Dokuz Eylül Üniversitesi-Mühendislik Fakültesi
Fen ve Mühendislik Dergisi
Cilt 20, Sayı 59, Mayıs, 2018

Dokuz Eylul University-Faculty of Engineering
Journal of Science and Engineering
Volume 20, Issue 59, May, 2018

DOI: 10.21205/deufmd. 2018205934

Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Alıcı-Vericilerin Oransal-İntegral Denetleyiciler ile Görev Döngüsü

Kasım Sinan YILDIRIM*[1]

[1]Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova, İzmir

(Alınış / Received: 27.03.2017, Kabul / Accepted: 25.12.2017, Online Yayınlanma / Published Online: 15.05.2018)

Anahtar Kelimeler
Kablosuz Algılayıcı Ağları, Görev Çevrimi, Oransal-İntegral Denetleyici

Özet: Algılayıcı düğümlerinin enerji tüketimi, görev çevrimi tekniği olarak adlandırılan alıcı-vericilerinin etkinleştirilip kapatılmasıyla oldukça düşürülebilir. Ancak görev çevriminin uygulanması kolay değildir çünkü düğümler alıcı vericilerini etkinleştirmek için verinin ne zaman geleceğini önceden bilmek zorundadırlar. Bu makalede, düğümler arasında sabit bir devirde haberleşme olduğu varsayılarak, düğümler arasında açık bir saat eşzamanlaması gerektirmeyen verimli bir görev çevrimi tekniği tanıtılmaktadır. Daha iyi ifade edilecek olunursa, bu makale güncel literatürde oransal-integral tabanlı görev çevrimini tanıtan bilgimiz dahilindeki ilk makaledir. Önerilen yöntemin en önemli avantajı hesaplama ve bellek yükü açısından oldukça hafif olmasıdır. Önerilen yöntem derinlemesine bir matematiksel analizle desteklenmiş ve analizlerin doğruluğu benzetimler aracılığıyla gösterilmiştir.

Duty Cycling of Transceivers in Wireless Sensor Networks Using Proportional-Integral Controllers

Keywords
Wireless Sensor Networks, Duty Cycling, Proportional-Integral Controller

Abstract: The energy consumption of the sensor nodes can be reduced considerably by turning on and off their transceivers, the so called duty-cycling. However, the difficulty of duty-cycling is that nodes should know beforehand when data is coming and then they need to switch on their transceivers to receive the incoming data. In this article, we assume a periodic communication between two sensor nodes at a fixed frequency and introduce an efficient duty-cycling technique that does not require explicit time synchronization between the nodes. More precisely, up to our knowledge, this is the first article in the current literature proposing a proportional-integral controller-based duty-cycling mechanism. A desirable property of this technique is that it is lightweight in terms of computation and memory overhead. We support our article by providing an extensive mathematical analysis of our technique and show the correctness of our analysis through simulations.

***Sorumlu yazar**: Kasım Sinan Yıldırım email: sinan.yildirim@ege.edu.tr*

1. Giriş

Dağıtık bilgisayar sistemleri, sistem genelindeki bir veya birden çok görevi işbirliği içinde yerine getirebilmek için birbirleri ile haberleşen ve eylemlerini eşgüdümleyen, *düğüm* adı verilen bilgi işleme yeteneğine sahip donanımlardan oluşmaktadırlar [1]. Düğümlerin her birinin kendi özel saat donanımı ve dolayısıyla kendisi için özel bir zaman algısı; başka bir deyişle *yerel saati* vardır. Her bir yerel saat farklı hızda ilerlediği için, düğümler aynı anda çalışmaya başlasalar bile saatler zaman içinde birbirlerinden *sapacak* (drift) ve sistemdeki tüm düğümlerin farklı bir zaman algısı olacaktır. Ancak, düğümlerin sistem genelindeki görevleri doğru ve verimli bir şekilde yerine getirebilmeleri, genellikle aralarında ortak; yani *genel bir zaman kavramının* olmasını gerektirmektedir. Dağıtık sistemlerde ortak bir zaman algısının oluşturulması için, düğümler kendi iletişim kapsama alanındaki diğer düğümlerle haberleşerek bir saat *eşzamanlama algoritması* [2] çalıştırmalı ve sistemdeki genel saat kavramını temsil eden bir *mantıksal saat* değeri hesaplamalıdırlar. Dağıtık saat eşzamanlama algoritmalarının ana amacı sistemdeki tüm düğümlerin mantıksal saatleri arasındaki farkı, diğer bir deyişle *eşzamanlama hatalarını*, en aza indirmektir. Ne yazık ki hiçbir saat eşzamanlama algoritması düğümlerin birbirleri ile iletişimi süresince meydana gelen belirsiz gecikmeler ve saat sapmaları nedeniyle mükemmel bir eşzamanlama sağlayamaz [3].

Buna ek olarak, düğümlerin bazı işlemleri işbirliği ile yerine getirebilmesi için her zaman saat eşzamanlaması algoritması işletmelerine gerek yoktur. Örneğin, bir düğüm kendi kapsama alanı içerisindeki diğer bir düğümden sabit bir devirde veri alıyorsa, sadece kendi yerel saatini kullanarak bir sonraki verinin ne zaman gelebileceğini tahmin edebilir. Dolayısıyla, devirsel olarak meydana gelen olayların zamanını tahmin edebilmek için açık bir saat eşzamanlamasına her zaman gerek kalmayabilir [4]. Bu sayede, saat eşzamanlamasının getireceği iletişim ve hesaplama yükü ortadan kalkmış olmaktadır.

Günümüzde, dağıtık bilgisayar sistemlerinin pratikteki özel bir kolu olan kablosuz algılayıcı ağları (KAA) araştırmacıların ilgisini yoğun bir şekilde çekmektedir. Kabaca bir mikrodenetleyici, değişik algılayıcılar ve *alıcı-verici* (transceiver) donanımından oluşan KAA düğümleri, fiziksel çevrenin gözlemlenmesi, konum belirleme ve nesne tespiti gibi dağıtık uygulamaların geliştirilmesi için kullanılmaktadırlar [5]. KAA düğümleri, güçlerini pillerden aldıkları için, işlemlerini kısıtlı ve sonlu enerjiyi göz önüne alarak gerçekleştirmelidirler. Dolayısıyla, algılayıcı düğümleri, işlemlerini gerçekleştirirken bir *görev çevrimi* (duty-cycle) uygulamalıdırlar [6].

Görev çevriminin sağlanabilmesi için, düğümlerin mikrodenetleyicilerinin çeşitli *düşük-güç çalışma kiplerine* (low-power operation mode) sahip olmaları geremektedir. Örneğin TI MSP430 [7] beş adet düşük-güç kipine sahiptir. En düşük güç tüketim kipi olan LPM 4'te mikrodenetleyici ve tüm yan aygıtlar kapalı tutulmakta, sistem bir *dışsal kesme* (external interrupt) tarafından uyanacak şekilde bekletilmektedir. LPM 3 ise *uyku kipi* olarak adlandırılmaktadır ve bu kipte sadece dışsal 32 KHz *salınım üreteci* (oscillator) ve bu salınım üretecini kullanan *zamanlayıcılar* (timer) etkindir. Mikrodenetleyicilere ek olarak, düğümlerin alıcı-vericileri de açılıp kapatılma özelliğine sahiptirler. Alıcı-vericiler, algılayıcı donanımının en fazla enerji tüketen elemanıdır ve mümkün

olduğunca kapalı tutulmalıdırlar. Tablo 1, Telos ve MICAz platformlarındaki mikrodenetleyici ve alıcı-vericilerin enerji gereksinimlerini özetlemektedir. Dikkat edilecek olursa, alıcı-verici ve mikrodenetleyicilerin uykudan uyanmaları anlık olmamakta, etkin hale gelmeleri belirli bir sürenin geçmesini gerektirmektedir.

Sonuç olarak, algılayıcı düğümleri mikrodenetleyicilerini mümkün olduğunca uyku kipinde tutmalı ve ancak gerektiğinde etkin hale getirerek işlemleri hızlı bir şekilde yapıp tekrar uyku kipine geçirmelidir. Benzer şekilde, alıcı-vericiler de ancak veri gönderimi ve alımı zamanlarında etkin hale getirilmeli ve gereksiz durumlarda kapatılmalıdır. Görev çevrimi yöntemleri, mikrodenetleyicilerin ve/veya alıcı-vericilerin ne zaman etkin hale getirilip ne zaman kapatılacağını belirlerler.

Tablo 1. Telos ve MICAz platformlarına ilişkin enerji tüketimi ile ilgili sistem parametreleri. Bu değerler [8] çalışmasında yer alan Şekil 6'dan alınmıştır.

İşlem	**Telos**	**MICAz**
MCU (Mikrodenetleyici) Alıcı-Verici	TI MSP430 Chipcon CC2420	Atmel Atmega 128 Chipcon CC2420
Minimum Voltaj	1.8 V	2.7 V
Uyku Kipi MCU Boş MCU Etkin MCU + Alıcı-Verici (Alım) MCU + Alıcı-Verici (Gönderim)	5.1 µA 54.5 µA 1.8 mA 21.8 mA 19.5 mA	27.0 µA 3.2 mA 8.0 mA 23.3 mA 21.0 mA

1.1. Katkılar

Daha önce de vurgulandığı gibi, görev çevrimi ile alıcı-vericilerin etkinleştirilebilmesi ve uyutulabilmesi için, her bir algılayıcı düğümü diğer düğümlerden gönderilecek verinin alım zamanını kendi saatini kullanarak *tahmin etmeli*, bu zamandan biraz önce alıcı-vericisini açmalı ve veri alındıktan sonra kapatmalıdır. Bu makalede, güncel literatürde ilk defa, bu işlevsellik oransal-integral denetleyici (proportional-integral controller) prensibinden esinlenerek, açık bir saat eşzamanlamasına ihtiyaç duyulmadan sağlanmaktadır. Oransal-integral denetleyiciler son yıllarda verimlilikleri nedeniyle KAA çalışmalarında öne çıkmaktadırlar. Özellikle saat eşzamanlama alanında yapılan [9,16,17] çalışmaları bu basit prensibin enerji ve kaynak kısıtlarına sahip düğümler için çok uygun olduğunu ortaya koymuştur. Doğrusal bağlanım (linear regression) gibi yöntemler KAA'larda sıkça kullanılmasına rağmen [10], birçok hesaplama adımı içermeleri ve hatırı sayılır bir bellek ihtiyacının olması nedeniyle oransal-integral denetleyicilerle kıyaslandığında oldukça fazla bir hesaplama ve bellek yükü getirmektedirler.

Bu çalışmada, KAA düğümlerinin sabit bir devirde birbirlerine veri gönderdikleri varsayılmaktadır. Bu varsayım kullanarak, *açık bir saat eşzamanlamasına ihtiyaç duymayan* ve çok basit işlem adımlarına sahip, yükte hafif bir görev çevrimi yöntemi önerilmektedir. Bu makale güncel literatüre aşağıdaki katkıları sunmaktadır:

- Oransal-integral denetçiler ve kontrol tabanlı yöntemler daha önce saat senkronizasyonu için kullanılmışlardır [9,16,17,18]. Ancak bu makale ile literatürde ilk defa alıcı-vericilerin görev çevrimi için oransal-integral denetçi tabanlı bir yöntem

geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntem saat eşzamanlamasına ihtiyaç duymamaktadır.

- Önerilen yöntem kaynak gereksinimleri açısından tartışılmakta ve avantajları somut bir şekilde ifade edilmektedir.
- Bu yöntemin, iki düğüm göz önüne alınarak ve üniform devingen bir saat sapması modeli kullanılarak teorik analizi literatürde ilk defa sunulmaktadır.
- Teorik sonuçlar, benzetimler yardımıyla doğrulanarak, önerilen yöntemin başarımı hakkında çıkarımlar yapılmıştır.
- Önerilen yöntemin pratikte başarı ile uygulanabileceği, gerçek bir KAA ortamında gerçekleştirilerek ve sonuçlar sunularak gösterilmiştir.

2. İlgili Çalışmalar: Kaa'larda Alıcı-Vericilerin Görev Çevrimi

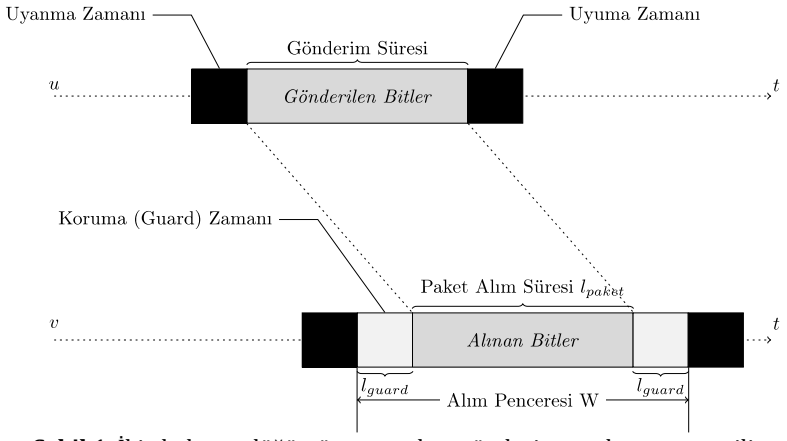
Algılayıcı düğümlerinin alıcı-vericilerinin (iletişim donanımının) verimsiz kullanımı, Tablo 1'den de görüleceği gibi enerji israfına neden olur. Ağda hiçbir iletişim eylemi yoksa ve düğümlerin alıcı-vericileri uyku durumuna geçirilmediyse, algılayıcı düğümler diğer düğümlerden gelebilecek olası paketleri her an alabilmek için iletişim ortamını *boşa dinlemekte* (idle listening) ve gereksiz yere enerji harcamaktadırlar. Enerji tüketimini azaltmak ve ağın yaşam süresini uzatmak için algılayıcı düğümleri alıcı-vericilerini kapatıp açarak bir *görev çevrimi* sürecini gerçekleştirmek zorundadırlar. Düğümlerin görev çevrimini gerçekleştirebilmeleri için diğer düğümlerden ne zaman veri gelebileceğini tahmin etmeleri ve veri gelmeden hemen önce veriyi almak için alıcı-vericilerini etkin hale getirmeleri gerekmektedirler. Tahminleme hataları paket kayıplarına neden olabilir ve iletilebilecek/alınacak veri miktarını azaltabilir. Düğümlerin alıcı-verici donanımını denetlemek ve etkinlik/uyku devirlerini eşgüdümlemek *Ortam Erişimi Katmanı-OEK* (Medium Access Layer) sorumluluğundadır.

OEK protokolleri B-MAC [11] protokolündeki gibi kanal erişiminin rastgele olması ilkesiyle çalışabilir. Rastgele kanal erişimine dayalı OEK protokolleri ile görev çevrimi, etkinlik/uyku devrinin ne zaman gerçekleşeceği konusunda herhangi bir ön bilgi gerektirmez. Dolayısıyla, düğümlerin eşgüdümlü çalışmasına ihtiyaç yoktur. Her düğüm alıcı-vericisini diğer düğümlerden bağımsız olarak belirli bir devirde etkinleştirir ve ortamda iletişim olup olmadığını denetler. Ancak, gönderici düğümler alıcı düğümlerin uyanmasını ve gönderilen paketi almalarını garantilemek için uzun bir *öncül* bit dizisi (preamble) göndermelidir. Bu sayede, devirsel olarak alıcı-vericilerini etkinleştiren alıcı düğümler bu öncülü algılayacak ve alıcı-vericilerini paketi almak için açık tutacaklardır. Alıcı düğümleri uyandırabilmek için uzun bir öncül paket gönderme yöntemine *Düşük Güç Dinleme* (Low-Power Listening) denmektedir.

Bunun dışında, S-MAC [12] gibi *dilimli erişim* (slotted access) OEK protokolleri, alıcı-vericilerin aynı anda etkinleştirilip uyutulması için algılayıcı düğümleri arasında *eşgüdümlemeye* ihtiyaç duyarlar. Düğümler her bir dilimin başında uyanır, iletişim kanalını denetleyerek ya paket gönderir veya o an gönderilmekte olan paketi alırlar. Alım veya gönderim işlemi sonunda ise alıcı-vericilerini tekrardan uyku durumuna getirirler. *Çerçeve* (frame) tabanlı OEK protokolleri, örneğin *zaman bölüşümlü çoklu erişim*-ZBÇE (TDMA) tabanlı LMAC [13] protokolü gibi, *çekişmeleri* (contention) ve paket *çarpışmalarını* (collision) engellemek için gönderen ve

alıcılara zamanlanmış dilimler atamaktadırlar. ZBÇE tabanlı OEK protokollerinde, her bir düğüme veri göndermek veya almak için devingen veya durağan zaman dilimleri atanır.

Eğer düğümler bu zaman dilimlerini biliyorlarsa ve *ortak bir zaman kavramına sahiplerse*, bu zaman dilimlerinin başında alıcı-vericilerini etkinleştirerek gelen paketleri alabilirler veya paket gönderebilirler. Algılayıcı düğümlerinin yerel saatleri alıcı-vericilerin eşgüdümlü etkinleştirilme/uyutulma eylemleri sağlamak için tek başına yeterli değildir. Frekans hataları nedeniyle, yerel saatler sık sık birbirinden sapar ve dolayısıyla yerel saatler yalnızca ilgili düğüme özel bir yerel saat kavramı sağlayabilir. Algılayıcı düğümleri saatlerini eşzamanlamak için, kendilerinin iletişim kapsamı içerisinde yer alan komşu düğümlerin saat/zaman bilgilerini öğrenmeli ve dolayısıyla onlarla devirsel iletişim kurmalıdırlar. Saat eşzamanlanması olarak adlandırılan genel bir zaman kavramının oluşturulması, alıcı-vericilerin eşgüdümlü bir şekilde uyutulup etkinleştirilmesi ve dolayısıyla enerjiden tasarruf etmek için önemli bir yapı taşıdır. Literatürde KAA'larda saat eşzamanlaması sağlamak için önerilmiş ve saat eşzamanlama hatasını en az sayıda veri iletişimi yaparak azaltmak amacıyla tasarlanmış çeşitli protokoller yer almaktadır [9,10,14,15,16,17,18,19,20].



Şekil 1. İki algılayıcı düğümü arası paket gönderim ve alımının temsili.

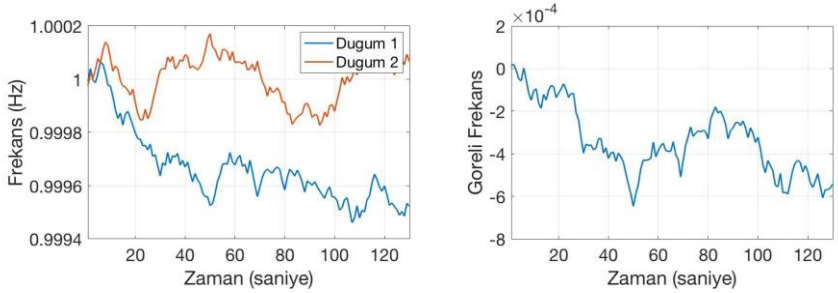
Bir diğer yaklaşımda ise, eğer düğümlerin paket gönderme yani iletişim periyodu sabit ise, algılayıcı düğümleri komşularının veriyi ne zaman göndereceklerini *saat eşzamanlamasına gerek kalmadan* öğrenebilirler. Verimli görev çevrimi için, düğümler verilerin ne zaman geleceğini tahmin etmeli ve daha sonra verileri almak için alıcı-vericilerini etkinleştirmelidirler. Bu yaklaşımda, herhangi bir alıcı düğümün veriyi almak için alıcı-vericisini açık tutma süresi, başka bir deyişle *paket alma penceresi W* (receiving window), saat tahminleme doğruluğuna bağlıdır. Şekil 1'de birbirleri ile iletişimde bulunan iki düğüm gösterilmektedir. *v* düğümü *u* düğümünden gelecek paketi tahmin ettiği zamandan *koruma zamanı* (guard time) kadar önce alıcı-vericisini etkinleştirmelidir. Bu sayede, tahminleme hatalarını telafi etmiş olur. Dolayısıyla, W değerinin büyüklüğü alınan paketin alım süresinin uzunluğunu ifade eden l_{paket} değerine ek olarak tahminleme hatasının varyansını ifade eden l_{guard} değerine de bağlıdır.

3. Sistem Modeli ve Tanımlar

Bu çalışmada, iletişim ağındaki birbirine komşu iki düğümü göz önüne alacağız ve bu düğümleri u ve v ile temsil edeceğiz. Ağdaki bu iki düğümün sadece okunabilir ve değeri değiştirilemez saat donanımlarına sahip olduklarını varsayacağız. Buna ek olarak, saatlerin salınım üreteçlerinin (oscillator) f^* nominal frekansında titreşme özelliğine sahip olduklarını varsayacağız. Sıcaklık gibi çevresel etkenler ve enerji seviyesi gibi düğüm donanımına özgü etkenler nedeniyle, düğümlerin saat frekansları f_u ve f_v istenilen f^* değerinden ve dolayısıyla birbirlerinden sapmalar göstermektedir. Tanım olarak u düğümünün $t > t_0$ anındaki yerel saati

$$t_u(t) \triangleq t_u(t_0) + \int_{t_0}^{t} f_u(\sigma)\, d\sigma$$

ile ifade edilmektedir. Burada $f_u(\sigma)$ düğümün σ anındaki saat frekansıdır.



Şekil 2. İki düğümün anlık (solda) ve göreli (sağda) saat frekansı.

Şekil 2'de iki düğümün temsili olarak saat frekansları ve bu iki frekans değerinin birbirine göreli değeri olan $f_v^u = \frac{f_u}{f_v}$-1 değeri gösterilmiştir. Bu çalışmada saatlerin devingen sapmalarını, aşağıda gösterildiği gibi bir rastgele süreç olarak aşağıdaki gibi modelleyeceğiz:

$$f_v^u(t_0 + \delta) \triangleq f_v^u(t_0) + \eta(t_0 + \delta)$$

Burada $\eta(t)$ göreli saat frekansındaki t anındaki anlık değişimi ifade etmektedir. İlerleyen bölümlerdeki hesaplamaların basitliği açısından, $\eta(t)$ değerini $[-\varepsilon, \varepsilon]$ aralığında bir uniform şans değişkeni olarak varsayacağız. Dolayısıyla, $\eta(t)$ parametresi 0 ortalamaya ve $\sigma_\eta^2 = \frac{\varepsilon^2}{3}$ varyansına sahip bir şans değişkenidir. $\bar{f}_v^u(t_0, t_0 + \delta)$, δ uzunluğuna sahip $[t_0, t_0 + \delta]$ zaman aralığındaki ortalama göreli saat frekansı değerini temsil etsin. f_v^u ve $\bar{f}_v^u$ arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi ifade edebiliriz:

$$\bar{f}_v^u(t_0, t_0 + \delta) \triangleq \frac{1}{\delta} \int_{t_0}^{t_0+\delta} f_v^u(t)dt$$
$$= f_v^u(t_0) + \frac{1}{\delta} \int_{t_0}^{t_0+\delta} \eta(t)dt\,.$$

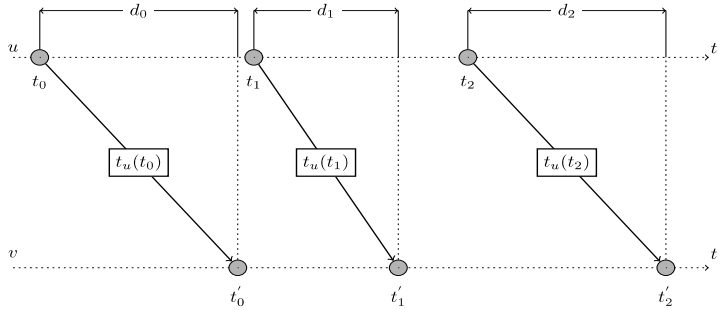
İlerleyen bölümlerdeki matematiksel hesaplamalarımızın açık ve basit bir şekilde ifade edilebilmesi için, düğümler arasındaki iletişim süresince paketlerin kaybolmadığını varsayacağız. Bir düğümün paket göndermeye başlamasından alıcı düğümün o paketi almasına kadar geçen süreye iletişim gecikmesi adını vereceğiz. Merkezi limit teoremi ve deneysel gözlemler sonucunda [14], iletişim gecikmelerini d ile gösterip 0 ortalamaya ve σ_d^2 varyansa sahip bir normal şans değişkeni olarak modelleyeceğiz.

Özetle, şu ana kadarki tanımlarımız göz önüne alınacak olursa, sistemdeki temel rastgeleliği yaratan parametreler saatlerin devingen sapmalarını ifade

eden η ve mesaj gecikmelerini ifade eden d şans değişkenleridir.

4. Alıcı-Vericilerin Oransal-İntegral Denetleyiciler ile Görev Çevrimi

Bu bölümde, v düğümünün u düğümünden her τ saniyede bir paket aldığı bir gönderim-alım senaryosu üzerine odaklanacağız [15]. Şekil 3 örnek bir iletişim senaryosunu göstermektedir. Devirsel iletişimin sonucu olarak, v düğümü bir sonraki paketi alıncaya kadar alıcı-verici donanımını uyku durumuna getirerek enerji kazancı sağlamakta, sonraki paketin alınacağı tahmini zamanda ise alıcı-vericileri etkinleştirerek paketin doğru bir şekilde alınmasını garanti altına almaktadır.



Şekil 3. Düğümler arasındaki paket gönderim-alım sürecinin temsili gösterimi.

4.1. Sonraki Paket Alım Zamanının Tahmini

İletişim devri olan τ değerinin sabit ve tüm düğümler tarafından bilindiğini varsayalım. Şekil 3'te gösterildiği gibi, v düğümü u düğümünden tam olarak t_2' anında alacağı paketin alınma zamanını, kendi saatini kullanarak bir önceki paketi aldığı t_1' anında aşağıdaki gibi tahmin edebilmektedir:

$$\hat{t}_v(t_2') = t_v(t_1') + \tau\left(1 + \hat{f}_v^u(t_1')\right)$$

Burada $\hat{f}_v^u(t_1')$ tahmini göreli saat frekansının t_1' anındaki değerini ifade etmektedir. Dolayısıyla, paketin alınacağı anda v düğümünün saatinin değeri $t_v(t_2')$ ile bu paketin tahmini alım anındaki saat değeri $\hat{t}_v(t_2')$ arasındaki fark tahminleme hatasıdır ve aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir:

$$\begin{aligned}\tilde{t}_v(t_2') &= t_v(t_2') - \hat{t}_v(t_2') \\ &= t_v(t_2') - t_v(t_1') - \tau\left(1 + \hat{f}_v^u(t_1')\right)\end{aligned}$$

Açık bir şekilde, buradaki ana amaç paketin geliş zamanını doğru tahminlemek, dolayısıyla alıcı-vericiyi zamanında etkinleştirerek gelen paketin doğru bir şekilde alınmasını sağlamaktır. Doğru tahminlemek, bir başka ifadeyle tahminleme hatası olan $\tilde{t}_v(t_2')$ değerini en aza indirgemektir. Görüleceği gibi yukarıdaki ifadede tahminleme hatasını etkileyen temel eleman göreli tahmini saat frekansı değeri olan $\hat{f}_v^u(t_1')$ değeridir. Dolayısıyla, bu değer ne kadar iyi tahminlenirse, tahmini paket alım zamanı o ölçüde iyi tahminlenecek ve paket alımı garanti altına alınacaktır.

Aşağıdaki ifadenin doğru olduğunu varsayalım:

$$t_v(t_2') - t_v(t_1') \simeq t_v(t_2) - t_v(t_1) + d_2 - d_1.$$

Burada d_2 ve d_1 iletişim süresince meydana gelen gecikmeleri ifade etmektedir. $t_v(t_2) - t_v(t_1) = \tau(1 + \bar{f}_v^u(t_1, t_2))$ geçerli olduğu için:

$$\tilde{t}_v(t_2') = \tau\left(\bar{f}_v^u(t_1,t_2) - \hat{f}_v^u(t_1')\right) + d_2 - d_1$$
$$= \tau\tilde{f}_v^u(t_1) + \frac{\tau}{t_2 - t_1}\int_{t_1}^{t_2}\eta(t)dt$$
$$+d_2 - d_1$$

elde edilmektedir. Burada $\tilde{f}_v^u(t_1)$ saat frekansı tahminleme hatasıdır ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

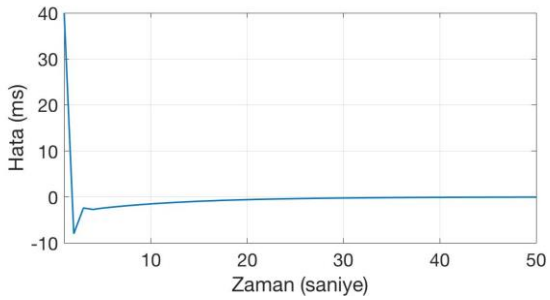
$$\tilde{f}_v^u(t_1) \triangleq f_v^u(t_1') - \hat{f}_v^u(t_1')$$

4.2. Göreli Saat Frekansının Oransal-İntegral Denetçi ile Tahminlenmesi

Bu makalede, oransal-integral denetçilerle saat eşzamanlaması çalışmasından [9] esinlenerek ve [16] çalışmasını taban alarak, v düğümünün u düğümünden bir paket aldığında, tahmini göreli saat frekansını güncellemesi için aşağıdaki algoritmayı öneriyoruz:

$$\hat{f}_v^u(t_2') = \hat{f}_v^u(t_1') - \alpha\tilde{t}_v(t_1').$$

Bu tahmin güncelleme algoritmasında α değeri integral kazancı olarak adlandırılmakta ve algoritmanın başarımında önemli bir parametre olarak etki göstermektedir. Bu gerçeği ilerleyen adımlarda daha da açık bir şekilde ifade edeceğiz. Dolayısıyla, yukarıdaki algoritma bir **oransal-integral denetleyicidir** ve her güncelleme adımında döngülü (iterative) bir şekilde tahmin hatasını sıfır değerine yaklaştırmaktadır. Bunu her döngüde tahmini göreli saat frekansı hatasını sıfır değerine yaklaştırarak başarmaktadır.



Şekil 4. Tahminleme hatasını için benzetimler.

Önerdiğimiz oransal-integral denetleyici tabanlı algoritmayı MATLAB ortamında geliştirdik ve benzetimler sonucunda elde edilen hata değerlerini Şekil 4'te göstermekteyiz. Tahminleme hatası her güncelleme adımında iyileşerek sonuçta sıfır değerine yakınsayacaktır. Benzetimlerde $\alpha = 10^{-6}$ ve $f^* = 32768$ olarak seçilmiştir.

Oransal-integral denetleyici tabanlı görev çevrimi, görüldüğü gibi geliştirilmesi oldukça basit bir yöntem olması nedeniyle, KAA ağları için tam manasıyla uygundur. Öncelikle ifade etmek gerekirse, her v düğümü sadece $\hat{f}_v^u$ değerini güncellemekte, ve bu güncelleme işlemi sadece 1 çarpma ve 1 çıkarma işlemiyle gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, doğrusal bağlanım kullanan diğer yöntemlere kıyasla [10], hesaplama ve bellek gereksinimleri açısından oldukça hafiftir.

5. Önerilen Yöntemin Teorik Analizi

Bu bölümde, önerilen yöntemin teorik analizini gerçekleştirilmektedir. Öncelikle, yöntemin tahminleme hatasını beklenende sıfır değerine varacağı Teorem 1 ile ispatlanacaktır. Teorem 2 ile yöntemin asimptotik varyansını

gösterilecektir. Bu değer, döngüsel yöntemin döngü adımı sonsuza giderken, sistemdeki rastgelelikten dolayı oluşan tahminleme hatasının sınırlarını ifade edecektir. Dolayısıyla, önerilen yöntemin hatasının analitik ifadesi, hatanın sistemdeki hangi parametrelere bağlı olduğunu ve bunlardan nasıl etkilendiğini gösterecektir.

Teorem 1: Oransal-integral denetçilerle görev çevrimi uygulandığında, beklenende bütün paketlerin alınma zamanı doğru tahmin edilecektir.

İspat: Hesaplama adımlarını basitleştirebilmek için aşağıdaki gösterimleri kullanacağız:

$$\begin{aligned} \mathrm{a}(h) &= \frac{\tau}{t_{h+1}-t_h}\int_{t_h}^{t_{h+1}-t_h}\eta(t)dt, \\ \mathrm{b}(h) &= d_{h+1}-d_h, \\ \Delta(h) &= \tilde{f}_v^u(t_h'), \\ \Theta(h+1) &= \tilde{t}_v(t_{h+1}') = \tau\Delta(h)+\mathrm{a}(h)+\mathrm{b}(h). \end{aligned}$$

Bu tanımlamalar ışığı altında, $\Delta(\mathrm{h}+1)$ değerini şu şekilde ifade edebiliriz:

$$\begin{aligned} \Delta(\mathrm{h}+1) &= \Delta(\mathrm{h}) - \alpha\Theta(\mathrm{h}+1) \\ &= \Delta(\mathrm{h}) - \alpha(\tau\Delta(\mathrm{h}) + \mathrm{a}(\mathrm{h}) + \mathrm{b}(\mathrm{h})) \\ &= (1-\alpha\tau)\Delta(\mathrm{h}) - \alpha\big(\mathrm{a}(\mathrm{h}) + \mathrm{b}(\mathrm{h})\big). \end{aligned}$$

Bu gösterimi kullanarak sistemin evrimini aşağıdaki özyinelemeli matris eşitliği ile gösterebiliriz:

$$\underbrace{\begin{bmatrix}\Theta(\mathrm{h}+1)\\ \Delta(\mathrm{h}+1)\end{bmatrix}}_{\mathrm{X(h+1)}} = \underbrace{\begin{bmatrix}0 & \tau\\ 0 & 1-\alpha\tau\end{bmatrix}}_{\mathrm{A}}\underbrace{\begin{bmatrix}\Theta(\mathrm{h})\\ \Delta(\mathrm{h})\end{bmatrix}}_{\mathrm{X(h)}} + \underbrace{\begin{bmatrix}\mathrm{a}(\mathrm{h})+\mathrm{b}(\mathrm{h})\\ -\alpha\big(\mathrm{a}(\mathrm{h})+\mathrm{b}(\mathrm{h})\big)\end{bmatrix}}_{\mathrm{Y(h)}}.$$

Bu ifadenin beklenen değerini alacak olursak:

$$\mathrm{E}[\![\mathrm{X}(\mathrm{h}+1)]\!] = \mathrm{A}\mathrm{E}[\![\mathrm{X}(\mathrm{h})]\!]$$

eşitliği elde edilir. A matrisinin λ_1 ve λ_2 olan özdeğerleri aşağıdaki determinant eşitliği çözülerek $\lambda_1 = 0$ ve $\lambda_2 = 1\text{-}\alpha\tau$ şeklinde bulunur. Devingen sistemlerin kararlılık teorisine göre, sistemin asimptotik kararlılığa erişebilmesi için $|\lambda_1, \lambda_2| < 1$ sağlanmalı, dolayısıyla

$$0 < \alpha < \frac{1}{\tau}$$

şartı sağlanmalıdır. Eğer α parametresi yukarıdaki şartı sağlayacak şekilde seçilirse,

$$\begin{aligned} \mathrm{E}[\![\Delta(\infty)]\!] = (1-\alpha\tau)\mathrm{E}[\![\Delta(\infty)]\!] &\Rightarrow \mathrm{E}[\![\Delta(\infty)]\!] = 0, \\ \mathrm{E}[\![\Theta(\infty)]\!] = \tau\mathrm{E}[\![\Theta(\infty)]\!] &\Rightarrow \mathrm{E}[\![\Theta(\infty)]\!] = 0, \end{aligned}$$

sağlanacaktır. Dolayısıyla, beklenende tahminleme hatası $\mathrm{E}[\![\Theta(\infty)]\!] = \tilde{\mathrm{t}}_{\mathrm{v}}(\infty)$ sıfıra yakınsayacaktır. Bir başka deyişle, oransal-integral denetçilerle görev çevrimi uygulandığında, ortalamada bütün paketlerin alınma zamanı doğru tahmin edilecek ve paketler zamanında alınacaktır.

Teorem 2: Oransal-integral denetçilerle görev çevrimi uygulandığında, paketlerin alınma zamanı

$$\gamma = \frac{\alpha^2\left(\frac{\varepsilon^2\tau}{3}+\sigma_{\mathrm{d}}^2\right)}{(2-\alpha\tau)} + \frac{\varepsilon^2\tau}{3} + \sigma_{\mathrm{d}}^2$$

asimptotik varyansıyla tahmin edilmektedir.

İspat: Tahminleme varyansını bulmak için $\lim_{\mathrm{h}\to\infty}\mathrm{Var}(\Theta(\mathrm{h}))$ varyans değeri bulunmalıdır. Zaten $[\![\Theta(\infty)]\!] = 0$ eşitliği bilindiği için, $\mathrm{Var}(\Theta(\infty)) = \mathrm{E}[\![\Theta(\infty)^2]\!]$ elde edilir ve hesaplanması gereken değer $\mathrm{E}[\![\Theta(\infty)^2]\!]$ değeri olmaktadır. Dolayısıyla,

$$E[\![\Theta(\infty)^2]\!] = \tau^2 E[\![\Delta(\infty)^2]\!] + E\left[\!\left[\left(a(h) + b(h)\right)^2\right]\!\right].$$

Öncelikle $E[\![\Delta(\infty)^2]\!]$ değerini hesaplayalım:

$$E[\![\Delta(\infty)^2]\!] = (1 - \alpha\tau)^2 E[\![\Delta(\infty)^2]\!] + \alpha^2 E[\![(a(h) + b(h))^2]\!].$$

Bu değeri hesaplamak için öncelikle $E[\![(a(h) + b(h))^2]\!]$ değeri hesaplanmalıdır. a(h) ve b(h) birbirinden bağımsız şans değişkenleri olduğu için

$$E[\![(a(h) + b(h))^2]\!] = E[\![a(h)^2]\!] + E[\![b(h)^2]\!]$$

elde edilir. Eğer $t_{h+1} - t_h \approx \tau$ varsayarsak, $E[\![a(h)^2]\!] = \frac{\varepsilon^2\tau}{3}$ ve $E[\![b(h)^2]\!] = \sigma_d^2$ olduğu için, bu değer basit adımlar sonucunda

$$E[\![\Delta(\infty)^2]\!] = \frac{\alpha^2(\frac{\varepsilon^2\tau}{3} + \sigma_d^2)}{(2\alpha\tau - \alpha^2\tau^2)}$$

olarak bulunur. Bu değerleri de, ispatın en başında belirttiğimiz $E[\![\Theta(\infty)^2]\!]$ ifadesinde yerine koyacak olursak, birkaç basit adımdan sonra Teorem 2'deki sonucu elde etmiş oluruz. Görüleceği gibi, asimptotik varyans, saat kararlılığını temsil eden ε donanımsal parametresine, iletişim sıkılığını ifade eden τ değerine ve iletişim gecikmelerini ifade eden σ_d^2 değerine bağlıdır. Önerdiğimiz algoritmanın integral kazanımı olan α değeri de başarımı etkileyen önemli bir etkendir.

6. Paket Alım Penceresinin Büyüklüğü

Bu bölümde, bir önceki bölümdeki analiz sonuçlarını kullanarak v düğümünün paket alım penceresinin (Şekil 1'de gösterilen W değeri) ne kadar büyük olması gerektiğin incelenecektir. v düğümünün u düğümünden t anında gönderilecek bir sonraki paketin alım zamanını $\hat{t}_v(t')$ olarak tahmin ettiğini varsayalım. İletişim süresince meydana gelen gecikmeler, saat sapmaları ve tahminleme hataları yüzünden, v düğümünün paketi doğru alabilmesi için bir koruma zamanına (guard time) ihtiyacı vardır. Dolayısıyla, v düğümü alıcı-verici donanımını tahminlediği zaman koruma zamanını kullanarak biraz önce açmalıdır.

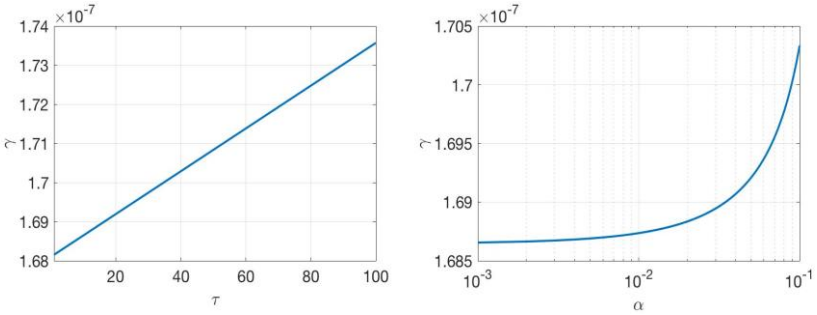
v düğümü u düğümü tarafından t anında gönderilen paketi $\hat{t}_v(t')$ anında %99.7 olasılıkla alabilmek için, kendi alım penceresinin büyüklüğü olan $W = l_{pkt} + l_{guard}$ ifadesindeki l_{guard} değerini aşağıdaki gibi

$$l_{guard} = 3\sqrt{\gamma}$$

ayarlamalıdır. Görüleceği gibi, tahminleme hatası, yani γ değeri arttıkça, l_{guard} değeri ve dolayısıyla paket alım penceresi W büyüyecek, alıcı–verici daha fazla açık kalacak ve daha fazla enerji harcanacaktır. Teorem 2'de gösterdiğimiz oransal-integral denetçiler ile görev çevriminin γ varyansı, saatin kristal salınım üretecinin (oscillator) kararlılığını ifade eden ε değerine, paket alım sıklığı olan τ değerine ve mesaj gecikmelerindeki belirsizlikleri ifade eden σ_d^2 değerine bağlıdır. Dolayısıyla, v düğümü sistemdeki bu parametrelerin değer aralıklarını bilirse, γ ve dolayısıyla l_{guard} değerini hesaplayabilir. Bu sayede kendi paket alım penceresini verimli bir şekilde ayarlayarak paketleri yüksek olasılıkla kaybetmeden alacak ve enerji tüketimini azaltacaktır.

Şekil 5'te değişik iletişim sıklığı ve integral kazanımı değerleri için, MATLAB benzetimleri yardımıyla alım penceresi W değerinin önemli bir kısmını ifade eden γ değerindeki değişimi

gösterilmektedir. Benzetimlerde $\varepsilon = 64e-12$ ve $\sigma_d^2 = 16e-8$ olarak seçilmiştir. Şeklin solunda görüleceği gibi, $\alpha = 1e-6$ değeri için, paket alım sıklığının artması algoritmanın daha sık çalıştırılmasını sağlayacak ayrıca daha önce Teorem 2'de gösterdiğimiz varyans değerinin küçülmesini sağlayarak l_{guard} değerini ve dolayısıyla W değerini küçültecektir. Benzer şekilde, sabit bir $\tau = 10$ değeri için, integral kazanımı $0 < \alpha < \frac{1}{\tau}$ ifadesine göre aralığındaki (0,0.1) arasındaki değerleri alabilmektedir. Şeklin sağında gösterildiği gibi, integral kazancının asimptotik varyansı küçülten bir minimum değeri vardır. Ancak, integral kazancının küçük değerlerinin yakınsama süresini uzatacağı unutulmamalıdır.



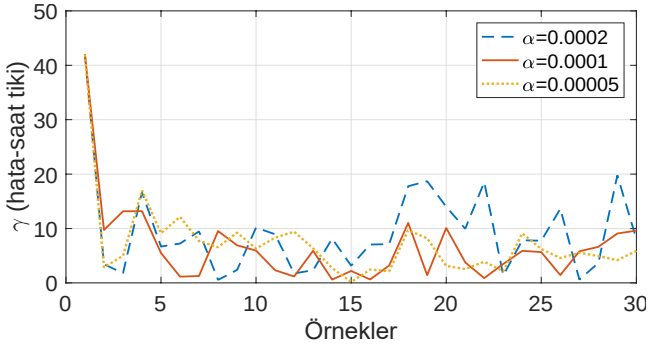
Şekil 5. Paket alım penceresi W'nin haberleşme devri τ ve integral kazanımı α ile değişimi.

7. Deneysel Sonuçlar

Bu bölümde, önerilen yöntemin uygulamada da geçerli ve tutarlı olduğunu göstermek için, deneysel sonuçlar sunulacaktır. Önerilen yöntem KAA için genel geçer işletim sistemi olan TinyOS 2.1.1 ortamında gerçeklenmiştir. Deneylerde MICAz algılayıcı düğümleri kulanılmıştır. MICAz donanım ortamındaki zamanlayıcılar için 23KHz kuvars salınıcı kristali saat kaynağı olarak kullanılmıştır. Dolayısıyla düğümler yaklaşık 32 mikrosaniye hassasiyetinde zaman ölçümü yapabilmektedirler.

Deneylerde bir ana (master) düğüm kendi kapsama alanı içerisindeki bir diğer alıcı düğüme periyodik olarak her 30 saniyede bir paket göndermektedir. Alıcı düğüm paketi aldığında, kendi tahminleme hatasını hesaplamakta ve bu değeri PC'ye bağlı bir merkezi düğüme göndermektedirler. Merkezi düğüm aldığı hata saat değerlerini seri porttan, bu portu dinleyen bir uygulamaya göndermektedir. Uygulama kendisine gelen anlık hata değerlerini saklamaktadır. Deney sonunda, saklanan değerler kullanılarak grafiksel olarak gösterilmektedir.

Deneylerde oransal-integral denetçisi tabanlı yöntemimizin temel parametresi olan α parametresi için değişik değerler seçilerek yöntemin gerçek bir donanım ortamındaki başarımı gözlemlenmiştir. Deney ortamından toplanan tahminleme hatası Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Alıcı düğümün gönderici düğümün gönderme zamanına ilişkin tahminlerinin hatası.

Şekil 6'da gösterilen değerler göz önüne alındığında, daha büyük bir α değeri olan 0.0002 değeri için gözlemlenen tahminleme hatası değerleri daha büyüktür. Bu durum Şekil 5'te gösterilen benzetim sonuçları ile tutarlıdır: Daha büyük α değerleri daha büyük tahminleme hatasına yol açar. Ancak α için seçilen 0.0001 ve 0.00005 değerleri karşılaştırıldığında, tahminleme hata değerleri oldukça benzerdir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: 32 KHz hızında çalışan saat ile 32 mikrosaniyeden daha hassas ölçüm yapılamamaktadır. Dolayısıyla nicemleme hataları (quantization error) nedeniyle, α değerinin belirli bir değerin altına düşmesi tahminleme hatasını değiştirmemektedir. Sonuç olarak α için seçilen 0.0001 önerilen yöntem için uygun bir değerdir ve yaklaşık 3,2 milisaniyelik bir tahminleme hatasına yol açmaktadır.

8. Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu makalede, KAA'larda düğümlerin alıcı-vericilerini bir görev döngüsü mekanizması ile kapatıp açarak enerji tüketimlerini azaltmaları konusuna odaklanılmıştır. Güncel literatürde ilk defa, bu tip bir görev döngüsü için oransal-integral denetleyicilerin kullanılması önerilmiştir. Önerilen yöntemin işlem ve bellek yükü açısından oldukça hafif olduğunun altını çizilerek, matematiksel analizler yardımıyla başarımı analitik olarak gösterilmiştir. Buna ek olarak, MATLAB benzetimleri yardımıyla teorik sonuçların doğruluğunu da gösterilmiştir. Önerilen yöntemin gerçek bir KAA ortamında geliştirimi ve deneysel sonuçları da gösterilmiştir. Gelecek çalışması olarak önerilen yöntemin gerçek KAA uygulamalarında kullanılması ve uygulama ihtiyaçları doğrultusunda çok düğümden oluşan bir ağdaki başarımının değerlendirilmesi hedeflenmektedir.

Kaynakça

[1] Lamport, L., "Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system", Communications of the ACM, 21(7), 558-565, 1978.

[2] Lenzen, C., Locher, T., Wattenhofer, R., "Tight bounds for clock synchronization", Journal of the ACM (JACM), 57(2), 8, 2010.

[3] K. S. Yıldırım, Kablosuz Algılayıcı Ağlarında Saat Eşzamanlaması, Ege Üniversitesi, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.

[4] Burri, N., Von Rickenbach, P., Wattenhofer , R, "Dozer: ultra-low power data gathering in sensor networks", 26th International Symposium on Information

Processing in Sensor Networks, Cambridge, MA, 2007.

[5] Akyildiz, I. F., Vuran, M. C., Wireless sensor networks, John Wiley & Sons, 2010.

[6] Guo, S., He, L., Gu, Y., Jiang, B., He, T., "Opportunistic flooding in low-duty-cycle wireless sensor networks with unreliable links", IEEE Transactions on Computers, 63(11), 2787-2802, 2014.

[7] İnternet: Texas Instruments, http://www.ti.com/

[8] Polastre , J., Szewczyk,, R., Culler, D., "Telos: Enabling ultra-low power wireless research," IPSN 2005, Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, Los Angeles, California, USA, April 24 - 27, 2005.

[9] Yıldırım, K. S., Carli, R., Schenato, L., "Adaptive control-based clock synchronization in wireless sensor networks." 2015 European Control Conference (ECC), Linz, pp. 2806-2811, 2015.

[10] Maróti, M., Kusy, B., Simon, G., Lédeczi, A., "The flooding time synchronization protocol", Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '04), ACM, New York, NY, USA, 39-49, 2004

[11] Polastre, J., Hill, J., Culler, D., "Versatile low power media access for wireless sensor networks", Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '04), ACM, New York, NY, USA, 95-107.

[12] Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D., "An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks", INFOCOM 2002 Proceedings.Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, pp. 1567-1576 vol.3, 2002.

[13] van Hoesel, L., Havinga, P. "A lightweight medium access protocol (lmac) for wireless sensor networks: Reducing preamble transmissions and transceiver state switches," 1st International Workshop on Networked Sensing Systems, INSS 2004, Tokio, Japan, 2004

[14] lae Noh, K., Serpedin, E., Qaraqe, K. "A new approach for time synchronization in wireless sensor networks: Pairwise broadcast synchronization," Wireless Communications, IEEE Transactions on, vol. 7, no. 9, pp. 3318–3322, 2008.

[15] Huang, H., Yun, J., Zhong, Z., Kim, S., He, T., "Psr: Practical synchronous rendezvous in low-duty-cycle wireless networks", 2013 Proceedings IEEE INFOCOM, Turin, pp. 2661–2669, 2013

[16] Yıldırım, K. S., Aantjes, H., Majid, A. Y., Pawełczak, P, "On the Synchronization of Intermittently Powered Wireless Embedded Systems". arXiv preprint arXiv:1606.01719, 2016

[17] A. Leva, F. Terraneo, L. Rinaldi, A. V. Papadopoulos, and M. Maggio, "High-precision low-power wireless nodes' synchronization via decentralized control," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 24, no. 4, pp. 1279–1293, Jul. 2016.

[18] R. Carli and S. Zampieri, "Network clock synchronization based on the second-order linear consensus algorithm," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 59, no. 2, pp. 409–422, Feb. 2014

[19] R. Lim, B. Maag, and L. Thiele, "Time-of-flight aware time synchronization for wireless embedded systems," in EWSN 2016, pp. 149–158.

[20] C. Lenzen, P. Sommer, and R. Wattenhofer. PulseSync: An efficient and scalable clock synchronization protocol. ACM/IEEE Transactions on Networking (TON), Mar 2014.