

Nacionalni etalon frekvence in časa

Zoran Svetik, Rado Lapuh, Iztok Visočnik
SIQ — Slovenski institut za kakovost in meroslovje
Področje meroslovja
Tržaška 2, 1000 Ljubljana, Slovenija
tel.: (061) 1778 100, fax: (061) 1778 444, e-mail: zoran.svetik@siq.si

National standard of frequency and time

National standard of frequency and time is realized in the Slovenian Institute of Quality and Metrology (SIQ) as a standard oscillator with an output frequency which is further divided to obtain 1 pps (one pulse per second). In this way both frequency and the time interval unit (second) are defined. The comparison to international standards is carried out by measuring of time signals from GPS (Global Positioning System) satellites using the "quasi common mode" technique.

The paper discusses the measurement setup in SIQ compared to the realization of frequency and time scales at the international level, main sources of uncertainty and future development plans to cover the needs of Slovenian industry.

1. Uvod

V SIQ je enota za čas in frekvenco izvedena kot etalonski oscilator, čigar frekvenca je razdeljena tako, da ima izhodni signal obliko impulzov s periodo 1 sekunde (1 pps, pulse per second – enota časovnega intervala). Izhodni signal se primerja z nacionalnim etalom v Italiji z meritvami GPS časovnih signalov na osnovi "kvazi common view" tehnike, evalviranega sprejemnika in korekcij UTC iz GPS. Trenutno priznana (akreditirana) negotovost realizacije je $5 \cdot 10^{-12}$, ki jo nameravamo do začetka letal 2000 (ob naslednjem akreditacijskem nadzoru) zmanjšati pod $1 \cdot 10^{-12}$. Naši plani za naslednjih nekaj let predvidevajo zmanjšanje merilne negotovosti do nekajkrat 10^{-13} , kar bi po naših ocenah tudi ustrezalo rasti potreb na tem področju v Sloveniji.

2. Etaloni frekvence in časovne skale

Današnja definicija enote za čas (sekunda) je v veljavi od 13. CGPM (1967-1968):

»Sekunda je trajanje 9 192 631 770 period sevanja, ki ustreza prehodu med dvema hiperfinima nivojem osnovnega stanja atoma cezija 133.«

Na srečanju 1997 je CIPM potrdil, da zgornja definicija velja za cezijev atom v osnovnem stanju in pri temperaturi 0 K [5].

Praktična realizacija je danes v skoraj vseh nacionalnih laboratorijih v skladu z definicijo. Le nekaj svetovnih laboratorijev (NIST, PTB) definirajo časovno enoto s primarnimi cezijevimi etaloni (ocenjena negotovost $2 \cdot 10^{-15}$), večina ostalih pa s sekundarnimi cezijevimi etaloni (komercialni ceziji) s primerjavo na primarne cezijeve etalone. Potrebno je poudariti, da je pri sekundarnih cezijevih etaloni potrebna kalibracija njihove izhodne frekvence, čeprav so izdelani tako, da je njihova realizacija v skladu z definicijo. Kakovost te realizacije se potrdi s kalibracijo.

Primerjave frekvenčnih etalonov potekajo preko sistema za satelitsko navigacijo (GPS), kjer različni laboratoriji merijo časovne signale iz cezijevih ur na satelitih in računajo časovne diference na osnovi "common view" tehnike. Mednarodni urad za uteži in mere (BIPM) uvaja tudi komplementaren sistem primerjav preko ruskega GLONASS (Global Navigation Satellite System). Cezijevi etaloni so v osnovi frekvenčni viri, primerjave pa vedno potekajo preko časovnih signalov.

V ta namen je vzpostavljena skala TAI (mednarodni atomski čas), ki predstavlja " ... referenčno časovno koordinato, na osnovi odčitkov atomskih ur, ki delujejo v različnih okoljih, skladno z SI definicijo sekunde" [3]. TAI vzdržuje Bureau International de l'Heure na osnovi uteženega povprečenja približno 230 cezijevih ur v 50 različnih meroslovnih laboratorijih, upošteva njihovo dolgotrajno stabilnost in druge podatke. Za praktično uporabo se upoštevajo korekcije zemeljske rotacije in drugi astronomski vidiki, tako da je naš vsakdanji čas (UTC – universal time coordinated) nekoliko različen od TAI (1. julija 1997 je znašala ta razlika - 31 sekund). Te korekcije se vedno delajo za eno celo sekundo (prestopna sekunda) [1, 3, 5].

Na ta način so med seboj povezani enota časovnega intervala, enota frekvence in absolutni čas, izražen skozi dve časovni lestvici.

Enota frekvence in s tem tudi enota časa po nekaterih značilnostih bistveno odstopa od drugih osnovnih enot SI sistema:

- Definirana je za vsaj 6 dekad bolj točno kot katerakoli druga enota SI sistema; celo nekatere druge osnovne enote so realizirane s pomočjo nje (npr. dolžina, el. tok. posredno);
- Relativno poceni in v široki uporabi je frekvenca ali čas z veliko točnostjo;
- Edina enota SI sistema je, katere realizacijo je mogoče primerjati daljinsko in jo distribuirati.

3. Merilno mesto za realizacijo enote frekvence in časa v SIQ

3.1 Etaloni in pomožna oprema

V SIQ uporabljamo oscilator s cezijevo cevjo kot etalonski vir frekvence. Oscilator s cezijevo cevjo generira frekvence v skladu z definicijo (§ 2), in ima dobro dolgotrajno stabilnost. Cezijeve cevi nove generacije odlikuje tudi izjemno dobra kratkotrajna stabilnost znotraj intervalov, v katerih se izvajajo meritve, ki je bila nekdanj odlika predvsem rubidijevih oscilatorjev (Allanova varianca za 1000 s in več) [1, 4]. Naše meritve kažejo, da je njegova stabilnost preko obdobja več kot 1 meseca znotraj 10^{-13} , pri čemer so tudi kratkotrajni raztrosi (povprečenje preko 3 dni in več) tudi znotraj teh meja. Tudi komercialne cezije je potrebno umerjati oz. imeti stalno vključene primerjavo preko GPS sistema, saj le tako preverjamo kakovost definicije, hkrati pa lahko dosežemo celo boljšo dejansko negotovost, kot je specifikacija proizvajalca. Ker še nimamo evalvacije cezijevega etalona preko daljšega časovnega obdobja, še tudi nismo spreminjali naše akreditirane merilne zmogljivosti.



Slika 1: Nacionalni etalon frekvence in časa

Komercialna izvedba cezijevega etalona ne omogoča neodvisne evalvacije vseh vplivnih

parametrov, zato ga ne moremo šteti kot primarni etalon. Kljub temu pa dosedanje meritve v BIPM kažejo, da je s komercialnim cezijevim etalom, vpetim v GPS sistem stalnih komparacij, ob ustrezni evalvaciji parametrov, ki vplivajo na točnost prenosa signala, možno doseči zeleno negotovost realizacije (§ 1) [3, 5].

V kolikor etalonski oscilator nima že vgrajenega 1 pps delilnika, ga je potrebno še dodati na izhodu za referenčno frekvenco.

3.2 Sistem za izvajanje primerjav

Sistem za izvajanje primerjav je osnovan na sprejemniku časovnih signalov iz GPS satelitov in števcem časovnih intervalov.

Sistem za globalno pozicioniranje (GPS) je razvila ameriška vojska, služi pa v osnovi za pozicioniranje, geodezijo, določanje hitrosti (predvsem letal) in distribucijo časa. Skupina 24 satelitov drugega bloka, ki krožijo okrog zemlje (za razliko od komunikacijskih satelitov niso geostacionarni) na takšen način, da je na vsaki točki zemeljske oble možno istočasno videti vsaj 4 satelite (kolikor potrebuje GPS sprejemnik za rešitev enačbe s štirimi neznankami, s katero se dobijo prostorske in časovne koordinate) je opremljena vsak z več frekvenčnimi etaloni, povečini vsaj s po enim cezijevim. Njihove signale spremlja, nadzoruje in korigira USNO (United States Naval Observatory), dopolnjuje pa se s podatki, ki jih zbira BIPM, Observatoire de Paris in drugi [1, 4].

Leta 1978 je bil v orbito v celoti poslan eksperimentalni »blok I« satelitov, ki danes ni več operativen (signali so izključeni), leta 1993 pa je bil v celoti operativen »blok II«, ki danes tvori GPS sistem. Blok II ima za razliko od predhodnika namenoma popačen signal, tako da je negotovost časovnega signala blizu $1 \mu\text{s}$ (pozicija 300 m in več), s čimer postane sistem neuporaben za posebne vojaške namene (npr. določanje pozicije in hitrosti letočih oz. hitro premikajočih se objektov). Večina današnjih GPS sprejemnikov za namene distribucije časa z določenimi prijemi zmanjšuje to negotovost do 150 ns, kar omogoča pri celodnevnem povprečenju negotovost frekvence okrog $1 \cdot 10^{-12}$, pri daljšem povprečenju pa tudi boljše, odvisno od kakovosti referenčnega oscilatorja.

Za najpreciznejše primerjava specifiira BIPM »common view« tehniko, kjer dva laboratorija, ki imata oba dovolj točno določene prostorske koordinate, istočasno merita časovni signal iz istega satelita in določata zgolj časovno diferenco med časovnima skalama, ki jih vzdržujeta vsak zase na

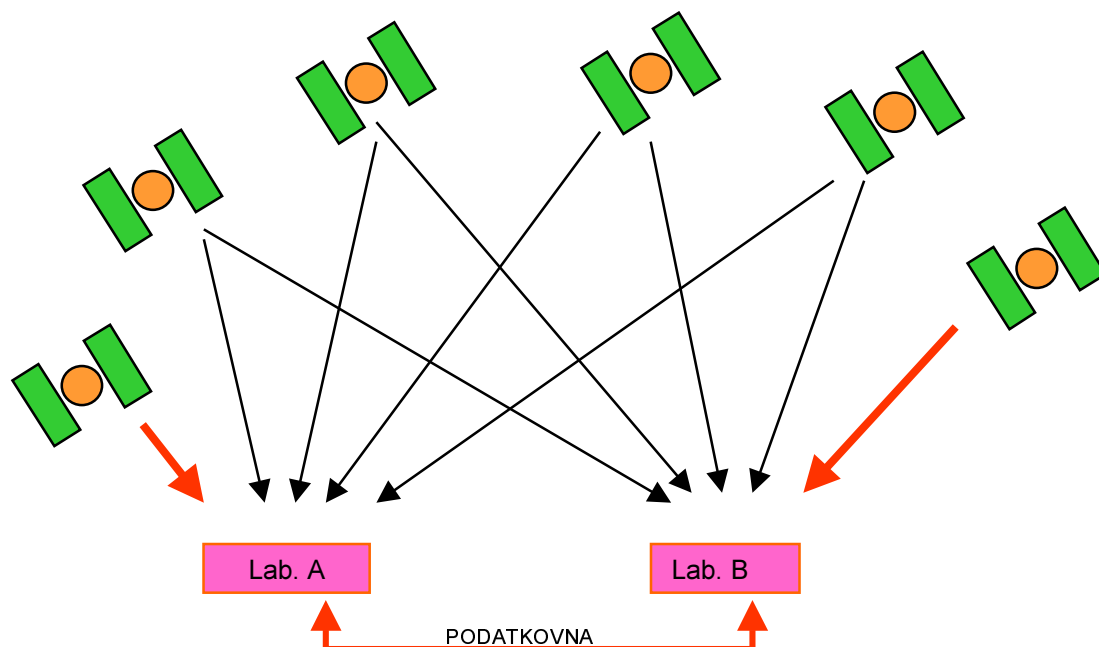
osnovi referenčnih etalonov frekvence. S tem se poleg namernega popačenja signala (SA – selective availability) zmanjša negotovost časovnih zamikov zaradi ionosferskih vplivov. V zadnjih letih se je, ob še boljšem poznavanju dejanskih efemerid posameznih satelitov v najboljših primerih negotovost primerjave zmanjšala na 5 ns oz. do $1 \cdot 10^{-15}$ pri primerjavi frekvenc.

Ta tehnika je se uporablja znotraj regij, medkontinentalno pa se uporabljajo dvosmerne povezave preko komunikacijskih satelitov med Observatoire de Paris v Evropi, National Institute of Standards and Technology v Boulderju, ZDA in Communications Research Laboratory na Japonskem.

Leta 1997 so Združene države pričele z lansiranjem izpopolnjenih GPS satelitov, t.im. »Blok 2R«, v naslednjih 5 do 10 letih pa se predvideva tudi umik »selektivne dostopnosti«. Prav tako

spodbuja BIPM nacionalne laboratorije, da začnejo vršiti primerjavo preko ruskega sistema GLONASS, ki predstavlja paralelo ameriškemu sistemu, z določenim fiksnim odmikom glede na UTC, vendar brez namernega popačenja (SA).

V SIQ vršimo komparacijo glede na UTC, ki ga realizirajo v italijanskem nacionalnem meroslovnem inštitutu IEN. Zaradi relativne bližine z večkanalnim GPS sprejemnikom vidimo istočasno v glavnem isto skupino satelitov, tako da uporabljamo t. im. »quasi common view« ali »melting pot« tehniko. Ta je kar se negotovosti tiče nekoliko slabša od čiste »common view« tehnike, zaradi specifičnosti zahtev za »common view« sprejemnike pa bistveno cenejša in zaenkrat predstavlja le neznamen del merilne negotovosti v naši realizaciji etalona.



Slika 2: Primerjava frekvenčnih etalonov preko GPS sistema kot ga uporabljamo v SIQ

3.3 Meritev časovnih intervalov

3.3.1 Komparacija frekvence, splošno

Primerjavo frekvence izvajamo posredno preko primerjave časovnih (1 pps) signalov preko določenega časovnega obdobja s pomočjo specializiranega elektronskega števca časovnih intervalov. Če sta dve frekvenci, ki ju med seboj primerjamo, povsem enaki, potem bo faza (časovna diferenca) med časovnima signaloma vedno enaka, sicer pa se bo spreminjala. Velja relacija:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

S parcialnim odvajanjem in normalizacijo glede na osnovno frekvenco dobimo:

$$\frac{df}{f} = -\frac{dT \cdot 1/T^2}{1/T} = -\frac{dT}{T} \quad (2)$$

Časovni interval t_i , ki ga izmerimo s števcem časovnega intervala nT sekund po prvem odčitku, je definiran z enačbo:

$$t_i(nT) = t_i(0) + n \cdot \Delta t_x \quad (3)$$

kjer je :

t_i odčitek števca časovnega intervala,

T perioda ene sekunde,

n število period ene sekunde, ki je minilo,

Δt_x pogrešek časovnega signala 1 pps z neznanom frekveco,

Relativno odstopanje neznane frekvence se potem izračuna:

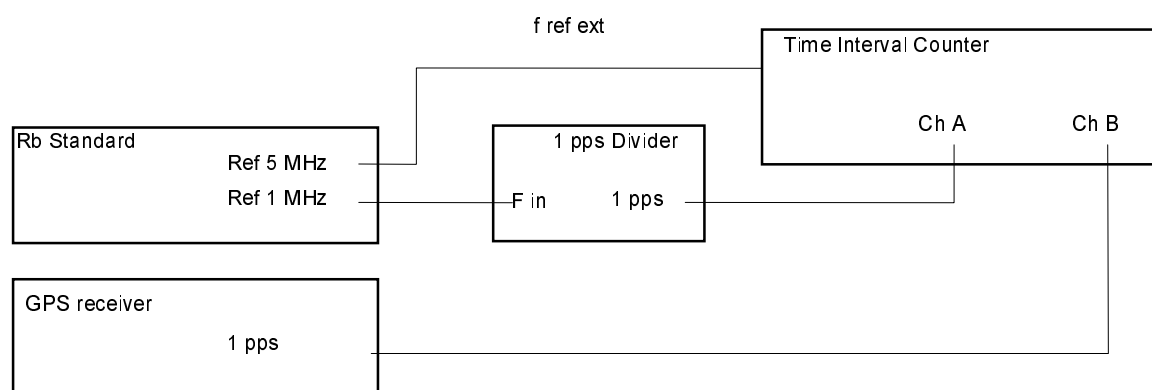
$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{t_i(nT) - t_i(0)}{nT} = -\frac{\overline{\Delta t_x}}{T} \quad (4)$$

3.3.2 Meritev z linearizacijo časovnih odmikov preko obdobja 24 ur

Če v skladu z enačbo (4) povprečimo meritve časovnega intervala preko krajših obdobj, npr. 1000 s ($n_i = 1000, i = 1, 2, 3, \dots, k$), kjer je k število, ki ustreza celotnemu številu meritev v obdobju najmanj 24 h, to je:

$$\tau = \sum_{i=1}^k n_i \cdot T \text{ npr, } k = 85, n_i = 1000, \tau = 85000 \text{ s}$$

uporabimo vgrajeno funkcijo števca časovnega intervala za povprečenje meritev vsakih n_i . Preko k merjenih vrednosti pa uporabimo metodo linearne regresije, kjer je izračunana strmina premice enaka $-\Delta f/f$. Standardni odmik ($u_A = 2\sigma$) se dobi neposredno iz regresijskega algoritma in je merilo stabilnosti tako etalona kot tudi neznanega oscilatorja med meritvami.



Slika 3: Merjenje frekvence preko merjenja časovnih intervalov

Zgornjo metodo uporabljamo pri kalibraciji frekvenčnih etalonov naših strank.

Pri določanju vrednosti našega referenčnega etalona, ko se vršijo primerjave preko GPS sistema, se zgornji postopek spremeni le v toliko, da je število meritev preko enega dneva natanko 24 ($k = 24$). V vsaki uri se izvrši le ena meritev iz $n_i = 1000$ vzorcev (sekund), ki se začne na vsako polno uro, sinhronizirano z UTC, ki ga dobimo preko GPS. To je pomembno zaradi tega, da lahko referenčni laboratorij (IEN) vnese korekcije za UTC iz GPS, ki zaradi načrtna modulacije odstopa.

V praksi se pri obeh metodah vrši stalna komparacija na enak način, razlikuje se zgolj način izračunavanja rezultatov.

4. Merilne negotovosti in rezultati

4.1 Splošni izraz

Merilna negotovost, izračunana za tip B (2 s), je

$$u_B = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \quad (5)$$

- u_1 negotovost frekvenčnega etalona
- u_2 negotovost števca časovnega intervala
- u_3 negotovost 1 pps delilnika

4.2 Frekvenčni etalon

Negotovost etalona podamo na sledeč način:

$$u_1 = u_c + u_a \quad (6)$$

kjer je

u_c kalibracijska negotovost

u_a kratkotrajna stabilnost (Allanova varianca)

Glede na to, da vrednost etalona stalno primerjamo na 1 pps signal iz GPS sprejemnika, ni potrebno upoštevati dolgotrajne stabilnosti.

Meritve kratkotrajne stabilnosti za čase meritve med 10.000 s in 100.000 s (več kot en dan) kažejo, da je Allanova varianca manjša kot $1 \cdot 10^{-13}$.

Meritve smo izvedli predhodno tudi na rubidijevem etalonu (tabela 1), ki je skladno s teorijo tudi pokazal na zelo dobro kratkotrajno stabilnost.

Nastavitev GATE TIME frekv. števca	u_a , kratkotrajna stabilnost
0,1 s	$8,1 \cdot 10^{-11}$
1 s	$8,3 \cdot 10^{-12}$
10 s	$3,0 \cdot 10^{-12}$
100 s	$5,5 \cdot 10^{-13}$
1000 s	$2,0 \cdot 10^{-13}$

10.000 s | $1,2 \cdot 10^{-13}$

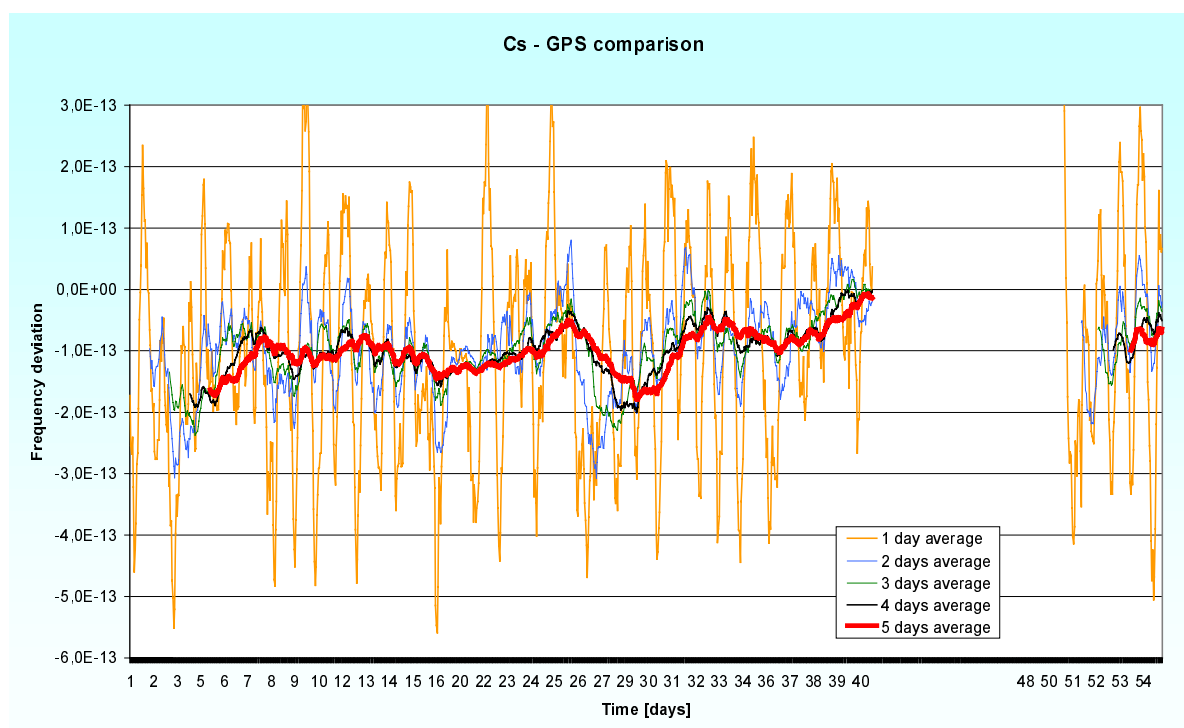
Tabela 1

Evalvacija našega GPS sprejemnika, ki jo je izvedel italijanski IEN, potrjuje negotovost v prisotnosti selektivne dostopnosti (SA) glede na UTC boljšo kot 150 ns. SA je sestavljen iz kratkotrajne stabilnosti (šum), ki ga s povprečenjem v celoti odpravimo, in dolgotrajne stabilnosti s periodo približno 210 dni. V najslabšem primeru, brez kratkotrajnega filtriranja, bi 150 ns ustrezalo $2,5 \cdot 10^{-12}$ pri meritvi frekvence.

Primerjava merilnih rezultatov in kalkulacija neposredno na časovni signal, izmerjen iz GPS, s kalibracijskim rezultatom, ki nam ga je podal IEN, kaže na razlike velikostnega reda $1 \cdot 10^{-13}$, kar pomeni, da lahko svojim meritvam glede na GPS v celoti zaupamo. Ta rezultat se nanaša na srednjo vrednost čez obdobje slabih dveh mesecev brez

opaznega lezenja v katerokoli smer. Posamezni enodnevni rezultati pa kažejo na raztros približno $3 \cdot 10^{-13}$, negotovost realizacije UTC v IEN pa je $1 \cdot 10^{-13}$. Seveda takšno ujemanje lahko pripišemo tudi izredno dobri kratkotrajni stabilnosti obstoječega etalona.

Negotovosti števca časovnega intervala in 1 pps delilnika sta zanemarljivi (manj kot 1 ns).



Slika 4: Rezultati primerjave cezijevega etalona preko GPS sistema

5. Razvojne perspektive

Razvojno delo v prvem obdobju predvideva predvsem nadaljnjo evalvacijo cezijevega referenčnega etalona. V nadaljevanju so predvidene nove metode komparacije frekvence, ki vključujejo proučevanje »carrier phase tracking« GPS sprejemnikov in komparacije v »common view« načinu.

Proučujemo možnosti distribucije frekvenčnih in časovnih signalov preko telekomunikacijskih linij drugim uporabnikom. Mnoge države uporabljajo v ta namen pasivno TV metodo, ki pa se v naših razmerah ne zdi več optimalna. Neodvisni uporabniki si lahko pomagajo z GPS discipliniranim oscilatorjem, s katerim se da doseči negotovosti velikostnega reda $1 \cdot 10^{-11}$, predhodno pa ga je potrebno evalvirati skozi kratkotrajno opazovanje (npr. 2 meseca) v metrološkem laboratoriju.

Literatura

- [1] B. Bezek: *Sledljivo merjenje časa in frekvence*. Predavanje na drugi Elektrotehniški in računalniški konferenci ERK '93, 27. - 29. september 1993, Portorož, Slovenija (ni objavljeno v zborniku)
- [2] B. Bezek, Z. Svetik: *GPS kot nacionalni etalon časa in frekvence*. Zbornik tretje Elektrotehniške in računalniške konference ERK '94, 26. - 28. september 1994, Portorož, Slovenija
- [3] Proceedings of the 20th Conference Generale de Poids et Mesures (1995)
- [4] Hewlett Packard Application Note 1289: *The Science of Timekeeping* (1997)
- [5] Bureau International des Poids et Mesures: *The International System of Units*, 7th edition, 1998