

Predlog realizacije etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om

Dorđe Novaković, Nemanja Gazivoda, Sanja Mandić, Zdravko Gotovac, Stefan Mirković

Apstrakt—U ovom radu je dat predlog za realizaciju etalonskog izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om (Globalnim Pozicionim Sistemom). Nakon teorijskog opisa u radu je dat predlog za hardversku implementaciju sistema. Svaki deo predloženog uređaja analiziran je ponaosob. Takođe, dat je predlog firmvera mikrokontrolera kako bi se upravljalo opisanim hardverom.

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

I. UVOD

GPS predstavlja satelitski sistem koji se koristi za određivanje geografskog položaja, brzine i vremena na Zemlji. Sastoji se od mreže satelita koji kruže oko Zemlje i GPS prijemnika koji se koristi za prijem i dekodiranje signala sa satelita. Jedna od ključnih karakteristika GPS-a je preciznost vremena, koja je od suštinskog značaja za mnoge aplikacije.

Izvor frekvencije disciplinovan GPS-om je sistem koji koristi GPS signal kao referentni izvor frekvencije, kako bi se održala tačnost i stabilnost frekvencije. Ova tehnologija ima mnogo primena, uključujući telekomunikacije, navigaciju, bankovne transakcije, vazduhoplovstvo, naučna istraživanja itd.

Kao stabilni referentni izvori frekvencije u metrološkim laboratorijama se često koriste generatori disciplinovani GPS-om. U situacijama kada ne postoji mogućnost korišćenja GPS signala često se kao zamena koriste rubidijumski generatori koje odlikuje visoka stabilnost i tačnost frekvencije, ali je i njihova cena veća. Motivacija za ovaj rad je predložiti jeftinije rešenje za realizaciju referentnog izvora frekvencije korišćenjem OCXO (*Oven-controlled Crystal Oscillator*), temperaturno stabilizovanog oscilatora, disciplinovanog GPS-om [1], [2].

II. PREDLOG REALIZACIJE SISTEMA

Predlog realizacije uređaja dat je na slici 1.

Dorđe Novaković - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs)

Nemanja Gazivoda - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: nemanjagazivoda@uns.ac.rs)

Sanja Mandić - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: sanja.mandic@uns.ac.rs)

Zdravko Gotovac - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: zdravko.gotovac@uns.ac.rs)

Stefan Mirković - Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: mikrovicst@uns.ac.rs)

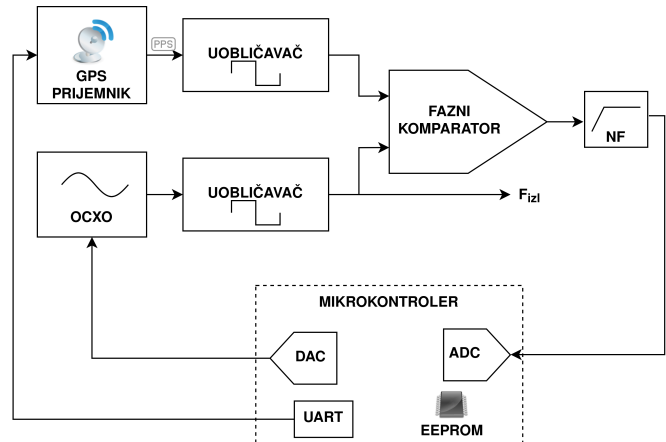


Fig. 1. Blok šema uređaja

Šema se sastoji iz GPS prijemnika koji se sinhronizuje sa atomskim časovnikom satelita i OCXO koji će se koristiti kao referentni izvor takta u slučaju kada se izvrši njegovo disciplinovanje signalom GPS prijemnika. Kako bi se ovo postiglo neophodno je uporediti da li su signali sa GPS prijemnika i OCXO identični, što se proverava faznim komparatorom. Na osnovu izlaza faznog komparatora mikrokontroler dobija informaciju da li je neophodno da izvrši dodatno fino podešavanje OCXO u slučaju da signali nisu isti. U slučaju da su signali identični, izlaz OCXO se koristi kao izvor referentne frekvencije.

A. GPS prijemnik

Trenutno dostupni GPS prijemnici u najvećoj meri koriste UART (*Universal asynchronous receiver-transmitter*) protokol za komunikaciju. Status i kontrola GPS prijemnika može se vršiti mikrokontrolerom posredstvom NMEA-0183 (*National Marine Electronics Association*) standarda. Razmenom standardnih NMEA poruka moguće je dobiti informaciju sa koliko satelita GPS prijemnik prima signale, kao i o poziciji, vremenu, brzini kretanja itd. Neki GPS prijemnici imaju PPS (*Pulse Per Second*) pin na kom se dobija povorka pravougaonih impulsa frekvencije 1 Hz po fiksiranju pozicije. Takođe, neki od prijemnika imaju mogućnost promene frekvencije na PPS pinu. Većina dostupnih ubox GPS prijemnika iz serije NEO ima mogućnost generisanja pravougaonog signala od 0,25 Hz do 10 MHz i ova frekvencija je softverski selektabilna slanjem odgovarajućih konfiguracionih parametara [3], [4].

B. OCXO

Zbog nestabilnosti frekvencije kristalnog oscilatora usled promene temperature, a ona je od presudne važnosti za ovaj generator, kao izvor referentnog signala može se koristiti OCXO. OCXO predstavlja kristalni oscilator smešten u metalno kućište (pećnicu) ispod koje se nalazi i grejač koji zagreva celokupnu unutrašnjost iznad ambijentalne temperature. Ova temperatura se održava konstantnom čime se postiže da frekvencija kristalnog oscilatora bude stabilna i smanjuje se fazni šum [5]. Nekim komercijalno dostupnim OCXO oscilatorima je moguće vršiti fino podešavanje izlazne frekvencije u slučaju da se javi odstupanje od nominalne vrednosti. Korekcija se vrši dovodenjem jednosmernog napona na predviđeni pin za korekciju. Pomoću DA konvertora mikrokontrolera vrši se fino podešavanje izlazne frekvencije dok fazni detektor ne detektuje da su signali identični [7].

C. Uobličavač

Pošto signal sa GPS prijemnika može biti izobličena četvrtka, a i signal OCXO-a je sinusoidalna, neophodno ih je konvertovati u pravougaoni signal kako bi bili pogodni za poređenje na faznom komparatoru. Signal na izlazu uobličavača signala OCXO-a, nakon disciplinovanja, koristi se kao referentni frekvencijski signal. Kao uobličavač moguće je koristiti Šmitovo okidno kolo, a kako bi se dobile veće strujne mogućnosti moguće je povezati nekoliko kola paralelno.

D. Fazni komparator

Fazni komparator najčešće dolazi kao komponenta unutar PLL (*Phase Locked Loop*) kola. Jedno od najčešće korišćenih kola je 74HCT4046 [6], koje u sebi sadrži tri fazna komparatora. Izlazi tri fazna komparatora su dostupni na pinovima čipa i korisnik može odabrati koji fazni komparator će koristiti u svojoj aplikaciji.

Prvi komparator za poređenje faze signala na ulazima koristi XOR kolo. Pošto ovaj komparator poredi logičke nivoe neophodno je da signali budu sa faktorom ispune 50 %. Na slici 2a, prikazani su ulazni signali, signali dovedeni sa OCXO-a i GPS PPS pina, kao i signal na izlazu prvog faznog komparatora. Signali na ulazu neće imati faktor ispune 50 %, zbog čega ovaj komparator nije adekvatno rešenje za predloženu aplikaciju. Deljenjem oba ulazna signala brojačem, dobio bi se faktor ispune 50 %, ali bi to usložilo hardversku realizaciju.

Drugi komparator koristi D flip flobove i ima tri-stejt izlaz. Ovaj komparator menja stanje na svaku uzlaznu ivicu signala dovedenih na ulaze. Ako prvi signal prednjači, između uzlazne ivice prvog i drugog ulaznog signala, izlaz faznog komparatora će biti na visokom nivou. Ako drugi signal prednjači, između uzlazne ivice drugog i prvog ulaznog signala, izlaz faznog komparatora će biti na niskom nivou. U ostalim slučajevima izlaz faznog komparatora je u stanju visoke impedanse. Na slici 2b, prikazani su ulazni i izlazni signali na drugom faznom komparatoru. Pošto ovaj fazni komparator ne zavisi od faktora ispune signala, on je pogodan za korišćenje u ovoj aplikaciji.

Slično kao i drugi fazni komparator, rad trećeg faznog komparatora ne zahteva faktor ispune 50 %, ali za razliku od njega nema tri-stejt izlaz. Ovaj fazni detektor koristi SR flip flop gde se stanje na izlazu menja na uzlaznu ivicu svakog od ulaznih signala. Na slici 2c, prikazani su ulazni i izlazni signali na trećem faznom komparatoru. Pošto faza signala nije bitna za ovu aplikaciju, upotreba opisanog faznog komparatora za ovu aplikaciju je opravdana [8].

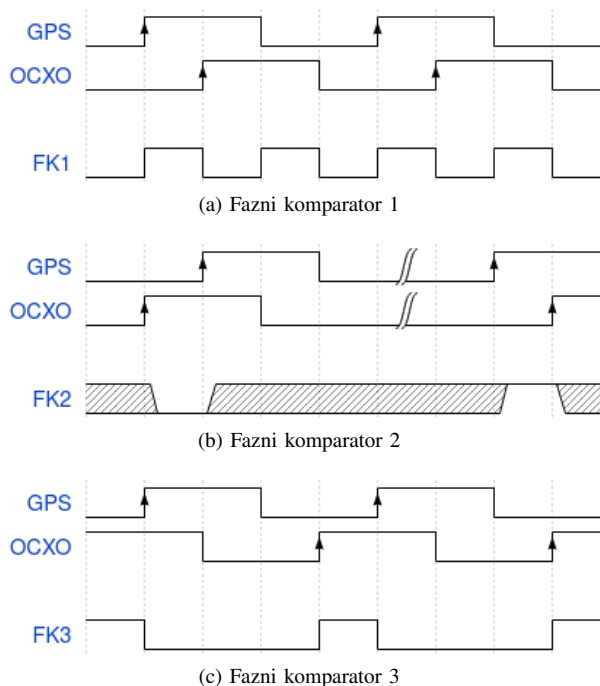


Fig. 2. Signali na ulazu i izlazu faznog komparatora

E. Mikrokontroler

Pre početka rada posredstvom UART protokola mikrokontroler stupa u komunikaciju sa GPS modulom.

Kako bi se pratila vrednost izlaza faznog komparatora neophodno je filtrirati signal niskopropusnim filterom. Ovaj signal se dovodi na AD konvertor, gde se nakon odabiranja signala može odrediti odstupanje. Većina današnjih mikrokontrolera ima AD konvertor kao integralni deo čipa čija je rezolucija najčešće između 10 i 12 bita, pa stoga nije neophodno dodavati spoljašnji AD konvertor. Pošto se na izlazu faznog komparatora nalazi niskopropusni filter, koji integriše rezultat razlike faza, rezolucija internog AD konvertora može zadovoljiti potrebe predloženog uređaja.

Na osnovu izmerenog napona AD konvertorom, odnosno razlike faza, određuje se signal korekcije gde se pomoću DA konvertora vrši fino podešavanje izlazne frekvencije OCXO. Najčešće korišćeni OCXO oscilatori koji rade na 5 V imaju radnu frekvenciju 10 MHz, gde se preko pina za podešavanje može fino podesiti frekvencija ± 2 ppm promenom napona od 0 V (-2 ppm) do 4 V (2 ppm). Za slučaj da se koristi 12-bitni DA konvertor sa referencom 4,096 V, frekvencija se može menjati ± 20 Hz. Očekivana rezolucija promene frekvencije

OCXO-a za ovakvu konfiguraciju je $\approx 9,77$ mHz, odnosno $\approx 0,977$ ppb.

III. PREDLOG FIRMVERA SISTEMA

Na slici 3 dat je predlog algoritma firmvera kojim bi se izvršilo disciplinovanje OCXO-a, signalom sa GPS prijemnika.

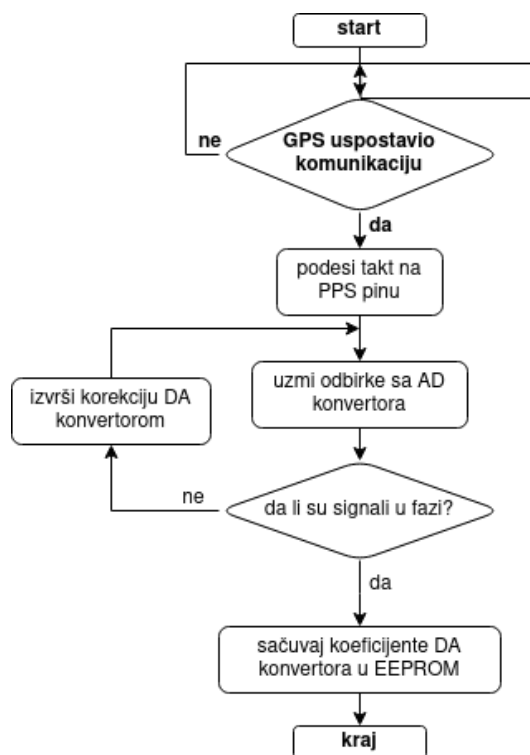


Fig. 3. Algoritam disciplinovanja OCXO-a GPS-om

Pre startovanja rada mikrokontrolera neophodno je sačekati dovoljno vremena da se OCXO zagreje. Procedura zagrevanja najčešće traje od 5 do 15 minuta, ali je preporučljivo da se OCXO zagreva 1 sat kako bi se dosegla što bolja temperaturna stabilnost. Nakon zagrevanja OCXO-a, proverava se da li je GPS prijemnik primio signal sa satelita. Kako bi se uspostavila komunikacija prijemnik mora dobiti signal sa bar 4 satelita, gde na osnovu metode trilateracije određuje parametre pozicije, brzine, vremena itd. Po fiksiranju pozicije, posredstvom UART protokola mikrokontroler podešava takt na PPS pinu koji odgovara nominalnoj frekvenciji OCXO-a.

AD konvertor vrši odabiranje signala sa niskopropusnog filtera na osnovu kog se određuje greška. Unutar mikrokontrolera se na osnovu signala greške može odrediti vrednost korekcije pomoću koje se može vršiti korekcija frekvencije OCXO-a. Kako bi se izvršila korekcija moguće je primeniti PID regulator. Ako postoji odstupanje faza signala, izvršila bi se korekcija DA konvertorom i ciklus se ponavlja sve dok signali nisu u fazi tj. dok frekvencije signala na ulazu faznog komparatora nisu iste.

Pošto je predviđeno da se uređaj koristi u laboratorijskim uslovima u kojima nije moguće dobiti signal sa GPS,

disciplinovanje bi se izvršilo na lokaciji gde je to moguće. Rezultat korekcije DA konvertora bi se čuvao u EEPROM memoriji mikrokontrolera. Prilikom uključivanja etalonskog generatora frekvencije, sačuvana vrednost bi se pročitala i uređaj bi mogao početi sa radom nakon zagrevanja OCXO-a. Po potrebi, korisnik bi mogao započeti rekaliibraciju parametara smeštenih u EEPROM novim ciklusom kalibracije (disciplinovanja).

Na kraju uređaj bi mogao biti povezan sa računarom preko USB ili UART protokola uz implementaciju SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) protokola. Posredstvom računara može se vršiti kontrola etalonskog generatora frekvencije, kao i praćenje statusa.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen predlog za realizaciju izvora frekvencije disciplinovanog GPS-om. Dat je predlog hardverske implementacije i opis svakog od funkcionalnih blokova. Predloženo je firmversko rešenje disciplinovanja OCXO-a GPS-om, kao i predlog rada uređaja nakon disciplinovanja.

Dalji razvoj predloženog rešenja podrazumeva realizaciju hardverskog i firmverskog sistema opisanog u ovom radu. Radi lakšeg korišćenja u laboratorijskim uslovima biće razvijen softver za nadgledanje i kontrolu procesa disciplinovanja OCXO-a. Predloženo rešenje bi bilo implementirano u postojeće metode etaloniranja frekvencometara i generatora frekvencija u Laboratoriji za metrologiju Fakulteta tehničkih nauka i bila bi sprovedena verifikacija. Rezultat verifikacije bi bila potvrda mogućnosti etaloniranja u oblasti vremena i frekvencije.

ZAHVALNICA

Ovo istraživanje (ovaj rad) je podržan(o) od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija kroz projekat broj 451-03-47/2023-01/200156 "Inovativna naučna i umetnička istraživanja iz domena delatnosti FTN-a".

REFERENCE

- [1] 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.
- [2] Penrod, Bruce M. "Adaptive temperature compensation of GPS disciplined quartz and rubidium oscillators." Proceedings of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium. IEEE, 1996.
- [3] Koo, Ki Young, David Hester, and Sehoon Kim. "Time synchronization for wireless sensors using low-cost gps module and arduino." Frontiers in Built Environment 4 (2019): 82.
- [4] Gasparini, Leonardo, et al. "A digital circuit for jitter reduction of GPS-disciplined 1-pps synchronization signals." 2007 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement. IEEE, 2007.
- [5] Malović Miodrag, Ljiljana M. Brajović, i Tomislav Šekara. "Stabilnost frekvencije kvarcnih oscilatora." Zbornik radova LXVI konferencije ETRAN (2022): 846-851.
- [6] Texas Instruments, CD74HCT4046A High-Speed CMOS Logic Phase-Locked Loop with VCO [online]. 2003 [pristupljeno 17.5.2022.]. Dostupno na: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/89915/TI/CD74HCT4046A.html>.
- [7] Pawłowski, Eligiusz, and Piotr Warda. "Method and system for disciplining a local reference oscillator by GPS 1PPS signal." signal 2 (2018): 3.

- [8] W. M. Austin, "CMOS phase-locked-loop applications using the CD54/74HC/HCT4046a and CD54/74HC/HCT7046a." (2002).

ABSTRACT

This paper presents a proposal for the realization of a frequency reference generator disciplined by GPS (Global Positioning System). After the theoretical description, the proposal for the hardware implementation of the system is described in the paper. Each part of the proposed device was analyzed individually. Also, a microcontroller firmware proposal is provided to manage the described hardware.

Proposal for realization of the frequency reference generator disciplined by GPS

Đorđe Novaković, Nemanja Gazivoda, Sanja Mandić,
Zdravko Gotovac, Stefan Mirković