

Çok Atlamalı Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Dağıtık Bir Eşzamanlama Tekniğinin Tasarımı ve Deneysel İncelenmesi

Design and Experimental Evaluation of a Distributed Time Synchronization Technique for Multi-Hop Wireless Sensor Networks

Muhammed Fatih İnanç* ve Bülent Tavlı*

* TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

E-posta: {fatihinanc,btavli}@etu.edu.tr

Özetçe —Genelde tüm haberleşme ağları, özelde ise Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), sağladıkları hizmetlerin sıkı gereksinimlerini yerine getirebilmek için eşzamanlamaya ihtiyaç duyarlar. KAA'larda eşzamanlama birden çok amaç için gereklidir (örneğin, uyuma-uyanma çizelgelemesi, olay tespit etiketlemesi). Literatürde KAA'lar için çeşitli eşzamanlama protokolleri önerilmiş ve bunların bazıları da deneysel olarak test yataklarıyla sınanmıştır. Fakat, KAA'larda çok-atlamalı eşzamanlama deneysel olarak hiç incelenmemiştir. KAA literatüründeki bu açıklığı kapatmak amacıyla bu çalışmada özgün bir eşzamanlama tekniğinin tasarımı ve gerçekleştirilmesi sunulmuştur. Ayrıca, önerilen tekniğin başarımı doğrudan deneylerle irdelenmiştir. Sonuçlarımız önerilen tekniğin üstün başarısını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler—kablosuz algılayıcı ağlar, gömülü sistemler, eşzamanlama, çok-atlamalı haberleşme, saat kayması

Abstract—All communications networks, in general, and Wireless Sensor Networks (WSNs), in particular, need time synchronization for fulfilling the stringent requirements of the services they are providing. Time synchronization in WSNs is needed for multiple purposes (e.g., sleep-wakeup scheduling, event detection annotation). In literature, various time synchronization protocols for WSNs are proposed and some of these designs are evaluated in experimental testbeds. However, multi-hop time synchronization in WSNs have never been investigated experimentally. Therefore, to fill the gap in the WSN literature, in this study, we present the design and implementation of a novel time synchronization technique. Furthermore, we investigate the performance of the proposed technique through direct experimentation. Our results reveal the superior performance of our technique.

Keywords—wireless sensor networks, embedded systems, time synchronization, multi-hop communications, clock drift

I. GİRİŞ

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) henüz olgunlaşma safhasını bütünüyle tamamlamamıştır. Buna rağmen, tüm dünyada KAA kullanımı özellikle güvenlik amaçlı olarak oldukça yaygın bir durumdadır (örneğin savaş alanı izlemesi, kritik altyapı koruması, izleme). KAA'ların verimli ve yüksek başarımlı iş

görebilmeleri için eşzamanlama en önemli servislerden birisidir. KAA'ların küçük boyutlu ve sınırlı kapasiteli platformlardan oluşmasının yanısıra kullanılabilecek olan frekans bandı ve pil enerjisinin de sınırlı olması nedenleriyle KAA'lar için tasarlanacak olan eşzamanlama protokollerinin bu oldukça sıkı kısıtlar içerisinde verimli şekilde çalışmasını sağlayacak tarzda tasarlanması gerekmektedir [1].

KAA'larda eşzamanlama 10 yılı aşkın süredir incelenmekte olan bir konudur [2], [3]. Bu konudaki çalışmaların böylesi uzun soluklu olmasının temel nedenleri hem konunun önemi hem de çözülmeye çalışılan problemin zor olan doğasıdır [4]–[6]. Pek çok KAA uygulamasında, eşzamanlama, amaçlanan işlevselliği gerçekleştirebilmek adına yaşamsal öneme sahiptir. Örneğin, nesne takibi veya olay tespiti gibi uygulamalarda çok miktarda algılayıcıdan alınan verinin birleştirilmesi önem arz etmektedir. Böylesi işlevleri yüksek başarımla yerine getirebilmek için eşzamanlama gereklidir. Yaşam süresini uzatmak amacıyla KAA algılayıcıları sıklıkla düşük enerji harcayacakları uyku durumuna geçerler. Fakat, süregelen temel algılama ve algılanan verinin baz istasyonuna (doğrudan veya çok atlamalı olarak) eriştirilmesi için algılayıcıların belirli bir çizelgeye göre uyanmaları birbirleriyle etkileşime geçmeleri ve iletişim gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Böylesi bir çizelgeye uyabilmek için komşu algılayıcılar arası eşzamanlama gereklidir. Şimdiye kadar anlatılan kurgular KAA'larda eşzamanlamanın önemini vurgulamak amacıyla sunulan az sayıda örnekten ibarettir fakat KAA'larda daha pek çok durumda eşzamanlama son derece önemli bir servistir [7], [8].

KAA algılayıcılarının iç saatleri genelde aşağıdaki denklem kullanılarak modellenir.

$$t_a = \alpha_a + \beta_a t_u \quad (1)$$

Bu denklemde, t_a bir KAA algılayıcısının (algılayıcı- a) saat değeri, α_a ofset, β_a algılayıcı- a 'nın saatinin kayması ve t_u da evrensel zamandır [9]–[13]. Genel kabul saat zaman kaymasını değişmez bir sabit almak yönündedir. Aslında göreceli olarak kısa sürelerde bu varsayımın doğruluğu pek çok deneysel çalışmada teyid edilmiştir. Böylece, çözülmesi

gereken problem, evrensel bir referansa göre kayma ve ofset değerlerinin doğru bir şekilde tahmin edilmesine indirgenebilmektedir.

Literatürde deneysel olarak doğrulanmış çok miktarda ofset ve kayma tahmini yapabilmek için çalışmaları sunulmuştur [14]–[21]. Ofset ve kayma parametrelerini tahmin için iki yönlü bir tokalaşma mekanizması kullanılabilir. Ayrıca eşzamanlama için oluşan fazla trafiği düşürmek amacıyla mevcut paketler üzerine bindirme yöntemi de kullanılabilir çünkü standart bağ seviyesi veri ve teyid mesajları eşzamanlama amaçlı tokalaşmayı gerçekleştirilebilmek için mükemmel bir altlık oluşturmaktadır.

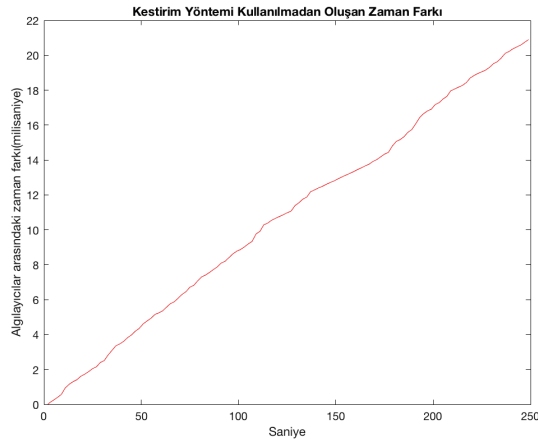
Bu çalışmada, çok atlamalı KAA'larda dağıtık çalışabilen ve düşük karmaşıklıkla bir eşzamanlama yönteminin tasarımı ve gerçekleştirilmesi sunulmaktadır. Tasarladığımız eşzamanlama yönteminin deneysel incelemesi doğrudan deney yöntemiyle gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları sunulmuştur.

Bu çalışmanın geri kalanı üç bölümden oluşmaktadır. Bölüm II'de yöntemimiz sunulmaktadır. Bölüm III'de deneysel sonuçlar irdelenmiştir. Bölüm IV'te makalenin sonuçları ortaya konulmuştur.

II. SİSTEM TASARIMI

A. Problem Tanımı

Genellikle birçok elektronik cihaz içerisinde bir gerçek zamanlı saat birimi bulunur. Özellikle kablosuz ağ sistemlerinde bu saatlerin çok yüksek hassasiyetli ve doğru olması istenir. Fakat fiziksel ortam şartlarından dolayı, saat biriminin referans kaynağı olan kristallerde, zamana bağlı olarak bir hata değeri oluşur. Bu sebeple, bu tür cihazların çok kısa aralıklarla saat senkronizasyonu yapması gerekir.



Şekil 1: İki algılayıcı arasında oluşan zaman farkı.

Şekil 1'de görüldüğü üzere 4 dakikada yaklaşık 20 milisaniye zaman farkı oluşmaktadır. Özellikle kritik zamanlama gerektiren sistemler için (örn. TDMA) 20 milisaniye fark, yüksek bir değer olarak kabul edilmektedir [2]. Bu sebeple, bu tip bir ağda bulunan kablosuz algılayıcıların, yaklaşık her 4 dakika veya daha az bir sürede zaman senkronizasyonu yapması gerekmektedir. Bu zaman senkronizasyonu ihtiyacından dolayı kablosuz algılayıcılar, çok sık aralıklarla ağda aktif kalacağından dolayı, kablosuz ağ trafiğini arttırmakta ve ağ performansını azaltmaktadır. Ayrıca, genellikle kablosuz algılayıcılar

pil ile çalıştığı için kısa aralıklarla veri gönderimi ve alımı yaparak sürekli enerji tüketenlerdir. Bu ise, algılayıcıların pil ömrünü büyük oranda azaltmaktadır.

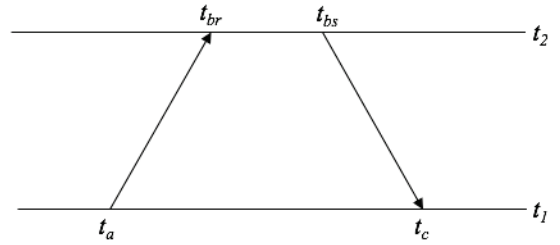
Bu çalışmada, bir KAA'da bulunan algılayıcıların saat kristalinin sapma karakteristiğini tespit ederek saatinin tahmin edilmesi konusu üzerinde çalışılmıştır.

B. Tahmin Algoritması

Bir kablosuz ağ sisteminde iki algılayıcının saatleri arasındaki ilişkiyi Denklem 2 ile modelleyebiliriz.

$$t_1 = \alpha_{12} + \beta_{12}t_2 \quad (2)$$

Bu denklemde, t_1 ve t_2 algılayıcı-1 ve algılayıcı-2'nin yerel saatlerini, α_{12} algılayıcı-1 ve algılayıcı-2'nin saatleri arasındaki göreceli ofseti ve β_{12} de algılayıcı-1 ve algılayıcı-2'nin saatleri arasındaki göreceli kaymayı ifade etmektedir. Eğer herhangi bir zamanda algılayıcılar birbirlerine kendi saat bilgilerini gönderirlerse α_{12} ve β_{12} değerini elde etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2: Eşzamanlama şeması.

Şekil 2'de görüleceği üzere, algılayıcı-1, t_a zamanında kendi saat bilgisini içeren bir paketi algılayıcı-2'ye gönderir. Algılayıcı-2 bu paketi t_{br} zamanında alır ve kendi saat bilgisini aynı pakete ekleyerek t_{bs} zamanında algılayıcı-1'e gönderir. Algılayıcı-1 ise t_c zamanında bu paketi alır ($t_a - t_{br}$ ve $t_{bs} - t_c$ arasında geçen süre sabittir ve bir kez ölçülmesi yeterlidir). t_{br} ve t_{bs} arasında geçen sürenin hesaplamalara bir etkisi olmadığı için $t_b = t_{br}$ ve $t_c = t_c - (t_{bs} - t_{br})$ şeklinde bekleme zamanından arındırılmış iki değişken tanımlıyoruz. Bu çalışmada, bu işleme *örnek toplama* adı verilmiştir. İki algılayıcı arasında yeteri kadar örnek toplandıktan sonra aşağıdaki denklemlerde ifade edilen algoritma [22] ile algılayıcı-1, algılayıcı-2'nin saatini tahmin edebilir.

$$\beta_{12a}(i) = (t_a(i) - t_a(i-1)) / (t_b(i) - t_b(i-1)), \quad (3)$$

$$\beta_{12b}(i) = (\hat{t}_c(i) - \hat{t}_c(i-1)) / (t_b(i) - t_b(i-1)), \quad (4)$$

$$\alpha_{12a}(i) = t_a(i) - \beta_{12a}(i)t_b(i), \quad (5)$$

$$\alpha_{12b}(i) = \hat{t}_c(i) - \beta_{12b}(i)t_b(i), \quad (6)$$

$$\beta_{12}(i) = [\beta_{12a}(i) + \beta_{12b}(i)] / 2, \quad (7)$$

$$\alpha_{12}(i) = [\alpha_{12a}(i) + \alpha_{12b}(i)] / 2, \quad (8)$$

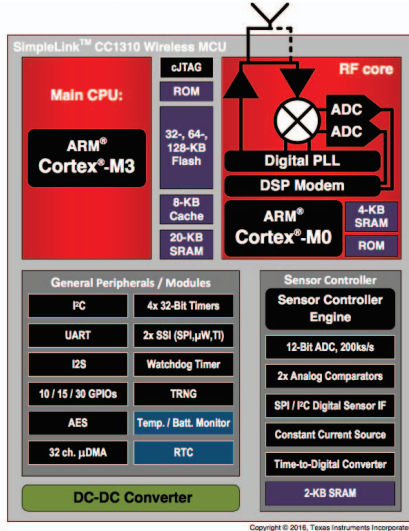
$$\beta_{12avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_{12}(i), \quad (9)$$

$$\alpha_{12avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_{12}(i). \quad (10)$$

Burada N , örnek sayısını temsil etmektedir ve 50 seçilmiştir.

C. Test Düzeneği

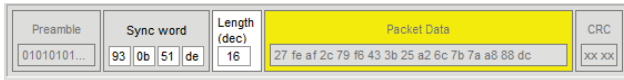
Bu deneyde, Texas Instruments CC1310 ARM Cortex-M3 mikro-denetleyicisi kullanılmıştır (Şekil 3). CC1310 mikro-denetleyicisi, 128KB flash hafıza, 20KB RAM, IEEE 802.15.4g uyumlu 868-MHz kablosuz alıcı/verici birimini ve bu birimi kontrol eden ARM Cortex-M0 işlemcisini üzerinde barındırmaktadır.



Şekil 3: CC1310 mimarisi (<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1310.pdf>).

D. Haberleşme Protokolü

Kablosuz haberleşme için herhangi yazılım kütüphanesi ve katmanı kullanılmamıştır. Şekil 2’de belirtilen süreler basit paketler halinde iletilmiştir.



Şekil 4: Paket formatı (<http://www.ti.com/tool/SMARTRF-TM-STUDIO>).

Şekil 4’deki paket formatına dikkat edilirse *Sync Word* bilgisinin de paket içerisinde olduğu görülmektedir. Bu bilgi sayesinde paket alım süresi çok daha kararlı bir şekilde tespit edilebilmektedir. Bu sistem, kısaca aşağıdaki şekilde çalışmaktadır:

- 1) Algılayıcı-1 göndermek istediği paketi t_a zamanında göndermek üzere kablosuz haberleşme birimini aktif hale getirir.
- 2) t_a zamanında algılayıcı-1 önce *Preamble* bitleri göndererek algılayıcı-2’yi uyandırır.
- 3) Algılayıcı-2 uyandığı anda algılayıcı-1’den *Sync Word* bilgisini bekler.
- 4) Algılayıcı-1 *Sync Word* bilgisini gönderir.
- 5) Algılayıcı-2 *Sync Word* bilgisini alır. Bu bilgi eğer doğru ise (yani paket kendine ait ise) paketin devamını almak üzere kablosuz haberleşme devam eder.

Yukarıdaki akışta paket tespiti için en önemli aşama 5. aşamadır. Çünkü bu aşamada *Sync Word* doğru alındı ise

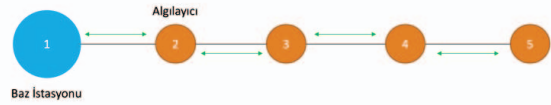
mikro-denetleyicinin kablosuz haberleşme birimi tam bu an-daki zamanı (İng. *timestamp*) kendi hafızasına kaydetmektedir. Dolayısıyla paket iletimi ile ilgili oluşabilecek gecikmeler bu özellik sayesinde tespit edilebilmektedir.

Ek olarak, CC1310 mikro-denetleyicisi içerisindeki kablosuz haberleşme biriminde bulunan *istenilen zamanda gönderme özelliği* sayesinde t_a zamanı minimum gecikme ile tespit edilebilmektedir. Standardın aksine bu özellik, t_a zamanını kaydet ve gönder yerine tam olarak t_a zamanında gönder şeklinde çalışmaktadır.

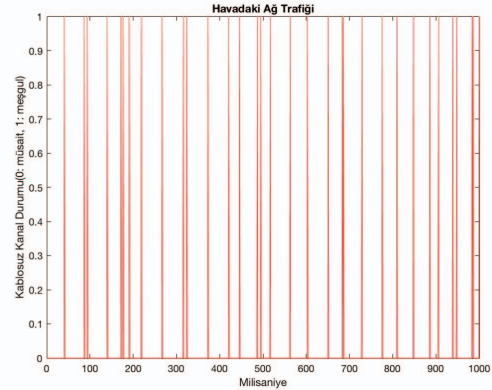
III. DENEYSEL İNCELEME

Bu çalışmada kullanılan algoritma, farklı koşullar altında test edilmiştir. Bunlar:

- 1) Ortamda birden fazla algılayıcı bulunması ve algılayıcı-1’in algılayıcı-5’in zamanını çok atlamalı bir durumda tahmin etmeye çalışması (Şekil 5).
- 2) 1.koşul ve ortamda yoğun veri trafiğinin olması (Şekil 6).



Şekil 5: Çok atlamalı eşzamanlama şeması.



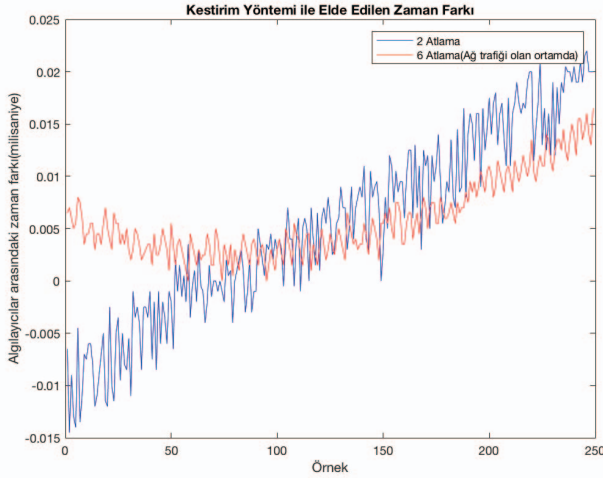
Şekil 6: Ortamdaki genel ağ trafiği.

Pratik olarak paketler arasındaki gecikmeler arttıkça algoritmanın zamanı doğru tahmin edebilmesi ihtimali azalmaktadır. Örneğin, bu algoritmanın 802.11 Wi-Fi altyapısı üzerinde çalıştırıldığı düşünülürse, gönderimlerin başarısız olmasından dolayı bazı gecikmeler meydana gelecektir. Algılayıcılar t_a zamanında paket gönderim komutu verseler bile CSMA/CA implementasyonunun 802.11 MAC katmanı içerisinde gömülü olarak gelmesinden dolayı, önlenemeyen, tespit edilemeyen ve müdahalesi mümkün olmayan gecikmeler meydana gelecektir. Ve bu gecikmeler ortamdaki algılayıcı sayısına bağlı olarak artacaktır. Bu ise pratikte algoritmanın hata payının belirgin şekilde artmasına sebep olmaktadır. Fakat bu çalışmada herhangi bir ağ yazılım kütüphanesi ve katmanı kullanılmadığı için yukarıda belirtilen durumlarda oluşan istenmeyen gecikmeler olsa bile bu gecikmeler tespit edilebilmektedir. Yukarıda bahsedilen gecikmelerin tespit edilme aşamaları aşağıdaki gibidir:

- 1) t_a 'da paket göndermek üzere bir zamanlayıcı çalıştır.
- 2) t_a zamanı geldiğinde kablosuz kanalı kontrol et.
- 3) Eğer kanal meşgul değilse paketi gönder.
- 4) Eğer kanal meşgul ise 2. adıma git ve arada geçen süreyi pakete ekle.

Yukarıda belirtilen adımların gerçekleştirilmesi ile ortamda yoğun veri trafiği olsa bile veya saati ayarlanmak istenen algılayıcılar arasında birden fazla algılayıcı olsa bile saat tahmin algoritması yüksek doğrulukla çalışmaktadır.

Deneyler saniyede 1 örnek alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de sunulan test sonuçlarından da görüleceği üzere bu algoritmanın başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesiyle birlikte ortamdaki yoğun ağ trafiğinden bağımsız olarak 4 dakikadaki zaman farkı 20 milisaniyeden 13 mikrosaniyeye indirilmiştir. Birkaç on milisaniye, hassas sistemler için yüksek sayılabilecek bir değer olmasına karşın, mikrosaniyeler bu tip sistemler için rahatlıkla ihmal edilebilir bir değerdir. Dolayısıyla bu algoritmanın kullanımı ile birlikte KAA'larda zaman senkronizasyonu için ayrıca bir mekanizma ihtiyacı ortadan kalkmaktadır.



Şekil 7: Zaman kayması analizi.

IV. SONUÇ

Bu çalışmada KAA'larda eşzamanlama işleminin düşük karmaşıklıkta bir yöntemle gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, çok atlamalı KAA'larda çalışmak üzere bir yöntem tasarlanmış ve gömülü bir sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yöntem deneysel olarak irdelenmiş ve mikrosaniyeler seviyesinde zamanlama hatalarına kadar inilebildiği gözlemlenmiştir. Literatürde çok atlamalı KAA'larda harici trafik altında deneysel olarak eşzamanlama üzerine ilk çalışma olma özelliği çalışmamızın oldukça özgün bir yanıdır.

KAYNAKLAR

- [1] J. Elson and D. Estrin, "Time synchronization for wireless sensor networks," in *Proceedings of the 15th International Parallel & Distributed Processing Symposium*, ser. IPDPS '01, 2001, pp. 186–193.
- [2] F. Sivrikaya and B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: a survey," *IEEE Network*, vol. 18, no. 4, pp. 45–50, July 2004.
- [3] I.-K. Rhee, J. Lee, J. Kim, E. Serpedin, and Y.-C. Wu, "Clock synchronization in wireless sensor networks: An overview," *Sensors*, vol. 9, no. 1, pp. 56–85, 2009.
- [4] J. Elson and K. Römer, "Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization," *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 33, no. 1, pp. 149–154, Jan. 2003.
- [5] L. Schenato and G. Gamba, "A distributed consensus protocol for clock synchronization in wireless sensor network," in *Decision and Control, 2007 46th IEEE Conference on*, Dec 2007, pp. 2289–2294.
- [6] L. Schenato and F. Fiorentin, "Average timesynch: A consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks," *Automatica*, vol. 47, no. 9, pp. 1878 – 1886, 2011.
- [7] T. Kunz and E. McKnight-MacNeil, "Clock synchronization in wsn: Simulation vs. implementation," in *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, July 2011, pp. 980–985.
- [8] O. Mirabella, M. Brischetto, A. Raucea, and P. Sindoni, "Dynamic continuous clock synchronization for ieee 802.15.4 based sensor networks," in *Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE*, Nov 2008, pp. 2438–2444.
- [9] L. Ferrigno, V. Paciello, and A. Pietrosanto, "Experimental characterization of synchronization protocols for instrument wireless interface," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 3, pp. 1037–1046, March 2011.
- [10] S. Lee, U. Jang, and J. Park, "Fast fault-tolerant time synchronization for wireless sensor networks," in *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on*, May 2008, pp. 178–185.
- [11] J. Chen, Q. Yu, Y. Zhang, H.-H. Chen, and Y. Sun, "Feedback-based clock synchronization in wireless sensor networks: A control theoretic approach," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 6, pp. 2963–2973, July 2010.
- [12] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 36, no. SI, pp. 147–163, Dec. 2002.
- [13] F. Goncalves, L. Suresh, R. Lopes Pereira, J. Trindade, and T. Vaza-o, "Light-weight time synchronization for wireless sensor networks," in *Future Internet Communications (CFIC), 2013 Conference on*, May 2013, pp. 1–8.
- [14] T. Schmid, R. Shea, Z. Charbiwala, J. Friedman, M. B. Srivastava, and Y. H. Cho, "On the interaction of clocks, power, and synchronization in duty-cycled embedded sensor nodes," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 24:1–24:19, Oct. 2010.
- [15] Z. Zhong, P. Chen, and T. He, "On-demand time synchronization with predictable accuracy," in *INFOCOM, 2011 Proceedings IEEE*, April 2011, pp. 2480–2488.
- [16] H. Cho, J. Jung, B. Cho, Y. Jin, S.-W. Lee, and Y. Baek, "Precision time synchronization using ieee 1588 for wireless sensor networks," in *Computational Science and Engineering, 2009. CSE '09. International Conference on*, vol. 2, Aug 2009, pp. 579–586.
- [17] F. Ren, C. Lin, and F. Liu, "Self-correcting time synchronization using reference broadcast in wireless sensor network," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 15, no. 4, pp. 79–85, Aug 2008.
- [18] M. Sichitiu and C. Veerarittiphan, "Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks," in *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*, vol. 2, March 2003, pp. 1266–1273.
- [19] M. Maróti, B. Kusy, G. Simon, and A. Lédeczi, "The flooding time synchronization protocol," in *Proc. International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ser. SenSys '04, 2004, pp. 39–49.
- [20] S. Yoon, C. Veerarittiphan, and M. L. Sichitiu, "Tiny-sync: Tight time synchronization for wireless sensor networks," *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 8:1–8:34, Jun. 2007.
- [21] H. Dai and R. Han, "Tsync: A lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks," *ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review*, vol. 8, no. 1, pp. 125–139, Jan. 2004.
- [22] G. Bam, E. Dilcan, B. Dogan, B. Dinc, and B. Tavli, "DLwts: Distributed light weight time synchronization for wireless sensor networks," *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2015.