

Sinhronizacija mernih podataka u bežičnim senzorskim mrežama

Miodrag Malović

Apstrakt—Početkom dvadesetprvog veka, unapređenje a posebno pojeftinjenje mikroelektronskih komponenti dovelo je do značajne ekspanzije bežičnih tehnologija. Često imamo potrebu da fizički odvojeni uređaji koriste istu (odnosno, što približniju) vremensku skalu za označavanje veličina i događaja koje prate. Ovo je netrivialan zadatak budući da su uređaji baterijski napajani i moraju svesti razmenu poruka (koje zahtevaju upotrebu energetski zahtevnog radio interfejsa) na minimum. U tu svrhu osmišljen je veliki broj algoritama i protokola koji se bave problemom usklađivanja satova na bežičnim uređajima u okviru mreže. U ovom radu prikazana su i klasifikovana neka uobičajena rešenja.

Ključne reči—sinhronizacija, vreme, frekvencija, bežične senzorske mreže, merenja

I. UVOD

Bežične senzorske mreže (WSN - *wireless sensor networks*) su sa razvojem mikroelektronskih komponenti niske potrošnje dobile važno mesto u mnogim oblastima nauke i svakodnevnog života. Najčešće oblasti njihove primene su građevina (ispitivanje stanja kapitalnih građevinskih objekata), medicina (daljinski nadzor pacijenata), meteorologija (prikupljanje podataka), saobraćaj (kontrola; nadzor zagađenja), prevencija nepogoda (požara, poplava, raznih havarija), industrijska i kućna automatika, itd. U heritologiji, bežični senzorski sistemi se koriste kako u permanentnom bezbednosnom nadzoru lokaliteta (zaštiti od prirodnih nepogoda i od provalnika) tako i za evaluaciju stanja objekata: snimanje pukotina u zidovima, detekciju vlažnosti i prokišnjavanja, vibracija, i drugih veličina.

Jedan od važnih ciljeva u realizaciji praktično svakog bežičnog mernog sistema jeste postizanje odgovarajuće vremenske sinhronizacije između mernih podataka koji potiču iz različitih tačaka, a koja je primerena za datu svrhu. I dok se kod nekih vrsta merenja, kao što su merenja zagađenja u saobraćaju, praćenje nivoa podzemnih i nadzemnih voda, merenja u meteorologiji, biologiji i sl. ne zahteva velika sinhronizovanost, već je bitno da su podaci obeleženi od strane lokalnog časovnika realnog vremena koji ne mora biti striktno održavan, kod merenja brzih procesa u nekim tehničkim disciplinama kao što su mašinstvo ili građevina, bitna je usaglašenost podataka izmerenih različitim sensorima u različitim tačkama u prostoru, koja mora biti na nivou

zanemarljivog dela periode najviših harmonika oscilacija koje se proučavaju. Ove mogu biti reda veličine i preko 100 Hz, mada su najčešće u upotrebi frekvencije od najviše dvadesetak. Razvoj elektronike je zaista omogućio da se ove pojave mogu pratiti sa garantovanom sinhronizacijom znatno boljom od 1 ms, što je dovoljno za opisivanje većine mehaničkih pojava (ne treba zaboraviti da pretvaranje neelektričnih veličina u električne takođe unosi nekakvu dinamiku u proces merenja, te da sami senzori mehaničkih veličina teško mogu da daju odziv sa vremenskom pouzdanošću znatno boljom od milisekunde).



Sl. 1. *Torre Rognosa* u Toskani (centralna Italija), uvršćen u Uneskovu listu svetske baštine (*world heritage sites*), na kome je vršen višemesečni nadzor stanja mrežom bežičnih senzora [1].

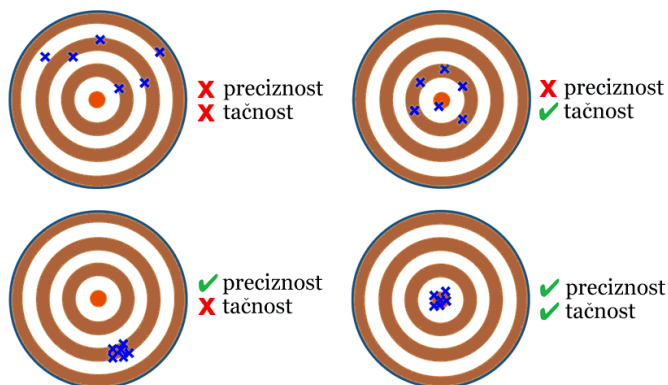
Dok kod žičanih mreža sinhronizaciju nije teško izvesti jer se isti signal iz zajedničkog izvora vremena može sa zanemarljivom neodređenošću (reda veličine ns) sprovesti na različite uređaje, kod bežičnih mreža situacija se komplikuje. Ove najčešće koriste kompleksne radio modeme, koji imaju sopstvene procesore i operativne sisteme (*embedded RTOS*) koji unose ne sasvim određeno kašnjenje u prenos poruke, a priroda veze, podložna smetnjama iz brojnih izvora, uslovljava slanje podataka u više paketa čiji prenos može uspeti iz prve ili biti podložan određenom broju ponovnih pokušaja. Takođe, ovi paketi mogu zahtevati isporuku preko relejnih uređaja jer ne postoji garancija direktne veze između pošiljaoca i primaoca (čak, topologija cele mreže može biti podložna rekonfiguraciji u vremenu). Zato je sinhronizacija mernih podataka u bežičnim mrežama senzora postala ozbiljna naučna disciplina.

II. SATOVI (TAJMERI) I NJIHOVE NESAVRŠENOSTI

Iako se reči tajmer i kaunter ponekad koriste naizmenično, ispravno je za uređaj za merenje vremena koristiti reč koja je

Miodrag Malović – Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11120 Beograd (e-mail: ofiss@malovic.in.rs) (<https://orcid.org/0000-0002-0691-4626>).

izvedena iz reči za vreme, a to je tajmer. Kaunter je po definiciji uređaj za brojanje električnih impulsa (silaznih ili uzlaznih ivica nekog signala). Ukoliko kaunter vežemo sa oscilatornim kolom baziranim na (najčešće) piezoelektričnom kristalu, koje daje takt procesoru i drugim čipovima na mernom uređaju, dobijamo tajmer. Generalno, kategorija „kaunter“ je šira (kaunteri se mogu koristiti u različite svrhe brojanja koje nemaju veze sa merenjem vremena).



Sl. 2. Grafički prikaz razlike između preciznosti i tačnosti.



Sl. 3. Pendulum CNT-91 precizni kaunter/tajmer (prednja i zadnja strana) [2]. Ovaj i slični uređaji se koriste za merenje vremena i frekvencije, kao i generisanje signala stabilne frekvencije, u eksperimentima vezanim za proveru sinhronizovanosti.

Karakteristike tajmera su određene kvalitetom piezoelektričnih kristala (mada se u novije vreme koriste i MEMS oscilatori koji ne moraju biti piezoelektrične prirode) i prateće elektronike koja čini oscilatorno kolo. Pojmovi koji se koriste u opisivanju kvaliteta oscilatora odnosno tajmera se

lako mogu pobrkati pa nije na odmet navesti njihove definicije. Greška ili odstupanje predstavlja razliku između tačne i nominalne vrednosti frekvencije. Da bi greška bila definisana, potrebno je da poznamo tačnu vrednost, što često nije slučaj. Najčešće se pod greškom podrazumeva razlika između nominalne (negde deklarirane) frekvencije i vrednosti koja se izmeri kvalitetnijim (etalonskim) uređajem. Tačnost je inverzno određena ovim odstupanjem. Preciznost se odnosi na ponovljivost frekvencije. Preciznost je sinonim za stabilnost, a ne tačnost. Frekvencija može odstupati od nominalne a biti slabo promenljiva, što uređaj čini preciznim, ali ne i tačnim. Ilustracija ovoga je data na Sl. 2.

Postoje dva glavna izvora greške vremenske sinhronizacije u distribuiranim sistemima. Prvo, vreme propagacije poruka nije dovoljno determinisano kada se koristi radio komunikacija između udaljenih uređaja (jedini način komunikacije kod bežičnih senzorskih mreža, ako ne računamo druge oblasti frekvencija koje ne spadaju u radio, ali je princip rada isti). Drugo, stabilnosti tajmera su limitirane brojnim fizičkim faktorima, pa čak i u slučaju da su njihove frekvencije perfektno kalibrisane u jednom trenutku, pomeranja (driftovi) moraju da se dogode u nekoj meri pre ili kasnije, i odstupanje pokazivanja (ofset) se akumulira sa vremenom, uslovljavajući potrebu za razmenom novih poruka da bi se uređaji međusobno ponovo sinhronizovali.

Mrežni protokoli koji se bave problemom sinhronizacije satova izvode serije akcija koje su bazirane na distribuciji vremenskih žigova iz referentnih izvora, što se naziva ofset sinhronizacija, i štelovanju dinamičkih koeficijenata koji se koriste za kalibraciju satova, što se naziva sinhronizacija brzine [3]. Uobičajena podela ovih akcija ne neke kategorije je data u nastavku, a zatim su predstavljani neki postojeći protokoli sinhronizacije.

III. IMPLICITNA I EKSPPLICITNA SINHRONIZACIJA

Kontinualna ili implicitna sinhronizacija znači da se paketi podataka koji su vezani za sinhronizaciju dodaju na postojeće pakete koji se sve vreme (odakle naziv *kontinualna*) šalju kroz mrežu (i nezavisno procesiraju na uređajima, u skladu sa algoritmom rada mreže). Ovo dodavanje sinhronizacionih parametara u regularne pakete se u literaturi označava kovanicom *piggy-backed*, što u doslovnom prevodu znači „na krkače“.

Suprotnost kontinualnoj sinhronizaciji je sinhronizacija na zahtev, koja se takođe naziva i eksplicitna, ili *event-triggered* (inicira se nekim događajem odnosno okidačem ili triggerom, koji može biti automatski detektovan ili dat od strane korisnika). Eksplicitna sinhronizacija zahteva dodatne komunikacione pakete koji služe isključivo (ili barem primarno) u ove svrhe. Ona je zato zahtevnija u smislu energetske potreba, što je značajno kod bežičnih uređaja, koji su obično energetski ograničeni jer su baterijski napajani, a baterije se moraju ručno menjati ili dopunjavati iz izvora ograničenog kapaciteta, kao što su solarne ćelije, induktivni mikrogeneratori, termogeneratori na bazi termoparova ili piroelektričnih materijala, itd.

IV. INTERNA I EKSTERNA SINHRONIZACIJA

Interna sinhronizacija je algoritam sinhronizacije u kome ne postoji nikakvo spoljašnje referentno vreme. Cilj interne sinhronizacije je da pokazivanja svih satova unutar mreže budu što sličnija [4], a po mogućstvu se vodi računa i o međusobnoj razlici njihovih frekvencija, radi naknadne (tzv. post-facto) korekcije.

Eksterna sinhronizacija se bazira na jednom referentnom satu, bez obzira da li dolazi sa jednog uređaja unutar mreže (u kom slučaju reč eksterna ne treba bukvalno da se shvati) ili ne. Cilj eksterne sinhronizacije je da učini da svi satovi u mreži pokazuju koliko je moguće blizu referentnom satu.

V. UNIDIREKSIONA I BIDIREKSIONA SINHRONIZACIJA

Unidirekciona sinhronizacija je procedura u kojoj se sat ciljnog uređaja podešava prema satu izvornog uređaja, dakle postoji jasan smer kretanja informacije. Tipično transmisiono vreme se oduzima od vrednosti po prijemu. Unidirekciona sinhronizacija ne znači da se ista poruka šalje na samo jednu prijemnu adresu, već samo da nema dvosmerne razmene informacija. Na ovaj način se može sinhronizovati više uređaja u okolini izvora.

Bidirekciona, često zvana i *pairwise* (po parovima, ili parska) sinhronizacija je bazirana na proračunu takozvanog *round-trip* kašnjenja, odnosno vremena potrebnog da poruka otputuje sa izvornog uređaja do ciljnog i da se povratna poruka detektuje na izvornom uređaju (kružno putovanje). Prednost je što se meri stvarno fizičko vreme (naravno, ograničeno preciznošću lokalnog sata), što je inače nemoguće u dve odvojene tačke (kod unidirekcionih sinhronizacija). Iako se ne može odrediti tačna raspodela vremena i nesigurnosti vremena putovanja između smerova, za povratnu putanju može se tačno odrediti i srednja vrednost i standardno i maksimalno odstupanje vremena propagacije (*round-trip*). Pošto se obično radi sa uređajima istog tipa, za tipično vreme propagacije uzima se polovina *round-trip* vremena. I drugi uređaji u mreži mogu imati koristi od bidirekcionih sinhronizacionih poruka između dva čvora. Oni mogu da koriste razmenjene vremenske žigove da bi sinhronizovali svoje satove bez bilo kakve dodatne transmisije podataka (utroška energije), samo prijemom, tj. uvidom u otvorenu komunikaciju parova koji se sinhronizuju bidirekciono. Ovakva procedura je česta i naziva se *eavesdropping* (prisluškivanje) [5].

VI. TRANSFORMACIJA VREMENSKE SKALE

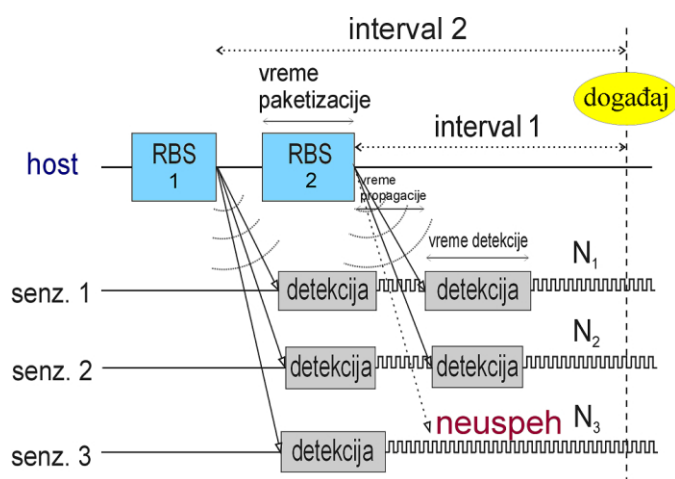
Transformacija vremenske skale spada u *backwards*, odnosno post-facto ili naknadne (unazad) sinhronizacione tehnike. Satovi nisu sinhronizovani za vreme događaja koji se posmatra, ali se sinhronizacija skupljenih podataka vrši naknadno u zavisnosti od relevantnih parametara (ustanovljenih frekvencija tajmera i međusobnih ofseta). Iako zahteva manje energije (manje dodatne komunikacije nego u slučaju sinhronizacije na zahtev), povećava potrebu za procesiranjem podataka, i najbolje je izvršiti je na sistemu visokog nivoa, kao što je PC računar, koji često predstavlja

baznu stanicu (*hub*) bežične mreže. Post-facto sinhronizacija se nekada naziva i reaktivnom ili a-posteriori, što je suprotno od proaktivne sinhronizacije koja se vrši unapred, ili a-priori [6]. Proaktivna i reaktivna sinhronizacija se kombinuju u nekim protokolima.

Kao što ime govori, transformacija vremenske skale je doterivanje vremenskih žigova u skladu sa poznatim odnosima između frekvencija satova na uređajima (doterivanje „nagiba“, odnosno brzine) i poznatim trenucima simultanih događaja (doterivanje ofseta).

VII. RBS, MULTIKAST, I UNIKAST

Reference Broadcast Synchronization (RBS) [7] ili sinhronizacija putem referentnog ili prozivnog signala je termin koji se asocira isključivo sa bežičnim mrežama. Spada u unidirekcionih sinhronizacionih tehnika. Centralni server emituje referentni signal (poznat i pod nazivom *beacon*, odnosno „signal za navođenje“, po analogiji sa signalima koji se koriste u navigaciji) a prijemni uređaji usklađuju svoje tajmere po prijemu. Sl. 4 prikazuje vremenski dijagram povorke od dva RBS-a koji prethodi detekciji događaja od strane više senzorskih uređaja.



Sl. 4. Prikaz uspele i delimično uspele sinhronizacije pri slanju povorke od dva RBS-a; u slučaju uspeha, neodređenost vremena označavanja događaja zavisi od neodređenosti vremena detekcije i neodređenosti frekvencije kojom se mere N_1 i N_2 , dok se u slučaju parcijalnog neuspeha (senzor 3) dodaje i neodređenost vremena paketizacije modema hosta [8].

Ovaj tip poruke se naziva *multicast* (šire raspoređen, odnosno za više primaoca), što je suprotno *unicast* porukama (koje imaju jednog pošiljaoca i jednog primaoca). Propagacione neodređenosti, vezane za transmisiju poruke (izlazno vreme kroz fizički sloj, koji se sastoji od interfejsa između procesora i komunikacionog modula, modema ili transsivera, i antene) se potiru jer se radi o istom signalu za sve primaoca. Neodređenosti vezane za prijem poruke su obično za red veličine manje i na ovaj način se ofset između čvorova praktično potire. Logičko vreme je na ovaj način nešto bolje sinhronizovano nego fizičko vreme. Logičko vreme predstavlja „relativno“ vreme unutar nekog posmatranog perioda, kao što je merni ciklus, dok fizičko

vreme predstavlja stvarno vreme u spoljnom svetu. Sekundarne RBS procedure se mogu ponavljati u multihop¹ mrežama (gde ne postoji direktna veza između izvora RBS-a i svih uređaja), gde sinhronizovani uređaji služe kao habovi (centralne stanice) lokalnih klastera (grupa u kojima su uređaji „nižeg nivoa“). Pouzdanost sinhronizacije naravno opada sa brojem hopova (novih transmisija RBS-a).

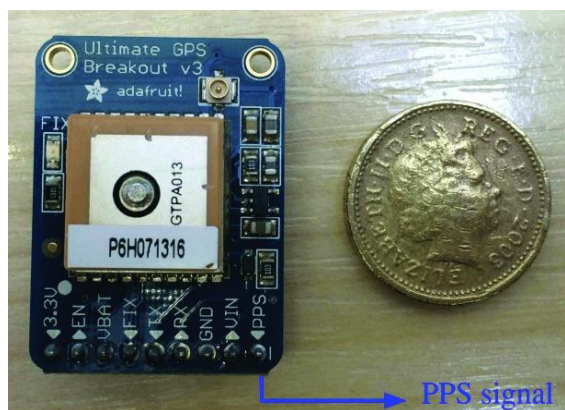
VIII. GPS I PPS

Puls u sekundi (PPS) globalnog sistema za pozicioniranje (GPS) predstavlja odličan izvor vremenskih žigova visoke tačnosti [9]. Kako se očekuje da cene GPS prijemnika padaju u doglednoj budućnosti, ovaj metod će verovatno dobiti na popularnosti. Ipak, u ovom trenutku, osim zahteva da se jeftini bežični senzorski uređaji opreme dodatnim hardverom čija cena nije zanemarljiva, postoji ozbiljan problem dostupnosti signala unutar građevina i drugih zatvorenih prostora, tako da se ovo inače efektivno rešenje uglavnom izbegava. Ovaj signal se emituje iz satelita, ograničenom snagom. Čak i malo gušće krošnje drveća mogu da budu prepreka za njega.

PPS signali su odlični za dugoročnu sinhronizaciju vremena. Informacija o protoku vremena se konstantno usklađuje sa referentnim laboratorijama najvišeg nivoa tačnosti na zemlji. Ovaj signal, nažalost, ne sadrži informaciju o fizičkom vremenu (vreme-datum).

U nekim praktičnim realizacijama bežičnih mreža koristi se jedan ili nekoliko referentnih uređaja sa GPS prijemnikom, koji se sinhronizuju putem PPS-a, i dalje prosleđuju informaciju uređajima „nižeg nivoa“ u mreži, koji mogu biti u zatvorenim prostorijama ili ispod vegetacije, ili naprosto nemaju GPS prijemnike radi uštede.

Na Sl. 5 prikazan je GPS modul za platformu Arduino [10].



Sl. 5. GPS modul za Arduino [10], cene \$30, 2021.

IX. KLASIČNI MREŽNI ALGORITMI SINHRONIZACIJE

Prve kompjuterske mreže koristile su dve varijacije sinhronizacije putem centralizovanog servera, poznate kao Kristijanova i Berkli sinhronizacija. Hab sistema (centralna stanica) šalje vremenske žigove uređajima u mreži na zahtev.

¹ putovanje paketa u više predajno-prijemnih koraka, odnosno putem releja, kada ne postoji direktna veza između pošiljaoca i primaoca; *hop* označava jedan „skok“ odnosno putovanje poruke između dva čvora

Očekivano vreme propagacije se oduzima prilikom prijema. Alternativno, višestruki paketi sa vremenskim žigovima se šalju u odgovoru na jedan zahtev, i najbrže pristigli paket se uzima u obzir (da bi se izbegla mogućnost povremenih nepredviđenih zastoja). U Kristijanovoj varijaciji algoritma, hab služi kao izvor vremena (njegov sat se uzima kao referentni eksterni izvor), dok se u Berkli varijaciji podaci skupljaju sa različitih čvorova usrednjavaju (opciono sa težinskim faktorima), i usrednjena informacija se šalje nazad.

Jedna od najčešće korišćenih metoda u savremenim kompjuterskim mrežama jeste mrežni vremenski protokol ili NTP (*network time protocol*) [11]. Čvorovi mreže se dele u različite slojeve (*layers*), počevši od referentnih satova koji su na vrhu (takozvani „stratum 0“ sloj, u koji spadaju nacionalne laboratorije i GPS sateliti). Mrežni čvorovi nižeg nivoa sinhronizuju se na bazi poruka koje primaju sa uređaja istog ili višeg nivoa. Razmena poruka unutar mreže ne sadrži samo vremenske žigove, već i razne druge podatke, kao što su preciznost tajmera na uređaju, vreme njegove poslednje sinhronizacije, pouzdanost njegove poslednje sinhronizacije, i očekivano vreme putovanja poruke. Ciljni uređaj odlučuje da li da izvrši korekciju svog sata, i za koliko, ili ne, bazirano ne samo na zadnjoj primljenoj poruci već ispitujući set poruka pristiglih u dužem vremenskom intervalu. NTP poruke se testiraju na smislenost i one koje izgledaju kao gruba greška se odbacuju u procesu interpolacije, tako da je algoritam robusan.

Precizni vremenski protokol ili PTP (*precision time protocol*), poznat i kao IEEE-1588 [12], je kompleksniji protokol baziran na istom principu. Veći broj tipova poruka se koristi, veći broj parametara se prosleđuje, i uređaji imaju različite funkcije, a ne samo klijent, server, ili klijent-i-server, što je slučaj u NTP-u. Ipak, glavna prednost ovog protokola nisu kompleksne softverske metode već „hardverska asistencija“. To znači da postoji specijalizovani hardver koji se instalira na mrežne kartice i druge uređaje, koji određuje precizna (ispod mikrosekunde) vremena fizičke emisije poruka (tzv. prolaska kroz „fizički sloj“ mreže), koja bi inače bila nedostupna glavnim procesorima mrežnih uređaja. Dok tipičan NTP klijent ostvaruje preciznost sinhronizacije reda veličine milisekunde, kod PTP-a su sinhronizacije reda veličine ispod mikrosekunde.

X. PROTOKOLI SINHRONIZACIJE U BEŽIČNIM MREŽAMA

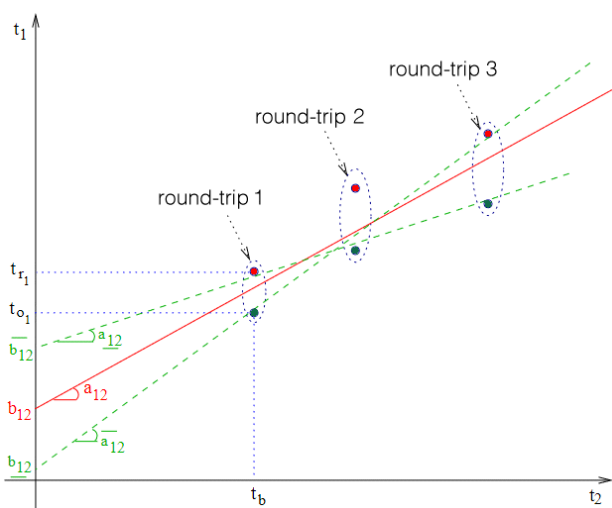
Veliki broj protokola je osmišljen radi upotrebe isključivo u bežičnim senzorskim mrežama. Navešćemo neke od osnovnih, uz kratak opis načina rada.

Sinhronizacija putem vremenskog žiga ili vremenskog označavanja (*time-stamp synchronization* ili TSS) je metod promene vremenskih žigova poruka koje prolaze kroz multihop mrežu, bazirano na vremenu prijema, procenjenom vremenu puta, i vremenu koje poruka provede u „redu“ (lokalnom baferu, odnosno steku, za prijem pristiglih paketa), odnosno *queue*-u, pre nego što se prosledi. Satovi nisu stvarno sinhronizovani tako da se ovde radi o formi *post-facto* odnosno naknadne sinhronizacije. Varijacija na ovu temu je

RITS (*routing integrated time synchronization*) [13], kod koga se izvodi dodatna kompenzacija zbog razlike u brzinama rada različitih tajmera. Ova razlika se procenjuje na osnovu istorije razmenjenih poruka sa vremenskim žigovima iz bidirekciono komunikacije (gde se mogu uporediti *round-trip* vremena proračunata na različitim čvorovima).

Laka vremenska sinhronizacija (*lightweight time synchronization* ili LTS) i *timing-sync* protokol za senzorske mreže (TPSN) su bazirani na bidirekcionoj sinhronizaciji parova uređaja koji razmenjuju poruke unutar multihop mreže, gde postoji jedna ili više referentnih tačaka (čiji su tajmeri deklarirani kao referentni) [14]. Uređaji na nižim nivoima (više hopova udaljeni od referenci), upućuju zahteve za sinhronizacijom prema uređajima na višem nivou. Kod LTS-a, uređaji proveravaju da li drugi uređaji na istom nivou imaju aktuelne zahteve koji nisu izvršeni (*pending requests*), i sinhronizuju se sa njima umesto da šalju nove multihop zahteve. Kod TPSN-a, uređaji na nižem nivou prisluškuju (*eavesdrop*) sinhronizaciju uređaja na višem nivou, i zatim šalju zahtev za sinhronizacijom u prigodnom momentu.

Tiny-sync i Mini-sync [15] takođe rade na principu bidirekciono sinhronizacije. Oni koriste statistiku da poredi vremenske žigove koji se razmenjuju između parova uređaja. Vremenski žigovi odstupaju sve više tokom vremena, zbog razlika u brzinama satova (koje su dodatno podložne varijacijama usled promene različitih fizičkih parametara), tako da se odnos frekvencija i inicijalni ofset mogu proceniti kreiranjem optimalne prave bazirane na većem broju parova vremenskih žigova sa oba uređaja (tzv. linearna regresija; ilustracija je data na Sl. 6). Različiti algoritmi se koriste da procene najverovatniji odnos frekvencija i ofset.



Sl. 6. Linearna regresija $t_1(t_2)$ gde donje tačke u paru predstavljaju emisiju signala, a gornje prijem odgovora kod round-tripa, u funkciji žiga na drugom uređaju; a označava minimalni, srednji i maksimalni odnos brzina satova, a b minimalni, srednji i maksimalni ofset [15].

Fleksibilna laka vremenska sinhronizacija (*scalable lightweight time-synchronization protocol*, ili SLTP) [16], koristi metod takozvanog pasivnog grupisanja (*passive clustering*) kao prvi korak, a zatim izvodi sinhronizaciju

slično LTS-u. Na zahtev, kreira se topologija mreže (pasivno grupisanje, odnosno trasiranje), pri čemu se uređaji dele na grupe (klustere) i dodeljuju im se funkcije habova klastera (referentnih tačaka, koje dakle nisu fiksne kao kod originalnog LTS-a), članova klastera, ili *gateway*-a odnosno kapija između klastera. Upotrebljava se i linearna regresija, kao kod tiny-synca i mini-synca, za poređenje i usklađivanje satova prilikom bidirekciono komunikacije.

Tsync protokol [17] koristi dve tehnike koje se nazivaju hijerarhijsko referenciranje (*hierarchy referencing time synchronization* ili HRTS) i individualni vremenski zahtevi (*individual-based time request* ili ITR). Glavni uređaj emituje RBS signal koji primaju uređaji najvišeg nivoa (lejera). Jedan od njih se slučajno izabira za bidirekcionu razmenu vremenskih žigova. Propagaciono kašnjenje se procenjuje na osnovu ovog procesa i novi RBS od strane centralnog uređaja se šalje dajući ciljnim uređajima referentnu vrednost vremena i pretpostavljeno vreme propagacije (smatra se da su uređaji hardverski identični te se očekuje približno isto vreme propagacije). Kada se proces završi, uređaji iz prvog nivoa ponavljaju proceduru prema klasterima nižeg nivoa. Proces se rekurzivno ponavlja dok svi uređaji u mreži nisu sinhronizovani. ITR je komplementarni mehanizam u Tsync-u, koji se koristi za sinhronizaciju na zahtev, bilo jednog uređaja bilo grupe. Uređaji koji zahtevaju sinhronizaciju šalju zahtev koji se multihop prenosi do centralne stanice (glavnog uređaja) i referentni vremenski žig se prenosi nazad istim putem. HRTS i ITR u originalnom obliku koriste dva različita kanala za razmenu poruka, ali moguća je implementacija i na jednom kanalu, sa nešto lošijom performansom.

Intervalska sinhronizacija (*interval based synchronization* ili IBS) [18] koristi procenu granica brzine satova (njihovih minimalnih i maksimalnih vrednosti) da odredi granice u kojima se vreme nalazi. Umesto razmene vremenskih žigova, čvorovi komuniciraju razmenjujući podatke o minimalnom i maksimalnom vremenu (tzv. *interval stamps* ili intervalski žigovi, bazirani na najgorem slučaju devijacije frekvencije sata). Ovo se naziva i intervalski model, koji je suprotan instant (tačkastom) modelu. Iako neki autori tvrde da je kombinacija „garantovanih“ granica za lokalne satove optimalnija nego upotreba pojedinačnih vremenskih žigova uz estimaciju njihovog kvaliteta (procenu distribucije verovatnoće i standardne i maksimalne devijacije), suština oba metoda je ista, a u stvarnosti ne postoje stopostotne garancije za granice kod *bounded-drift* modela sata (modela limitarnog odstupanja odnosno limitiranog drifta frekvencije).

Asinhrona difuzija [19] je protokol kod koga svi uređaji periodično šalju signal susedima tražeći pokazivanja njihovih satova (vremenske žigove). Slično kao kod Berkli algoritma, vrši se usrednjavanje ovih vrednosti i one se putem RBS-a prosleđuju susedima (svim uređajima u dometu ili unutar klastera), koji vrše sinhronizaciju na novu vrednost. Proces se ponavlja širom mreže.

Protokol sinhronizacije putem preplavlivanja (*flooding time synchronization protocol* ili FTSP) [20] koristi tzv. preplavlivanje (*flooding*) mreže odnosno slanje velikog broja

paketa (slično RBS-u) sa referentnog uređaja, u kombinaciji sa pamćenjem parova vremenskih žigova i linearnom regresijom koja se koristi kod tiny-sync-a. PulseSync je sličan protokol, baziran na plavljenju mreže velikom brzinom, da se ne dozvoli akumulacija nagiba (*skew*) [21]. *Skew* označava akumuliranu grešku sata baziranu na driftu frekvencije tajmera (odstupanju tokom posmatranog vremena). I dok oba protokola imaju preciznost koja opada sa brojem hopova, PulseSync preciznost opada nešto sporije.

Kod protokola vremenske difuzije (*time diffusion protocol* ili TDP) [22], referentni uređaj šalje primarni RBS signal, a susedi u dometu vraćaju informaciju koja sadrži procenjenju stabilnost sopstvene frekvencije tajmera, na bazi ranije razmenjenih vremenskih žigova. Referentni uređaj odlučuje koji susedi mogu da budu izvori sekundarnih RBS signala (centri klastera nižeg nivoa), i šalje sinhronizacioni RBS. Procedura se rekursivno ponavlja kroz multihop mrežu sve dok svi uređaji nisu primili bar jednu poruku ovog tipa. Uređaji koji su primili višestruke sinhronizacione naredbe sinhronizuju se na srednju vrednost, uz korišćenje težinskih koeficijenata (baziranih na proceni stabilnosti frekvencije i nivou izvora). Sličan protokol pod nazivom GTSP (*gradient time synchronization protocol*) [23] ne zahteva centralni referentni čvor, definisanu topologiju, niti stalnu operaciju svih uređaja. Opisane dvofazne RBS procedure se ponavljaju kroz mrežu bez definisane hijerarhije.

Konsenzus sinhronizacija (*consensus clock synchronization* ili CCS) [24] je tipična interna sinhronizaciona metoda. Svi uređaji emituju unidirekcionu poruku sa vremenskim žigovima i primajući uređaji pokušavaju da procene koliko iznosi vrednost „dogovorenog” vremena u mreži. Procena se donosi na bazi pamćenja većeg broja prethodnih poruka sa različitih uređaja.

Kao što vidimo, opisane metode, kao i mnoge druge koje postoje, nisu strogo razdvojene, već se prilično preklapaju i teško je povući granicu između njih i razvrstati algoritme striktno po kategorijama.

XI. ZAKLJUČAK

Bežične senzorske mreže (WSN) predstavljaju skup (najčešće minijaturnih) elektronskih senzorskih uređaja, koji služe za nadgledanje različitih pojava u fizičkom svetu. Uređaji u mreži komuniciraju putem radio talasa. Ovim putem se razmenjuju i informacije o vremenu, odnosno održava sinhronizacija satova unutar mreže. Sinhronizacija (na nivou određenom mernim zadatkom) je neophodna za ispravno vremensko označavanje mernih uzoraka u distribuiranim merenjima u mašinstvu, građevini, i drugim tehničkim disciplinama, uključujući heritologiju. U ovom članku dat je prikaz uobičajenih algoritama i protokola za minimizaciju razlika pokazivanja satova unutar bežične senzorske mreže.

ZAHVALNICA

Autor se zahvaljuje za podršku Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (ugovor 451-03-68/2022-14/200287).

REFERENCE

- [1] A. Mecocci, A. Abrardo, "Monitoring architectural heritage by wireless sensors networks: San Gimignano - a case study," *Sensors*, vol. 14, no. 1, pp. 770-778, Jan. 2014.
- [2] *Pendulum Instruments CNT-91/91R Advanced Frequency & Time Interval Analyzer*, [Online]. <https://pendulum-instruments.com/products/frequency-counters-analyzers/cnt-91-91r-advanced-frequency-time-interval-analyzer/>
- [3] S. Rahamatkar, A. Agarwal, N. Kumar, "Analysis and comparative study of clock synchronization schemes in wireless sensor networks," *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 536-541, Apr. 2010.
- [4] S. Khediri, N. Nasri, M. Samet, A. Wei, A. Kachouri, "Analysis study of time synchronization protocols in wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Parallel Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 155-165, Jun. 2012.
- [5] C. Liu, H. Pang, N. Cao, X. Li, D. Xu, "Wireless Sensor Network Time Synchronization Algorithm Overview," in Proc. of International Symposium on Intelligence Computation and Applications, Singapore, pp. 552-561, Nov. 2017.
- [6] J. Funck, C. Gühmann, "Comparison of approaches to time-synchronous sampling in wireless sensor networks," *Meas.*, vol. 56, pp. 203-214, Oct. 2014.
- [7] F. Zhang, G. Y. Deng, "Probabilistic time synchronization in wireless sensor networks," in Proc. of IEEE 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Wuhan, China, vol. 2, pp. 980-984, Sep. 2005.
- [8] M. Malović, Lj. Brajović, Z. Mišković, T. Šekara, "Simultaneity Analysis in a Wireless Sensor Network," *Metrol. Meas. Syst.*, vol. 22, no. 2, pp. 275-288, Jun. 2015.
- [9] R. Kim, T. Nagayama, H. Jo, B. F. Spencer Jr, "Preliminary study of low-cost GPS receivers for time synchronization of wireless sensors," in Proc. of SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, San Diego, CA, USA, vol. 8345, p. 83451A, Apr. 2012.
- [10] K. Y. Koo, D. Hester, S. Kim, "Time synchronization for wireless sensors using low-cost GPS module and Arduino," *Front. Built Environ.*, vol. 4, art. 82, Jan. 2019.
- [11] D. L. Mills, "Internet time synchronization: the network time protocol," *IEEE Trans. Comm.*, vol. 39, no. 10, pp. 1482-1493, Oct. 1991.
- [12] R. Exel, G. Gaderer, N. Kerö, "Physical Layer Ethernet Clock Synchronization," in Proc. of 42nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Reston, VA, USA, pp. 77-87, Nov. 2010.
- [13] J. Sallai, B. Kusý, A. Lédeczi, P. Dutta, "On the scalability of routing integrated time synchronization," in Proc. of 3rd European Workshop on Wireless Sensor Networks, Zürich, Switzerland, pp. 115-131, Feb. 2006.
- [14] F. Sivrikaya, B. Yener, "Time synchronization in sensor networks: a survey," *IEEE network*, vol. 18, no. 4, pp. 45-50, Jul. 2004.
- [15] S. Yoon, C. Veerarittiphan, M. L. Sichitiu, "Tiny-sync: Tight time synchronization for wireless sensor networks," *ACM Trans. Sens. Netw.*, vol. 3, no. 2, pp. 1-33, Jun. 2007.
- [16] S. Nazemi Gelyan, A. N. Eghbali, L. Roustapoor, S. A. Yahyavi Firouz Abadi, M. Dehghan, "SLTP: scalable lightweight time synchronization protocol for wireless sensor network," in Proc. of International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks, Beijing, China, pp. 536-547, Dec. 2007.
- [17] H. Dai, R. Han, "TSync: a lightweight bidirectional time synchronization service for wireless sensor networks," *ACM SIGMOBILE Mob. Comput. and Commun. Rev.*, vol. 8, no. 1, pp. 125-139, Jan. 2004.
- [18] L. Meier, "Interval-based Clock Synchronization for Ad-Hoc Sensor Networks," in 4. *GI/ITG KuVS Fachgespräch »Drahtlose Sensornetze«*, Zürich, Switzerland, ETH Zürich, 2005, ch. 2, pp. 25-28
- [19] Q. Li, D. Rus, "Global clock synchronization in sensor networks," *IEEE Trans. Comput.*, no. 55, no. 2, pp. 214-226, Jan. 2006.
- [20] L. Gheorghe, R. Rughiniş, N. Tăpuş, "Fault-tolerant flooding time synchronization protocol for wireless sensor networks," in Proc. of 6th International Conference on Networking and Services, Cancun, Mexico, pp. 143-149, Mar. 2010.
- [21] K. S. Yildirim, A. Kantarci, "Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 244-253, Feb. 2013.

- [22] W. Su, I. F. Akyildiz, "Time-diffusion synchronization protocol for wireless sensor networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 13, no. 2, pp. 384-397, Apr. 2005.
- [23] P. Sommer, R. Wattenhofer, "Gradient clock synchronization in wireless sensor networks." in Proc. of 8th IEEE/ACM International Conference on Information Processing in Sensor Networks, San Francisco, CA, USA, pp. 37-48, Apr. 2009.
- [24] M. K. Maggs, S. G. O'Keefe, D. V. Thiel, "Consensus clock synchronization for wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 6, pp. 2269-2277, Feb. 2012.

exchange messages from time to time, using radio interface. In order to preserve limited energy reserves (devices are battery powered), this exchange must be kept to a minimum. Proper fusion of data from different nodes requires certain level of synchronization of their clocks, depending on the particular measurement task. So the clocks synchronization is one of the primary concerns in many WSN. This paper reviews the most common techniques and protocols used for this purpose.

ABSTRACT

Advances in microelectronics in the past decades have lead to widespread use of wireless sensor networks (WSN). Sensor devices in these networks are not connected permanently, but are only able to

Synchronization of measurement data in wireless sensor networks

Miodrag Malović