

Future Alternative Positioning, Navigation, and Timing Techniques: A Survey

The Global Navigation Satellite System (GNSS), geniş kapsama alanı, yüksek doğruluk ve düşük maliyet avantajları nedeniyle telekomünikasyon, enerji endüstrisi ve ulaşım uygulamalarına PNT hizmetleri sağlamak için ilk tercih olarak kabul edilmiştir. Ancak, GNSS doğası gereği amaçlanan veya istenmeyen radyo parazitine karşı savunmasızdır ve bu tehdit, GNSS bozucuların piyasada kolayca bulunabilmesi nedeniyle daha ciddi hale gelmiştir. Sağlık ve güvenlik açısından, PNT hizmetleri yalnızca GNSS'ye güvenmemelidir. GNSS kesintisi durumunda APNT çözümleri sağlanmalıdır. Bu makalede, FAA tarafından Kuzey Amerika'da önerilen çözümler de dahil olmak üzere, güvenli ve emniyetli ulaşım sağlamak için yüksek düzeyde standartlaştırılmış PNT hizmetlerinin gerekli olduğu hava araçları için APNT çözümlerini araştırıyoruz.

Küresel Navigasyon Uydu Sistemi (GNSS), geniş kapsama alanı, yüksek doğruluk ve düşük maliyet avantajları nedeniyle bu tür hizmetleri sağlamak için ilk tercih olarak kabul edildi.

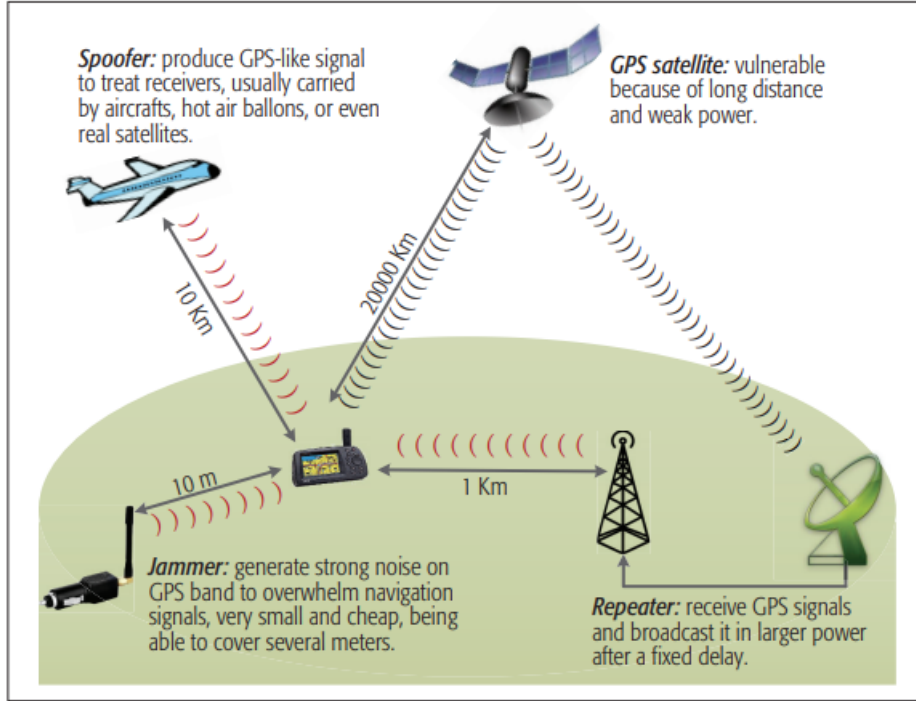


FIGURE 1. Three major threats to GNSS.

GNSS'nin güvenliği ve sağlamlığı biraz geliştirilebilse de, ne kadar ileri teknik uygulanırsa uygulansın hiçbir garanti verilemez. Son yıllarda Kuzey Amerika'daki Federal Havacılık İdaresi (FAA), Ulusal Hava Sahası Sistemini (NAS) yeni nesil sisteme (Yeni Nesil) dönüştürmek için bir proje yürütüyor.

Birincil hedef, küresel konumlandırma sistemi (GPS) tarafından sağlanan hassas PNT hizmetlerinin kapsamlı kullanımına dayanan ülkenin hava trafik kontrol sistemini, alan navigasyonu (RNAV) ve gerekli navigasyon performansı (RNP) gereksinimlerini karşılamak için modernize etmektir. GNSS kesintisi durumunda alternatif konumlandırma, navigasyon ve zamanlama (APNT) hizmetleri sağlamak için ilgili tesisleri kurmaktır.

Şu anda, birçok aday APNT kaynağı önerilmiştir ve araştırmacılar, FAA'nın gereksinimlerini karşılayan en iyi çözümü belirlemeye çalışmaktadır. Bir çözümün uygunluğunu değerlendirmek için doğruluk, kapsam, kapasite, karmaşıklık ve maliyet dahil olmak üzere bir dizi faktörün birlikte değerlendirilmesi gerekir. GNSS, PNT hizmetlerinin birincil sağlayıcısı olmaya devam ettiğinden ve baskınlığı sorgulanmadığından, herhangi bir APNT sisteminin kurulumunun mevcut ağ altyapısını minimum düzeyde etkilemesi gerekir.

APNT Solutions

DME and Optimized DME Network

Mesafe ölçüm ekipmanı (DME), bir transponderin, UHF (ultra yüksek frekans) radyo sinyallerinin gidiş-dönüş yayılma gecikmesini zamanlayarak eğik mesafe mesafesini ölçtüğü bir radyo ölçüm teknolojisidir. İki ana DME türü vardır, DME/N (dar bant) ve DME/P (hassasiyet)

PULSAR

Pulsar: A Wireless Propagation-Aware Clock Synchronization Platform

Bu yazıda, iç mekan veya GPS tarafından reddedilen cihazlar arasında beş nanosaniyeden daha iyi saat senkronizasyonu sağlayabilen kablosuz bir zaman aktarım platformu olan Pulsar'ı tanıtıyoruz. Nanosaniye düzeyinde saat senkronizasyonu, kanal kapasitesini artırmak ve uçuş zamanı yerleştirme gibi hizmetler sağlamak için uzamsal çoğullamadan yararlanan yeni nesil kablosuz sistemler gibi birçok gerçek zamanlı uygulama için eksik bir yetenektir. Pulsar, saat sapmalarını tahmin etmek ve düzeltmek için nanosaniye altı paket zaman damgası gerçekleştirebilen bir Ultra Geniş Bant (UWB) radyo ile birlikte Çip Ölçekli Atom Saatinden (Chip-Scale Atomic Clock :CSAC) türetilen kararlı bir saat kaynağından yararlanır. Pulsar için, hem düğümlerin konumunu tahmin etmek hem de birden çok atlamada kümülatif senkronizasyon hatasını azaltmak için düşük titreşimli bağlantılar seçen, kavram kanıtı ağ çapında bir senkronizasyon protokolü tasarlıyor ve değerlendiriyoruz. Pulsar platformu ve protokolü birlikte, yazılım tanımlı radyolar ve iletişim sistemleri gibi tipik son kullanıcı uygulamalarıyla kolayca entegre edilebilen, faz senkronize bir saniyede bir darbe (1PPS) sinyali ve 10 MHz referans saati sağlar. Pulsar platformunu, saat senkronizasyonu doğruluğu, ikili saatler arasındaki Allan sapması ve atlama başına beş nanosaniyeden daha iyi bir saat senkronizasyonunu ortalama 2.12 ns ve standart sapma 0.84 ns ile göstermek için değişen doğruluk açısından deneysel olarak değerlendiriyoruz. Platform, yoğun çok yönlü veya Görüş Hattı olmayan sinyallerin olduğu durumlarda saat hatasını belirleyebilir ve önleyebilir.

Introduction

Bu yazıda, çok sekmeli bir ağ üzerinden cihazları atlama başına 5 ns içinde senkronize edebilen bir kablosuz zaman aktarım platformu Pulsar'ı sunuyoruz. Bu düzeyde saat senkronizasyonu genellikle bilimsel deneylerdeki uygulamalar ve işbirliğine dayalı çoklu anten tekniklerini kullanan yeni nesil kablosuz sistemler için gereklidir. Örneğin, mevcut kablosuz sistemler, hüzme oluşturma için birden fazla antenden bağımsız ve ayrı olarak

kodlanmış veri sinyallerini iletmek veya zayıf yukarı bağlantı sinyallerini işbirliği içinde almaya yardımcı olmak için Çoklu Giriş Çoklu Çıkış (MIMO) anten dizilerini kullanabilir.

Geleneksel olarak, MIMO antenleri, dikkatlice oluşturulmuş gecikme yollarına sahip tek bir cihazda bulunur. Sıkı saat senkronizasyonu sayesinde, MIMO tekniklerini uzamsal olarak ayrılmış birden çok baz istasyonuna uygulamak mümkündür. Bu, özellikle kapsama alanının hücreler arası parazitlerle sınırlı olduğu durumlarda, hem kablosuz kapsama alanını hem de spektral verimliliği önemli ölçüde iyileştirme potansiyeline sahiptir. İşbirlikçi MIMO (C-MIMO) yaklaşımları halihazırda açık havada hücresel hizmete uyarlanıyor, ancak erişilebilir yayılmaya duyarlı zaman senkronizasyonu ile bu, iç mekanlarda bulunan femtocell ve diğer yüksek hızlı kablosuz ağlara uygulanabilir.

Hassas Zaman Protokolü (PTP) [1] gibi en iyi kablolu zaman senkronizasyonu çözümleri 25 ns kadar düşük doğruluklar elde edebilir, ancak bu erişim noktaları ağ genelinde hem kablolar hem de pahalı anahtarlar gerektirir. Kablosuz PTP sistemleri, zamanlama çözünürlüklerini önemli ölçüde sınırlayan mevcut WiFi kanal bant genişliklerinde çalışmak üzere tasarlanmaktadır (802.11ac, maksimum 160 MHz bant genişliğine sahiptir) ve halen ağırlıklı olarak ticari olarak mevcut olmayan araştırma prototipleridir. Pulsar platformu, zaman senkronizasyonunu temel iletişim protokolleri gibi sistem detaylarından ayırmak isteyen iç mekan kablosuz ve bilimsel uygulamalar için kullanımı kolay bir senkronizasyon sistemi sağlar.

Zaman senkronizasyonu protokolleri beş ana sorundan muzdariptir.

Aşağıdakilerle ilişkili hata kaynakları:

- (1) iletim süresi,- transmit time
- (2) yayılma süresi, -propagation time
- (3) alma süresi,- receive time
- (4) ikamet gecikmesi- residency delay
- ve (5) saat kararsızlığı.- clock instability.

Gönderim ve alma zamanlama hataları, paketlere zaman damgası vurulurken titreşim ve ofsetten kaynaklanır. Yerleşim gecikmesi, bir paket oluşturulduktan sonra mesajların arabelleklerde bulunmasından kaynaklanır. Ağ Zaman Protokolü (NTP) gibi mesaj geçiş protokollerinde, hatanın çoğu gidiş-dönüş mesaj geçiş sürelerindeki asimetri ile ilişkilidir. Yayılma süresi, bir sinyalin hava üzerinden veya tel veya fiber gibi bir ortamdan geçmesi için geçen süreden kaynaklanan gecikmedir. Bir nanosaniye, ışığın yaklaşık 30 cm seyahat etmesi için geçen süreye karşılık gelir. 100 ns'lik bir sapma, yalnızca 30 metrelik bir mesafe farkı olabilirPTP, ağ sinyallerinin yayılma süresini tahmin etmek için donanım düzeyinde zaman damgaları kullanır. Gürültülü bir kanalda giriş bölümlerine kilitleme ile ilişkili zamanlama hatası nedeniyle kablosuz sistemlerde bu son derece zordur. Son olarak, saat kararsızlığı, sıcaklık veya kristal aging gibi fiziksel özelliklere bağlı olarak değişebilen yerel osilatörlerin frekansındaki hatanın sonucudur. Tipik bir elektronik cihazda bulunan bir kuvars kristali, saniyede 1 μ s'ye kadar sürüklenebilir. En iyi fırın kontrollü osilatörler bile, birkaç saniyeden daha uzun süreler boyunca saniyede nanosaniye mertebesinde sürüklenmeye başlar. Bu hata

kaynakları göz önüne alındığında, ideal bir kablosuz zaman transfer sistemi iki ana teknolojiye dayanacaktır:

(1) üstten geçişi ve mesaj geçişini en aza indirmek için kararlı bir saat kaynağı ve (2) teorik menzile çözümlülüğünü iyileştirmek için geniş bir bant genişliği boyunca çalışan ve paketlerin doğru zaman damgasını gerçekleştirebilen bir radyo.

Pulsar, birincil saat kaynağı olarak bir Chip-Scale Atomic Clock (CSAC) ve nanosaniyenin altında paket zaman damgalama yapabilen ticari olarak mevcut bir UWB radyo kullanarak her iki cephedeki yeniliklerden yararlanır. Radyo için, tekrarlayan bir darbe katarında eşdeğer zaman örnekleme kullanarak paket iletimi ve alımında nominal 15.6 ps zaman damgası hassasiyeti sağlayan Decawave'den DW1000 UWB yonga setini kullanıyoruz. Stroboskopik örnekleme kombinasyonu ve UWB'nin kısa darbe süreleri kullanması, bu telsizleri hassas zaman damgası ve aralık uygulamaları için ideal hale getirir. DW1000, öncelikle uçuş süresi (TOF) değişen uygulamalar için tasarlanmıştır ve görüş hattı verildiğinde santimetre düzeyinde mesafe düzeltmeleri sağlayabilir. Işık hızı yayılma gecikmelerini hesaba katmak için bu mesafe tahminlerini kullanıyoruz. İkinci olarak, Pulsar, 1 s'lik bir ortalama periyodu (τ) ile 2.5×10^{-10} 'luk kısa vadeli bir kararlılık (Allan Sapması) sağlayan bir Quantum SA.45s CSAC içerir. CSAC, programlanabilir düşük titreşimli faz kilitli döngü (programmable low-jitter phase-locked loop: PLL) kullanılarak doğrudan UWB radyosuna ve bir ARM işlemcisine bağlanır. CSAC'nin yüksek kararlılığı ve düşük kayması, DW1000'i yalnızca frekans kitleme performansı açısından iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda senkronizasyonu ve daha uzun aralıklar arasında geçiş sağlayarak çoklu atlama performansını artırır.

Sistemimizdeki ana zorluklardan biri, DW1000 zaman damgalarını hassas saat koşullandırmasına izin verecek şekilde kullanmaktır. DW1000'in dijital alt sistemi 38,4 MHz'de çalışır, bu da tüm G/Ç'lerin 26 ns'ye ayrıştırıldığı anlamına gelir. Bu çalışmanın önemli bir katkısı, senkronizasyon doğruluğunu bu G/Ç ayrıştırma seviyesinin altına itmek için basit bir donanım mekanizması sağlamamızdır. Zaman damgası için ortak bir olay olarak CSAC PPS sinyalini kullanırken radyo ve işlemci alt sistemlerini senkronize olarak saatlemek için bir PLL kullanıyoruz. PLL, frekans kitlemesi sağladığından, ancak CSAC'den gelen giriş saatine göre faz hizalanmadığından, radyo ve saat, 26 ns zaman ayrıştırmasına kadar bilinmeyen bir faz kaymasına sahiptir. PPS sinyali ile PLL'den gelen çıkışlar arasındaki hatayı ölçmek için bir faz ölçüm alt sistemi kullanarak hatayı iyileştirebiliyoruz. Ardından, 5 ns'nin altında doğruluk elde etmek için yazılımdaki bu faz hatasını telafi ederiz. Sistemimizin son çıkışı, Yazılım Tanımlı Telsizler (Software-Defined Radios: SDR) gibi iletişim ekipmanlarını senkronize etmek için bir standart olan faz kilitli 10 MHz çıkışla birlikte senkronize bir PPS sinyalidir. propagation-aware time transfer systems Yayılıma duyarlı zaman transfer sistemlerinde, cihaz konumu ve zamanlama doğruluğu sıkı bir şekilde bağlanmıştır. NTP ve PTP gibi protokollerde zaman bir ağacın kenarları(edge) boyunca dağıtılır. Önceki çalışmalar, tüm bağlantıların ve saatlerin eşit olarak ele alınmaması gerektiğini göstermiştir [4]. Kablosuz iletişimin yayın doğasının faydalarından biri, bir ağ içindeki birden çok düğümün, kablolu sistemlere kıyasla daha fazla sayıda bağlantı ile topoloji hakkında bilgi toplamak için birbirleriyle çift yönlü aralıklar gerçekleştirebilmesidir. Pulsars senkronizasyon protokolünün bir parçası olarak, sistemin ağı topolojisini yakalamak için düğümler arasındaki mesafe ölçümlerini topladığı bir grafik gerçekleştirme ve düşük titreşimli bağlantı seçim adımına sahibiz. Grafik gerçekleştirme ve bağlantı profili oluşturma, görüş hattı olmayan (NLOS) iletişimin neden olduğu titreşimi en aza indiren rotaların bulunmasına yardımcı olur. Bu

grafik aynı zamanda birçok kablosuz uygulama için kritik bir bileşen olan düğümlerin fiziksel konumunu da sağlar.

Özetle, bu makalenin katkıları şunlardır: (1) mevcut SDR sistemleriyle kolayca entegre edilebilen, iletişim sekmesi başına 5 ns'den daha iyi çözünürlükte kablosuz uçuş süresi yayılımı farkında saat senkronizasyonu gerçekleştirebilen yeni bir donanım platformu, (2) platform tarafından sağlanan zamanlama belirsizliğinin uçtan uca analizi ve değerlendirmesi ve (3) yayılmaya duyarlı bir saat senkronizasyon algoritmasının tasarımı.

II. RELATED WORK

Bu bölümde, saat senkronizasyonunda ilgili çalışmaları tartışacağız ve yayılma gecikme hatalarını ortadan kaldırmak için kullanılabilecek doğru aralık için mekanizmalara bakacağız. Ayrıca kablosuz MIMO topluluğundan ilgili çalışmaları tartışıyoruz

A. Clock Synchronization Approaches

Ortak bir duvar saati zaman kavramı oluşturmaya yönelik önemli çabalar var. Ağ Zaman Protokolü [2] (The Network Time Protocol: NTP), süreleri ayarlamak için gidiş-dönüş mesaj gecikme ortalamasını kullanır. Saat disiplini ve ağ gecikme tahmini gibi NTP'ye benzer birçok kavramı benimsiyoruz. Çeşitli mesaj aktarma yaklaşımları, kablosuz sistemlerde erişim, iletim ve alım süresini en aza indirmeye bakmıştır. Referans yayın senkronizasyonu [5] (RBS) şeması, yayılma gecikmeleri dışında tüm iletim gecikmelerini ortadan kaldırmak için birden fazla alıcı arasında değiş tokuş edilen zaman damgalarını kullanır. Bu yaklaşım, sıkı bir ikili saat senkronizasyonu elde etmek için kablosuz cihazlarla ilişkili zamanlama titremesi kaynaklarını ve çoklu iletimlerin ortalamalarını hedefler. Pulsar platformu, yayılma gecikmelerini ayarlaması dışında, işaret mesajlarını kullanarak benzer bir yaklaşım benimser. The flooding time synchronization protocol [6] and the time-sync protocol for sensor networks Taşma zaman senkronizasyon protokolü [6] ve sensör ağları için zaman senkronizasyon protokolü [7], bu benzer zamanlama dalgalanması kaynaklarını ortadan kaldırmak için donanım zaman damgasını kullanır. Mesajlar, sapmayı periyodik olarak telafi eden bir yayılan ağaç (spanning tree) oluşturarak ağ boyunca taşar. Yerel saat hızları, modülümüzü kullanarak da elde edilebilecek sapmayı azaltmaya yardımcı olmak için ayarlanır. Orijinal formlarında, yayılma gecikmesi, elde edilen doğrulukla karşılaştırıldığında önemli değildi. Her iki yaklaşım da Pulsar platformuna uygulanabilir ve ince taneli zaman damgaları nedeniyle performanslarını iyileştirebilir. Çoklu senkronizasyon yaklaşımları, küresel zaman yayınlarını almak için harici donanımı kullanır. NIST'den yayınlanan WWVB atom saati, 60 Khz zaman işaretini iletmek için Boulder, Colorado'da bulunan 50 kW'lık bir radyo kulesini kullanır. Bu, kulenin yayın aralığındaki dış mekan uygulamaları için idealdir, ancak radyo iletimi binaların çok içine girmez. Sinyal ayrıca, uzun iletim mesafeleri nedeniyle ofsetlerle birlikte yüksek düzeyde titreşimden muzdariptir. Küresel Konumlandırma Sistemi (GPS) [8], yerelleştirme ve zamanlama için uydu aktarımlarından elde edilen hassas saat senkronizasyonunu kullanır. Bu, konumu tahmin etmek ve alıcı saatlerini atomik saat odaklı bir altyapı ile senkronize etmek için radyo mesajlarının Varış Zamanı Farkı (TDOA) kullanılarak elde edilir. Ne yazık ki, GPS binalara nüfuz etmez ve kesin zamanı hesaplamak için en az üç uyduya ihtiyaç duyar (tek bir uydu, mesafeleri belirleyemediği için mikro saniyeler düzeyinde kaba zaman verir). GPS zaman alıcıları yaygın olarak NTP sunucularını disipline etmek için kaynaklar olarak kullanılmıştır ve zamanlama kararlılığını geliştirmek için sıklıkla sıcaklık kontrollü osilatörler kullanır. Bunlar, kablosuz sensör ağları için

yazılımlarda bile uygulanmıştır [9]. Önceki çabalar, IEEE 802.15.4 ağlarına özgü bir dizi protokol ve zaman senkronizasyonu göstermiştir. Yüksek çok yollu ortamlarda, kanal tutarlılığı ve zaman çözünürlüğü, kanalların 5 MHz bant genişliği ile teorik olarak 200 ns ile sınırlıdır [10]. DW1000 gibi UWB radyoları, 500 MHz veya 1 GHz kanalları kullanarak bu sorunu çözer. Glossy [11] gibi saat senkronizasyon şemaları, mikro saniye senkronizasyonundan daha iyi performans göstermek için sembol düzeyinde yapıcı girişime dayanır. Ters taşma [12], Glossy'ye benzer ve ek olarak yayılma gecikmelerini telafi eder. Bu planın bir yararı, ağdaki yayılan ağaçların bakımını gerektirmemesidir. Etkileyici olmakla birlikte, elde edilen performans, G/Ç ayırıklaştırmasından (sistemlerinde 42 ns veya 1 saat döngüsü) kaynaklanan sınırlamaları bir kez daha vurgulamaktadır. Sunulan sonuçlar, teorik zaman çözünürlüğü sınırı nedeniyle çok yollu bir ortamda iyimser görünüyor (düşük çok yollu alanlarda olası deneyler). Fiziksel katmandaki farklılıklar nedeniyle, bu şemalar UWB telsizlerine kolayca uygulanamaz. Sıkıca bağlanmış saat dağıtım sistemi ile birlikte daha büyük bir sinyal bant genişliği kullanmak, Pulsar'ın bu son teknoloji sistemleri 20'den fazla bir faktörle (5 ns'ye karşı ~ 100 ns) geliştirmesini sağlar. Fiziksel katmandaki farklılıklar nedeniyle, bu şema UWB telsizlerine kolayca uygulanamaz.

Yazarlar, yayılma sürelerini geri hesaplamak için bilinen işaret konumlarını (GPS kullanarak) kullanan bir yaklaşım sunar. Bu yaklaşım Pulsar platformunu kullanabilir ve gerekli zaman ölçekleri göz önüne alındığında, desteklenen düğüm sayısı açısından büyük olasılıkla önemli bir gelişme görecektir. Uçuş zamanı farkında zaman senkronizasyonu, yayılım zamanı tahmini için bizim önerdiğimiz şeye benzer bir yaklaşım benimser; dahili senkronizasyon için bir alt GHz CC1101 radyo kullanarak, ancak daha karmaşık bir algoritma ile. WSN topluluğundaki mevcut platformların çoğu gibi, 200-1500 µs aralığında çalışırlar. Ancak, benzer ilkelleri kullanır ve protokol gelecekte Pulsar platformuna uygulanabilir.

B. Software-Defined Radios and Collaborative MIMO

Kablosuz topluluktan sıkı saat senkronizasyonu için önerilen çok sayıda yaklaşım vardır. Kablosuz senkronizasyon için arka kanal olarak güç hattı iletişiminin (power-line communication: PLC) kullanılması önerildi. Sistem, 400 ns kadar yüksek bir ortalama senkronizasyon doğruluğu ile 225 ns'lik bir ortalama senkronizasyon doğruluğu elde edebilmektedir. Küçük alan saati dağıtımı için ideal olmakla birlikte, PLC, tekrarlayıcıların (repeaters) devrelerden geçmesini gerektirir ve ortadan kaldırılması zor olan gürültüye duyarlı olabilir. SourceSync, bir SDR kullanarak sıkı zaman senkronizasyonu yoluyla gönderici çeşitliliğinden yararlanabilen bir sistem sunar. Sistem, 20 ns'den daha iyi zaman senkronizasyonu elde edebilir, ancak tek bir çakışma alanı ile sınırlıdır ve birçok SDR tabanlı yaklaşım gibi, senkronizasyon yeteneklerini içerecek şekilde temel MAC protokolünün değiştirilmesini gerektirir. AirSync ve JMB, standart protokollere uyum sağlamayı zorlaştıran temel MAC'yi tekrar değiştiren SDR'lerle benzer yaklaşımlar kullanır. Buna karşılık, yaklaşımımız, yalnızca senkronizasyon sağlamak amacıyla bir ağ boyunca atlama başına 5 ns'de harici bir girdi sağlar. Bu, zaman senkronizasyonunu temeldeki kablosuz MAC'den ayırır. JMB'den elde edilen sonuçlar, C-MIMO'da zaman senkronizasyonunun önemini de vurgulamaktadır: vericiler arasındaki her 0.1 radyan (64 ns) faz hatası, alıcıdaki SNR'yi 2 dB azaltır, bu da buna bağlı olarak sistem verimini etkiler.

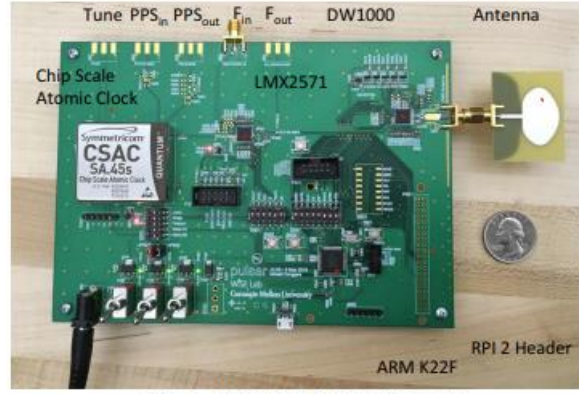


Fig. 1. Pulsar hardware photograph

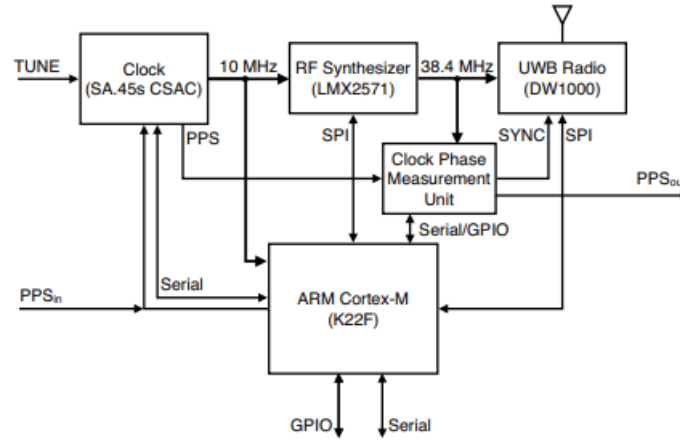


Fig. 2. Pulsar Block diagram with interconnects.

III. PLATFORM DESIGN

Bu bölümde, donanım tasarımıımızı tartışacağız ve ardından belirli senkronizasyon hatası kaynaklarımızı ele alacağız. Önerilen mimarimiz göz önüne alındığında, her bir hata kaynağının nasıl azaltılabileceğine bakıyoruz. Platformumuz, Upverter¹ ve GitHub²'de bulunan tüm donanım ve kodlarla açık kaynaklıdır.

A. Pulsar Hardware

Şekil 1'de gösterilen Pulsar platformu 18 cm x 12,5 cm boyutlarındadır. Pulsar kartının Şekil 2'deki blok şeması beş ana bileşeni göstermektedir: (1) CSAC, (2) bir frekans sentezleyici, (3) bir UWB radyo, (4) bir ARM işlemci ve (5) bir saat fazı ölçüm birimi. Pulsar kartının tamamı, çoğu radyo ve CSAC ısıtma elemanı tarafından tüketilen 3,3V'de 200 mA'lık bir tepe tüketir. Sistemimizin çıkışı, tüm düğüm ağı boyunca senkronize edilecek olan faz kilitli 10 MHz saat ile birlikte saniyede bir darbe (1PPS) sinyalidir.

The CSAC is a Microsemi SA.45s module that outputs a 10 Mhz signal with a short-term stability (Allan Deviation) of 2.5×10^{-10} over a one second averaging period with a long-term aging of less than 9×10^{-10} per month, and a maximum frequency change of 5×10^{-10} across a temperature range of -10 to 35 degrees Celsius. CSAC, faz ve frekans performansını sırasıyla 1 ns ve (pp) 10^{-12} başına 1 parça içinde geliştiren bir harici yüksek hassasiyetli PPS kaynağından (PPS_{in} senkronizasyonu) disipline edilme yeteneğine sahiptir. Deneylerimizde, saatleri tek bir GPS kaynağından önceden kalibre ediyoruz. CSAC, PPS_{in}, PPS_{out}, faz ayarı

için bir analog ayar girişi ve seri üzerinden dijital bir arayüz dahil olmak üzere çeşitli I/O'lara sahiptir. Seri arabirim veya analog ayar girişi aracılığıyla maksimum dört pp 10⁸ frekans yönlendirmesine kadar dijital olarak servo yapabilir. Servo PPS çıkışlarının hizalanması çok uzun zaman alacağından, bir başlatma işleminin (manuel PPSin senkronizasyonu) bir parçası olarak ana işlemcimizden bir GPIO pinini CSAC'nin PPS girişine besliyoruz. Dahili olarak, CSAC, buhar halinde ısıtılan rubidyum 87 içeren bir rezonans hücresi tarafından 1 Hz'de disipline edilen, fırın kontrollü bir kristal osilatör (OCXO) kullanır. Buhar, 6.834 GHz'de doğal olarak modüle edilen bir yarı iletken lazer diyotundan gelen ışıkla aydınlatılır. Lazer atomları salınımlı bir duruma getirdiğinde, daha az ışık emerler, bu da sistemin ışığın atomik kaynakla aynı frekansta modüle edilip edilmediğini belirlemesini sağlar. Işık yoğunluğuna bağlı olarak, bir iç kontrol döngüsü OCXO frekansını çalıştırır.

Rubidyum atomlarının uyarılmasını referans olarak kullanmak, uzun vadeli frekans kararlılığını sağlayan şeydir. CSAC'den gelen 10 MHz çıkış, Texas Instruments'ın LMX2561 düşük titreşimli frekans sentezleyicisine ve ana ARM işlemcisindeki bir donanım sayacına bağlanır. Frekans sentezleyici, 10 MHz sinyali UWB radyosunu ve diğer ilgili alt sistemleri çalıştırabilen 38,4 MHz sinyale dönüştürmek için kullanılır. LMX2561, çok düşük faz gürültüsü ile 10 MHz'den 1344 MHz'e kadar herhangi bir frekansı üretmek üzere programlanabilen bir kesirli PLL içerir. Ayarlanabilir bir saat kaynağına sahip olmayan sistemlerde (CSAC gibi), PLL, gelen bir saat sinyali ayarlamak için de kullanılabilir. Bir PLL'nin bir saat sistemine dahil edilmesi, diğer sinyallere (örneğin 1PPS ve 38.4 MHz) göre çıkış sinyali ile ilgili mutlak faz bilgisinin kaybına neden olur. Neyse ki, kararlı PLL'ler, kilit sırasında sabit tutulan bir faz kayması sunacak ve bu bilgiyi hatayı ölçmek ve telafi etmek için kullanabiliriz.

Başlangıçta, PLL ve CSAC, 120 MHz'de çalışan bir NXP Kinetis ARM K22F Cortex-M işlemci tarafından yapılandırılır. ARM işlemcisi, Pulsar'ın tüm alt bileşenlerini kontrol etmek için çeşitli bağlantılara ve ayrıca RPI2 uyumlu bir başlık kullanarak harici cihazlarla ara bağlantıya sahiptir. Ana işlemcide 512 KB Flash, 128 KB SRAM, bir FPU ve yerleşik DSP bulunur.

Daha önce bahsedildiği gibi, DW1000 UWB telsizi, mesajın giriş bölümünün bir parçası olan bir darbe akışının eşdeğer zaman örnekleme yoluyla 15.6 ps'lik bir çözünürlükle paket varış zamanını damgalama yeteneğine sahiptir. UWB, darbeler zaman açısından son derece dar ve dolayısıyla frekans açısından geniş yapılabildiğinden, çeşitli uygulamalar için mükemmel bir iletişim kaynağıdır. Radar literatüründen, menzil çözünürlüğünün bir zaman bant genişliği ürününden türetildiğini biliyoruz. DW1000, 64 GHz'de artan veya belirleyici olarak bir radyo iletimini tetikleyen dahili 40 bitlik bir sayacı sıfırlamak için kullanılabilen bir senkronizasyon hattına (synchronization line : SYNC) sahiptir. Bu SYNC girişi, radyo mesajları için sistem zaman tabanını sıfırlamak için kullanılabilir. Çoğu dijital radyo platformunda olduğu gibi, SYNC pimi yalnızca radyonun G/Ç alt sistemini çalıştıran 38,4 MHz saatin bir sonraki yükselen kenarında okunacaktır. Bu, SYNC hattını çalıştıran kaynak 38,4 MHz ile faz hizalı olmadığı sürece 26 ns'ye kadar hataya neden olur. Telsizin dijital sisteminin I/O ayırıştırma seviyesinin altında senkronizasyon doğrulukları elde etmek için, ham CSAC PPS sinyali SYNC hattına besliyoruz (ancak gerektiğinde sadece zaman tabanını sıfırlıyoruz) ve ardından bir saat fazı ölçüm birimi (a clock phase measurement unit: CPMU) kullanıyoruz. PPS girişi ile sonraki 38.4 MHz saat kenarı arasındaki faz hatasını belirlemek için. Bu faz hatasını bilmek, DW1000 zaman damgalarını birkaç nanosaniye içinde düzeltmemizi sağlar. Bu faz

hatası, başlangıçta yalnızca bir kez hesaplanmalıdır ve daha sonra yazılımda alınan zaman damgalarından statik bir sapma olarak kaldırılabilir. Mevcut donanım uygulamamızda, CPMU ölçümünü harici olarak gerçekleştiriyoruz ve faz hatasını seri üzerinden ana ARM işlemcisine geri besliyoruz. CPMU, Texas Instruments TDC7200 gibi bir FPGA veya zaman-dijital dönüştürücü IC'ler kullanılarak yerleşik olarak uygulanabilir.

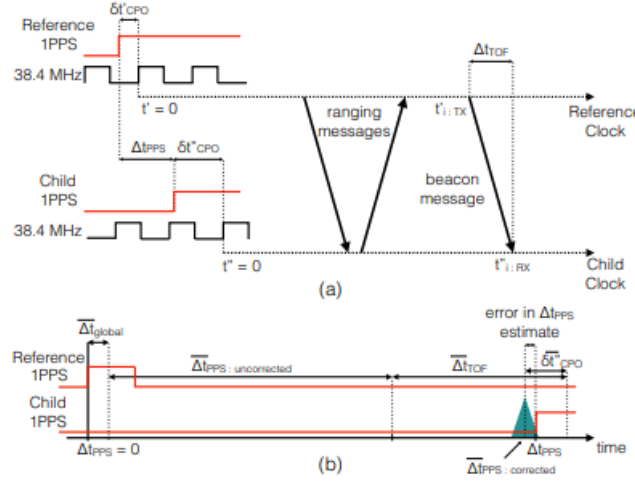


Fig. 3. Timing in the Pulsar platform for phase offset estimation

B. Sources of Error

Zamanlama sisteminde nanosaniye saat senkronizasyonunu zorlaştıran çeşitli hatalar birikir. Bu hataların bazıları tanımlanabilir, bazıları istatistiksel olarak filtrelenebilir, diğerleri ise tamamen gözlemlenemez ve sistem mimarisine bağlıdır. Bu çalışmanın kritik bir parçası, senkronizasyon sırasında karşılaşılan çeşitli zamanlama hataları kaynaklarını belirlemek ve azaltmaktır.

Frekans ofseti ve kararlılık hataları, tanımlanması ve düzeltilmesi en kolay olanlardır. Yalnızca alıcı sistemleri (Bölüm IV-D'de tanımladığımız gibi), bilinen zaman farklarına sahip sinyallere kilitlenerek frekans ofsetlerini kalibre etmek için kullanılabilir. Frekans kararlılığı, Bölüm III-B1'de daha sonra açıklanan Allan sapması kullanılarak modellenen temel bir hata kaynağıdır. Frekans ofseti ve kararlılık hataları, tanımlanması ve düzeltilmesi en kolay olanlardır. Yalnızca alıcı sistemleri (Bölüm IV-D'de tanımladığımız gibi), bilinen zaman farklarına sahip sinyallere kilitlenerek frekans ofsetlerini kalibre etmek için kullanılabilir. Frekans kararlılığı, Bölüm III-B1'de daha sonra açıklanan Allan sapması kullanılarak modellenen temel bir hata kaynağıdır. Tipik elektronik sistemlerde bulunan çoklu saat etki alanlarında ortak bir referans noktası oluşturmanın zorluğundan kaynaklanan faz hatalarının tahmin edilmesi ve düzeltilmesi daha karmaşıktır. Faz ayrıca sinyal yolundaki frekans tahminlerini etkilemeyen çeşitli yayılma gecikmelerine karşı oldukça hassastır. Şekil 3, sistemimizdeki çeşitli faz hata kaynaklarını açıklamaktadır. *The main quantity of interest is the time offset (Δt_{PPS}) between two 1PPS signal lines on different nodes.* Ana ilgi miktarı, farklı düğümlerdeki iki 1PPS sinyal hattı arasındaki zaman kaymasıdır (Δt_{PPS}). If the radio clocks on the nodes are to be started perfectly in synchronization with the 1PPS line ($\delta t_{CPO} = 0$ for both nodes) then timestamps for a message i provide an estimate of the 1PPS offset:

$$\Delta t_{PPS:uncorrected} = t'_{i:TX} - t'_{i:RX}$$

Bu tahmin, Bölüm IV-A'da daha sonra açıklandığı gibi, mesaj geçişi için hesaplanabilen ve telafi edilebilen uçuş süresinden (Δt_{TOF}) kaynaklanan yayılma gecikmelerini dikkate almaz.

Şekil 3'te gösterildiği gibi, saatli radyo iki nedenden dolayı 1PPS hattının başlangıcıyla aynı anda başlamadığından: (a) elektronik sinyallerin yükselmesi, radyonun CMOS mantığının onları algılayabilmesinden önce sonlu bir zaman alır ve (b) UWB radyosundaki dijital I/O, yalnızca 38,4 MHz I/O saatinin pozitif kenarlarını örnekliyor. Bu etkilerden kaynaklanan birleşik hatayı, her bir düğüm için δt_{CPO} ile temsil edilen saat fazı ofseti (CPO) olarak adlandırıyoruz. 10 MHz CSAC saat alanımız ile 38.4 MHz UWB radyo saat alanımız arasında köprü kurmak için kullanılan PLL, aralarındaki göreceli fazı 25'e 96 oranında kilitler, ancak aralarında daha önce sağlanan mutlak faz farkı hakkındaki bilgiyi kaybederiz. 10 MHz alanındaki 1PPS hattı.

t_i and t''_i are timestamps for message i on the reference and child nodes respectively. Assuming ideal timestamping on both nodes, Figure 3 (a) gives us the following

$$\Delta t_{PPS} = t'_{i:TX} - t''_{i:RX} + \Delta t_{TOF} + \delta t'_{CPO} - \delta t''_{CPO}$$

Senkronizasyon protokolümüzü, ara düğümlere(intermediate nodes) dağıtımını basitleştirmek için ağ genelinde yayılan bir ağaç(spanning tree) üzerinde çalışacak şekilde tasarlıyoruz. Ağacın üst katmanlarından hesaplanan 1PPS ofsetlerini δt CPO ile alt katmanlara aktarılabilen tek bir Δt_{global} değişkeninde birleştiriyoruz. Bu, son ofset tahmini ifadesini şu şekilde verir:

$$\begin{aligned} \Delta t_{PPS} &= \Delta \bar{t}_{PPS:uncorrected} + \Delta \bar{t}_{TOF} + \Delta \bar{t}_{global} - \delta \bar{t}_{CPO} + \epsilon_t \\ &= \Delta \bar{t}_{PPS:corrected} + \epsilon_t \end{aligned} \quad (1)$$

where ϵ_t is the error in estimation.

1) Allan Deviation:

Osilatör kararlılığının geleneksel karakterizasyonu, bir saat ve bir referans arasında bir dizi göreceli frekans tahmini kullanılarak tanımlanan Allan sapmasının bir grafiğidir. Allan sapması (σ_y) grafiğindeki her nokta, belirli bir örnekleme aralığı (τ) için göreceli(relative) saat frekansında (y) beklenen standart sapmayı gösterir.

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_i - \bar{y}_{i-1})^2 \rangle_i \quad (2)$$

Bir Allan sapma grafiği, frekans ve faz kararlılığına göre bir osilatörün sınırlarının anlaşılmasına yardımcı olur. Bu daha sonra optimal bir mesaj geçiş hızı *message passing rate* (τ_{update}) seçmek için kullanılabilir.

Allan varyansını, birbirine yakın (yaklaşık 1,5 m) yakınlıkta yerleştirilmiş iki düğüm kullanarak ölçüyoruz. Telsiz(radio), Bölüm V'de açıklandığı gibi zaman damgası performansını artıran varsayılan bant genişliği ile yapılandırılmıştır. GPS ile kalibre edilmiş bir Pulsar kartı, çeşitli alıcı düğümleri ile yalnızca iletim referans düğümü olarak kullanılır. Şekil 4'te, normal bir Kuvars kristali, bir sıcaklık dengelenmiş kristal osilatör (TCXO) ve başka bir CSAC tarafından saatlenen alıcı düğümleri karşılaştırıyoruz. Mesaj gönderme ve alma zaman damgaları 10 saatlik bir süre boyunca toplanır ve Bölüm IV-A'da açıklandığı gibi kesirli frekansları tahmin etmek için kullanılır. İyi saatler için alan sapması (üstel faz

gürültüsü ve Gauss frekans gürültüsü) kısa aralıklarla fazla değişmez. Mesajlar zaman içinde eşit aralıklı değilse, bu tahmin için kullanılabilir. Ölçümler eksiksiz Pulsar sistemi ile yapıldığından, RF sentezleyici, UWB radyo ve işlemci tarafından eklenen ek hataları da içerir.

İyi osilatörler için Allan sapma grafikleri, iki ayrı parça ile düzgündür: düşük aralıklarla negatif eğimli faz çizgisi ve daha yüksek aralıklarla pozitif eğimli frekans çizgisi. Faz gürültüsü, PLL'ler, zaman-ayırıştırma, kesintiler (yazılım zaman damgaları durumunda), zaman damgası algoritmaları vb. tarafından eklenir ve faz çizgisini yukarı kaydırır. Bu, CSAC saatli Pulsar'ın faz çizgisinin, diğer bileşenler tarafından eklenen faz gürültüsü ve referans CSAC nedeniyle veri sayfası değerinden (datasheet value) daha yüksek olduğunu gördüğümüz için gözlemlenebilir. Sıcaklık değişimi, hareket, frekans kilitleme hataları vb. faktörler tarafından frekans gürültüsü eklenebilir. Bu iki çizginin kesişme noktası, Allan Intercept adı verilen bir osilatör özelliğidir. **Bir saat senkronizasyon protokolünün etkin güncelleme süresi, en iyi performans senkronizasyonu için Allan kesmesinin aralık periyodundan daha az veya buna yakın olmalıdır.** Pulsar deneylerimiz için bu bir saniyeye ayarlanmıştır.

C. Pulsar Firmware

The firmware on the Pulsar platform is responsible for configuring the hardware peripherals, tracking peripheral failures as well as arbitrating the message passing and synchronization protocol. We provide a set of FreeRTOS v8.2.3 task routines and driver functions.

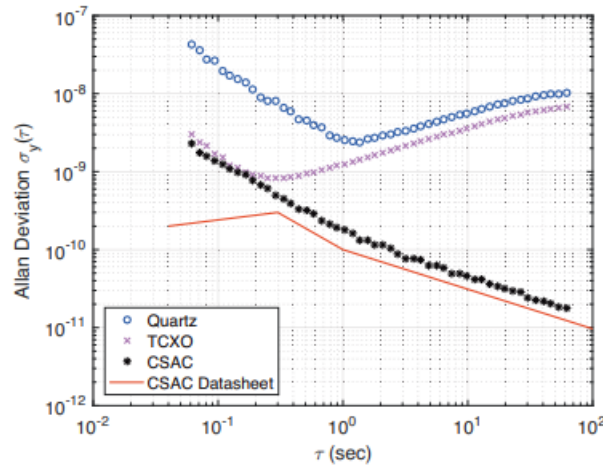


Fig. 4. Allan deviation between nodes given different clocks

FreeRTOS: FreeRTOS pek çok mikrokontrolöre taşınabilen gömülü cihazlar için tasarlanmış gerçek zamanlı işletim sistemidir. GPL lisansının değiştirilmiş bir şekli altında dağıtılmaktadır.

CSAC, RF Synthesizer ve UWB radyonun her birinin başlatılmasından bir dizi izleyici görevi sorumludur (A set of watcher tasks). Çevresel kilitleme, sıfırlama ve durdurma gibi olayları takip eder ve bu olaylarla ilgili bağımlı görevleri bildirir [They keep track of events like peripheral lock, reset and halting, and informing dependent tasks of these events.]. The radio monitor task is also responsible for synchronizing the radio clock with the CSAC PPS so that they share a synchronized time-base. The CSAC watcher task is additionally responsible for bootstrapping PPS alignment corrections in the current implementation of our protocol. Mesajlaşma görevi, protokolün gerektirdiği şekilde düğümler arasında mesaj geçişini başlatmadan önce gerekli tüm çevre birimlerinin (peripherals to lock)kilitlemesini bekler. A

disciplining task and some synchronization tasks are responsible gerekli tüm faz ve frekans düzeltmelerinin hesaplanmasından ve uygulanmasından sorumludur (CSAC izleyici görevine devredilen PPS bootstrap hariç). Faz ve frekans ofset tahminleri, daha yüksek seviyeli uygulamalara, onları dahili olarak düzeltmek için bir Seri arabirim (serial interface) aracılığıyla sağlanır. Son olarak, bir komut görevi, işlem modunu değiştirmek için kullanıcıdan Seri üzerinden girdileri kabul eder[Finally, a command task accepts inputs from the user over Serial to change mode of operations.].

IV. PROPAGATION-AWARE CLOCK SYNCHRONIZATION

Pulsar platformundaki DW1000 UWB telsizi, zamana duyarlı üç mesajlaşma işlevi sağlar: (a) mümkün olan en kısa sürede ilet ve zaman damgasını kaydet, (b) belirli bir gelecek zamanda ilet ve (c) mesaj alma ve zaman damgası[The DW1000 UWB radio on the Pulsar platform provides three time sensitive messaging functions: (a) transmit as soon as possible and record timestamp, (b) transmit at a deterministic future time and (c) receive and timestamp message.]. Şekil 5, saat senkronizasyonunda kullanılan çeşitli metrikleri tahmin etmek (ve dolayısıyla düzeltmelere izin vermek) için bu mesajlaşma ilkelerinin kombinasyonlarını açıklar. Bizim gösterimimizde, i mesajı bir referans düğüm tarafından gönderilen bir işaret mesajı iken, $R(i)$ onun çocuğu tarafından gönderilen cevaptır.

In our notation, a message i is a beacon message sent by a reference node while $R(i)$ is the response sent by its child

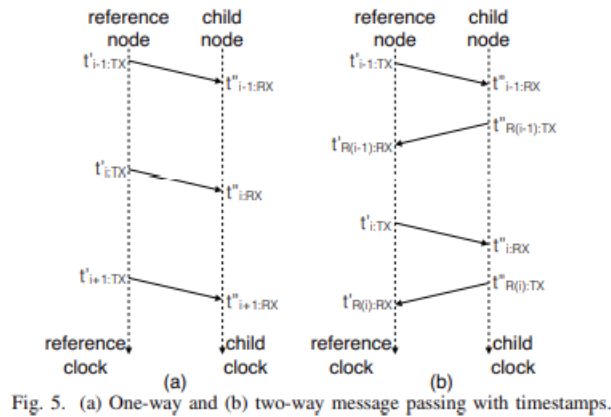


Fig. 5. (a) One-way and (b) two-way message passing with timestamps.

1) One-Way Messaging:

Şekil 5(a)'da açıklanan bir referans düğüm, bir alt düğüme mesajlar gönderir. Bu mesajlar önceden belirlenmiş iletim süreleri ile veya mümkün olan en kısa sürede gönderilebilir. RBS gibi yayılmadan bağımsız zaman senkronizasyonu protokolleri için tek yönlü mesajlaşma yeterlidir.

Multiple one-way message timestamps can compute fractional frequencies with respect to a reference node (y_i) which can then be used for frequency locking stationary devices.

$$y_i = \frac{f_i^{\text{child}}}{f_i^{\text{reference}}} = \frac{t_{i:RX}'' - t_{i-1:RX}''}{t_{i:TX}' - t_{i-1:TX}'} \quad (3)$$

If the radio clocks were started on a known 1PPS signal edge (using the time-base reset functionality of the radio described in Section III A), one-way messaging can also be used for propagation-agnostic estimation of the 1PPS line offset between a pair of communicating nodes.

$$\Delta t_{\text{PPS:uncorrected}}^i = (t'_{i:\text{TX}} - t''_{i:\text{RX}}) \bmod N \quad (4)$$

where N is the number of clock ticks between two 1PPS edges (nominally the clock frequency).

2) Two-Way Messaging:

Şekil 5(b)'de gösterildiği gibi iki yönlü mesajlaşma, mesajları iletmek ve almak için hem referans düğümleri hem de alt düğümleri gerektirir. Frekans kilitli düğümlerden gönderme ve alma zaman damgaları, durağan düğümler arası uçuş süresi *time of flight* (ve dolayısıyla menzil) tahmini için yeterlidir.

$$\Delta t_{\text{TOF}}^i = \frac{(t'_{\text{R(i):RX}} - t'_{i:\text{TX}}) - (t''_{\text{R(i):TX}} - t''_{i:\text{RX}})}{2} \quad (5)$$

İki yönlü mesajlaşmada hata analizi literatürde iyi çalışılmıştır. Daha sonra daha yüksek saat hatası anlarını tahmin etmeye ve telafi etmeye çalışan genelleştirilmiş bir N-yollu mesajlaşma şemasındaki düğümler arasında daha fazla sayıda mesaj alışverişi yapılabilir.

B. Timing Tree Construction

Önceki çalışmalar, belirli bağlantıların veya belirli saatlerin anormal derecede yüksek düzeyde varyans sergilediğini göstermiştir. Bölüm V'de daha sonra gösterildiği gibi, UWB telsizleri, NLOS konfigürasyonlarında artan ve genellikle Gauss olmayan hata sergiler. Bu nedenle, ağ içinde düşük seviyeli titreşime sahip bağlantıları seçmek çok önemlidir. Ağ kurulumumuzun bir parçası olarak, bağlantı grafiğini ve bağlantı varyansına ilişkin bir ilk tahmini yakalamak için her düğüm arasında ikili mesaj alışverişi yapan bir modumuz var. Graf verilerini, ağın grafik yapısını oluşturan Matlab'da Sensör Ağı Yerelleştirme Sorunları paketi için Seyrek Tam Yarı Belirli Programlama (SFSDP) gevşemesini kullanarak işliyoruz. Bu hem konum hem de düğüm geometrisi sağlar. Grafikteki her bağlantı, 100 mesajın üzerindeki varyansına göre ağırlıklandırılır. Kümülatif varyansı en aza indiren grafik boyunca yayılan bir ağaç seçmenin birçok yolu vardır. Bu makalenin odak noktası olmasa da, Bölüm V'de, PTP'de sıklıkla kullanılan minimum sekme sayısının nispeten zayıf senkronizasyona yol açtığı durumlar olduğunu pratikte gösteriyoruz. Çoğu kablolu bağlantı değerlendirme probleminin aksine, zamanlama varyansının bir dizi mesaj alışverişi üzerinden hesaplanmasının nispeten kolay olduğunu belirtmekte fayda var.

C. Protocol

Saat senkronizasyonu için, Bölüm IV-A'da açıklanan mesajlaşma şemalarını kullanan PTP'ye dayalı bir kavram kanıtı protokolü öneriyoruz. Algoritmamız aşağıdaki ön koşullara sahiptir:

1. Şekil 6(a)'da gösterildiği gibi çoklu referans-çocuk (reference-child) ilişkileri ile ağaç benzeri bir zaman dağıtım ağı oluşturulmuştur. İyi bir ağaç oluşturmanın önemi Bölüm IV-B'de açıklanmıştır.

2. Daha önce oluşturulan ağa dayalı olarak, Şekil 6(b)'de gösterildiği gibi düğümler arası iletişim için uygun bir TDMA programı, aşağıdakine benzer yaklaşımlar kullanılarak oluşturulmuştur. Hareket, sıcaklık değişimi vb. nedeniyle olası hataları azaltmak için bir dizi işaret mesajı ve yanıtları bir araya getirilir.
3. Algoritmanın güncelleme hızı (tupdate), saat parametreleri ve düğümler için Allan sapma eğrisi kullanılarak belirlenmiştir.

Kolaylık sağlamak için, her düğümün ilgili iletişim bağlantılarının, güncelleme hızlarının ve TDMA yuvalarının bir listesine sahip olduğunu ve bunların senkronizasyon işlemi sırasında değişmediğini varsayıyoruz. Her mesajın içeriği Şekil 6(c) ve Şekil 6(d)'de gösterilmektedir.

SONUÇ:

Bu makale, iç mekan cihazlarının kablosuz saat senkronizasyonu için bir saat senkronizasyon platformu olan Pulsar'ı sundu. Platform, UWB menzilli telsizleri, doğruluk açısından en son teknolojiyi geliştiren kararlı bir CSAC zamanlama kaynağıyla birleştirir. UWB telsizleri, düğümler arasındaki TOF aralıklarını tahmin etmek için kullanılır, böylece ışık gecikmelerinin hızı tahmin edilebilir ve senkronizasyon protokolünün bir parçası olarak hesaplanabilir. CSAC, 1.2 günde 1 μ s ikili sapma mertebesinde uzun vadeli kararlılık sağlar ve faz hizalı 1PPS ve 10 MHz çıkış sinyalleri sağlamak için doğrudan radyoyu ve bir PPS çıkış sistemini sağlar. Pulsar'ın 5 ns'den daha iyi ikili senkronizasyon sağladığını gösteriyoruz. Fiziksel bağlantı topolojisinin senkronizasyonda nasıl önemli bir rol oynayabileceğini vurgulayan bir senkronizasyon protokolünü de değerlendiriyoruz. Teknoloji geliştikçe, sistemlerin atomik saat kararlılığına ve hassas zaman damgası yeteneklerine sahip olmasının maliyet ve enerji açısından giderek daha uygun hale geleceğine inanıyoruz. Pulsar platformu, bu gelecekteki zamanlama sistemleriyle mümkün olacak çok çeşitli yeni nesil kablosuz uygulamaları keşfetmek için bir başlangıç aracı sağlar.

Time synchronization enhancements in wireless networks with ultra wide band communications

Juan J. Pérez-Solano, Santiago Felici-Castell *

, Antonio Soriano-Asensi, Jaume Segura-Garcia

Departament de Informàtica, ETSE, Universitat de València, Avd. de la Universidad S/N, 46100 Burjassot, (Valencia), Spain

Düşük maliyetli Ultra Geniş Bant (UWB) alıcı-vericilerin ortaya çıkması, bu iletişim teknolojilerine dayalı Kablosuz Sensör Ağlarının (WSN) uygulanmasını sağlamıştır. Bu ağlar, kendi işlem birimleri, bellekleri ve iletişimleri ile dağıtılmış özerk düşük maliyetli düğümlerden (mote olarak da bilinir) oluşur. Genellikle bu düğümlerin gücü sınırlıdır ve saatlerinin düşük performansı ve kalitesi nedeniyle, zaman senkronizasyonu milisaniye düzeyinde ve bazı özel senaryolarda mikrosaniyelere kadardır. Ticari UWB alıcı-vericilerinin bu düğümlere entegrasyonu, senkronizasyon doğruluğunu artırabilir. Özellikle, kullanıma hazır ticari ürünlere ve ticari donanıma dayalı WSN düğümlerine odaklanıyoruz. Bu yazıda, statik düğümlerle WSN üzerinde UWB teknolojisini kullanarak zaman senkronizasyonunda

yer alan farklı unsurları pratik ve deneysel bir bakış açısıyla adım adım analiz ediyoruz. Deneysel sonuçlarımızdan, paket değiş tokuşları sırasında yakalanan zaman damgalarıyla, farklı iletişim şemalarının ve basit istatistiksel yöntemlerin (WSN düğümlerinde çalıştırılmak üzere) uygulanmasını analiz ediyor ve tartışıyoruz. UWB alıcı-vericilerinde yakalanan zaman damgaları ve doğrusal regresyon kullanılarak elde edilen sonuçlar, iki düğüm arasında elde edilen en düşük zaman senkronizasyon hatasının 0.14 ns olduğunu göstermektedir. Aynı kurulumu kullanarak ve düğümlerin mikrodenetleyicilerinde dahili olarak yakalanan zaman damgalarıyla senkronizasyonu gerçekleştirerek, mikrodenetleyicilerin zamanlayıcılarının daha yüksek zaman periyodu ve zaman damgalarının alınmasını etkileyen yanlışlıklar nedeniyle hata 31 ns'ye yükselir. Bununla birlikte, mikrodenetleyicilerin saatlerinin senkronizasyonu, ağ düğümlelerinde ortak bir zaman referansının kurulmasına izin vererek, işbirlikçi hüzmeye oluşturma (collaborative beamforming) ve aralıklandırma (ranging) gibi sıkı senkronizasyon gereksinimleri olan uygulamaların uygulanmasını sağlar.

1. Introduction

Bu WSN'ler hala, her biri kendi işlem birimi (processing unit), belleği ve kablosuz iletişimle olan dağıtılmış ve özerk kablosuz düğümlere dayanmaktadır. IEEE 802.15.4'te önerilen fiziksel katmanı geliştirmek için farklı alternatifler arasında, Doğrudan Sıralı Ultra Geniş Bant (DS-UWB), özellikle statik düğümlü WSN için en alakalı olanıdır. Bu yazıda sunulan çalışmanın amacı, düşük maliyet ve düşük güç tüketimi özelliklerini göz önünde bulundurarak, kablosuz düğümler arasında zaman senkronizasyonunu iyileştirmek için DS-UWB teknolojisini kullanmaktır. DS-UWB, 500 MHz'den yüksek, yüksek bant genişliğine sahip iletişim ile kısa menzil için çok düşük sinyal gücü kullanan bir radyo teknolojisidir. UWB, tüm bant genişliğini kaplayan kısa darbelerin iletilmesine dayandığından, daha önce darbeleri radyo olarak biliniyordu. Bu kısa darbeler modüle edilebilir (konum/faz, süre, polarite ve genlik ile), bu nedenle çoğu sinyal yansıması orijinal darbeye örtüşmez ve daha sonra çok yollu sönümlenmeye karşı daha az duyarlıdır. UWB teknolojisinde kullanılan geniş bant genişliği, yoğun çok yollu ortamlarda kanal darbe yanıtının yüksek çözünürlüklü tahminine ve doğru uçuş süresi (TOF) ölçümlerine olanak tanır. Bu darbeler zaman açısından son derece dar (geniş frekans) olabileceğinden, bunlar çeşitli uygulamalar için ilginç özelliklerdir. Uzaklaştırma (ranging) yeteneğinin genellikle hassas senkronizasyon ve zaman ölçümüne dayandığına dikkat edin. Yerelleştirmede çok çeşitli UWB uygulamalarını motive eden senkronizasyon ve yerelleştirme işlevleri arasında bir sinerji vardır.

Decawave'den DWM1000 gibi, genel bir Mikro Kontrol Ünitesine (MCU) bağlanabilen, IEEE 802.15.4 UWB fiziksel katmanı ile uyumlu, belirtilen düşük maliyet ve düşük güç tüketimi gereksinimlerini karşılayan ticari UWB alıcı-vericileri bulabiliriz. Özellikle, bu UWB alıcı-verici, IEEE 802.15.4 UWB paket formatında bulunan Çerçeve Ayırıcının Başlangıcı (SFD) alanını kullanarak, SFD alanı algılandığı anda alıcı-verici saatinden zaman işaretlerini (zaman damgalarını) yakalar. bir paketin iletilmesi veya alınması. Zaman damgalarını elde etmek için SFD mekanizmasının kullanılması, Medya Erişim Kontrolü (MAC) katmanı tarafından sunulan birçok belirleyici olmayan gecikmeyi ortadan kaldırır. Bu belgenin ifadesinde paket ve çerçeve terimlerinin birbirinin yerine kullanılabildiğine dikkat edilmelidir.

WSN'de senkronizasyon protokollerinin uygulanması, normal olarak, zaman damgaları ile paketlerin değiş tokuşuna dayanır, bu da zaman saatleri arasındaki ofseti tahmin etmeye izin verir. Paketlerin iletimini ve alımını zaman damgalamak için SFD mekanizmasının

kullanılması, doğru saat sapmalarının tahminini kolaylaştırırsa da, bu tahminler, saat kaymaları nedeniyle bir süre sonra güncelliğini yitirir. WSN hareketlerinin düşük maliyetli saatleri, genellikle aralarında farklı saat çarpıklıkları üreten nominal frekanslarından sapmalar sergiler. Bu nedenle, ağ grupları, senkronizasyon doğruluğunu belirli sınırlar içinde tutmak için periyodik paket alışverişi yapmalıdır. Bu amaçla, anlık senkronizasyon (kısa sürede ve sadece bir süre için geçerli olan paket alışverişleri ile) ve enerji açısından daha verimli olan uzun süreli senkronizasyon olmak üzere iki farklı yaklaşım vardır. İkincisi, birincisini gerektirir. Böylece, önceki zaman damgalarına istatistiksel işleme teknikleri uygulanarak uzun vadeli senkronizasyon elde edilir, bu da doğruluğu artırır ve değiştirilen paket sayısını azaltır. Bu bağlamda uygulanan yaygın bir istatistiksel teknik, gelecekteki zaman farklarını tahmin etmek için önceki zaman damgalarının bir penceresini kullanan Doğrusal Regresyon'dur (LR).

Bu yazıda, UWB iletişimlerini kullanarak zaman senkronizasyonunda yer alan farklı unsurları pratik ve deneysel bir bakış açısıyla analiz ediyoruz. Düğümlerin kesin lokalizasyonu, tüm deney boyunca statik kaldıkları sürece senkronizasyon üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Böylece, hem UWB alıcı-vericisinde hem de MCU'da kayıtlı paket değişimlerini ve zaman damgalarını kullanarak, zaman senkronizasyonunu bozan hata kaynaklarını gösteriyor ve karakterize ediyoruz. Son olarak, LR'ye dayalı basit bir istatistiksel işlemle, bu çalışmada önerilen çözümle MCU'da bir nanosaniye zaman ölçeği çözünürlüğünün ve hatta UWB alıcı-vericisinde nanosaniyenin altında bir çözünürlüğün elde edilebileceği kanıtlanmıştır.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi yapılandırılmıştır. Bölüm 2'de ilgili çalışma tanıtılmaktadır. Bölüm 3'te, senkronizasyonu bozan etkilerin yanı sıra zaman senkronizasyonunda kullanılan çeşitli yaklaşımlar ve istatistiksel teknikler detaylandırılmıştır. Bölüm 4'te önerilen senkronizasyon stratejisi ve bir UWB alıcı-vericisinin ve genel bir MCU'nun bir kablosuz düğüme nasıl yerleştirileceği açıklanmaktadır. Bölüm 5'te, bu senkronizasyon stratejisi, performansı ilgili çalışma ile karşılaştırılarak değerlendirilmektedir. Son olarak, Bölüm 6'da, makalenin ana sonuçları ve sonuçları özetlenmiştir.

2. Related work

WSN'deki senkronizasyon birçok araştırmayı kendine çekmiştir. Anlık senkronizasyona dayalı, Sensör Ağları için Zamanlama Senkronizasyonu Protokolü (TPSN), MAC katmanında dört zaman damgası yakalamak için iki paketin değiştirildiği ikili bir senkronizasyon algoritmasıdır. Bu yaklaşım aynı zamanda gönderen-alıcı şeması olarak da bilinir. Algoritma, bu zaman damgalarını kullanarak iki hareket arasındaki farkı tahmin eder. Mika parçacıkları kullanılarak senkronizasyonda elde edilen ortalama hata 16.9 μ s'dir. Referans Yayın Senkronizasyonu (RBS), bir yayın paketinin iletimi ile birden çok mote senkronizasyonunu başlatan alternatif bir yöntemi gösterir. Daha sonra tüm moteler, görel sapmalarını tahmin etmek için kendi zaman damgalarını değiş tokuş etmek zorundadır. Bu işlem, her senkronizasyon gerektiğinde çalıştırılır. Mika parçacıkları ile RBS'nin ortalama doğruluğu 11 μ s'dir. Bu durumda, bu yaklaşım alıcı-alıcı şeması olarak bilinir.

Bununla birlikte, motların saatlerindeki kaymalar nedeniyle, bir anda tahmin edilen ofset kısa sürede güncelliğini yitirir. Bu nedenle, uzun vadeli bir zaman senkronizasyonu elde etmek için saatlerin çarpıklığını tahmin etmek gerekir. Flooding Zaman Senkronizasyonu Protokolü (FTSP), her 30 saniyede bir periyodik olarak değiştirilen zaman damgaları üzerinden LR kullanarak, yayın paketleriyle MAC katmanında zaman damgası kullanan ağ çapında bir senkronizasyon protokolüdür. Mica2 motlu (7,4 MHz dahili saatli) tek sekmeli bir ağda,

ortalama doğruluk $1,48 \mu\text{s}$ 'dir ve 60 motlu (ve 6 atlamalı) $3 \mu\text{s}$ 'lik bir çok sekmeli ağda. [9]'da Hız Uyarlamalı Zaman Senkronizasyonunun (RATS) kullanılması, LR kullanılarak yapılan hatanın farklı zaman pencereleriyle (birkaç dakika aralığında) en aza indirilebileceği gösterilmiştir. LR için optimum zaman penceresi, birkaç noktanın model doğruluğunu kısıtlarken, çok fazla noktanın ofset modelinin artık doğrusal olmamasına neden olabileceği bir değiş tokuştur. RATS kullanarak, iki Mica2 mote, 8 dakikalık bir optimal zaman penceresi ile $1,6 \mu\text{s}$ 'lik bir senkronizasyon hatası elde edebilir. Yazarların LR'yi gerçekleştirmek için optimum pencere boyutunu aramak için iki algoritma tanımladığı ve iki TelosB mote arasında 1 dakikalık bir Senkronizasyon Protokolü (SP) ile $8,95 \mu\text{s}$ 'lik bir ortalama doğruluk elde ettiği RATS'ın geliştirilmiş bir sürümü şurada bulunabilir: 4 atlama mesafesinde maksimum 8 dakikalık SP ile $12,42 \mu\text{s}$.

UWB, IEEE 802.15.4 alıcı-vericilerine uygulanan yeni bir teknoloji olduğundan, birkaç ilginç donanım prototipi de bulabiliriz. Fiziksel katmana odaklanarak, ticari olarak mevcut bileşenlerden inşa edilmiş ve yazılım tanımlı UWB alıcı-vericilerine (sembol korelasyon çözünürlüğünü kullanan) dayalı bir zamanlama senkronizasyon şemasına dayanan deneysel bir devre tasarımı sunulmaktadır, burada yazarlar 5 ns'den daha iyi bir zamanlama doğruluğu elde ederler. 4 düğümlü ağ.

İyi Sinyal Gürültü Oranı (SNR) koşulları altında, ağları iç mekan deneylerinde nanosaniyenin altında bir doğruluk elde edebilir. [18]'de veri iletimi için bir IEEE 802.15.4 alıcı-vericisini zaman senkronizasyonuna özgü bir UWB alıcı-vericisi ile birleştiren bir hibrit kablosuz düğüm sunulmaktadır. [19]'da, DWM1000 UWB alıcı-vericisine dayalı bir kablosuz düğüm ve karşılıklı kalibrasyon ile iki yönlü saat senkronizasyonu kullanan Wicsync adlı bir senkronizasyon protokolü gösterilmektedir. Yazarlar, saat ofsetlerini ayarlamak için bir Orantılı, İntegral, Türev (PID) sistemi kullanarak yerel saat fazı ayarı ile UWB senkronizasyonuna özgü donanımı uyguladılar. Elde ettikleri sonuçlar, Wicsync'in 75 m aralığında maksimum 3.4 ns zaman hatası ve 0.141 ns ortalama zaman hatası ile anlık saat senkronizasyonu doğruluğunu destekleyebileceğini gösteriyor. [20]'de, sensörler arasında zaman senkronizasyonu gerektirmeyen ve etiketlerin maliyetini ve karmaşıklığını azaltmak için tek yönlü bir iletişim şeması kullanan özel bir UWB alıcısına dayanan düşük maliyetli gerçek zamanlı bir yer belirleme sistemi açıklanmaktadır. Bu, her bir düğümde doğrudan 2 ns'lik UWB sinyal darbelerinin 7.25 GHz'lik bir taşıyıcı frekansı ile işlenmesiyle yapılır. [21]'de, gerçek zamanlı uzay-zaman bilgisinin paylaşılmasının gerekli olduğu drone'lar gibi çok etmenli ortamlar için bir kablosuz yayın görelî yerleştirme ve saat senkronizasyon sistemi sunulmaktadır. Bu amaçla, Kalman filtreleri kullanılarak ikili sözde saat parametrelerini izlemek için zaman bilgisi düğümler arasında dağıtılır. UWB teknolojisi, DWM1000 alıcı-verici aracılığıyla yerleştirme için kullanılır. Sonuçlarından, değişen doğruluk, yaklaşık 0.172 ns'lik bir saat senkronizasyon doğruluğuna karşılık gelir. Bu durumda, bu zaman senkronizasyon hatasının her ölçüm ile dolaylı ve anlık olarak verildiğine dikkat edilmelidir.

Varış Zaman Farkına (TDoA) dayalı UWB tabanlı yerleştirme sistemleri, altyapıyı oluşturan çapalar arasında sıkı senkronizasyon gerektirir. [22]'de yazarlar, biri Sıcaklık Dengelemeli Kristal Osilatör (TXCO) ile donatılmış DWM1000 alıcı-verici ile donatılmış iki referans düğümü kullanan yeni bir kablosuz senkronizasyon yöntemi önermektedir. Anlık zaman senkronizasyonu ve dengeleyici saat çarpıklığı efektlerini kullanarak, zamanın %90'ında 1,2 ns'den daha düşük hatalara ulaşırlar. [23]'te, iletim ve saat çarpıklıkları sırasında oluşan

gürültü girişimini ortadan kaldırmak için bir Kalman filtresi kullanarak TDOA konumlandırmasını geliştirmek için geliştirilmiş bir ana-bağımlı zaman senkronizasyon algoritması önerilmiştir. Yazarlar simülasyon sonuçlarını bir TPSN protokolü kullanarak gösterirler.

Ek olarak, UWB'nin içsel özelliklerinden yararlanmaya çalışan birkaç protokol, teorik bir bakış açısıyla önerilmiştir. [24]'te, komşu düğümler arasındaki bağlantı yayılma gecikmelerini ve kanal özelliklerini öğrenen ağ çapında bir senkronizasyon algoritması önerilmiştir. Bu algoritma, bir Zamanlama Sanal Ağları tanımlayan farklı katmanlarla kümeleme kullanır. Yaklaşımları, herhangi iki düğüm arasında kesin zamanlama ve UWB darbe yayınına dayalı hızlı yeniden zamanlama elde etmek için gidiş-dönüş TOF'u ölçmek için UWB teknolojisini kullanır. Yazarlar, UWB ağlarında varış zamanı tespitinin olası doğruluğu göz önüne alındığında, binlerce düğümlü ağlarda nanosaniye doğruluk zamanlamasının mümkün olduğu sonucuna varmışlardır. [25]'te, ikinci dereceden bir saat modeli varsayarak, saat ofseti, çarpıklık ve kaymanın yanı sıra yayılma gecikmesini tahmin etmek için iki yönlü bir zaman transfer protokolü ve algoritması önerilmiştir. Yazarlar, lineer saat modeline dayalı bir zaman tahmincisinin sınırlı senkronizasyon doğruluğu ile kısa zaman periyotları için çalışabileceği, önerdikleri ikinci dereceden saat modelinin ise yüksek senkronizasyon doğruluğu ile hem kısa hem de uzun zaman aralığı tahminine uyarlanabileceği sonucuna varmışlardır.

Son olarak, [26]'da IEEE 802.11 standartları üzerinden saat senkronizasyonu için bir anketten bahsetmeye değer. Özellikle, IEEE 802.11 standartları kullanılarak analiz edilen farklı çözümler arasında elde edilen en yüksek çözünürlük ve doğruluk μs mertebesinde. Bununla birlikte, [27,28]'de gösterildiği gibi fiziksel katmanda bir zaman damgası kullanarak nanosaniye altı doğruluk ve kesinlik elde edebilen IEEE olmayan 802.11 yaklaşımlarının da bulunduğu dikkat edilmelidir.

Özetle, bu çalışmalardan UWB'nin gelecek vaat eden bir teknoloji olduğu ve WSN'deki faydalarından yararlanmak için daha fazla araştırmaya yer olduğu sonucuna varılabilir. Bir yandan, birkaç prototipi olan yeni donanım tasarımları gördük ve diğer yandan, geliştirilmiş geçici senkronizasyon protokolleri için birkaç simüle edilmiş teklif gördük. Ancak, WSN dağıtımları için pratik bir bakış açısından, bu çalışmaların çoğu, aşırı derecede teorik oldukları veya düşük maliyet ve düşük güç tüketimi gereksinimlerini karşılamadıkları için o kadar kullanışlı değildir. Yine de, bu çalışmalardan, DWM1000 UWB alıcı-vericisine [8] dayalı [15,16] gibi iki olağanüstü katkıyı vurguluyoruz. Bununla birlikte, bu makalelerde, yaklaşımları, kullanıma hazır ürünleri kullanarak zaman senkronizasyonunu sağlamaya ve geliştirmeye değil, bunları ek bileşenlerle ayarlamaya odaklanmaktadır. Bu nedenle, bu yazıda, bu ticari alıcı-vericiye odaklanıyoruz ve genel bir MCU'ya sahip basit bir prototip kablolu düğümdeki performansını değerlendiriyoruz. Ayrıca, zaman doğruluğunu iyileştirmek için basit istatistiksel yöntemler kullanmanın yanı sıra farklı iletişim şemalarını ve senkronizasyon protokollerini analiz edip tartışıyoruz.

3. Analysis of time synchronization in WSN

WSN içindeki kablolu düğümlerdeki zaman senkronizasyonu, birkaç alt sisteme bağlıdır ve farklı süreçlere dayanır. Saatin etkisi ve iletişim alt sistemlerinin yanı sıra zaman damgası teknikleri sonraki alt bölümlerde tartışılacaktır.

3.1. Clock subsystem

Daha önce bahsedildiği gibi, kablosuz düğümler zaman damgalarıyla paketleri değiş tokuş ederek senkronizasyonu izler. Bu zaman damgaları, diğer düğümlerden bağımsız olarak, kendi saatleri kullanılarak artırılan her bir düğümdeki dahili sayaçların yerel okumalarına dayanır. Bu saatler, hassasiyetlerini etkileyen sapmalardan veya dalgalanmalardan muzdariptir ve düğümler arasında rastgele bir şekilde saat çarpıklıkları üretir. Bu sürüklenmeler farklı çevresel koşullardan (sıcaklık, nem, voltaj, yaşlanma vb.) kaynaklanmaktadır [29,30]. Düşük maliyetli bir kuvars kristali için tipik kayma değerleri 1 ppm ila 100 ppm aralığındadır [31].

İlk yaklaşım olarak, iki düğümün yerel zamanı arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu varsayılır. Saatlerin değişim oranı olan bir ofset (α) ve bir skew eğri(β) ile modellenenbilir:

$$y(t) = \beta \cdot x(t) + \alpha$$

burada $y(t)$ ve $x(t)$ iki düğümün yerel saatleridir ve t zaman referansıdır.

Çevresel koşullar kademeli olarak değiştiğinden, β genellikle tek boyutlu bir Additive White Gaussian Noise (AWGN) Random Walks (RW) olarak modellenir [14,32]. A düğümündeki saatin B düğümündeki saate göre (β^B_A) $t_0 + t$ zamanındaki çarpıklığı şu şekilde verilir:

$$\beta^B_A(t_0 + t) = \beta^B_A(t_0) + \int_{t_0}^t \eta(u) du \quad (2)$$

where $\eta(u) \sim N(0, \sigma_{RW}^2)$, being σ_{RW} the characteristic standard deviation of the RW. For these low cost clocks, it is assumed a σ_{RW} in the order of 10^{-8} and 10^{-9} [30,33].

Bu düşük maliyetli saatler için, 10^8 ve 10^9 mertebesinde bir σ_{RW} varsayılır.

3.2. Communication subsystem

Dahili sayaçlardan (veya zaman damgalarından) gelen bu yerel okumalar daha sonra düğümler arasında gönderen çerçeveler ile değiştirilir. Ancak, bu çerçeveler alıcı düğümün yanı sıra gönderici düğüm, TOF (veya yayılma gecikmesi) tarafından eklenen ek rastgele gecikmelere maruz kalır [14]. IEEE 802.15.4 standardına göre, deterministik olmayan gecikmeleri azaltmak için alıcı-verici, daha önce açıklandığı gibi SFD alanının iletimi ve alımı ile senkronize olarak zaman damgalarını bir çerçeveye yazar. Buna rağmen, dahili saat ofsetleri, anten uyarımı, dahili çerçeve yönetimi, sinyal çok yollu vb. gibi çeşitli sorunlardan dolayı hala küçük rastgele gecikmeler (veya senkronizasyon hataları) vardır. Bu rastgelelik AWGN olarak modellenmiştir ve denklemine eklendi. (1) bir ölçüm hatası olarak (n):

$$y(t) = \beta \cdot x(t) + \alpha + n \quad (3)$$

where $n \sim N(0, \sigma_C^2)$, being σ_C the standard deviation of the sum of all these accumulated errors due to the communication subsystem.

3.3. Time stamping techniques and packet exchanges for delay and offset estimation

Birkaç kablosuz düğümü paket değiş tokuşu yoluyla senkronize etmek için farklı yaklaşımlar vardır, bunlardan bazıları Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu paketlerin iletimi ve alımı nedeniyle, tüm düğümler arasında senkronizasyonu sürdürmenin aynı zamanda üzerindeki yükü

artırdığına dikkat edilmelidir. kaynakları ve ardından IEEE 802.15.4 standartlarının düşük enerji tüketimi hedefiyle çelişir.

En basit yaklaşım “tek yönlüdür” (Şekil 1(a)). Düğümlerden biri (bu durumda A) master olarak davranır ve zaman damgalarıyla paketleri periyodik olarak yayımlar. Slaveler (bu durumda B düğümü), master ile senkronize etmek için bu zaman damgalarını kullanır. Bu tek yönlü model, RBS [13] tarafından kullanılmaktadır.

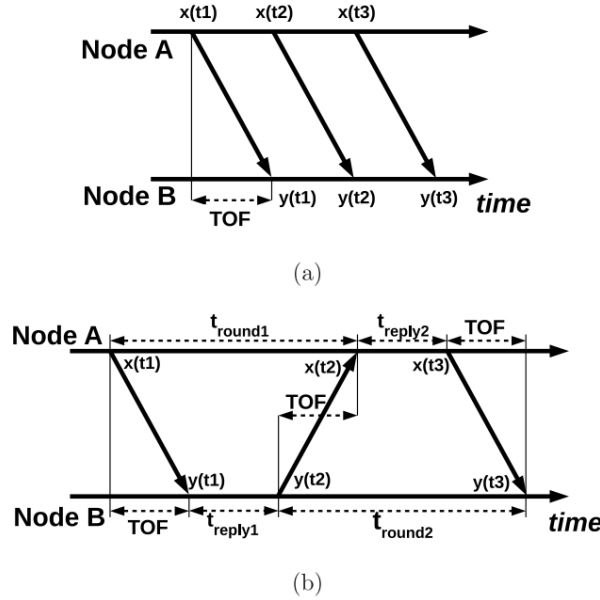


Fig. 1. Packet exchanges for synchronization between two nodes with detail of the timestamps: (a) One way, (b) Three way (or Double-Sided two way).

Bu durumda, köleler yerel zamanlarını ($y(t1)$, $y(t2)$, .. $y(ti)$) master tarafından sağlanan saatlere ($x(t1)$, $x(t2)$, ... , x ayarlayabilirler. (ti)), değiştirilen paketin i sayısıdır. Birkaç zaman damgasıyla, Denklem'deki β . (1) aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\beta = \frac{y(t_i) - y(t_{i-1})}{x(t_i) - x(t_{i-1})} \quad (4)$$

Ve ofset (α) ilk değişimden sonra ($t = 0$ 'da) hesaplanabilir. Ancak, bu tahmin yalnızca master ve slave arasındaki iletişim gecikmelerinin sabit olduğu varsayıldığında geçerlidir. Bu yaklaşım, “iki yönlü” [12] ve “üç yönlü” (Şekil 1(b)) yaklaşımlarda çözülen gecikmeyi tahmin etmeye izin vermez. Bu “üç yol” yaklaşımı, Çift Taraflı iki yol olarak da bilinir. UWB sinyalinin TOF'unu tahmin etmek amacıyla farklı isimlerle farklı uygulamalar vardır [34]. Denklem (5)'te gösterilen formül [35]'de önerilmiştir. Özellikle, bu formül Bölüm 5.2'de anten gecikmelerinin kalibrasyonu amacıyla kullanılacaktır ve UWB alıcı-verici üreticisi tarafından önerilen formüldür [36].

$$TOF = \frac{t_{round1} \cdot t_{round2} - t_{reply1} \cdot t_{reply2}}{t_{round1} + t_{round2} + t_{reply1} + t_{reply2}} \quad (5)$$

where the variables in Eq. (5) refer to the timings in Fig. 1(b).

3.4. Using Least Squares Linear Regression to improve time synchronization

Önceki alt bölümlerde detaylandırıldığı gibi, zaman senkronizasyonundaki doğruluk, lineer saat modelinde AGWN olarak β (rastgele yürüyüşler) ve ayrıca α (rastgele gecikmeler) olarak kabul edilen çeşitli etkilere bağlıdır. Ayrık gözlemlerdeki zaman damgalarını bildiğimiz için i , Eq. (3) şu şekilde yeniden yazılabilir:

$$y_i = \beta \cdot x_i + \alpha + n_i \quad (6)$$

burada $y_i = y(ti)$ ve $x_i = x(ti)$ sırasıyla verici ve alıcıdaki i . zaman damgası gözlemleridir, n_i ise gürültünün katkısıdır.

denklem (6), belirli sayıda önceki gözlem (veya pencere boyutu) üzerinden bir LR vasıtasıyla sırasıyla β ve α tahminleri olan $\hat{\beta}$ ve $\hat{\alpha}$ 'yi hesaplamak için kullanılabilir. En Küçük Kareler (LS) yönteminin yakalanan zaman damgalarının dağılımları için herhangi bir varsayım gerektirmediğini belirtmekte fayda var.

Ardından, $\hat{\beta}$ ve $\hat{\alpha}$ ile sonraki zaman damgası şu şekilde tahmin edilebilir: $y_{i+1} = \hat{\beta} \cdot x_{i+1} + \hat{\alpha}$.

Mutlak tahmin hatası $|e_{i+1}| = |y_{i+1} - \hat{y}_{i+1}|$ tahmini ve ölçülen (y_{i+1}) zaman damgaları arasındaki fark tarafından verilir. Hem y_{i+1} hem de \hat{y}_{i+1} , t_{i+1} zaman anında alıcıda gözlenebilir. Bu tahmin hatalarının ortalama değeri veya Ortalama Mutlak Tahmin Hatası (MAPE), zaman senkronizasyon hatasını kolayca vurgulamak için tahminin kalitesinin bir ölçüsü olarak kabul edilmiştir.

Zaman damgası tahmininin doğruluğu, büyük ölçüde LR'ye ve kullanılan pencere boyutuna bağlıdır. İki farklı ve bağımsız temel mekanizma bu regresyonları etkilediğinden, sırasıyla Bölüm 3.1 ve 3.2'de tanımlanan σ_{RW} ve σ_C değerlerine dayalı olarak hem saat çarpıklığı (β) hem de n veya gürültü nedeniyle farklı davranışlar takdir edilir. Bir yandan, σ_C , σ_{RW} 'den büyük olduğunda, daha büyük pencere boyutları tercih edilir. Öte yandan, σ_{RW} , σ_C 'den büyükse, daha kısa pencere boyutları tercih edilir. Bu senaryoda, zaman tahmini için hatayı en aza indirecek bir optimum pencere boyutu vardır [37].

4. UWB based time synchronization proposal

Aşağıdaki bölümlerde, kullanıma hazır ticari bileşenleri ve ticari donanımları kullanarak nanosaniye ölçeğinde bir doğrulukla bir WSN düğümleri içinde ortak bir zaman referansı oluşturmanın fizibilitesini değerlendirerek, zamanlama doğruluğu üzerinde hangi faktörlerin en yüksek etkiye sahip olduğunu analiz ediyoruz. . UWB alıcı-vericileri, Decawave'in DWM1000'i gibi, pikosaniye zaman ölçeğinde zaman doğrulukları elde edebilen mükemmel zaman senkronizasyon yetenekleri göstermiştir [16]. Bu yazıda değerlendirilen öneri, zamanlama yeteneklerini geliştirmek için WSN'deki her düğümün MCU'suna düşük maliyetli bir UWB alıcı-verici eklemektir. MCU ve UWB arasındaki bağlantı ve bunların açıklaması da ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Düğümelerde uygulanan senkronizasyon algoritması FTSP'ye dayanıyordu. UWB alıcı-vericinin tasarlandığı farklı bir kapsam için, zaman senkronizasyonunda DWM1000 alıcı-vericiyi kullanan UWB teknolojisinin performansını basit bir şekilde vurgulamak istediğimizden, bu yazıda daha karmaşık protokoller kullanmaktan kaçınıyoruz. Bu nedenle,

gelişmiş ve karmaşık senkronizasyon protokollerini düşünmek yerine alıcı-vericinin kendisinin karakterizasyonuna odaklanıyoruz.

Şekil 2'de gösterildiği gibi, ana düğüm iletim zaman damgasını (t_{txUWB}) içeren her SP bir mesaj yayımlar. Her düğüm, UWB alıcı-vericisindeki (t_{rxUWB}) mesajların alımına zaman damgası vurur ve SFD'nin etkinleştirilmesi de MCU (t_{rxMCU}) tarafından zaman damgasına sahiptir. Alınan son zaman damgalarını göz önünde bulundurarak, her düğüm LS saat modelini günceller ve yerel zaman damgalarını t_{rxMCU} , tüm ağ için referans saati olarak kabul edilen master'ın t_{txUWB} 'sine çevirir. Master'ın aynı radyo aralığında bulunan aynı anda birden fazla alıcının (slave düğümler), süreçte herhangi bir etki olmaksızın bu paketi kullanarak saatlerini senkronize edebileceğine dikkat edin.

Bu nedenle, bu çalışmanın temel amacı, küresel referans t_{txUWB} ve her bir düğümdeki t_{rxMCU} arasındaki ilişkide hangi öğelerin en güçlü etkiye sahip olduğunu analiz etmektir. Bu ilişki, MCU'nun dahili saatini içerir, çünkü bir düğümde kayıtlı tüm olayların zamanını damgalamak için kullanılır. Ancak, UWB alıcı-verici saatinin master ve MCU arasındaki senkronizasyon hatasına katkısını değerlendirmek için t_{rxUWB} da dikkate alındı.

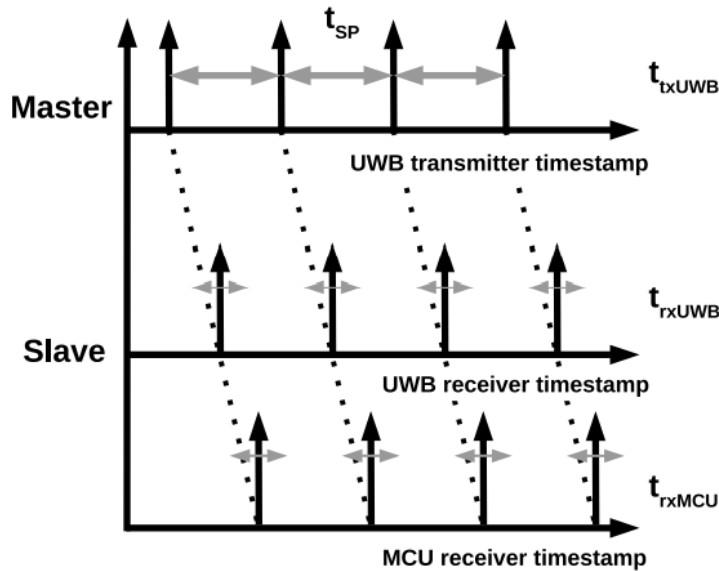


Fig. 2. Time line of the beacons sent from UWB transceiver of the master and the timestamps registered at the UWB transceivers and the MCU of each slave. In this figure, t_{SP} is the synchronization period and t_{txUWB} , t_{rxUWB} and t_{rxMCU} are the timestamps captured at the UWB transceivers of the master and the slave, and at the MCU of the slave, respectively.

4.1. Embedding the DWM1000 UWB transceiver with a generic MCU

Daha önce tartıştığımız gibi düşük maliyetli gereksinimleri karşılamak için, Şekil 3'te gösterildiği gibi genel bir MCU'ya bağlanabilen Decawave DWM1000 UWB alıcı-vericisine [8] odaklanıyoruz. Şekil 3(a) kablolu bir versiyonu göstermektedir. bu prototipin ve Şekil 3(b) elektronik şemasını göstermektedir. Deneylerde kullanılan MCU, Arduino MKRZero'dur [38]. 32 KB RAM ve 256 KB Flash ile 48 MHz'de çalışan ATSAMD21G18 Cortex-M0 32 bit düşük güçlü ARM'ye dayanmaktadır. Bu MCU'yu güç tüketimi, maliyeti ve dahili zamanlayıcılarla ilişkili donanım yakalama modülüyle hassas zaman damgası oluşturma yeteneği nedeniyle seçtik. Decawave'in DWM1000 yongalarını/modüllerini kullanmak için

temel işlevler sunan arduino-DWM1000 kitaplığını kullandık [39]. Bu kütüphaneye uyumlu tüm MCU'lar arasında, Arduino MKRZero, 48 MHz gibi nispeten yüksek bir frekansta çalışandır ve bu frekansı 96 MHz'e kadar ikiye katlamak için dahili PLL'leri kullanılarak ayarlanabilir.

Decawave DWM1000 UWB alıcı-verici, 6,8 Mbps'ye kadar yüksek veri hızlarını destekleyen, IEEE 802.15.4-2011 ile uyumlu, düşük güçlü ve düşük maliyetli tek bir entegre devredir. Veri sayfasına [8] göre, bu alıcı-verici etiketleri birkaç cm hassasiyetle bulmak için kullanılabilir. Nominal 15.6 ps zaman damgası hassasiyetine ulaşan dahili 64 GHz saat ile artan 40 bitlik bir sayaca sahiptir. Bu sayaç, hem bir çerçevenin SFD alanının iletiminde hem de gelen bir çerçevenin SFD alanının algılanmasında çerçeve zaman damgası için kullanılır. Bu SFD mekanizmasını kullanarak, gönderen alıcı-verici, zaman işaretini mümkün olduğu kadar geç alabilir ve alıcı alıcı-verici, zaman işaretini mümkün olan en kısa sürede alabilir. Ek olarak, DWM1000, MCU'ya SFD alanının geldiğini belirtmek için kullanılabilen, yalnızca paket alımında etkinleştirilen bir SFD çıkış pini (SFDled olarak adlandırılır) sağlar.

MCU ve DWM1000 UWB'nin ara bağlantısına sahip şema, Şekil 3(b)'de gösterilmektedir. Seri Çevre Birimi Arayüzü (SPI), UWB alıcı-vericisini MCU'dan kontrol etmek ve veri aktarımı için kullanılır. Hem alıcı-vericinin hem de MCU'nun bağımsız saatlere dayalı kendi yerel saatlerine sahip olduğuna dikkat edin. Bir paketin alınmasını MCU'nun saati ile zaman damgalamak için, UWB alıcı-vericisinin SFDled pini MCU'nun bir giriş pinine bağlandı. MCU'nun dahili bir zamanlayıcısının değerini donanım yakalama modülüyle yakalayarak SFDled pininin etkinleştirilmesine zaman damgası eklemek için bir program kesintisi yapılandırıldı.

5. Performance analysis

Önerilen senkronizasyon stratejisini değerlendirmek için kullanılan test ortamı, bir iç mekan senaryosunda bir verici (master) ve birkaç alıcı (slave) temel alır. Tüm bu düğümler, Şekil 3'te gösterilenle aynı tasarıma sahiptir. Senkronizasyonla ilgili tüm yönleri analiz etmek için bu bölümde çeşitli deneyler yapılmıştır. İlk olarak, SFD'nin aktivasyonundaki zaman değişimi Bölüm 5.1'de ölçülür. Haberleşme alt sistemi ve TOF tarafından getirilen gecikmeler Bölüm 5.2'de değerlendirilmektedir. Son olarak, UWB alıcı-vericilerinin ve MCU'nun senkronizasyon hatalarına katkısı Bölüm 5.3 ve 5.4'te analiz edilmiştir.

5.1. Characterization of the SFDled pin of the DWM1000 transceiver

MCU'lar arasındaki senkronizasyonun doğruluğunu etkileyen faktörlerden biri, SFD zaman damgası ve SFDled pinin aktivasyonudur. DWM1000'in veri sayfasında belirtilmediği için deneysel karakterizasyonu gereklidir. Bu alt bölümde, master'dan bir metre uzakta, birbirine (yan yana) yerleştirilmiş iki UWB alıcı-vericisinde SFDled pinin aktivasyonundaki zaman değişimlerinin değerlendirmesini sunuyoruz. Master ile her iki alıcı-verici slave arasındaki mesafe eşit olduğundan, her ikisinin de aynı anda beacon alması beklenir. Bu nedenle ölçülen zaman farkları, DWM1000'in devresinde ortaya çıkan dahili rastgele gecikmelerden kaynaklanmaktadır.

Bu deneyde ölçülmesi beklenen farklılıklar, ölçümler için ölçülen saatin periyodu ile karşılaştırılabilir olduğundan, ilk olarak Keysight Technologies [40] tarafından bir DSO1022 A Osiloskop ile SFDled pinin aktivasyonunun dalga biçimini yakaladık. Şekil 4, osiloskop ile kaydedilen her iki bağımlı alıcı-vericinin SFDled sinyallerinin dalga biçimlerini

göstermektedir. Bu SFD mekanizmasının davranışını karakterize etmek için örnekler olarak tanıtıldılar. Şekil 4'te gösterilen dalga biçimleri, her iki aktivasyonun da aynı anda gerçekleştiği (Şekil 4(a)) ve aktivasyonlar arasında zaman gecikmesi olan (Şekil 4(b)) ölçümleri temsil etmektedir.

Bu rastgele zaman farklarını daha geniş bir zaman periyodu boyunca karakterize etmek ve SFDled pinin aktivasyonundaki zaman varyasyonunun istatistiksel bir tahminini elde etmek için, iki UWB bağımlı alıcı-vericisinin SFDled pinlerinin bağlandığı ek bir deney yapıldı. aynı MCU'da. Master, 1 buçuk saat boyunca her 200 ms'de bir işaret gönderecek şekilde yapılandırılmıştır. UWB bağımlı alıcı-vericileri, alımlarında SFDled pinini etkinleştirdi ve aynı MCU'da bulunan iki farklı zamanlayıcıda yakalanan zaman damgalarının farkı, SFDled pininin aktivasyonundaki varyasyonu ölçmek için kullanıldı. Şekil 5, ölçülen zaman farkları ile histogramı göstermektedir. Şekil 5'teki ölçümler, çoğu zaman farkının bir saat tiki içinde olduğunu gösteren saat tiklerinde gösterilmiştir. MCU'nun donanım yakalama modülünün sınırlamaları nedeniyle zaman damgalarının kaybolmasını önlemek için sayaçlar 78.67 MHz saat frekansında çalışacak şekilde yapılandırılmıştır. Böylece, her saat döngüsü (saat tik) 12.7 ns'ye karşılık gelir. Bu saat frekansının yalnızca zamanlayıcıya ve yakalama modülüne uygulandığına dikkat edin, ancak program yürütme saati de dahil olmak üzere MCU modüllerinin geri kalanı için saat 48 MHz'e eşit olmaya devam etti, çünkü bu, MCU tarafından kabul edilen maksimum frekanstır. MCU. Tablo 1'de, sırasıyla 2.3 ns ve 22.4 ns ile sonuçlanan aktivasyon zaman farkının ve standart sapmasının ortalaması gösterilmektedir.

Table 1

Time difference for the *SFDled* pin activation at two UWB transceivers (side-by-side) when receiving the same beacon, one meter away from the master.

	MCU (clock ticks)	Time (ns)
Avg. time difference	0.18	2.3
Std. time difference	1.76	22.4

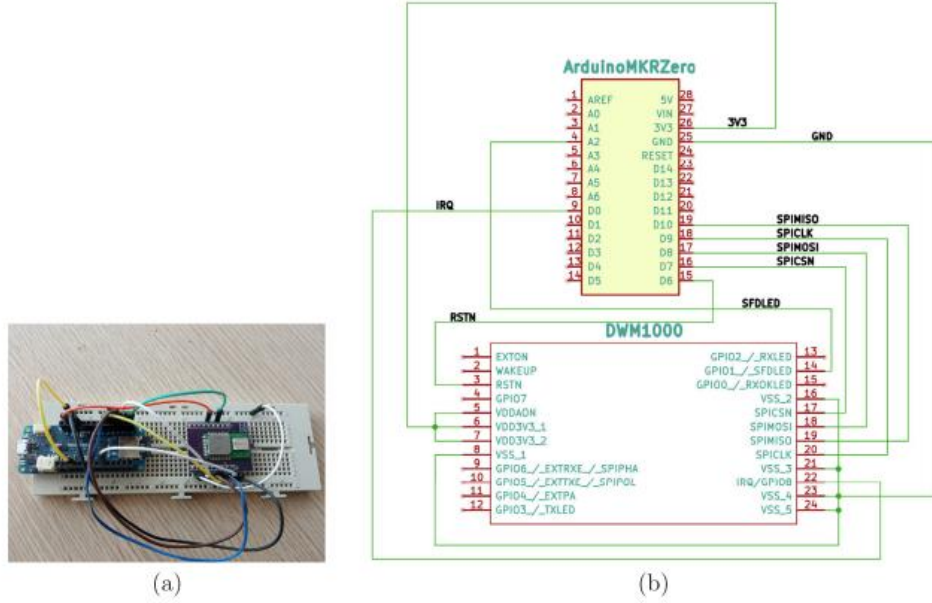


Fig. 3. Detail of the DWM1000 UWB transceiver connected to a MCU Arduino MKRZero: (a) wired prototype of DWM1000 UWB Transceiver and MCU and (b) its scheme.

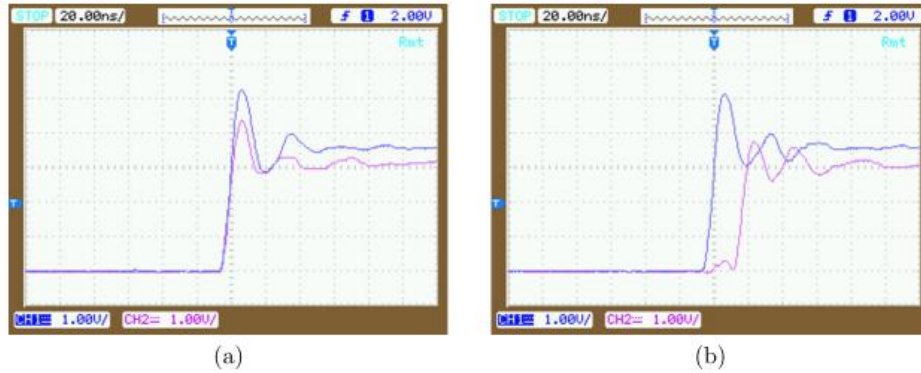


Fig. 4. Screenshots captured using an oscilloscope of the activation waveforms of the *SFDled* pins of two UWB transceivers on the reception of a beacon. Figures show the voltage of the *SFDled* pins with a time and voltage scale of 20 ns and 1 V per division respectively. (a) Example of a simultaneous activation of both *SFDled* pins. (b) Example of a measurement in which the *SFDled* pins are not activated simultaneously.

5.2. Analysis of the Time of Flight between UWB transceivers

Kablosuz düğümler arasındaki senkronizasyon doğruluğunu etkileyen diğer bir etki, TOF'tan, yani paketin bir düğümden diğerine seyahat etmesi için gereken zamandan ve ayrıca iletim ve alım antenlerinin neden olduğu sabit bir gecikmeden oluşan gecikmedir. Bölüm 3.3'te açıklandığı gibi, gecikme, UWB alıcı-vericileri tarafından değiştirilen zaman damgaları dikkate alınarak tahmin edilebilir. UWB alıcı-vericilerinin saat kaymalarının ve kaymalarının etkisini en aza indirmek için, alternatif çift taraflı iki yönlü [35] olarak da bilinen Üç Yönlü (asimetrik formül) Denklem 2'de gösterilmiştir. (5) bu deneydeki gecikmenin tahmini için dikkate alınmıştır. TOF'un daha iyi karakterizasyonu ve kalibrasyonu için iki farklı senaryo düşünülmüştür. Bir yandan çoklu yol nedeniyle istenmeyen yansımaları önlemek için ölçümleri yankısız bir odada yaptık. Öte yandan, sonuçları genellemek için aynı testleri dışarıda tekrarladık.

Yankısız oda içinde gerçekleştirilen ilk deneyde, master ve slave 1 m'lik adımlarla 1 m'den 5 m'ye kadar çeşitli mesafelere yerleştirildi. Her pozisyonda, master ve slave, 30 dakika boyunca her 200 ms'de bir zaman damgalarını değiştirecek şekilde yapılandırıldı. Test sırasında sıcaklık 23-24 °C arasında değişmiştir. Her mesafedeki gecikme ölçümlerinin

ortalama ve standart sapması Tablo 2'de sunulmaktadır. Tablo 2'deki sonuçların doğrusal bir regresyonu, her mesafede TOF'un tahminine izin verecektir. 2.505 ns'lik kesişme, iletim ve alım antenleri tarafından getirilen sabit gecikmeyi temsil ederken, 3.387 ns/m'lik eğim, TOF'un mesafeyle birlikte yükselişinin bir tahminidir. Eğimin tersi $2.95 \cdot 10^8$ m/s'dir, havadaki ışık hızına yakındır (299792458 m/s). Tahmini ve gerçek ışık hızı arasındaki farklılıklar, bu ölçümler sırasında düğümlerin konumlandırılmasındaki küçük yanlışlıklara bağlanabilir.

Aynı deney, TOF'u 5 ila 45 m arasında ölçerek Mühendislik Okulumuzun tesislerinde bir dış mekan senaryosunda tekrarlandı. Her mesafede ölçülen ortalama TOF ve standart sapma Tablo 3'te gösterilmiştir. 35 m'den daha büyük mesafeler düşünüldüğünde standart sapmanın 0.1 ns civarında olduğu gözlemlenmiştir. Bunun başlıca nedeni, özellikle paketlerin %70'inin kaybolduğu 45 m'de paket kayıplarının hızlı artmasıdır. İletim ve alıcı antenlerin neden olduğu gecikmeyi belirlemek için aynı doğrusal uyum gerçekleştirilmiştir. Ancak, daha yüksek mesafelerde paket kayıplarının artması nedeniyle sadece 35 m'ye kadar olan ölçümler dikkate alındı. Doğrusal uyum, yankısız oda içinde elde edilen sonuçlarla iyi uyum içinde olan 3.375 ns/m'lik bir eğim ve 2.603 ns'lik bir kesişme ile sonuçlandı.

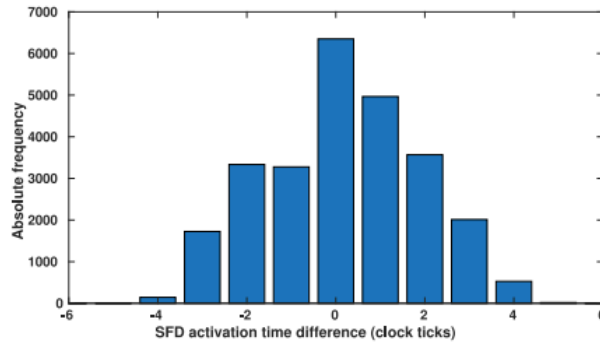


Fig. 5. Histogram of the time difference (in clock ticks of the MCU at 78.67 MHz) for the activation of the SFDled pins at two different UWB transceivers when receiving the same beacon.

Table 2

Time delay (in ns) between two UWB transceivers inside an anechoic chamber at 1, 2, 3, 4 and 5 m.

Distance [m]	Avg. [ns]	Std. [ns]
1	5.70	0.10
2	9.41	0.07
3	12.83	0.09
4	16.10	0.06
5	19.29	0.07

Table 3

Time delay (in ns) and Packet Loss Ratio (PLR) between two UWB transceivers in an outdoor setting at 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 and 45 m.

Distance [m]	Avg. [ns]	Std. [ns]	PLR
5	19.10	0.09	0
10	36.77	0.12	0
15	52.71	0.08	0
20	71.04	0.09	0
25	86.18	0.17	0.0018
30	105.31	0.10	0.0075
35	119.65	0.15	0.0128
40	139.58	0.38	0.0387
45	153.12	0.99	0.7009

5.3. Clock synchronization between UWB transceivers

Bölüm 4'te bahsedildiği gibi, bu çalışmanın ana amacı, her bir düğümün MCU'su ile zaman referansı olarak kullanılan master saat, sırasıyla Şekil 2'de t_{rxMCU} ve t_{txUBW} arasında bir zaman ilişkisi kurmaktır. Bununla birlikte, UWB alıcı-vericilerinin WSN'deki düğümlerin senkronizasyonu üzerindeki etkisini belirlemek için iki UWB alıcı-verici arasındaki zaman senkronizasyon doğruluğunun analizi de bu çalışmada ilgi çekicidir.

Bu deneyler, 1 m arayla yerleştirilmiş ana ve bağımlı iki düğümle yapıldı. Tüm alıcı-vericiler, tüm deney boyunca aktif ve alım modunda kaldı, böylece tüm düğümler her zaman iletişim kurabildi. Master, her SP'ye t_{txUBW} zaman damgasıyla bir işaret gönderirken, t_{rxUBW} ve t_{rxMCU} , bağımlı düğümdeki alımına kaydedildi. t_{rxUBW} 'den t_{txUBW} tahmin etmek için kullanılan saat modeli, en son zaman damgaları dikkate alınarak bir LS uyumu aracılığıyla bağımlı düğümde güncellendi. Her ölçüm 5 saat sürmüştü ve tüm deney boyunca sıcaklık 26 °C ile 28 °C arasında değişmiştir. LS modelinin hesaplanması MCU'da kolayca uygulanabilir. Ancak, sonuçların tekrarlanabilirliğini ve analizlerini kolaylaştırmak adına, LS modelinin çevrim dışı değerlendirmesi için üç zaman damgasının tümünün saklanması tercih edildi.

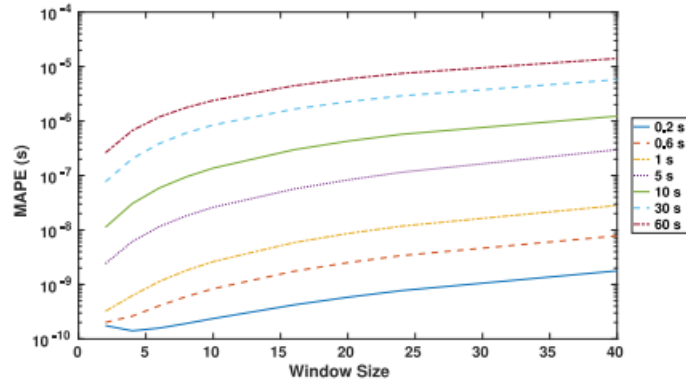


Fig. 6. Variation of MAPE between two UWB transceivers with the number of previous timestamps considered in the LS model, for several SP between 200 ms and 60 s.

Table 4

Comparison of the MAPE values measured for each SP interval when considering the timestamps at the UWB transceiver and the timestamps at the MCU.

SP	200 ms	600 ms	1 s	5 s	10 s	30 s	60 s
UWB	0.14 ns	0.19 ns	0.32 ns	2.6 ns	11 ns	76 ns	261 ns
MCU	31 ns	33 ns	36 ns	45 ns	66 ns	177 ns	452 ns

İki UWB alıcı-vericisi arasındaki zamanlama doğruluğu, Bölüm 3.4'te bahsedildiği gibi, tüm deney boyunca ortalaması alınan t_{txUBW} 'nin tahmini ve gerçek değerleri arasındaki fark olan MAPE açısından değerlendirilir. MAPE, master'ın SP tarafından kontrol edilen senkronizasyon işaretlerini ne sıklıkta yayınladığına ve ayrıca LS'de dikkate alınan zaman damgalarının sayısına, yani pencere boyutuna bağlıdır.

Şekil 6'da, iki UWB alıcı-vericisinin senkronizasyonu düşünüldüğünde, MAPE'nin SP'den ve pencere boyutundan nasıl etkilendiği gösterilmektedir. Asgari SP, master tarafından gönderilen çok fazla paketlerden kaçınmak ve doğru bir zaman senkronizasyonu elde etmek için yeterince kısa olmak üzere bir takas olarak 200 ms'ye ayarlandı. Beklendiği gibi, SP ne kadar büyük olursa, o kadar yüksek MAPE değerleri elde edildi. 40 kadar büyük pencere

boyutları kullanılmasına rağmen, Şekil 6'da gözlemlenen minimum MAPE, son iki zaman damgası göz önüne alındığında ölçülmüştür. 2'den büyük bir pencere boyutu yalnızca 200 ms'lik bir SP kullanıldığında haklıydı. Bölüm 3.4'deki tartışmaya göre, bu, yalnızca 1 s'den küçük SP aralıkları kullanıldığında gürültünün hataya önemli bir katkısı olduğunu gösterir. 1 s'den büyük SP aralıkları için, MAPE değerleri pencere boyutuyla birlikte arttı. Bu nedenle, Bölüm 3.4'te tartışıldığı gibi, senkronizasyon hatalarında RW rastgele gürültüye üstün gelir. 1 ns'den küçük MAPE değerleri, Tablo 4'te gösterildiği gibi, optimum pencere boyutu göz önüne alındığında 1 s'den daha kısa SP aralıkları dikkate alındığında ölçülmüştür.

Bu sonuçlara dayanarak, SP'yi etkileyecek müdahaleler veya çarpışmalar içeren bir senaryoyu ek bir rastgele gecikme olarak düşünebiliriz. Ancak, bu sorunlardan kaynaklanan bu rastgele dalgalanmaların SP'den çok daha düşük bir zaman ölçeğinde olduğuna ve ihmal edilebilir olduğuna dikkat edin. Yine de, bu sonuçlara göre MAPE'yi biraz yükseltecek olan Şekil 6'da daha yüksek SP'ye sahip bir grafiği düşünürsek, bu etki görülebilir.

5.4. Clock synchronization between the MCU of a node and the global time reference

Son olarak, belirli bir düğümün MCU'sunda kaydedilen zaman damgalarından küresel zaman referansının tahminindeki hata analiz edilir. Küresel zaman referansının $t_{tx}UWB$ ölçümleri ve tahmini Bölüm 5.3'te açıklanmıştır, ancak bu durumda $t_{rx}UWB$ yerine MCU'daki ($t_{rx}MCU$) zaman damgaları dikkate alınır. Bölüm 5.1'de olduğu gibi, zamanlayıcı değerlerini artırmak için kullanılan dahili saat 78.67 MHz frekansında yapılandırılmıştır.

Şekil 7'de gösterilen MCU'daki zaman damgaları göz önüne alındığında MAPE'nin SP ve pencere boyutu ile değişimi, dikkate alındığında daha büyük hataların elde edilmesi dışında, UWB alıcı-vericileri arasında gözlemlenene benzerdir (Şekil 6). MCU zaman damgaları. Tablo 4'te, UWB alıcı-vericisindeki zaman damgaları ve MCU'daki zaman damgaları dikkate alındığında ölçülen MAPE değerleri karşılaştırılır. MCU zaman damgalarıyla ölçülen MAPE değerleri, UWB alıcı-vericileri arasındaki değerlerden önemli ölçüde daha büyüktür. Bu, hataya en büyük katkının, MCU ile yerleşik UWB alıcı-verici arasındaki her düğümde yerel olarak gerçekleştiğini gösterir. Tablo 4'te ayrıca, UWB alıcı-vericisindeki zaman damgaları göz önüne alındığında, MAPE değerlerinin SP aralığı ile azaldığı takdir edilmektedir. Bununla birlikte, MCU'daki zaman damgaları göz önüne alındığında, 1 sn'den küçük SP aralıkları için MAPE'de çok az gelişme gözlenir. Bunun nedeni, Bölüm 5.1'de gösterildiği gibi, 22 ns'lik bir standart sapmaya sahip olan UWB alıcı-vericisinin SFD led pininin aktivasyonundaki değişkenliktir.

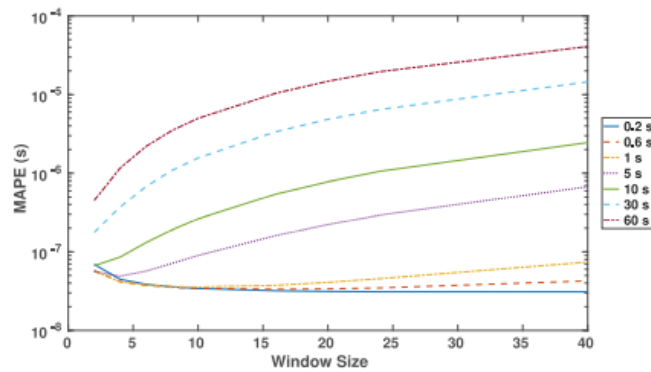


Fig. 7. Variation of MAPE between the node's MCU and the global time reference with the number of previous timestamps considered in the LS model, for several SP between 200 ms and 60 s.

5.5. Comparison of the proposed system with related work

Katkımızı vurgulamak için, Tablo 5, basit, uygulanabilir ve düşük maliyetli bir yaklaşım kullanarak, tanımlanan kriterlerle aynı kriterleri izleyen referansları dikkate alarak teklifimizin ilgili çalışma ile karşılaştırmasını göstermektedir. Bu referansları seçmek için kullanılan kriterler, kablosuz ağlarda gerçek deneyler ve kurulumlarla zaman senkronizasyonuna odaklanan, benzer gereksinimleri karşılayan, düşük maliyetli ve gelişmiş aramalarda ana önemli bilimsel veritabanları (IEEE, ACM ve Elsevier) aracılığıyla kapsamlı bir ankete dayanmaktadır. Düşük güç tüketimi. Bu karşılaştırmada düğüm sayısı (motlar) ve mesafeler sorun olabileceğinden, daha sonra Tablo 5'te yer alan farklı referanslar için bu ayrıntıyı ekleyeceğiz. Zigbee tabanlı veya WIFI gibi kablosuz teknolojilere dayalı referanslarda (2. satırdan 2. satıra kadar). 7), düğümler arasındaki mesafe belirtilmemiş ve bu düğümlerin sayısı sadece iki veya üçtür. Buna karşılık, UWB alıcı-vericilerini entegre eden referanslar, 3 ila 7 m arasındaki bu mesafeleri içerir. Özellikle, [15]'te, test yatağı 3 m ayrılmış 5 düğümden oluşmaktadır. [22]'de en büyük mesafe olarak 3,87 m ile 6x6 m²'lik bir odada 6 düğüm kullanılır. Son olarak BLAS'ta [21] 2.5x4 m²'lik bir odada 3+1, dış mekanda ise 5x7 m²'lik bir alanda 4+2 düğüm kullanılır.

Daha sonra, görebileceğimiz gibi, bu, MCU'da kullanıma hazır bileşenleri ve UWB alıcı-vericilerinde alt nanosaniyeyi kullanarak uzun vadeli nanosaniye doğrulukta zaman senkronizasyonu sağlayan ilk çalışmadır.

6. Conclusions

Bu yazıda, nanosaniye zaman ölçeği mertebesinde bir senkronizasyon doğruluğu elde etmek için bir UWB alıcı-vericisinin geleneksel bir WSN'ye entegrasyonu önerilmiştir. Ayrıca, bu çalışmada sunulan sonuçlar, WSN düğümlerinin düşük maliyetli özelliğini koruyarak, kullanıma hazır ticari cihazlar ve ticari donanım kullanılarak böyle bir zamanlama doğruluğunun elde edilebileceğini kanıtlamıştır. Burada önerilen çözüm, DWM1000 UWB alıcı-vericisinin Decawave tarafından bir Arduino MKRZero MCU'ya bağlanması ve düğümlerin senkronizasyonu için FSTP gibi basit bir senkronizasyon protokolüne dayalı bir senkronizasyon prosedürüdür. UWB teknolojisini kullanan zaman senkronizasyonu ile ilgili makalelerin çoğu, UWB alıcı-vericileri arasındaki zamanlama doğruluğunu gösterdi. Ancak bu çalışma, WSN'nin referans saati ile MCU'nun saati arasında elde edilen zamanlama doğruluğuna odaklanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları özellikle ilgi çekicidir çünkü MCU saati, UWB alıcı-verici dışındaki sensörler ve aktüatörlerle ilgili tüm olaylar için zaman referansıdır. Bu iyi zamanlama doğruluğu, menzil ve işbirliğine dayalı hüzme oluşturma gibi uygulamalarda ve ayrıca ağ ömrünü uzatmak için geliştirilmiş görev döngüsü için gelişmiş özelliklerde ve ağ kullanımını iyileştirmek için çekişmeli kanal erişiminde güçlü bir etkiye sahip olabilir.

Zaman senkronizasyonunda yer alan unsurların katkısı, pratik ve deneysel bir bakış açısıyla sistematik olarak analiz edilmiştir. UWB alıcı-vericisindeki bir paketin MCU'ya alındığını belirtmek için kullanılan SFD'de piminin aktivasyonunun analizi, aktivasyonunun yanlışlığının 22.4 ns'lik bir standart sapmaya sahip olduğunu göstermiştir. Bu değer, MCU'da elde edilebilecek zamanlama hassasiyetini sınırlar. UWB alıcı-vericiler arasında ölçülen en küçük hata 0.14 ns iken, aynı konfigürasyon için MCU ile 31 ns'lik bir MAPE değeri ölçülmüştür.

Ayrıca, çeşitli mesafelerde iki alıcı-verici arasındaki gecikmenin ölçümü, UWB vericisinin ve alıcısının (antenler dahil) dahili devresi tarafından getirilen gecikmenin toplamda 2.505 ns olduğu ve TOF'un düğümlerin ayrılmasıyla arttığı sonucuna varmıştır. havadaki ışık hızının tersinin beklenen değeri ile iyi bir uyum içinde olan 3.387 ns/m'lik bir hız. Bu sonuçlar, dikkate alınan “tek yönlü” senkronizasyon stratejisinin, düğümler yakın olduğu sürece geçerli olduğunu göstermektedir. 5 m'den daha büyük mesafeler için gecikme, hataya kıyasla ihmal edilebilir değildir. Bu durumlarda, bu nedenle, verici ve alıcı arasındaki gecikmeyi telafi etmeye izin veren iki yönlü veya üç yönlü ölçüme dayalı bir senkronizasyon prosedürünün kullanılması tavsiye edilir.

Zaman senkronizasyonunun doğruluğunun analizi, LS modelinin birkaç SP ve birkaç pencere boyutu için değerlendirilen MAPE açısından yapıldı. Beklendiği gibi, MAPE SP ile yükselir, MCU zaman damgaları göz önüne alındığında ölçülen MAPE değerleri, UWB alıcı-vericileri arasında ölçülenlerden daha büyüktü. Ölçülen MAPE değerlerinden, bir LS modelinin kullanımı yalnızca 100 ns'den küçük bir zamanlama doğruluğu gerektiğinde ve 1 s'den küçük SP aralıkları kullanıldığında doğrulandı. 10 s'den büyük SP değerleri dikkate alındığında, alınan son iki zaman damgası dikkate alınarak doğrusal bir interpolasyon ile en iyi MAPE sonuçları elde edildi. Aynı davranış, MCU'daki zaman damgaları ve UWB alıcı-vericilerinde kayıtlı zaman damgaları göz önüne alındığında gözlemlendi.

Table 5

Comparison of time synchronization protocols based on wireless networks with different IEEE technologies and off-the-shelves platforms.

Reference	Error	IEEE Technology (platform/transceiver)	Comments
TinySync [11]	10.78 μ s	802.15.4 QPSK in 2.4 GHz (TelosB/CC2420)	100 s of SP, long-term
TinySync [11]	1.3 μ s	pre-802.15.4 FSK in 2.4 GHz (Mica2/CC1000)	20 μ s of SP, long-term
TPSN [12]	16.9 μ s	pre-802.15.4 ASK in 2.4 GHz (Mica/TR1000)	instantaneous
RBS [13]	11 μ s	pre-802.15.4 ASK in 2.4 GHz (Mica/TR1000)	instantaneous
FTSP [10]	1.48 μ s	pre-802.15.4 FSK in 2.4 GHz (Mica2/CC1000)	30 s of SP, long-term
RATS [9]	1.6 μ s	pre-802.15.4 FSK in 2.4 GHz (Mica2/CC1000)	1 min of SP, long-term
[28]	2.5 μ s	802.11, FSK 2.4 GHz (Atheros 5414)	1 min of SP, long-term
[15]	3.3 μ s	802.15.4-2011 DS-UWB in 3.5–6.5 GHz (DWM1000)	100 ms of SP, long-term
[22]	1.2 ns	802.15.4-2011 DS-UWB in 3.5–6.5 GHz (DWM1000)	instantaneous
BLAS [21]	0.172 ns	802.15.4-2011 DS-UWB in 3.5–6.5 GHz (DWM1000)	instantaneous
Our proposal	0.14 ns	802.15.4-2011 DS-UWB in 3.5–6.5 GHz (DWM1000)	200 ms-1 min of SP, long-term