

# BİLİŞSEL RADYO MAC KATMANI SPEKTRUM DİNLEMESİ YAZIN ARAŞTIRMASI PROBLEMLER ve ÖNERİLEN YÖNTEMLER

Suzan Bayhan

Boğaziçi Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Telematik Araştırma Merkezi, İstanbul

<http://www.cmpe.boun.edu.tr/~bayhan>

Bilişsel Radyo Ağlarının temel çalışma prensiplerinden biri ikincil kullanıcıların daha öncelikli olan lisans sahibi Birincil Kullanıcıların iletişimine zarar vermeden iletişimlerini gerçekleştirmeleridir. Yani, bir frekansın boş olduğu ve iletişim için uygun olduğu kararını vermiş olan bir ikincil kullanıcı, iletimine herhangi bir Birincil Kullanıcı geldiği anda ara vermeli ve iletimine devam edebilmek için başka bir kanal aramalıdır. Burada Birincil Kullanıcının iletime başladığı kararını vermek fiziksel katmanda (PHY) uygulanacak yöntemlerle yapılacakken, yeni bir kanal arama kararı, hangi kanalların ne zaman ve ne kadar süre boyunca dinleneceği kararını vermek Ortam Erişim Katmanı'nda (MAC) uygulanacak yöntemlerle planlanır.

BR sistemler, BK sistemlerinin etkin olmadığı frekans ve zaman aralıklarında yer paylaşım (overlay) olarak kaynakları kullanabilecekleri gibi aynı anda BR sistemlerle birlikte (underlay) iletimlerine devam edebilirler. İlk durumda birincil kullanıcının iletimi durumunda ikincil sistem kesinlikle iletim yapamazken ikinci durumda birincil kullanıcının zarar görmeyeceği “girişim sıcaklığı limiti” dikkate alınarak ikincil sistem daha az güçle iletim yapabilir. Ancak, girişim sıcaklığı hesaplanmasındaki pratik zorluklar ve otoritelerce kabul edilmiş operasyon limitlerinin tanımlanmamış olması nedeni ile ilk çalışma kipi tercih edilen yöntemdir. PHY katmanında Birincil Kullanıcı Tespiti için spektrum analizi yöntemleri uygulanır. En bilinen ve sıklıkla tercih edilen yöntemler: eşleşen filtrelili belirleme <sup>1</sup> (matched filter detection), enerji yardımıyla belirleme (energy detection) ve döngüsel durağan özellik belirleme (cyclostationary feature detection)'dir.

Bilişsel radyo sistemlerinin uygulanmasındaki temel gerekçe günümüzde spektrumun statik erişim politikaları nedeni ile yeterli derecede etkin kullanılmadığı ve buna bağlı olarak sanal bir “spektrum kıtlığı” yaşandığı gerçeğidir. Bu nedenle, bilişsel radyo sistemlerinde *spektrum verimi* (spectrum efficiency) uygu-

<sup>1</sup>İngilizce terimlerin çevirilerinde <http://cr.cs.itu.edu.tr/> adresindeki çevirilerden yararlanılmıştır.

lanacak yöntemler için en önemli başarımlar kriterlerindedir. Spektrum verimi, çerçeve (frame) temelli bir sistem düşünülürse bir çerçeve içinde ikincil kullanıcıların iletim yaptığı zamanların toplam çerçeve zamanına oranıdır.  $T_f$  uzunluğunda bir çerçeve düşünelim: bu çerçevenin  $t_s$  kadarlık zamanında boş bir kanal bulmak için kanal dinleme ve arama işlemleri yapılsın. İletim için uygun bir kanal bulunduktan sonra iletim yapılan süre ise  $t_t$  olsun. O halde bir çerçeve zamanı ( $T_f$ ) aşağıda verilen Denklem [1] ile ifade edilirken spektrum verimi ( $\eta$ ) (Denklem 2) ile hesaplanır.

$$T_f = t_t + t_s \quad (1)$$

$$\eta = \frac{t_t}{T_f} \quad (2)$$

Burada  $t_s$  ile belirtilen süre aslında yeni bir boş kanal bulma süresi olduğundan daha çok istatistiksel spektrum analizi yöntemleriyle belirlenecek bir süre olmakla birlikte aynı zamanda MAC katmanını kararlarını da içerir. Örneğin, sönümü yüksek bir kanalda (deep fading) bir birincil kullanıcının varlığı tespiti daha uzun zaman alırken, aynı koşullarda (Birincil-İkincil kullanıcı arasındaki mesafe ve Birincil Kullanıcı iletim gücü gibi diğer tüm değişkenler aynı iken) açık kanal durumlarında sinyal seviyesinin yüksekliğinden dolayı birincil kullanıcının varlığı konusunda karar verme süreci daha çabuk tamamlanabilir.

Bilişsel radyoların çoklu antene sahip olduğu düşünülürse aynı anda farklı frekanslar dinlenebilir. Ancak çoklu anten yapısı cihazların maliyeti ve karmaşıklığını artırır. Yazındaki çalışmalara bakıldığında, bazı çalışmalar her bir frekans için ayrı bir alıcı-verici donanımının varlığını farzederken bazı çalışmalar daha gerçekçi tek anten üzerinde durmaktadır. İkincil kullanıcıların tekli anten sistemi donanımına sahip olduğu durumlar dikkate alındığında, spektrum algılamada dikkat edilmesi gereken noktalardan biri de kanalların hangi sıra ile dinlemesidir. Örneğin,  $N$  tane frekansın olduğu bir sistem düşünülürse İkincil kullanıcı o an iletim yapmakta olduğu kanalı bırakmak durumunda kaldığında diğer  $N - 1$  kanalı hangi sıra ile dinlemelidir? Literatürde bu problem “kanal arama sırası” problemi olarak adlandırılmaktadır [1].

Hiçbir tekniğin uygulanmadığı bir yöntem “rasgele arama” (random search) yöntemidir. Yani kullanıcı var olan  $N - 1$  kanaldan rasgele bir  $i$  kanalı seçer ve onu  $t_s^i$  süre boyunca analiz eder. Her frekansın kanal karakteri farklı olabileceğinden kanal dinleme süreleri  $t_s^i$  farklılık gösterebilir. İkincil kullanıcının rasgele seçtiği dinleme sırası ile oluşturulan *kanal dinleme listesini*  $S$  ile gösterelim ve bu listedeki  $j$  konumundaki eleman  $S_j$  ile ifade edilsin. En iyi ihtimal düşünülürse, ikincil kullanıcı iletim yapılacak yeni kanalı ilk dinlediği kanalın boş olması ile bulacaktır. Bunun için harcanan süre  $t_s^{S_0}$  olacaktır. En kötü ihtimal ise, boş kanalın dinlenen en son kanal olacağı durumdur. Bu durumda ise harcanacak toplam süre:

$$T_s = \sum_{k=0}^{N-2} t_s^{S_k} \quad (3)$$

Toplam  $N - 1$  kanal olduğu ve her bir adımda boş bir kanal bulma ihtimali aynı olduğu düşünülürse, boş bir kanal bulmak için harcanacak zamanın beklenen değeri:

$$E[T_s] = \frac{t_s^{S_0} + \sum_{k=0}^{N-2} t_s^{S_k}}{2} \quad (4)$$

olacaktır. Denklem [4] ile verilen ifadede her bir kanal için farklı  $t_s^i$  değerleri dikkate alınmıştır. Tüm kanalların aynı özelliklere sahip olduğunu varsayarsak bu ifadedeki  $t_s^i$  değerlerini  $t_s$  ile değiştirebiliriz. Bu durumda toplam dinleme süresinin beklenen değeri:

$$E[T_s] = \frac{t_s + \sum_{k=0}^{N-2} t_s}{2} = \frac{N \times t_s}{2} \quad (5)$$

Yukarıdaki ifadeden de görüleceği gibi sistemde kullanılacak kanal sayısı  $N$  arttıkça kanal arama için harcanan süre  $E[T_s]$  artacak ( $O(N)$ ) ve dolayısı ile spektrum verimi düşecektir. Bu nedenle kanal arama yöntemleri spektrum verimliliği açısından oldukça önemlidir ve rasgele kanal arama yönteminin yerine daha etkin yöntemler gereklidir.

Kim ve Shin [2] çalışmalarında kanal dinleme algoritmalarını *proaktif* ve *reaktif* olmak üzere ikiye ayırır. *Proaktif kanal dinleme*, kullanıcıların periyodik olarak “dinleme dönemi” denilen zaman aralıklarında kanalı dinlemesi ve kanal hakkında bilgi sahibi olmasıdır. Düzenli olarak toplanan bu bilgiler, kullanıcı kanal değiştirmek zorunda kaldığı anda hangi kanalın öncelikle dinlenmesi konusunda karar vermek için kullanılabilir. *Reaktif kanal dinleme* ise kullanıcının iletim yaptığı frekans bandında bir birincil kullanıcının iletme başlaması anında veya kendisi bir iletim yapacağı için yaptığı zorunlu dinlemedir. Daha önceden düzenli olarak bilgi toplanmadığından burada hangi kanalın öncelikle dinlenmesi kararının verilmesi için uygulanacak yöntem genellikle daha önce bahsi geçen *rasgele kanal arama* yöntemidir. Bu iki kanal dinleme yöntemleri arasında harcanan enerji ( $E$ ), spektrum verimliliği ( $\eta$ ) ve boş kanal bulma zamanı ( $t_s$ ) açısından farklılıklar vardır. Proaktif kanal dinleme, kanallar hakkında düzenli olarak veri toplanmasına olanak sağladığından ve böylece boş kanal bulma zamanını kısalttığından daha tercih edilir olmasına rağmen, düzenli olarak kanal dinleme işlemi gerçekleştirildiğinden harcanan enerji ve spektrum verimi açısından reaktif dinlemeye göre daha az verimlidir. Nasıl bir kanal dinleme mekanizmasının uygulanacağı kullanılacak uygulamanın gecikmeye karşı duyarlılığı ve sistemin enerji kısıtlamaları dikkate alınarak belirlenebilir.

Literatürde proaktif kanal dinleme, kanal bulma zamanı ve birincil kullanıcı tespitini kolaylaştırdığından daha çok kabul gören bir metottur. Ayrıca, proaktif kanal dinleme aynı zamanda reaktif dinlemeyi de bünyesinde barındırır. Birincil kullanıcı tespiti sinyal tespiti araştırmalarında sıkça çalışılan araştırma

alanlarındandır. Bilişsel radyo özelinde dikkate alındığıdaysa, problem sadece bir sinyalin varlığını tespit etmekten öte o sinyalin varlığı ve sinyalin bir birincil kullanıcı sinyali olduğu tespitidir. Çünkü, aynı anda incelenen bantta bir ikincil kullanıcı da sinyal yayımlıyor olabilir. Birincil kullanıcının varlığı ve ikincil kullanıcının varlığı tespiti bilişsel radyo sisteminde farklı hareketlere neden olur. En basit haliyle, birincil kullanıcı varlığı incelenen bantta ikincil kullanıcı sinyal iletiminin kesinlikle durdurulmasını gerektirirken, o bantta yayın yapan başka bir ikincil kullanıcının varlığı bunu gerektirmeyebilir. İkincil kullanıcılar arasındaki spektrum paylaşımı kuralları “spektrum etiği” adı verilen kurallar çerçevesince ikincil sistem tarafından belirlenir.

Proaktif kanal dinlemede periyodik kanal dinleme için ayrılan zamanlarda ikincil kullanıcılar iletimlerine ara verdiklerinden, ortamdaki sinyal sadece birincil kullanıcılardan kaynaklanacaktır. Bu da yukarıda değindiğimiz sinyalin birincil kullanıcı sinyali mi yoksa ikincil kullanıcı sinyali mi olduğu sorusunu otomatik olarak kaldırır. Proaktif dinlemenin dinleme periyodu sistemin spektrum verimini doğrudan etkileyecek bir noktadır. Bununla birlikte bu dinleme zamanlarının ne zaman olacağı bir başka noktadır. Örneğin dört tane kanaldan oluşan Şekil 1’de gösterildiği gibi bir sistem düşünelim.  $C_i$  ile göstereceğimiz ( $i \in (0, 4)$ ) her bir kanalın aynı zamanda dinleniyor olması spektrum verimliliği açısından daha etkin bir yöntem olmasına rağmen spektrum boşluklarının bulunması açısından etkin olmayabilir. Örneğin, Şekil 1’de gösterildiği gibi kanal dinleme zamanlarında  $C_1$  hep dolu olmasına rağmen genel olarak yoğun birincil kullanıcı trafiğine sahip bir frekans değildir. Ancak dinlenen zaman aralığındaki durumu bir sonraki zaman aralığına kadarki durumunu (*dolu* veya *boş*) belirlediğinden pek çok spektrum boşluğu olmasına rağmen bu boşluklar bulunamayacaktır. Literatürde, farkedilemeyen bu boşluklar “keşfedilmemiş boşluk” veya “kayıp spektrum fırsatı” olarak adlandırılır [2]. Bilişsel radyo MAC katmanı dinleme protokolleri kayıp spektrum fırsatlarını en aza indirecek şekilde tasarlanmalıdır. Genel olarak, boşlukların ikincil kullanıcı tarafından farkedilebilmesi her bir kanal durumu hakkında ikincil kullanıcının gerçeğe yakın tahminler yapabiliyor olmasını gerektirir. Diğer bir deyişle, eğer ikincil kullanıcı periyodik olarak topladığı bilgilerden çeşitli yöntemlerle<sup>2</sup> kanalın boşluk-doluluk durumunu tahmin edebilirse keşfedilmemiş boşlukları en aza indirgeyecek şekilde hangi kanalı ne zaman ve hangi sıklıkla dinleyeceğine karar verebilir. Bu problem “birincil kullanıcı trafik tahmini” olarak da adlandırılmaktadır.

Bilişsel radyonun temel yöntemi ikincil kullanıcının boş bulduğu frekansları kullanabilmek için frekanstan frekansa atlamasını gerektirmekle birlikte, frekans değişimi de enerji ve zaman kaynaklarından kullanılarak gerçekleştirildiği için MAC protokol tasarımıdaki önemli başarımlar parametrelerinden biri de kanal değiştirme sıklığı veya sayısıdır. Örneğin, ikincil kullanıcı çeşitli yöntemlerle iki tane kanalın boş olduğunu bulmuş ise, bunlardan daha uzun süre boş kalacak kanalı tercih etmelidir. Aksi takdirde kısa bir süre sonra belki de iletimini henüz tamamlamamışken yeni bir birincil kullanıcı gelecek ve yeniden boş

<sup>2</sup>Literatürde, birincil trafik tahmini için SARIMA, POMDP, stokastik süreç analizi gibi yöntemler bulunmaktadır.

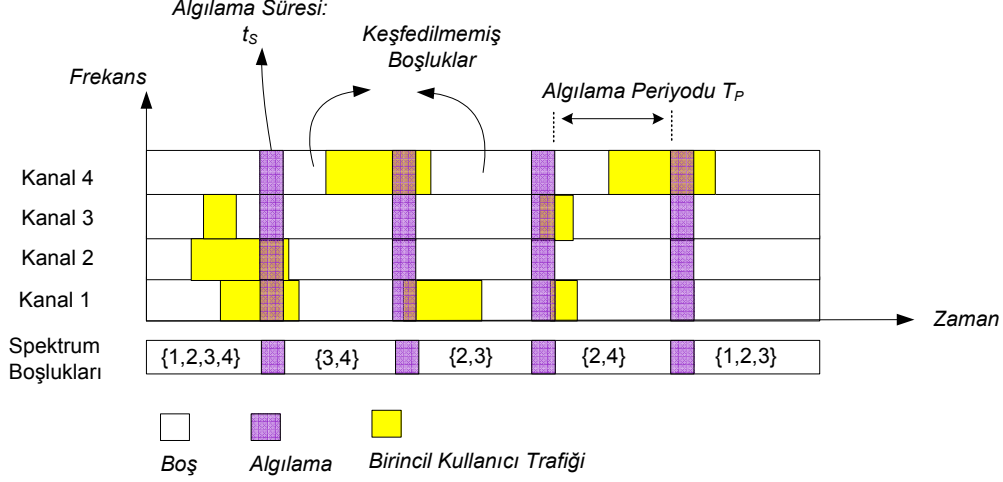


Figure 1: Farklı özelliklere sahip frekans kanalları aynı dinleme periyotlarıyla dinlendiğinde keşfedilmemiş boşluklar artabilir.

kanal aramak zorunda kalacaktır. Enerji ve gecikme maliyetine ek olarak çok sık frekans değişimi özellikle multi-hop ağlarda her frekans değişiminde yönlendirme tablolarının da güncellenmesini gerektireceğinden oldukça maliyetli olacaktır. Tüm bu nedenlerden dolayı, spektrumun etkin kullanımı önemli bir başarımlar parametresi olmakla birlikte hoplama sayısını da mümkün olduğunca düşük tutmak gerekmektedir.

Cormio ve Chowdhury [3] çalışmalarında MAC katmanı tasarım sorunlarından bahsetmiş ve detaylı bir yazın araştırması sunmuşlardır. Bu çalışmada, MAC protokolleri rasgele erişim (random-access), zaman dilimli (time-slotted) ve hibrit protokoller olmak üzere üçe ayrılmıştır. Genel olarak, MAC katmanındaki algılama konusundaki çalışmalar, belirli bir belirleme olasılığı ve yanlış alarm olasılığını sağlayacak şekilde algılama süresi eniyilemesi, iletim süresi eniyilemesi veya birleşik eniyileme çalışmalarıdır. İletim süresi eniyilemesi, iletim süresini eniyileyerek aslında sistem çıktısını en yükseğe çıkarmaya çalışır. Açık Spektrum Erişimi MAC protokolleri tasarımı üzerine yapılan bir başka çalışma [4]'dür. Pawelczak ve çalışma arkadaşları bu makalede, yazında yer alan tasarısız kipte çalışan 20 MAC protokolünü incelemiş ve MAC protokol tasarımındaki temel noktalara işaret etmişlerdir. Ayrıca, BK trafiği tahmini ve modellenmesinin önemine işaret edilmiş, BK trafiği tahmini için bir mobil iletişime ayrılmış 446.04-467.82 MHz bandında 11:00-20:00 saatleri arasında spektrum sinyal ölçümleri yapılmıştır.

Luo ve Roy [1] rasgele arama, sıralı arama ve n-adımlı sıralı arama yöntemlerinin başarımlar karşılaştırmalarını yapmışlardır. Rasgele aramada, ikincil kullanıcı boş bir frekans bulana kadar rasgele kanal seçer. Sıralı aramada ise, sadece dinlenmeye başlanılan kanal rasgele seçilir. Örneğin  $N$  kanalın olduğu bir sistemde ilk olarak algılanacak kanal  $i$  ise ( $i \in (0, N - 1)$ ), kanalın dolu olması halinde bir sonraki dinlenecek kanal  $(i + 1) \bmod (N - 1)$  dir. Bu yöntemde, dinlenmeye başlanan kanal önem taşımaktadır. Örneğin, birincil

kullanıcı etkinliğinin belirli bir kanal aralığında yoğunlaştığı durumlarda eğer kullanımın yoğun olduğu bu kanallardan birinden spektrum algılaması başlarsa kanal bulma süresi uzayabilir. Bu problemi çözmek için n-adımlı kanal arama yöntemi önerilmiştir. Burada yine önceki iki yöntem gibi dinlemeye rasgele bir kanal ( $i$ ) seçilerek başlanır. Ancak sonrasında  $((i+n) \bmod (N-1))$  kanalı dinlenir. Sıralı arama n-adımlı aramanın  $n=1$  olduğu özel durumdur. Yazarlar, bu yöntemin kanalların kullanımının birbiriyle korelasyonlu olması ve olmaması durumundaki başarımlarını incelemişlerdir. Ancak her zaman  $N$  tane boş kanal olacağı kabülü gibi gerçekçi olmayan kabüllerden yola çıkarak başarımların analizi gerçekleştirmişlerdir. Çalışma kanal arama sırasının ve kanalların kullanım durumlarının tahmininin önemine dikkat çeken ilk çalışmalardandır.

Birincil kullanıcı trafiği istatistiklerinden yararlanarak kanal arama MAC protokolünün başarımlarını arttıracaktır. Örneğin, neredeyse her zaman BK trafiğine sahip kanallar İK tarafından dikkate alınmayarak gereksiz enerji harcanması engellenebilir [5]. Ancak a priori (önsel) bilginin sağlanması gerçekçi bir durum olmadığından, birincil kullanıcı trafiği kestiriminde olasılıksal yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin, Song çalışmalarında [6] “öğrenen otomata” teknikleri kullanarak kanal seçiminin kanaldan kanala atlama fiyatını düşüreceğini belirtmiş ve önerdikleri yöntemin  $\epsilon$ -optimal bir çözüme yakınsadığını analitik olarak kanıtlamıştır. Motamedi ve Bahai [7] çalışmalarında yüksek güçte yayın yapan IEEE 802.11 birincil kullanıcıları ve düşük güçte yayın yapan IEEE 802.15.4 ikincil kullanıcılarının olduğu bir sistemde dinamik kanal seçim problemi üzerine odaklanmışlardır.  $M$  kanaldan oluşan bir sistemde ikincil kullanıcılar biri her zaman ortak kontrol kanalını (common control channel CCC) dinleyen iki antene sahiptir. Kontrol kanalındaki tüm iletimin hatasız yapıldığı kabulü varken veri iletimi çarpışmalardan kaynaklı hata ve paket kaybı içerebilir. Birincil kullanıcı trafiği olan IEEE 802.11 trafiği iki durumlu bir Markov zinciri şeklinde modellenmiş ve bu model şebekede paket korsanı (sniffer) kullanılarak doğrulanmıştır. Bayeziyen öğrenme yöntemleri kullanılarak ikincil kullanıcıların iletim yapacakları kanalları seçme yöntemleri geliştirilmiştir. Bir  $t$  anında kanal  $i$ 'nin kalitesi o kanala ait durum bilgisi  $x_i(t)$  ile gösterilir.

$$x_i(t) = (s_i(t), f_i(t), b_i(t)) \quad (6)$$

$$i_i(t) = s_i(t) + f_i(t) \quad (7)$$

$b_i(t)$ :  $t$  anına kadar  $i$  kanalının dinlenmesi sonucunda meşgul olarak değerlendirilmesi sayısı

$i_i(t)$ :  $t$  anına kadar  $i$  kanalının dinlenmesi sonucunda boş olarak değerlendirilmesi sayısı

$s_i(t)$ :  $t$  anına kadar o kanalda kaç tane başarılı iletim yapıldığı bilgisi

$f_i(t)$ :  $t$  anına kadar o kanalda kaç tane başarısız iletim yapıldığı bilgisi

İkincil kullanıcılar  $t+1$  anındaki kanal durumu olan  $x_i(t+1)$  tahminini yapmak için  $x_i(t)$  değerinden faydalanırlar. Bir kanalın boş bulunma ihtimali  $p_i^{idle}$  ve kanalın boş olması halinde  $L$  zaman aralığı

boyunca sürececek bir iletimin başarılı bir şekilde tamamlanması ihtimali  $p_i^{success}$ , kullanıcının her adımdaki davranışı ve bu davranışı nedeni ile aldığı geribesleme kullanılarak Bayez kurallarına göre güncellenir.

Her bir kanalın Bernoulli dağılımı ile boş veya dolu olduğunu ve kanalların birbirinden bağımsız olduğunu kabul edersek, kanala erişim problemi *çok kollu haydut* (multi-armed bandit-MAB) problemi olarak düşünülebilir. Her bir kanal bir makinaya karşılık gelir ve her makinanın kendine ait beklenen bir ödül değeri vardır. Ancak ikincil kullanıcı bu kanallar (makinalar) hakkında bilgiye sahip olmadığından hangi kanalı seçmesi gerektiğini kullanarak (exploitation) ve araştırarak (exploration) bulabilir. Burada amaç maksimum ödülü alabilmektir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta, ikincil kullanıcı geçmiş verilere dayanarak en iyi ödül değerine sahip olduğunu düşündüğü kanalı her seferinde seçerse, aslında belki de daha iyi olan başka bir kanalı kaçırmış olacaktır. Bu senaryoda sonlu zamanlı bir ödül değerlendirilmiştir. Bilişsel radyo kanal seçimi probleminde seçilen kanalın meşgul olması durumunda ödül sıfır iken ( $R=0$ ), seçilen kanalda başarılı bir iletim yapılması ödülü  $R = L$  ve bir çarpışma yaşanması durumundaki ödül (ceza)  $R = -\alpha \times L$ 'dir.  $\alpha$  değeri “enerji maliyet değeri” olarak adlandırılmakta ve enerji tüketimi-üretilen iş arasındaki ödünleşimi (trade-off) temsil eder. Bu problemin literatürdeki çözümünde herbir makina için bir *Gittins indeksi* hesaplanmaktadır ve her adımda en yüksek Gittins indeksine sahip makina seçilmektedir. [8] BR kanal seçiminde kullanılan farklı MAB algoritmalarını incelemiştir.

BK trafik kestiriminde kullanılması önerilen yöntemlerden biri de Dönüşümlü Yenilenme Süreci (Alternating Renewal Theory- ART) teorisidir. Bu teoriden yararlanarak birincil trafiğin modellenebileceğini öneren çalışmalardan ikisi [9] ve [2]'tir.

Sharma ve çalışma arkadaşları [9] CSMA-CA tabanlı bir BK şebekesinde- yani BKların iletim yapmadan önce kanalı dinleyip herhangi bir sinyal olması halinde (İkincil kullanıcı sinyali de dahil) bir müddet bekledikten sonra tekrar kanalı dinleyip boş bulmaları halinde iletme başladığı bir sistemde- ikincil kullanıcıların BK temel çalışma prensibini ihlal etmeden çalışması için ART'den yararlanılabileceğini gösterir. Zaman dilimli sistemlerde BK trafiğe zaman dilimi başında başladığından zaman dilimi başında kanalın İKlarca dinlenmesi ve boş olması halinde zaman dilimi süresince İK iletiminin yapılması BK sistemine zarar vermeyecektir. Ancak, CSMA-CA sistemlerde BK herhangi bir anda iletme başlayacağından İK trafiğinin BK trafiğini hiç bir koşulda engellememesini sağlamak oldukça zordur. Bir kanalın boş olduğunu belirleyip iletme başlayan İK ne kadar süre bu kanalda kalmalıdır? Her çerçeve başında ortamın dinlenmesi MAC katmanında oldukça masraflı olacaktır. Kanalın  $N$  çerçeve süresinde bir dinlenmesi ve bu aralıkta iletimin yapılması ise BK trafiğine zarar verebilir. Ayrıca, her kanalın dinamikleri farklı olacağından bir kanal için belirlenen uygun  $N$  sayısı bir diğer kanal için uygun bir değer olmayabilir. Bu nedenle, ART kullanılarak bir kanalın “kalan ömrü” (residual life) hesaplanır ve o süre boyunca İK iletme devam eder.

“Var (on)” ve “Yok (off)” şeklinde sadece iki durumdan birinde olabilecek bir sistem düşünelim. Sistem

$t = 0$  anında “var” durumunda olsun ve bu durumda rastgele bir  $X_1$  zamanı kadar bulunduktan sonra “yok” durumuna geçip  $Y_1$  zamanı kadar da bu durumda bulunsun. Süre sona erdiğinde “var” durumuna geçsin ve  $X_2$  süresince bu durumda bulunsun. Bu süreç benzer şekilde devam etsin.  $X_i \sim F$  ve  $Y_i \sim G$  ve birbirlerinden bağımsız rastgele değişkenler olsun. Sistemin bir  $t$  anında “var” durumunda olma ihtimali  $g(t) = P(\text{sistem “var” durumundadır})$  ile gösterilsin. ART uzun vadede yani  $t \rightarrow \infty$  olması halinde,  $E[X]$  ve  $E[Y]$  sırasıyla “var” ve “yok” durumlarında kalma sürelerinin beklenen değerlerini göstermek üzere,  $g(t)$  değerini aşağıdaki şekilde tanımlar:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (g(t)) = \frac{E[X]}{E[X] + E[Y]} \quad (8)$$

$g(t)$  sistemin “var” durumunda olma olasılığını göstermektedir. Sistemin “yok” durumunda olması ihtimali ise  $P_{off} = 1 - g(t)$  yani  $\frac{E[Y]}{E[X] + E[Y]}$ ’dir. Burada  $E[X] + E[Y]$  değeri “yenilenmeler arası zaman”dır. ART’nin birincil kullanıcı tahminine uygulanmasında “kalan ömür” ve “yaş” kavramları kullanılır. Bir yenilenme süreci  $\{N(t), t \geq 0\}$  için  $t$  anındaki kalan ömrü  $\gamma_t$  bir sonraki yenilenme sürecine kadar olan süredir. Sürecin  $\delta_t$  ile gösterilen  $t$  anındaki yaşı ise en son yenilenme anından beri geçen süredir [10][11].  $S_{N(t)}$  ve  $S_{N(t)+1}$ , sırasıyla  $t$  anı öncesi ve sonrasındaki son olayları gösterebilir. Bu durumda kalan ömür, yaş ve toplam ömür  $\gamma_t$ ,  $\delta_t$  ve  $X_{N(t)+1}$  aşağıdaki şekilde hesaplanır. Şekil 2 bu kavramları görselleştirerek sunmaktadır.

$$\gamma_t = S_{N(t)+1} - t \quad (9)$$

$$\delta_t = t - S_N(t) \quad (10)$$

$$X_{N(t)+1} = \gamma_t + \delta_t \quad (11)$$

Birincil kullanıcı trafiği tahmininde birincil kullanıcı trafiğinin Şekil 3’de gösterildiği gibi 2-durumlu bir Markov zinciri şeklinde hareket etmesi ART’nin kullanılabilirliğini gösterir. BK trafiğinin kanalda bulunması “var” durumuna karşılık gelirken kanalın İK iletimi için uygun yani boş olduğu durumlar “yok” durumuna karşılık gelir. Eğer en son  $t$  anında bir kanal dinlemesi gerçekleştirilmişse, dinleme sonucunda elde edilen veriler kullanılarak dinlenen kanalın hangi ihtimalle boş olacağı yukarıdaki çıkarımlar yapılarak belirlenir. Buna göre en yüksek ihtimale sahip kanal dinlemede öncelikli olarak tercih edilir.

Song ve çalışma arkadaşları [6], kanal değiştirme maliyetine ve değişim süresinde yaşanacak paket kaybına dikkat çekerek, ikincil kullanıcıların öğrenen otomata tekniği kullanarak başarılı iletim ihtimalinin en yüksek olacağı kanalı seçeceğini göstermişlerdir. İkincil sistemin bulunduğu ortamın bilinmezliklerinden (BK trafiği ve diğer komşu İK trafiği) dolayı bu ortam bir “kara kutu” şeklinde modellenmiştir. İK, işlem ortamı konusunda hiçbir bilgiye sahip olmadığından tüm kanalların iletim için seçilme ihtimali

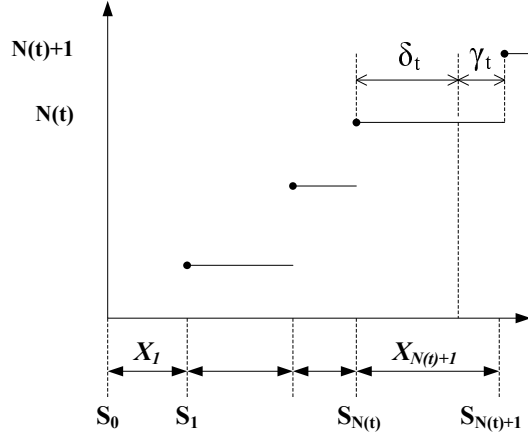


Figure 2: Dönüşümlü Yineleme Süreci Teorisi'nde kalan ömür ( $\delta_t$ ), yaş ( $\gamma_t$ ) ve toplam ömür ( $X_{N(t)+1}$ ) kavramları.

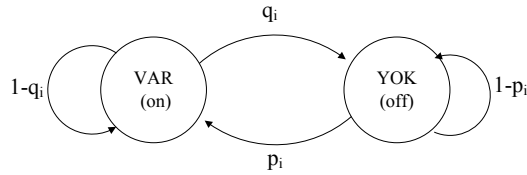


Figure 3: Birincil kullanıcı trafiği 2-durumlu Markov süreci olarak modellenenbilir [7].

$M$  kanaldan oluşan bir sistemde eşit ve  $p_i = \frac{1}{M}$ 'dir. Bu ilkendirme aşamasından sonra, her adımda İK  $P=[p_1, \dots, p_M]$  olasılık vektöründen iletim yapacağı kanalı seçer. Eğer seçilen kanal boş değilse, boş bir kanal bulunana kadar yeni bir kanal seçilir. Bu hareket sonucunda aldığı geribesleme (başarılı iletim durumunda  $\beta = 1$ , başarısız iletim durumunda  $\beta = 0$ ) değerleri öğrenme algoritmasına girdi olarak verilmiş ve  $p_i$  değerleri güncellenmiştir. En yüksek  $p_i$  değeri belirli bir yakınsama eşik değerine ulaşmaya kadar bu işlem devam eder. Stokastik kontrol teoriye göre çok hızlı değişmeyen kanallarda, hiçbir ön bilgiye gerek olmadan belirli bir öğrenme süresinden sonra en uygun (birincil kullanıcıların iletimde bulunma ihtimali en düşük olan kanal) seçilir. Bu çalışmada, BK trafiğinin ve dolayısı ile her kanalın dinamiklerinin durağan olduğu varsayılmış ve bu durumlarda en uygun kanala yakınsama incelenmiştir. Ancak kanalların farklı zaman aralıklarında farklı yoğunluklarda olduğu gerçeği dikkate alındığında daha dinamik ve adaptif bir kanal seçme mekanizması gerekmektedir.

Benzer şekilde Höyhtya ve çalışma arkadaşları [5] kestirimci kanal seçiminin kanal atlamasını %55 düşürdüğünü göstermişlerdir. Öncelikle kanal doluluğu ikilik sayı dizisi şeklinde ifade edilmiş ve bu dizi incelenerek BK trafiğinin periyodik veya stokastik yapıda olduğu çıkarımı yapılmıştır. Şekil 4'te bir kanaldaki BK trafiği ve karşılık gelen ikilik dizisi gösterilmektedir. Gerçek örüntü ile İKlarca algılanan örüntü arasında  $\Delta t$  kadarlık bir faz farkı vardır. Bu fark, spektrum analizindeki işlem gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Çalışmada, (1) periyodik ve sabit on-off süreleri, (2) sabit off ve rasgele on süresi,

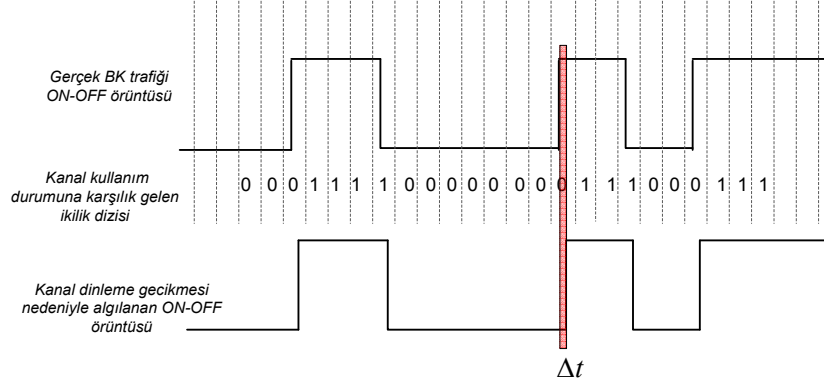


Figure 4: BK trafiği binary bit örüntüsü şeklinde ifade edilebilir.

(3) sabit on ve rasgele off süresi ve (4) rasgele on-off süreleri olmak üzere dört çeşit BK trafiği dikkate alınmıştır. Trafiğin periyodik veya stokastik yapıda olduğu kararı verildikten sonra o duruma göre akıllı kanal seçim mekanizması önerilmiştir. İkilik dizinin periyodik veya stokastik olduğunu belirlemek için çok sayıda özilinti (otokorelasyon) fonksiyonu değeri hesaplanır. Özilinti fonksiyonu ile bir sinyalin içinde periyodik bir bileşenin olup olmadığı anlaşılabilir. Bir ayrık sinyalin  $N$  örneklem üzerinden  $m$  aralıklarla özilinti fonksiyonu Denklem 12 ile hesaplanır.  $R_{xx}$  değerlerinin global ve yerel maksimum değerleri analiz edilerek periyodikliğine karar verilir. Beklenen boş kalma süresi en uzun olan kanal iletim için seçilir.

$$R_{xx}[m] = \sum_{n=0}^{N-m-1} (x[n]x[n+m]) \quad (12)$$

Şekilde de görüldüğü gibi kanalın gerçek durumu ile İKlarca algılanan durumları arasında bir fark vardır. Spektrumun hepsinin değil bir kısmının incelenebilmesi, kanal durumlarından kaynaklı (gürültü gibi) algılama hataları nedeni ile kanal POMDP ile modellenebilir. Zhao et al. [12] çalışmalarında MAC kanal dinleme politikalarını, dinleme ve erişim politikaları olarak ikiye ayırmış ve kanalı POMDP olarak modellemiştir.

Çok kanallı MAC protokolleri temel çalışma prensiplerine göre dört grupta incelenir: özgül kontrol kanalı (dedicated control channel), ortak hoplmalı kontrol kanalı (common hopping), bölünmüş faz kontrol kanalı (split phase) ve çoklu randevu kontrol kanalı (multiple rendezvous) protokolleri [13, 14]. Farklı çalışma ortamlarında farklı protokoller daha etkili başarımlar gösterebilir. Örneğin, özgül kontrol kanalı ile iletim yapan düğümler arasında senkronizasyon gerekmezken sürekli olarak kontrol kanalını dinleyecek ayrı bir radyo ekipmanı gerekir. Mo ve çalışma arkadaşları [13] bu protokollerin başarımlarını karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Pawelczak ve çalışma arkadaşları [15] bu çalışmayı temel alarak Bilişsel Radyo özelinde, BK belirleme başarımları ve kanal kullanılabilirliğindeki değişimleri de dikkate alarak çok kanallı MAC protokollerini Markov zinciri kullanarak analizini yapmışlardır. Yazarlar, her zaman diliminin bir algılama ( $t_s$ ) ve sonrasında iletim zamanından ( $t_l$ ) oluştuğunu ifade etmiş ve  $t_s$

değerinin tüm MAC protokollerinin doğrudan başarımını etkilediğinin altını çizmişlerdir. Bu çalışmada işaret edilen diğer bir husus ise kontrol kanalı olarak kontrol ve veri iletimini tüm boş kanallara yayan hoplmalı kontrol kanalı protokollerinin diğer protokollere göre daha yüksek başarımlı sağlanmasına rağmen yazında böyle bir çalışmanın olmadığıdır.

Spektrumun etkin olarak kullanılamaması ve bununla birlikte kablosuz iletişimin çok hızlı bir şekilde her alanda yer bulmasıyla spektrum talebinin artmasıyla spektrumun dinamik olarak kullanılması bir gereklilik haline gelmiştir. Ancak henüz tam anlamıyla sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak protokoller tasarlanmamıştır. MAC katmanını dinlemesi de aktif olarak çalışılan alanlardan biri olmakla birlikte henüz İK şebekesinin farklı koşullardaki farklı ihtiyaçlarına cevap verecek bir MAC protokolü bulunmamaktadır. Geliştirilecek protokol, İK cihazlarının donanım (anten sayısı, pil ömrü gibi) kısıtlarını dikkate alarak hem enerji etkinliği, hem spektrum verimi hem de birincil şebekenin girişim sıcaklığı kısıtlarını sağlamalıdır.

## References

- [1] L. Luo and S. Roy, "Analysis of search schemes in cognitive radio," *Proceedings of IEEE Workshop on Networking Technologies for Software Defined Radio Networks*, 2007.
- [2] H. Kim and K. G. Shin, "Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 5, pp. 533–545, May 2008.
- [3] C. Cormio and K. R. Chowdhury, "A Survey on MAC Protocols for Cognitive Radio Networks," *Ad Hoc Networks*, 2009.
- [4] P. Pawelczak, S. Pollin, H.-S. W. So, and A. Motamedi, "State of the Art in Opportunistic Spectrum Access Medium Access Control Design," *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom 2008. 3rd International Conference on*, pp. 1–6, 2008.
- [5] M. Hoyhtya, S. Pollin, and A. Mammela, "Performance improvement with predictive channel selection for cognitive radios," *IEEE CogART Workshop*, 2008.
- [6] Y. F. Y. Song and Y. Zhang, "Stochastic channel selection in cognitive radio networks," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'07) Washington, DC*, November 2007.
- [7] A. Motamedi and A. Bahai, "Mac protocol design for spectrum-agile wireless networks: Stochastic control approach," *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007.*, pp. 448–451, April 2007.
- [8] L.-H. Kung.

- [9] M. Sharma, A. Sahoo, and K. Nayak, "Alternating Renewal Theory-based MAC Protocol for Cognitive Radio Networks," Dept. of Computer Science and Engineering, Indian Institute of Technology, Tech. Rep. IITB/CSE/2008/July/15, TR-CSE-2008-15, 2008. [Online]. Available: <http://www.cse.iitb.ac.in/internal/techreports/reports/TR-CSE-2008-15.pdf>
- [10] "Applications of renewal theorem," <http://courses.washington.edu/inde599s/notes7.pdf>, 2008.
- [11] D. Cox, *Renewal theory*, 1962.
- [12] Q. Zhao, Y. Chen, and A. Swami, "Cognitive mac protocols for dynamic spectrum access," *Cognitive Wireless Communications Networks (Ed. Ekram Hossain and Vijay K. Barghava)*, pp. 271–301, 2007.
- [13] J. Mo, H.-S. W. So, and J. Walrand, "Comparison of multi-channel mac protocols," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 7(1), pp. 50–65, 2008.
- [14] R. Maheshwari, H. Gupta, and S. R. Das, "Multichannel mac protocols for wireless networks," *Proc. IEEE SECON 2006*, September 2006.
- [15] P. Pawelczak, S. Pollin, H.-S. W. So, A. Bahai, R. V. Prasad, and R. Hekmat, "Comparison of opportunistic spectrum multichannel medium access control protocols." in *Globecom*. IEEE, 2008.