal tahsis algoritmasının 4 kanal için Markov zinciri modeli

Figure 3. Markov chain model of the channel assignment algorithm for the 4 channels

$i = 0, 1 \leq j < N$ durumu için denge eşitlikleri Denklem (5) ile verilmiştir.

$$P(i, j)(N_p \lambda_p + (N_s - j) \lambda_s + j \mu_s) = P(i, j - 1)(N_s - (j - 1)) \lambda_s + P(i, j + 1)(j + 1) \mu_s + P(i + 1, j) \mu_p \quad (5)$$

$1 \leq i < N, j = 0$ durumu için denge eşitlikleri Denklem (6) ile verilmiştir.

$$P(i, j) \left((N_p - i) \lambda_p + N_s \lambda_s + i \mu_p \right) = P(i - 1, j) \left((N_p - (i - 1)) \lambda_p + P(i + 1, j)(i + 1) \mu_p + P(i, j + 1) \mu_s \right) + P(i - 1, j + 1) \left((N_p - (i - 1)) \left(\frac{1}{N - (i - 1)} \right) \lambda_p \right) \quad (6)$$

$1 \leq i < N, j = N - i$ durumu için denge eşitlikleri Denklem (7) ile verilmiştir.

$$P(i, j) \left((N_p - i) \lambda_p + j \mu_s + i \mu_p \right) = P(i, j - 1)(N_s - (j - 1)) \lambda_s + P(i - 1, j + 1) \left(N_p - (i - 1) \right) \lambda_p + P(i - 1, j) \left((N_p - (i - 1)) \left(\frac{N - (i - 1) - j}{N - (i - 1)} \right) \lambda_p \right) \quad (7)$$

$1 \leq i < N$, $1 \leq j < N - i$ durumu için denge eşitlikleri Denklem (8) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 P(i, j) & \left((N_p - i)\lambda_p + (N_s - j)\lambda_s + i\mu_p + j\mu_s \right) \\
 & = P(i - 1, j) \left(N_p - (i - 1) \right) (N - (i - 1) - j) / (N - (i - 1)) \lambda_p \\
 & + P(i, j - 1) (N_s - (j - 1)) \lambda_s + P(i + 1, j) (i + 1) \mu_p + P(i, j + 1) (j + 1) \mu_s \\
 & + P(i - 1, j + 1) \left((N_p - (i - 1)) (j + 1) / (N - (i - 1)) \right) \lambda_p
 \end{aligned} \tag{8}$$

Markov zinciri modelinde kullanılan bütün durumların olasılıkları toplamı 1 olduğundan bu durum Denklem (9) ile ifade edilebilir.

$$\sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N P(i, j) = 1 \tag{9}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı-tıkanma olasılığı Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (10) ile hesaplanır;

$$\begin{aligned}
 P_B & = \frac{\text{Toplam İK çağrı tıkanma oranı}}{\text{Toplam kullanıcı çağrı oranı}} \\
 & = \sum_{i=0}^N \sum_{i+j=N}^N \frac{\lambda_s P(i, j)}{(N_p - i)\lambda_p + (N_s - j)\lambda_s}
 \end{aligned} \tag{10}$$

İkincil kullanıcılara ait çağrı-düşme olasılığı Markov zinciri modelinde ilgili durumlar kullanılarak Denklem (11) ile hesaplanır;

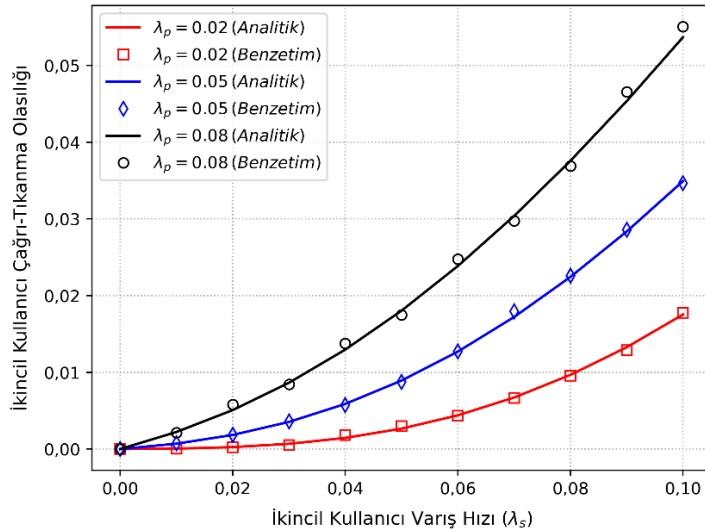
$$\begin{aligned}
 P_D & = \frac{\text{Toplam İK çağrı düşme oranı}}{\text{Toplam kullanıcı çağrı oranı}} \\
 & = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=1}^N \frac{(N_p - i)\lambda_p P(i, j)}{(N_p - i)\lambda_p + (N_s - j)\lambda_s}
 \end{aligned} \tag{11}$$

4. Sayısal sonuçlar ve analiz

4. Numerical results and analysis

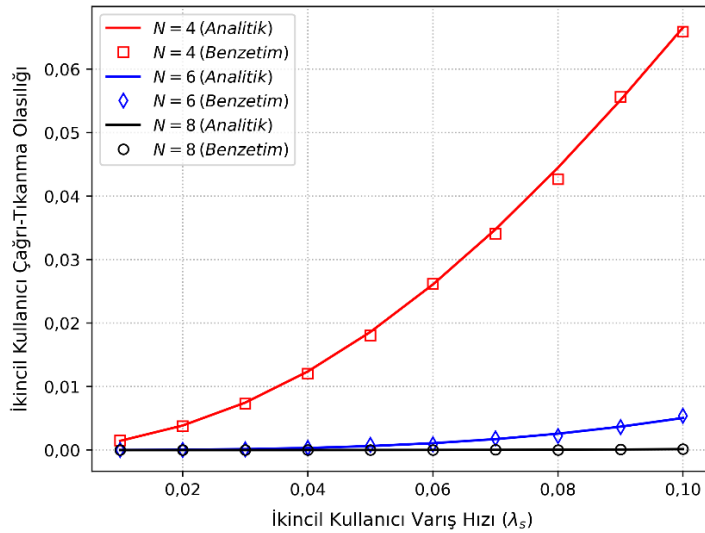
Önerilen BR ağ modeli kullanılarak yapılan çalışmalarda analitik sonuçlar, birincil ve ikincil kullanıcıların değişken varış hızı, servis hızı ve zaman dilimi sayısı için elde edilmiştir. Değerlendirme için esas alınan başarımlar ölçütleri ise bilişsel radyo ağının çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıklarıdır. Bütün grafiklerdeki elde edilen değerler için BK sayısı $N_p = 10$ ve İK sayısı $N_s = 10$ alınmıştır.

Şekil 4'te artan İK varış hızları (0'dan 0,1'e) ve farklı BK varış hızları için İK çağrı-tıkanma olasılıklarının analitik sonuçlar ile doğrulanmış benzetim sonuçları görülmektedir. Bu grafiklerde elde edilen değerler için kullanılan zaman-dilimi sayısı $N = 10$, BK servis hızı $\mu_p = 0,4$ ve İK servis hızı $\mu_s = 0,5$ 'tir. Grafikler incelendiğinde, sabit bir İK varış hızı için BK varış hızı arttığında İK çağrı-tıkanma olasılıklarının da arttığı görülmektedir. Örneğin; İK varış hızı 0,06 için BK varış hızı 0,02 iken İK çağrı-tıkanma olasılığı 0,0044 değerini almaktadır. Ancak, BK varış hızı 0,05 olduğunda bu değer 1,88 kat, BK varış hızı 0,08 olduğunda ise 4,42 kat artmıştır. Çünkü ağdaki kullanıcıların zaman dilimi kullanım oranı arttığında sistemde boşta kalan mevcut zaman dilimi sayısı azalmakta ve İK'lar için çağrı-tıkanma olasılıkları artmaktadır. Şekilde görülen grafikler arasındaki açıklığın 0'dan itibaren giderek artmasının sebebi ise hem BK varış hızının hem de İK varış hızının artmasıdır. Her iki kullanıcı türünün de kanal kullanım oranı arttığından İK çağrı-tıkanma olasılığı üstel olarak hızla artmaktadır.



Şekil 4. Artan İK varış hızları ve farklı BK varış hızları için İK çağrı-tıkanma olasılıkları
Figure 4. Call block probabilities for increasing SU arrival rates and different PU arrival rates

Şekil 5'te artan İK varış hızları ve farklı zaman dilimi sayıları için İK çağrı-tıkanma olasılıklarının analitik ve benzetim sonuçları görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, sabit bir İK varış hızı için zaman dilimi sayısı (N) arttığında İK çağrı-tıkanma olasılıklarının azaldığı görülmektedir. Örneğin; İK varış hızı 0,07 için $N = 4$ iken İK çağrı-tıkanma olasılığı 0,0347 değerini almaktadır. Ancak, $N = 6$ olduğunda bu sonuç %95 iyileşerek 0,00172 değerini ve $N = 8$ için ise %99 iyileşerek ise 0,00034 değerini almıştır. Buradan elde edilen sonuçlar da dikkate alınarak İKlar için gerekli hizmet derecesi (grade of service) düşünülerek en yüksek İK varış hızı değeri de belirlenebilmektedir.

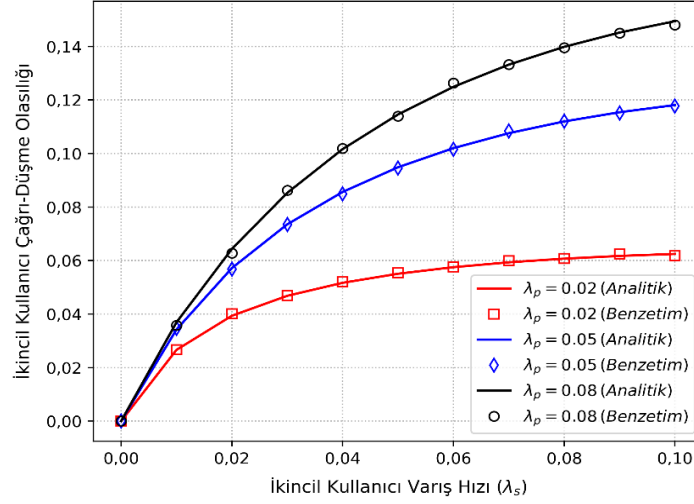


Şekil 5. Artan İK varış hızları ve farklı zaman dilimi (N) sayıları için İK çağrı-tıkanma olasılıkları
Figure 5. Call block probabilities for increasing SU arrival rates and different time slot numbers (N)

Şekil 4 ve 5'teki sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, makalede sunulan modelin farklı zaman dilimi sayısı (N) ve ikincil kullanıcı varış hızı değişkenleri ile çağrı-tıkanma olasılık ilişkisini doğrulamak için kullanılabilirliği görülmektedir.

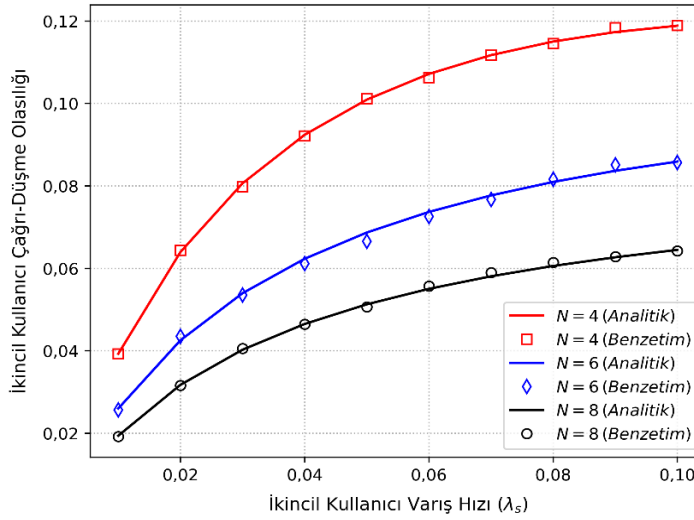
Şekil 6'te artan İK varış hızları (0'dan 0,1'e) ve farklı BK varış hızları için İK çağrı-düşme olasılıklarının analitik sonuçlar ile doğrulanmış benzetim sonuçları görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, $\lambda_p = 0,02$ iken λ_s , 0'dan 0,1'e artarken İK çağrı-düşme olasılığı 0'dan artarak 0,00624 değerine yükselmektedir. $\lambda_p = 0,08$ iken ve λ_s , 0'dan 0,1'e arttırıldığında ise İK çağrı düşme-olasılığı da 0'dan artarak 0,1494 değerine

ulaşmaktadır. Örneğin $\lambda_s = 0,1$ için $\lambda_p = 0,02$ iken İK çağrı düşme-olasılığı 0,0624 olmaktadır. Ancak, aynı λ_s değeri için $\lambda_p = 0,08$ olduğunda İK çağrı düşme olasılığı 1,39 kat artarak 0,149 değerini almaktadır.



Şekil 6. Artan İK varış hızları ve farklı BK varış hızları için İK çağrı-düşme olasılıkları
Figure 6. Call drop probabilities for increasing SU arrival rates and different PU arrival rates

Şekil 7'deki sonuçlar incelendiğinde $N = 4$ ve λ_s 0,01'den 0,1'e artarken İK çağrı-düşme olasılığı 0,0393'den üstel olarak artarak 0,1188 değerine ulaşmaktadır. $N = 8$ iken ise, λ_s 0,01'den 0,1'e artarken İK çağrı düşme-olasılığı da 0,0194'ten artarak 0,0644 değerine yükselmektedir. Örneğin, $\lambda_s = 0,1$ için $N = 4$ iken İK çağrı düşme-olasılığı 0,1188 olmaktadır. Ancak, aynı λ_s değeri için $N = 8$ olduğunda İK çağrı düşme olasılığı % 45 azalarak 0,0644 değerini almaktadır.



Şekil 7. Artan İK varış hızları ve farklı zaman dilimi (N) sayıları için İK çağrı-düşme olasılıkları
Figure 7. Call drop probabilities for increasing SU arrival rates and different time slot numbers (N)

Özellikle Şekil 6 ve 7'de sunulan sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, makalede sunulan modelin ikincil kullanıcı varış hızı ve çağrı düşme olasılık ilişkisini doğrulamak için kullanılabilirliği gösterilmiştir.

5. Sonuç

5. Conclusion

Bu makalede sunulan çalışmada, geleneksel çözümlerden farklı olarak TDMA tabanlı merkezi yapıda geliştirilen bir bilişsel radyo ağ modeli sunulmuştur. Bu modelde kullanılan İK'ların çağrı-tıkanma ve çağrı-

düşme başarımları analizleri gerçekleştirilmiştir. BR ağında, ortak bir iletişim kanalını zaman paylaşımını kullanan BK'lar ve aynı kanalı fırsatçı yaklaşımla kullanan İK'lar bulunmaktadır. Önerilen bilişsel ağ modelinde İK'ların çağrı kabul başarımları bir 2-boyutlu sürekli Markov zinciri kullanılarak analiz edilmiştir. BR ağ modelinin başarımları değerlendirmek için BK'ların ve İK'ların değişken varış-hızı, servis hızı ve kanal sayısı (zaman dilimi) kullanılarak İK çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıkları hem analitik hem de benzetim çalışması ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, diğer parametreler sabit tutulup birincil kullanıcıların varış hızları artırıldığında, BR ağında İK'ların çağrı-düşme ve çağrı-tıkanma olasılıkları da artmıştır. Ancak diğer parametreler sabit tutularak sistemde kullanılan zaman dilimi sayısı artırıldığında, İK'ların çağrı-düşme ve çağrı-tıkanma olasılıkları azalmıştır. Örneğin, $\lambda_s = 0,1$ ve $N = 4$ için İK çağrı düşme-olasılığı 0,1188 iken aynı λ_s değeri için $N = 8$ olduğunda İK çağrı düşme olasılığı % 45 iyileşerek 0,0644 değerini almaktadır. Gelecekteki çalışmalar için bu makalede önerilen model esas alınarak İK'lar için belirlenen hizmet derecesi için en yüksek İK varış hızları ve en iyi zaman dilimi sayıları elde edilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, farklı kanal tahsis algoritmaları kullanılarak çağrı-tıkanma ve çağrı-düşme olasılıklarında iyileştirmeler elde edilmesi öngörülmektedir.

Teşekkür / Katkı belirtme

Acknowledgement

Makalenin inceleme ve değerlendirme aşamalarında yapmış oldukları katkılardan dolayı editör ve hakemlere teşekkür ederim.

Yazar katkısı

Author contribution

Makalenin tamamı başlıca yazar tarafından yazılmıştır.

Etik beyanı

Declaration of ethical code

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

Çıkar çatışması beyanı

Conflicts of interest

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Kaynaklar

References

- Bandırmalı, N., Çeken, C., Bayılmış, C., & Ertürk, İ. (2005). Kablosuz erişim yöntemlerinin karşılaştırmalı incelemesi. *TMMOB Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi* (ss. 22-25), İstanbul.
- Bayrakdar, M. E., & Çalhan, A. (2015). Bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme. *Sakarya University Journal of Science*, 19(3), 291-302. <https://doi.org/10.16984/SAUFENBILDER.81445>
- Bayrakdar, M. E., & Çalhan, A. (2017). Kablosuz bilişsel radyo ağlarında spektrum el değiştirme için öncelikli kuyukları ve yapay zekâ teknikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 303-315. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.338042>
- Chu, T. M. C., Phan, H., & Zepernick, H. J. (2014). Dynamic spectrum access for cognitive radio networks with prioritized traffics. *IEEE Communications Letters*, 18(7), 1218-1221. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.2319253>
- Hassani, M. M., & Berangi, R. (2019). Impact of the primary user on the secondary user blocking probability in cognitive radio sensor networks. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(3), 2081-2092. <https://doi.org/10.3906/elk-1706-292>
- Haykin, S. (2005). Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 23(2), 201–220. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2004.839380>

- Jee, A., Hoque, S., & Arif, W. (2020). Performance analysis of secondary users under heterogeneous licensed spectrum environment in cognitive radio ad hoc networks. *Annals of Telecommunications*, 75, 407-419. <http://dx.doi.org/10.1007/s12243-020-00761-8>
- Mitola, J., & Maguire, G. Q. (1999). Cognitive radio: making software radios more personal. *IEEE Personal Communications*, 6(4), 13-18. <https://doi.org/10.1109/98.788210>
- Namdar, M., & Başgümüş, A. (2017). Outage performance analysis of underlay cognitive radio networks with decode-and-forward relaying. *Cognitive Radio, IntechOpen*, 25-38. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69244>
- Park, J. H., & Chung, J. M. (2016). Prioritized channel allocation-based dynamic spectrum access in cognitive radio sensor networks without spectrum handoff. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 266, 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13638-016-0764-4>
- Qiming, T., Chuan, M., Guanding, Y., & Aiping, H. (2010). Analysis of cognitive radio spectrum access with finite primary users and infinite secondary users. *International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)* (pp. 1-5), China, <https://doi.org/10.1109/WCSP.2010.5633740>
- Salameh, O., Bruneel, H., & Wittevrongel, S. (2020). Performance evaluation of cognitive radio networks with imperfect spectrum sensing and bursty primary user traffic. *Mathematical Problems in Engineering*, 64, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2020/4102046>
- Salameh, O., Turck, K. D., & Bruneel, H. (2017). Analysis of secondary user performance in cognitive radio networks with reactive spectrum handoff. *Telecommunication Systems*, 65, 539-550. <https://doi.org/10.1007/s11235-016-0250-7>
- Sridhara, K., Chandra, A., & Tripathi, P. S. M. (2008). Spectrum challenges and solutions by cognitive radio: an overview. *Wireless Personal Communications*, 45, 281-291. <https://doi.org/10.1007/s11277-008-9465-6>
- Tang, P. K., Chew, Y. H., Ong, L. C., & Haldar, M. K. (2006). Performance of secondary radios in spectrum sharing with prioritized primary access. *IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, (pp. 1-7), USA. <https://doi.org/10.1109/MILCOM.2006.302214>
- Tang, W., Yu, H., Han, Y., & Li, S. (2012). An analytical performance model considering access strategy of opportunistic spectrum sharing system. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 24(11), 1200-1212. <https://doi.org/10.1002/cpe.1890>
- Tumuluru, V. K., Wang, P., Niyato, D., & Song, W. (2012). Performance analysis of cognitive radio spectrum access with prioritized traffic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(4), 1895-1906. <https://doi.org/10.1109/TVT.2012.2186471>
- Zhao, Q., & Sadler, B. M. (2007). A survey of dynamic spectrum access. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3), 79-89. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.361604>
- Zhonggui, M., & Hongbo, W. (2012). Dynamic spectrum allocation with maximum efficiency and fairness in interactive cognitive radio networks. *Wireless Personal Communications*, 64, 439-455. <https://doi.org/10.1007/s11277-010-0208-0>