Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 23(2), 149-164, 2017

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Kablosuz bilişsel radyo ağlarında ikincil kullanıcılar için ortam erişim kontrol protokolleri

Medium access control protocols for secondary users in wireless cognitive radio networks

Muhammed Enes BAYRAKDAR[1], Ali ÇALHAN[1]*

[1]Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye.
muhammedbayrakdar@duzce.edu.tr, alicalhan@duzce.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 01.12.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 22.02.2016 doi: 10.5505/pajes.2016.91328
* Yazışılan yazar/Corresponding author Derleme Makalesi/Review Article

Öz

Kablosuz bilişsel radyo ağ çalışmaları yeni uygulamalar için gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Kablosuz ağlarda, düğümler arası haberleşmeyi MAC (Ortam Erişim Kontrol) protokolleri sağlamaktadır. MAC protokolleri kablosuz haberleşme kanallarında oluşan gizli terminal ve sinyal kaybolma etkileri gibi hata ve problemlerden dolayı daha da önemli bir hale gelmektedir. MAC protokolleri ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen, yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu izole şekilde kullanılmıştır. Bu çalışmada, birbirinden habersiz yapılan literatürdeki bütün çalışmaların derlemesi yapılmıştır. Ayrıca, MAC protokollerinin tanımı ve kısa açıklamaları da bu çalışmada yer almaktadır. Sonuç kısmında, gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuş ve MAC alanı ile ilgili genel ifadeler vurgulanmıştır.

Anahtar kelimeler: Bilişsel radyo, Kablosuz ağlar, Ortam erişim kontrol

Abstract

Wireless cognitive radio network studies are gaining importance day by day for new applications. In wireless networks, communication between nodes is provided by MAC (Medium Access Control) protocols. MAC protocols are becoming more important due to hidden wireless communication terminal problem, signal errors and problems that occur in channels such as loss effects. Although there are many studies on the MAC protocols, majority of these studies are isolated from each other. In this study, the compilation of all work that is unaware of each other in the literature has been made. In addition, the definition of MAC protocols and brief descriptions are also included in this study. In the concluding part, some suggestions for future work are presented and general terms about MAC are emphasized.

Keywords: Cognitive radio, Wireless networks, Medium access control

1 Giriş

1970'li yıllarda, paket radyo ağları DARPA (ABD Savunma Bakanlığı İleri Araştırma Projeleri Ajansı) tarafından savaş alanlarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır [1]-[3]. Aynı yıllarda, ALOHA protokolü de tek hop atlamalı radyo ağları oluşturmak amacıyla kablosuz veri yayınlanması için kullanılmıştır. Bu durum, geniş alanda haberleşme sağlayan çoklu-hop çoklu-erişim PRNET (Paket Radyo Ağ) kavramının gelişmesine yol açmıştır [4]. Çoklu-hop terimi, verinin kaynaktan hedefe ulaşması sürecinde birçok düğümü dolaşması anlamına gelmektedir. PRNET kavramının en önemli özelliklerinden biri çok hızlı bir gelişme sağlamasıdır [5]-[7]. Ayrıca, kurulum işleminden sonra bütün sistem kendi kendini yönetmektedir. Bu ağ yapısı, gezgin radyo tekrarlayıcıları, kablosuz terminaller ve gezgin istasyonlardan oluşmaktadır. Paketler, hedefe ulaşana kadar birçok tekrarlayıcıdan geçerler [6]-[8].

Sahip olduğu özelliklerden dolayı, kablosuz bilişsel radyo ağları birçok yeni uygulamada kullanılmaktadır. Doğal afetlerde veya felaketlerde, mevcut haberleşme altyapısı kullanılmaz hale gelmektedir [8]-[10]. Böyle durumlarda, geniş bant kapasitelere sahip bilişsel radyo kablosuz ağ yapısı acil haberleşme ihtiyaçları için kullanılabilmektedir. Gezgin haberleşmede, mevcut ağ yapılarını tespit etme yeteneğine sahip olan kablosuz gezgin cihazlar geleneksel masaüstü bilgisayarlarla senkronize olabilmektedirler. PDA (Kişisel Dijital Yardımcı) cihazına sahip olan kullanıcılar, kablosuz ağ ve servis hizmeti sağlayan alışveriş merkezleri veya müze gibi yerlerde içerik duyarlı verileri indirebilirler. Kullanıcıların hareketine bağlı olarak, PDA bir ağda bulunan bilgileri kendi bulunduğu yerden elde edebilme özelliğine de sahiptir [10]-[13]. Örneğin, kullanıcı bir alışveriş merkezinin giyim bölümüne doğru ilerliyorsa, bununla ilgili kampanyalar ve fiyatlar kullanıcıya bildirilir [5],[8]. Benzer olarak, bilişsel radyo ağlar seyahat, sanal navigasyon vb. alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bilişsel radyo kablosuz ağlarda birçok önemli konu vardır. Kablosuz bilişsel radyo ağ uygulamalarının büyük çoğunluğu lisans sorunu bulunmayan ISM (Endüstri, Bilim ve Tıp) bandını kullanmaktadırlar [12]-[15]. Kablosuz alanlar çok sıkı denetimde oldukları için, kablolu ağlara göre daha sınırlı bir kanal bant genişliğine sahiptirler. Bunun yanında, kablosuz ortam hatalara duyarlıdır. Bir radyo yeterli kanal bant genişliğine sahip olsa bile; çoklu erişim, sinyal zayıflaması ve gürültü gibi etkenler kablosuz ağların etkin iş çıkarma oranlarını önemli ölçüde düşürmektedirler. Kablosuz düğümler gezgin olabildiklerinden dolayı, ağ topolojileri sıklıkla değişebilmektedir. Genel olarak, düğümler arasındaki bağlantılar çift-yönlüdür, fakat tek-yönlü bağlantıların olduğu durumlar da mevcuttur [13]-[17]. Bilişsel radyo ağ düğümleri güç kaynağı olarak batarya kullandıkları için enerji tasarruflu olmak zorundadırlar. Kablosuz ağlar dışarıdan dinlemelere açık olduğundan dolayı, genel ağ yapısındaki güvenlik önlemleri de göz önüne alınmalıdır. Yönlendirme protokolleri mevcut topoloji ile ilgili bilgiye ihtiyaç duydukları için, kaynaktan hedefe bir yol bulmak hiç de zor değildir. Bununla birlikte, mevcut yönlendirme protokolleri dinamik topolojiler için düşük iş çıkarma oranlarına sahiptirler. Bu yüzden, kablosuz bilişsel radyo ağlarda daha yeni yönlendirme protokollerine ihtiyaç duyulmaktadır [14]-[18].

MAC katmanı, ağdaki iki ya da daha fazla düğüm arasında veri transfer etmek için gereken fonksiyonları içermektedir. Fiziksel katmanda oluşan veri kayıplarını önlemek için hata düzeltimi yapmak da MAC katmanının görevidir [19]-[23]. Bu katman, çerçeveleme, fiziksel adresleme, akış ve hata kontrolleri için özel işlemler gerçekleştirmektedir. Kanal erişim için farklı düğümlerin çekişmesini çözmek de bu katmanın görevidir [20]. MAC katmanı, bir verinin bir düğümden başka bir düğüme yönlendirme yolu boyunca güvenli ve etkin bir şekilde gönderildiğiyle ilgilendiğinden dolayı, ağın QoS (Hizmet Kalitesi) parametresini de etkilemektedir. MAC protokolü tasarımı sırasında, düğümlerin gezgin olabileceği durumu da göz önünde tutulmalıdır [22].

Popüler CSMA (Taşıyıcı Sezen Çoklu Erişim) MAC protokolü ve kablolu ağlar için geliştirilen CSMA / CD (Çarpışma Tespiti) gibi türevleri, kablosuz ağlarda doğrudan kullanılamaz [20]-[22]. CSMA sisteminde, gönderici düğüm ilk olarak ortamın boşta veya meşgul olduğunu öğrenmek için ortamı sezer. Ortam meşgul ise, mevcut sinyal ile bir çarpışmayı önlemek için kendi iletimini erteler. Aksi takdirde, ilgili düğüm ortamı algılamaya devam ederken, veri iletimini de başlatır. Ancak, alıcı düğümde çarpışmalar meydana gelebilir. Kablosuz ortamda sinyal gücü, uzaklığın karesi ile orantılı olarak zayıfladığından dolayı, sinyalin varlığı alıcı düğüm tarafından algılanmayabilir [24]-[26].

2 Kablosuz bilişsel radyo ağları

Bilişsel radyo, belirli bir frekans spektrumunu sezen ve gönderici parametrelerini değiştirebilen bir radyo sistemidir [9]. Bilişsel radyo teknolojisinde, lisanslı kullanıcılara tahsis edilmiş olan frekans bantlarına erişim dinamik olarak yapılmaktadır ki bu duruma dinamik spektrum erişimi adı verilmektedir. Bilişsel radyo tekniği ilk olarak 1990'lı yılların sonunda J. Mitola ve GQ. Maguire isimli iki kişinin yaptığı çalışmalar sonucunda ortaya çıkmıştır. Bu teknik ortaya çıktığı yıldan itibaren geliştirilmiştir ve farklı tanımlamalarla günümüze kadar gelmiştir [10]-[14]. IEEE (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü) 1900.1 çalışma grubunun yaptığı bilişsel radyo tanımı aşağıdaki gibidir:

"Bilişsel radyo, bulunduğu ortamı algılayabilen ve algılama sonuçlarına göre çıkarım yapabilen radyo sistemleridir. Bu sistemler; bilgi tanımlaması, çıkarım ve makine öğrenme mekanizmalarını kullanarak iletişim sağlarlar. Ayrıca, işlem yapılan ortama bağlı olarak çalışma parametrelerini dinamik olarak değiştirebilirler."

Bilişsel radyo, kullanım kolaylığı, verimli oluşu ve güvenli spektrum kullanımı sağlaması sebebiyle büyük ilgi görmektedir [15]. Ayrıca, lisanslı kullanıcıların gönderimlerine hiçbir girişimde bulunmadan lisanslı olmayan kullanıcılara da spektrumdan yararlanma fırsatı verir. Sıralanan özelliklerinden dolayı, bilişsel radyo teknolojileri her geçen gün önemini daha da artırmaktadır. Bunun yanında, yeni ve birçok farklı alanda kullanımı da gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır [13]-[17]. Ayrıca, spektrum geçişlerinde kesintisiz haberleşme sağlamak da bilişsel radyo sisteminin görevidir. Bunlara ek olarak, tespit edilen kullanılabilir spektrumun lisanslı olmayan kullanıcılar arasında eşit olarak paylaştırılması işlemi de bu sistemin görevlerindendir.

Bilişsel radyo teknolojisi, kendi kendine öğrenmenin temel alındığı bir yapıdır. Kendi kendine öğrenme sayesinde, daha güçlü bir haberleşme sağlamak için boş spektrumların tespit edilmesini ve tespit edilen boş spektrumlardan yararlanılmasını sağlar [12]-[16]. Bilişsel radyo sistemler ayrıca, bulundukları ortamı sezme ve davranışlarını çevreye göre ayarlama yeteneğine sahiptirler. Bilişsel radyo sisteminin en önemli fonksiyonlarından biri olan spektrum sezme, spektrum kullanımı hakkında bilgi vererek, kullanılmayan spektrumların tespit edilmesini sağlar. Elde edilen bilgi, üst katmanlar tarafından değerlendirilerek lisanslı kullanıcılara girişim oluşturmadan boş spektrumların kullanılması sağlanır [15]-[18]. Gerekli işlemler yerine getirilirken kullanıcı açısından en uygun olan spektrumun tespit edilmesi de, bilişsel radyo sisteminin fonksiyonlarındandır.

Diğer bir adı da lisanslı kullanıcı olan birincil kullanıcı, bir lisans satın aldığından dolayı frekans bandını hiçbir girişim olmadan öncelikli olarak kullanım hakkına sahiptir [14]. Birincil kullanıcılar aynı spektrumu kullanan lisanssız kullanıcıların varlığından haberdar olmadıkları için, bilişsel radyo kullanıcıların birincil kullanıcılara girişimde bulunmamaları gerekir [16]-[18].

Bilişsel radyo kullanıcı olarak da bilinen lisanssız kullanıcı ise, bir frekans bandını sadece ortam boş olduğu durumda kullanabilen kullanıcıdır [15]. Başka bir ifade ile birincil kullanıcılar spektrum kullanım önceliğine sahiptir. Bilişsel radyo kullanıcı, spektrumu sürekli olarak dinler ve sadece birincil kullanıcı olmadığı durumlarda spektrumdan faydalanabilir. Bilişsel radyo sistemleri, birincil kullanıcıların varlığının doğru tespit edilebilmesi için çeşitli teknik ve algoritmalar kullanmaktadır [8]-[12]. Ortamda bulunan lisanslı kullanıcıların hiçbir zarar görmeden, sağlıklı bir haberleşmenin gerçekleştirilmesi bilişsel radyo sisteminin en temel ilkelerinden biridir.

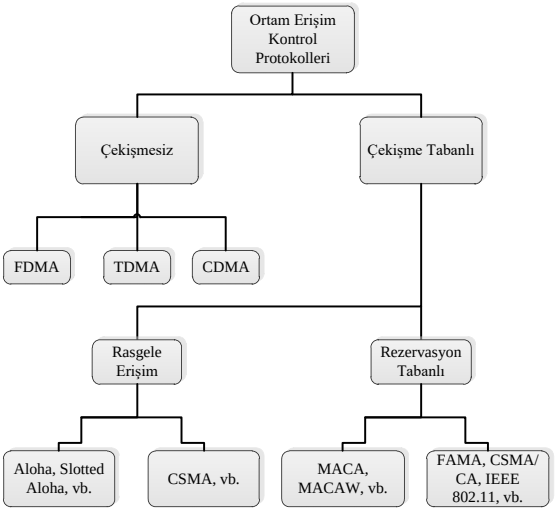
3 İkincil kullanıcılar için ortam erişim kontrol protokolleri

Kablosuz bilişsel radyo ağlar için geliştirilen çeşitli MAC şemaları sınıflandırılabilir. Çekişmesiz protokollerde (örneğin, TDMA (Zaman Bölmeli Çoklu Erişim), FDMA (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim), CDMA (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)), bazı atamalar çekişmeleri önlemek için kullanılır. Diğer yandan, çekişmeli protokoller, iletilen verinin çarpışma riskinin farkındadır [26]-[28]. Çekişmesiz MAC protokolleri statik veya merkezi kontrol sistemine sahip ağlara ve çekişme tabanlı MAC protokolleri de dinamik yapıdaki ağlara uygulanabilir oldukları için bu çalışmada hem çekişme tabanlı hem de çekişmesiz MAC protokolleri ele alınmıştır. Şekil 1'de, ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması görülmektedir.

ALOHA gibi rasgele erişim tabanlı protokollerde, bir düğüm hazır olur olmaz kanala erişebilir. Doğal olarak, aynı anda birden fazla veri iletimi olabileceği için çarpışmalar meydana gelebilir. Bu yüzden, ALOHA düşük sistem yükü altında daha uygundur ve nispeten düşük iş çıkarma oranı sunmaktadır [3]. ALOHA protokolünün bir varyasyonu olarak adlandırılan slotted-ALOHA TDMA yapısına benzer senkronize iletim hatlarına sahiptir. Bu durumda, düğümler sadece bir zaman diliminin başlangıcında iletim yapabilirler [7]. Pure-ALOHA ile karşılaştırıldığında zaman senkronizasyonu maliyeti ile iş çıkarma oranı iki katına çıkar. CSMA tabanlı protokoller paket çakışması olasılığını azaltmakta ve verimi artırmaktadır [23].

CSMA protokolünde gizli terminal ve maruz-kalan terminal problemlerini çözmek için araştırmacılar birçok çekişme tabanlı protokol üzerinde çalışmalar yaptılar [27]-[29]. Bazı protokoller RTS (Gönderme İsteği)/CTS (Ortam Temiz Mesajı) yapısı ile paketleri kontrol ederek çarpışmaları önlemeyi

hedeflediler. MACA (Çoklu Erişim Çarpışmadan Kaçınma) ve MACAW (MACA Kablosuz Ağ) taşıyıcı sezme ve kontrol paketleri kullanan yapılardandır.



Şekil 1: Ortam erişim kontrol protokollerinin sınıflandırılması.

MAC protokollerini ayrıştıran önemli etkenlerden biri veri trafiğini göndericinin ya da alıcının başlatmasıdır. Yukarıda da bahsedildiği üzere, dinamik atama yaklaşımı veri gönderiminden önce bir çeşit rezervasyon yapma işlemi gibidir. Eğer rezervasyon işlemini veri göndermek isteyen düğüm yaparsa, buna gönderici başlatmalı protokol adı verilir. Birçok protokol gönderici başlatmalı olarak çalışmaktadır [30]-[33]. Alıcı başlatmalı protokollerde, alıcı düğüm muhtemel gönderici düğümler arasından bir düğüm seçer. Eğer gönderici düğümün gönderecek bir verisi var ise, seçildikten sonra veri gönderimine izin verilir. MACA-BI (MACA-Davet ile) ve RI-BTMA (Alıcı Başlatmalı - Meşgul Tonlu Çoklu Erişim) bu protokollere örnektir. Daha sonra da göreceğimiz üzere MACA-BI protokolü MACA protokolünden biraz daha iyi performans sergilemektedir [31].

Diğer bir sınıflandırma, veri gönderimi için kullanılan kanal sayısına dayanmaktadır. Tek kanallı protokoller gönderim için rezervasyon uygularlar ve daha sonra aynı kanal ya da frekansı kullanarak verilerini gönderirler [34]-[36]. MAC protokollerinin çoğunluğu tek kanal kullanmaktadır. Çoklu kanal protokolleri alıcı ve verici düğümlerin oturumlarını yönetmek için birden daha fazla sayıda kanal kullanırlar. FCC (Federal Haberleşme Komisyonu) ISM bandını kullanan bütün radyolar için DSSS (Direkt Sıralı Geniş Spektrum) veya FHSS (Frekans Atlamalı Geniş Spektrum) protokollerini kullanmaya zorlamaktadır. Bazı MAC protokolleri frekans atlamalı teknikler aracılığıyla çoklu kanal kullanımı için geliştirilmişlerdir [35]. HRMA (Atlama - Rezervasyon Çoklu Erişim) protokolü buna örnek olarak verilebilir. Bazı diğer protokoller ise gönderilen veriyi korumak için ayrı kanallarda özel kontrol sinyalleri kullanırlar.

Daha önce de bahsedildiği üzere, ağın tüm katmanlarında enerji etkili protokoller elde etmek için düşük güç tüketen cihazlar önemli hale gelmektedir. Enerji tabanlı MAC protokolleri geliştirmek için birçok çalışmalar halen sürdürülmektedir. Diğer bir sınıf MAC protokolleri ise yönlü antenler kullanmaktadırlar [37]-[40]. Bu yöntemin avantajı bütün sinyallerin tek bir yönde gönderilmesidir. Diğer yönlerdeki düğümler, girişimlere ve çarpışma etkilerine duyarlı değildir.

Genel olarak, düğümler arasındaki bağlantılar çift yönlüdür ancak, bazı durumlarda MAC protokolleri tarafından özel işlem gerektiren farklı uygulamalara da ihtiyaç duyulmaktadır. Tek yönlü bağlantılar üzerine de birçok çalışmalar yapılmıştır. Bilişsel radyo ağların gün geçtikçe artan popüleritesine bağlı olarak, kullanıcılar belli seviyede QoS beklemektedirler. Bunlardan bazıları; uçtan uca gecikme, kullanılabilir bant genişliği, paket kayıp olasılığıdır [40]-[42]. Bununla birlikte; merkezi kontrol olmaması, sınırlı bant genişliği kanalları, düğüm hareketliliği, güç ve işlevsel kısıtlılıklar gibi kablosuz ortam sorunları bilişsel radyo ağlarda etkili bir QoS sağlamayı zorlaştırmaktadırlar. MAC protokolü, bir düğümden diğer düğüme ne kadar güvenli ve etkili veri transfer edilebileceğiyle ilgilendiği için ağın QoS parametresini doğrudan etkilemektedir. Literatürde, birçok QoS-tabanlı MAC protokolü önerilmiştir.

Yukarıda sınıflandırılan protokoller tamamen birbirinden bağımsız değildir. Bir MAC protokolü birden fazla kategoriye ait olabilmektedir [43]-[45]. Örneğin, PAMAS (Enerji Tabanlı Ortam Erişim Kontrol-Sinyal ile) hem bir enerji tabanlı protokol hem de iki kanal kullanmaktadır. Benzer olarak, RI-BTMA hem alıcı başlatmalı hem de iki kanal kullanan MAC protokolleridir.

3.1 Çekişme tabanlı ortam erişim kontrol protokolleri

Özel olarak, çekişme tabanlı MAC protokolleri tek kanal, alıcı başlatmalı, güç-tabanlı ve çoklu kanal kategorilerinde anlatılabilir [46]. Kısıtlamalardan dolayı, diğer kategoriler sadece kısaca anlatılacaktır. Bununla birlikte, kısaca anlatılacak olması diğer kategorilerin daha az önemli olduğu anlamına gelmemektedir.

3.1.1 MACA (çoklu erişim çarpışma kaçınma)

MACA protokolü, CSMA ailesindeki protokollerin karşılaştığı gizli ve maruz kalan terminal problemlerini çözmek için önerilmiştir [28]. MACA protokolünde önemli olan nokta, RTS paketini duyan komşu düğümler ilgili CTS paketinin işlemi bitene kadar gönderimlerini ertelemek zorunda kalırlar. Ayrıca, CTS paketini duyan komşu düğümler de beklenen veri paketinin uzunluğu kadar erteleme yaparlar.

MACA protokolü, RTS ve CTS paketleri normal veri paketlerinden daha kısa olduğu için etkilidir. Bu yüzden, RTS ve CTS paketleri arasındaki çarpışmalar veri paketleri arasında meydana gelebilecek çarpışmalardan daha az maliyetlidir [47]. Bununla birlikte, RTS/CTS yaklaşımı gizli terminal problemini her zaman tamamıyla çözemez ve farklı düğümler RTS, CTS paketleri gönderirken çarpışmalar meydana gelebilir.

MACA protokolünün diğer bir zayıflığı ise, veri bağı katmanındaki veri gönderimi ile ilgili herhangi bir geri bildirim sağlamamasıdır. Herhangi bir sebeple veri gönderimi olumsuz sonuçlanır ise, yeniden gönderim işlemi ulaşım katmanı tarafından başlatılır [48]-[52]. Bu durum veri transferinde çok büyük gecikmelere sebep olur.

MACA protokolünün zayıflıklarına çözüm olması açısından beş adımda RTS-CTS-DS-DATA-ACK sistemi kullanan kablosuz MACAW protokolü önerilmiştir [31]. MACAW, alıcı düğümden verici düğüme veri alma işleminin tamamlandığına dair gönderdiği ACK (Geri Bildirim) paketi sayesinde veri bağı katmanında daha hızlı hata kurtarma işlemi gerçekleştirir [53]-[60]. Aktif düğümler arasındaki geri çekilme ve adil olma konuları da bu protokolde incelenmiştir. MACAW protokolü

MACA ile karşılaştırıldığında daha yüksek iş çıkarma oranı sunmaktadır. Bununla birlikte, gizli ve maruz kalan terminal problemlerini bütünüyle çözmemektedir.

MACA tabanlı diğer bir protokol ise FAMA (Ortam Kontrol Çoklu Erişim) protokolüdür [60]-[62]. Bu protokolde, gönderim yapacak her bir istasyon gönderim yapmadan önce ortamı kontrol altında tutmak zorundadır [63]. MACA ve MACAW protokollerinin aksine, FAMA protokolünde hem alıcıda hem de göndericide çarpışma kaçınma sağlanması gerekmektedir. Ortamı kontrol etmek için, gönderici düğüm NPS (Tekrarsız Paket Sezme) veya NCS (Tekrarsız Taşıyıcı Sezme) kullanarak RTS paketi gönderir. Alıcı, gönderici düğümün adresini içeren bir CTS paketi ile cevap verir. CTS paketini duyan diğer düğümler ortamın kontrol altına alındığını öğrenmiş olur. Ortamda bulunabilecek gizli göndericilerin gönderici düğümün RTS paketini kaydetmeme ihtimaline karşı CTS paketleri uzun bir süre boyunca tekrar gönderilir [58]. NCS sistemi, bilişsel radyo ağlarda gizli terminal problemini etkili bir şekilde çözdüğü için yaygın olarak kullanılmaktadır.

3.1.2 IEEE 802.11 MAC protokolü

IEEE 802.11 iki farklı MAC protokol modu üzerinde yoğunlaşmaktadır. Bunlar, kablosuz bilişsel radyo ağlar için DCF (Dağıtık Koordinasyon Fonksiyonu) ve merkezi altyapılı ağlar için PCF (Nokta Koordinasyon Fonksiyonu) modlarıdır [36],[60],[61]. IEEE 802.11 DCF modu, CSMA ve MACA protokollerinin karması olan CSMA/CA yapısına dayanmaktadır. Veri iletimi için, RTS-CTS-DATA-ACK yapısını kullanmaktadır. Sadece fiziksel taşıyıcı sezme değil, aynı zamanda sanal taşıyıcı sezme mekanizmasını da kullanmaktadır. Bu sistem her bir düğüm tarafından NAV (Ağ Tahsis Vektörü) formunda uygulanmaktadır [64]. NAV ortamın diğer gönderimlerden dolayı ne kadar süre boyunca meşgul olduğunu belirlemek için kullanılır. Her bir paket, kalan gönderim süresi için bilgi tuttuğundan dolayı sürekli olarak NAV tablolarını günceller [62].

Zaman dilimleri, çoklu çerçevelere bölünmüştür ve birçok çeşitli IFS (İleri Ozonosfer Yayılımı) dilimi bulunmaktadır. Uzunluk olarak artan sırada; SIFS (Kısa IFS), PIFS (PCF IFS), DIFS (DCF IFS) ve EIFS (Genişletilmiş IFS) zaman dilimleri bulunmaktadır. Düğümler farklı süreler boyunca ortamın boşalması için bekleme yaparlar. Farklı tipteki paketler, ortamın boşalması için farklı tipte IFS zaman dilimi süreleri beklerler [65]-[67]. Örneğin, kablosuz bilişsel radyo ağlar için ortam DIFS süresi kadar boş olduğunda düğüm kuyruktaki paketini gönderir. Diğer türlü, ortam hala meşgul ise geri çekilme zamanlayıcısı başlatılır. Başlangıç geri çekilme zamanı 0 ile CW-1 arasında değişir [68]. CW (Çekişme Penceresi), zaman dilimi açısından çekişme penceresinin uzunluğunu göstermektedir. Başarısız bir gönderim denemesinin ardından, yeni bir geri çekilme zamanı BEB (İkili Üstel Geri Çekilme) algoritması ile 2 kat fazla CW ile gerçekleştirilir. Beklenen her bir DIFS zamanından sonra zamanlayıcı azaltılır [69]. Süre dolduğunda paket gönderim işlemi gerçekleştirilir. Her bir başarılı gönderimin ardından gönderici düğüm tarafından rasgele geri çekilme zamanı belirlenir. RTS, CTS ve ACK gibi kontrol paketleri ortam SIFS kadar süre boş olduktan sonra gönderilir. IEEE 802.11 DCF, kablosuz LAN (Yerel Alan Ağları) ağlar için sıklıkla kullanılan bir protokoldür [70]. Bu çalışmada sunulan MAC protokollerinin büyük çoğunluğu IEEE 802.11 DCF üzerine kurulmuştur.

3.1.3 MACA-BI (çoklu erişim çarpışma kaçınma-davet ile)

Tipik gönderici başlatma protokollerinde, gönderici düğümün RTS paketini gönderdikten hemen sonra CTS almak için alıcı moda geçmesi gerekmektedir. Paket alışverişleri, zaman kaybından dolayı toplam iş çıkarma oranını düşürmektedir. MACA-BI, gönderici-başlatmalı protokoldür ve kontrol paketi alışverişlerini azaltmaktadır [28]. Kanal erişimi için gönderici beklemesi yerine, MACA-BI alıcının göndericiyi veri iletimi için davet etmesi prensibine dayanmaktadır. İlgili yaklaşımda RTS/CTS paketleri yerine RTR (Almak için Hazır) paketi kullanılmaktadır [31]. Bu yüzden, MACA protokolündeki RTS-CTS-DATA üçlü paket alışverişi yerine RTR-DATA ikili paket alışverişi yapılmaktadır.

Gönderici, alıcı tarafından istenmedikçe bir veri gönderemeyeceği için alıcıya entegre edilmiş bir trafik tahmin algoritmasına ihtiyaç duyulmaktadır, böylece göndericiden ne zaman veri talep edileceği anlaşılmış olur. Algoritmanın verimliliği, sistemin iş çıkarma oranını temsil etmektedir. Önerilen algoritma; veri paketi, paket kuyruk uzunluğu ve veri hızı bilgilerini de içerir. Alıcı veriyi aldığında, kayıtları tahmin etmekte ve buna göre diğer RTR paketlerini göndermektedir. Göndericinin, giriş tamponu taştığında RTS paketi gönderdiği durumlar da mevcuttur [63]. Bu tür durumlarda sistem MACA protokolüne dönüşmüş olur. MACA-BI protokolü tahmin edilebilir trafik örneği bulunan ağlarla etkili bir şekilde çalışmaktadır. Bununla birlikte, eğer trafik çok fazla ise, sistem performansı MACA seviyesine düşmektedir.

3.1.4 GAMA-PS (grup tahsis çoklu erişim-paket sezme ile)

GAMA-PS hem çekişme tabanlı hem de çekişme tabanlı olmayan yöntemlerin özelliklerini taşımaktadır. Kablosuz kanalı bir dizi dilimlere böler. Her bir dilim, çekişme ve grup gönderimi için iki bölüme ayrılır. Grup gönderim bölümü kendi içinde gönderim periyotlarına ayrılsa da, GAMA-PS farklı düğümler arasında zaman senkronizasyonu gerektirmemektedir. Kanala erişim için rezervasyon yapmak isteyen düğümler RTS/CTS algoritmasını uygularlar. Bununla birlikte, düğüm sadece tüm paketi algıladığında geri çekilme yapar [45]-[48]. Yalnız başına taşıyıcı sezme, geri çekilme için yeterli sebep değildir.

GAMA-PS düğümleri, haberleşme periyotlarına atanan düğümlerden oluşan iletim gruplarını organize eder. Her bir düğümün kanalı dinlemesi beklenmektedir [50]. Bu yüzden, herhangi bir merkezi yapıya ihtiyaç duyulmamaktadır. Gruptaki her bir düğüm başarılı RTS/CTS alışverişinden ve boş gönderim periyotlarından haberdardır.

Gönderim grubunun üyeleri veri göndermek için sıra beklerler ve her bir düğüm veri transferine başlamadan önce BTP (Gönderim Periyoduna Başla) paketi gönderir. BTP; gönderim grubunun durumunu, o gruptaki düğümlerin konumunu ve grup üyelerinin sayısını içermektedir. Her bir grup üyesi sabit uzunlukta veri transferi yapmaktadır. Bu durum verimliliği artırmaktadır [32]-[35]. Gönderim grubunun son üyesi paket gönderim işlemi bittiğinde TR (Gönderim İsteği) paketi yayımlar. TR paketinin kullanımı, çekişme periyodunun başlangıcında çekişmesi muhtemel üyeleri zorlayarak çekişme periyodunun maksimum uzunluğunu kısaltır.

3.1.5 PAMAS (güç tabanlı ortam erişim kontrol protokolü-sinyal ile)

Gezgin cihazlar batarya gücüne sahip oldukları için, enerjiyi korumaları ve mümkün olduğunca etkili bir şekilde kullanmaları çok önemlidir. Gerçekte, güç koruma meselesi bütün katmanlar için düşünülmelidir. Aşağıda belirtilenler MAC protokolleri için güç koruma ilkeleridir. İlk olarak, çarpışmalar maliyetli gönderimlerin en büyük sebebidir ve mümkün olduğunca çarpışmadan kaçınılmalıdır [40]-[42]. İkinci olarak, alıcı vericiler mümkün olduğu her zaman bekleme moduna geçmelidir, çünkü en fazla enerji aktif olduklarında harcanmaktadır. Üçüncü olarak, maksimum güç kullanmak yerine gönderici hedef düğümün veriyi alabileceği seviyede daha düşük bir güç tüketimini denemelidir.

PAMAS protokolünde, RTS/CTS gibi kontrol paketleri iletimi ayrı bir sinyal kanalı üzerinden yapılmaktadır ve veri gönderimleri için ayrı bir kanal mevcuttur [38]. Veri paketi alınırken, hedef düğüm sinyal kanalı üzerinden meşgul mesajı yayımlar. Düğümler sinyal kanalını dinleyerek ne zaman alıcı-verici güçlerini düşürecekleri hakkında bilgi sahibi olurlar. Güçleri düşürme veya düşürmeme konusunda, iş çıkarma oranını da hesaba katarak her bir düğüm kendi kararını verir [50-53]. Bir düğüm, gönderecek verisi olmadığında veya komşu düğümleri iletim yaparken enerji tüketmezler. Bir düğüm ayrıca, komşu düğümlerden birisi veri gönderiyorsa ve diğeri veri alıyorsa gücünü kapatır.

Bu protokolün, FAMA gibi diğer protokollerle ortak kullanıldığı stratejiler de mevcuttur. Ayrıca, ACK kullanımı ve çoklu paket gönderiminin kullanımı da PAMAS protokolünün performansını artırmaktadır. Bununla birlikte, PAMAS protokolünde ihmal edilemeyecek olan radyo alıcı-verici zamanı göz ardı edilmiştir.

3.1.6 DPSM (dinamik güç koruma mekanizması)

IEEE 802.11 DCF modu zamanın belli senkronize dilimlere bölündüğü güç koruma mekanizmasına sahiptir. Her bir dilimin başlangıcında, her bir düğüm belirli bir süre boyunca uyanık olmak zorundadır [30]-[32]. DPSM mekanizması, gönderim için hazır olan paketleri alıcı düğümlere duyurur. Duyurular çerçeveler aracılığıyla yapılır ve ACK paketleri ile geri bildirim işlemi yapılır.

Daha önceki çalışmalara bakıldığında, çekişme penceresinin uzunluğu sabit tutulduğunda iş çıkarma ve enerji tüketim performanslarının düştüğü gözlenmektedir. DPSM mekanizmasında, her düğüm çekişme penceresinin uzunluğunu dinamik ve bağımsız olarak seçmektedir. Sonuç olarak, her düğüm potansiyel olarak farklı uzunlukta çekişme penceresine sahip olabilir. Bu şekilde, alıcı ve verici düğümler çekişme penceresi paket gönderim duyurularına katıldıktan sonra uyku moduna geçebilirler [28]. DCF mekanizmasının aksine, çerçeve zamanı boyunca bile uyanık kalmak zorunda değildirler. Eğer kuyrukta bekleyen paketler var ise, çekişme penceresinin uzunluğu artırılır. Ayrıca, her bir veri paketi mevcut çekişme penceresi uzunluğunu içermektedir ve ilgili düğümler kendi pencerelerini buna göre ayarlayabilirler.

DPSM, iş çıkarma oranı ve güç koruma açısından bakıldığında IEEE 802.11 DCF mekanizmasından daha etkilidir [60]-[62]. Bununla birlikte, IEEE 802.11 ve DPSM düğümlerin saatlerinin senkronize olduğunu varsaydığı ve ağ bağlantısının kurulu olduğunu farz ettiği için, çoklu-atlama bilişsel radyo ağlar için uygun değildir.

3.1.7 PCM (güç kontrol-ortam erişim kontrolü)

Bundan önceki yaklaşımlarda düğümler için uykuda ve uyanık olma güç kontrol mekanizmaları kullanılmıştı. PCM mekanizmasında, RTS ve CTS paketleri mümkün olan en yüksek güçlerle gönderilmesine karşın ACK ve veri paketleri en düşük güçlerle gönderilmektedir [34].

PCM mekanizmasının işlemi, alınan paket sinyal gücünün doğru bir şekilde tahmin edilmesini gerektirir. Bu yüzden, zayıflamadan kaynaklanan kablosuz sinyal yayılımı dinamikleri performansı düşürebilir [47]-[49]. PCM mekanizmasının diğer bir kusuru ise, gönderim gücü seviyesindeki frekans değişimi uygulamasının zor olmasıdır.

3.1.8 PCMA (güç kontrollü çoklu erişim)

PCMA, gönderici iletim gücünü kontrol etme esasına dayanmaktadır. Böylece, alıcının tek yapması gereken paketi çözmektir. Bu durum diğer komşu düğümlerle oluşabilecek girişimleri engellemeye yardımcı olur. PCMA iki kanal kullanmaktadır [36]-[39]. Bunlardan biri, meşgul olduğunu bildiren mesaj kanalı, diğeri ise veri ve kontrol paketlerinin aktarımı için kullanılan kanaldır. PCMA mekanizmasındaki güç kontrolü, sadece batarya ömrünü artırmak için değil aynı zamanda kanal verimliliğini artırmak için de kullanılır. Bu yüzden, alıcı ve verici için önemli olan mesele alıcının paketi çözebileceği minimum güç seviyesini belirlemek ve girişimlerden ayırt etmektir. Ayrıca, alıcı gürültü toleransını bildirmek zorundadır ki diğer potansiyel göndericiler onun alım işlemine girişimde bulunmasın.

Geleneksel çarpışma kaçınma yöntemlerinde, bir düğümün taşıyıcı sezme sonucuna bağlı olarak iletim izni olabilir veya olmayabilir [34]-[36]. PCMA mekanizmasında, bu yöntem sınırlı bir güç modeli için genelleştirilmiştir. Veri iletiminden önce, gönderici alıcıya veri kanalından RPTS (Gönderme için İstek Gücü) paketi gönderir. Alıcı da vericiye aynı kanaldan APTS (Gönderme için Kabul Gücü) paketi ile cevap verir. RPTS-APTS paket alışverişleri, alıcının paketi alabilmesi için gereken en düşük güç seviyesini belirlemek için kullanılır. Bu alışverişten sonra, asıl veri transfer edilir ve ACK paketi ile doğrulanır.

Ayrı bir kanalda, her bir alıcı meşgul olduğunu belirtmek için ayrı bir mesaj hazırlar. Bunu göndermek için gereken sinyalin gücüne gürültü gücü de eklendiğinde, alıcı mesaja tolerans gösterebilmelidir. Gönderici, kanalda meşgul mesajı algıladığında CSMA/CA yapısındakine benzer bir şekilde taşıyıcı sezme yöntemini kullanması gerekmektedir. Alıcının ortama meşgul mesajı göndermesi, ortama CTS paketi göndermesi gibi bir durumdur. RPTS-APTS paket değişimi RTS-CTS paket değişimine eşdeğer bir sistemdir. En büyük fark, RPTS-APTS sisteminde gizli alıcıların geri çekilmeye zorlanmamasıdır [56]-[58]. Çarpışmalar, farklı geri çekilme stratejileri kullanılarak çözülmektedir.

Bu protokolde IEEE 802.11 protokolüne göre 2 kat daha iyi performans gelişmesi görülmüştür. Eş zamanlı olarak taşıyıcı sezme ve iletim yapmak karmaşık bir işlemdir [40]. Bu yüzden gönderilen ACK paketleri çarpışmaya maruz kalabilir. ACK paket çarpışmaları bir sorundur, çünkü kaynaktaki gürültü seviyesi veri iletimi sırasında güncellenemez. Bu durum, güç kontrol mekanizmaları kullanan tüm protokoller için açık bir problem olarak görülmektedir.

IEEE 802.11 için enerji koruma teknikleri ve HIPERLAN (Yüksek Performans LAN) standartları da tanımlanmıştır. HIPERLAN algoritmasında, her bir düğüm kendi gücünü göz

önünde bulundurur ve komşusunun uyanık olması veya uyumasına karar vermesi açısından avantaj sağlar. Böylece, koordinatör düğüm gibi davranmış olur. Uyanık olan düğümler, yönlendirme görevini üstlenirler [32]-[40].

3.1.9 Çoklu kanal protokolleri

Tek paylaşımlı kanal protokollerinin en büyük sorunu, düğümler arttıkça çarpışma olasılığının artmasıdır. Bu sorunu çözmek için çoklu kanal yaklaşımlar kullanmak gerekmektedir. Sınıflandırmada da görüldüğü üzere, bazı çoklu kanal stratejileri paket kontrolü için ayrı bir kanal ve veri transferi için ayrı bir kanal kullanmaktadır [45]. Kontrol kanalında sadece meşgul mesajı yayınlanmaktadır. Küçük bir bant genişliği sayesinde, düğümler devam eden bir iletim olduğunun farkına varmış olurlar.

Diğer yaklaşım, veri paket transferleri için çoklu kanal kullanmaktır. Çoklu kanal yaklaşımın birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, tek bir kanalın maksimum iş çıkarma oranı bant genişliği ile ilgili olduğu için, daha fazla kanal kullanmak iş çıkarma oranını artıran bir etken olarak görülmektedir. İkinci olarak, farklı kanallarda gönderilen veriler birbirleriyle çarpışmamaktadırlar ve bazı bölgelerde eş zamanlı veri iletimi sağlanabilmektedir. Bu durum, daha da az çarpışmalara sebep olmaktadır. Üçüncü olarak, çoklu kanal kullanarak QoS desteği sağlamak daha kolaydır. Genel olarak, çoklu veri kanal MAC protokolleri farklı düğümlere farklı kanallar atamak zorundadır. Fakat, ortam erişim sorununun da çözülmesi gerekmektedir. Bu durum karar vermeyi de etkilemektedir. Örneğin, herhangi bir düğüm özel bir kanala erişmek isteyebilir. Özel durumlarda, bütün düğümlerin birbirleriyle senkronize olmaları gerekebilir [50]-[52]. Diğer durumlarda ise, düğümlerin birbiri arasında bir zaman çizelgesi oluşturmalarına gerek yoktur.

3.1.10 DBTMA (çoklu meşgul mesajı-çoklu erişim)

RTS / CTS değişimini baz alan protokollerde, bu paketlerin dahi çarpışma yaşayabileceği göz önüne alınmalıdır. Böylece, gizli terminallerin varlığı durumunda ardışık veri paketlerinin çarpışma olasılığı vardır. DBTMA, bant dışı sinyal kullanımı ile gizli ve maruz kalan terminal problemlerini etkili bir şekilde çözmektedir. Veri iletimi de, tek paylaşımlı kablosuz bir kanal üzerinden yapılmaktadır [28]-[30]. Bu protokol, BTMA (Meşgul Mesajı Çoklu Erişim) ve RI-BTMA protokolleri üzerine kurulmuştur.

DBTMA, ortak alana erişimi yönetim sorumluluğunun merkezliğini ortadan kaldırır ve düğümler arası senkronizasyon gerektirmez [34]. Daha önce anlatılan bazı protokollerde, düğümler iletim isteğini bildirmek için veri kanalından bir RTS paketi gönderir. Daha sonra, iki farklı meşgul mesajı farklı kanallardan ortama gönderilir ve hem RTS hem de veri paketi korunmuş olur. RTS gönderen düğüm BTt (Gönderim Meşgul Mesajı) mesajı gönderir. Cevap olarak, alıcı da CTS paketi kullanmadan RTS paketine cevap vermek için BTr (Alım Meşgul Mesajı) mesajı gönderir [33]-[35].

BTr ya da BTt mesajını duyan düğümler kendi RTS paket gönderimlerini ertelerler. Böylece, bu iki meşgul mesajı da diğer düğümlerin gönderimleriyle meydana gelebilecek çarpışmaları engellemiş olur. Bağlantılı olarak, BTt ve BTr aracılığıyla, maruz kalan terminaller veri paketi transferi başlatabilmektedir [34]-[37]. Ayrıca, gizli terminaller aynı anda veri iletimi ve RTS isteklerine cevap verebilir. Bazı senaryolar için, MACA protokolünden %140 daha önemli bir gelişme kaydetmiştir. Bununla birlikte, DBTMA protokolü alınan veri paketleri için ACK kullanmaz. Fakat ek donanım karmaşıklığı gerektirir.

Yakın zamanda, verimli heterojen güç seviyelerine ve iletim aralıklarına sahip ağları destekleyen bir ROC (RTS / OTS / CTS) mekanizması önerildi. Bu mekanizma, OTS (Nesne Gönderme) kontrol paketi kullanmaktadır [50]. Ayrı bir kontrol kanalı ve tek bir veri kanalının kullanılması ile önerilen protokol gizli, açık, hareketli, geçici olarak sağır ve heterojen düğümlerden kaynaklanan sorunları çözmektedir.

3.1.11 Çoklu kanal CSMA MAC protokolü

Çok kanallı CSMA protokolü, toplam bant genişliğini N kanala bölmektedir. Burada N, ağdaki düğüm sayısından daha düşük olabilmektedir. Ayrıca, kanalların FDMA veya CDMA tabanlı olması mümkündür. Bir verici, son kullanılan kanalın boş olup olmadığını öğrenmek için algılama taşıyıcı kullanır [50]. Boş bulursa, son kullanılan kanalı kullanır. Aksi takdirde, başka bir boş kanal rasgele seçilir. Hiç boş kanal bulunamazsa, düğüm geri çekilme yapar ve daha sonra tekrar dener. Her düğüm, son kullanılan kanal yerine sadece rasgele yeni bir kanal tercih etme eğiliminde olduğu için, trafik yükü yüksek olduğunda yeterli kanal mevcut değilse bile, çarpışma olasılığı biraz azalır.

Bu protokol, tek kanal CSMA yönteminden çok daha etkili olduğunu kanıtlamıştır [51]-[52]. İlginçtir ki, bu protokolün performansı düşük trafik yükü altında ve uzun bir süre için az sayıda aktif düğüm içeren tek kanallı CSMA protokolünden daha düşüktür. Bu protokol, gönderen tarafında gözlenen sinyal gücüne göre en iyi kanalı seçmek için geliştirilmiştir.

3.1.12 HRMA (atlama rezervasyonu çoklu erişim)

HRMA, ISM bandında FHSS radyo bandına dayalı etkin bir MAC protokolüdür [33]. Daha önceki protokollerde, veri paketlerinin ortasında frekans atlamalı radyo gerektiren etkili CDMA elde etmek için frekans atlamalı kanal kullanılmıştı. HRMA, tüm paketin aynı atlama kanalından gönderildiği FHSS sisteminin zaman dilimleme özelliklerini kullanmıştır. HRMA, hiçbir taşıyıcı algılama gerektirmeyen ortak bir frekans atlamalı kanal kullanır. Ayrıca, düğümlere diğer düğümlerden müdahale olmaksızın iletişim için bir RTS-CTS değişimiyle frekans atlama rezervasyonu sağlar.

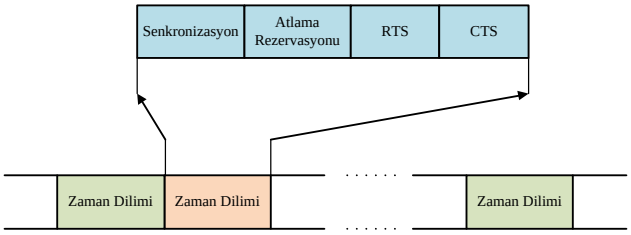
Bir gönderici, RTS zaman dilimi sırasında alıcıya bir RTS paketi gönderir. Alıcı, aynı zaman periyodunun CTS gönderme dilimi sırasında göndericiye bir CTS paketi gönderir. Sonra, verici aynı frekans kanalını kullanarak diğer düğümlerin senkronize olduğu sırada verileri gönderir ve daha sonra alıcı bir ACK gönderir. Veri paketi büyük ise ve birden fazla zaman aralığında iletilmesi gerekiyorsa, gönderici bunu veri paketinin başlığında gösterir. Alıcı, bir sonraki zaman diliminin HR (Atlama Rezervasyonu) periyodunda HR paketi gönderir [30]-[35]. Böylece, gönderici ve alıcı için mevcut frekans rezervasyonu uzatılır. Bu durum, diğer düğümlerin atlama sırasında sonraki frekans bandını kullanmamaları gerektiğini bildirir.

HRMA protokolünün, FHSS kanallarda slotted-ALOHA protokolüne göre daha yüksek verim elde ettiği iddia edilmektedir. Bu, ticari olarak mevcut olan yarı çift yönlü yavaş frekans atlamalı radyoları kullanır. Ancak, çok atlamalı ağlar için uygun değildir çünkü düğümler arasında senkronizasyon gerektirmektedir. Şekil 2'de, senkronizasyon sırasında tüm düğümler birbirleriyle senkronize

olmaktadırlar. Atlama rezervasyonu, CTS ve RTS dilimlerinde ise, atlama işlemini gerçekleştirmektedirler.

3.1.13 MMAC (çoklu kanal ortam erişim kontrol)

Yapılan çalışmalar sonucunda, kanallar arasında dinamik geçiş yapan MMAC protokolü önerilmiştir. IEEE 802.11 protokolü DCF modunda çoklu kanal için destek sağlamasına rağmen, gerçekte sadece tek bir kanal kullanır [50]-[53]. Bunun başlıca nedeni, tek bir yarı çift yönlü alıcı verici ile her seferinde sadece iletim veya dinleme yapılabilmesidir.



Şekil 2: HRMA protokolünün zaman dilimi ve çerçeve yapısı.

MMAC, çoklu kanal kullanmak için DCF yönteminin bir uyarlamasıdır. DPSM protokolüne benzer şekilde, zaman birden fazla sabit aralıklara ayrılmıştır. Her aralığın başlangıcında küçük çekişme penceresi vardır. Bu aralık boyunca, çekişme paketleri düğümler arasında değiştirilir. Böylece, pencere sırasında sonraki zaman dilimlerinin kullanımı için uygun bir atama koordinesi yapılır [28]-[30]. Diğer çok kanallı farklı protokollerin aksine, MMAC sadece bir alıcı verici gerektirmektedir. Her işaret aralığının başında, her düğüm çekişme paket alışverişi yapan ortak bir senkronizasyon kanalı için ayarlama yaparak bütün diğer düğümlerle senkron hareket ederler. Bu zaman diliminde, hiçbir veri paketi iletimine izin verilmez. Ayrıca, her düğüm kendi iletim aralığındaki kanalların kullanımı ile ilgili PCL (Tercih edilen Kanal Listesi) saklar ve aynı zamanda bu kanallar için öncelikleri belirler.

3.1.14 DCA-PC (dinamik kanal atama-güç kontrol)

DCA-PC, DCA protokolünün güç kontrolü konusunu ele alan bir uzantısıdır. Bu protokol, gezgin ağlar bağlamında güç kontrolü ve çok kanallı ortam erişim kavramlarını birleştirir. Düğümler, gerektiğinde dinamik kanallara atanabilirler. Her düğüm, iki yarım çiftli alıcı ile donatılmıştır. DCA-PC, bant genişliği kontrol kanalı ve birden çok veri kanalına bölünmüştür. Bir alıcı verici kanalı, güç kontrolü ile veri alışverişi yapmak için kullanılır [30-35]. Veri kanalları arasındaki diğer anahtarlamalar için maksimum güç sağlanarak kontrol kanalları kullanılır. RES (Rezervasyon Paketi), kullanılacak uygun veri kanalını gösteren, özel bir rezervasyon paketidir. Bir iletim kanalı gerektiğinde, RTS/CTS/RES üçlü mesajlaşması başlatmak gerekmektedir.

Her bir düğüm, başka bir düğümle iletişim kurmak için gereken güç seviyelerini bir tabloda tutar. Bu güç düzeyleri, kontrol kanalındaki RTS/CTS değişimlerine göre hesaplanır. Her düğüm sürekli olarak kontrol kanalını dinliyor olduğu için dinamik olarak güç değerlerini güncellerler [41]. Her düğüm kanal kullanım bilgilerini içeren bir liste tutar. Bu listeyi tutmanın asıl amacı, hangi düğümlerin komşu olduğunu anlamak ve kullanım sürelerini kaydetmektir.

DCA-PC, DCA mekanizmasından daha yüksek verim elde etmek için tasarlanmıştır. Bununla birlikte, kanal sayısı bir noktanın ötesinde artış gösterdiği zaman, güç kontrol etkisi nedeniyle, güç kontrolü daha az önemli hale gelmektedir. Özet olarak, DCA-PC entegre bir şekilde dinamik kanal atama ve güç kontrol sorunlarını çözmede yeni bir girişimdir.

3.1.15 Yönlü anten kullanan protokoller

Kablosuz bilişsel radyo ağlar için MAC protokolleri, genellikle radyo sinyallerinin iletimi için çok yönlü anten kullanırlar. Bu MAC protokolleri çevresindeki diğer tüm düğümlerin bekleme durumunda kalması gerekmektedir. Yönlü antenler ile daha yüksek kazançlar elde etmek ve belirli bir yöndeki iletimi sınırlamak mümkündür. Benzer şekilde, yönlü anten ile bir düğümün paket alımı sırasında diğer yönlerdeki girişimlerden etkilenilmez [40]-[45]. Sonuç olarak, bu iki düğüm çifti iletim yönüne bağlı olarak, eş zamanlı olarak iletişim kurabilirler. Bu durum, diğer etkilenmeyen yönlerde daha iyi spektrum kullanımına yol açmaktadır. Bu antenleri kullanarak, doğru yönde sağlanan ve gerçek zamanlı olarak dönüt sağlayan sistemler gerçekleştirilebilir. IEEE 802.11 gibi mevcut protokolleri, bu özelliklere sahip olarak tasarlamak için yönlü antenler kullanılması gerekmektedir. Şu anda, yönlü antenlerin donanımları çok yönlü antenlerin donanımları ile karşılaştırılırsa daha maliyetli oldukları görülmektedir. Büyük askeri araçlar içeren uygulamalarda, bu tür anten sistemleri kullanılarak kablosuz cihazlar için uygun ağlar geliştirmek mümkündür. Ultra geniş bant iletimi sağlayan yüksek frekans bantları kullanımı, yönlü antenlerin boyutunu azaltmaktadır.

Yapılan çalışmalar, paket radyo ağları ve yönlü antenleri kullanan slotted-ALOHA protokolünün uyumlu çalıştığını göstermektedir. Çoklu ve yönlü antenler içeren paket radyo ağları ile ilgili araştırmalar literatürde mevcuttur. Son zamanlarda, yönlü antenler oluşturmak için, kanal-erişim modelleri, bağlantı güç kontrolü ve yakın komşu bulma gibi konular tartışılmıştır. Gelişmiş bağlantı ve düşük gecikme gibi etkiler de bu çalışmalarda tartışılmıştır. Ayrıca, her düğümün dinamik olarak bilgi depoladığı ve özel kontrol birimleri aracılığıyla denetim sağladığı kontrol paketleri de kullanılmaktadır [52]-[55]. Bu, bir düğümün ortamda devam eden gönderimine uygun olan anteni yönlendirme işlemini gerçekleştirir. Bağlantı durumu tabanlı yönlendirme aşamasında, yeni bir form uygulamak için de yönlü antenler kullanılmaktadır.

Yönlü antenler kullanarak oluşturulan D-MAC (Yönlü MAC) protokolünün iki farklı çeşidi bulunmaktadır. Bu protokol, normal RTS/CTS/Veri/ACK sırasını kullanır fakat sadece RTS paket yönlü bir anten kullanılarak gönderilir. Her düğümün çok yönlü antenler ile donatılmış olduğu kabul edilir, ancak sadece bir düğümün alıcının yerine bağlı olarak veri iletimi yapmasına izin verilir [47]-[49]. Bu protokolde, her düğümün kendi konumu yanı sıra yakın komşularının konumlarını da bildiği varsayılır.

IEEE 802.11 protokolüne dayanarak, her bir düğümün çok sayıda antene sahip olduğu, nispeten basit bir protokol önerilmiştir. İlk önce, göndermek için verisi olan herhangi bir düğüm çok yönlü anten kullanarak her yöne bir RTS gönderir. Hedeflenen alıcısı, aynı zamanda tüm antenleri kullanarak her yöne CTS paketi gönderir. Asıl gönderen, en güçlü CTS sinyalini alır ve alıcının bağıl olarak yönünü öğrenebilir. Veri paketi, amaçlanan alıcının yönüne karşılık gelen yönlü anten aracılığıyla gönderilir [50]-[55]. Böylece, komşu düğümlerin kendi konum bilgilerini bilmek gerekmez. Her düğümün, sadece bir alıcı verici anteninin iletim yapabildiği unutulmamalıdır. Benzetim aracılığıyla, bu protokolün RTS/CTS sistemi ile çok yönlü antenler kullanıldığında,

CSMA/CA mekanizmasından 2-3 kat daha iyi performans gösterdiği anlaşılmaktadır.

Çoklu atlamalı yollarda, M-MAC (Çoklu-Atlamalı RTS MAC) protokolü üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Yönlü antenler, çok yönlü antenlerden daha yüksek kazanç ve iletim menziline sahip olduğu için, bir düğümün uzaktaki başka bir düğümle doğrudan iletişim kurması mümkündür. Bu nedenle, M-MAC uzak düğümlerin arasında bağlantılar kurmak ve RTS paketleri göndermek için birden fazla atlama kullanır, ancak CTS, veri ve ACK paketleri tek hop atlama ile gönderilir. Benzetim sonuçları, bu protokolün daha önce sunulan temel IEEE 802.11 protokolünden daha iyi verim ve uçtan uca gecikme sağladığını göstermektedir [43]-[46]. Fakat performansın, sistemde kullanılan topoloji yapılarına ve akış modellerine de bağlı olduğu unutulmamalıdır.

Yönlü antenlerin kullanımı üç yeni sorun oluşturmaktadır: gizli terminallerinin yeni türü, yüksek yönlü girişim ve sağırlıktır. Bu sorunlar, topoloji ve akış modellerine bağlıdır. İki akış yolu ortak bir bağlantı paylaşmak istediğinde sağırlık bir sorundur. Benzer şekilde, düz bir çizgide olan düğümler daha yüksek ihtimalle yönlü girişime maruz kalırlar. Bu sistemlerin performansı, düğüm hareketliliği arttıkça düşmektedir [33-36]. Geçerli protokollerin bazıları, yanlış bir şekilde yönlü anten kazancının tek yönlü anten ile aynı olduğunu varsaymaktadır. Benzer şekilde, bunların hiçbiri güç kontrolü iletimi, birden fazla kanal ve gerçek zamanlı trafik için destek kullanımı etkilerini dikkate almamaktadır.

3.1.16 Tek yönlü MAC protokolleri

Kablosuz bilişsel radyo ağlarda düşük güç ve pille çalışan düğümler, güç kaynaklarına bağlı daha güçlü düğümler ile bir arada olduğunda, düğümler arasındaki kanallar yetki ve asimetrik bağlantılarla tanımlanmaktadır. Böyle bir ağ, güç düzeyleri açısından heterojendir. Bu durum, A düğümünün B düğümüne bir iletim yapabildiği fakat B düğümünün gönderiminin A düğümüne ulaşamadığı durumlara yol açabilir. Bazı protokoller, bireysel düğümlerin iletim menzili kontrollerini sağlamak için topolojiler önermişlerdir. Sonuç olarak, bu ağlar arasında tek yönlü bağlantılar oluşmaktadır [60]-[63].

Tek yönlü MAC protokolleri üzerine birçok çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Tek yönlü bağlantılı ağlarda dikkat edilmesi gereken bazı sorunlar vardır. Heterojen güç seviyeleri olan cihazların bulunduğu bir ağda, düşük gücü olan bir düğüm veri iletimi için kanal ayırmaya çalışır, fakat yakın olan yüksek güçlü düğümler veri alışverişini bozabilir. Sonuç olarak, başarılı bir RTS-CTS paket değişimi başarılı bir veri iletimini garanti etmez [66]-[68]. Ayrıca, daha yüksek güçlü düğümlerin her zaman tercih edilmeyeceği de bilinmelidir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, IEEE 802.11 protokolünde RTS/CTS paket alışverişini genişletmek için bir sistem önerilmiştir. Bu durum, tüm gizli yüksek güçlü düğümlerin kanalın rezervasyonundan haberdar olmasını gerektirir, aksi takdirde sonraki veri paketi iletimleri engellenebilir.

3.2 Çekişmesiz ortam erişim kontrol protokolleri

Kablosuz bilişsel radyo ağların artan popülaritesi ile kullanıcıların belli bir seviye QoS beklemesi olağandır. Bazı QoS tabanlı parametreler şu şekildedir: uçtan uca gecikme, kullanılabilir bant genişliği, paket kayıp olasılığı vb. Bununla birlikte, merkezi kontrolden yoksunluk, sınırlı bant genişliği, hata-eğilimli kablosuz kanallar, düğüm hareketliliği ve güç kısıtlamaları bu tür ağlarda etkili bir QoS sağlamasını zorlaştırmaktadır [45].

Düğümler bir kablosuz ağa rasgele olarak bağlandığında veya ayrıldığında periyodik topoloji güncellemeleri gerekmektedir. Bu şekilde, her düğüm mevcut ağ konfigürasyonunu bilmektedir. Ağ topolojisinin çok hızlı değiştiği durumlarda, ağ kararlı bir yapıda olur fakat belli bir QoS seviyesi garanti etmesi mümkün değildir. Bununla birlikte, topolojideki değişikliklere rağmen eğer garanti verilirse ağın QoS güçlü olduğu söylenmektedir. Bunun yanında, garanti sadece iki ardışık güncelleme arasında olursa, ağ yapısına QoS-koruyucu adı verilir. QoS sisteminde öncelik kullanımı da öncelikli QoS olarak bilinmektedir. Öncelikli QoS, uygulamalara ağ erişimi için diğer kaynaklardan daha yüksek öncelik sağlamaktadır [34]-[37]. Dinamik QoS sisteminde, kaynak rezervasyonu bir dizi değer tanımlamaktadır. Örneğin, uygulamaların kabul edebileceği en düşük servis seviyesi ve kullanabilecekleri en yüksek servis seviyesi belirlenir. Ayrıca, ağ üzerinde belli bir noktanın altında servis kalitesi sağlanmayacağı konusunda garanti verilir. Böyle bir durumda, kaynak tahsisinin ağın tüm katmanlarında dinamik olarak ayarlanması gerekmektedir. Ses ve video gibi gerçek zamanlı uygulamalar, kanal kapasite paylaşımı gerektirmektedir ki QoS gereklilikleri sağlanmış olsun [56]. Bu yüzden, ilgili uygulamalar dinamik QoS ile desteklenmektedir. Araç içi haberleşme gibi diğer uygulamalar güvenlik garantisi gerektirmektedir. Bu tür uygulamalar da, parametreli QoS desteklemektedir.

3.2.1 QoS (hizmet kalitesi) etkileyen meseleler

Servis modeli, yönlendirme stratejileri, kabul kontrolü, kaynak rezervasyonu, sinyal teknikleri ve MAC protokolleri bilişsel radyo kablosuz ağlarda QoS sağlama açısından düşünülmelidir. Gerçekte, ağın her bir katmanı QoS tabanlı olmalıdır ki son kullanıcı uygulamaları için sağlanan QoS tüm senaryo için sağlanmış olsun.

QoS servis modeli, toplam çerçeve mimarisini özetlemektedir ve ağda hangi tip servislerin sağlanacağını belirlemektedir. Sinyal; kaynakları koruma, sürdürme ve boşaltma için kullanılmaktadır ve ağın en karmaşık yapılarından biridir. Topoloji değişikliklerini de içerecek şekilde güvenli bir şekilde gerçekleştirilmelidir [54].

Uygulamanın belirli bir minimum bant genişliği veya uçtan uca gecikme garanti etmesi gerekiyorsa, yönlendirme protokolü aynı zamanda QoS odaklı olmalıdır. Veri akışı gerçekleşirken sadece yolun geçerli olması yeterli değildir, aynı zamanda bu yol boyunca tüm düğümlerin ve uygulamalarının QoS gereksinimini desteklemek için yeterli kaynağa sahip olması gerekmektedir [46]. Potansiyel bir yol kurulduktan sonra, ilgili uygulamaların taleplerinin karşılanması gerekir. Bu sebeple, yolun tüm düğümler için gerekli kaynakları ayırması ve tahsis etmesi gereklidir. Kabul kontrolü, bu bağlamda önem kazanmaktadır.

Üst katmanlardaki QoS destekleyen bileşenler, QoS tabanlı MAC protokollerinin varlıklarını varsaymaktadır. Ayrıca, ortam çekişmesiyle ilgilenir, güvenilir tek noktaya iletişimi destekler ve dağıtılmış bir ortamda rt (real-time) trafiği için kaynak rezervasyonu sağlar [32]. Bu yüzden, MAC protokolleri için QoS desteği çok önemlidir. Çünkü güvenilir ve verimli bir veri iletiminin sağlanması gerekmektedir. MAC protokolü, düğüm hareketliliği ve zamanla değişen kanal sorunlarını ele almalıdır.

3.2.2 QoS tabanlı MAC protokolleri

Bilişsel radyo ağlarda, MAC protokolleri gizli veya maruz-kalan terminal problemlerini ele alarak çekişme sorununu çözmeyi hedeflemektedir. Belirli bir düzeyde QoS gerektiren gerçek zamanlı uygulamalar için, MAC katmanı protokolü, kaynak rezervasyonu ve gerçek zamanlı trafiği desteklemelidir [46].

QoS-tabanlı MAC protokollerinde, merkezi bir koordinatör düğüm yapısını önlemek için iki yol vardır. İlk yaklaşım; Küme TDMA, Küme Token ve SRMA-PA (Yumuşak Rezervasyon Çoklu Erişim-Öncelik Atama ile) gibi senkron protokolleri içermektedir. Küme TDMA protokolünde, düğümler kümeler halinde düzenlenmiştir ve her kümenin kendi içinde düğümlerin faaliyetlerinin koordinasyonundan sorumlu bir küme başı vardır. Her küme farklı bir DS (Dağınık Spektrum) kodu kullanmaktadır. Zaman dilimleri, gerçek zamanlı trafik ile rezerve edilebilir ve boş dilimler gerçek zamanlı olmayan veriler tarafından kullanılır [60]-[64]. Ancak, zaman senkronizasyonu kaynak yoğunluklu bir süreçtir ve bilişsel radyo ağlarında kullanmaktan kaçınılmalıdır [18]. Benzer şekilde, çoklu kodların uygulanması ve ilgili güç kontrolleri gereksiz değildir.

Diğer seçenek, küresel zaman senkronizasyonu gerektirmeyen ve bu nedenle bilişsel radyo ağlar için daha uygun olan asenkron yaklaşımlar kullanmaktır. IEEE 802.11 DCF en iyi teslim modeli kullanan ve yaygın olarak tercih edilen asenkron bir protokoldür. Rasgele geri çekilme mekanizması kanal erişim gecikmeleri üzerinde belirleyici üst sınırları sağlayamadığı için gerçek zamanlı trafikleri desteklememektedir [46]-[50]. QoS tabanlı MAC protokolleri son birkaç yıl içinde önerilmiştir ve bir çoğu az ya da çok IEEE 802.11 DCF tabanlıdır. Bu protokolleri gruplamak için literatürde henüz bir sınıflandırma yoktur.

3.2.3 RT-MAC (gerçek zamanlı MAC)

RT-MAC adındaki IEEE 802.11 protokolü, paket çarpışmalarından ve süresi geçmiş paketlerin iletiminden kaçınarak gerçek zamanlı trafikleri destekler. Bunu başarmak için, RT-MAC protokolü bir paket iletim tarihi ve gelişmiş çarpışma kaçınma yöntemleri kullanır [48]-[52]. Bir gerçek zamanlı trafik paketi iletim için sıraya alındığında, aktarılması gereken zamanı gösteren bir zaman damgası düğüme kaydedilir. Bir paketin süresinin dolup dolmadığı üç yolla belirlenir: paketi göndermeden önce, geri çekilme süresi dolduğunda ve iletimi onaylanmamış bir şekilde iletildiğinde. Süresi dolan bir paket hemen iletim kuyruğundan çıkarılır. Paket aslında gönderilmek üzereyken, gönderen düğüm bir sonraki geri çekilme değerini seçer ve bunu paket başlığına kaydeder. Paketi duyan diğer herhangi bir düğüm farklı bir geri çekilme değeri seçer. Bu durum, çarpışma olasılığını ortadan kaldırmaktadır [53]. Geri çekilme değerinin seçildiği çekişme penceresi değer aralığı sistemdeki düğüm sayısının bir fonksiyonu olarak tutulur. Bu nedenle, düğüm sayısının bilinmesi ya da en azından tahmin edilebilmesi gerekmektedir.

RT-MAC protokolü IEEE 802.11 ile karşılaştırıldığında ortalama paket gecikme süresinde ve paket çarpışmalarında ciddi azalmalara sebep olmuştur. Ancak, genellikle düğüm sayısı çok olan bir ağda çekişme penceresi de oldukça büyük olmaktadır. Ağ yükü düşük olduğunda, bant genişliği israf edilmiş olur.

3.2.4 Öncelik sınıfları ile DCF (dağıtık koordinasyon fonksiyonu)

Farklı veri sınıfları için öncelik tabanlı erişim destekleyen IEEE 802.11 protokolü DCF-PC olarak önerilmiştir. Temel fikir, gerçek zamanlı trafiklerde daha fazla öncelikli veriler için daha kısa IFS bekleme süreleri ayarlamaktır [56]-[58]. Çekişme penceresinin izin verilen maksimum boyutunu aşmayacak şekilde daha kısa geri çekilme zaman değerleri kullanılmaktadır. Daha önce de belirttiğimiz gibi, IEEE 802.11 protokolünde IFS, SIFS, PIFS ve DIFS gibi zaman bekleme aralıkları bulunmaktadır [60]. Normal bir düğümün, veri iletimi öncesinde DIFS kadar süre boşta kalması gerekmektedir. Daha öncelikli bir düğüm ise sadece PIFS süresi kadar beklemelidir. Bununla birlikte, seçilen geri çekilme değeri daha uzun olabilir, ancak daha yüksek öncelikli bir düğüm uzun bir IFS ve daha kısa bir rasgele geri çekilme değeri kadar bekler [46]-[48]. Bu sorunu çözmek için, yüksek öncelikli düğümlere daha kısa bir geri çekilme zamanı atanır.

Benzetim kullanarak, bu protokolün yüksek öncelikli gerçek zamanlı trafik için; verim, erişim gecikmesi ve çerçeve kaybolma ihtimali açısından, 802.11 DCF protokolünden daha iyi performans gösterdiği ispatlanmıştır. Bu protokol, ikiden daha fazla sayıda trafik önceliği destekleyebilmektedir. Ancak, bu protokol gerçek zamanlı trafik için deterministik gecikme sınırları sağlama yeteneğinden yoksundur. Ayrıca, daha uzun bir geri çekilme süresi nedeniyle yüksek öncelikli düğüm normal veri trafiğinde daha yüksek gecikmelere maruz kalır [35]. Kanal bant genişliği de bu gibi durumlarda boşa harcanmaktadır.

3.2.5 Geliştirilmiş DCF (dağıtık koordinasyon fonksiyonu)

IEEE 802.11 DCF, dağıtılmış bir şekilde tüm çekişen düğümlerin eşit olasılıklar ile bir kanala erişim sağlamaları için tasarlanmıştır [60]. EDCF, çerçeve önceliklerine göre farklı kanal erişimi sağlamak için DCF protokolünü geliştirmiştir. Bu, IEEE 802.11e protokolünün ve HCF (Hibrid Koordinasyon Fonksiyonu) protokolünün bir parçası olarak geliştirilmiştir [60],[61].

IEEE 802.11 DCF protokolü üzerine yapılan gecikme analizlerine dayanarak VMAC (Sanal MAC) protokolü önerilmiştir. En iyi performans sağlayan trafik için; kabul kontrolü destekleyen tamamen dağıtılmış hizmet farklılaşması, radyo izleme ve gecikme duyarlılığı bu protokolde mevcuttur. VMAC pasif olarak radyo kanalını izler ve yerel olarak elde edilebilecek hizmet düzeylerini tahmin eder [61]. Ayrıca; gecikme, gecikme değişimi, paket çarpışması ve paket kaybı gibi kritik MAC düzeyi QoS istatistiklerini tahmin eder.

3.2.6 BB (siyah patlama) çekişmesi

IEEE 802.11 standardına ve taşıyıcı sezme mekanizmasına dayanmaktadır. Şu şekilde çalışmaktadır: normal veri düğümleri gerçek zamanlı düğümlerden daha uzun çerçeve arası zamana sahiptir [32]-[35]. Kanal belli bir zaman boyunca boş olduğunda paketlerini göndermek yerine, gerçek zamanlı düğümler kanalı siyah patlama da denilen enerji darbeleriyle sıkıştırırlar. Bunların uzunluğu yaşanan çekişme gecikmesiyle orantılıdır. Çekişme gecikmesi, siyah patlama iletimi başlayana kadar kanala erişim denemesi yapıldığı andan itibaren ölçülür.

Her bir BB gönderiminden sonra, bir düğüm kendi BB değerinin en uzun olup olmadığını öğrenmek için gözleme

periyodu boyunca kanalı sezer. Eğer öyleyse, düğüm veri transferi işlemine geçer. Özet olarak, bu protokolün dinamik TDM iletimi yapısını açık bir slot tahsisi ve senkronizasyon yapmadan başardığı görülmektedir. Gerçek zamanlı paketlerin çarpışma olmadan ve yüksek öncelikli olarak gönderilmesini garanti etmektedir [39]-[43]. BB çekişmesinin gerçek zamanlı düğümler arasında Round-Robin disiplinini uyguladığı ve gerçek zamanlı gecikmeler başardığı görülmüştür.

Basit taşıyıcı sezme ağlar ile karşılaştırıldığında, BB çekişme protokolü, gerçek zamanlı çoklu ortam trafiğine bazı QoS garantileri sağlar. Düşünülen uygulamalar arasında, oturumları uzun sürelerde kanala daha fazla veya daha az periyodik erişim gerektiren ses ve video uygulamaları bulunmaktadır. İlgili uygulamalarda, ana hususlardan biri uçtan uca gecikmedir [42]. Veri bağlantı katmanı, sınırlı bir paket gecikmesi gerektirmektedir. Ancak, bu protokol gizli terminal sorununu dikkate almaz.

3.2.7 MACA-PR (çoklu erişim çarpışma kaçınma-rezervasyon ile)

Bilişsel radyo ağlarda verimli gerçek zamanlı çoklu ortam desteği sağlamak için MACA/PR mimarisi önerilmiştir. MACA/PR, IEEE 802.11 ve FAMA protokollerinin bir uzantısıdır [63]. Mimarisi, bir MAC protokolü içermektedir. Gerçek zamanlı bağlantılar kurmak için rezervasyon protokolü de içermektedir. Ayrıca, QoS tabanlı yönlendirme protokolüne de sahiptir.

MACA/PR protokolünde, düğümler özel rezervasyon tablosu tutarlar ve bir paketin iletilebilmesi için iletim zamanını tabloda belirtirler [63]. Gerçek zamanlı veri akışındaki ilk veri paketi, standart RTS-CTS yaklaşımı ile tüm yol boyunca rezervasyonlarını ayarlar. Bu kontrol paketleri, her veri paketinin uzunluğunu içerir. En kısa sürede ilk paket bir bağlantı rezervasyonu yaptığında, göndericide bir iletim dilimi ayrılır. Daha sonraki paket için, uygun zaman aralıkları bir sonraki alıcı düğüme tahsis edilir. Gönderici aynı zamanda mevcut veri paketleri içerisine sonraki veri paketinin rezervasyon bilgilerini de yerleştirir. Alıcı, kendi rezervasyon tablosunda bu rezervasyonları not eder ve aynı zamanda ACK paketi ile teyit eder. Veri ve ACK paketlerine kulak misafiri olan komşu düğümler, sonraki paket iletim zamanlamalarından haberdar olurlar ve buna göre geri çekilme yaparlar [60]-[64]. ACK sadece rezervasyon yenilemek için hizmet vermektedir. Çünkü veri paketleri ACK çarpışması nedeniyle kaybolsa bile yeniden iletim yapılmaz. Gönderen arka arkaya N kez ACK alamazsa, bağlantının bant genişliği ihtiyacını karşılayamadığı varsayılır ve üst katmandaki QoS yönlendirme protokolüne bildirilir. İlk veri paketinden sonra hiçbir RTS-CTS değişimi olmadığı için, gerçek zamanlı paketlerin çarpışma önlemesi rezervasyon tablolarının kullanımıyla gerçekleşir.

Benzetim kullanılarak, bu asenkron protokolün Küme Token ve Küme TDMA gibi zaman senkronizasyonu gerektiren diğer protokollerden daha düşük uçtan uca gecikme başardığı görülmüştür. Ancak, küme tabanlı protokoller kod ayırma kullandıkları için, daha yüksek toplam verim elde edebilirler. MACA/PR tarafından elde edilen verimin düşük olmasının nedeni, çoklu rezervasyon tablosunun her zaman güncel tutulmasının gerekmesidir [53]-[55]. Böylece, gönderici düğüm iletim öncesinde bunları iletici düğümden öğrenir. Tablolar komşular arasında sıklıkla değiştiğinden dolayı, bu durum ağa ek bir yük getirmektedir.

3.2.8 Asenkron QoS tabanlı çoklu atlamalı MAC

IEEE 802.11 DCF protokolüne dayanan asenkron bir protokol önerilmiştir. Bu protokol, CBR (Sabit Bit Hızı), VBR (Değişken Bit Hızı) gerçek zamanlı ve gerçek zamanlı olmayan datagram trafiğini destekler. Gerçek zamanlı olmayan bir veri iletimi durumunda, düzenli RTS-CTS-DATA-ACK dizisi gönderici ve alıcı arasında kullanılır. Gerçek zamanlı olmayan ve olan paketlere yanıt olarak gönderilen paketlere sırasıyla D-ACK ve R-ACK denir [45]-[48]. Benzer şekilde, gerçek zamanlı olmayan ve olan veri paketlerine de D-PKT ve R-PKT adı verilir. Gerçek zamanlı trafik durumunda, ilk R-PKT paketinden sonra gönderilen veri paketleri için bir RTS-CTS değişimi yapılmamaktadır. Diğer bir deyişle, R-ACK paketi sonraki gerçek zamanlı veri paketi için iletim rezervasyonu yapmaktadır. Beklenilen bir gerçek zamanlı trafik olduğunda düğümler bilgilendirilir [50]-[53]. Bu tahminler, R-PKT ve R-ACK paketleriyle ilgili tablolara kaydedilir. Aslında, herhangi bir RTS göndermeden önce, düğümler rezervasyon tablolarındaki girişlere dayalı olarak kuyruktaki gerçek zamanlı iletimlere müdahale etmeden boş bir zaman dilimi ararlar. Benzer şekilde, bir düğüm RTS alırsa, bir CTS paketi ile yanıt vermeden önce aynı denetimleri gerçekleştirir. Başarılı bir RTS-CTS alışverişinden sonra, veri gönderilir ve bir ACK paketi beklenir. ACK cevapsız kalır ise, düğüm geri çekilmeye başlar ve aynı işlem için IEEE 802.11 çekişme pencerelerini kullanır.

Bu protokolde, hem alıcı hem de verici düğümler kendi tablolarını kontrol ederler. Böylece, tablolarında bulunan bilgilerin alışverişini ortadan kaldırmış olurlar [60]-[64]. Benzetim kullanılarak, bu protokolün gerçek zamanlı trafik için BB Çekişmesi, MACA/PR ve DFS algoritmalarından daha düşük gecikmelere sebep olduğu görülmüştür. Paket kaybı oranları da nispeten küçüktür.

Gerçek zamanlı trafik desteklemek için rezervasyon tablosunu kullanan DBASE protokolü (Dinamik Bant Genişliği Tahsis/Paylaşım/Genişletme) önerilmiştir. Bu protokolün önemli bir özelliği de bant genişliği tahsisinin dinamik olarak değiştirilebilmesidir. Böylece, verimli CBR desteği yanı sıra VBR trafiğine de izin verilir [30]-[37]. Bu protokol, çok yüksek verimlilik ve yoğun trafik yükünde gerçek zamanlı paketler için düşük paket kaybı olasılığı elde ederek IEEE 802.11 DCF ve DFS mekanizmalarını geride bırakmaktadır. Bununla birlikte, DBASE, tüm düğümlerin birbirlerini duyabildiğini farz etmektedir.

3.2.9 DFS (dağıtık adil çizelgeleme)

Ortak bir kablosuz kanal paylaşan ve farklı akışları sağlayan DFS protokollerine, öncelikleri göz önüne alınarak bant genişliği ataması yapılmaktadır. DFS, IEEE 802.11 DCF protokolünden türetilmiştir ve ortam erişimini düzenleyen merkezi bir koordinatöre ihtiyaç duymaktadır [50-53]. DFS temel fikri, her paketin başlangıç ve bitiş zaman damgaları ile ilişkili olmasıdır. Daha yüksek öncelikli bir pakete daha küçük bir bitiş etiketi ve daha kısa geri çekilme periyodu atanmaktadır. Bu yaklaşım, yüksek öncelikli paket akışlarına tutarlı olarak daha kısa geri çekilme zamanları atamaktadır. Böylece, daha yüksek iş çıkarma oranları elde edilecektir.

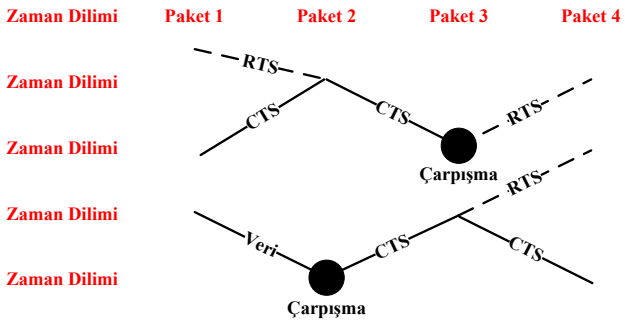
DFS, paketler için başlangıç ve bitiş zamanlarını SCFQ (Kendi-Zamanlı Adil Kuyruklama) algoritmasına göre hesaplamaktadır. SCFQ yapısına göre, her düğüm aynı zamanda yerel bir sanal saat tutar. Ancak, DFS böyle bir yapı kullanmaz ve bazı durumlarda kısa vadeli adaletsizliği ortadan

kaldırır. Çarpışma çözüm protokollerinin kullanımı, bu anormalliği çözebilmektedir [34]-[37]. Geri çekilme zamanlarını hesaplamak için doğrusal haritalama ve üstel haritalama olarak iki alternatif yaklaşım kullanılmaktadır. Doğrusal haritalama protokolünün bir dezavantajı, birçok paket akışının düşük önceliğe sahip olduğu durumlarda hepsine de büyük geri çekilme zamanları atanmasıdır. Bunun sonucu olarak, sistem uzun bir zaman boyunca boş kalır. Üstel haritalama yaklaşımı, bu soruna bir çözüm olarak önerilmiştir.

Benzetim kullanılarak, DFS mekanizmasının IEEE 802.11 protokolünden daha yüksek bir verim elde ettiği kanıtlanmıştır [45]-[48]. Ayrıca, geri çekilme zamanı hesaplaması için üstel haritalama tekniğinin kullanımı, doğrusal haritalama tekniğinden daha yüksek verim vermektedir. Ancak, DFS gizli terminal sorununu ve gerçek zamanlı paketlerin gecikmesini düşünmemektedir. Ayrıca, adilliği modellemek için genel bir analitik çerçeve önerilmemiştir.

4 Ortam erişim kontrol protokollerinde karşılaşılan sorunlar

CSMA tabanlı MAC protokolleri çok hop iletim ve gizli/maruz kalan terminal problemleri nedeniyle bilişsel radyo ağlar için uygun değildir. MACA protokolü, iki kısa RTS/CTS kontrol paketleri yardımı ile bu sorunları çözmek için önerilmiştir. MACAW protokolü, MAC katmanında veri paket kayıplarına daha hızlı yanıt sağlamak için, gönderimlere ACK paketi ekler. MACAW protokolü ayrıca, MAC katmanındaki tıkanıklık ve adaletsizlik sorunlarını çözmek için teknikler içermektedir. MACA ve MACAW gibi protokoller, RTS-CTS iletişimini temel almaktadırlar [56]-[59]. Fakat gizli terminallerden kaynaklanan performans düşüşünü azaltmak için taşıyıcı algılama mekanizmasından vazgeçseler dahi, sadece kısmen başarılıdırlar. Çünkü kontrol paketleri de çarpışmaya maruz kalabilmektedir. RTS/CTS/ACK gibi kontrol paketleri ve CSMA gibi taşıyıcı sezme tekniklerinin bir arada kullanımı gizli terminallerden kaynaklanan çarpışma olasılığını azaltmak için bulunmuştur. Böyle bir strateji, FAMA-NCS tarafından CTS hakimiyeti sağlamak için kullanılmaktadır. Veri paketleri hiçbir zaman CTS paketleri ile çarpışmayacağından dolayı gizli terminal sorunu çözülmüş olur. Fakat maruz-kalan terminal sorunu yine de çözülememektedir [57]. FAMA protokolüne benzer olarak, IEEE 802.11 DCF standardı CSMA ve RTS / CTS ileti değişimlerini birleştirmektedir. IEEE 802.11 DCF, kablosuz LAN ortamında iyi çalışmasına rağmen gezgin düğümler içeren çok hop bilişsel radyo ağlar için uygun değildir. Şekil 3'te RTS-CTS mekanizması görsel olarak ifade edilmiştir.



Şekil 3: RTS – CTS mekanizmasının gösterimi.

IEEE 802.11 protokolünde RTS/CTS/ACK ve NAV kullanımına rağmen, bazı paketler yine de çarpışmalara maruz kalmaktadır. Bir düğümün, paketin kodunu başarılı bir şekilde çözebileceği aralık alınan sinyalin gücü ile belirlenir. RX_{Th} ve CS_{Th} sırasıyla, geçerli bir paket alınması için gereken minimum işaret gücünü ve taşıyıcı algılamayı göstermektedir. Alınan sinyalin gücü CS_{Th} değerinden daha düşük ise, alınan sinyal gürültü olarak algılanır. Alınan sinyal gücü RX_{Th} ve CS_{Th} arasında ise, düğüm paket iletimini sezebilir fakat çözemez. Bu durum girişim aralığı olarak ifade edilmektedir [47]-[49]. Bir düğüm, alıcının kapsama girişimi dışında fakat göndericinin kapsama girişimi içindeyse ACK paketlerini algılayamaz. Sonuç olarak, ACK ve veri paketleri ilgili düğümlerden kaynaklanabilecek çarpışmalara maruz kalabilir. ACK paketlerindeki çarpışmalar, uzun veri paketlerinin iletim kaybına yol açtıkları için büyük bir problemdir. EIFS (Genişletilmiş IFS), IEEE 802.11 DCF protokolünde ACK paketlerindeki çarpışmaları önlemek için kullanılır. Bununla birlikte, diğer MAC protokollerinin çoğunluğu iletim aralığının girişim aralığına eşit olduğunu varsayar.

IEEE 802.11 DCF protokolünde, verileri çarpışmaya maruz kalan düğümler için çekişme penceresi boyutları hızlı bir şekilde artmaktadır. Diğer taraftan, önceki paketler başarılı bir şekilde teslim edilmezse ve bir ağ sıkışması olsa bile her yeni paket için CW_{min} en düşük değeri ayarlanır. Bu çekişme ve geri çekilme stratejisi, özellikle yoğun trafik koşulları altında, çarpışmalardan dolayı geri çekilen mevcut düğümler için haksızlıktır. Bunun için, MACAW protokolünde MILD (Çoklu Artış Normal Düşüş) algoritması kullanılarak mekanizma geliştirilmeye çalışılmıştır [60]-[63]. MACAW protokolünde, sadece düşük trafik koşullarında iş çıkarma oranını azaltmaktadır. Çekişme diliminde, zaman dilimlerini iki parçaya bölen bir algoritma önerilmiştir. Algoritmaya göre, yeni gelen trafiklere çarpışmaya uğrayan trafiklerden sonra zaman dilimi atamaları yapılmaktadır. Diğer bir çalışma da [61], adil kanal erişimi sağlamak ve çarpışma olasılığını azaltmak için önerilmiştir. Bu çalışmada, bir düğüm için çekişme penceresi yakın çevresindeki trafiğe bağlı olarak dinamik olarak ayarlanmaktadır.

Çoklu eşzamanlı gönderim, çoklu-hop ağlardaki gönderim/girişim aralığının dışındaki farklı düğümler arasında gerçekleşebilir. Çok hop ağlar, düğümlerin arka arkaya bindirildiği tek-hop durumlar ile karşılaştırıldığında daha fazla çarpışmaya maruz kalmaktadırlar. Bunun bir sonucu olarak, bir alandaki tıkanıklık komşu alanları da etkileyebilir ve hatta diğer bölgelere de yayabilir. IEEE 802.11 DCF protokolünün uçtan uca verimliliği, düğümlerin çarpışmalarından dolayı çoklu-hop ağlarda önemli ölçüde azalmaktadır. Maruz kalan terminal sorunu çözülerek BTMA protokolünde olduğu gibi iş çıkarma oranı artırılabilir [28]-[30]. PCMA, güç kontrolü ve yönlü anten kullanarak da iş çıkarma oranı artırılabilir.

Cihazların boyutları küçüldükçe, daha büyük pil paketleri taşıma kapasiteleri de azalmaktadır. Ağın tüm katmanlarındaki güç-odaklı protokoller, performans ve pil ömrünü en üst düzeye çıkarabilmektedir. Kısacası, çeşitli düğümler için uyku ve uyanıklık döngüleri kullanan güç yönetimi ve düğümlerin güç seviyesini değiştiren güç kontrol yaklaşımları kullanılmaktadır [36-38]. Bunlar, veri iletişiminde hem avantaj hem de dezavantaj olabilmektedirler.

PAMAS gibi güç yönetimi tabanlı MAC protokolleri, uygun zamanlarda düğümleri kapatarak önemli ölçüde güç tasarrufu

sağlamaktadırlar. İlginçtir ki, düğümler alternatif uyku ve uyanık olma döngülerini takip etseler bile; düğümler uykuda iken gönderim ve alım yapamadıkları için iş çıkarma oranını etkilemezler [40]-[43]. PAMAS mekanizması, MAC katmanında geri bildirim kullanmamaktadır. MACAW protokolünde olduğu gibi yükseltme işlemi fiziksel katmanda yapılır ise, yüksek katmanlarda yeniden gönderim gereksiz hale geldiğinden enerji verimliliği geliştirilebilir. Güç yönetimi de önemli bir tasarruf sağlamaktadır. Fakat az sayıda düğüm aktif iken ağ kapasitesini azaltmaktadır. Uyku düğümlerinin paket iletimleri için uyanmaları gerektiğinden, uzun kurulum gecikmeleri meydana gelebilmektedir.

Veri paketlerinin iletimi için daha az güç seviyeleri kullanmak, daha yüksek bit hata oranları ve daha maliyetli yeniden iletimlere neden olabilmektedir [45]-[49]. IEEE 802.11 protokolü ile güç kontrolü kullanılarak yapılan kanal ediniminin, küçük paketler için genellikle orantısız yüksek enerji maliyetine yol açtıkları görülmüştür.

Bir bilişsel radyo ağı, PDA cihazları, el bilgisayarları ve güç kaynağı odaklı diğer cihazlar gibi çeşitli güç kaynaklarıyla çalışan heterojen cihazları içerebilir. İlgili cihazlar, kendi gönderme gücü özelliklerine göre farklılık göstermektedir. [Bu, çok farklı güç kaynakları ve cihazlar arasında asimetrik bağlantılara yol açmaktadır [34]-38]. Daha güçlü düğümler komşuluğundaki, düşük güçlü düğümlerin kanal erişimi sağlayabilmesi garanti edilmelidir. Literatürdeki güç tabanlı protokollerin çoğu; heterojen düğümleri, adil olma özelliklerini, düğüm hareketliliğini ve çoklu-hop ağları hesaba katmamaktadır.

Tek kanallı MAC protokollerinin performansı, gezgin düğümlerin sayısı yüksek olduğunda yüksek çarpışmalardan dolayı önemli ölçüde azalmaktadır. Güç kontrol protokolleri ve kanal yeniden kullanımını artıran yönlü antenler performansı artırılabilmektedir [49]. Başka bir seçenek ise, kod veya frekans bandı kullanan çoklu kanallar kullanmaktır.

Birden çok veri kanalı kullanmak için, gezgin bilgisayarlar bir kanaldan diğerine geçiş yapabilen tek bir veya aynı zamanda çoklu erişim sağlayabilen çoklu alıcı vericiye sahip olabilir. Birden fazla alıcı verici kullanımı karmaşık donanım ve yüksek maliyet gerektirmektedir [58]-[61]. Ayrıca, farklı frekanslar kullanmak için vericilerinin senkronize yeteneği olmayan cihazlar ile bu durum mümkün olmayabilir.

Çok-kanallı protokoller genellikle çoklu veri kanalları için kanal atama ve orta erişim sorunlarıyla ilgilenmektedir. Protokol tarafından seçilen kanal sayısı ağ derecelendirmesinden bağımsız olmalıdır. Çok kanallı CSMA, derece bağımsız bir protokoldür. Ancak, başka bir kanaldan diğerine atlamalı tek bir verici var ise her bir düğümün tüm kanalları dinlemesi gerekmektedir. Tüm kanalları dinlemek birden çok alıcı verici gerektirmesi nedeniyle donanım maliyetini artırmaktadır. Ayrıca RTS/CTS gibi rezervasyon mekanizmalarından yoksun olması nedeniyle gizli terminal sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. HRMA protokolü ayrıca tek bir alıcı verici kullanan dereceden bağımsız bir protokoldür [45]-[47]. Fakat, HRMA protokolü senkronizasyon gerektirmektedir ki bu da ağın geniş bir alana yayıldığı durumlarda oldukça zor olmaktadır. DCA protokolü tek alıcı verici talep tabanlı kanal ataması kullanmaktadır ve saat senkronizasyonu gerektirmemektedir. Ayrıca, DCA protokolüne benzer bir kontrol ünitesi ve N veri kanalına sahip mekanizmalar da önerilmiştir. Ancak, en iyi kanal alıcı tarafındaki kanal durumlarına göre seçilmektedir. Birçok protokol güç tasarrufu veya çoklu kanal kullanırken, DCA-PC kanal ataması, ortam erişimi ve güç kontrol sorunlarıyla ilgilenmektedir. Bu sayede, güç koruması ve çoklu kanalın avantajlarından faydalanılmaktadır.

Her bir kontrol paketinin iletimi, kaynakların kullanılmasını gerektirir. Bunun bir sonucu olarak, düğüm sayısı ve kontrol paketi yükü arasındaki ilişkiyi araştırmak gerekmektedir [30]-[33]. Ayrıca, yönlendirme gibi üst katmanlardaki kümeleme protokollerini kullanmak yararlı olabilir.

Bazı MAC protokollerindeki yüksek öncelikli düğümler diğer düğümlerden daha kısa IFS süresi beklerler. Bu protokoller yüksek öncelikli trafiklere nispeten daha düşük ortalama gecikme sağlamaktadırlar. Ancak, uzun paketlerin büyük bir bölümü daha uzun gecikmelere maruz kalmaktadırlar [39]-[42]. Hatasız kanal durumunda, IEEE 802.11 protokolü maksimum çerçeve boyutu ve çerçeve parçalama kullanarak daha yüksek verim elde etmektedir. Bu durum, IFS ve geri çekilme zamanları ile kombinasyon halinde servis farklılaşması sağlamaktadır. Bununla birlikte, daha uzun paketler gürültü olması durumunda kısa çerçevelerden daha fazla bozulmaya maruz kalırlar. Aslında, geri çekilme ve maksimum çerçeve uzunluğu kullanılan servis farklılaşmasına bağlı olarak gürültülü ortamlarda iyi çalışmamaktadır. Bunun yanında, MAC protokollerinin çoğunluğu kanal hata etkilerini göz önüne almamaktadır.

Çekişmeye alternatif başka bir yaklaşım BB tabanlı protokoller tarafından kullanılmıştır. Protokolün birincil gücü, ağdaki diğer düğümlere öncelik derecesini yaymak için BB sinyallerini kullanmasıdır. Bu durum, sınırlı ve genellikle çok küçük gerçek zamanlı gecikmeleri garanti etmektedir. Bununla birlikte, yüksek öncelikli istasyonlarda sabit erişim aralıkları gibi ekstra gereksinimler istemektedir [45]-[47]. Bu protokolün önemli kısıtlamalarından biri de eşzamanlı trafik kaynaklarının servis ihtiyaçları için optimize edilmiş olmasıdır. Benzer şekilde, eğer bir düğümün tek ya da birkaç acil gönderilecek paketi var ise uygun bir teknik değildir. Ayrıca, gizli terminaller açık bir şekilde göz önüne alınmamıştır. Bunu, taşıyıcı algılama ve meşgul mesajları ekleyerek geliştirmek mümkündür.

Yukarıda bahsedilen protokollerin çoğunluğu, gerçek zamanlı trafik ve datagram arasında adil paylaşım sağlamayabilir. DFS protokolü, IEEE 802.11 protokolünün geri çekilme mekanizmasını kullanmaktadır. Servis farklılaşması, düğümlerin önceliğine ters orantılı olacak şekilde geri çekilme aralığı seçerek başarılır [50]-[53]. Diğer yandan, adil olma paket boyutlarıyla orantılı aralar seçilerek yapılmaktadır. Bununla birlikte, gerçek zamanlı trafik için gereken sınırlı gecikme sağlanamamaktadır. Bunun yanında, düşük öncelikli akışlar için gereken geri çekilme zamanları oldukça büyük olabilmektedir.

Önceki bölümlerde açıklandığı gibi, ACK ve veri paketleri diğer düğümlerden kaynaklanan çarpışmalara hassastır. ACK paketlerindeki çarpışmalar, uzun veri paketlerinin yeniden iletimi kaybıyla sonuçlandığı için özellikle büyük bir sorundur [64]-[67]. Ancak, diğer MAC protokollerinin çoğu iletim aralığının girişim aralığına eşit olduğunu varsaymaktadır.

Önerilen MAC protokollerinin çoğunluğu basitleştirilmiş paket çarpışma modeli kullanırlar. Örneğin, dairesel adım fonksiyonu çarpışma modeli. Her bir düğümün iletim aralığının genellikle aynı olduğu varsayılır. Düğüm her zaman, bu aralık içinde gönderilen tüm yayınlara kulak misafiri olur. Eğer iletim aralığında üst üste gelinirse, paket çarpışmaları

meydana gelir [43]-[45]. Bu çarpışma modeli, protokol tasarımını ve teorik analizi kolaylaştırıyor olsa da, bazı işlemlerin nasıl yapılabileceği ile ilgili yanlış bilgiler verebilir. Örneğin, ortak bir alıcının iletim aralığının dışında iki gönderici mevcut olabilir.

Minyatür güç kaynakları geliştirmedeki teknolojik gelişmelerin yanında, enerji verimli MAC protokollerinin geliştirilmesi de üzerinde araştırma yapılan konulardandır. Daha önce tartışıldığı gibi, güç yönetimi ve güç tasarrufu yaklaşımlarının; iş çıkarma oranı, protokol yükü, asimetrik bağlantılar, kanal hatalarına duyarlılık gibi kusurları vardır [56].

Birçok MAC protokolleri, veri paket iletimi başlamadan önce kanal kullanımını görüşmek için; MACA, FAMA, IEEE 802.11 RTS/CTS gibi belli kontrol paketlerini kullanırlar. Bu kontrol paketleri veri paketleri ile çarpışabileceğinden dolayı, bazı MAC protokolleri ayrı bir kontrol kanalı üzerinden kontrol paketlerini iletirler [34]-[37]. Veri paketleri, kontrol kanalında başarıyla gerçekleştirilen görüşmelerden sonra veri kanalları üzerinden gönderilirler.

Bu tür düzenlemelere ilişkin asıl sorun, kanal kullanım verimliliğinin artıp artmadığıdır. Farklı kontrol/veri kanalı veri hızları oranlarındaki ilişkiyi anlamak için kapsamlı çalışmalar gereklidir [32]-[35]. Bu durum, kontrol paketlerinin iletim zamanını ve dolayısıyla iş çıkarma oranını etkilemektedir. Tek bir kanal yerine birden fazla kanal kullanımının toplam yararı hala belirsizdir.

Kablosuz bilişsel radyo ağlar için MAC protokollerinin çoğu, çoklu-hop ağlarda kullanıldığında, maksimum ağ kullanımını sağlayan optimum iletim modeliyle sonuçlanmamaktadır. Optimum iletim örneği veya yapısı sağlamak için, tüm ağdaki aktif düğümlerin kuyruğu bilinmelidir. Bilişsel radyo ağların dinamik ve dağıtık yapısı göz önüne alındığında, tüm ağın bilgisi kanal erişimi kararı verilmeden önce bilinmemektedir. Ancak, yerel alandaki bilgi sınırlı hız ve belli bir süredeki yarı-statik trafik modelinden dolayı mevcut olabilir [45]-[48]. Bu kısıtlı bilginin nasıl kullanabileceği ve aktif düğümlere kanal erişiminin düzenli ve etkili bir şekilde nasıl öğretileceği, kablosuz bilişsel radyo ağlarda MAC protokolleri için farklı bir çalışma alanıdır.

Rakip aktif düğümler için adil kanal erişimi, MAC protokollerinde önemli bir konudur. Bir uç örnek vermek gerekirse, diğer tüm düğümler bekletilirken sadece bir düğümün paylaşım kanalını kullanmasına izin verilmektedir. Böyle adil olmayan bir protokolün iş çıkarma oranı ve gecikme performansı diğer MAC protokollerinden daha iyi olabilmektedir [45]-[49]. Örneğin, çekişen düğümlere adil erişim sağlayan DFS gibi protokoller, gerçek zamanlı trafik için zaman sınırlı gecikme desteklememektedirler.

Gelecekte, uygulamaların daha ve daha fazla bant genişliği gerektirme olasılığı vardır ve bilişsel radyo ağlar günlük hayatımızın bir parçası olabilir. Yön kontrolüne dayalı akıllı antenler geliştirilmelidir ve bunların etkili kullanım yöntemleri gerekli olacaktır [56]. Şu an itibariyle, bu alanda nispeten küçük çaplı çalışmalar yapılmıştır. Gerçek donanım geliştirme elemanları kullanıldıkça, daha ayrıntılı araştırmaların yapılması gerekmektedir.

Taşınabilir cihazların yaygın kullanımı ile gezgin kullanım için daha fazla uygulamalar tasarlanmaktadır. Günümüzde hücresel bağlantı popüler bir seçim olsa da bilişsel radyo ağların daha popüler olacağı konusunda hiçbir şüphe yoktur. MAC katmanı, tüm sistem performansı için önemli bir rol oynamaktadır ve diğer katmanları da etkilemektedir. Etkili MAC protokolleri, çoklu servis sınıfları için servis garantisinin karmaşıklığı, mevcut kaynakların verimli kullanımı ve kayıp iletimlere hemen müdahale konuları arasında denge kurulmalıdır [45]-[48]. Bu sebeple, toplam QoS gereksinimlerini karşılamak için kaynak rezervasyonlarında yakınlık, MAC protokolleri ve yönlendirme yaklaşımları başarılmalıdır.

Kablosuz bilişsel radyo ağlardaki asıl dinamik kaynaklar; çeşitli bağlantı özellikleri ve gezgin düğümlerdir. Çeşitli uygulama talepleri, dinamiklerin diğer bir kaynağı olarak düşünülebilir. Çoğu protokol, ağ düğümleri arasındaki kablosuz bağlantıların sabit özelliklere sahip olduğunu düşünür. Bununla birlikte, bu bağlantılar girişim, zayıflama gibi faktörlerden dolayı iletim kalitelerinde varyasyonlara maruz kalmaktadırlar. Eğer link katmanı BER özelliğindeki değişimlere cevap vermiyorsa, BER oranındaki artış ağ katmanında daha fazla paket kayıplarına yol açacaktır. Paket kayıplarının sıkışma veya bağlantı katmanı bozukluklarından kaynaklandığını ayırt etmek ağ katmanı için oldukça güçtür [50]-[60]. Sonuç olarak, ağ katmanı mevcut kullanılabilir bant genişliğini doğru bir şekilde belirleyemez. Bu da herhangi bir kaynak rezervasyon tabanlı QoS mekanizması için anahtar parametredir. ARQ (Otomatik Tekrar İsteği) iletim kalitesi düştüğünde, paket yeniden iletimlerinin sayısını artırmak için link katmanında kullanılır. Karmaşık link katmanı ayrıca, uyarlamalı hata düzeltme mekanizması kullanır veya modülasyonu değiştirir. Bu önlemler genellikle, ağ katmanındaki etkili iş çıkarma oranını düşürmektedir. Bozulmalardan dolayı oluşan paket kayıpları ise düşük olarak kalmaktadır.

Çekişen paketlerin geçerlilik süresi, kanal erişim mekanizmasında belirtilmelidir. Bu durum, özellikle bazı paketlerin ağda artmış gecikmeye maruz kaldığında önem kazanmaktadır. Benzer olarak, acil bilgisinin derecesi BB mekanizmasında olduğu gibi ağdaki her bir çekişen düğüm tarafından ortama yayılmalıdır. Diğer yandan, kanal erişimi sırasında çeşitli noktalarda süresi dolan paketlerin atılması ağ performansını artırmak için diğer bir önemli etkendir. Gerçek zamanlı trafikler için sınırlı gecikmeleri garanti altına almak için çarpışma çözümleme mekanizması belirli bir zamanda sonlandırılmalıdır [45]-[49]. İki ya da daha fazla sayıda düğüm arasındaki çarpışmalar çözümlenirken, kanal çekişmesi için yeni trafiğe izin verilmemelidir. Mevcut protokollerin birçoğu bu özelliği düşünmemektedir. Bazı akışların engellenmesinden kaçınılmalıdır. Düğümler arasında adil kaynak paylaşımı garanti edilmelidir.

Geniş bir alanda değişen QoS gereksinimlerine gelecekte ihtiyaç duyulacaktır. Bant genişliği tahsisi, kabul kontrolü ve trafik politikalarının hepsi çeşitli QoS akışlarını karşılamak için gereklidir [52]. Gerçek zamanlı trafik için kabul kontrolünün bazı formları, mutlak QoS sağlayan protokoller için düşük öncelikli trafik yoksunluğundan kaçınmak için gereklidir.

Maalesef, çözülmesi gereken bazı konular birbirlerine zıt gözükmektedirler. Örneğin, belli bir seviye QoS sağlamak için bazen başarılı paket iletimi bazen de doğrulama yapılması gerekmektedir. Bununla birlikte, bu durum daha ağır kontrol paket yüküne sebep olmaktadır. Diğer yandan, sürekli olarak yeni paketler üretildiği için gerçek zamanlı paketlerin doğrulaması gerekmeyebilir [55]. Gerçekte, vurgu ilgisiz

paketler yerine yeni varan paketlerin gönderilmesi üzerine olmalıdır.

Mevcut MAC protokollerinin çoğunluğu sadece basit ağ topolojileri ile QoS özellikleri alt kümesine yoğunlaşmaktadır. Bununla birlikte, çoklu-hop ağlarda uçtan uca paket gecikmesi, kanal hataları, güç kontrolü, heterojen düğümler ve düğüm gezginliği gibi konular ihmal edilmektedir. Daha fazlası, tüm paketler aynı önceliğe sahip olduğunda düğüm başına tek akış olduğu kabul edilmektedir. Çoklu-hop bilişsel radyo ağlarda, bir düğüm farklı akışlara ait olan paketleri gönderebilir. Bu durumda, akışlar farklı bant genişliği, gecikme sınırları ve önceliklere sahip olabilir [65]-[68]. Benzer olarak, bir akışın farklı paketleri gecikme değişikliği ve paket önemine göre farklı önceliklere sahip olabilir. Benzetim sonuçları genellikle basit rasgele hataları göz önüne almaktadır. Kanal kaybolma etkisi, patlamalı ve yer bağımlı gürültünün performansa etkileri göz ardı edilmektedir. Benzer olarak, bozuk ya da dinamik olarak değişen ağ topolojilerinin etkisi birçok protokolde düşünülmemiştir. IEEE 802.11 DCF protokolünün kaybolmaya karşı bazı önlemlerinin olduğu göz önünde tutulmalıdır. Ayrıca, BEB kullanımı ve paket parçalanmasından dolayı patlamalı gürültüye de hassastır.

Bununla birlikte, tüm uygulamalar için en uygun tek bir yaklaşım olduğu iddia edilemez. Gerçekten, tek bir kesin yaklaşım yoktur [70]. En iyisi, tanımlanan önceliklere bağlı olarak akıllı çıkarımlar yapmaktır.

5 Sonuç

Bu çalışma, MAC protokolleri tabanlı kablosuz bilişsel radyo ağları alanında yapılan çalışmaların geniş bir yelpazesini sunmaktadır. Birçok protokol tartışılmıştır ve belirgin özellikleri tanımlanmıştır. Özellikle; çarpışma çözümü, güç koruma, çoklu kanal, yönlü anten kullanmanın yararları ve QoS konuları üzerinde durulmuştur. Bazı MAC protokollerinin özellikleri ve işlevsel prensipleri tanımlanmıştır. Bu çalışmaların bazıları; MACA, MACAW gibi genel amaçlı protokollere yoğunlaşırken diğerleri PAMAS, PCM gibi güç kontrolü ya da DMAC, çoklu-hop RTS MAC gibi yönlü anten teknolojilerindeki özel konulara yoğunlaşmaktadırlar. Bununla birlikte, ilgili protokollerin çoğunluğu sadece gezgin ve sabit düğümlü ağlar için tasarlanmakla kalmamıştır. Sunulan MAC protokolleri, geleneksel veya kablosuz bilişsel radyo ağlarındaki ikincil kullanıcıların ihtiyaç ve gereksinimlerine göre farklı amaçlar için kullanılabilmektedir.

6 Kaynaklar

[1] Rappaport TS. *Wireless Communications, Principles & Practice*. 2nd ed. New Jersey, USA, Prentice-Hall Inc., 2002.

[2] Stallings W, *Wireless Communications and Networks*. 2nd ed. New Jersey, USA, Pearson Education, 2005.

[3] Li X, Liu H, Roy S, Zhang J, Zhang P, Ghosh C. "Throughput analysis for a multi-user, multi-channel ALOHA cognitive radio system". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 11(11), 3900-3909, 2012.

[4] Choe S. "Throughput, delay and packet capture effects in rayleigh fading of a cognitive radio packet network". *IEEE Conference on Wireless Days*, Dubai, 24-27 November 2008.

[5] Lien SY, Tseng CC, Chen KC. "Carrier sensing based multiple access protocols for cognitive radio networks". *IEEE International Conference on Communications*, Beijing, China, 19-23 May 2008.

[6] Yang Z. Investigations of Multiple Access Protocols in Cognitive Radio Networks. Doctoral Dissertation, Stevens Institute of Technology, Hudson, New Jersey, United States, 2010.

[7] Choe S, Park SK. "Throughput of slotted ALOHA based cognitive radio MAC". *IEEE International Conference on Ubiquitous Information Technologies and Applications*, Fukuoka, Japan, 20-22 December 2009.

[8] Wyglinski AM, Nekovee M, Hou T. *Cognitive Radio Communications and Networks*, *Principles and Practice*. 1st ed. California, USA, Academic Press, 2010.

[9] Chen KC, Prasad R. *Cognitive Radio Networks*, 1st ed. Chippenham, UK, John Wiley & Sons Inc., 2009.

[10] Kataria A. Cognitive Radios-Spectrum Sensing Issues. Master of Science Thesis, University of Missouri, Faculty of the Graduate School, Columbia, USA, 2007.

[11] Eerla VVS. Performance Analysis of Energy Detection Algorithm in Cognitive Radio. Master of Science Thesis, National Institute of Technology Rourkela, Department of Electronics and Communication Engineering, Odisha, India, 2011.

[12] De Domenico A, Strinati EC, Di Benedetto M. "A survey on MAC strategies for cognitive radio networks". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(1), 21-44, 2012.

[13] Buccardo A. A Signal Detector for Cognitive Radio System. Master of Science Thesis, University of Gävle, Gävle, Sweden, 2010.

[14] Muta R, Kohno R. "Throughput analysis for cooperative sensing in cognitive radio networks". *IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Tokyo, Japan, 13-16 September 2009.

[15] Akyildiz IF, Lee WY, Vuran MC, Mohanty S. "Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey". *Computer Networks*, 50(13), 2127-2159, 2006.

[16] Yuan J, Torlak M. "Optimization of throughput and autonomous sensing in random access cognitive radio networks". *7th IEEE International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing*, Istanbul, Turkey, 4-8 July 2011.

[17] Zhang L, Xiao Z. "Performance analysis of cooperative spectrum sensing algorithm for cognitive radio networks". *IEEE International Conference on Computer Design and Applications*, Qinhuangdao, China, 25-27 June 2010.

[18] Ghasemi A, Sousa ES. "Spectrum sensing in cognitive radio networks: the cooperation processing tradeoff". *Wireless Communications and Mobile Computing*, 7(9), 1049-1060. 2007.

[19] Bayılmış C, Ertürk İ, Çeken C. "Kablosuz bilgisayar ağlarının karşılaştırmalı incelemesi". *Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi*, 7(3), 201-210, 2004.

[20] Çiflikçi C, Tuncer AT, Özşahin AT, Yesbek SM. "Bilişsel radyo ve ortam erişim kontrol katmanı protokolleri". *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.

[21] Bayılmış C, Ertürk İ, Çeken C, Bandırmalı N. "Kablosuz Erişim Yöntemlerinin Karşılaştırmalı İncelemesi". *TMMOB Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 22-25 Eylül 2005.

[22] Karahan A, Ertürk İ, Atmaca S, Çakıcı S. "Melez bir kablosuz algılayıcı ağ OEK protokolü". *6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Elazığ, Türkiye, 16-18 Mayıs 2011.

[23] Abramson N. "THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications". *Proceedings of the Fall Joint Computer Conference*, Houston, Texas, USA, 14-19 November 1970.

[24] Akyildiz IF, McNair J, Martorell LC, Puigjaner R, Yesha Y. "Medium access control protocols for multi-media traffic in wireless networks". *IEEE Network Magazine*, 13(4), 39-47, 1999.

[25] Kleinrock L, Tobagi FA. "Packet switching in radio channels: part i-carrier sense multiple access modes and their throughput-delay characteristics". *IEEE Transactions on Communations*, 23(12), 1400-1416, 1975.

[26] Kleinrock L, Tobagi FA. "Packet switching in radio channels: Part II-the hidden terminal problem in carrier sense multiple access and busy tone solution". *IEEE Transactions Communations*, 23(12), 1417-1433, 1975.

[27] Gallager RG. "A perspective on multi access channels". *IEEE Transactions on Information. Theory*, 31(2), 124-142, 1985.

[28] Bhargavan V, Demers A, Shenker S, Zhang L. "MACAW: A media access protocol for wireless LANs". *ACM Special Interest Group on Data Communication Conference*, London, UK, 31 August-2 September 1994.

[29] Fullmer CL, Garcia-Luna-Aceves JJ. "Floor acquisition multiple access (FAMA) for packet - radio networks". *ACM Special Interest Group on Data Communication Conference*, Cambridge, Massachusetts, USA, 28 August-1 September 1995.

[30] Ye W, Jeidemann J, Estrin D. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks". *Proceedings of The IEEE International Conference on Computer Communications*, New York City, USA, 23-27 June 2002.

[31] Talucci F, Gerla M. "MACA-BI (MACA By Invitation), A wireless MAC protocol for high speed ad hoc networking". *Proceedings of The IEEE 6th International Conference on Universal Personal Communications*, San Diego, USA, 12-16 October 1997.

[32] Wu C, Li VOK. "Receiver-initiated busy-tone multiple access in packet radio networks". *Proceedings of the ACM Special Interest Group on Data Communication Conference*, Stowe, USA, 11-13 August 1987.

[33] Tang Z, Garcia-Luna-Aceves JJ. "Hop-reservation multiple access (HRMA) for ad hoc networks". *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, New York, USA, 21-25 March 1999.

[34] Haas ZJ, Deng J. "Dual busy tone multiple access (DBTMA)-A multiple access control scheme for ad hoc networks". *IEEE Transactions on Communications*, 50(6), 975-984, 2002.

[35] Chen KC. "Medium access protocols of wireless LANs for mobile computing". *IEEE Network*, 8(5), 50-63, 1994.

[36] Crow BP, Widjaja I, Kim JG, Sakai PT. "IEEE 802.11, wireless local area networks". *IEEE Communications Magazine*, 35(9), 116-126, 1997.

[37] Muir A, Garcia-Luna-Aceves JJ. "An efficient packet sensing MAC protocol for wireless networks". *Mobile Networks and Applications*, 3(3), 221-234, 1998.

[38] Singh S, Raghavendra CS. "PAMAS-power aware multi-access protocol with signaling for ad hoc networks". *ACM Computer Communication Review*, 28(3), 5-26, 1998.

[39] Chockalingam A, Zorzi M. "Energy efficiency of media access protocols for mobile data networks". *IEEE Transactions on Communications*, 46(11), 1418-1421, 1998.

[40] Sivalingam KM, Srivastava MB, Agrawal P. "Low power link and access protocols for wireless multimedia networks". *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Arizona, USA, 4-7 May 1997.

[41] Smith WM, Ghang PS. "A low power medium access control protocol for portable multi-media systems". *Proceedings of the 3rd International Workshop Mobile Multimedia Communication*, New Jersey, USA, 25-27 September 1996.

[42] Jung ES, Vaidya NH. "An energy efficient MAC protocol for wireless LANs". *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, New York, USA, 23-27 June 2002.

[43] Woesner H, Ebert JP, Schlager M, Wolisz A. "Power saving mechanisms in emerging standards for wireless LANs: The MAC level perspective". *IEEE Personal Communications*, 5(3), 40-48, 1998.

[44] Monks J, Bharghavan V, Hwu W. "A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks". *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, Alaska, USA, 22-26 April 2001.

[45] Ramanathan R, Hain RR. "Topology control of multi-hop wireless networks using transmit power adjustment". *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, Tel Aviv, Israel, 26-30 March 2000.

[46] Rodoplu V, Meng TH. "Minimum energy mobile wireless networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 17(8), 1338-1344, 1999.

[47] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. "On the construction of energy-efficient broadcast and multicast trees in wireless networks". *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Communications*, Tel Aviv, Israel, 26-30 March 2000.

[48] Wieselthier JE, Nguyen GD, Ephremides A. "Resource- limited energy efficient wireless multicast of session traffic". *Hawaii International Conference on Systematic Science*, Hawaii, USA, 3-6 January 2001.

[49] Ebert JP, Stremmel B, Wiederhold E, Wolisz A. "An energy-efficient power control approach for WLANs". *Journal of Communications and Networks*, 2(3), 197-206, 2000.

[50] Nasipuri A, Zhuang J, Das SR. "A multichannel CSMA MAC protocol for multi-hop wireless networks". *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Louisiana, USA, 21-24 September 1999.

[51] Nasipuri A, Das SR. "Multichannel CSMA with signaling power-based channel selection for multi-hop wireless networks". *Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference*, Boston, USA, 15-18 May 2000.

[52] Jain N, Das SR, Nasipuri A. "A multichannel CSMA MAC protocol with receiver-based channel selection for multi-hop wireless networks". *Proceedings of the 9th International Conference Computer Communications and Networks*, Arizona, USA, 15-17 October 2001.

[53] Ephremides A, Wieselthier J, Baker D. "A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling". *Proceedings of the IEEE*, 75(1), 56-73, 1987.
[54] Pursley M. "The role of spread spectrum in packet radio networks". *Proceedings of the IEEE*, 75(1), 116-134, 1987.
[55] Chalmers D, Slomon M. "A survey of quality of service in mobile computing environments". *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2(2), 2-10, 1999.
[56] Veres A, Campbell AT, Barry M, Sun LH. "Supporting service differentiation in wireless packet networks using distributed control". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 19(10), 2081-2093, 2001.
[57] Gerla M, Tzu J, Tsai C. "Multi-cluster, mobile, multimedia radio network". *Wireless Networks*, 1(3), 255-265, 1995.
[58] Lin CR, Gerla M. "Adaptive clustering for mobile wireless networks". *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 15(7), 1265-1275, 1997.
[59] Lin CH. A Multi-Hop Adaptive Mobile Multimedia Network: Architecture and Protocols. Doctoral Dissertation, University of California, Los Angeles, United States, 1996.
[60] Deng DJ, Chang RS. "A priority scheme for IEEE 802.11 DCF access method". *IEICE Transactions on Communications*, E82-B(1), 96-102, 1999.
[61] Choi S, Pedro J, Shankar NS, Mangold S. "IEEE 802.11e contention-based channel access (EDCF) performance evaluation". *Proceedings of the International Conference on Communications*, Alaska, USA, 11-15 May 2003.
[62] Mangold S, Choi S, May P, Klein O, Hiertz G, Stibor L. "IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service". *Proceedings of the European Wireless*, Florence, Italy, 25-28 February 2002.
[63] Lin CR, Gerla M. "MACA/PR: An asynchronous multimedia multi-hop wireless network". *Proceedings of The IEEE Conference on Computer Communications*, Kobe, Japan, 7-12 April 1997.
[64] Vaidya NH, Bahl S, Gupta S. "Distributed fair scheduling in a wireless LAN". *6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, USA, 6-11 August 2000.
[65] Golestani SJ. "A self-clocked fair queuing scheme for broadband applications". *Proceedings of The IEEE Conference on Computer Communications*, Toronto, Canada, 12-16 June 1994.
[66] Garces R, Garcia-Luna-Aceves JJ. "Near-optimum channel access protocol based on incremental collision resolution and distributed transmission queues". *IEEE Conference on Computer Communications*, San Francisco, USA, 29 March-2 April 1998.
[67] Nandagopal T, Kim TE, Gao X, Bharghavan V. "Achieving MAC layer fairness in wireless packet networks". *Proceedings of The International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, USA, 6-11 August 2000.
[68] Aad I, Castelluccia C. "Differentiation mechanisms for IEEE 802.11". *IEEE Conference on Computer Communications*, Alaska, USA, 22-26 April 2001.
[69] Weinmiller J, Woesner H, Ebert JP, Wolisz A. "Analyzing and tuning the distributed coordination function in the IEEE 802.11 DFW MAC draft Standard". 1996.
[70] Cali F, Conti M, Gregori E. "Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit". *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 8(6), 785-799, 2000.