



Slotsuz IEEE 802.15.4 Ağlarda CSMA/CA Parametre Değerlerinin Hesabına Yönelik Monte Carlo Makinesinin Tasarımı

Selçuk ÖKDEM^{1,*}

¹ Mühendislik Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye.

Öz

IEEE 802.15.4 protokolü kişisel alan ağlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Az enerji tüketimine ve düşük işlem karmaşıklığına sahip olan bu protokol birçok uygulamada tercih edilmektedir. Bu protokolün kanal erişiminde kullandığı CSMA/CA parametrelerinin en uygun değerlere atanması, haberleşme performansını etkileyen önemli bir süreçtir. Bu değerler, ağ yapısına ve ağ trafiğine bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu makalede, Monte Carlo simülasyonları aracılığı ile farklı ağ yapılarına yönelik testler yapılmış ve en uygun değerler bulunmuştur. Bu değerlerin bulunmasında ele alınan ağ yapısı çeşitli veri trafiğinde incelenerek parametrelerin etkisi gözlenmiştir. Bu sürece ilişkin olarak tasarlanan Monte Carlo makinesi ile hesaplanan değerlerinin performans artışındaki etkisi analiz edilmiştir. Farklı ağ yapıları ve çeşitli ağ trafikleri için ağ tasarımcılarına en uygun parametre değerleri önerilmiştir.

Makale Bilgisi

Başvuru: 28/10/2016
Kabul: 11/05/2017

Anahtar Kelimeler

IEEE 802.15.4
Kişisel Alan Ağları
CSMA/CA Parametreleri

Keywords

IEEE 802.15.4
Personal Area Networks
CSMA/CA Parameters

A Monte Carlo Machine Design to Obtain CSMA/CA Parameter Values for Unslotted IEEE 802.15.4 Based Networks

Abstract

IEEE 802.15.4 protocol is often used in wireless personal area networks. The protocol, which consumes low energy and has low computational complexity, is preferred in many applications. Assigning the best suitable values to CSMA/CA parameters, which are used for accessing the channel, is an important task that affects the communication performance. These values are variables depending on network type and network traffic. In this paper, tests were made according to network types using Monte Carlo simulations and the best values were found. The impact of parameters is observed while obtaining these values for the corresponding network type under various data traffic. The impact of calculated values using Monte Carlo machine, which is designed for this process, is analyzed. The best parameter values for various network types and network traffics are proposed to network designers.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kablosuz ağlarda, kanalın verimli kullanılması, paket çarpışmalarının azaltılması ve paket iletim gecikmesinin düşürülmesi ağ verimliliğini artırmada önemli etmenlerdendir. Kanalın verimli kullanılabilmesi, ağ üzerindeki diğer elemanların kanaldaki diğer haberleşmelerden olumsuz yönde etkilenmemesiyle sağlanabilir. Olumsuz etkilerin başlıca nedenleri, kanaldaki çakışmalar ve iletilen bilgilerin birbiri üstüne gelerek bozulmalarıyla (çarpışma) meydana gelir. Bu anlamda ağ elemanlarının kanaldan faydalanma kontrolleri kanal boşluğunu değerlendirme (Clear Channel Assessment, CCA) işlemi ile gerçekleşir. IEEE 802.15.4 protokolü de diğer protokollerde olduğu gibi ağdaki eleman sayısı ve ağ trafiği arttıkça kanal erişimde bazı sıkıntılar barındırır. Bu sıkıntılar, ağ tıkanmalarının yol açtığı çarpışmalarda (collision) artışa ve veri aktarımında (data throughput) yavaşlamalara neden olur. Bu sıkıntıların önlenmesi için CCA işleminde uygun parametre değerlerinin kullanılması önemlidir. Birçok uygulamada IEEE 802.15.4 protokolü tanımlanmış önerilen varsayılan değerler kullanılmıştır [1], [2], [3]. Ancak, ağın büyüklüğü ve veri trafiğinin yoğunluğuna bağlı olarak bu değerler veri aktarım performansını farklı ölçülerde etkilemektedir. Bu değerlerin hesabında çevrimdışı hesaplama [4], model tabanlı adaptasyon [5], ölçüm tabanlı adaptasyon [6] ve benzetim tabanlı analiz [7] yöntemleri kullanılabilir. Bunlardan çevrimdışı hesaplama ve analitik yöntemin birlikte kullanılması sonuçların önceden alınmasını

*İletişim yazarı, e-mail: okdem@erciyes.edu.tr

sağlar. Bu sayede, ağ çevrimiçi durumda sonuçları doğrudan kullanır ve ortalama olarak daha hızlı adaptasyon sağlar. Dolayısıyla, ağ çevrimiçi durumda iken haberleşen elemanlar analitik iş yükü ile boğulmamış olurlar. Bu iş yükü ağın değişen her durumu için fazladan enerji harcanmasına ve gecikme zamanının uzamasına neden olur. Ayrıca, analitik modellerde yapılan kabuller ve yaklaşım esaslı basitleştirme yöntemleri sonuçların olması gereken değerlerden sapmalarına neden olur. Örneğin kanalı boş bulma ihtimalinin parametre değerlerinden bağımsız kabul edilmesi uygulamada gerçekçi değildir. Çünkü CSMA/CA parametre değerlerini değiştirerek elemanların kanala daha sıklıkla bakmaları sağlanabilir. Bu sayede, boş kalan kanalın sıklıkla daha erken kullanılması mümkündür. Bu durum, kanalı boş bulma ihtimalinin doğrudan parametrelere bağlı olduğunu gösterir. Ölçüm tabanlı bir yaklaşım olan ADaptive Access Parameters Tuning (ADAPT) [6], dinamik olarak parametre değerlerin o anki ağ durumuna göre ayarlamaktadır. Bu ayarlama sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilir. Parametre değerleri artırılarak veya azaltılarak sonuç gözlenir. En uygun sonuca geçici osilasyon sürecinden sonra ulaşılır. Bu süreç, uygun değerlere ulaşmaya kadar işlem zamanına ihtiyaç duyar. Ağ bu süre zarfında yanlış parametre değerleri ile işletilir. Bu durum ağın farklı çalışma şartlarının değiştiği her anda tekrarlanır. Hafızasız bir sisteme sahip olan ADAPT ile hızlı bir parametre değişim süreci sağlanamayacağı belirgindir. Benzetim tabanlı bir çalışma ile hafızalı bir sistem geliştirilmiş ve öğrenme tabanlı bir yapı ile “Learning-based Adaptive Parameter tuning, LEAP” algoritması önerilmiştir [8]. Bu algoritma ADAPT algoritmasında olduğu gibi ağ şartlarını algılayan ölçümler yapar ve ağın çalışma anındaki durumuna göre uygun parametre değerlerini üretir. Ancak, ADAPT algoritmasından farklı olarak geçmiş durumlar kaydedilir ve mevcut duruma ilişkin değerler daha önceden kayıtlı ise daha hızlı geçiş süreci gerçekleşir. Bu LEAP algoritmasına hız kazandıran en önemli özelliktir. ADAPT ve LEAP algoritmalarında ağın mevcut şartlarına göre sonuç üretmeleri, “kanalı boş bulma ihtimali” ve “ağın enerji tüketimi” değerlerinin hesabını gerektirir. Bu değerlerin ilki belirli sayıda CCA işlemini gerektirir. Bu sayı, istatistiki açıdan anlamlı sonuçların üretilmesi için düşük değerlerde olmamalıdır. Bu örnekler içerisinde kanalın boş bulunma ihtimali, boş bulunma sayısının toplam örnek sayısına oranlanmasıyla hesaplanır. CCA zamanının örnek sayısına çarpımıyla ifade edilen “örnek alınma zamanı” uygun parametrelerin işletilmesini geciktiren bir süreçtir. Bu ise yanıt zamanını uzatmakta ve işlem karmaşıklığının artmasına neden olmaktadır. Ayrıca, bu algoritmalar kişisel alan ağlarından ziyade kablosuz sensör ağları gibi kümelenmiş ağlar için önerilmiştir.

Bu makalede, deneysel ölçümler benzetim tabanlı olarak geliştirilen ortamda alınmıştır. Kanalı boş bulma ihtimali, çarpışma ihtimali gibi değerler çalışma şartlarına göre deneysel olarak alınmıştır. Bu değerlere ilişkin kabul ve genellemeler yapılmadığı için gerçekçi çalışma şartlarına uygun yapı oluşturulması hedeflenmiştir. Çalışmanın katkısı aşağıda özetle maddeler halinde verilmiştir.

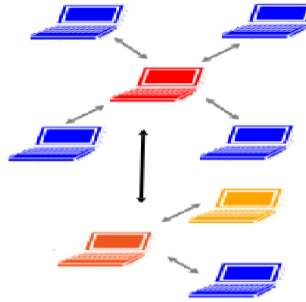
- IEEE 802.15.4 protokolü için kişisel alan ağlarına (Wireless Personal Area Networks, WPANs) özgü test işlemlerinin yapılacağı olay tabanlı benzetim ortamı geliştirilmiştir. Benzetim ortamıyla protokole özelleştirilmiş Monte Carlo makinesi tasarlanmıştır.
- WPAN yapılarında farklı CSMA/CA değerlerinin ağ performansına etkisi incelenmiştir.
- Çeşitli büyüklüklerde farklı ağ trafiği içeren senaryolar için uygun parametre değerlerinin hesabı yapılmıştır.
- WPAN yapılarına uygun olarak hesaplanan CSMA/CA parametre değerlerinin, ağ büyüklükleri ve ağ trafiğine göre kullanılmaları önerilmiştir.

Makalenin devamında ikinci bölümde IEEE 802.15.4 protokolü kısaca açıklanmıştır. Üçüncü bölümde Monte Carlo benzetim metotları hakkında bilgi verilmiştir. Dördüncü bölümde IEEE 802.15.4 protokolünü kullanan WPAN ağlarına yönelik Monte Carlo benzetim makinesi tasarlanmıştır ve sonuçlar alınmıştır. Son bölümde makalemizin çalışma bulguları genel olarak verilmiş ve gelecek çalışma hedeflerinden bahsedilmiştir.

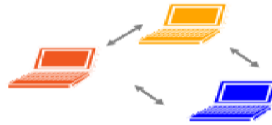
2. IEEE 802.15.4 KİŞİSEL ALAN AĞLARI

IEEE 802.15.4, düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağları (Wireless Personal Network – WPAN) için geliştirilmiş bir protokoldür. Protokol tanımı fiziksel katman ve ortam erişim kontrol (Media Access Control – MAC) özelliklerini içerir. Bu protokol 2003 yılında başlayan IEEE 802.15 çalışma grubunun 4 nolu iş paketi ile önerilmiştir [9]. Zigbee [10], WirelessHART [11] ve 6LoWPAN [12] protokolleri de alt katmanlarında IEEE 802.15.4 protokolünü kullanırlar. Bu protokolün en önemli özelliği Wi-Fi haberleşmeye kıyasla çok daha az enerji tüketmesi ve küçük boyutlarda düşük maliyetlerle gerçekleştirilebilmesidir.

IEEE 802.15.4 protokolünün yaygın olarak kullanılan 2.4 GHz frekans bantlı versiyonu ideal şartlarda 250 kbit/s hızla veri transferi yapar. Kullanılan diğer frekans bantları ise 868MHz ve 915MHz’ dir. Protokolün MAC katmanını, çerçeveleri (frame) temiz kanal erişim (Clear Channel Access – CCA) sürecinin ardından iletir. MAC katmanının diğer işlevleri; radyo kanalına erişimin, slot zamanlarının senkronizasyonunun, kişisel alan ağ yönlendiricisine (PAN) bağlanma ve ayrılmanın sağlanmasının, güvenlik işlemlerinin, garanti edilmiş zaman slotlarının (guaranteed time slot – GTS) gerçekleştirilmesidir. MAC katman işlevleri slotlu veya slotsuz olarak gerçekleştirilebilir. Slotlu versiyonda her bir elemana kanal, belirli periyotlar dahilinde paylaşılır. Slotsuz versiyonda ise kanalı kullanmak isteyen eleman herhangi bir zaman diliminde iletim isteğinde bulunabilir. İletilen çerçevelerin maksimum uzunluğu toplam 128 byte’ dır. 6LowPAN’ da olduğu gibi genelde bu uzunlukta haberleşme tercih edilir. WPAN ağlar birbirlerine sınıflandırılarak hiyerarşik düzende (Şekil 1) veya noktadan noktaya (Şekil 2) haberleşecek şekilde bağlanabilirler. Hiyerarşik sınıflandırılmış yapıda birbirini gören her bir grup için bir WPAN ağından söz edilir. Noktadan noktaya haberleşen yapılarda ise karşılıklı haberleşebilen her yapı için WPAN ağından söz etmek mümkündür.



Şekil 1. Hiyerarşik sınıflandırılmış WPAN yapısı.



Şekil 2. Noktadan noktaya haberleşen WPAN yapısı.

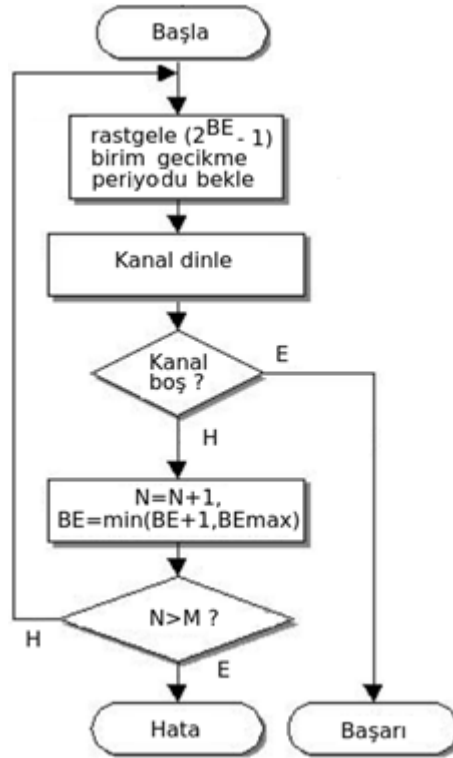
Şekil 3’ te slotsuz iletim modunda CSMA/CA algoritma şeması verilmiştir. Algoritma, $aUnitBackoffPeriod$ sembol süresine eşit olması gereken “gecikme periyotları” ismi ile anılan zaman birimleri kullanır.

Slotsuz CSMA/CA sürecinde ağdaki her eleman için BE_{min} , BE_{max} ve M ile gösterilen üç parametre bulunur. M , kanal isteğinde maksimum düzeyde gerçekleştirilecek iterasyon sayısıdır. BE_{min} , bekletilecek minimum gecikme periyodun üstel değerini (ikinin kuvveti) ifade eder. Bu değer 0 olarak alınırsa ilk adımda bekletilme olmadan kanal dinleme başlanacaktır. Bu değer, cihazın kanal değerlendirmesi yapmadan önce ne kadar gecikme periyodu bekleyeceği ile ilişkilidir. BE_{max} ise bekletilecek maksimum gecikme periyodun üstel değerini (ikinin kuvveti) ifade eder. Bekleme sonrası yapılan dinleme takibinde kanal boş olarak değerlendirilirse MAC alt katmanı çerçevenin iletimine hemen başlayacaktır. IEEE 802.15.4 protokol tanımında bu parametreler sırasıyla 3, 5, 4 olarak varsayılan değerlerde verilmiştir. Bu parametreleri kullanan CSMA/CA sürecinin akış şeması Şekil 3’ te görülmektedir. Süreç iletilmek istenilen her çerçeve için gerçekleştirilir. Bu süreç başarılı bir şekilde tamamlanamazsa çerçeve iletiminden vazgeçilir.

Şekil 3' te verilen akışta BE değişkeni başlangıçta BE_{min} değerine eşitlenir. Daha sonra bu değer maksimum BE_{max} olana kadar artırılır. Bu akışta, kanal dinleme iterasyonu M değerini aşınca kanal erişim hatası olarak üst katmanlara bilgi verilir.

3. MONTE CARLO MAKİNESİNİN TASARIMI

Monte Carlo metotları, sonuçların hesaplanması için rastgele örneklemeleri kullanırlar. Bu metotlar, genelde fiziksel ve matematiksel sistemlerin benzetimlerinde tercih edilir. Özellikle çok boyutlu değişkenlerin bulunduğu ve karmaşıklık düzeyi yüksek olan sistemlerin analizinde oldukça kullanışlıdır. Bu metotların başarısı örnekleme sayısının fazlalığıyla orantılıdır. İstatistiki açıdan anlamlı sonuçların gözlenebilmesi amacıyla örnekleme sayısının artırılması birçok uygulamada gerekli olmaktadır.

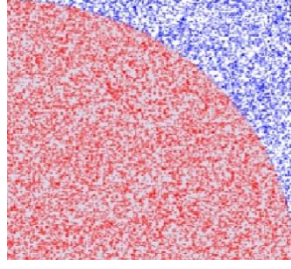


Şekil 3. CSMA/CA süreci.

Monte Carlo makinesinin tasarımı aşağıda verilen durumlarda kullanışlı olmaktadır:

- karmaşıklık düzeyi üstel olan (örneğin 2^n),
- çözümü matematiksel olarak klasik yöntemlerle bulunamayan,
- modellenmesi zor olan sistemler.

Bu durumlarda Monte Carlo makinesinin tasarımı çözüme ulaşmada kolaylık sağlamaktadır. Bu tür makineler aracılığıyla sistem girişine rastlantısal (genelde düzgün dağılımlı) örneklerin verilmesiyle çıkışların gözlenmesi sağlanır. Bu çıkış değerlerine bağlı olarak sistem modelleri yapılır veya sistem cevabının tahmini değerleri elde edilir. Bu olaya güzel bir örnek π sayısının hesabıdır. Monte Carlo benzetimi Şekil 4 üzerinde açıklanabilir. Şekil üzerinde, çeyrek daire ve bunu çerçeveleyen çeyrek kare dilimi bulunmaktadır. Belirli bir iterasyon sayısı ile döngüde işletilerek rastgele noktalar üretilir ve şekil üzerine konumlandırılır. Burada noktaların sayısı alanları ifade edecektir. Daha sonra noktaların sayısı (daire dilimindekiler ve kare dilimindekiler) oranlanır. Bu oran 4 ile çarpılırsa π değeri hesaplanmış olur. Bu örnek, basit yapıda bir Monte Carlo makinesinin işleyişini özetler [13].



Şekil 4. Basit yapıda bir Monte Carlo makinesinin işleyişi [13].

CSMA/CA süreci, bu süreçte çakışmalar ve meydana gelen çarpışmalar (collision), birim zamanda veri aktarım (data throughput) miktarı Monte Carlo benzetimiyle hesaplanabilir. CSMA/CA parametrelerinin etkisi bireysel olarak analiz edilebilir ve veri aktarım oranına etkisi bu sayede incelenebilir. Bu işlemlerin gerçekleştirilmesinde aşağıda adımları verilen Monte Carlo makinesinden faydalanılmıştır. Burada test edilen CSMA/CA parametreleri ikinci bölümde açıklanan BE_{min} , BE_{max} ve M değerleridir. Bu değerler BE_{min} için IEEE 802.15.4 standart tanımında verilen $[0,1,2,3]$ aralığında; BE_{max} ve M için yine bu tanımda verilen varsayılan değerlerin bir birimlik komşuluğunda (sırasıyla $[4,5,6]$ ve $[3,4,5]$ aralığındaki değerlerde) test edilmiştir.

Adım 1. Makineyi başlat:

1a) CSMA/CA parametre değerlerine dizideki ilk değerleri ata: BE_{min} için 0, BE_{max} için 4, M için 3.

Adım 2. Her bir popülasyon bireyi için aşağıdaki adımları tekrarla:

2a) Her bir parametrenin dizideki değerleri için aşağıdaki adımları tekrarla:

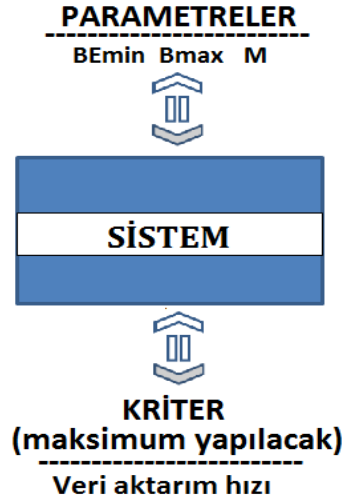
- Düzgün dağılımlı olarak rastgele zamanlar için çerçeveler üret,
- Çerçeve üretilen elemanlarca CSMA/CA sürecini olay tabanlı olarak gerçekleştir,
- CSMA/CA süreçlerinde çakışmaları ve çerçeve çarpışmalarını kaydet,
- İletilen çerçeveleri kaydet,
- Çarpışma olasılıklarını hesapla,
- Veri aktarım oranını (sağlıklı iletilen veri miktarının iletim süresine oranı) hesapla.

Adım 3. Çarpışma olasılığı ve veri aktarım oranları için standart sapma ve ortalama değerlerini hesapla.

Adım 4. Durdurma kriterini değerlendir:

- (standart sapmadaki değişim $\leq 0.01 \cdot$ Ortalama değer) şartı sağlanıyor mu?
- bu şart sağlanmıyorsa popülasyon büyüklüğünü bir artır ve Adım 2'ye git.

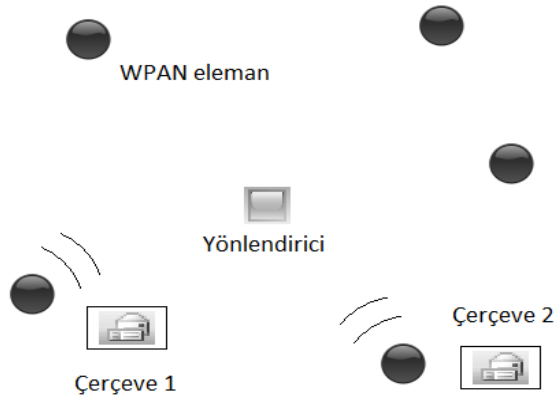
Şekil 4' de farklı WPAN ağ yapılarına yönelik Monte Carlo benzetimlerini gerçekleyecek sistemin blok şeması verilmiştir. Bu şemada maksimum veri aktarımını sağlayacak parametre değerlerinin elde edilmesine yönelik ilişki mevcuttur. Sistem, Monte Carlo makinesi ile işleyen IEEE 802.15.4 CSMA/CA işlevini içermektedir. Yukarıda dört adımda verilen döngüsel işleyiş gerçekleştirilmektedir. Sistem, çift yönlü işlemektedir. Sonucun gözlenmesinde “parametre değerleri” giriş, “veri aktarım oranı” ise çıkış durumundadır. Ancak, yeni değerlerin set edilmesi ve “veri aktarım oranı” bilgisinin kaydedilmesi sürecinde; “veri aktarım oranı” giriş, parametre değerleri ise çıkış olmaktadır.



Şekil 4. Monte Carlo Makinesi.

Bir WPAN üzerinde farklı elemanlarca aynı zaman dilimlerinde gerçekleşen CSMA/CA işlemleri gözlenebilir. Bu durumda farklı WPAN elemanlar aynı anda farklı çerçeveleri (frame) iletmek isteyebilir. Geliştirilen Monte Carlo benzetim yazılımı, Şekil 5' te yer alan örnekten görüldüğü üzere farklı çerçeveler için aynı zamanlarda CSMA/CA süreçlerini gerçekleştirir. Bu süreçte, WPAN' da eş zamanlı olarak paralel çalıştırma desteklenmelidir. Paralel çalıştırmanın gerçekleştirilmesi için Octave platformunun zamanlayıcı (timer) nesnesinden faydalanılmıştır. Zamanlayıcı nesnesi olayları (event) çoklu programlama tekniği ile paralel olarak çalıştırır. Bu anlamda, uygun parametre değerlerinin bulunmasında paralel yapıda ayırık olay çalıştırma yöntemi tercih edilmiştir.

Olaylara ait işlemlere eşit zaman dilimleri atanarak döner çekirdek (round robin) [14] tekniğinden faydalanılmıştır. Her CCA süreci paralel gerçekleşecek diye bir öngörü olamaz. Ancak, boş olan bir kanalda paralel gerçekleşen CCA' lar çarpışmalara (collision) neden olacaktır. Çünkü, farklı WPAN elemanları kanalı aynı zamanda dinlediklerinden dolayı boş görüp iletme geçecekler ve çarpışma gözlenecektir. Bu durum kablosuz ağlarda sıklıkla rastlanan bir olaydır.



Şekil 5. Paralel yapıda CSMA/CA süreçleri.

4. EN UYGUN CSMA/CA PARAMETRELERİNİN BULUNMASI

Monte Carlo benzetimleri Tablo 1’ de verildiği üzere üç farklı ağ yapısı için gerçekleştirilmiştir. Bu ağlar, bir yönlendirici ve farklı sayıdaki kablosuz düğümlerden oluşmaktadır. Bu düğümler, mobil aygıtlar veya internet nesnelere olabilir (internet of things). WPAN ağ yapıları, büyüklüklerine göre farklı özellikler sergiledikleri için ürettikleri performans sonuçları da farklılık arz etmektedir. Bu anlamda, gerek analiz gerekse de benzetim çalışmalarında 5 ile 50 eleman sayısı arasındaki büyüklükler dikkate alınmıştır [15], [16].

Tablo 1. Ağ ölçeği

Tanım	Düğüm sayısı
Küçük	5
Orta	10
Büyük	50

Düzenli dağılımlı rastgele çerçevelerin (frame) oluşturulduğu WPAN yapısı Tablo 2’ de verildiği üzere dört aşamada ele alınmıştır. İdeal bir yapıda çarpışma ve diğer çevresel etmenlerin olumsuz olarak etkilemediği düşünülür. Böyle bir yapıda, IEEE 802.15.4 WPAN hızı 250 kbit/s alınmaktadır [9]. Bu hızın çerçeve iletimi karşılığı ise Denklem (1)’ de verildiği üzere yaklaşık 2k çerçeve/s olur. Bu bilgiden hareketle, çarpışma ve diğer olumsuz etmenlerin varlığında maksimum düzeyde hız 2k çerçeve/s’ den bir miktar düşük olacaktır. Simülasyon çalışmasında bu değer en fazla 1500 çerçeve/s olarak alınmıştır. Tablo 2’ de test edilen diğer değerler yer almaktadır. Tablo 2’ de hızlı ve çok hızlı diye tanımlanan 1000 çerçeve/s ve 1500 çerçeve/s değerleri IEEE 802.15.4 WPAN ağlarında yüksek değerlerdir. Halbuki, bu değerler bir Wi-Fi ağ için oldukça küçük haberleşme hızlarını ifade eder.

Tablo 2. Ağ trafiği

Tanım	çerçeve/s
Yavaş	100
Normal	500
Hızlı	1000
Çok hızlı	1500

$$y = \frac{250 \text{ kbit/s}}{128 \text{ bit/çerçeve}} \approx 2k \text{ çerçeve/s} \quad (1)$$

Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5’ te sırasıyla küçük, orta ve büyük ölçekli ağlardan elde edilen optimum CSMA/CA parametre değerleri verilmiştir. Bu değerler, farklı ağ trafiği yoğunluklarından çıkarılmıştır. Optimum değerler, Monte Carlo benzetimlerinden çıkarılan en yüksek “veri aktarımını” sağlayan değerlerdir. Tablolardan görüleceği üzere herbir durum için bu değerler değişiklik gösterebilmektedir. IEEE 802.15.4 protokolünde yer alan varsayılan CSMA/CA parametre değerleri ($BE_{min}=3$ $BE_{max}=5$, $M=4$), sonuçlar içerisinde sadece büyük ölçekli ağlarda yavaş hızlı aktarımda uyumluluk göstermektedir. Bu durum Tablo 5’ te görülmektedir. Tablo 6, Tablo 7 ve Tablo 8’ de ise sırasıyla küçük, orta ve büyük ölçekli ağlarda birim zamanda (1s) elde edilen veri aktarım miktarları verilmiştir. Bu değerler, IEEE 802.15.4 varsayılan değerleri ile Monte Carlo benzetimlerinin ürettiği optimum değerlerin çıktılarını göstermektedir. Tablolardan görüleceği üzere optimum değerler veri aktarımında ciddi artışlar sağlamıştır. Şekil 6’ da bu durum oransal olarak bar grafiklerle gösterilmiştir. Özellikle küçük ve orta ölçekli WPAN ağ yapıları için hızlı ve çok hızlı veri trafiğinde dikkat çekici ölçüde artış olduğunu görülmektedir. Tablolar ve şekil, ağ trafiği ideal hıza (2k çerçeve/s) doğru arttıkça veri aktarım hızlarında düşümlere geçtiğini de göstermektedir. Bu durum çarpışmaların artmasıyla açıklanabilir.

Tablo 3. Küçük ölçekli ağlar için en uygun CSMA/CA parametre değerleri

Veri (çerçeve/s)	100	500	1000	1500
BE_{min}	3	1	0	0
BE_{max}	5	6	4	4
M	5	3	3	3

Tablo 4. Orta ölçekli ağlar için en uygun CSMA/CA parametre değerleri

Veri (çerçeve/s)	100	500	1000	1500
BE_{min}	3	1	0	0
BE_{max}	6	4	6	6
M	5	4	3	3

Tablo 5. Büyük ölçekli ağlar için en uygun CSMA/CA parametre değerleri

Veri (çerçeve/s)	100	500	1000	1500
BE_{min}	3	3	0	0
BE_{max}	5	6	4	4
M	4	3	3	3

Tablo 6. Küçük ölçekli ağlarda veri aktarım hızı (bit/s)

Veri (çerçeve/s)	Varsayılan parametre değerleri	En uygun parametre değerleri
100	$8.81 \cdot 10^4$	$9.93 \cdot 10^4$
500	$1.33 \cdot 10^5$	$1.96 \cdot 10^5$
1000	$5.53 \cdot 10^4$	$1.99 \cdot 10^5$
1500	$1.87 \cdot 10^4$	$1.84 \cdot 10^5$

Tablo 7. Orta ölçekli ağlarda veri aktarım hızı (bit/s).

Veri (çerçeve/s)	Varsayılan parametre değerleri	En uygun parametre değerleri
100	$9.32 \cdot 10^4$	$1.00 \cdot 10^5$
500	$1.85 \cdot 10^5$	$2.01 \cdot 10^5$
1000	$9.32 \cdot 10^4$	$1.97 \cdot 10^5$
1500	$4.61 \cdot 10^4$	$1.95 \cdot 10^5$

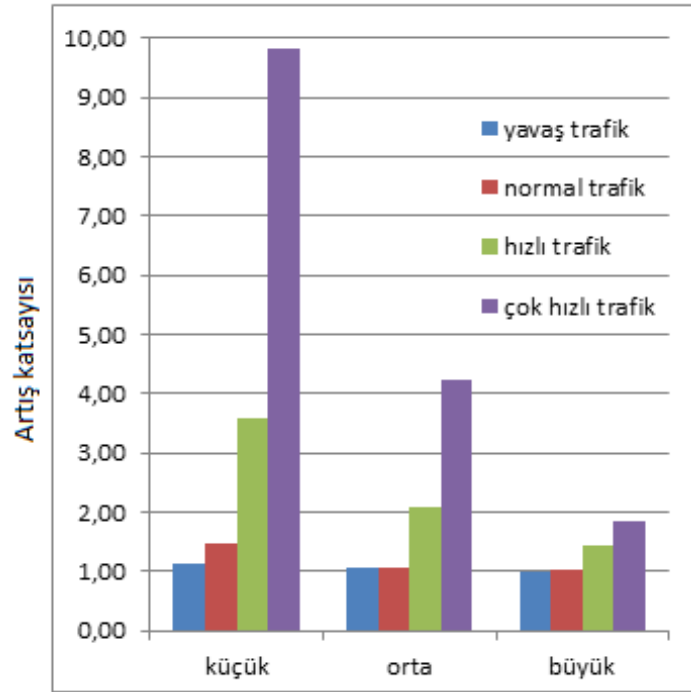
Tablo 8. Büyük ölçekli ağlarda veri aktarım hızı (bit/s).

Veri (çerçeve/s)	Varsayılan parametre değerleri	En uygun parametre değerleri
100	$9.63 \cdot 10^4$	$9.63 \cdot 10^4$
500	$2.17 \cdot 10^5$	$2.22 \cdot 10^5$
1000	$1.44 \cdot 10^5$	$2.10 \cdot 10^5$
1500	$1.11 \cdot 10^5$	$2.05 \cdot 10^5$

Şekil 6' dan görüleceği üzere CSMA/CA parametre değerlerinin etkisinin en fazla olduğu ağ türü küçük ölçekli WPAN yapılarıdır. Bu tür ağlarda özellikle yoğun trafikte performans artışı oldukça belirgindir.

5. SONUÇLAR

IEEE 802.15.4 protokolünü kullanan kişisel alan ağlarında kanal erişim kontrolü CSMA/CA parametrelerine bağlıdır. Birçok uygulamada varsayılan değerlerde kullanılan bu parametrelerin uygun değerlere ayarlanması haberleşme performansını artıracaktır. Ağ yapısına ve ağ trafiğine bağlı olarak yapılacak bu düzenleme ile veri aktarım oranında artış sağlanabilir. Bu çalışmada, Monte Carlo benzetimleri ile farklı ağ yapılarına yönelik testler sonucunda en uygun parametre değerleri elde edilmiştir. Bu değerler tablolar ile verilmiştir. Performans artışı ise karşılaştırmalı grafikler ile gösterilmiştir. Üretilen sonuçlar gözlemlenerek farklı CSMA/CA değerlerinin ağ performansına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak uygun değerlerin kullanılması ile kişisel alan ağlarında daha verimli haberleşmenin sağlanacağı testler ile doğrulanmıştır. Ağ tasarımcılarına, kullandıkları ağ yapılarına uygun olarak üretilen parametre değerleri önerilmiştir.



Şekil 6. Küçük, orta ve büyük ölçekli ağlar için veri aktarımında artış katsayısı

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmalarım sürecinde eşim Sema Ökdem, kızım Zeynep Yaren Ökdem ve oğlum Şahin Ökdem' e bana verdikleri motivasyon ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Ayrıca, bana verdiği maddi ve manevi katkılardan dolayı kardeşim Ayşe Ökdem Karakuş' a teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Cuomo F, Anna A, Emanuele C. "Cross-layer network formation for energy-efficient IEEE 802.15.4/ZigBee Wireless Sensor Networks". Ad Hoc Networks, 11(2), 672-686, 2013.
- [2] Toscano E, Lucia LB. "Multichannel superframe scheduling for IEEE 802.15. 4 industrial wireless sensor networks". IEEE Transactions on Industrial Informatics, 8(2), 337-350, 2012.
- [3] Yean Fu W, Anderson T, Powers D. "On energy efficient aggregation routing and scheduling in IEEE 802.15.4 based wireless sensor networks". Wireless communications and mobile computing. 14(2), 232-253, 2014.

- [4] Park P, Marco PD, Soldati P, Fischione C, Johansson K. “A generalized Markov chain model for effective analysis of slotted IEEE 802.15.4”. 6th IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS '09), Macau, China, 12-15 October 2009.
- [5] Park P, Marco PD, Fischione C, Johansson K, “Modeling and Optimization of the IEEE 802.15.4 Protocol for Reliable and Timely Communications”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 24(3), 550-564, 2012.
- [6] Francesco MD, Anastasi G, Conti M, Das S, Neri V, “Reliability and Energy Efficiency in IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks: A Cross-layer Approach”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 29(8), 1508-1524, 2011.
- [7] Brienza S, Guglielmo D, Anastasi G, Conti M, Neri V, “Strategies for Optimal MAC Parameter Setting in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks: a Performance Comparison”, IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2013), Split, Croatia, 07-10 July 2013.
- [8] Brienza S, Guglielmo D, Alippi C, Anastasi G, Roveri M. “A learning-based algorithm for optimal mac parameters setting in IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks”. 10th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, & ubiquitous networks. Barcelona, Spain, 3-8 November 2013.
- [9] IEEE P80215 Working Group. IEEE std. 802.15.4, part. 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) 2006.
- [10] ZigBee Alliance. "ZigBee Specification". <http://www.zigbee.org> (09.02.2015).
- [11] Song J., et al. “WirelessHART: Applying wireless technology in real-time industrial process control”. Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, ST. Louis, Missouri. 22-24 April 2008.
- [12] Shelby Z, Carsten B. 6LoWPAN: The wireless embedded Internet. Vol. 43. United Kingdom, John Wiley & Sons, 2011.
- [13] Malvin H, Kalos PA. Whitlock. Monte Carlo Methods, 2nd ed. Heppenheim, Germany, Wiley, 2008.
- [14] Shreedhar M, Varghese G. “Efficient fair queueing using deficit round robin”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 25(4), 231-242, 1995.
- [15] Montavont J, Roth D, Noel T. “Mobile IPv6 in internet of things: analysis, experimentations and optimizations”. Ad Hoc Netw., 14, 15-25, 2014.
- [16] Misic J, Shafi S, Misic V. “The impact of MAC parameters on the performance of 802.15.4 PAN”. Ad Hoc Netw., 3, 509–528, 2005.