

TIIVISTELMÄRAPORTTI

Hajautetut vikasietoiset kelloverkot

Anders Wallin (anders.wallin@vtt.fi), Thomas Lindvall, Kalle Hanhijärvi, VTT Ot

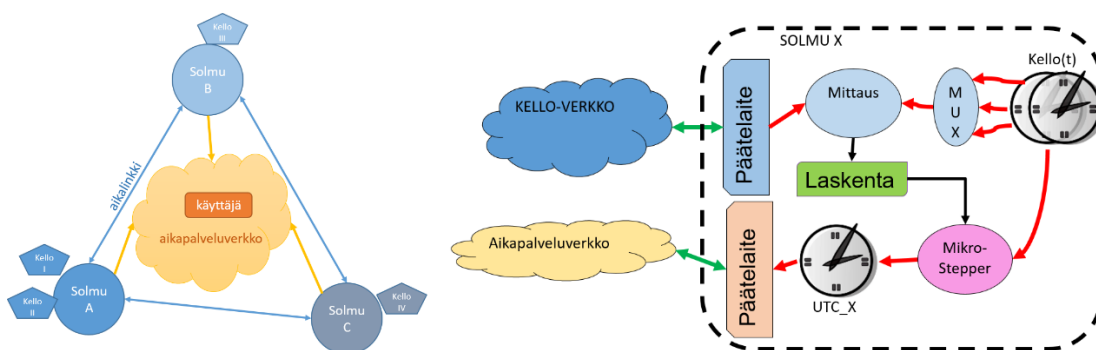
Tiivistelmä: Hankkeessa toteutettiin maantieteellisesti laaja kelloverkko käyttäen Precision-Time-Protocol:n White Rabbit -aikalinkkejä. Kelloverkko mahdollistaa n. 14 solmuissa sijaitsevan atomikellon taajuuksien vertailun ja hajautetun vikasietoisien UTC-ajan toteutuksen useassa solmussa. Hankkeessa kehitettiin myös solmuissa tarvittavaa laitteistoa mikro-stepperin sekä digitaalisen vaihevertailijan muodossa.

1. Johdanto

Kasvava määrä sovelluksia ja järjestelmiä vaatii tarkkaa aikaa ja taajuutta. Näitä ovat esimerkiksi 5G-televerkot, älykkäät sähköverkot ja nopea pörssikauppa [1]. Satelliittijärjestelmiä kuten GPS, GLONASS ja Galileo käytetään usein aikalähteenä, mutta niitä voidaan helposti häiritä tai harhauttaa [2]. Atomikelloihin perustuva aika ja maanpäällisiin valokuituihin perustuva ajan/taajuuden jakelujärjestelmä on vaihtoehtoinen tarkan ajan lähde, joka on satelliiteista riippumaton.

Aikaisemmassa MATINE-hankkeessa [3] on osoitettu, että PTP (Precision Time Protocol) White Rabbit (WR) [4] -aikalinkkejä voidaan käyttää kellojen vertailuun. PTP White Rabbit -yhteyden on osoitettu toimivan pitkällä etäisyyksillä Otaniemen ja Kajaanin välillä (kuituyhteys >900 km) [5].

Hahmotelma hajautetusta vikasietoisesta kelloverkosta on esitetty kuvassa 1 (vasen). Kelloverkko koostuu solmuista, joihin on sijoitettu yksi tai useampi kello, sekä solmujen välisistä ajan ja taajuuden siirtolinkeistä. Jokaisessa solmussa luodaan oma UTC (Coordinated Universal Time) -aikaskaala, jota voidaan jakaa eteenpäin solmusta palveluna käyttäjille. Kelloverkon linkit mahdollistavat kaikkien kellojen välisen taajuusvertailun, jonka tuloksia voidaan hyödyntää UTC-ajan generoinnissa. Parhaimmillaan kellojoukolla voidaan luoda aikaskaala, joka on stabiilimpi kuin mikään yksittäinen joukon kello [6]. Käyttäjän näkökulmasta aikapalvelu on vikasietoinen, jos käyttäjällä on tietoliikenneyhteys useampaan kelloverkon solmuun, joista ainakin yksi toimii. Tässä hankkeessa on kehitetty kelloverkkoa - kuvan 1 (vasen) keskiosassa piirretyn aikapalveluverkon rakenne, laitteisto ja vikasietoisuus jäävät tämän tutkimuksen ulkopuolelle.



Kuva 1: (vasen) Kelloverkon rakenne. (oikea) Kelloverkon solmun rakenne.

Kelloverkon solmun rakenteen hahmotelma on esitetty kuvassa 1 (oikea). Solmun keskeiset osat ovat aikalinkin/verkon päätelaite (esim. PTP White Rabbit kytkin), yksi tai useampi paikallinen aika-/taajuuslähde kuten atomikello tai GNSS (global navigation satellite system) -vastaanotin,

ajan/taajuuden mittausjärjestelmä, joka voi sisältää multiplexerin (MUX), sekä hienojakoinen syntetisaattori, ns. mikro-stepperi, jolla luodaan paikallinen UTC-aika perustuen valittuun lähteeseen. Solmun mittaus ja ohjaustoiminnot ovat ohjelmoitavissa, erityisesti mikro-stepperin taajuuskomento lasketaan saatavilla olevan mittaustiedon avulla käyttäen kellojoukkoalgoritmia. Solmusta tarjotaan aikapalveluja erilliseen aikapalveluverkkoon esim. PTP GrandMaster -päätelaitteella.

2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteet olivat:

- Toteuttaa kelloverkko jossa on >10 kpl atomikelloa.
- Kehittää ja testata uusia vähäkohinaisia menetelmiä kelloverkkosolmun keskisiin toimintoihin: taajuusmittaukseen ja taajuusgenerointiin.
- Kehittää hajautettu vikasietoinen kellojoukkoalgoritmi atomikellojen mallinnukseen.

2.1. Kelloverkko

VTT MIKES:n ylläpitämä Suomen aika UTC(MIKE) perustuu 6 kpl atomikelloon (3 kpl aktiivivety-maseria, 2 kpl Cs-kelloa, 1 kpl passiivimaser), jotka ennen vuotta 2013 olivat kaikki sijoitettu Otaniemeen. Pitkien aikalinkkien myötä kellojen hajauttamista kokeiltiin 2013 sijoittamalla yksi Cs-kello Kajaaniin. VTT MIKES:n yhteistyö Metsähovin observatorion kanssa (Aalto yliopisto ja Maanmittauslaitos) on lisäksi mahdollistanut kelloverkon yhteyden Metsähoviin, missä Aalto yliopistolla on 4 kpl aktiivivety-maseria.

Hankkeen tavoitteena on laajentaa kelloverkko kattamaan nämä ja mahdolliset muut uudet solmut siten, että mittaustuloksia saadaan 3–5 kpl solmusta ja >10 kpl atomikellosta. Yhteydet toteutetaan ns. BiDir-yhteyksinä missä se on mahdollista, ja muutoin tavanomaisin kahden kuidun telekommunikaatioyhteyksin. Päätelaitteina käytetään PTP WR -kytkimiä. Mahdollisuudet mitata sulkuvirhettä rengasmuotoisessa verkossa selvitetään. Solmujen komponentteina käytetään kustannussyistä itse kehitettyä jakeluvahvistinta [7] ja multiplexeriä [8].

2.2. Taajuusmittaus ohjelmistoradiopohjaisella vaihevertailijalla

Kaupallisesti saatavilla olevat parhaat taajuus-/aikaerolaskurit, esim. tässä työssä käytetty Keysight 53230A [9], ovat Allan-deviaatioltaan tasolla $2e-11$ @ 1s. Siten laskurin mittaustulosta on keskiarvoistettava vähintään tunteja, jotta laskurin oma kohina alittaisi hyvän atomikellon kohinatason. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vähäkohinaista ns. "direct digital" -mittaustapaa, jossa kellosignaali (esim. 10 MHz siniaalto) digitoidaan ja vaihevertailu tehdään ohjelmallisesti. Näitä digitaalisia vaihevertailijoita on kehitetty kaupallisesti 2004 lähtien [10], ja viime aikoina ohjelmistoradiopohjaisia ratkaisuja on julkaistu useita [11] [12]. Kaupallisten laitteiden korkea hintataso estää niiden laajemman käytön jokaisessa kelloverkon solmussa. Helpommin saatavilla oleva ja edullinen ohjelmistoradioon perustuva ratkaisu olisi toteutettavissa koko kelloverkossa.

Hankkeessa on tarkoitus selvittää yleiskäyttöisen ohjelmistoradion soveltuvuus vaihevertailussa sekä näin toteutetun vaihevertailijan suorituskyky.

2.3. Taajuusgenerointi mikro-stepperillä

Mikro-stepperillä tarkoitetaan atomikelloon kytkettyä laitetta, jolla voidaan generoida aika-/taajuussignaaleja, joilla on ohjelmoitu taajuusero verrattuna atomikelloon. Tyypillisesti esimerkiksi Cesium-kellon taajuus voi poiketa SI-sekunnin määritelmästä 1...10 ns/päivä (n. $1e-14$ suhteellinen taajuusvirhe), ja vetymaserin taajuus ryömiä $1e-15$ /päivä tasolla. Mikro-stepperillä korjataan tämä tunnettu virhe ja laitteella on siis oltava tavanomaista signaaligeneraattoria huomattavasti tarkempi.

tavasti parempi taajuusresoluutio. Kaupallisten laitteiden rakenteesta on saatavilla vaihtelevasti tietoa. Ascarruntz on julkaissut [13] ja patentoinut [14] useita eri sekoitusmenetelmiä, joista joku vastannee SpectraDynamics:in tuotetta. Pariisin observatorio on myös julkaissut pääpiirteiltään samantapaisen mikro-stepperin [15]. Koska kaupallisten laitteiden hintataso on korkea, ja kelloverkossa mikro-steppereitä tarvitaan useita, on hankkeessa tarkoitus kehittää oma mikro-stepperin prototyyppi ja mitata sen suorituskykyä.

2.4. Kellojoukkoalgoritmi

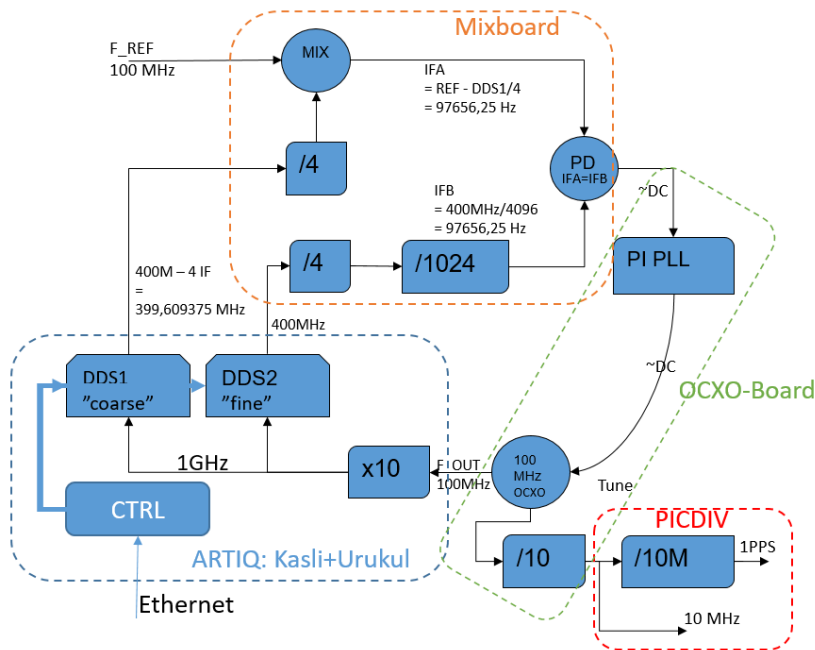
Kellojoukkoalgoritmin tarkoitus on mallintaa solmuihin sijoitettuja vapaasti käyviä atomikelloja perustuen kelloverkon aika-/taajuusmittauksiin. Algoritmi muodostaa mallin jokaisen kellon vaiheelle, taajuudelle ja taajuuden muutokselle. Lisäksi kellojoukkoalgoritmissa voidaan muodostaa uusi kellojoukko-aika, joka yleensä perustuu kaikkien kellojen painotettuun keskiarvoon. Parhaimmillaan kellojoukko-aika voi olla stabiilimpi kuin mikään yksittäinen joukon kello [6]. UTC-aika voidaan realisoida kelloverkon solmussa perustuen yhteen tai useampaan kelloon, jonka mallinnettu taajuusvirhe korjataan mikro-stepperillä.

Hankkeessa on tarkoitus kehittää kellojoukkoalgoritmi simulaation avulla. Hankkeen lopussa toteutetaan mahdollinen koejakso, jossa algoritmia käytetään kellojen mallinnukseen ja yhden tai usean mikro-stepperin ohjaukseen.

3. Aineisto ja menetelmät

3.1. Kelloverkon toteutus

Kelloverkon toteutus eteni hankkeen aikana merkittävästi. Solmuja on toteutettu VTT MIKES:n tiloissa Otaniemessä ja Kajaanissa, Metsähovissa, sekä yhteistyökumppaneilla. Verkon solmut ja solmuihin sijoitetut atomikellot on esitetty kuvassa 2. Verkon laajuus ylitti ennakkosuunnitelmat (10 kelloa), ja verkko on vuoden 2018 aikana mahdollistanut 14 kpl atomikellon mittauksen. Lisäksi oli mahdollista toteuttaa rengasmuotoinen verkon osa (M1-M2-M3), jonka avulla mitattiin verkon sulkuvirhettä. Kahteen solmuun (OTA, M2) sijoitettiin mikro-stepperit, joiden avulla tuotettiin Otaniemessä jatkuvasti UTC(MIKE) aika perustuen joko AHM1 tai AHM2 kelloon, sekä solmussa M2 hankkeen loppuvaiheessa oma UTC-aika perustuen kelloon AHM4.

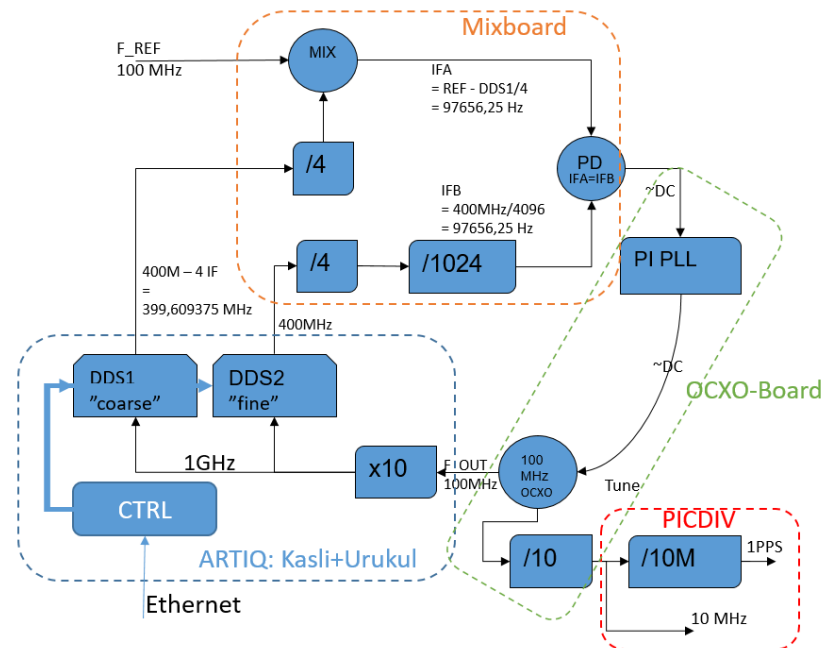


Kuva 2: Kelloverkon toteutettu rakenne. Solmuihin on sijoitettu yhteensä 8 kpl aktiivivetymaseria (AHM1-AHM8), 2 kpl passiivivetymaseria (PHM1 ja PHM2), sekä 4 kpl Cs-kelloa (Cs1-Cs4), yhteensä 14 atomikelloa. Verkossa on kaksi mikro-stepperiä MS1 ja MS2, ja kolme GNSS vastaanotinta.

Osana kelloverkon toteutusta mittaustietokoneisiin asennettiin hajautettu vikasietoinen *Cassandra* [16] -tietokanta. Tietokanta mahdollistaa mittaustietojen lukemisen ja tallentamisen mistä tahansa verkon solmusta. Tietokanta on vikasietoinen, ts. tieto tallennetaan useampaan solmuun ja tietokantapalvelu pysyy tiettyynajaan asti toiminnallisena, vaikka yksi tai useampi solmu katoaa verkosta.

3.2. Mikro-stepperin kehitystyö

Hankkeessa toteutettiin mikro-stepperin prototyyppi, jonka rakenne on esitetty kuvassa 3. Laite perustuu avoimeen ARTIQ-ympäristöön [17], jonka "Kasli" -ohjainkortti [18] sekä "Urukul" DDS-kortti [19] muodostavat mikro-stepperin digitaalisen osan. Lisäksi kehitettiin itse 3 kpl analogikortteja ("Mixboard", "OCXO-board", ja "PICDIV"). DDS-kortista käytettiin kahta ulostuloa DDS1 ja DDS2. Nämä signaalit on tuotettu AD9912 piirillä [20], joka tuottaa ohjelmoitavan taajuuden n. 1-400 MHz välillä. Taajuus on ohjelmoitavissa 48-bitin resoluutiolla (kts. myös tulokset), jolloin pienin suhteellinen taajuusmuutos on n. 9×10^{-15} .



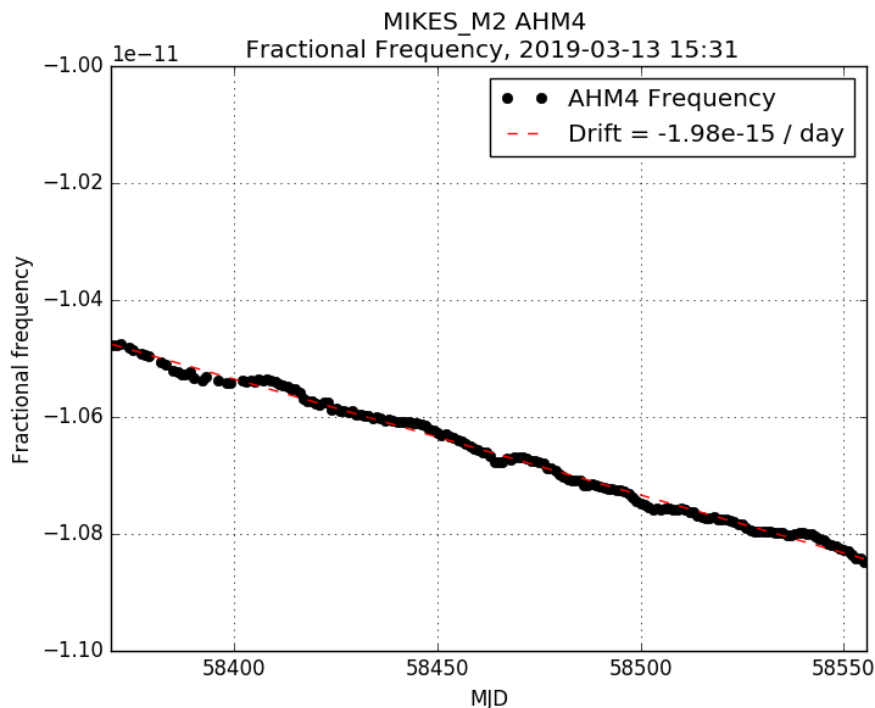
Signaalinkäsittely toteutettiin GNU Radio-ohjelmistolla [24] pääpiirteittäen Sherman&Jördens [11] julkaisun mukaisesti. Digitaalisen vaihevertailijan hyvä vaihe/taajuus-resoluutio perustuu näytteistetyn signaalin kaistanleveyden kaventamiseen. Esimerkiksi jos kellosignaalia kerätään 1 MS/s näytteistystaajuudella, joka alipäästösuodatetaan 0.5 Hz kaistanleveyteen ja 1 S/s näytteistysnopeuteen, pienenee Allan-deviaatio teoriassa tekijällä 1000.

Digitaalisen signaalinkäsittelyn lisäksi kokeiltiin Jablonskin ehdottamaa menetelmää [25], jossa digitoidaan sekä haluttu (hitaasti muuttuva) kellosignaali että kellosignaalista poikkeavalla taajuudella lisätty kalibrintisignaali. Vertailemalla kellosignaalin ryömintää kalibrintisignaaliin on mahdollista poistaa ohjelmistoradion sekoitus ja A/D-muunnos asteen aiheuttamat virheet.

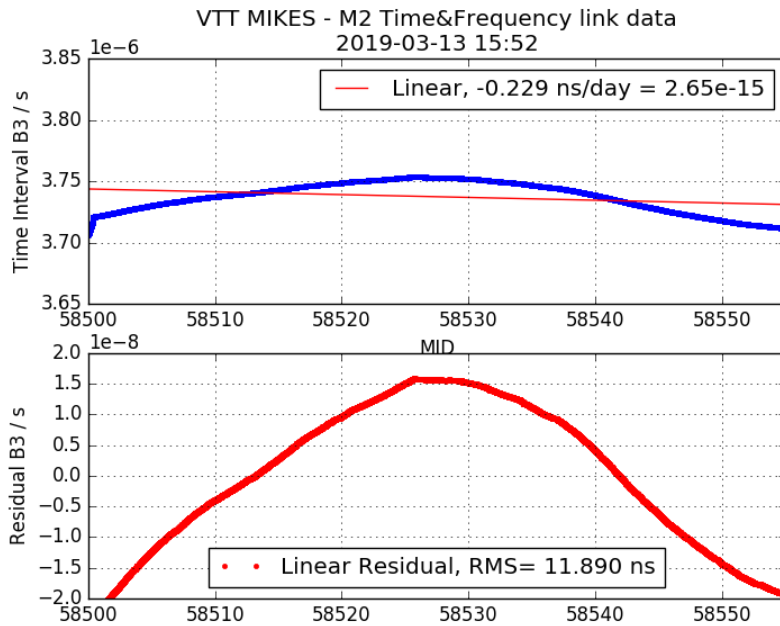
4. Tulokset ja pohdinta

4.1. Kelloverkon mittaustulokset

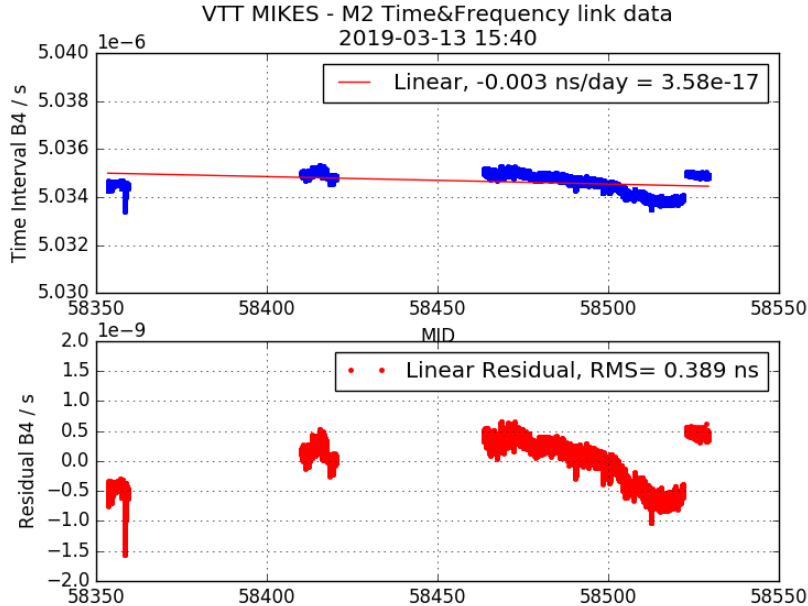
Kelloverkon solmuista kerättiin hankkeen aikana suuri määrä dataa Cassandra-tietokantaan, josta tässä on mahdollista esittää vain osa. Kuvan 2 verkosta tässä on esitetty kellon AHM4 taajuusmitaus sekä AHM4-kelloon perustuvan UTC-ajan erotus Otaniemessä luotuun UTC(MIKE) aikaan. Lisäksi on esitetty sulkuvirhe M1-M2-M3-silmukassa, jonka ideaalitulanteessa tulisi olla nolla, ts. siirretty aika reittiä OTA-M1-M2 pitkin vastaa aikaa joka on siirretty reitillä OTA-M1-M3-M2.



Kuva 4: AHM4 kellon mitattu suhteellinen taajuus noodissa M2 yli 150 päivän aikana. Kellon taajuus ryömyy keskimäärin $1.98e-15$ / päivä. MJD = Modified Julian Date, esimerkiksi MJD 58550 = 2019-03-08.



Kuva 5: AHM4-kelloon perustuva mikro-stepperillä MS2 luotu UTC-aika solmussa M2 verrattuna Otaniemessä luotuun UTC(MIKE) aikaan. Alemmasta kuvasta näkyy, että M2-solmussa luotu UTC-aika on poikennut n. +/- 20 ns UTC(MIKE) ajasta n. 50 päivän koejakson aikana.

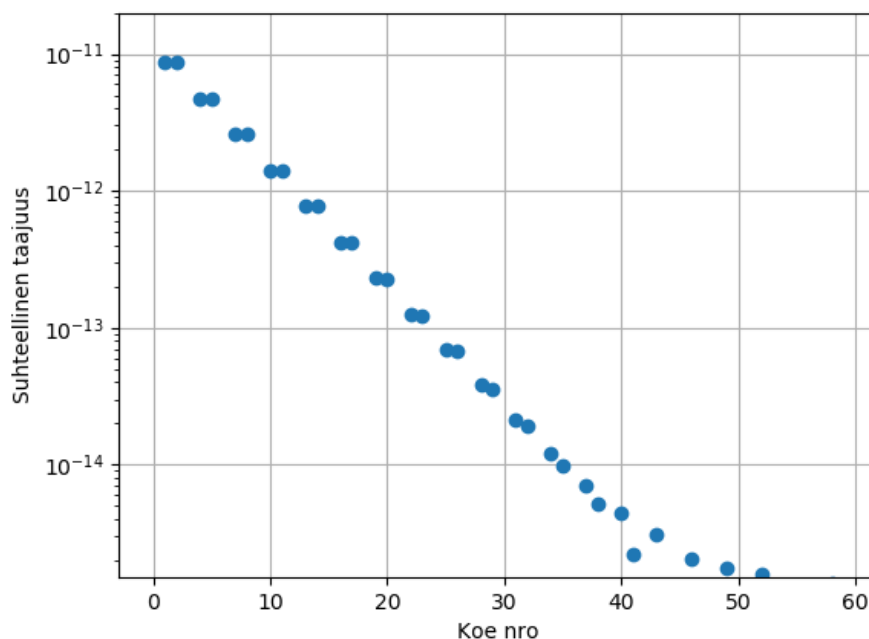


Kuva 6: Sulkuvirhe. Mittaustulos vertaa M2-solmun WR-kytkimen aikaa (reitiltä OTA-M1-M2) reitin OTA-M1-M3-M2 kautta tulevaan aikaan. Mittaustulos n. 5 μs johtuu verkon epäsymmetrioista. Kuvassa on esitetty dataa vain siltä ajalta jolloin aikalinkki M2-M3 on toiminut. Alemmassa kuvassa näkyy, että sulkuvirheen vaihtelu on pysynyt pääosiltaan +/- 0.5 ns. vaihteluvälin sisällä.

4.2. Mikro-stepperi-prototyypin mittaustulokset

Mikro-stepperi-prototyypin tuottamaa taajuutta mitattiin Microsemi 3120A -vaihevertailijalla tunnin jaksoissa, joiden välillä taajuutta muutettiin säätämällä DDS2-taajuutta. Mittaustulokset on esitetty kuvassa 7. Tulokset ovat odotettuja ja mikro-stepperin tuottama taajuus on mittaustarkkuuden rajoissa kaavan (1) mukainen. Mittauksissa havaittiin, ettei AD9912 pienintä taajuusaskelta n. 3.6 μHz käytännössä saavuteta - havaittu pienin taajuusaskel oli aina kaksinkertainen n. 7.1 μHz . Havainto ilmoitettiin valmistajalle, joka kiitti havainnosta ja ilmoitti korjaavansa AD9912 datalehden tietoja jatkossa. Tästä johtuen mikro-stepperin taajuusresoluutio on suunnitelmaan verrattuna kaksinkertainen, n. $1.7\text{e-}17$, joka vastaa 1.5 ps/päivä vaiheen ryömintää.

Mittaustulokset olivat odotettuja ja mikro-stepperi-prototyyppiä voidaan jatkossa koekäyttää laboratoriossa UTC-ajan tuottamiseen. Laitteiston kustannus n. 5 keur on huomattavasti kaupallista mikro-stepperiä (n. 20 keur) halvempi ja mahdollistaa sen laajemman käytön kelloverkossa.

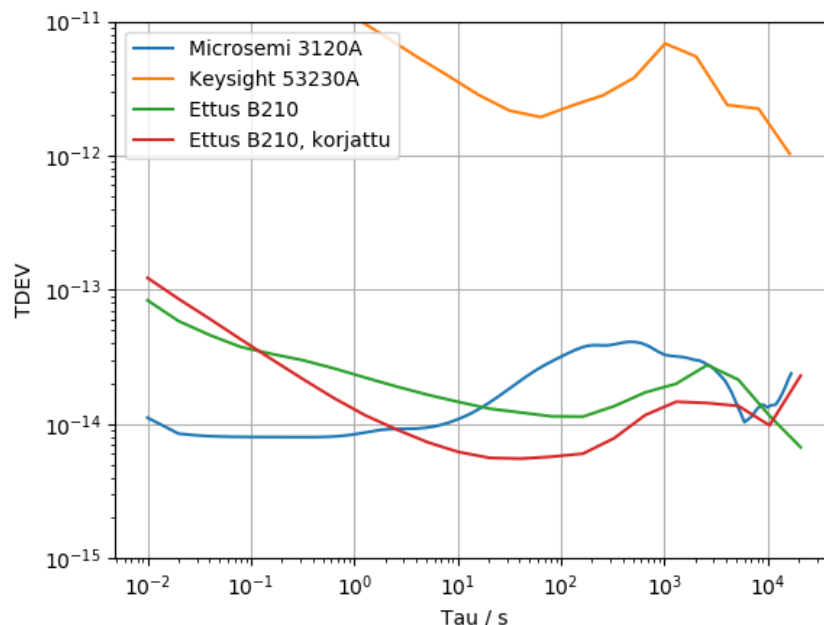


Kuva 7: Mikro-stepperi-prototyypin taajuusmittaus. Jokainen piste vastaa keskiarvoa 1 h mittausjaksolta. Kokeiden välillä DDS2-taajuutta säädettiin logaritmisella asteikolla. Alle $1\text{e-}14$ taajuuksien mittaustuloksiin vaikuttaa satunnaiskohina 1 h mittauksessa.

4.3. Ohjelmistoradiopohjaisen vaihevertailijan mittaustulokset

Suoraan RF-signaalia näytteistävällä N210-ohjelmistoradiolla saavutettiin joissain laboratoriokokeissa odotettuja tuloksia. Kuitenkin kun mitattavat kellosignaalit olivat lähellä no-minaalista 10 MHz taajuutta havaittiin mittaustuloksissa aina ylimääräistä kohinaa. Ilmiön selittää mahdollisesti mitattavan taajuuden (10 MHz) ja näytteistystaajuuden 100 MS/s yksinkertainen suhde (1:10), jota tulisi välttää.

Sekoittavalla ohjelmistoradiolla B210 saavutettiin parempia tuloksia. Päättulos on esitetty kuvassa 8, jossa ohjelmistoradion kohinapohjaa verrataan kaupalliseen vaihevertailijaan (Microsemi 3120A) sekä aikaerolaskuriin (Keysight 53230A). Näytteistetty signaali ali-päästösuodatettiin n. 50 Hz kaistanleveyteen ja 100 S/s näytteistystaajuuteen useassa vaiheessa. Kvadratuurinäytteistä I/Q laskettiin kanavien vaihe-ero, joka tallennettiin analyysiä varten. Laskenta tehtiin AllanTools-ohjelmistolla [26]. Tulos osoittaa, että kehitettyä ohjelmistoa ja edullista ohjelmistoradiota voidaan jatkossa käyttää vähäkohinaiseen vaihevertailuun ja taajuusmittaukseen kelloverkkosolmuissa.



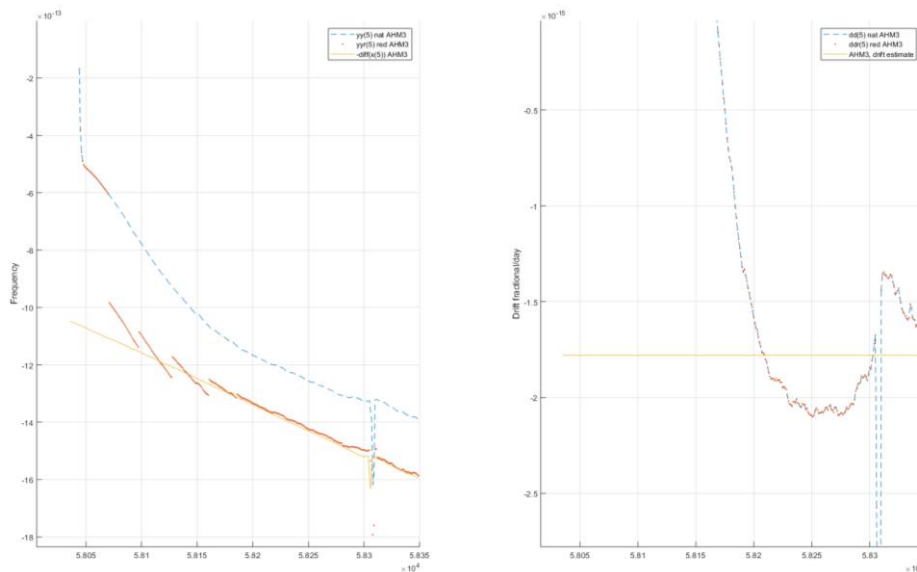
Kuva 8: Eri taajuus-/aikavälilaskureiden kohinapohja ilmaistuna TDEV-kuvaajana. Tässä työssä kehitetty ohjelmistoradiopohjainen vaihevertailija on kilpailukykyinen kaupallisen Microsemi 3120A -laitteen kanssa yli 10 s keskiarvoistusajoilla. Tavanomainen aikaerolaskurin (Keysight 53230A) kohina on noin satakertainen verrattuna digitaaliseen vaihevertailijaan. Korjattu data tarkoittaa Jablonskin [25] menetelmän mukaan korjattua mittaustulosta.

4.4. Kellojoukkoalgoritmin tulokset

Kellojoukkoalgoritmia kehitettiin simulaation avulla perustuen julkaistuihin Kalman-suodattimeen perustuviin algoritmeihin ja menetelmiin [6] [27] [28]. Algoritmin lähdedatana käytettiin kelloverkon tehtyjä kellojen välisiä vaihemittauksia. Tutkimuksen tuloksena on identifioitu kellojoukkoalgoritmin keskeisiä haasteita, joihin tulisi keskittyä jatkotutkimuksissa:

- N kpl kellojoukossa on N-1 kpl toisistaan riippumattonta (vaihe tai taajuus) mittaustulosta. Tästä johtuen Kalman-suodattimen arviot kahden kellon väliselle taajuuserolle ovat oikeat, mutta malli yksinään ei kiinnitä kellon absoluuttitaajuutta verrattuna joukon ulkopuoliseen kelloon. Hankkeessa kehitettiin tähän alustava ratkaisu, jossa Kalman-suodattimen mallia ohjataan kuukausittain perustuen Circular-T:ssä julkaistuihin UTC-UTC(MIKE) vaihe-eroihin.
- Kalman-suodatin-laskennassa käytetään jokaisen kelloille kohinamallia. Kohinamallin parametrit oletetaan useassa julkaisussa tunnetuksi *a priori* - mikä ei välttämättä vastaa todellista kelloverkon tilannetta. Hankkeessa selvitettiin alustavasti, miten kelloverkkoon liitetyn uuden kellon kohinamalli voitaisiin mitata ns. oppimisjakson aikana (1-3 kk) ennen kellon liittämistä varsinaiseen kellojoukkoon [29].
- Kaikkia joukon kelloja hyödyntävän stabiilin kellojoukkoajan luominen osoittautui haasteelliseksi. Kirjallisuudessa on esitetty monia eri menetelmiä, miten kellojen painokertoimet tulisi määrittää. Erityisesti uuden kellon lisääminen joukkoon tai vikaantuneen kellon/mittauksen/aikalinkin vaikutus kellojoukkoon tulisi käsitellä siten, ettei kellojoukon painotettu keskiarvo häiriinny.

Koejaksoa, jossa kellojoukkoalgoritmia olisi kokeiltu kelloverkon solmussa mikro-stepperin ohjaukseen, ei ehditty toteuttaa. Esimerkkikuva kellon AHM3 mallinnetusta taajuudesta ja taajuuden muutoksesta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Kellojoukkoalgoritmin esimerkkitulokset kelloille AHM3. Vasemmalla kellon taajuus, oikealla taajuuden muutos. Punaiset pisteet edustavat Kalman-suodattimen mallia AHM3-kelloille johon on lisätty Circular-T -julkaisun mukainen ohjaus. Kuvasta näkyy, miten mallinnettu taajuus vastaa todellista taajuutta n. 3 kk oppimisjakson jälkeen.

5. Loppupäätelmät

Hankkeessa toteutettiin maantieteellisesti laaja kelloverkko käyttäen WR PTP -aika-/taajuuslinkkejä, jossa oli mahdollista verrata 14 kpl atomikelloa keskenään. Verkko on huomattavasti laajempi kuin aikaisemmissa tutkimuksissa toteutetut lähinnä kahden paikkakunnan väliset yhteydet. Kehitetty kelloverkko ja menetelmät/laitteet voivat olla mallina tai perustana kansalliselle kelloverkolle, joka tarjoaa vikasietoista aikapalvelua kriittiselle infrastruktuurille.

Hankkeessa käytettiin aikaisemmin kehitettyä jakeluvahvistinta ja multiplexeriä sekä kehitettiin kaksi uutta laitteistoa kelloverkkosolmun keskeisiin toimintoihin. Ohjelmistoradiopohjaisella vaihevertailijalla toteutettiin vähäkohinainen taajuusmittaus. DDS-syntetisaattoreihin perustuvalla mikro-stepperillä voidaan luoda UTC-aika perustuen vapaasti käyvään atomikelloon. Itse kehitetyt avoimet (ns. open-hardware) laitteet ja niiden huomattavasti kaupallisia laitteita halvempi hintataso on edellytys laajamittaiselle käytölle kelloverkoissa.

Kellojoukkoalgoritmia kehitettiin Kalman-suodattimeen perustuen simulaatioiden avulla. Keskeisiä haasteita on edelleen kohinamallien määrittämisessä, painokertoimien laskennassa sekä kellojen lisäämisessä/poistamisessa. UTC-ajan laskenta on toistaiseksi toteutettu manuaalisesti kerran kuukaudessa. Autonominen hajautettu Kalman-suodatin, joka vikasietoisesti mallintaisi kelloverkkoa, jää tulevien tutkimusten aiheeksi.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

- Esitelmä EFTF 2018 konferenssissa, Torino, 10–12 Huhtikuu 2018, A. Wallin, "Improved systematic and random errors for long-distance time-transfer using PTP White Rabbit"
- Esitelmä 2018 White Rabbit Workshop:ssa, CERN, 6–7 Lokakuu 2018, A. Wallin, "Towards distributed fault-tolerant timekeeping based on a WR-network"
<https://www.ohwr.org/project/white-rabbit/wikis/Oct2018Meeting>

Viitteet

- [1] GSA, "Report on Time & Synchronization User Needs and Requirements," 2018. [Online]. Available: https://www.gsc-europa.eu/system/files/galileo_documents/Time-Synchronisation-Report-on-User-Needs-and-Requirements-v1.0.pdf.
- [2] H. Kuusniemi, "Satelliittipaikannuksen häirinnän tunnistaminen, analysointi ja riskinhallinta," 2012. [Online]. Available: https://www.defmin.fi/files/3049/817_Final_Report_DETERJAM_30Nov2012.pdf.
- [3] M. Merimaa ja A. Wallin, "Tarkka aikasynkronointi ja aikalinkit maanpuolustuksessa," 2015. [Online]. Available: https://www.defmin.fi/files/3671/0034_MATINE_tarkka_aikasynkronointi_Summary_Report.pdf.
- [4] M. Lipinski, T. Wlostowski, J. Serrano ja P. Alvarez, "White Rabbit: a PTP Application for Robust Sub-nanosecond Synchronization," tekijä: *ISPCS*, 2011.
- [5] E. Dierikx, A. Wallin, T. Fordell, J. Myrsky, P. Koponen, M. Merimaa, T. Pinkert, J. Koelemeij, H. Peek ja R. Smets, "White Rabbit Precision Time Protocol on Long Distance Fiber Links," *TUFFC*, 2015.
- [6] C. Greenhall, "A review of reduced Kalman filters for clock ensembles," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, osa/vuosik. 59, pp. 491-496, 2012.
- [7] A. Wallin, "1-to-8 Pulse and Frequency Distribution Amplifier," 2017. [Online]. Available: <https://www.ohwr.org/projects/pda-8ch-fda-8ch>.
- [8] A. Wallin, "RF Multiplexer 8ch 1GHz," 2018. [Online]. Available: <https://www.ohwr.org/project/rf-mux-8ch>.
- [9] Keysight, "53230A 350 MHz Universal Frequency Counter/Timer, 12 digits/s, 20 ps," [Online]. Available: <https://www.keysight.com/en/pd-1893420-pn-53230A/350-mhz-universal-frequency-counter-timer-12-digits-s-20-ps>.
- [10] J. Grove, J. Hein, J. Retta, P. Schweiger, W. Solbrig ja S. R. Stein, "Direct-digital phase-noise measurement," tekijä: *Proceedings of the 2004 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition*, 2004.
- [11] J. A. Sherman ja R. Jordens, "Oscillator metrology with software defined radio," *Rev. Sci. Instrum.*, osa/vuosik. 87, p. 054711, 2016.
- [12] C. Andrich, A. Ihlow, W. Kotterman, N. Beuster ja G. D. Galdo, "Using software defined radios for baseband phase measurement and frequency standard calibration," tekijä: *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2017.
- [13] F. G. Ascarrunz, "A high resolution phase and frequency offset generator," tekijä: *Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium*, 1998.
- [14] F. G. Ascarrunz, "Frequency and phase offset signal generator and method". United States of America Patentti 6278330, 1998.
- [15] G. D. Rovera, M. Abgrall ja M. Siccaldi, "Characterization of an Auxiliary offset Generator for steering of H Masers," tekijä: *2012 European Frequency and Time Forum*, 2012.
- [16] The Apache Software Foundation, "Apache Cassandra," [Online]. Available: <http://cassandra.apache.org/>.
- [17] "Advanced Real-Time Infrastructure for Quantum physics," [Online]. Available: <https://m-labs.hk/artiq/>.
- [18] "Kasli EEM controller," [Online]. Available: <https://github.com/sinara-hw/Kasli/wiki>.
- [19] "Urukul 4 channel GS/s DDS EEM," [Online]. Available: <https://github.com/sinara-hw/Urukul/wiki>.
- [20] Analog Devices, "AD9912, 1 GSPS Direct Digital Synthesizer with 14-Bit DAC," 2010. [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/products/ad9912.html>.

- [21] T. Van Baak, "picDIV - Single Chip Frequency Divider," [Online]. Available: <http://www.leapsecond.com/pic/picdiv.htm>.
- [22] Ettus Research, "Ettus USRP N210," [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/UN210-KIT>.
- [23] Ettus Research, "Ettus USRP B210," [Online]. Available: <https://www.ettus.com/product/details/UB210-KIT>.
- [24] The GNU Radio Foundation, "GNU Radio, the free and open software radio ecosystem," [Online]. Available: <https://www.gnuradio.org/>.
- [25] S. Jablonksi, K. Czuba, F. Ludwig ja H. Schlarb, "2PI Low Drift Phase Detector for High-Precision Measurements," *IEEE Transactions on nuclear science*, osa/vuosik. 62, nro 3, 2015.
- [26] A. Wallin, "AllanTools - A python library for calculating Allan deviation and related time & frequency statistics," [Online]. Available: <https://github.com/aewallin/allantools>.
- [27] C. Greenhall, "Forming stable timescales from the Jones-Tryon Kalman filter," *Metrologia*, 2003.
- [28] L. Galleani ja P. Tavella, "On the use of the Kalman filter in timescales," *Metrologia*, 2003.
- [29] C. Zucca ja P. Tavella, "The clock model and its relationship with the Allan and related variances," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 2005.
- [30] M. Rizzi, "WRS Low Jitter Daughterboard," [Online]. Available: <https://www.ohwr.org/project/wrs-low-jitter/wikis/home>.