

Tommi Korhonen

Uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuuden vertailu GPS-sekuntipulssiin

Insinööriö
Kajaanin ammattikorkeakoulu
Tekniikka ja liikenne
Tietotekniikka
Kevätlukukausi 2009



Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Tommi Korhonen	
Työn nimi Uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuuden vertailu GPS-sekuntipulssiin	
Vaihtoehtoiset ammattipinnot Mittausjärjestelmät	Ohjaaja(t) Jukka Heino
	Toimeksiantaja Ismo Talus
Aika 14.2.2009	Sivumäärä ja liitteet 36
<p>Insinööriytyön tavoitteena oli tutkia Agilent 53131A -uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuutta verrattuna GPS-sekuntipulssiin. Insinööriytyön toimeksiantaja oli laboratorioinsinööri Ismo Talus ja työn ohjaajana toimi tietoliikennetekniikan lehtori Jukka Heino. Taajuusstabiilisuuden vertailu tapahtui uunikideoskillaattorin referenssisignaalin ja GPS-sekuntipulssin vaihevertailuna. Tutkimuksessa saatuja tuloksia voidaan käyttää uunikideoskillaattorin uudelleen kalibrointiin. Saatujen tulosten perusteella voidaan tulevaisuudessa myös synkronisoida uunikideoskillaattori GPS-sekuntipulssiin.</p> <p>Insinööriytyötä varten suunniteltiin ja toteutettiin mittauslaitteisto ja -ohjelmisto. Laitteistoon kuuluu piirilevy, jolla uunikideoskillaattorin 10 MHz:n referenssisignaali jaetaan 1 Hz:n signaaliksi. Tätä signaalia verrataan GPS-moduulista saatavaan sekuntipulssiin. Signaalien vaihevertailu tapahtuu National Instruments cRIO-reaaliaikajärjestelmän FPGA-yksikössä. Reaaliaikajärjestelmä ohjelmoitiin LabVIEW 8.5 -ohjelmalla. Mittaustulokset lähetettiin lähiverkon yli verkkolevylle.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena ilmeni, ettei uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuus ole enää valmistajan spesifikaatioiden mukainen. Uunikideoskillaattorin taajuusvirhe johtuu luultavasti siitä, että oskillaattoria on liikuteltu ja sitä ei ole kalibroitu viiteen vuoteen. Tutkimuksen tuloksia tulisi käyttää uunikideoskillaattorin uudelleen kalibrointiin. Työssä käytettyä laitteistoa voisi myös tulevaisuudessa kehittää ja käyttää sitä synkronoimaan uunikideoskillaattori GPS-sekuntipulssiin. Tämä toimenpide nostaisi uunikideoskillaattorin tarkkuutta huomattavasti.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Ajan vertailu, GPS-sekuntipulssi, uunikideoskillaattori, taajuusstabiilisuus
Säilytyspaikka	<input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Tommi Korhonen	
Title Frequency Stability of the Oven Crystal Oscillator against the GPS One Second Marker	
Optional Professional Studies Measurement Systems	Instructor(s) Mr Jukka Heino, Lecturer
	Commissioned by Mr Ismo Talus, Laboratory Engineer
Date 10 February 2009	Total Number of Pages and Appendices 36
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to examine the frequency stability of the Agilent 53131A oven crystal oscillator against the GPS one second marker. The thesis was commissioned by Mr Ismo Talus, the laboratory engineer. The frequency stability was examined by comparing the phase difference of the second markers. The results of the thesis can be used to recalibrate the oscillator. The results can also be used to synchronize the oscillator to the one second marker.</p> <p>For the thesis hardware and software were designed and implemented. The hardware divides a 10 MHz reference signal into one second marker. The GPS one second marker is received from the GPS module. The actual comparison of these second markers was performed in the National Instruments cRIO real time controller. The required precision of comparing was given by the real time controller's FPGA unit. The real time controller was programmed by National Instruments' LabVIEW 8.5. The results were transmitted over the Ethernet at the network drive where they could be examined.</p> <p>As a result, it was found out that the frequency stability of the oscillator was not within the specifications. The frequency error of the oscillator was probably caused by the movement of the oscillator. The oscillator was calibrated five years ago and it also caused the error. The results of the thesis should be used to recalibrate the oscillator. In the future, the hardware to synchronize the oscillator to the GPS one second marker could be developed.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Timekeeping, GPS One Second Marker, Oven Crystal Oscillator
Deposited at	<input type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

ALKUSANAT

Insinööriyön tekeminen alkoi työharjoittelussa Kajaanin ammattikorkeakoululla keväällä 2008, jolloin sain aiheen Jukka Heinolta. Keväällä työhön suunniteltiin piirilevyä erilaisilla testauksilla. Työn aloittaminen aikaisin keväällä edisti työn valmistumista huomattavasti. Kesä 2008 menikin tiukasti kesätöiden parissa, jolloin työhön ei ollut aikaa paneutua muutoin kuin ajatustasolla. Niinpä suurin osa työstä tapahtui syksyllä 2008 ja keväällä 2009.

Työn valmistumisen kannalta suurin apu on tullut Jukka Heinolta, suuret kiitokset siitä. Työssä käytettävän National Instruments cRIO-reaaliaikajärjestelmän käytössä sain paljon apua projekti-insinööri Katja Karjalaiselta, jolle osoitan myös suuret kiitokset. Työn tekeminen on ollut todella opettavaista ja mielenkiintoista. Lopuksi haluan kiittää myös perhettäni, joka on jaksanut olla tukena työtä tehdessä.

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 AJAN JA TAAJUUDEN YLLÄPITO	2
2.1 Ajan historiaa	2
2.2 Ajan ylläpidon määritelmiä	4
2.2.1 Aurinkoaika (ST)	4
2.2.2 Greenwichin keskiaika (GMT)	6
2.2.3 Kansainvälinen atomiaika (TAI)	7
2.2.4 Koordinoitu yleisaika (UTC)	7
2.2.5 GPS-aika (GPST)	8
2.3 Ajan ylläpidon menetelmiä	8
2.3.1 Aurinkokellot	9
2.3.2 Vesikellot	10
2.3.3 Mekaaniset kellot	11
2.3.4 Kvartsikidekellot	13
2.3.5 Atomikellot	14
2.4 Ajan ylläpitäminen	16
2.4.1 Primäärinormaali	17
2.4.2 Sekundäärinormaali	20
3 AJAN VERTAILU	21
3.1 Suora taajuusvertailu	21
3.2 Vaihevertailu	22

4 TOTEUTUS	24
4.1 Laitteiston esittely	24
4.1.1 Referenssisignaalin jakaminen	25
4.1.2 National Instrumentsin cRIO -reaaliaikajärjestelmä	27
4.2 Vaihe-eron mittaamiseen käytetty ohjelma	29
5 TULOSTEN TARKASTELU	31
5.1 Simulointi	31
5.2 Saadut tulokset	33
6 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	35
LIITTEET	

1 JOHDANTO

Insinööriyön tavoitteena on tutkia Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa sijaitsevan Agilent 53131A-uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuutta verrattuna GPS:n sekuntipulssiin. Ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa voidaan suorittaa yleisimpiä radiotekniikkaan liittyviä mittauksia. RF-laboratoriossa on ollut käytössä uunikideoskillaattori jo viiden vuoden ajan, eikä sitä ole kertaakaan kalibroitu. Työllä pyritään selvittämään, kuinka tarkka uunikideoskillaattori todellisuudessa on ja onko se syytä kalibroida. Koska uunikideoskillaattorilla synkronoidaan muutkin RF-mittalaitteet, vaikuttaa sen taajuusvirhe siten myös muihin mittalaitteisiin.

Idean työhön antoi tietoliikennetekniikan lehtori Jukka Heino, joka on vastuussa RF-laboratorion laitteistosta. Jukka Heino toimii myös työn valvojana. Työn varsinainen tilaaja on laboratorioinsinööri Ismo Talus.

Työ perustuu yksinkertaisesti tarkkaan ajan vertailuun. Työn alussa perehdytään ajan mittauksen historiaan, joka antaa hyvän käsityksen siitä, miten mittausmenetelmät ovat kehittyneet tuhansien vuosien kuluessa. Ensimmäisiä mittausvälineitä olivat taivaankappaleet ja erilaiset aurinkokellot. Tuhansien vuosien aikana mittaustekniikka on kehittynyt ja on päästy atomikelloihin, joiden tarkkuus on käsittämättömän korkea. Atomikellot ja niiden toiminta liittyykin suoraan työhön, koska GPS-satelliiteista saatava sekuntipulssi muodostetaan atomikelloilla. Varsinainen mittaus suoritetaan uunikideoskillaattorin referenssisignaalin ja GPS:n sekuntipulssien nousevien reunojen välisenä vaihe-eromittauksena. Työssä kuvailaan myös yleisin tapa mitata taajuuseroja sekä työssä käytetty menetelmä. Työn aikana johdettiin myös yleinen taajuusstabiilisuuden vertailukelpoisen numeerisen arvon antava kaava.

Käytännön toteutuksena tehtiin mittausjärjestelmä käyttäen National Instrumentsin cRIO-9004-reaaliaikajärjestelmää. Uunikideoskillaattorin 10 MHz:n referenssisignaali jaetaan 1 Hz:n signaaliksi, jolloin sitä voidaan suoraan verrata GPS:n sekuntipulsseihin. Näiden signaalien vaihe-eroa mitataan reaaliaikajärjestelmän FPGA-yksiköllä, jolla päästään tarvittavaan mittausresoluutioon. Saaduista tuloksista muodostetaan LabVIEW-ohjelmalla taulukoita, jotka tallennetaan ammattikorkeakoulun lähiverkon O:\-asemalle. Mittausjärjestelmä on myös yleiskäyttöinen, ja sillä voidaan mitata periaatteessa minkä tahansa signaalien vaihe-eroa.

2 AJAN JA TAAJUUDEN YLLÄPITO

2.1 Ajan historiaa

Vuoden pituutta on määritelty jo yli 3000 vuotta sitten. Vuosi määritellään aikana, jonka maapallolta kestää kiertää Aurinko. Alun perin vuoden pituutena pidettiin 360 vuorokautta. Muinaiset egyptiläiset huomasivat yli 2000 vuotta sitten, että Siriuksen nousu tähtitaivaalle merkitsee Niilin tulvahuippua. Tämän ilmiön huomattiin toistuvan 365 ja $\frac{1}{4}$ päivän välein. Nykyään vuoden pituudeksi määritellään 365 vuorokautta, 5 tuntia ja 49 minuuttia. Vuosi voidaan määritellä erilaisten vertailukohtien avulla, jolloin vuoden pituudelle saadaan erilaisia arvoja. [1.]

Sideerinen vuosi on Maan todellinen kiertoaika Auringon ympäri kiintotähtien suhteen. Sen pituus on 365,2564 vuorokautta. [1.]

Trooppinen vuosi on Maan asukkaiden kannalta luonnollisin vuosi, sillä sen mukaan vaihtelevat vuodenaajat. Vuodenaikoihin vaikuttaa erityisesti Maan pyörimisakselin suunta. Maan pyörimisakselin kiertymisen, eli prekession vuoksi tämä suunta muuttuu hitaasti rata-
liikkeelle vastakkaiseen suuntaan. Siksi trooppinen vuosi tulee täyteen hieman ennen kuin täysi sideerinen vuosi on ehtinyt kulua. Trooppisen vuoden pituus on 365,2422 vuorokautta. Tämä on se jakso, jota kalenterivuoden tulisi seurata mahdollisimman tarkkaan. Ongelmana on se, ettei trooppisen vuoden pituus ole tasan jaollinen päivän pituudella. [1.]

Anomalistinen vuosi on aika esimerkiksi perihelistä seuraavaan (periheli on piste, jossa planeetta on lähinnä Aurinkoa). Muiden planeettojen aiheuttamien häiriöiden vuoksi Maan rata-
ellipsin asento kiertyy rataliikkeen suuntaan, joten Maan anomalistinen vuosi on hieman sideeristä pitempi, 365,2596 vuorokautta. [1.]

Kalenterivuosi on keinotekoinen ajanlaskua varten määritelty vuosi. Kalentereissa vuoden pituus on kokonainen määrä vuorokausia. Jotta kalenterivuosi saataisiin keskimäärin vastaamaan vuodenaikojen vaihtelua, täytyy joihinkin vuosiin lisätä ylimääräisiä karkauspäiviä. Juliaanisessa kalenterissa joka neljänteen vuoteen lisättiin yksi karkauspäivä, joten juliaanisen kalenterivuoden keskimääräinen pituus on 365,25 vuorokautta. Gregoriaanisessa kalenterissa karkauspäiviä on hieman vähemmän; sen keskimääräinen pituus 365,2425 vuorokautta on jomelko lähellä trooppista vuotta. [1.]

Kuuvuosi on 12 synodista kuukautta, 354,367 vuorokautta (354 d 8 h 48 min 33,6 s). Synodinen jakso tai synodinen kiertoaika on aikaväli, jonka jälkeen kolmen kappaleen keskinäinen asema toistuu samanlaisena vaikka mahdollisesti eri asennossa. [2.]

Kuukaudella tarkoitettiin alun perin Kuun kautta. Yli 3000 vuotta sitten kuukaudet määriteltiin taivaalta näkyvistä Kuun kierron eri vaiheista. Uusi kuukausi alkoi, kun Kuun sirppi nousi iltataivaalle. Kuun vaiheiden tarkka jakso on 29,5 vuorokautta, jonka takia kuukausien pituudet vaihtelivat 29:n ja 30 vuorokauden välillä vuorotellen. Egyptissä määriteltiin 2500 vuotta sitten kuukauden pituudeksi 30 päivää, mutta vuoden pituus vaihteli 365:n ja 366 päivän välillä. Lisäksi vuoden loppuun lisättiin 5 tai 6 päivää, jolloin vuoden pituus täsmäsi luonnonilmiöiden kanssa. [1.]

Rooman keisari Julius Caesar puolestaan uudisti ajanlaskun 100-luvulla eaa. Tässä yhteydessä kuukaudet saivat nykyiset pituutensa, sillä egyptiläisten vuoden loppuun lisäämät ylimääräiset vuorokaudet jaettiin nyt tasaisemmin koko vuodelle, eli aina kuukauden loppuun. Tuohon aikaan vuoden viimeinen kuukausi oli helmikuu ja siksi se jäi lyhyemmäksi. [1.]

Vuonna 200 eaa. kreikkalainen tähtitieteilijä Hipparkhoks määritteli vuorokauden vaihtuvan keskiyöllä. Vuorokaudet on johdettu suoraan Auringon liikkeistä. Viikot ovat taas ihmisen oma keksintö, niiden taustalla on viisi tunnettua planeettaa, Aurinko ja Kuu. [1.]

Vuorokausi on Maan pyörähdysaika akselinsa ympäri. Maan pyörähdysaika ympäröivän tähtiavaruuden suhteen on 23 tuntia 56 minuuttia 4,1 sekuntia. Tätä nimitetään tähti-vuorokaudeksi eli sideeriseksi vuorokaudeksi (tähti-aika). Elämä maapallolla on riippuvainen pimeän ja valoisan ajan vaihteluista. Pyörähdysaikaa Auringon suhteen nimitetään aurinko-vuorokaudeksi. Vuorokaudella tarkoitetaan normaalisti keskiaurinkovuorokautta, jonka pituus on 24 tuntia. [3.]

Egyptiläiset määrittivät yli 3000 vuotta sitten aurinkokellon avulla vuorokauden. Vuorokausi koostui kymmenen tunnin mittaisesta ajasta, joka kesti auringonnoususta auringonlaskuun, kaksi tuntia määriteltiin hämärän ajaksi ja kaksitoista tuntia määriteltiin yöksi. [4.]

Joskus 300–100 eaa. babylonialaiset suorittivat astronomisia laskutoimituksia 60-kantaiseen lukujärjestelmään perustuvalla seksagesimaali menetelmällä. Tämä oli erittäin kätevä tapa ajan jakamiseen, koska 60 on jaollinen luvuilla 2, 3, 4, 5, 6 ja 10. Tästä johtuen minuutti juontuu ensimmäisestä seksagesimaalin murtoluvun paikasta ja sekunti toisesta murtoluvun paikasta. [4.]

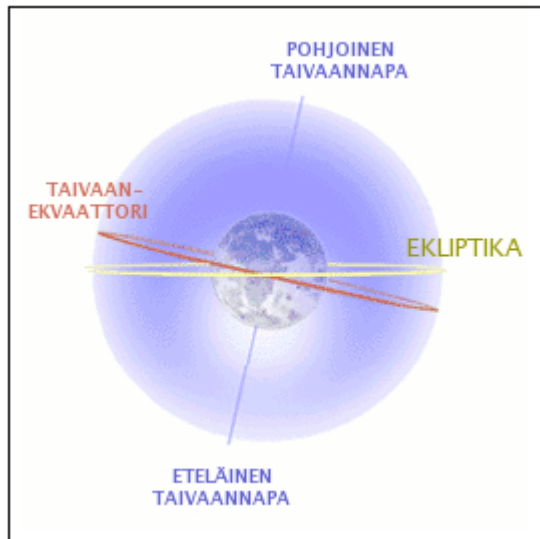
2.2 Ajan ylläpidon määritelmiä

Ajan ylläpitämisessä on monenlaisia eri määritelmiä. Tässä esitellään yleisimmät ja työn kannalta tärkeimmät määritelmät.

2.2.1 Aurinkoaika (ST)

Koska jokapäiväinen elämä perustuu päivän ja yön vaihteluihin, ajan mittaamiseen on kaikkein luonnollisinta käyttää Auringon näennäistä liikettä. Aurinkoaika on paikallista aikaa, joka riippuu havaintopaikan pituusasteesta. Auringon mukaan mitattu aika ei kuitenkaan ole tasaista. Tähän on kaksi syytä, jotka ovat seurausta Maan rataliikkeestä Auringon ympäri:

- 1) Maan rata ei ole aivan ympyrä, vaan ellipsi, ja siten Maan nopeus radallaan ei ole vakio. Niinpä Auringonkaan näennäinen nopeus ei ole vakio.
- 2) Aurinko näyttää liikkuvan ekliptikaa (kuva 1) eikä ekvaattoria pitkin, ja siksi sen rektaskensio eli kulmaetäisyys taivaanekvaattoria pitkin kevättasauspisteestä vastapäivään ei kasva tasaisesti. Nopeimmin Auringon rektaskensio kasvaa joulukuun lopulla (4 min 27 s vuorokaudessa) ja hitaimmin syyskuun puolivälissä (3 min 35 s vuorokaudessa). Samoin myös aurinkoajan määräävä Auringon tuntikulma kasvaa epätasaisella nopeudella. [2.]



Kuva 1. Ekliptika ja taivaan ekvaattori. [5.]

Tasaisesti etenevän aurinkoajan löytämiseksi määritellään kuviteltu keskiaurinko, jonka projektiota taivaan ekvaattorilla liikkuu tasaisella kulmanopeudella täyden kierroksen yhdessä vuodessa. Vuosi tarkoittaa tässä trooppista vuotta, joka on Auringon kiertoaika kevättasauspisteestä kevättasauspisteeseen. Trooppisen vuoden kuluessa Auringon rektaskensio kasvaa siis tasan 24 h. Koska kevättasauspiste siirtyy prekession vaikutuksesta, tämä poikkeaa siderisestä vuodesta, jonka kuluessa Aurinko tekee täyden kierroksen tähtien suhteen. [2.]

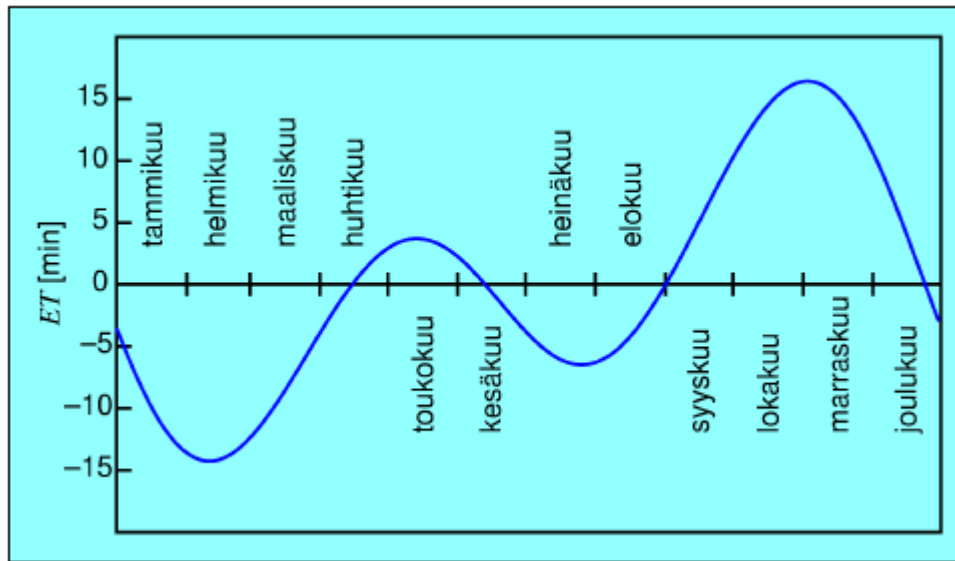
Keskiauringon avulla määritellään nyt tasaisesti kasvava keskiaurinkoaika eli keskiaika T_M , joka tarkoittaa keskiauringon keskipisteen tuntikulmaa h_M (lisättynä 12 tunnilla, jotta vuorokausi saadaan tähtitieteilijöiden harmiksi alkamaan keskiyöllä)

$$T_M = h_M + 12 \text{ h.} \quad (1)$$

Todellisen aurinkoajan T ja keskiajan T_M välistä eroa kunakin hetkenä sanotaan ajan-tasaukseksi (Equation of Time)

$$\text{E.T.} = T - T_M. \quad (2)$$

Sen suurin positiivinen arvo on noin 16 min ja suurin negatiivinen noin -14 min. Tämän verran on siis eroa esimerkiksi todellisen Auringon mukaan lasketun puolipäivän (Auringon yläkulminaation) ja keskiaurinkopuolipäivän välillä (kuva 2). [2.]



Kuva 2. Auringon yläkulminaation ja keskiaurinkopuolipäivän välinen ero. [2.]

2.2.2 Greenwichin keskiaika (GMT)

Greenwichin keskiaika (Greenwich Mean Time) on Greenwichin paikallinen keskiaurinkoaika eli pituuspiiriä 0° vastaava keskiaurinkoaika. [2.]

Englannissa sijaitseva Greenwich on ollut Greenwichin keskiajan koti vuodesta 1884 alkaen. GMT:tä kutsutaan joskus myös Greenwichin pituuspiirijaksi, koska sitä mitataan Greenwichin pituuspiiriltä kuninkaallisessa observatoriossa, joka sijaitsee Greenwichissä. Greenwich on paikka, josta kaikki aikavyöhykkeet mitataan. [6.]

Greenwichin pituuspiiri on alkupiste kaikille maailman aikavyöhykkeille, jotka määräävät päivän ajan, ja se on keskellä aikavyöhykekarttaa. GMT on keskiarvo ajasta, joka maapallolla menee pyörähtääkseen keskipäivästä keskipäivään. GMT on kansainvälinen aika, maailman kellonajan perusta. Se on myös sotilaallisen ajan perusta, ja sitä kutsutaankin joskus Zuluajaksi. GMT määrittelee päivämäärän ja kellonajan kullakin hetkellä. Nykyisiä atomikelloja säädetään karkaussekunneilla, jotta ne pysyvät GMT:n tahdissa. Nykyisin GMT:n on korvannut UTC (Coordinated Universal Time). [6.]

2.2.3 Kansainvälinen atomiaika (TAI)

Vuonna 1977 taivaankappaleiden liikkeisiin perustuva aika (Efemeridiaika, ET) korvattiin kansainvälisellä atomiajalla (Temps Atomique International, TAI), joka määriteltiin siten, että $ET - TAI = 32,184 \text{ s}$, epookkina 1.1.1977. TAI:n aikayksikkö on SI-järjestelmän mukainen sekunti. TAI on merenpinnan tasossa liikkumattoman kellon näyttämä aika, jonka realisaatiota ylläpidetään eri puolilla maapalloa olevissa aikalaboratorioissa. Tällä hetkellä verkostoon kuuluvia atomikelloja on yli 250. Kunkin atomikellon aikaa voidaan pitää TAI:n paikallisena realisaationa. Kellojen synkronointi μs -tasolla hoidetaan keskinäisten vertausten ja nykyisin myös GPS:n antaman ajan avulla. [7.]

2.2.4 Koordinoitu yleisaika (UTC)

Maan pyörimisliikkeen hidastumisen vuoksi maan pyörimisliikkeestä johdetun ajan ja TAI:n välinen erotus kasvaa koko ajan. Koska sekunnin pituus on johdettu 1800-luvulla, olisi nykyisestä pyörimisnopeudesta johdettu sekunti hieman pidempi. [7.]

Jos asialle ei tehtäisi mitään, poikkeaisi kellojen näyttämä aika yhä enemmän maan pyörimisliikkeen osoittamasta ajasta. Tämän vuoksi otettiin vuonna 1972 käyttöön koordinoitu yleisaika (UTC), jonka mukaan kellot nykyisin käyvät. UTC on atomiaikaan sidottu aika, joka seuraa yleisaikaa (UT1, johdettu maan pyörimisestä) niin, ettei ero pääse kasvamaan yli 0,9 sekunnin. Jos näin uhkaa käydä, lisätään tai vähennetään UTC:stä karkaussekunti. Tämä tehdään tarvittaessa joko 30. kesäkuuta tai 31. joulukuuta. Toistaiseksi maapallon pyöriminen on hidastunut, joten on jouduttu vain lisäämään karkaussekunteja. [7.]

Viimeksi karkaussekunti on lisätty vuonna 2008, joka on ollut erittäin pitkä vuosi johtuen karkauspäivästä ja lisäystä karkaussekunnista. Maapallon pyörimisen hidastuminen taas johtuu vuoroveden aiheuttamasta kitkasta, Kuun kiertoradan momentista, jään sulamisesta napajäätiköillä, Maan 23° :n kallistumasta, ilmakehästä, aurinkotuulesta, avaruuspölystä ja magneettisista myrskyistä. [8.]

2.2.5 GPS-aika (GPST)

GPS-aika on GPS-satelliittien käyttämä aikajärjestelmä. Se määritellään TAI:n avulla, niin että $GPST = TAI - 19,0 \text{ s}$ [7].

Kun toisaalta $UTC = TAI - n$ sekuntia, jossa n vuonna 2007 oli 33, poikkesi GPS-aika UTC:stä 14 sekuntia. Jokaisen karkaussekunnin lisäämisen myötä kasvaa GPST:n ero UTC:hen nähden, sillä GPST:hen karkaussekunteja ei lisätä. Satelliittien lähettämän navigointiviestin mukana tulee tieto karkaussekuntien määrästä, joten vastaanotin osaa näyttää myös UTC:n mukaista aikaa. [7.]

Kuten TAI:n yhteydessä kerrottiin, jokaisella aikalaboratoriolla on oman atomikellonsa kautta TAI:n paikallinen realisaatio. GPS-satelliittien käyttämä aika on USNO:n (US Naval Observatory) ylläpitämä ja siten USNO:n realisaation mukainen. Aika saattaa poiketa muutamia nanosekunteja muiden laboratorioden TAI-realisaatioista. [7.]

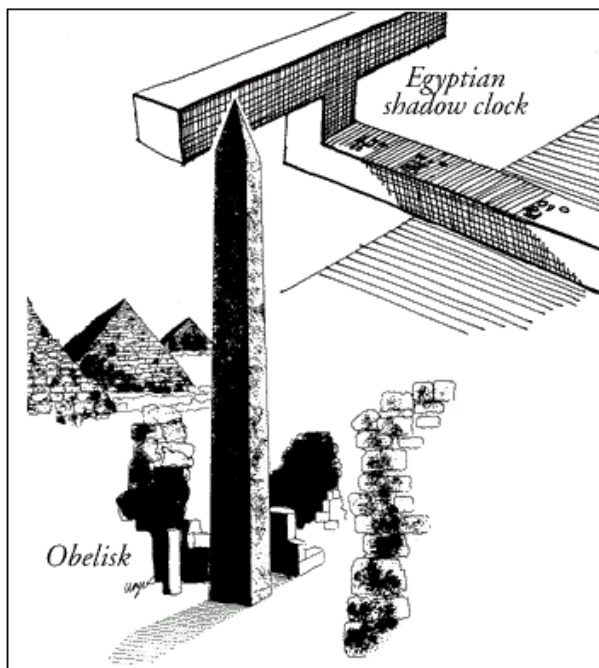
GPS-ajan nollahetki on 6. tammikuuta 1980 klo 0 UT. Tuolloin $GPST = UTC$. Tästä nollahetkestä lähtien aika ilmoitetaan viikkoina ja viikon sekunteina niin että uusi GPS-viikko alkaa aina sunnuntaina klo 0 UT. Usein tarvitaan myös tietoa siitä, monesko päivä kyseistä vuotta on kulumassa, esimerkiksi datatietojen nimeämiseen. Tammikuun 1. päivä on luonnollisesti päivä 1, ja edellisen vuoden viimeinen päivä oli DOY 365 (Day Of Year). [7.]

2.3 Ajan ylläpidon menetelmiä

Ihmiskunnan historiaa ajatellen vasta nykypäivinä on kellosta ja ajan ylläpitämisestä tullut ihmiselle tärkeää. Ihminen on kuitenkin pitänyt aikaa yllä jo tuhansia vuosia. 5000–6000 vuotta sitten suuret Lähi-idän ja Pohjois-Afrikan sivilisaatiot alkoivat tehdä kelloja tarkentamaan kalentereita. Nämä kulttuurit huomasivat tarpeen käyttää aikaa tehokkaammin byrokratian, uskonnon ja muiden sosiaalisten toimintojen takia. [9.]

2.3.1 Aurinkokellot

Egyptiläiset jakoivat päivänsä ajanjaksoihin, jotka vastaavat jotakuinkin meidän tuntejamme. Obeliskeja (kuva 3) rakennettiin 3500 eaa. Niiden liikkuva varjo muodosti eräänlaisen aurinkokellon, joka mahdollisti ihmisten jakaa päivä aamu- ja iltapäivään. Obeliski näytti myös vuoden lyhimmän ja pisimmän päivän, kun varjo oli keskipäivällä vuoden lyhin tai pisin. Myöhemmin erilaiset merkit obeliskin ympärillä ilmaisivat ajan vielä tarkemmin. [9.]



Kuva 3. Obeliski ja varjokello. [9.]

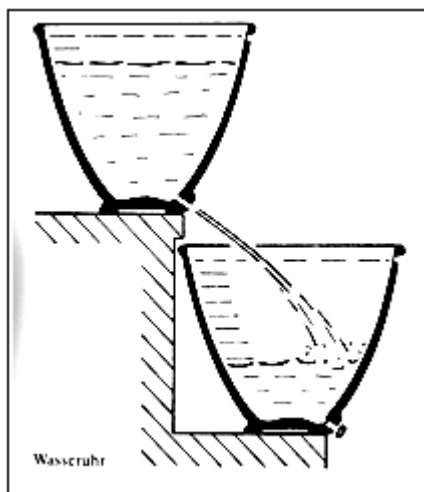
Eräs toinen egyptiläinen aurinkokello, ehkä ensimmäinen kannettava kello, tuli käyttöön 1500 eaa. Tämä laite jakoi päivänvalon ajan kymmeneen osaan sekä kahteen hämärän ajan tuntiin aamulla ja illalla. Laitteessa oli pitkä varsi viiden vaihtelevasti sijoitetun merkin kanssa. Tämä varsi piti aamulla laittaa osoittamaan itään ja länteen. Tällöin muodosti laitteen itäpäässä kohotettu ristikko liikkuvan varjon merkkien yli, jotka osoittivat aamupäivän tunteja. Keskipäivällä laite käännettiin toisin päin osoittamaan iltapäivän tunteja. [9.]

Aurinkokellot kehittyivät vieläkin tästä, ja niistä muodostui astronomisia työkaluja, joilla voitiin tähtien avulla määritellä tunnit yölläkin. Aurinkokelloista oli kehittynyt monenlaisia versioita ennen ajanlaskumme alkua. Marcus Vitruvius kuvaili 30 eaa. kolmetoista erilaista aurinkokellotyylisiä Kreikassa, Vähä-aasiassa ja Italiassa. [9.]

2.3.2 Vesikellot

Vesikellot olivat ensimmäisiä ajan ylläpitämiseen tarkoitettuja laitteita, jotka eivät olleet riippuvaisia taivaankappaleiden tarkastelusta. Yksi vanhimmista vesikelloista löydettiin egyptiläisen faarao Amenhotep I:n haudasta. Hän oli haudattu noin vuonna 1500 eaa. [9.]

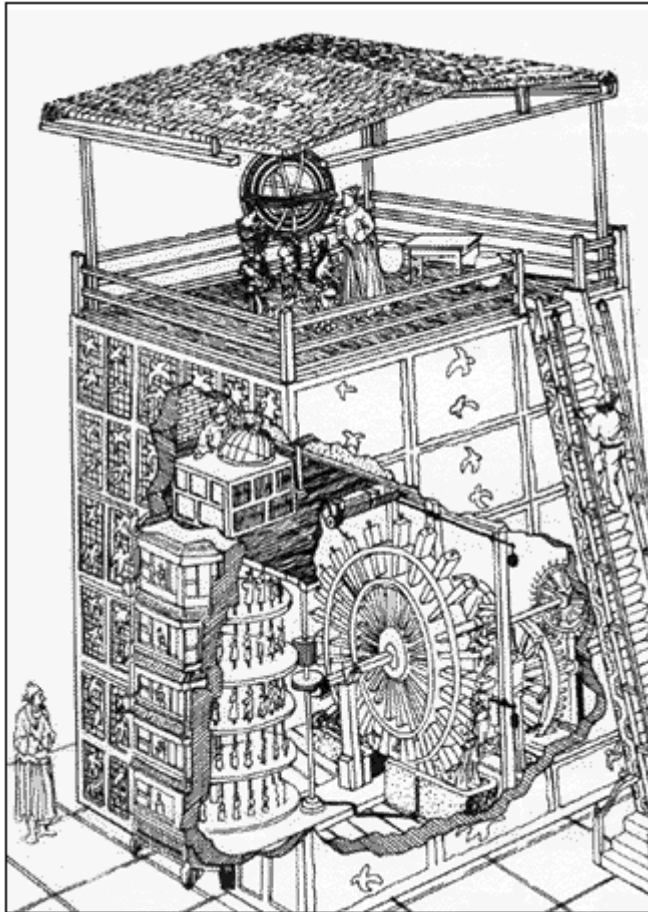
Myöhemmin kreikkalaiset nimesivät vesikellot klepsydroiksi eli vesivarkaiksi, joita alettiin käyttää 325 eaa. Ne olivat kiviastioita, joissa oli kaltevat reunat. Näitä reunoja myöten vesi tippui lähes vakionopeudella pienestä reiästä, joka oli lähellä pohjaa (kuva 4). Muut klepsydrat olivat sylinterimäisiä tai kulhomaisia astioita, jotka oli suunniteltu täyttymään hitaasti vedellä, jota tuli vakionopeudella. Astioiden sisäpuoliset merkinnät mittasivat tuntien kulkua, kun vesi saavutti ne. Näitä kelloja käytettiin määrittelemään pimeän ajan tunnit, mutta niitä varmaan käytettiin myös päivällä. Eräänlainen vesikello oli käytössä vielä 1900-luvulla Pohjois-Afrikassa. [9.]



Kuva 4. Yksinkertainen vesikello. [1.]

Monimutkaisemmat ja hämmästyttävämmät mekanisoidut vesikellot kehittivät vuosien 100 eaa. ja 500 jaa. välillä kreikkalaiset ja roomalaiset tähtitieteilijät. Lisääntynyt monimutkaisuus tähtäsi tasaisempaan virtaukseen säätämällä painetta ja tarjoamalla koristeellisempia näyttöjä ajan tarkasteluun. Jotkin vesikellot soittivat kelloja, jotkin avasivat ovia ja ikkunoita näyttääkseen pieniä ihmishahmoja tai erilaisia osoittimia. [9.]

Kaukoidässä mekanisoitu astronominen ja astrologinen kellon valmistaminen kehittyi 200-luvulta aina 1300-luvulle. 200-luvun kiinalaiset klepsydrat pyörittivät erilaisia mekanismeja, jotka esittivät astronomisia ilmiöitä. Yhden monimutkaisimmista kellotorneista rakensi Su Sung ja hänen kumppaninsa 1088 (kuva 5). [9.]

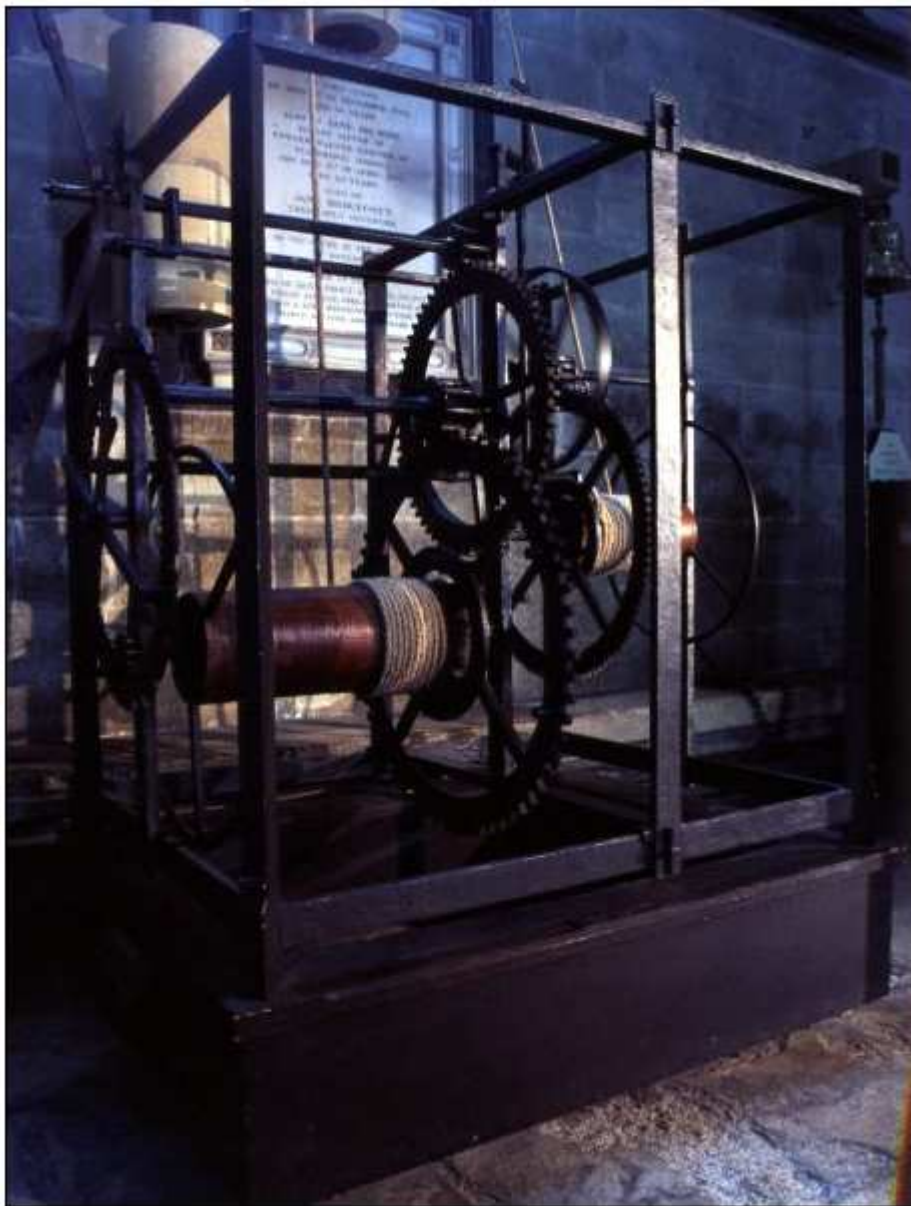


Kuva 5. Su Sungin vesikellotorni. [9.]

2.3.3 Mekaaniset kellot

Kerrotaan, että ensimmäisen mekaanisen kellon olisi rakentanut magdeburgilainen munkki Gerbert 990-luvulla. Kertomusta voi epäillä, koska Gerbertistä tuli sittemmin paavi Sylvester II ja paavin taustalle mielellään kerrotaan monenlaisia urotekoja. Tiedetään kuitenkin, että paavi Sylvester II joutui luopumaan virastaan ja häntä jopa vaadittiin poltettavaksi roviolla keksimänsä "helvetinkoneen" kanssa. [1.]

Varmasti tiedetään, että Englannin Bedfordshiressä tehtiin mekaaninen kello vuonna 1283. Kirkkojen tornikellot yleistyivät nopeasti 1300-luvulla Euroopassa. Mekaanisessa kellossa oli paino ja hammasratas, joiden avulla aikaa voitiin mitata jo vuorokauden ympäri. Parhaat kellot poikkesivat oikeasta ajasta vain noin 15 minuuttia vuorokaudessa, ja yleistä olikin, että kello jätätti tai edisti tunnin vuorokaudessa. Aurinkokelloakin käytettiin yhä, ja niitä laitettiin muun muassa keskiaikaisten kirkkojen ulkoseiniin. Myös taskuun mahtuvia aurinkokelloja valmistettiin. Varhaisimmat mekaaniset kellot toimivat painovoiman avulla: maan vetovoima veti kelloissa ollutta painoa alaspäin. Nämä kellot eivät olleet siirreltäviä (kuva 6). [1.]



Kuva 6. Maailman vanhin toimiva mekaaninen kello, joka sijaitsee Salisburyn katedraalissa Iso-Britanniassa. Se on valmistettu vuonna 1386. [10.]

Ensimmäiset jousivetoiset ja siirreltävät kellot tulivat käyttöön 1400-luvulla. Tarkkuus tosin kärsi siitä, että jousen voima oli suurempi heti vetämisen jälkeen, joten kello kävi aluksi kii-vaammin. Tarkkuutta kelloon saatiin myöhemmin lisäämällä sen koneistoon kierukka eli snekka, joka tasoitti jousen voiman heikkenemistä. Koteja varten valmistettuja seinä- ja pöytäkelloja alkoi esiintyä Euroopassa 1400-luvun lopulla ja taskukellojakin 1500-luvulla. Monet keskiaikaiset kellot olivat loistavia käsityötaidon taidonnäytteitä. Heilurin keksiminen paransi jälleen kellon tarkkuutta. Galileo Galilei (1564—1642) huomasi 1580-luvulla, että samanpituisten heilurien heilahdusaika ei riipu painon koosta eikä heilahduskulmasta, vaan se on vakio (siihen vaikuttaa myös painovoiman kiihtyvyyden). Ensimmäisen käyttökelpoisen heilurikellon teki hollantilainen Christiaan Huygens (1629—1695). Hänen kellonsa käynti-poikkeama oli alle minuutin vuorokaudessa. Jo 1889 rakennettiin heilurikello, jonka käynti-poikkeama oli alle neljä sekuntia vuorokaudessa. [1.]

2.3.4 Kvartsikidekellot

Kvartsikidekello syrjäytti 1930- ja 1940-luvulla Shorttin puolimekaanisen kaksoisheilurikellon. Kvartsikide tarjosi paljon tarkemman ajan ylläpidon kuin heiluri- tai tasapainopyörä-koneistot. [11.]

Kvartsikellokoneisto perustuu kvartsikiteen pietsosähköiseen ominaisuuteen. Jos kiteen al-tistaa sähkökentälle, se muuttaa muotoa, ja jos sitä puristaa tai taivuttaa, se muodostaa sähkökentän. Kun kide laitetaan sopivaan sähköiseen kytkentään, alkaa tämä mekaanisen rasituksen ja sähkökentän välinen yhteys kiteessä tuottaa värähtelyä ja vakiotaajuista sähkösignaalia, jota voidaan käyttää elektronisen kellon ohjaamiseen. [11.]

Kvartsikidekellot olivat parempia, koska niissä ei ollut rattaita tai koneistoja häiritsemässä niiden tavallista taajuutta. Silti ne perustuivat mekaaniseen värähtelyyn, jonka taajuus oli krii-tisesti riippuvainen kiteen koosta ja muodosta. Näin ollen kaksi kidettä ei voi olla täsmälleen samanlaisia ja omata täsmälleen samaa taajuutta. Tällaiset kvartsikellot hallitsevat kuitenkin markkinoita, koska niiden suorituskyky on erinomainen ja ne ovat halpoja. Nykyään atomikellot ovat lyöneet kvartsikellot ajan ylläpitotarkkuudessa. [11.]

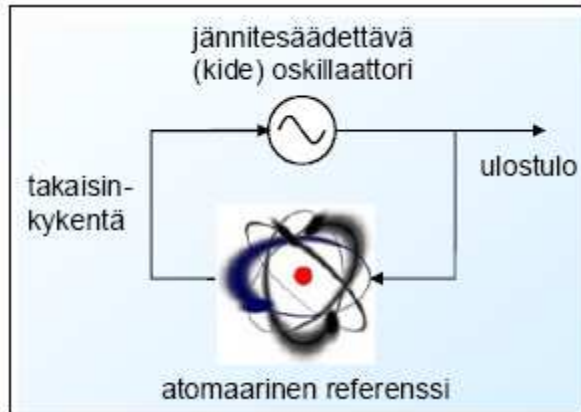
2.3.5 Atomikellot

Idean atomikellosta keksi ensimmäisenä Isador Rabi 1930-luvulla. Ensimmäisen atomikellon, Cesium 1:n (kuva 7), suunnitteli ja rakensi Louis Essen Teddingtonissa vuonna 1955. Se ei ollut varsinaisesti ensimmäinen atomikello, mutta se oli ensimmäinen kello, joka oli tarkempi ajan ylläpidossa kuin heiluri- tai kvartsikidekello. Se oli myös ensimmäinen kello, jonka ajan ylläpito oli merkittävästi tasaisempi kuin maan pyörimisliike. Nykyaikaiset atomikellot ovat jopa vielä tarkempia kuin Cesium 1, ja aika onkin nykyään määritelty atomien eikä maan pyörimisliikkeen mukaan. On myös olemassa erilaisia atomikelloja, kuten vety- ja rubidium-atomikelloja. [12.]



Kuva 7. Ensimmäinen atomikello Cesium 1. [12.]

Aikaa ylläpitävä osa atomikellossa on kvartsikideoskillaattori. Yleensä kvartsikelloissa oskillaattori säädetään tarkasti, kun kello tehdään, mutta sen taajuutta ei sen jälkeen tarkasteta enää. Ajan kuluessa sen taajuus muuttuu hitaasti tehden kellosta jätättävän tai edistävän. Monimutkaisen laitteiston tarkoitus atomikellossa on tarkastaa kvartsikideoskillaattorin taajuutta jatkuvasti (kuva 8). Tämä antaa atomikellolle sen suuren tarkkuuden. [12.]



Kuva 8. Atomikellon toimintaperiaate. [13.]

Kun Cesium 1 toimi, Louis ja Jack Parry alkoivat parantaa kelloa. Cesium 2 rakennettiin 1959. Siinä oli pidempi sädeputki, joten atomit altistuivat radioaalloille pidemmän aikaa. Tämä teki kellosta entistä tarkemman. Cesium 2:n epävarmuus olikin enää yksi sekunti 2000 vuodessa. [12.]

Ensimmäinen kaupallinen cesiumkello, Atomichron, tuli markkinoille lokakuussa 1956. Vuonna 1964 tuotettiin HP5060A-atomikello, jonka myötä epävarmuus oli enää yksi sekunti 6000 vuodessa. Atomikelloteknologia jatkoi kehittymistään. Laitteet, joilla epävarmuus oli enää yksi sekunti 30000 vuodessa, kuten HP5071A (kuva 9), ovat nyt kaupallisesti saatavilla. Niitä käyttävät tietoliikenneyhtiöt saavuttamaan tarkkoja taajuuksia, jotka mahdollistavat nykyaikaisen tietoliikenteen. [12.]



Kuva 9. Agilent 5071A -primääri taajuusstandardi. [14.]

Nämä kellot toimivat samalla periaatteella kuin Cesium 1. Uusimmat atomikellot toimivat hieman erilaisella tavalla, joka mahdollistaa kellojen suuremman tarkkuuden. Vuonna 1993 NIST (National Institute of Standards and Technology) rakensi NIST-7-atomikellon, joka käyttää lasereita magneettien sijasta erottamaan atomeita ennen ja jälkeen niiden kulkemista sädeputken läpi. Alun perin NIST-7:n epävarmuus oli yksi sekunti 800000 vuodessa, mutta on sittemmin kehittynyt yhteen sekuntiin kuudessa miljoonassa vuodessa. Atomikellojen seuraava sukupolvi tulee käyttämään eri tapoja atomien ohjaamiseen, mikä tekee kelloista vielä tarkempia. Ei ole itsestään selvää, mihin tarvitaan näin suuria tarkkuuksia, mutta aina kun on kehitetty tarkempi kello, on sille löytynyt uusi käyttötarkoitus. [12.]

2.4 Ajan ylläpitäminen

Mittatekniikan keskus (MIKES) ylläpitää kansallisessa aika- ja taajuuslaboratoriossaan Suomen virallista aikaa. Aikaan ja taajuuteen liittyvä tutkimus metrologiamielessä alkoi maassamme Teknillisessä korkeakoulussa 1971. Ajan ja taajuuden seuranta suoritettiin aluksi pitkäaaltoisien aikamerkkiasemien (DCF-77, MSF jne.) avulla, mutta pian siirryttiin Loran-C-navigointijärjestelmän käyttöön. Ajan ylläpidon siirryttyä VTT:lle rakennettiin kymmenkunta Loran-C-kelloa, joita sittemmin käytettiin eri puolilla Suomea ja myös kansainvälisessä EISCAT-projektissa ajan ja taajuuden ylläpitämiseen. Loran-C-kelloilla saavutettiin UTC-ajassa noin 1 μ s:n epävarmuus ja taajuudessa suhteellinen epävarmuus $1 \cdot 10^{-11}$ vuorokausikeskiarvona. [15.]

Aikavertailuja tehtiin kuljetettavan kellon avulla sekä Ruotsin että yleissopimuksen puitteissa Neuvostoliiton kanssa. 1970-luvulla rakennettiin myös Yleisradion pääkello antamaan tuttua "piip"-aikamerkkiä. Tämä kello oli lukittuna VTT:n viralliseen kelloon puhelinlinjan välityksellä ja oli käytössä Yleisradiossa vuoteen 1997 saakka. Tällöin Yleisradio siirtyi käyttämään GPS-vastaanottimeen perustuvaa kelloa. Kansallinen laboratorio alkoi sittemmin valvoa ja raportoida Yleisradion tuottamia aikamerkkejä. [15.]

GPS-navigointijärjestelmä antoi paremmat mahdollisuudet ajan ja taajuuden ylläpitoon ja valvontaan kuin Loran-C. Niinpä VTT:lle hankittiin ensimmäinen GPS-kello 1989. Sen avulla saavutettu UTC-ajan epävarmuus oli $0,5 \mu\text{s}$ ja taajuuden suhteellinen epävarmuus $1 \cdot 10^{-12}$ vuorokausikeskiarvona. Myöhemmin GPS-vastaanottimia hankittiin lisää ja kideoskillaattorit ajan ja taajuuden "vauhtipyörinä" korvattiin rubidiumkelloilla. Vuonna 1997 hankittiin ensimmäinen oma Cesium-atomikello. Sitä ennen oli "lainattu" Cesium-atomiaikaa Teletä kaukomittauksena jo pari vuotta. [15.]

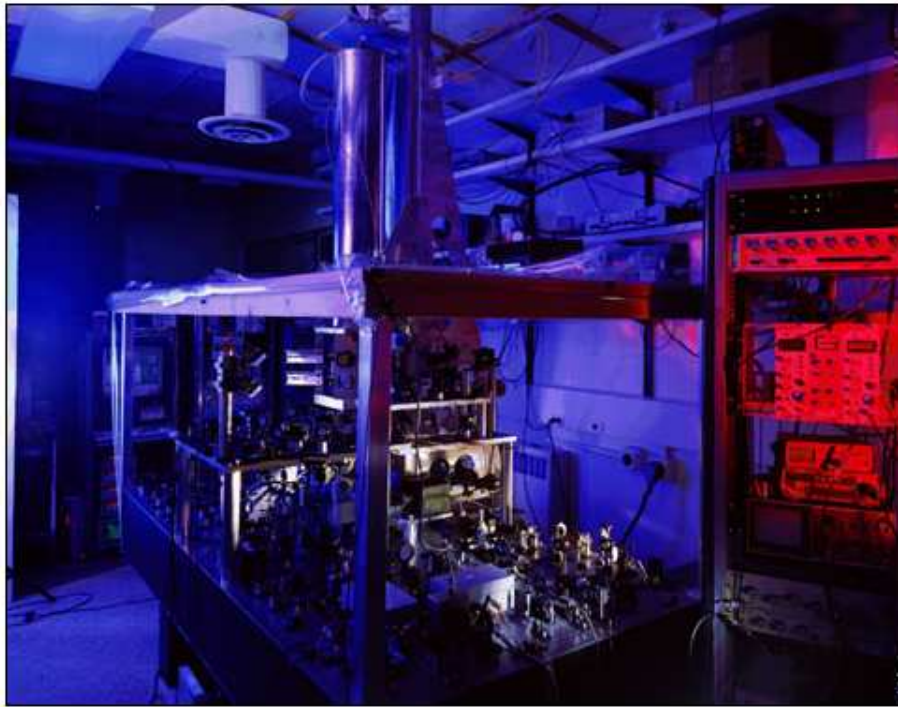
Vuoden 2000 alusta Suomen kansallinen aikametrologia siirtyi VTT:ltä Mittatekniikan keskukseen. MIKES:iin hankittiin samana vuonna toinen Cesiumatomikello varmentamaan ajan ylläpitoa. Vuonna 2003 hankittiin sekä passiivinen että aktiivinen vetymaseri Kvarzilta Venäjältä. Niiden erinomaisen lyhytaikaisen stabiilisuuden hyödyntämiseksi hankittiin samalla samalta tehtaalta myös femtosekuntiresoluutioon pystyvä nelikanavainen vaihekomparaattori. [15.]

Suomen aikaa ja taajuutta verrataan jatkuvasti "GPS common view"-mittauksen avulla koordinoituun yleisaikaan (UTC) ja GPS:n avulla suoraan USNO:n pääkelloon. Aika-vertailuja kuljetettavan GPS:n avulla on myös tehty Ruotsin kanssa muutaman vuoden välein. MIKES:in aika- ja taajuuslaboratorion ylläpitämän Suomen ajan epävarmuus (UTC) on nykyisin noin 30 ns. Taajuuden lyhytaikainen (10 min) suhteellinen epävarmuus on $1 \cdot 10^{-12}$ ja vuorokausitasolla $1 \cdot 10^{-13}$. [15.]

2.4.1 Primäärinormaali

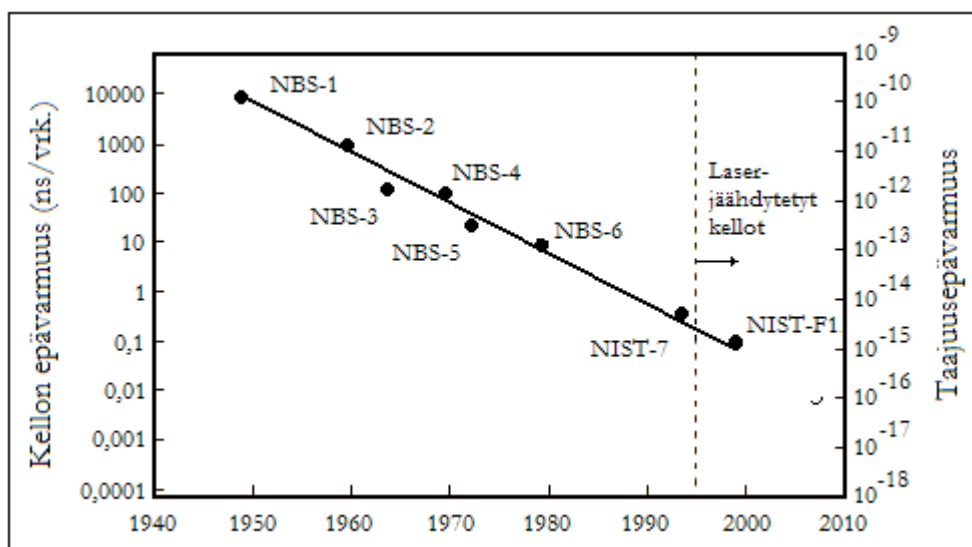
Sekunti on 9192631770 kertaa sellaisen säteilyn jakson aika, joka vastaa cesium 133 -atomin siirtymää perustilan ylihienorakenteen kahden energiatason välillä. Nykyisin jakson aika selvitetään cesiumlähde-atomikellolla. Cesiumatomikelloa käytettiin määrittelemään sekunti uudelleen, koska se oli ensimmäinen toimiva atomikellotyyppi. [13.]

Tällä hetkellä tarkimpia primäärinormaaleja on cesiumlähde-atomikello NIST-F1 (kuva 10). Se on kehitetty NIST:n laboratorioissa Boulderissa, joka sijaitsee Coloradossa. NIST-F1 kuuluu atomikellojen kansainväliseen joukkoon, joka määrittelee UTC:n. Ja koska NIST-F1:n epävarmuus on yksi pienimmistä, on UTC:n epävarmuus pienempi kuin koskaan aikaisemmin. [4.]



Kuva 10. Cesiumlähde-atomikello NIST-F1. [4.]

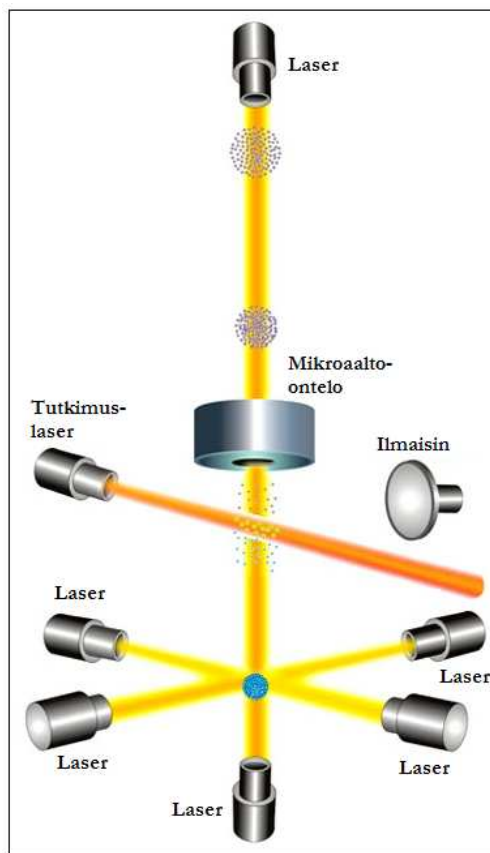
NIST-F1:n epävarmuus paranee koko ajan. Vuonna 2000 epävarmuus oli noin 10^{-15} sekuntia, mutta vuonna 2005 epävarmuus oli enää $5 \cdot 10^{-16}$ sekuntia. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, ettei virhe ylitä sekuntia 60 miljoonan vuoden aikana! NIST-F1:n epävarmuus on kymmenesosan siitä kuin edellä mainitun NIST-7:n (kuva 11), joka palveli Yhdysvaltojen primäärinormaalina vuosina 1993–1999. [4.]



Kuva 11. NIST:n atomikellojen epävarmuuden kehitys. [4.]

Cesiumlähde on nykyaikainen atomikello. Lähde-sana tulee atomien lähteen kaltaisesta liikkeestä. Ensimmäiseksi kellon tyhjiökammioon johdetaan cesiumkaasua. Tämän jälkeen cesiumatomit hidastetaan melkein pysähdyksiin kuuden infrapunalasereiden avulla, jolloin niiden lämpötila putoaa lähelle absoluuttista nolapistettä (kuva 12). Cesiumatomit kasautuvat pieneksi palloksi. Kaksi pystysuunnassa olevaa laseria työntävät atomit ylöspäin, luoden lähdemäisen liikkeen. Tämän jälkeen kaikki laserit sammutetaan. Tämän pienen tönäisyn takia atomit nousevat noin metrin korkeuteen mikroaalto-ontelon läpi. Painovoiman takia atomit putoavat hitaasti mikroaalto-ontelon läpi alaspäin. Atomien matka ylös ja alas kestää noin sekunnin. [4.]

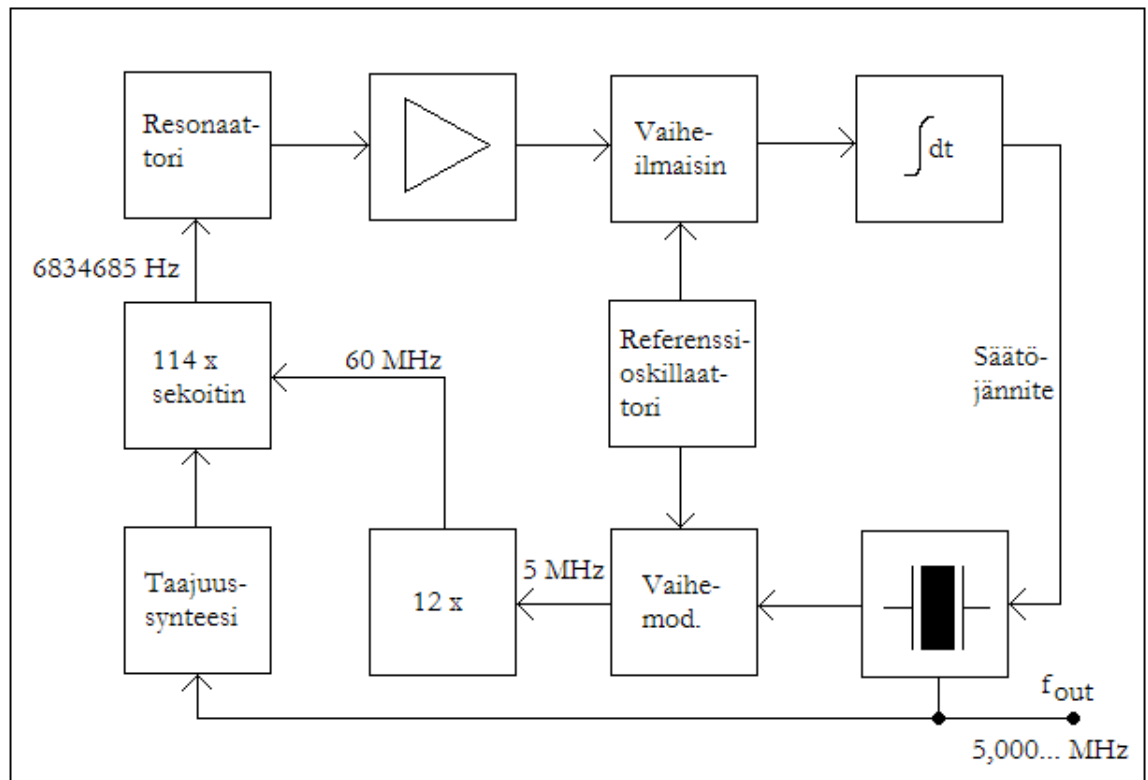
Kun atomit tulevat alas, yksi laser suunnataan niihin. Atomit, joiden tila on muuttunut mikroaaltojen takia, emittoivat valoa. Fotonit mitataan erillisellä ilmaisimella. Tämä toistetaan useita kertoja, kunnes mikroaaltosignaali on virittynyt eri taajuuksille. Lopulta löydetään mikroaaltotaajuus, joka muuttaa melkein kaikkien cesiumatomien tilaa ja maksimoi valon emittoitumisen. Tämä taajuus on cesiumin luonnollinen resonanssitaajuus (9192631770 Hz), jota käytetään sekunnin määrittämiseen. [4.]



Kuva 12. Cesiumlähteen toiminta. [4.]

2.4.2 Sekundäärinormaali

Rubidiumatomikello (kuva 13) on määritelty taajuuden sekundäärinormaaliksi. Se on primäärinormaalia halvempi. Taajuuden pitkäaikainen ryömintä on sillä kuitenkin ainakin sata kertaa hitaampaa kuin parhaissa kideoskillaattoreissa. Rubidiumnormaalin toiminta muistuttaa hyvin paljon perinteisen cesiumnormaalin toimintaa. [16.]

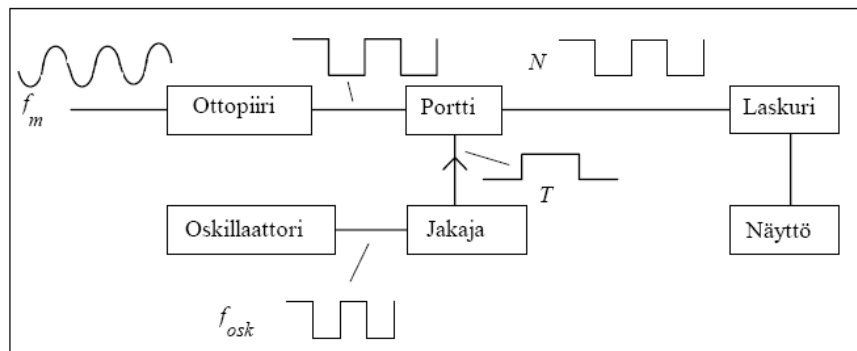


Kuva 13. Rubidiumnormaalin toimintakaavio. [16.]

3 AJAN VERTAILU

3.1 Suora taajuusvertailu

Suora taajuusvertailu on ehkäpä yleisin tapa tehdä taajuusvertailua. Taajuuslaskurin kytkentä suorassa taajuusmittauksessa on esitetty kuvassa 14.

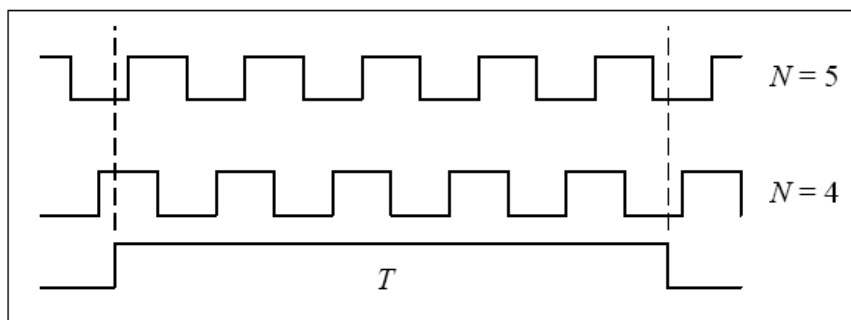


Kuva 14. Taajuuslaskurin toimintaperiaate suorassa taajuusvertailussa. [13.]

Suorassa taajuusvertailussa muodostetaan paikallisoskillaattorin ja jakajan avulla pulssi, joka ohjaa porttia siten, että mitattava taajuus pääsee laskuriin, kun pulssi on ylhäällä. Laskuriin tulevien pulssien lukumäärä on

$$N = T \cdot f_m = \pm 1, \quad (3)$$

missä f_m on mitattava taajuus ja T mittausaika. Yhtälössä esiintyvä epävarmuustekijä ± 1 johtuu siitä, että jakajasta tuleva pulssin alku on satunnaisessa vaiheessa mitattavan signaalin taajuuteen nähden. Kuvassa 15 on havainnollistettu tilannetta. [13.]



Kuva 15. Taajuuslaskurin tulos voi vaihdella ± 1 pulssia riippuen siitä, missä vaiheessa signaali on portitusaikaan T nähden. [13.]

Taajuuslaskurin erottelukyky on ± 1 pulssia ja suhteellinen erottelukyky

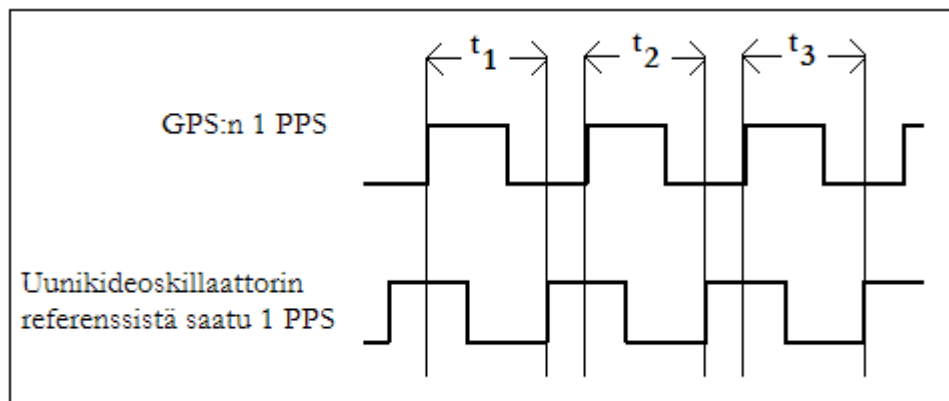
$$\frac{\Delta f_m}{f_m} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{1}{T \cdot f_m}. \quad (4)$$

Havaitaan, että mitä suurempi on mitattava taajuus ja mitä pitempi on mittausaika, sitä parempi on erottelukyky eli resoluutio. Jos jaksonaika pysyy vakiona, pystyvät jotkut laskurit mittaamaan taajuuden paljon tarkemmin, kuin mitä kaavasta saadaan laskemalla. [13.]

Työn kannalta ajatellen tätä menetelmää olisi ollut käytännössä mahdoton käyttää. Mittausresoluution olisi täytynyt olla vähintään $1 \mu\text{Hz}$, jolloin yhden mittausarvon saamiseen olisi kulunut kokonainen päivä. Työn kannalta tärkeäähän on saada mittaustuloksia pitemmältä ajalta, jolloin tarkkuusoskillaattorin käyttäytymistä voidaan luotettavasti seurata.

3.2 Vaihevertailu

Koska työssä ei voitu käyttää suoraa taajuusvertailua, valittiin työssä käytettäväksi menetelmäksi vaihevertailu. Vaihe-eromittaus toteutetaan laskemalla pulssien nousevien reunojen välistä aikaeroa (kuva 16).



Kuva 16. Pulssien nousevien reunojen välinen aikaero.

Jos pulssien jaksonaika on T ja niiden nousevien reunojen väliaika on t , niin vaihe-ero on silloin

$$\varphi = \frac{t}{T} \cdot 360^\circ. \quad (5)$$

Tämä on käytännössä yleinen taajuusstabiilisuuden vertailukelpoisen numeerisen arvon antava kaava. Vaihe-eromittaus toteutettiin käytännössä National Instrumentsin cRIO-9004-reaaliaikajärjestelmän FPGA-yksiköllä toteutetulla laskurilla, jolla päästään 1 μ s:n mittausresoluutioon.

4 TOTEUTUS

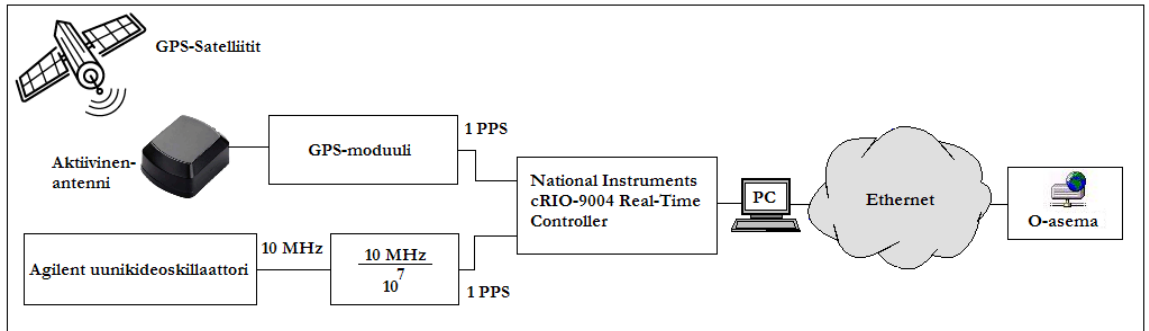
4.1 Laitteiston esittely

Tarkasteltava Agilentin taajuuslaskuri 53131A (kuva 17), jossa on uunikideoskillaattori, sijaitsee Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa. Käytännössä laite toimii siis taajuuslaskurina, mutta siitä saatavaa 10 MHz:n referenssisignaalia käytetään tahdistamaan muita RF-mittalaitteita.



Kuva 17. Agilentin taajuuslaskuri 53131A.

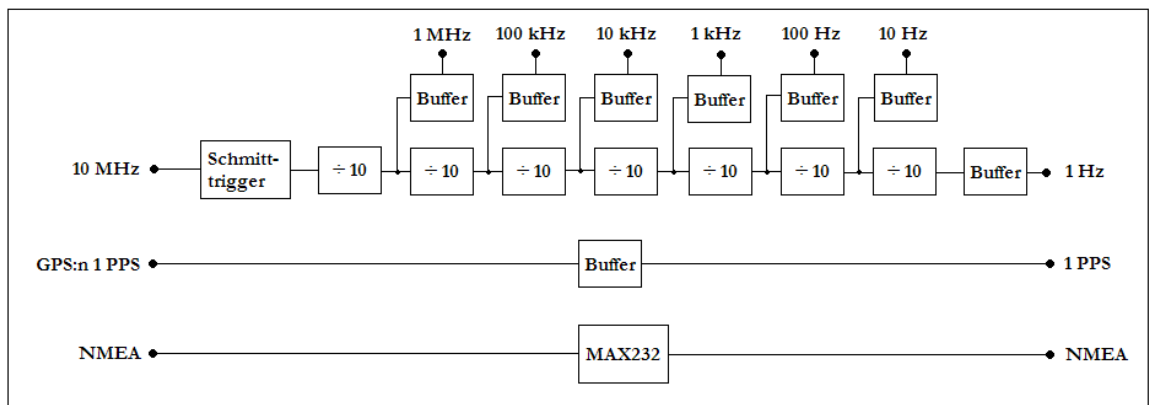
Mittausjärjestelmä koostuu monesta eri osasta (kuva 18). GPS-satelliiteista saatava sekuntipulssi (Pulse Per Second, PPS) vastaanotetaan u-bloxin TIM-CJ-GPS-moduulilla, johon on liitetty valmistajan oma aktiiviantenni. Tutkittavan uunikideoskillaattorin 10 MHz:n referenssisignaali jaetaan 1 Hz:n signaaliksi asynkronisilla jakajilla, jotka ovat erillisellä piirilevyllä. Piirilevyllä on myös saatavilla NMEA-koodi RS-232-portin kautta, sekä 10 MHz:n referenssistä dekadittain jaetut välitaajuudet. Näillä menetelmillä saadut sekuntipulssit vietään National Instrumentsin digitaaliselle i/o-kortille NI 9401, joka on liitetty cRIO-9004-realiaikajärjestelmään. Varsinaisen vaihe-eron mittauksen suorittaa reaaliaikajärjestelmän FPGA-yksikkö, jolla voidaan toteuttaa tarpeeksi nopea laskeminen. Lasketut arvot vietään tietokoneen välityksellä koulun lähiverkon läpi O:\-asemalle tulosten tarkastelua varten.



Kuva 18. Mittauslaitteiston lohkokaavio.

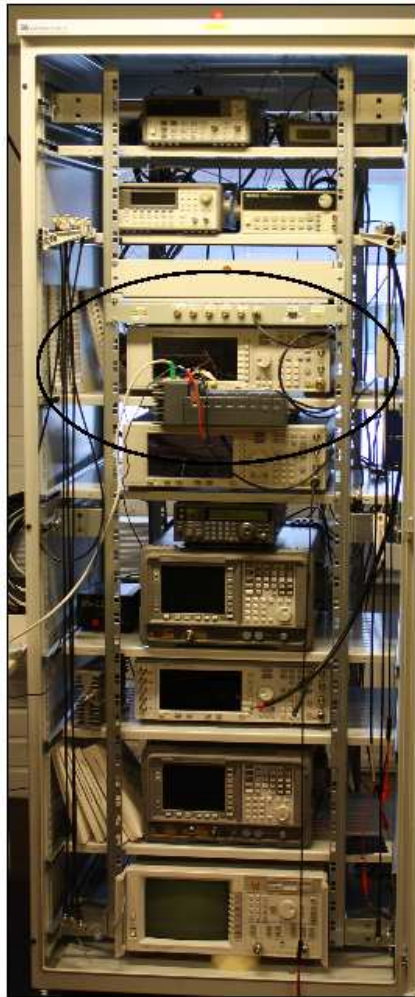
4.1.1 Referenssisignaalin jakaminen

Työtä varten suunniteltiin piirilevy, johon on toteutettu 10 MHz:n referenssisignaalin jakaminen, GPS:n sekuntipulssin puskurointi ja NMEA-signaalin muuttaminen RS-232-signaaliksi MAX232-piirillä (kuva 19). Piirilevyllä jolla 10 MHz:n referenssisignaalin jakaminen toteutetaan, on käytetty signaalin jakamiseen asynkronisia laskuripiirejä 74HC390. Ennen jakamista referenssisignaalin taso muutetaan TTL-tasoiseksi 74HC14-Smitt-triggereillä. Piirit ovat kaksoisdekadilaskureita, jolloin yhdellä piirillä voidaan toteuttaa jakaminen sadalla. Tällöin 10 MHz:n signaalin jakaminen 1 Hz:n signaaliksi voidaan toteuttaa neljällä piirillä. Tällöin yksi dekadilaskuri jää käyttämättä. Jokaisen kymmenellä jaon jälkeen otetaan puskuripiiri 74LS244:n kautta piirilevytelineen etulevylle lähdöt, joita voidaan käyttää muihin tarkoituksiin. Viimeisen laskurin jälkeen saadaan mittauksiin tarvittava 1 Hz:n signaali. Piirilevyn piirikaavio on esitetty liitteessä 1.



Kuva 19. Piirilevyn lohkokaavio.

Piirilevy ja GPS-moduuli asennettiin alumiinikehikkoon, joka on asennettu toimimaan RF-mittalaiteräkissä (kuva 20). Alumiinikehikossa oleville laitteille toteutettiin varmistettu sähkön syöttö käyttämällä 2700 mAh:n akkua.



Kuva 20. RF-laboratorion mittalaiteräkki, jossa mittauslaitteisto ympyröitynä.

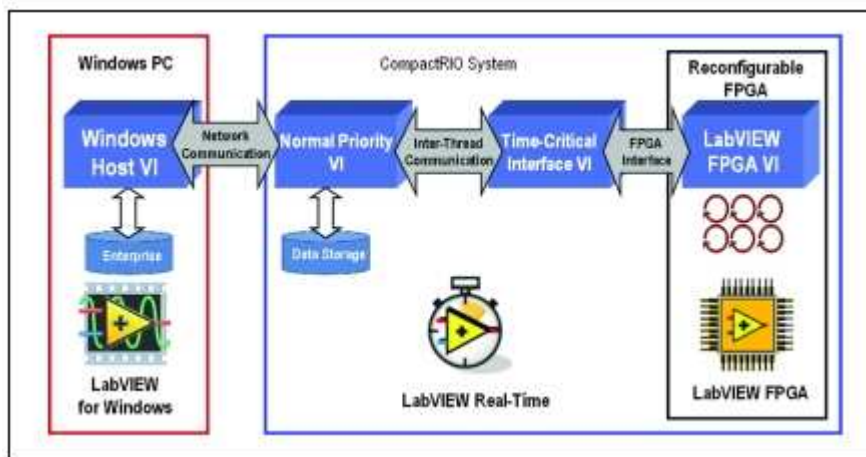
Alumiinisen kehikon etulevyssä ovat BNC-liittimet, joista saadaan dekaideittain jaetut signaalit (kuva 21). Etulevyssä on myös kolme lediä, jotka ilmaisevat GPS:n sekuntipulssin ja referenssisignaalia jaetun sekuntipulssin sekä kehikolle tulevan verkkovirran syötön tilan. Tämän lisäksi etulevystä saadaan NMEA-signaali RS-232-portin kautta, josta saadaan esimerkiksi navigoinnissa tarvittavaa paikkatietoa.



Kuva 21. Alumiinikehikon etulevy ja sen liitännät.

4.1.2 National Instrumentsin cRIO -reaaliaikajärjestelmä

Työssä käytetään vaihe-eron mittaukseen National Instruments (NI) cRIO-9004-reaaliaikajärjestelmää. Sulautettu järjestelmä pystyy suorittamaan LabVIEW-ohjelman reaaliaikaohjelmistoa, jolla voidaan suorittaa erittäin nopeaa tiedon analysointia ja tarvittaessa ohjausta. Järjestelmässä on 195 MHz:n prosessori, 512 Mt CompactFlash-muistia ja 64 Mt DRAM-muistia. Järjestelmässä on 10/100BASE-T-ethernetliitäntä, jonka kautta järjestelmä ohjelmoidaan ja luetaan mittaustulokset. Järjestelmään kuuluu uudelleen ohjelmoitava FPGA-piiri. Järjestelmä toimii siten, että mitattavat signaalit kytketään tiedonkeruukortin kautta FPGA-piirille, jonka jälkeen tieto välittyy reaaliaikaosaan ja siitä Windows-ympäristöön käyttäjän tietokoneelle (kuva 22). [17.]



Kuva 22. NI cRIO-reaaliaikajärjestelmän ohjelmistohierarkia. [17.]

Työssä käytettiin NI 9401 -tiedonkeruukorttia (kuva 23). Se on 8-kanavainen digitaalinen i/o-kortti. Kortti on hyvin nopea, ja signaali viivästyy vain 100 ns kulkiessaan kortin läpi. Kortti tukee normaaleja TTL-tasoisia signaaleja. [17.]



Kuva 23. NI 9401 -i/o-kortti. [18.]

Mitattavat signaalit kytketään digitaalisen i/o-kortin kautta ohjelmoitavalle FPGA-piirille, joka ohjaa i/o-korttia ja toimittaa tiedon paikallisen PCI-väylän kautta ohjaimelle käyttämällä sisäänrakennettuja tietoliikennefunktoita. FPGA-piirille on ohjelmoitu työn kannalta ajatellen tärkein tehtävä, eli pulssien nousevien reunojen välisen eron mittaaminen. Piirillä päästään todella nopeisiin mittausaikoihin, mutta työn kannalta päädyttiin käyttämään mikrosekunnin tarkkuutta. Kun pulssien välinen ero on laskettu, FPGA-piiri toimittaa tiedon paikallisen PCI-väylän kautta reaaliaikaohjaimelle käyttämällä sisäänrakennettuja tietoliikennefunktoita.

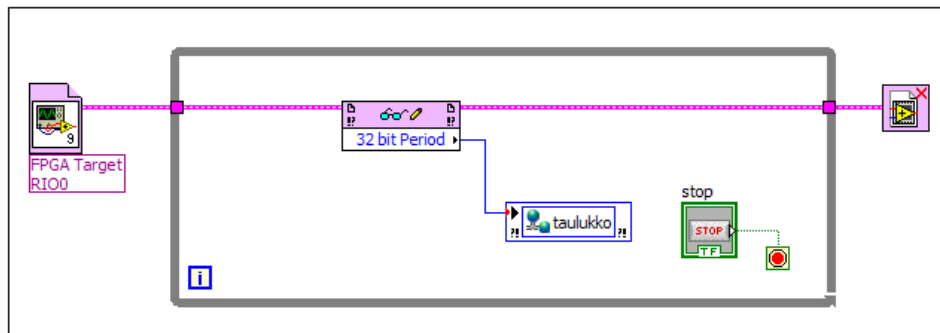
Reaaliaikaohjaimella voidaan tehdä aikakriittisiä sovelluksia, esimerkiksi PID-säätimiä. Työn kannalta reaaliaikaohjainta ei käytetä muuhun kuin tiedon siirtämiseen FPGA-laskurilta Windows-ympäristöön käyttäjän tietokoneelle. Mittaustuloksista muodostetaan LabVIEW-ohjelmassa taulukoita, jotka tallennetaan .txt-muodossa ammattikorkeakoulun lähiverkossa sijaitsevalle O:\-asemalle.

4.2 Vaihe-eron mittaamiseen käytetty ohjelma

Ohjelmointiympäristönä työssä käytettiin LabVIEW 8.5 -ohjelmaa. Ohjelman tärkein ja aikakriittisin osio on FPGA-piirille toteutettu laskuri. Reaaliaikaohjaimelle toteutettiin vain mittaustuloksia Windows-ympäristöön välittävä ohjelma. Windows-ympäristössä LabVIEW-ohjelmalla toteutettiin mittaustulosten taulukointi ja niiden lähettäminen lähiverkon yli.

FPGA-piirille toteutetussa ohjelmassa mitataan GPS:n sekuntipulssin ja Agilentin uunikide-oskillaattorista saatavan 10 MHz:n signaalin 1 Hz:n signaaliksi jaetun pulssin välistä vaihe-eroa (liite 2). Ohjelma rakentuu while-silmukan ympärille, jossa pulssien aikaero määritellään laskurin avulla. Signaalien tilat kiertävät siirtorekistereissä, joista ne luetaan case-rakenteeseen, joka määrittelee, onko pulssien reunat tunnistettu ja päästetäänkö laskurin arvo menemään eteenpäin reaaliaikaohjaimelle.

Reaaliaikaohjaimen ohjelma on hyvin yksinkertainen (kuva 24). Ohjelmassa avataan ”yhteys” FPGA-ohjelmaan, josta mittaustulokset välittyvät reaaliaikaohjaimelle. Sen jälkeen mittaustulokset vietään globaalille muuttujalle while-silmukassa, jonka avulla mittaustulokset siirtyvät Windows-ympäristöön. Mittaustuloksia välittyy Windows-ympäristöön niin kauan kuin ohjelmaa suoritetaan. Kun ohjelma suljetaan, sulkeutuu myös yhteys FPGA-ohjelmaan.



Kuva 24. Reaaliaikaohjaimen LabVIEW-ohjelman lohkokkaavio.

Windows-ympäristön ohjelma on rakennettu toimimaan jatkuvasti while-silmukassa. Silmukan sisällä ohjelma toimii pinosekvenssissä. Se on eräänlainen silmukkarakenne, joka koostuu erillisistä kehyksistä, joiden sisällä oleva koodi suoritetaan kehysten mukaisessa järjestyksessä. Eli ensimmäisen kehyksen koodi suoritetaan ensin, jonka jälkeen suoritetaan toisen kehyksen koodi. Viimeisen kehyksen koodin suorittamisen jälkeen ohjelma palaa ensimmäiseen kehykseen.

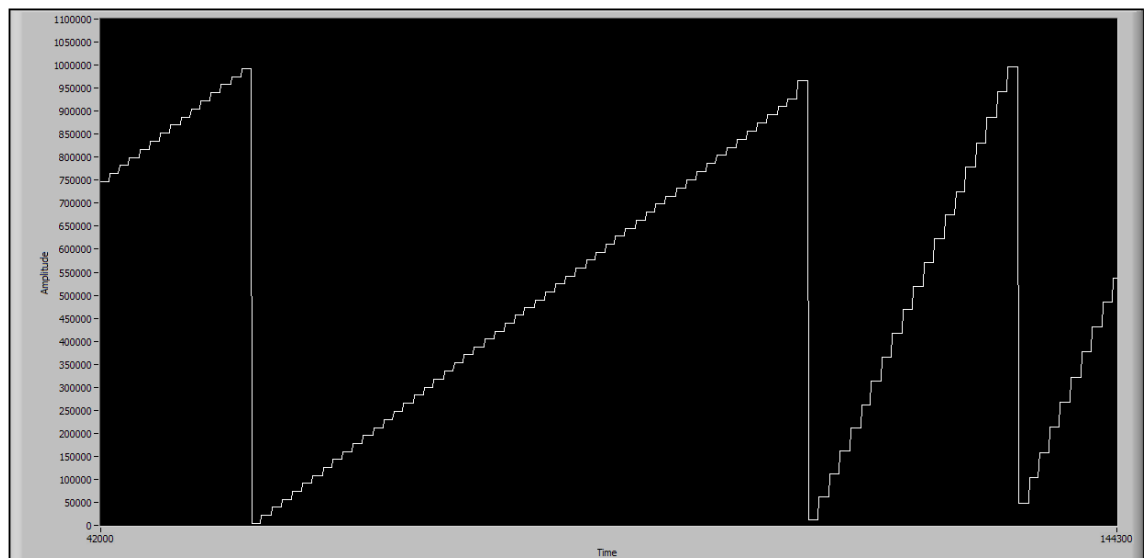
Ensimmäisessä kehyksessä mittaustulokset taulukoidaan for-silmukassa siirtorekisterin avulla. Taulukoitavien tulosten määrä voidaan määrittellä siten, että määritellään, kuinka monesti for-silmukka pyörii. Silmukan sisällä voidaan myös määrittellä viive, joka määrittelee kuinka usein mittausarvoja taulukoidaan. Tämän jälkeen syntynyt taulukko muutetaan toisessa kehyksessä tekstimuotoiseksi taulukoksi. Kolmannessa kehyksessä tekstimuotoinen taulukko tallennetaan haluttuun polkuun ja tiedoston nimeksi muodostuu kellonaika ja päivämäärä, jolloin tiedostoa tallennetaan. Neljännessä kehyksessä suljetaan tiedosto ja ohjelma palaa sekvenssin alkuun. Windows-ympäristön LabVIEW-ohjelman lohkokaavio kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä 3.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Mittauksia suoritettiin Kajaanin ammattikorkeakoulun RF-laboratoriossa joulukuussa 2008 ja tammikuussa 2009. Mittausjärjestelmän toimivuutta testattiin erilaisilla simulaatioilla pitkin syksyä 2008.

5.1 Simulointi

Mittausjärjestelmän toimivuutta testattiin tuottamalla mitattavat signaalit signaaligeneraattoreilla. LabVIEW-ohjelman FPGA-osiossa voidaan ohjelman etupaneelissa tarkastella laskurilta saatavia arvoja reaaliaikaisesti graafista. Graafista voidaan helposti havaita pulssien välinen aikaero ja sen muuttuminen. Kuvassa 25 on kahdella signaaligeneraattorilla tuotettu noin 1 Hz:n signaaleja. Kuvan vasemmalla puolen on pulssien nousevien reunojen välinen aikaero pieni. Kuvan oikealla puolella nähdään aikaeron kasvaminen, joka johtuu siitä, että vaihe-eroa muutettiin, jolloin piirturin jälki muuttuu paljon jyrkemmäksi.



Kuva 25. FPGA-ohjelman etupaneelissa oleva graafi, jolla esitetään aikaero.

Tällä menetelmällä testattiin FPGA-piirille ohjelmoidun laskurin toiminta. Myös reaaliaikaohjaimen ja Windows-ympäristön ohjelmien toimivuutta testattiin. Ohjelmia testattaessa niiden etupaneeleihin sijoitettiin ylimääräisiä indikaattoreita, joihin saadut mittaustulokset siirtyivät. Näistä indikaattoreista havaittiin, välittyivätkö mittaustulokset ohjelmassa oikein. Mittaustulosten taulukointia ja tallennusta mallinnettiin tallentamalla taulukoita tietokoneella sijaitsevaan testikansioon.

Laitteistolla tehtiin testimittaus, jonka avulla saatujen mittaustulosten perusteella laskettiin kulmakerroin kaavalla 5.

$$\Phi = \frac{\Delta T}{\Delta t} \cdot 10^{-9} . \quad (5)$$

Mittaustulokset ovat tekstimuotoisessa taulukossa, joiden perusteella kulmakerroin lasketaan. Mittaustuloksia on otettu tässä tapauksessa minuutin välein ja laskussa on huomioitu mittaustuloksia tuhannen minuutin ajalta, jolloin kulmakertoimeksi saadaan

$$\Phi = \frac{60000 \text{ s}}{26987 \mu\text{s} - 23742 \mu\text{s}} \cdot 10^{-9} = 20 \frac{\text{ns}}{\text{s}} . \quad (6)$$

Tämä kulmakerroin kuvaa uunioskillaattorin taajuusvirhettä, ja se halutaan saada mahdollisimman lähelle nollaa. Itse asiassa koko työn tarkoitus on selvittää juuri tämä taajuusvirhe ja sen suuruus.

5.2 Saadut tulokset

Työn tilaajan asettamiin tavoitteisiin päästiin. Työn tavoitteena oli selvittää uunikideoskillaattorin taajuusvirhe verrattuna GPS-sekuntipulssiin. Työtä varten suunniteltiin ja toteutettiin laitteisto sekä ohjelmisto, jolla voitiin suorittaa taajuusvirheen vertailu. Tuloksena saatiin uunikideoskillaattorin taajuusvirheeksi 10^{-8} -luokkaa oleva taajuusvirhe. Esimerkkinä tuloksista esitellään 2. helmikuuta 2009 (kaava 7) ja 3. helmikuuta 2009 (kaava 8) saadut mittaustulokset.

$$\Phi = \frac{68400 \text{ s}}{65184 \mu\text{s} - 62338 \mu\text{s}} \cdot 10^{-9} = 25 \frac{\text{ns}}{\text{s}}. \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{57600 \text{ s}}{61828 \mu\text{s} - 59492 \mu\text{s}} \cdot 10^{-9} = 25 \frac{\text{ns}}{\text{s}}. \quad (8)$$

Mittauksien perusteella todettiin, että mittausten aikana taajuusvirhe pysyi samana. Saatujen tulosten perusteella saatiin selville, ettei uunikideoskillaattorin taajuusvirhe ole valmistajan määritelmien mukainen (10^{-9}). Tähän voidaan kuitenkin todeta, ettei oskillaattoria ole kalibroitu viiteen vuoteen ja oskillaattoria on liikuteltu oppilaitoksen sisällä. Oskillaattorin liikuttelusta johtuva värinä lisää osaltaan taajuusvirhettä. Uunikide-oskillaattorilta on myös katkaistu välillä sähkönsyöttö, mikä osaltaan vaikuttaa taajuusvirheeseen. Nämä asiat yhdessä aiheuttavat oskillaattorin taajuusvirheen lisääntymistä. Huomioiden nämä asiat, voidaan todeta, että oskillaattori on olosuhteisiin nähden kunnossa.

6 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia Agilentin 53131A-uunikideoskillaattorin taajuusstabiilisuutta verrattuna GPS:n sekuntipulssiin. Tätä varten suunniteltiin ja toteutettiin laitteisto sekä ohjelmisto, jolla voitiin suorittaa tarvittava vertailu. Laitteistoon kuului itse suunniteltu ja toteutettu piirilevy, jolla jaetaan uunikideoskillaattorin referenssisignaali sekuntipulsseiksi. Piirilevy suunniteltiin PADS-ohjelmalla ja varsinainen piirilevy toteutettiin ammattikorkeakoulun piirilevyjyrsimellä. Laittekokonaisuuteen kuului myös National Instrumentsin cRIO-9004-reaaliaikajärjestelmä, jolla varsinainen vertailu tapahtui. Ohjelmisto toteutettiin LabVIEW 8.5 -ohjelmalla.

Työllä saavutettiin työn tilaajan asettamat tavoitteet ja vaatimukset. Työn lopputuloksena on olemassa laitteisto ja ohjelmisto, jolla vertailu voidaan toteuttaa. Uunikideoskillaattorin yhteydessä RF-mittalaiteräkissä sijaitsee työtä varten toteutettu piirilevy ja sen teline, josta saadaan vertailtavat signaalit. Ammattikorkeakoululla on työssä käytettyjä reaaliaikajärjestelmiä kaksi kappaletta, joista toinen voidaan tarvittaessa ohjelmoida työssä toteutetulla ohjelmistolla. Näin ollen vertailuun tarvittavia mittauksia voidaan suorittaa tulevaisuudessa ammattikorkeakoululla milloin tahansa.

Työn ohessa saaduista mittaustuloksista selviää, että uunikideoskillaattorin taajuusvirhe on luokkaa 10^{-8} . Tämä ei ole valmistajan ilmoittamien määritelmien mukainen (10^{-9}). Valmistajan ilmoittamaa taajuusvirhettä suurempi virhe selittyy kuitenkin sillä, ettei uunikideoskillaattoria ole kalibroitu viiteen vuoteen ja sitä on liikuteltu. Yksi työn sivutavoitteista olikin selvittää mahdollinen kalibroinnin tarve.

Mittaustulosten antamaa tietoa on syytä käyttää tulevaisuudessa lukitsemaan uunikideoskillaattori GPS-sekuntipulssiin. Lisäksi uunikideoskillaattorille olisi suositeltavaa suorittaa kalibrointi.

LÄHTEET

1. Suomen kellomuseo, koululaisten kellomuseo. Viimeksi muutettu 10.8.2008. [WWW-dokumentti] <<http://www.kellomuseo.fi/koululaisten/>>
2. Karttunen, H. Tähtitieteellinen sanasto. [WWW-dokumentti] <<http://www.astro.utu.fi/zubi/time/year.htm>> (Luettu 3.1.2009)
3. Suomen tähtitieteellisen yhdistys, tähtitieteen viitetietokanta. Viimeksi muutettu 22.8.1999. [WWW-dokumentti] <<http://www.ursa.fi/kosmos/v/vuorokausi.html>>
4. National Institute of Standards and Technology, Aika- ja taajuusosasto. Viimeksi muutettu marraskuussa 2008. [WWW-dokumentti] <<http://tf.nist.gov/general/history.htm>>
5. Wikipedia, Akselikallistuma. [WWW-dokumentti] <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/fi/1/1c/Akselikallistuma.png>> (Luettu 3.1.2009)
6. Greenwichin keskiaika. Viimeksi muutettu 22.1.2009. [WWW-dokumentti] <<http://wwp.greenwichmeantime.com/what-is-gmt.htm>>
7. Geodeettinen laitos, avaruusgeodesian luentomateriaalia. Viimeksi muutettu 13.2.2008. [PDF-dokumentti] <<http://www.fgi.fi/~mp/tiedostot/aika.pdf>>
8. Inventors, Just a Second –artikkeli. [WWW-dokumentti] <<http://inventors.about.com/b/2008/12/26/just-a-second.htm>> (Luettu 3.1.2009)
9. National Institute of Standards and Technology, Walk Through Time -sivusto. 1995, viimeksi muokattu 30.4.2002. [WWW-dokumentti] <<http://physics.nist.gov/GenInt/Time/early.html>>
10. Saliburnyn katedraali, kuvagalleria. [WWW-dokumentti] <<http://www.salisburycathedral.org.uk/gallery.php?id=42>> (Luettu 3.1.2009)
11. Inventors, The Invention of Clocks -artikkeli. [WWW-dokumentti] <<http://inventors.about.com/library/weekly/aa072801a.htm>> (Luettu 3.1.2009)

12. Lontoon tiedemuseo, atomikellot. [WWW-dokumentti]
<http://www.sciencemuseum.org.uk/onlinestuff/stories/atomic_clocks.aspx>
(Luettu 17.1.2009)
13. MIKES TKK Mittaustekniikka, mittaustekniikan perusteet. [PDF-dokumentti]
<http://metrology.hut.fi/courses/S-108.1010/Luento6_2007.pdf> 17.1.2009
(Luettu 23.1.2009)
14. Agilent Technologies. [WWW-dokumentti]
<http://cp.home.agilent.com/upload/cmc_upload/5071A-lg.jpg>
(Luettu 17.1.2009)
15. Mittatekniikan keskus, Suomen virallinen aika. [WWW-dokumentti]
<<http://www.mikes.fi/frameset.aspx?pageID=816>> (Luettu 17.1.2009)
16. Heino J. Mittaustekniikan osasto, Tampereen teknillinen korkeakoulu.
Aika/taajuusnormaalit ja –mittaukset. 15.2.1978
17. National Instruments, cRIO-tekniset tiedot. [PDF-dokumentti]
<http://www.ni.com/pdf/products/us/6358_crio_rt_controllers.pdf>
(Luettu 23.1.2009)
18. National Instruments, Developer Zone. [WWW-dokumentti]
<<http://zone.ni.com/cms/images/devzone/tut/9401.JPG>> (Luettu 23.1.2009)

LIITTEIDEN LUETTELO

LIITE 1, Referenssisignaalin jakamiseen käytetyn piirilevyn piirikaavio

LIITE 2, FPGA-yksikön LabVIEW-ohjelman lohkokaaavio

LIITE 3, Windows-ympäristön LabVIEW-ohjelman lohkokaaavio

