

Realizacija etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om

^{1st} Kasapović Sara

DEET, Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
kasapovic.sara@uns.ac.rs

^{2nd} Novaković Đorđe, 

DEET, Katedra za električna merenja
Fakultet tehničkih nauka
Novi Sad, Srbija
djordjenovakovic@uns.ac.rs

Apstrakt—U ovom radu opisan je realizovani sistem etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om (Globalnim Pozicionim Sistemom). Nakon uvodnih razmatranja, opisan je korišćeni hardver potreban za realizaciju sistema. Takođe, dat je i detaljan opis firmvera implementiranog na mikrokontrolerskom sistemu sa opisom algoritma automatizacije disciplovanja izvora frekvencije. Na kraju su prikazani rezultati kao i predlozi za dalji razvoj sistema.

Ključne reči—disciplinovani generator, referentni izvor frekvencije, GPS prijemnik, OCXO

I. UVOD

Globalni sistem pozicioniranja (GPS) predstavlja jedno od sredstava za određivanje lokacije ali i sinhronizacije vremena. Lokacija se određuje tako što se meri vreme potrebno da signal od satelita stigne do prijemnika i na osnovu signala sa minimalno četiri satelita moguće je odrediti tačnu lokaciju prijemnika na zemlji. Budući da signal od satelita do zemlje putuje oko 67,3 ms, zavisno od vremenskih prilika, neophodno je imati tačnu vremensku referencu kako bi se odredilo rastojanje. Zbog toga svaki satelit sadrži atomski časovnik čija je stabilnost veća od $20 \cdot 10^{-12}$ s što omogućuje da greška određivanja lokacije bude nekoliko metara. Od svojih početaka kao vojne tehnologije, GPS je evoluirao i proširio svoju primenu na mnoga civilna područja, uključujući navigaciju, telekomunikacije, geodeziju itd. [1], [2].

Jedna od primena GPS-a u metrološkim laboratorijama ogleda se u disciplinovanju oscilatora [3]. Disciplinovanje predstavlja proceduru prenosa tačnosti frekvencije sa atomskih časovnika satelita na oscilatore. Najčešće se disciplinuju Rubidijumski oscilatori ili temperaturno stabilizovani oscilatori (OCXO - *Oven-controlled Crystal Oscillator*). Rubidijumski oscilatori imaju veću stabilnost i tačnost frekvencije, ali je i cena nekoliko puta veća u odnosu na OCXO [4], [5].

U ovom radu predlaže se realizacija generatora baziranog na OCXO koji je disciplinovan GPS-om. U prvom poglavlju opisano je trenutno stanje u oblasti i pregled komercijalno dostupnih rešenja. Dat je detaljan opis realizovanog hardvera

Ovo istraživanje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija (br. ugovora: 451-03-65/2024-03/200156) i Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu kroz projekat "Naučnoistraživački i umetničkoistraživački rad istraživača u nastavnim i saradničkim zvanjima Fakulteta tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu" (br: 01-3394/1).

kao i opis implementiranog firmverskog algoritma za disciplinovanje oscilatora. Nakon opisa realizovanog uređaja prezentovani su rezultati. Na kraju su dati pravci daljeg usavršavanja uređaja. Motivacija i cilj ovog rada su razvoj uređaja koji bi se koristio kao etalonski izvor frekvencije u metrološkoj laboratoriji.

II. STANJE U OBLASTI

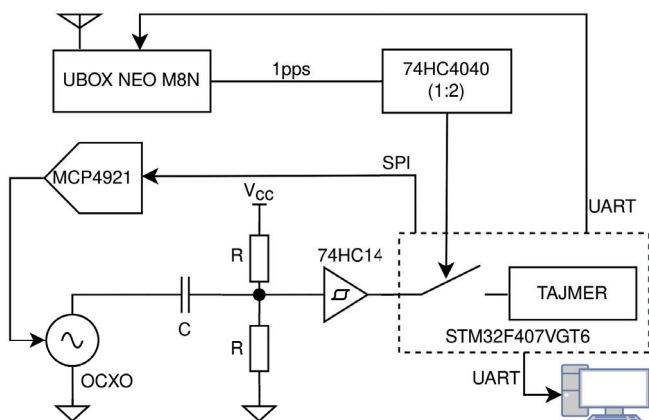
Na tržištu se trenutno mogu pronaći jeftinija rešenja čije se cene kreću od nekoliko stotina dolara, pa do nekoliko hiljada dolara. Uređaji u nižem cenovnom rangu poput BG7TBL imaju relativnu grešku podešavanja frekvencije od oko 10^{-10} [7] i stabilnost ne lošiju od $5 \cdot 10^{-11}$, ali budući da specifikacije izvora frekvencije nisu definisane od strane proizvođača moguće su varijacije od uređaja do uređaja [6]. U višem cenovnom rangu (nekoliko hiljada dolara i više) mogu se pronaći uređaji poznatijih proizvođača metrološke opreme. Npr. *Stanford Research System* FS752 predstavlja disciplinovani OCXO sa GPS prijemnikom NEO-M8T. Obezbeđuje stabilnost frekvencije $3.5 \cdot 10^{-11}$ [7]. Fluke 910 predstavlja OCXO disciplinovan GPS signalom i njegov relativno iskazani frekvencijski ofset je $2 \cdot 10^{-12}$, dok je stabilnost $3 \cdot 10^{-11}$. Takođe, od komercijalno dostupnih rešenja mogla bi se izdvojiti i rešenja koja koriste rubidijuski oscilator poput Fluke 910R, koji imaju znatno bolje performanse ali im je i cena znatno viša. Ovaj izvor ima relativno iskazani frekvencijski ofset je 10^{-12} , a stabilnost frekvencije je $3 \cdot 10^{-12}$ [8].

Pored gotovih rešenja moguće je pronaći realizovane prototipove nekomercijalnih etalonskih izvora. Većina rešenja su bazirana na korišćenju PLL petlje tj. faznog detektora realizovanog XOR kolom, gde se na osnovu signala filtriranog RC filtrom signal očitava AD konvertorom mikrokontrolera. Na osnovu očitavog signala mikrokontroler vrši korekciju frekvencije OCXO-a [9]–[11]. Prednost korišćenja ovakvih uređaja je što su *open souce* rešenja, pa se mogu modifikovati po potrebi i hardverski i softverski. Prototipovi nekomercijalnih uređaja imaju stabilnost i frekvencijski ofset isključivo zavise od kvaliteta komponenti koje se koriste za njihovu izradu. Budući da postoji greška usled filtriranja i očitavanja AD konvertorom, novo rešenje predlaže korišćenje gejtovanog tajmera, što zahteva manje hardverskih komponenti

na šemi. U predloženom rešenju se ne koristi ni PLL petlja čime se znatno pojednostavljaju hardverski zahtevi.

III. HARDVER RAZVIJENOG SISTEMA

Na slici 1 prikazana je blok šema hardvera realizovanog sistema.



Sl. 1. Blok šema hardvera realizovanog uređaja

Ključne komponente sistema su:

- OCXO koji se disciplinuje i pripadajuće uobličavačko kolo
- GPS prijemnik sa deliteljem frekvencije
- Mikrokontrolerski sistem

A. OCXO sa uobličavačkim kolom

Izlazni signal HIC OSC101 je sinusoidalna amplituda 3 Vpp. Kako bi se signal doveo na tajmerski modul mikrokontrolera neophodno je signal digitalizovati propuštanjem kroz uobličavačko kolo. Sinusoidalni signal se dovodi na kondenzator čime se izbacuje jednosmerna komponenta, a zatim se naponskim razdelnikom dodaje jednosmerna komponenta jednaka polovini opsega napajanja mikrokontrolera (1,65 V). Da bi se signal konvertovao u pravougaoni signal upotrebljeno je Šmitovo okidno kolo 74HC14. Vreme propagacije signala je manje od 30 ns, što je dovoljno za potrebe projekta [13].

B. GPS prijemnik sa deliteljem frekvencije

Korišćeni GPS prijemnik je UBLOX NEO M8N. Ovaj modul se napaja sa 3,3 V i sa mikrokontrolerskim sistemom komunicira preko UART (*Universal asynchronous receiver-transmitter*) interfejsa. GPS prijemnik svake sekunde prosleđuje NMEA (*National Marine Electronics Association*) rečenice na osnovu kojih se može pratiti trenutni status modula kao što je broj trenutno vidljivih satelita, UTC (*Coordinated Universal Time*) vreme, lokacija, status pozicioniranja itd. Na osnovu primljenih poruka mikrokontroler ima mogućnost detekcije da li je GPS prijemnik uspešno sinhronizovao oscilator sa atomskim časovnicima satelita. Dodatno ovaj GPS prijemnik ima TCXO (*Temperature Compensated Crystal Oscillator*) kako bi se povećala stabilnost izlazne

frekvencije. Na izlaznom pinu PPS (*Pulse-Per-Second*) NEO M8N generiše signal četvrtke frekvencije 1 Hz sa greškom periode ne većom od 60 ns. Takođe, korisnik može po potrebi promeniti frekvenciju signala na pps pinu, kao i faktor ispune koji je inicijalno na 50 % [14].

PPS signal se koristi kao referentni signal koji upravlja gejtom tajmerskog modula. Pošto je inicijalno faktor ispune 50 % pri frekvenciji 1 Hz onda je trajanje signala gejta 0,5 s. Kako bi se eliminisala greška koja može poticati od ditera u generisanom faktoru ispune, pre dovođenja signala na ulaz za kontrolu gejta signal se deli korišćenjem delitelja frekvencije 74HC4040. Delitelj vrši deljenje u odnosu 1:2 čime se, nezavisno od faktora ispune, na izlazu delitelja dobija signal frekvencije 0,5 Hz tj. trajanje pozitivne poluperiode signala je 1 s. Ovako generisani signal eliminiše grešku podešavanja faktora ispune i ujedno se dobija signal čiji je visok nivo 1 s, čime je obezbeđeno da je vrednost u tajmerskom registru jednaka frekvenciji signala OCXO-a.

C. Mikrokontrolerski sistem

Korišćena razvojna ploča je STM32DISCF407, sa kontrolerom STM32F407VGT6. Mikrokontroler koristi tajmerski modul TMR2 u gejtovanom modu. Kontrola gejta vrši se signalom čiji je izvor GPS prijemnik, dok se kao izvor takta koristi signal četvrtke nakon uobličavača čiji je izvor OCXO. Očekivana vrednost u tajmeru je 10000000 (gejt je uključen 1 s, a izvor takta je frekvencije 10 MHz), međutim vrednost u tajmerskom registru će odstupati od očekivane. Na osnovu greške vrši se korekcija frekvencije OCXO-a, iterativnim podešavanjem izlaza DA konvertora, dok se ne dobije željena vrednost frekvencije.

Pored GPS prijemnika mikrokontroler korišćenjem UART interfejsa šalje poruke ka računaru na osnovu kog se obaveštava korisnik o trenutno izmerenoj frekvenciji. Komunikacija sa DA konvertorom odvija se preko SPI (*Serial Peripheral Interface*) protokola.

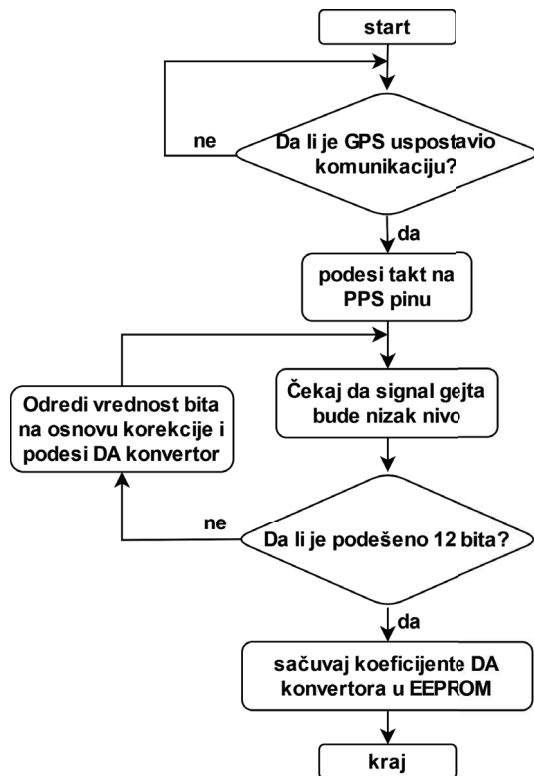
IV. FIRMVER RAZVIJENOG SISTEMA

Na slici 2 prikazana je procedura disciplinovanja OCXO-a, odnosno algoritam implementiranog firmvera.

Pre početka disciplinovanja OCXO-a mikrokontroler očitava NEMA poruke sa GPS predajnika. Mikrokontroler čeka dok se ne uspostavi adekvatno stanje fiksacije satelita, to jest dok GPS prijemnik ne sinhronizuje svoj oscilator sa atomskim časovnicima satelita.

Kada NEO M8N uspostavi komunikaciju, mikrokontroler podešava frekvenciju na pps pinu na 1 Hz i faktor ispune na 50 % korišćenjem *UBX-CFG-TP5* standardne poruke [15], nakon čega se očitavanjem odgovarajućeg registra dobija softverska potvrda da je frekvencija uspešno podešena.

Na svaku silaznu ivicu gejta iz tajmerskog registra se očitava vrednost izmerene frekvencije (broj impulsa u 1 s). Na osnovu greške koja se određuje kao razlika izbrojane vrednosti i očekivane vrednosti vrši se korekcija frekvencije OCXO promenom napona na izlazu DA konvertora. Pošto je DA konvertor 12 bitni, binarnom pretragom u 12 iteracija



Sl. 2. Algoritam disciplinovanja OCXO-a

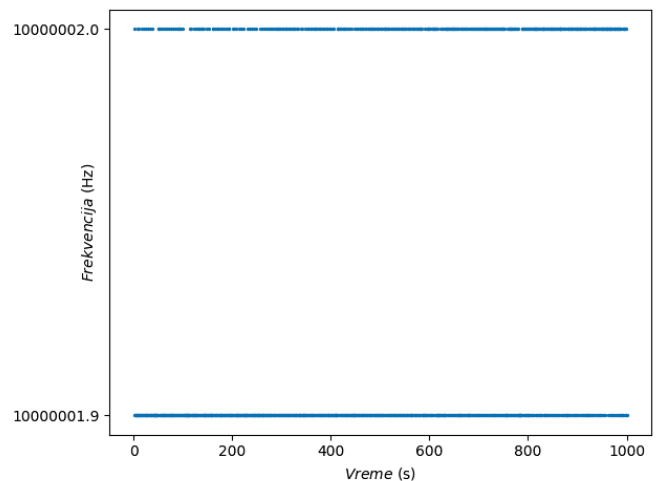
se pronalazi korektivna vrednost napona. Počevši od MSB, vrednost prvog bita se postavlja na 1. DA konvertoru se na ovaj način prosleđuje vrednost tačno na polovini opsega. Čeka se sledeći impuls sa PPS pina, greška se iznova računa i vrši se provera znaka greške. Ukoliko greška nije promenila znak, sledeći bit po redu se postavlja na vrednost 1. Ukoliko je greška promenila znak, došlo je do pogrešnog podešavanja bita u prethodnoj iteraciji. U ovom slučaju je potrebno postaviti vrednost drugog bita na 1, ali i promeniti vrednost prvog bita (bita podešenog u prethodnoj iteraciji) sa 1 na 0. Ovaj proces se ponavlja u 12 iteracija ili dok se ne postigne zaključavanje frekvencija. Moguće je doći do tačne i stabilne frekvencije od 10 MHz i u manjem broju iteracija, podešavanjem samo najviših bitova DA konvertora. Prilikom svake iteracije očitana vrednost iz tajmerskog registra se prosleđuje preko UART-a ka računaru kako bi se korisnik obavestio o trenutnom statusu.

Finalni rezultat podešavanja DA konvertora je sačuvan u EEPROM memoriji mikrokontrolera. U slučaju da korisnik ne želi disciplinovati OCXO, prethodno zapamćena vrednost se očitava iz EEPROM memorije i podešava se izlaz DA konvertora.

V. REZULTATI

Provera realizovanog sistema izvršena je u Laboratoriji za metrologiju na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, korišćenjem referentnog multimetra Fluke8588A. Multimetar je postavljen u mod merenja frekvencije sa gejtom podešenim na 1 s. Merenje je vršeno 1000 s, nakon čega je preuzeto

1000 odbiraka sa instrumenta posredstvom računara. Na slici 3 prikazan je grafik sa 1000 odbiraka preuzetih sa referentnog multimetra.



Sl. 3. Odbirci frekvencije etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om

Na osnovu rezultata prikazanih na slici 3 moguće je uočiti da se rezultati grupišu oko dve vrednosti 10000002 Hz i 10000001,9 Hz. Ovo ograničenje je direktna posledica ograničene rezolucije instrumenta. Srednja vrednost 1000 odbiraka iznosi 10000001.938 Hz, dok standardna devijacija iznosi 48,56 mHz. Važno je istaći da je greška merenja referentnog multimetra 0,5 ppm odnosno 5 Hz u slučaju merenja signala frekvencije 10 MHz [16]. Na osnovu specifikacije instrumenta i podataka iz specifikacije očekivano je da će se rezultati grupisati u dve grupe zbog greške brojanja (± 1 kvant). Izmerena vrednost frekvencije realizovanog etalonskog izvora se nalazi u granicama greške instrumenta ± 5 Hz. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da je stabilnost OCXO-a sigurno bolja od 0,5 ppm, što je i specificirano od strane proizvođača. Budući da je frekvencijska stabilnost OCXO-a manja od specifikacije greške instrumenta, a korišćeni referentni multimetar nije prevashodno namenjen samo za merenje frekvencije, neophodno bi bilo koristiti instrument sa boljim performansama specijalizovanim za merenje frekvencije.

VI. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljena realizacija etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om. Opisana je hardverska i firmverska implementacija sistema. Takođe, razmatrani su dobijeni rezultati gde je pokazano da je stabilnost OCXO-a manja od 0,5 ppm. Ograničenje u obradi rezultata predstavlja rezolucija korišćenog frekvencimetra (referentnog multimetra), pa bi u daljim istraživanjima trebalo odrediti metrološke specifikacije realizovanog sistema korišćenjem instrumenta boljih performansi.

Pošto GPS prijemnik ima dobru dugoročnu stabilnost, u daljim istraživanjima sistem se može modifikovati tako da

se faktor deljenja PPS signala povećava. Tako bi se uzelo u obzir više perioda PPS signala čime bi se dobila veća tačnost. Mana ovog rešenja je i povećavanje vremena potrebnog za pronalaženje napona korekcije DA konvertora. U ovoj verziji uređaja za određivanje vrednosti frekvencije potrebno je maskimalno 24 s da bi se OCXO disciplinovao.

Budući da je prototipom uspešno disciplinovan OCXO, sledeći korak u razvoju uključuje i realizaciju štampane ploče gde bi se objedinile sve komponente u celinu i tako realizovao etalonski uređaj. Takođe, moguće je realizovati i softversku aplikaciju za nadgledanje i kontrolu procesa disciplinovanja OCXO-a korišćenjem standardizovanih SCPI komandi.

REFERENCE

- [1] Zogg, Jean-Marie. Essentials of Satellite Navigation (Compendium). Technical Report GPS-X-02007-C. u-blox AG, 2007.
- [2] Powers, S. T., Parkinson, B. (2010). The origins of GPS. GPS World, 5(06).
- [3] Pavlović, Vladimir, Željko Stanojević, and Nikola Nikolić. "JEDNA PRIMENA GPS SIGNALA U SINHRONIZACIJI ONE APPLICATION OF GPS SIGNAL IN SYNCHRONIZATION."
- [4] Lombardi, Michael A. "The use of GPS disciplined oscillators as primary frequency standards for calibration and metrology laboratories." NCSLI Measure 3.3 (2008): 56-65.
- [5] Penrod, Bruce M. "Adaptive temperature compensation of GPS disciplined quartz and rubidium oscillators." Proceedings of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium. IEEE, 1996.
- [6] BG7TBL, Testing the BG7TBL GPSDO [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: <https://blog.febo.com/?p=636>
- [7] Stanford Research System, Frequency Standards, FS752 - GPS/GNSS Time and Frequency Reference [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: <https://www.thinksrs.com/downloads/pdfs/catalog/FS752c.pdf>
- [8] Fluke, GPS-Controlled Frequency Standards 910, 910R [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/910___omeng0300.pdf
- [9] David Fannin, GPS Disciplined Oscillator Project [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: <https://github.com/dfannin/gpsdo?tab=readme-ov-file>
- [10] Paul V, High precision 10MHz GPS disciplined oscillator (GPSDO V1) [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: <https://www.paulvdiyblogs.net/2020/07/a-high-precision-10mhz-gps-disciplined.html>
- [11] Lars Walenius, Lars Walenius-GPSDO [online]. [pristupljeno 17.5.2024.]. Dostupno na: <https://github.com/paulvee/Lars-GPSDO-V1>
- [12] Queen's land, OCXO CTI OSC5A2B02 datasheet[online]. [pristupljeno 8.5.2024.]. Dostupno na: <https://dl6gl.de/media/files/ocxo-cti-osc5a2b02-datasheet.pdf>
- [13] Texas Instruments, 74HC14 Hex Schmitt-Trigger Inverter [online]. 2007 [pristupljeno 8.5.2024.]. Dostupno na: <https://www.mouser.com/datasheet/2/308/74HC14.REV1-34947.pdf>.
- [14] Ublox, u-blox M8 concurrent GNSS modules[online]. 2022 [pristupljeno 8.5.2024.]. Dostupno na: https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf
- [15] Ublox, u-blox 8/u-blox M8 Receiver description Including protocol specification[online]. 2022 [pristupljeno 8.5.2024.]. Dostupno na: https://content.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8-FW3_DataSheet_UBX-15031086.pdf
- [16] Fluke, 8588A Reference Multimeter Product Specifications[online]. 2019 [pristupljeno 8.5.2024.]. Dostupno na: https://s3.amazonaws.com/download.flukecal.com/pub/literature/8588A___pseng0700.pdf

ABSTRACT

This paper describes the realized system of reference frequency generator disciplined by GPS (Global Positioning

System). After the introductory considerations, the used hardware required for the implementation of the system is described. Also, a detailed description of the firmware implemented on the microcontroller system with a description of the frequency reference disciplining automation algorithm is given. At the end, the results and suggestions for further development of the system are presented.

Realization of the frequency reference generator disciplined by GPS

Sara Kasapović, Đorđe Novaković