

# Sistem za distribuciju vremena i frekvencije putem fiber optičkih linkova korištenjem WR-PTP protokola

## Demonstracija mogućnosti i evaluacija performansi

Sani Šarčević, Osman Šibonjić, Zijad Džemić

Laboratorija za električne veličine i vrijeme i frekvenciju

Institut za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine

Sarajevo, Bosna i Hercegovina

sani.sarcevic@met.gov.ba, osman.sibonjic@met.gov.ba, zijad.dzemic@met.gov.ba

**Sažetak**—Pouzdan referentni izvor vremena i frekvencije je ključan za ispravno funkcionisanje velikih telekomunikacionih i elektroenergetskih sistema. Većina njih se oslanja na navigacijske satelitske sisteme, koji ne nude garanciju pružanja usluge niti osiguranja kvaliteta, a satelitske signale je relativno jednostavno ometati ili lažirati. Ovaj članak demonstrira mogućnost distribucije sljedivog signala vremena i frekvencije iz Instituta za mjeriteljstvo BiH do krajnjih korisnika putem komercijalne fiber optičke infrastrukture. Najprije je ukratko predstavljena međunarodna vremenska skala i njena realizacija u BiH, te konvencionalni sistemi za distribuciju. Zatim je opisan predloženi sistem, elementi i princip rada. Realizovan je link dužine 5 km te su evaluirane performanse. Postignuta je tačnost distribucije vremena reda 100 ps u odnosu na referentni signal i stabilnosti frekvencije reda  $10^{-11}$  na intervalu 1s.

**Ključne riječi**—vrijeme i frekvencija; fiber optički linkovi, WR-PTP protokol (key words)

### III. UVOD

#### A. Međunarodna vremenska skala

Međunarodno atomsko vrijeme (fr. Temps atomique international) – TAI je uspostavljeno i održava se od strane međunarodnog biroa za mjere i tegove (fr. Bureau International des Poids et Mesures) – BIPM na osnovu očitavanja preko 450 atomskih satova širom svijeta, koji rade u skladu sa definicijom sekunde, kao osnovne jedinice međunarodnog sistema mjernih jedinica (fr. Système international) – SI. TAI vrijeme se po potrebi koriguje dodavanjem tzv. umetnutih sekundi, kako bi se održala usaglašenost skale sa neuniformnom rotacijom Zemlje, koja određuje trajanje dana. Rezultantna skala naziva se univerzalno koordinisano vrijeme (eng. Universal Time Coordinated) – UTC i predstavlja međunarodnu vremensku skalu [1]. BIPM obezbjeđuje proračun i diseminaciju UTC skale putem permanentne ključne interkomparacije pod nazivom CCTF-K001.UTC. Proračun ima za cilj ekstremno pouzdanu i frekventno dugoročno stabilnu vremensku skalu. Rezultat ovog proračuna BIPM objavljuje u formi mjesečnog izvještaja, tzv. CircularT, koji daje razlike [UTC – UTC(k)] u petodnevnom intervalima za sve “k” laboratorije učesnice. Učešće u realizaciji UTC-a predstavlja jedinstveni način za

obezbjeđenje sljedivosti do SI sekunde. UTC(k) je pri tome lokalna realizacija UTC skale u laboratoriji “k”.

#### B. Nacionalna vremenska skala BiH

Laboratorija za vrijeme i frekvenciju, Instituta za mjeriteljstvo Bosne i Hercegovine (IMBIH) trenutno realizuje nacionalnu vremensku skalu BiH - UTC(IMBH) koristeći dva komercijalna atomska sata na bazi cezija, sa cezijevim tubama visokih performansi. Standardni izlazi ovih satova su signali vremena – impuls po sekundi (eng. Pulse per second) - PPS, i frekvencije – sinusni signali etalonskih frekvencija. Vremenska skala UTC(IMBH) je upravljana prema UTC skali korištenjem faznog mikrostopera – ofset generatora visoke rezolucije primjenom algoritma koji je IMBIH za ovu namjenu razvio. Detaljniji opis upravljanja skalom UTC(IMBH) i postignuta tačnost opisani su u [2]. Razlike SI sekundi realizovanih pomoću ova dva sata i skale UTC(IMBH) se kontinuirano mjere brojačem vremenskih intervala (eng. Time interval counter) – TIC i zapisuju, a podaci se šalju u BIPM u standardiziranom formatu automatizovanim sistemom. Transfer vremena prema BIPM-u se ostvaruje korištenjem dva referentna vremenska prijemnika. Ovaj sistem obezbjeđuje kontinuirano učešće IMBIH-a u realizaciji UTC-a i generisanje nacionalne vremenske skale tačnosti  $\pm 10$  ns u odnosu na UTC, te sljedivost mjerenja vremena i frekvencije u BiH.

Pouzdanost sistema povećana je na način da svi ključni elementi imaju najmanje jedno zamjensko rješenje. Takođe, laboratorija se nalazi u prostoru sa kontrolisanim okolinskim uslovima (temperatura i relativna vlažnost vazduha), a sva oprema je priključena na dvostruki sistem neprekidnog napajanja električnom energijom.

#### C. Sistemi za distribuciju vremena i frekvencije

##### 1) Distribucija putem interneta

Zvanično vrijeme UTC(IMBH) se trenutno diseminira NTP serverima (eng. Network Time Protocol) pomoću dvije javno dostupne IP adrese (eng. Internet Protocol), te putem jednog direktnog NTP linka, čime se može postići tačnost reda 100 ms. Ovo zadovoljava potrebe građana za informacijom o vremenom. Međutim NTP nema dovoljne performanse da bude referentni izvor za sinhronizaciju velikih telekomunikacionih sistema.

## 2) Globalni navigacijski satelitski sistemi

Većina telekomunikacionih i elektroenergetskih sistema danas kao referentni izvor koristi globalne navigacijske satelitske sisteme (eng. Global Navigation Satellite System) – GNSS, odnosno najčešće američku varijantu ovog sistema – GPS (eng. Global Positioning System). Sateliti ovih sistema kontinuirano emituju poruke koje sadrže informacije o vremenu i lokaciji. Referentni izvor vremena je jedna od UTC(k) realizacija. Detaljniji opis principa funkcionisanja GNSS-a, kao i ostalih satelitskih sistema izlaze iz okvira ovog rada.

Međutim, postoji nekoliko bitnih nedostataka GNSS sistema koje treba razmotriti prilikom njihove upotrebe. Prije svega, najčešće korištena varijanta – GPS je strani vojni sistem u vlasništvu Sjedinjenih Američkih Država, te ne postoji nikakva garancija da će ovaj sistem i u budućnosti biti javno dostupan ili da neće doći do degradacije performansi. Osim toga, nizak nivo signala koji sa satelita dolazi do prijemnika je relativno jednostavno ometati ili lažirati. Nestankom GNSS signala, oscilator u prijemniku trenutno gubi deklarisanu frekventnu stabilnost. Takođe, ovi sistemi su osjetljivi i na vremenske prilike u svemiru, tzv. solarne oluje.

Iz navedenog se može zaključiti da GNSS nije najbolji izbor kao jedini referentni izvor vremena i frekvencije u velikim mrežnim infrastrukturama. Jedno od alternativnih rješenja je demonstrirano i evaluirano u nastavku ovog rada.

## IV. WR-PTP SISTEMI

### A. Opis protokola

WR-PTP protokol (eng. White Rabbit Precision Time Protocol) je tehnika za distribuciju vremena i frekvencije, inicijalno dizajnirana u Evropskoj agenciji za nuklearna istraživanja (eng. European Organization for Nuclear Research) – CERN, za njihove potrebe distribucije vremena i sinhronizacije bolje od 1 ns. Ova tehnika bazirana je na standardu IEEE 1588 - Precision Time Protocol (PTP), preko gigabitnog etherneteta (IEEE 802.3) korištenjem fiber optičke mreže. Dizajn sistema i opis protokola ima licencu otvorenog tipa (“open source”), a korišteni uređaji su komercijalno dostupni. Dizajn mreže može varirati od jednostavne veze jednog “master” i jednog “slave” uređaja, do složenih topologija sa višestrukim linkovima i distribucijom prema više krajnjih tačaka.

Klasični PTP je paketski sinhronizacijski protokol, koji koristi hardverske vremenske pečate i pojednostavljeni model procjene kašnjenja u komunikacijskom kanalu, te postiže sinhronizaciju reda mikrosekundi. Postizanje boljih performansi je ograničeno karakteristikama PTP protokola. Oscilatori svih uređaja rade u slobodnom režimu (eng. free running), sa kompenzacijom drifta frekvencije u trenucima sinhronizacije. Ovo uzrokuje skokovite promjene faze i smanjuje frekventnu stabilnost. Osim toga, PTP pretpostavlja simetričan transportni medij, sto je u stvarnosti nemoguće. Takođe, rezolucija vremenskih pečata je ograničena frekvencijom oscilatora, i za 62.5MHz iznosi 16 ns. Kako bi se prevazišli ovi nedostaci, WR-PTP je dizajniran kao unaprijeđeni nivo osnovnog PTP-a [3]. Implementirana su sljedeća poboljšanja:

- WR-PTP koristi sintonizaciju na fizičkim nivou. Informacija o taktu je kodirana u signal nosilac i regenerisana na strani prijemnika, čime je postignuto da su oscilatori svih uređaja zaključani na frekvenciju referentnog signala.
- Umjesto klasičnog vremenskog pečata koristi se precizno mjerenje faze u čipu na strani prijemnika, čime je rezolucija povećana do 1 ps.
- Takođe, realizovan je precizni model procjene kašnjenja signala u linku, koji uzima u obzir kašnjenja u uređajima (na ploči, čipu, predajnicima/prijemnicima, konvertorima signala- električnog u optički), kao i asimetrija koja nastaje na linku uslijed kromatske disperzije u vlaknu. Kao rezultat, WR-PTP ima deklarisanu performanse tačnosti bolje od 1 ns.

Postizanje deklarisanu tačnosti distribucije vremena i stabilnosti frekvencije je evaluirano u poglavlju III ovog rada.

### B. Elementi sistema i mreže

U WR-PTP mreži vrijeme i frekvencija se distribuiraju od master prema slave uređaju. Na početku linka nalazi se tzv. grandmaster, odnosno uređaj koji prima signale vremena i frekvencije od vanjskog referentnog sata. U ovom slučaju to su PPS signali UTC(IMBH) i njemu koherentni sinusni signal frekvencije 10 MHz. Ovi signali se putem WR-PTP protokola distribuiraju linkom prema narednoj tački u mreži. Svi ostali uređaji imaju najmanje jedan slave port preko kojeg primaju signale, i jedan master port kojim ih mogu prosljeđivati prema narednoj tački, te PPS i 10MHz izlaze.

Za ovaj članak su pri kreiranju linka korišteni tzv. WR-PTP 18-portni switch uređaji (WRS) na početku i kraju linka, pri čemu se funkcija pojedinih portova može po potrebi konfigurirati. Dodatno WRS ima mogućnost da generiše izlaz različitih frekvencija u zavisnosti od potreba krajnjeg korisnika (npr. 62.5MHz za telekomunikacione sisteme). Pored WRS, moguće je koristiti i ekonomičniju 2-portnu varijantu, odnosno tzv. WR-LEN. Osim PPS takta i signala frekvencije, grandmaster switch je spojen i na NTP server IMBIH-a, te ujedno distribuira i informaciju o tačnom vremenu, odnosno UTC sekundama. U demonstriranoj konfiguraciji ostvaren je direktni link između dva WRS-a. Međutim, u zavisnosti od različitih mrežnih topologija, na nekim tačkama je potrebno regenerirati signal. To mogu biti telekomunikacijska čvorišta u kojim završavaju fiber optički kablovi ili lokacije na dugačkim dionicama na kojim je potrebno pojačati signal. Za ove potrebe kao regeneratorski uređaj može se koristiti WR-LEN.

Opisani uređaji su u mreži povezani fiber optičkim vlaknima, a najbolje performanse se postižu upotrebom jednog jednomodnog vlakna za komunikaciju u oba smjera, jer se time minimizira nesimetričnost kanala. Koriste se postojeća telekomunikaciona optička infrastruktura, a link može biti uspostavljen na neosvjetljenom optičkom vlaknu (eng. dark fiber), kao i na dijeljenom vlaknu, zajedno sa regularnim telekomunikacionim saobraćajem, korištenjem jedne od tehnika multipleksiranja. Kao interfejs između električnog i optičkog domena korišteni su SFP transiveri (eng. small form-factor pluggable). Ovi uređaji su uobičajeni u optičkim

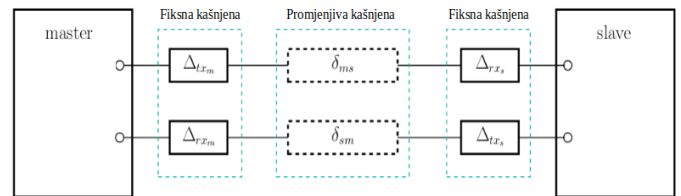
telekomunikacijskim sistemima, dostupni sa različitim talasnim dužinama predajnika i snagom lasera. Za primjer demonstriran u ovom radu korišteni su bidirekcionni SFP-ovi, sa dužinama 1490 nm i 1310 nm. Ovo rješenje je optimalno za linkove dužina do desetak km na dark fiber-u, budući da se izbjegava upotreba multipleksiranja i smanjuje cijena opreme.

Međutim, u telekomunikacionim mrežama se najčešće više saobraćajnih tokova multipleksira u jedno vlakno u cilju optimizacije resursa. Tipično se koriste dvije metode: CWDM (eng. coarse wavelength division multiplexing) ili DWDM (eng. dense wavelength division multiplexing). CWDM je ekonomičnija varijanta koja se može koristiti na kraćim dionicama (reda nekoliko km). Na vrlo dugim linkovima (reda više stotina km) efekat kromatske disperzije unosi značajnu asimetriju, budući da grupna brzina zavisi od talasne dužine koja je različita u dva smjera na istom vlaknu. Kako bi se ovaj efekat umanjio poželjno je izabrati dva susjedna kanala ITU-T DWDM mreže. Takođe, moguće je WR-PTP saobraćaj multipleksirati sa regularnim telekomunikacijskim/internet saobraćajem bez interferencije. Takođe, pri realizaciji linka, potrebno je voditi računa o optičkoj snazi signala na kraju vlakna. Na dugim linkovima zbog asimetrije nije poželjna upotreba uobičajenih pojačala snage. Bolja varijanta je pomoću WR-LEN uređaja regenerisati signal i prosljediti ga prema sljedećoj dionici. Nasuprot tome, kod kratkih dionica je preporučljivo koristiti atenuatore, jer jak laserski signal može zaslijepiti ili oštetiti fotodiodu prijemnika.

### C. Kalibracija internih kašnjenja

Da bi se UTC(IMBH) precizno distribuirao do korisnika, i kako bi se odredila tačnost, kalibrisana su interna kašnjenja uređaja i asimetriju vlakna. Kalibracija se provodi za sve WRS i WR-LEN uređaje, optičko vlakno, multipleksere (ukoliko postoje u mreži), prespojne kablove i sve ostale uređaje koji se koriste za prenos saobraćaja između čvorova. Takođe, određeno je i kašnjenje između referentne tačke UTC(IMBH) – impulsne distributivne jedinice i ulaza u grandmaster WRS.

WR-PTP je dvosmjerni link za transfer vremena između dva čvora. Kako bi se izbjegle velike razlike u dužini puta u dva smjera koristi se jednomodno optičko vlakno, sa bliskim talasnim dužinama za slanje i primanje podataka. Link je karakterisan hardverskim kašnjenjima u komponentama i propagacijskim kašnjenjem u vlaknu. Svaki WR uređaj ima konstantna kašnjenja u prijemniku  $\Delta t_{rx}$ ,  $\Delta r_{rx}$  i predajniku  $\Delta t_{tx}$ ,  $\Delta r_{tx}$ , koji nastaju u SFP modulima, spojevima na ploči, elektronskim krugovima te u samom procesorskom čipu. Asimetrija kašnjenja u optičkom vlaknu, osobina da kašnjenja signala u suprotnim smjerovima ( $\delta_{ms}$ ,  $\delta_{sm}$ ) nisu ista, uzrokovana je većinom kromatskom disperzijom, osobinom da grupna brzina prostiranja zavisi od talasne dužine svjetlosti. Kako se za slanje i prijem informacija koriste različite talasne dužine, to se vrijeme propagacije u dva smjera međusobno razlikuje. Za velike dužine linkova ova vrijednost postaje značajna, te je potrebno odrediti je. Opisani parametri su kalibrisani u demonstraciji prezentovanoj u ovom radu koristeći smjernice proizvođača opreme iz [4], a grafički su predstavljeni na Sl. 1. Kalibracija je provedena upotrebom etalonske mjerne opreme koja obezbjeđuje sljedivost SI jedinica preko državnih etalona do međunarodnog nivoa.



Slika 1. Kalibracija internih kašnjenja

Vremenski intervali su mjereni kalibrisanim TIC-om. Mjerenje kašnjenja u vlaknu pri određivanju asimetrije bazirano je na razlikama vremena potrebnog da signal pređe put od izvora do prijemnika i vrati se nazad (eng. Round trip time) – RTT. Mjerenje RTT vremena izvodi WRS, na osnovu frekvencije svog internog oscilatora. Budući da je ovaj oscilator zaključan na vanjsku referentnu frekvenciju 10 MHz, koherentnu sa UTC(IMBH), ostvarena je sljedivost i ovog mjerenja. Određena su kašnjenja naznačena na Sl. 1. Ukupna proširena mjerna nesigurnost pri kalibraciji parametara je bila reda 100 ps sa faktorom pokrivanja  $k = 2$  (95%), a najveći doprinos potiče od granice faznog šuma TIC-a i internog oscilatora WR-PTP uređaja.

## V. KARAKTERIZACIJA PERFORMANSI SISTEMA

### A. Opis demonstriranog linka

Za prezentaciju u ovom radu realizovan je jednostavni WR link između dva identična WRS uređaja. Jedan od njih je izabran za grandmaster i sinhronizovan po vremenu i frekvenciji vanjskim referentnim signalima 10 MHz i 1 PPS sljedivim prema UTC(IMBH). Drugi uređaj je konfigurisan kao slave, te na svojim izlazima rekonstruiše kopije referentnih signala. Za konverziju u optički domen korišteni su bidirekcionni SFP-ovi bez multipleksera, na talasnim dužinama 1490 nm i 1310 nm za slanje i prijem signala respektivno. Link je realizovan pomoću jednomodnog optičkog vlakna, tipa G652 sa LC konektorima i UPC poliranjem (eng. Ultra Physical Contact), dužine 5 km, namotanog na kotur. Šema spoja je prikazana na Sl. 2.

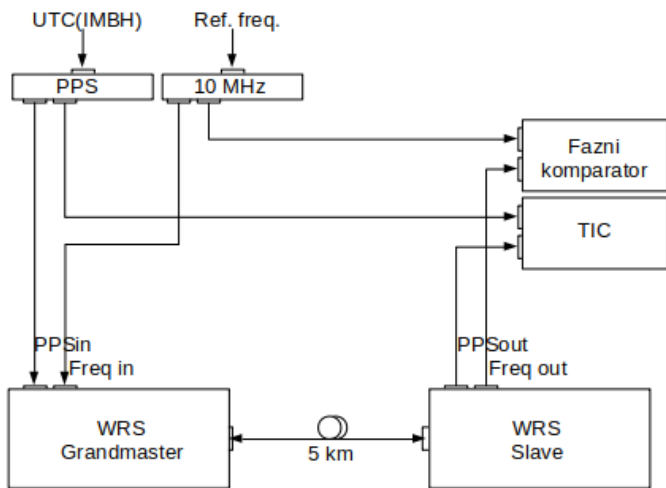
Uspostavljena je sinhronizacija, te izvršena kalibracija kašnjenja i asimetrije opisana u poglavlju II C. Izlazi rekonstruisanih signala 10 MHz i 1 PPS na slave WRS-u su spojeni na odgovarajuće mjerne uređaje kako bi se evaluirale performanse. Određena je tačnost distribucije vremena u odnosu na UTC(IMBH) i stabilnost izlazne frekvencije u odnosu na referentnu.

### B. Tačnost distribucije vremena

Budući da je cijeli sistem realizovan u laboratorijskim uslovima, postojala je mogućnost direktnog mjerenja tačnosti distribucije upotrebom TIC-a. Greška je definisana kao vremenski interval između uzlaznih ivica PPS impulsa UTC(IMBH) i impulsa regenerisanog na WRS PPS izlazu, tj.

$$E = PPS_{UTC(IMBH)} - PPS_{WRS} \quad (1)$$

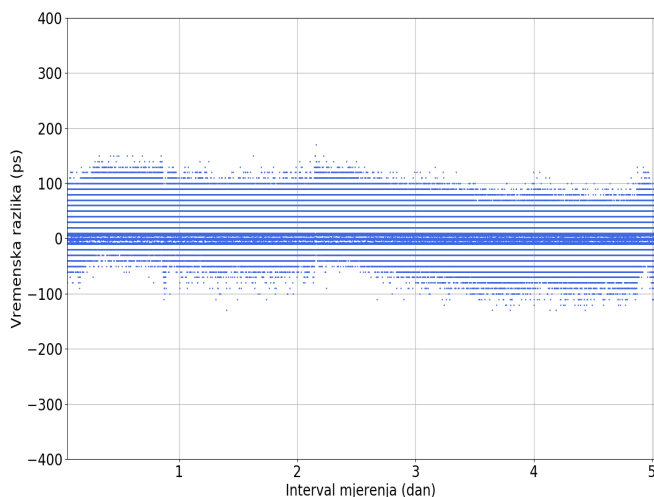
Rezultati mjerenja TIC-om su kontinuirano prikupljeni tokom 5 dana i zapisivani automatski na računar, sa intervalom uzorkovanja od 1 s. Ovim je dobiven uvid u tačnost i dugoročnu stabilnost PPS impulsa na strani krajnjeg korisnika.



Slika 2. Realizacija linka

Grafički prikaz ovih rezultata dat je na Sl. 3. Iz rezultata se može vidjeti srednja vrijednost greške od 21 ps. Ukupna proširena mjerna nesigurnost sa faktorom pokrivanja  $k=2$  (95%) je iznosila 150 ps. Najveći doprinos nesigurnosti dolazi od odstupanja pojedinačnih uzastopnih mjerenja. Ova odstupanja nisu uzrokovana performansama TIC-a, već se pretpostavlja da su granica faznog šuma čipa WRS-a. Nije detektovan drift faze. Može se zaključiti da su postignute performanse u skladu sa deklarisanom tačnošću WR-PTP protokola, odnosno da je moguće postići distribuciju vremena tačnosti bolje od 1 ns, što je daleko bolje od mogućnosti GNSS sistema.

Provedena analiza tačnosti je izvedena u laboratorijskim uslovima, gdje je moguće TIC-om mjeriti PPS signale na početku i kraju linka. U praktičnim realizacijama ovih sistema krajnji korisnik će se nalaziti na udaljenoj lokaciji te su potrebne drugačije metode za poređenje - uspostavljanjem komparativnog linka. Jedno od rješenja je upotreba vremenskih ili geodetskih prijemnika te poređenje vremenskih



Slika 3. Tačnost distribucije vremena

skala dobro poznatim metodama za komparaciju UTC(k) skala i udaljenih atomskih satova, npr. PPP (eng. Precision Point Positioning), CV (eng. Common View), AV (eng. All in View) [1].

Na ukupnu mjernu nesigurnost će u ovom slučaju uticati i nesigurnost uslijed kalibracije ovih prijemnika te korištenog algoritma za poređenje. Druga mogućnost je uspostava povratnog optičkog linka. Moguće varijante su upotreba drugog vlakna u istom kablju ili upotreba dva dodatna susjedna kanala DWDM mreže. Performanse pri korištenju navedenih metoda u ovom radu nisu evaluirane.

### C. Frekventna stabilnost

Osim tačne informacije o vremenu, za sinhronizaciju velikih mreža je bitna i stabilna referentna frekvencija. Stoga je analizirana i frekventna stabilnost 10 MHz izlaza slave WRS-a u odnosu na referentnu 10 MHz frekvenciju atomskog sata koji se koristi za realizaciju UTC(IMBH). Mjerenje je u ovom slučaju provedeno upotrebom faznog komparatora (eng. Phase Comparator) – PCO. Ovaj uređaj mjeri fazu, odnosno vremenski interval između signala koji se porede sa rezolucijom većom od rezolucije TIC-a. Mjerenje frekventne stabilnosti je izvedeno istovremeno sa mjerenjem tačnosti, a rezultati su takođe prikupljeni i zapisivani računarski sa intervalom uzorkovanja 1 s. Frekventna stabilnost je prikazana kao Alanova devijacija, odnosno kvadratni korijen Alanove varijanse i uobičajena je metoda za analizu stabilnosti frekvencije oscilatora, a definisana je kao:

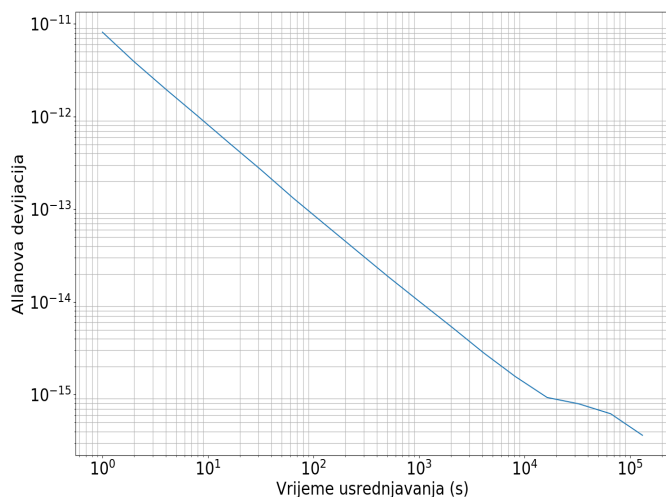
$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-2)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2} [x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i]^2 \quad (2)$$

gdje je:

- $\sigma_y(\tau)$  - Alanova devijacija
- $\tau$  - interval usrednjavanja
- $\tau_0 = 1$  s - osnovni interval mjerenja
- $x_i$  - i-ta vrijednost od  $N = M+1$  faznih mjerenja

Grafički prikaz frekventne stabilnosti za različite vrijednosti  $\tau$  dat je na Sl. 4. Postignuta je frekventna stabilnost od  $8.15 \cdot 10^{-12}$  na osnovnom intervalu usrednjavanja 1 s i zavisnost  $1/\tau$  što je i očekivano. Nije detektovan drift frekvencije oscilatora, te se može zaključiti da je WRS adekvatno pratio referentnu frekvenciju. Najveći doprinos mjernoj nesigurnosti je u ovom slučaju bio "A"-tipa, odnosno statistički. Testirane su i granične mogućnosti PCO-a, a limiti njegovog faznog šuma su bili za dva reda veličine bolji od rezultata mjerenja za odgovarajući  $\tau$ , te je korišten PCO bio adekvatan za ovo mjerenje.

Iz provedene analize se može zaključiti da je postignuta kratkoročna frekventna stabilnost reda veličine stabilnosti cezijuskog atomskog sata, dok je drift minimiziran upravljanjem referentne frekvencije prema UTC skali. Kao i kod analize tačnosti, i ovdje je izvedena metoda primjenjiva u laboratorijskim uslovima, gdje su izlazni i referentni signal spojeni direktno na PCO. Na lokaciji krajnjeg korisnika



Slika 4. Frekventna stabilnost izražena kao Allanova devijacija za različito vrijeme usrednjavanja  $\tau$

moguće je koristiti transfer etalon, npr. rubidijski atomski oscilator, kojim je moguće analizirati kratkoročnu stabilnost – za  $\tau$  do reda  $10^2$  s, jer rubidij nakon toga ima veliki drift.

Takođe, stabilnost se može odrediti pomoću vremenskog ili geodetskog prijemnika sa frekventnim ulazom, naknadnim procesiranjem PPP metodom, što ovdje nije analizirano.

## VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu demonstrirane su mogućnosti i evaluirane performanse WR-PTP sistema za distribuciju sljedivog vremena i frekvencije iz Instituta za mjeriteljstvo BiH putem komercijalne fiber optičke infrastrukture. Definisana je međunarodna vremenska skala i njena realizacija u BiH, te lanac sljedivosti do SI sekunde. Opisani su najčešće korišteni satelitski sistemi za diseminaciju i navedeni njihovi nedostaci. Potom je prezentovan WR-PTP sistem, dat je opis protokola, korištenih uređaja, elemenata mreže i kalibracije relevantnih parametara.

Realizovan je WR-PTP link dužine 5 km, te je izveden niz eksperimenata kako bi se procijenile njegove performanse. Postignuta je tačnost distribucije vremena bolja od 150 ps u

odnosu na UTC(IMBH), te frekventna stabilnost bolja od  $1 \cdot 10^{-11}$  na intervalu 1 s, koja je uporediva sa performansama cezijskog atomskog sata. Demonstrirani rezultati prevazilaze mogućnosti GNSS sistema i nude široki spektar primjene, te ovi sistemi mogu biti razmotreni kao referentni izvori vremena u velikim telekomunikacionim i elektroenergetskim mrežama.

## LITERATURA

- [1] G. Panfilo and F. Arias, "The Coordinated Universal Time (UTC)", Metrologia 56 042001, pp 26, 2019.
- [2] S. Šarčević, O. Šibonjić, "Maintenance of official time in Bosnia and Herzegovina – UTC(IMBH)", 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 2018., DOI 10.1109/INFOTEH.2018.8345522
- [3] E. Cota, M. Lipiński, T. Włostowski, E. van der Bij, J. Serrano, "White Rabbit Specification", Draft Version 2.0, 2011.
- [4] G. Daniluk, "White Rabbit calibration procedure", CERN BE-CO-HT, version 1.1, 2015.

## ABSTRACT

A reliable reference time and frequency source is essential for correct functioning of complex telecommunication and power grid networks. Most of them depends on navigation satellite systems, which does not offer services providing guarantee nor quality assurance, and the satellite signals are relatively easy to jam or spoof. This article demonstrates the possibility of dissemination of traceable time and frequency signals from the Institute of metrology of B&H to end users utilizing a commercial fiber optic infrastructure. Firstly, the international time scale and its realization in B&H is introduced, as well as conventional dissemination systems. Then the proposed system, elements and principle of operation are described. A five km long link was realized and the performances are evaluated. The time dissemination accuracy of 100 ps and the frequency stability of the order  $10^{-11}$  at the 1s interval were achieved.

## TIME AND FREQUENCY DISSEMINATION OVER FIBER OPTICAL LINKS USING WR-PTP PROTOCOL – SYSTEM DEMONSTRATION AND PERFORMANCES EVALUATION

Sani Sarcevic, Osman Sibonjic, Zijad Dzemic