



2015/2500M-0034

ISSN 1797-3457 (verkkajulkaisu)  
ISBN (PDF) 978-951-25-2756-4

## TIIVISTELMÄRAPORTTI (SUMMARY REPORT)

### Tarkka aikasykronointi ja aikalinkit maanpuolustuksessa

Mikko Merimaa ([mikko.merimaa@vtt.fi](mailto:mikko.merimaa@vtt.fi), +358504105517)  
Anders Wallin ([anders.wallin@vtt.fi](mailto:anders.wallin@vtt.fi), +358504155975)  
VTT MIKES, Tekniikantie 1, 02150 Espoo

#### Tiivistelmä

Hankkeessa toteutettiin aikalinkki PTP White Rabbit tekniikalla VTT MIKES Espoon ja etäpään välillä. Aikalinkin molemmissa päissä oli vetymaser kellot, joita vertailtiin toisiinsa. Aikalinkin epäsymmetria kalibroitiin siirrettävällä Rubidium-kellolla. Aikalinkin siirtämän ajan virheeksi arvioitiin +/- 1 ns mittausjakson (39 päivää) aikana. Simulaation avulla osoitettiin miten tarkkaa aikaa voi ylläpitää ja jakaa maanlaajuisesti synkronointiverkossa.

#### 1 Johdanto

Tarkan ajan ja synkronisaation merkitys yhteiskunnassa kasvaa. UTC aikaa 1  $\mu$ s tai paremmalla epävarmuudella tarvitaan telekom-alalla LTE ja 5 G tukiasemien synkronointiin, navigointiin, tietoverkoissa aikaleimaukseen (Pankit, Finanssiala), sähkö ja energiaverkoissa mm. energian kulutuksen ja sähkön laadun mittaukseen, sekä monessa muussa sovelluksessa. Maanpuolustuksen tarkan aikasykronoinnin ja aikalinkkien sovellukset voivat olla esim. redundanttia ja robustia synkronointiverkko, havaintoverkot (esim. passiivitutkat), sala-algoritmit tietoverkoissa ja radioliikenteessä, sekä navigointijärjestelmät. Kansainvälisessä SI-mittayksikköjärjestelmän perusyksiköistä aika/taajuus voidaan toteuttaa ja mitata tarkimmin - ja siksi SI-järjestelmää ollaan uudistamassa siten että sekunnin määritelmä on perustana kaikille muille mittayksiköille [New SI]. Tämä edelleen korostaa ajan ja synkronisaation tarvetta kaikkialle jossa tehdään jäljitettäviä ja luotettavia mittauksia (teollisuus, yliopistot, tiede).

VTT MIKES Metrologia on vuoden 2015 alusta osa VTT OY:tä ja toimii suomen kansallisena metrologialaitoksena. VTT MIKES ylläpitää Suomen aikaa reaaliaikaisena UTC-ennusteena UTC(MIKE), perustuen atomikelloihin jotka on sijoitettu Espooseen ja Kajaaniin. Aikaskaala muodostetaan ennustamalla atomikellon taajuuden virhe ja sen muutos ja korjaamalla tämä ns. kellon ikääntyminen. Koordinoitua maailmanaikaa UTC:tä ylläpitää BIPM joka kuukausittain julkaisee kansallisten metrologialaitosten ylläpitämien aikaskaalojen erotuksen laskennalliseen UTC aikaan, ns. UTC-UTC(k) erotus (k= kansallisen metrologialaitoksen lyhenne) Circular-T julkaisussa [BIMP]. MIKESin aikalinkki BIPM:lle muodostuu geodeettisen 2-taajuus GPS aika-vastaanottimen kautta. Aikavertailua varten päivittäisiin RINEX GPS-havaintotiedostoihin kahden UTC-laboratorion välillä sovelletaan GPS-PPP (Precise Point Positioning) laskentamenetelmää. UTC(MIKE) erotus laskennallisesta UTC-ajasta on tyypillisesti alle +/-10 ns. MIKESin ylläpitämä aikaskaala on kansainvälisesti yksi parhaista, yleensä 10 parhaan UTC-laboratorion joukossa (maailmanlaajuisesti laboratorioita on 71 kpl).

Perinteiset ajan ja taajuuden siirtomenetelmät perustuvat satelliittimenetelmiin (GNSS järjestelmät ja geostationaariset satelliitit), aikaleimattuihin IP-paketteihin internetissä (NTP), aikamerkkilähettimiin (DCF77 saksassa, MSF isobritannissa), tai siirrettävään (atomi)kelloon. Network Time Protocol –menetelmää tarkempi ajan ja taajuuden siirto voidaan tehdä ns. PTP (Precision Time Protocol) menetelmällä, jossa tietoverkossa siirtyvien pakettien aikaleimaus on toteutettu laitteistotasolla. Nykyinen PTP standardi IEEE1588 on vuodelta 2008.

Postiosoite	Käyntiosoite	Puhelin	s-posti, internet
Postadress	Besöksadress	Telefon	e-post, internet
Postal Address	Office	Telephone	e-mail, internet
MATINE/Puolustusministeriö	Eteläinen Makasiinikatu 8 A	Vaihde +358 295 16001	matine@defmin.fi
PL 31	00130 Helsinki		www.defmin.fi/matine
FI-00131 Helsinki	Finland		
Finland			



Tässä työssä on käytetty tulevan IEEE1588-2018 standardin ns. High Accuracy profiilin alustavaa toteutusta 'PTP White Rabbit' (WR) [Wlostowski]. White Rabbit -tekniikan on kehittänyt CERN, alun perin hiukkaskiihdyttimen mittaus- ja ohjaussovelluksiin. WR tekniikkaa on kuitenkin sovellettu laajasti CERN:in ulkopuolella esim. kellojen vertailuun ja tähtitieteellisiin havaintoihin, jne. MIKES toteutti vuosina 2013-2014 toistaiseksi maailman pisimmän (n. 1000 km) WR-yhteyden Espoon ja Kajaanin välillä [Dierikx].

Työn merkitystä korostaa GNSS järjestelmien (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou, jne) lisääntynyt ja helppo häiritävyys (jamming) ja harhautus (spoofing). Valokuituyhteydellä toteutettua aikalinkkiä on huomattavasti vaikeampaa häiritä tai harhauttaa.

## 2 Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tutkimuksen tavoitteena oli

- 1) selvittää pitkän etäisyyden White Rabbit –aikalinkin toimivuus ja suorituskvyn rajoitukset
- 2) kehittää uusi menetelmä linkin epäsymmetrian eliminointiin käyttäen erisuuntaisia White Rabbit aikalinkkejä ja
- 3) evaluoida Suomen ajan UTC(MIKE) ylläpidon mahdollisuudet synkronointiverkossa.

### 2.1 White Rabbit linkin toimivuus ja suorituskvyn rajoitukset

Laboratoriokokeissa PTP White Rabbit -tekniikalla toteutetuilla aikalinkeilla on saavutettu hyvä suorituskvyy. Näissä kokeissa tehdään tyypillisesti ajan/taajuuden siirto WR protokollalla kahden WR laitteen välillä, joita yhdistää kuitukela, joka on tyypillisesti pituudeltaan 1 - 10 km. Aikalinkin systemaattiseen virheeseen vaikuttaa erityisesti linkin epäsymmetria, minkä vuoksi WR-yhteydet suositellaan toteutettavaksi 100BASE-BX10 SFP lähettin/vastaanottimilla yhdessä kuidussa (kts 3.1). Yleisesti käytössä olevat pitkän etäisyyden tietoliikenneverkot on kuitenkin toteutettu kuitupareilla joissa valo/tietoliikenne kulkee vain yhteen suuntaan yhdessä kuidussa. MIKES on demonstroinut tällaisella kuituparilla 1000 km WR-linkin CSC:n FUNET-DWDM verkossa Espoosta Kajaaniin. Tämän aikalinkin epävarmuutta mitattiin Kajaaniin sijoitettua Cs-kelloa sekä GPS-vastaanotinta käyttäen ja tulokseksi saatiin +/- 2 ns mittausjakson (100 päivää) aikana [Dierikx].

Tässä tutkimuksessa oli tarkoitus selvittää kuituparilla toteutetun WR-linkin suorituskvyy MIKESin Espoon toimipisteen ja etäpään välillä. Etäpään sijoitettu vetymaser-atomikello on vähäkohinaisempi ja ennustettavampi kuin aiemmassa kokeessa käytetty Cs-kello. Selvitettävät kysymykset olivat erityisesti:

- Miten WR aikalinkki (<300 km pituus) DWDM verkossa voidaan toteuttaa?
- Mikä on aikalinkin epäsymmetria ja sen aiheuttama synkronointivirhe?
- Miten stabiili aikalinkki on kalibroinnin jälkeen?
- Mikä on kellojen rajoittama mittausraja aikalinkin suorituskvyyllä ja onko linkki tällä tasolla?

### 2.2 White Rabbit linkkien kalibrointimenetelmät

WR aikalinkit perustuvat edestakaisen viiveen mittaukseen ja tämän mittaustuloksen perusteella tehtävään yhdensuuntaisen viiveen arviointiin/laskentaan. Laskennassa käytetään arviota linkin epäsymmetriasta (kts 3.1). WR protokollassa itsessään ei ole mekanismeja tai menetelmiä jolla epäsymmetria voidaan määrittää - tähän vaaditaan aina ulkoinen kalibrointimenetelmä. Menetelmä voi olla siirrettävä atomikello tai kalibroidut GNSS vastaanotimet, joilla mitataan aikalinkin molemmissa päissä.

Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli:

- Kehittää ja kokeilla laboratoriossa kalibrointimenetelmä joka perustuu epäsymmetrian kääntämiseen.
- Kalibroida toteutettu aikalinkki käyttäen joko siirrettävää atomikelloa tai GNSS vastaanotinta sekä määrittää kalibroinnin epävarmuus.

### 2.3 Selvittää ajan ylläpidon mahdollisuudet synkronointiverkossa.

Tällä hetkellä tarkka (aika)synkronointi maantieteellisesti etäisten pisteiden välillä tehdään käytännössä aina käyttäen GNSS järjestelmiä. Ilman satelliiteista riippumatonta synkronointimenetelmää, järjestelmien synkronointi väistämättä menetetään, jos GNSS järjestelmät ovat tilapäisesti tai pysyvästi poissa käytöstä. Suomen ajan ylläpitoon käytettävät kellot ovat hyvin stabiileja, niiden ajan epävarmuus on 10 ns luokkaa kuukauden sisällä Suomen ajan maailman aikaan yhdistävän satelliittilinkin menettämisen jälkeenkin. On kuitenkin huomattava, että yhdessä paikassa saatavilla oleva tarkka aika ei hyödytä järjestelmätason synkronointia ilman toimivaa ajanvälitysjärjestelmää. Tämän vuoksi Suomen ajan ylläpito käyttäen maantieteellisesti hajautettuja kelloja on järkevää ja mahdollistaa useissa tapauksissa järjestelmien synkronoinnin paikallisesti lähellä oleviin aikalähteisiin. Jos kellojen synkronoinnissa käytettävä verkko suunnitellaan järkevästi ja toteutetaan normaaliolosuhteissa käyttäen kuituyhteyksiä sekä satelliittilinkkejä, on mahdollista saavuttaa kellojen väliselle koherenssille pitkä hold-over –aika, vaikka kaikki yhteydet kellojen välillä menetettäisiin. Lisäksi hajasijoituksen tuottama redundanssi vähentää merkittävästi paikkasidonnaisia riskejä synkronoinnin ylläpidossa.

Tässä työssä on kokeellisesti tutkittu parhaiden kaupallisesti saatavissa olevien kellojen, vety-masereiden, synkronointia käyttäen WR kuituyhteyttä. Luvussa 4.3 on puolestaan analysoitu Monte-Carlo –menetelmällä ajansiirtoverkon toimintaa. Tärkein lopputulos on, että runkoverkoon ja sen solmuissa oleviin kelloihin panostaminen riittää synkronoinnin varmistamiseen. Koska Suomessa useilla toimijoilla on käytössään vetymasereita tai Cs-atomikelloja ja ne usein sijaitsevat myös tietoliikenneverkkojen solmukohtissa tai verkkoteknisesti niiden läheisyydessä, olisi tulevaisuudessa järkevää yhdistää nämä kellot aikasyntronointiin kykenevillä yhteyksillä. Näin meneteltäessä

- jokaiselta kellolta olisi normaaliolosuhteissa saatavilla jäljitettävä aika, UTC(MIKE),
- kellot olisivat tarkasti vaihekoherentteja keskenään,
- kaikkia kelloja olisi mahdollista käyttää Suomen ajan ylläpitoon, eli kellojoukko yhdessä tuottaisi maanlaajuisen redundantin aikaskaalan ja
- järjestelmien synkronointi voitaisiin säilyttää varsin pitkään, vaikka kelloja tai yhteyksiä menetettäisiin.

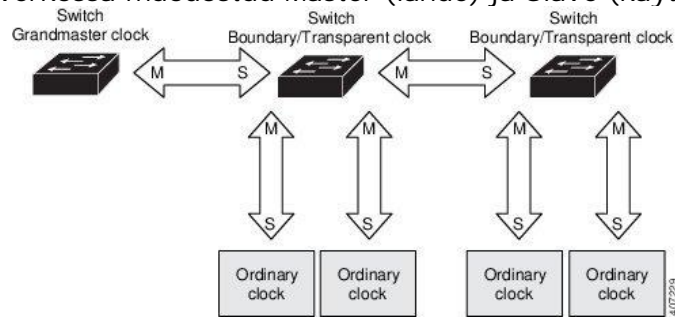
## 3 Aineisto ja menetelmät

### 3.1 PTP WR aikalinkkien toiminta

Ajan siirron perusongelma on yhdensuuntaisen viiveen arvioiminen aikalähteestä (Master) ajan käyttäjälle (Slave). Yhdensuuntaista viivettä on hankalaa tai mahdotonta mitata suoraan, joten se yleensä arvioidaan edestakaisesta viiveestä. Seuraavassa on lyhyesti esitetty WR aikalinkin edestakaisen viiveen mittaamenetelmä ja tästä yhdensuuntaisen viiveen arvio käyttäen epäsymmetria-parametria.

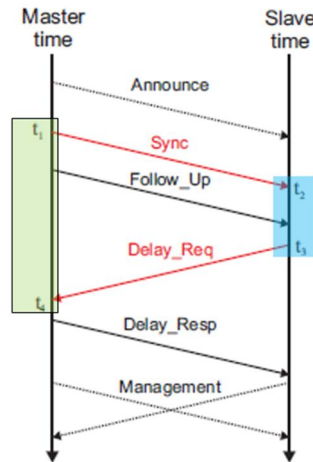
PTP WR aikalinkit [Wlostowski] perustuvat PTPv2 (IEEE1588-2008) tapaiseen aikaleimaukseen sekä SyncE (Synchronous Ethernet) syntonisaatioon (taajuussiirtoon) ns. Master-noodin (aikalähde) ja Slave-noodin (käyttäjä) välillä. CERN on kehittänyt WR-kytkimen sekä SPEC PCI-kortin, jotka voivat molemmat toimia WR-verkon GrandMaster tai Slave -noodeina. WR-kytkin voi lisäksi toimia ns. BoundaryClock -noodina. Eri PTP-noodit on esitetty kuvassa 1. Jokainen

yksittäinen linkki PTP verkossa muodostuu Master (lähde) ja Slave (käyttäjä) parista.



Kuva 1: PTP verkon eri noodit ja niiden väliset yhteydet. Aikalähteenä toimii GrandMaster noodi. BoundaryClock tai TransparentClock (ei esiinnyt WR-verkoissa) vastaanottaa aikaa yhdestä portista ja välittää aikaa useammalle portille. OrdinaryClock tai Slave noodi on ajan loppukäyttäjä.

Pakettien aikaleimaus on esitetty kuvassa 2. WR aikalinkin tarkkuus perustuu tarkkaan edestakaisen viiveen (RTT = round-trip-time) mittaukseen. Mittaus toteutetaan lähettämällä paketti Master-noodista Slave-noodille joka aikaleimataan lähettäessä (T1) ja vastaanotettaessa (T2). Vastaavasti Slave-noodin lähettämä paketti aikaleimataan (T3 ja T4). Kuvasta nähdään miten erotus (T4-T1)-(T3-T2) vastaa edestakaista viivettä. Viivemittaus näin toteutettuna on tarkka jos Slave ja Master ovat syntonoituja (kellot samalla taajuudella) - synkronointia (sama vaihe) ei siis vaadita.



$$\text{delay\_coarse} = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$$

Kuva 2: Aikalinkin edestakaisen viiveen mittaus perustuen neljään aikaleimaan T1...T4.

WR implementaation kuvaus [Wlostowski] sisältää yksityiskohtaisen esityksen siitä, miten SyncE:n syntonisaatio ja karkea aikaleimaus (aikaleiman resoluutio on 8 ns tai 16 ns WR laitteissa) yhdistetään siten että edestakaisen viiveen mittauksen epävarmuus on ~10 ps tai pienempi.

Edestakaisen viiveen (RTT) perusteella WR noodi arvioi yhdensuuntaista viivettä  $d_{MS}$  kaavalla

$$d_{MS} = \frac{1 + \alpha}{2 + \alpha} RTT \quad (\text{Kaava 1})$$

missä  $\alpha$  on epäsymmetriaparametri ja RTT edestakainen viive. Täysin symmetrinen aikalinkki,



jossa signaalin kulku-aika on sama molempiin suuntiin vastaa tilannetta  $\alpha=0$ . Täysin symmetrisiä linkkejä on kuitenkin käytännössä vaikea toteuttaa. Jos aikalinkki toteutetaan CERNin suositusten mukaisesti 100BASE-BX10 SFP lähetinvastaanottimilla yhdessä kuidussa, epäsymmetriaa syntyy kromaattisen dispersion aiheuttamana. Näillä lähetinvastaanottimilla tietoliikenne toteutetaan eri aallonpituuksilla (1310 nm ja 1490 nm) eri suuntiin, jolloin yhdensuuntaiset viiveet poikkeavat toisistaan, koska kuidun taitekerroin muuttuu aallonpituuden funktiona. Tyypillisesti BX10 linkeillä  $\alpha=250$  PPM (PPM = parts per million, miljoonasosaa).

Epäsymmetrian vaikutus aikalinkin virheeseen BX10 lähetinvastaanottimilla, mikäli laitteita ei lainkaan kalibroida (asetetaan  $\alpha=0$ ), on esitetty Taulukossa 1. Epäsymmetrian aiheuttama ajansiirron virhe skaalautuu linkin pituuden mukaan. Epäsymmetrian huomioonottaminen riippuu siis aikalinkin pituudesta ja asetetusta epävarmuuden vaatimustasosta.

Taulukko 1: WR aikalinkin ajan siirron enimmäisvirhe BX10 lähetinvastaanottimilla

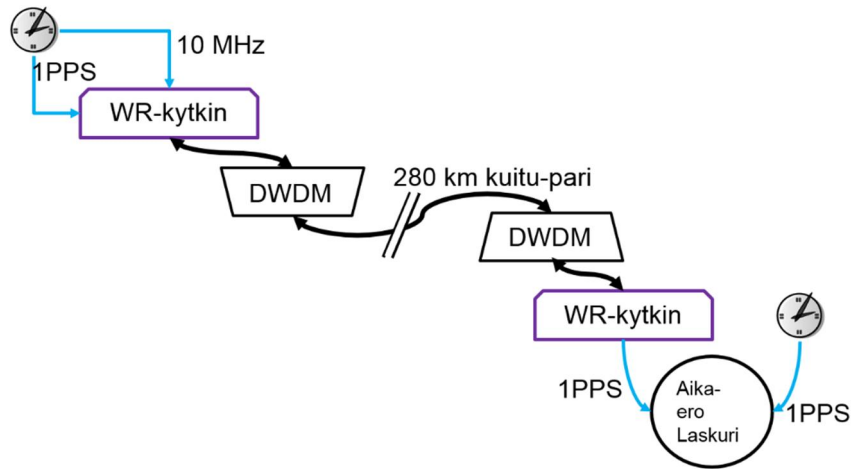
Aikalinkin pituus (km)	Aikalinkin edestakainen viive ( $\mu$ s)	Todellinen ajan siirron enimmäisvirhe $d_{MS}$ , jos $\alpha=250$ PPM ( $\mu$ s)	ajan siirron enimmäisvirhe (ns)
1	10	5,000624922	0,3
10	100	50,00624922	3
100	1000	500,0624922	31
1000	10000	5000,624922	312

Jos WR aikalinkki toteutetaan kahdella kuidulla (kuten tämän työn aikalinkissä) epäsymmetriaan vaikuttavat kahden erillisen kuidun fyysiset pituuserot, sekä kuitujen pituuserot dispersion kompensointiin käytetyissä kuitukeloissa ja optisissa vahvistimissa. Käytännössä epäsymmetrian suuruutta on vaikeaa ennustaa tai laskea olemassa olevalle verkolle - se pitää mitata. Käytännössä kuituparien yli toteutetuissa linkeissä on havaittu isoja epäsymmetrioita, ja niiden huomiointi kalibroimalla linkki on oleellista myös lyhyillä välimatkoilla, jos epävarmuus halutaan pitää ns-tasolla. Espoo-Kajaani kokeessa GPS-PPP menetelmällä mitattiin  $\alpha=780...850$  PPM joka vastaa noin 2  $\mu$ s virhettä 1000 km linkillä ilman kalibrointia.

WR-noodin käyttämä malli linkistä (Kaava 1) olettaa että epäsymmetria  $\alpha$  on vakio. Toistaiseksi löytyy varsin vähän tutkimustietoa siitä, miten vakiona epäsymmetria pitkällä WR linkillä pysyy vuosien tarkasteluvälillä. Tarkat aikalinkit on syytä kalibroida kuitukatkojen tai muiden verkon muutosten jälkeen.

### 3.2 Aikalinkin toteutus

Aikalinkki toteutettiin WR-kytkimillä (WRS3-18, Seven Solutions, ohjelmistoversio 4.2), katso Kuva 3. Linkin GrandMaster kytkin sijoitettiin MIKES Espoon kellolaboratorioon, ja Slave kytkin etäpäähän. GrandMaster kytkimeen syötettiin UTC(MIKE) aikaskaalan sekuntipulssi (1PPS) sekä 10 MHz taajuus. SFP lähetinvastaanottimet valittiin verkkoon sopivaksi. Etäpäähän Slave-noodina toimi toinen WR-kytkin. Slave-noodin 1PPS signaali edustaa aikalinkin siirtämää aikaa. Aikaeroa WR-kytkimen 1PPS signaalin ja etäpäähän vetymaserin 1PPS signaalin välillä mitattiin aikaerolaskurilla (Keysight 53230A). Aikaeron lisäksi tallennettiin WR slave-kytkimen arvio linkin edestakaisesta viiveestä. Lisäksi mitattiin etäpäähän sisäilman lämpötilaa ja suhteellista kosteutta (Papouch TME anturi), koska suuret vaihtelut vaikuttavat vetymaserin taajuuteen. Mittaukset automatisoitiin kytkemällä mittalaitteet samaan Ethernet verkkoon mittaustietokoneen kanssa. Python ohjelmointikielillä toteutettu mittaushjelma keräsi 1PPS aikaeromittaus-tiedon kerran sekunnissa, aikalinkin edestakaisesta viivettä minuutin välein, sekä lämpötilaa ja suhteellista kosteutta minuutin välein. Aikalinkin edestakainen viive oli noin 2.8 ms (kts. tulokset 4.1), joka vastaa n. 280 km yhdensuuntaista kulkumatkaa valokuidussa.



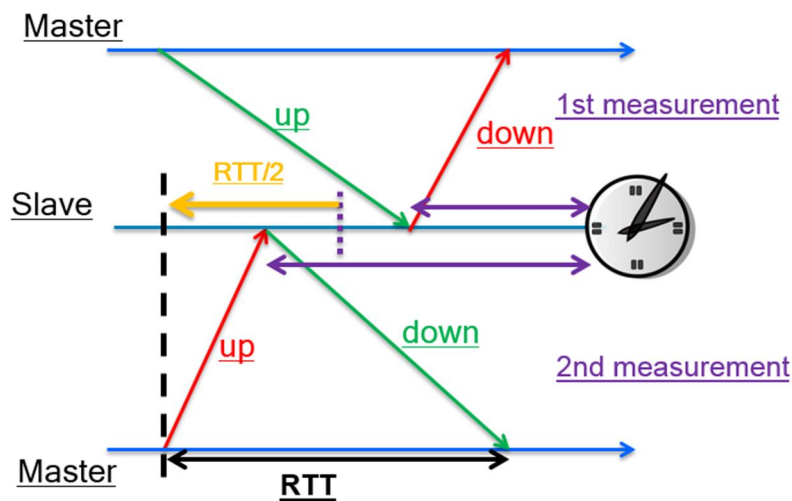
Kuva 3: Aikalinkin toteutus MI KES Espoon laboratoriosta DWDM-kuituverkossa. 1 PPS = sekuntipulssi, 10 MHz = sini-aalto atomikellosta. DWMD = Dense Wavelength Division Multiplexing.

### 3.3 Kalibrintimenetelmät

Tutkimuksessa käytettiin kahta kalibrintimenetelmää: 1) epäsymmetrian kääntöön perustuva menetelmä kokeiltiin laboratoriossa, ja 2) toteutettu aikalinkki kalibroitiin siirrettävällä atomikellolla. Molemmista menetelmistä kalibroinnin tavoite on määrittää epäsymmetriaparametri  $a$  kaavassa 1.

#### 3.3.1 Epäsymmetrian kääntöön perustuva menetelmä

Epäsymmetrian kääntöön perustuva kalibrointi on ehdotettu PTP verkoissa kirjallisuudessa [Huang][Exel]. Menetelmä on esitetty kuvassa 4. Kalibrointi tehdään mittaamalla aikaeroa aikalinkin välittämän 1 PPS sekuntipulssin ja Slave-noodiin sijoitetun kellon välillä. Mittaus tehdään kahdesti, siten, että mittausten välissä epäsymmetriaa käännetään. Olettaen että epäsymmetria saadaan kokonaan käännettyä mittausten välillä, kahden mittaustulosten (kuvan ylä- ja ala-osa) keskiarvo edustaa täysin symmetrisellä aikalinkillä siirrettyä aikaa. Slave-noodin kellon on oltava stabiili tavoite-epävarmuudella mittausten aikana. Tämä ehto täyttyy, jos käytössä on vetymasereita tai Cs-kelloja ja epäsymmetrian kääntö voidaan tehdä alle tunnissa.

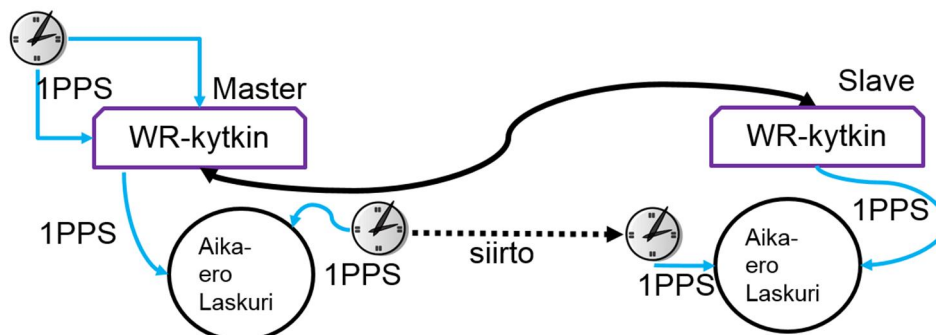


Kuva 4: Epäsymmetrian kalibrointi käyttäen epäsymmetrian kääntö menetelmää.

Epäsymmetrian käänntö käytännön WR verkoissa on kuitenkin hankalaa. BX10-optiikoilla toteutussa linkissä yhdessä kuidussa tämä vaatii lähetyksen/vastaanotto aallonpituuksien vaihtamista keskenään Master- ja Slave-noodeissa. Kuitu pareilla toteutetuilla linkeillä epäsymmetrian käänntö on periaatteessa helppoa - vaihdetaan kuidut keskenään - mutta käytännön toteutus jossa kuidun tietoliikennekapasiteetti jaetaan usean käyttäjän kesken CWDM/DWDM tekniikalla, tai linkillä joka sisältää valosignaalin vahvistimia jotka ovat välttämättömät pitkillä yhteyksillä (mutta yleensä yhdensuuntaisia) estävät yksinkertaisen kuitujen vaihdon keskenään. Tästä syystä epäsymmetrian käänntöön perustuvaa kalibroitimenetelmää kehoitettiin vain laboratoriossa.

### 3.3.2 Kalibrointi siirrettävällä atomikellolla

Vaihtoehtoinen tapa kalibroida aikalinkki on mitata aikalinkin 1PPS sekuntipulssia sekä lähtöpäässä (Master) että vastaanottopäässä (Slave) ulkoista aikareferenssiä vastaan. Referenssi voi olla GNSS vastaanotin tai atomikello, joka on siirrettävissä Master noodista Slave noodiin. Jos kalibrointi tehdään GNSS vastaanottimella, voidaan GNSS-järjestelmän aiheuttamaa virhettä vähentää ns. Common-View tai Precise Point Positioning laskennalla jälkikäteen. Tarkat GNSS aikalinkit toteutetaan kaksitaajuusvastaanottimilla, joilla ionosfäärin aiheuttama vaihteleva viive saadaan arvioitua ja kumottua. Kalibroitimenetelmä on esitetty kuvassa 5. Tässä työssä aikalinkki kalibroitettiin siirrettävällä Rubidium-kellolla (Stanford Research Systems, PRS-10). Aikaeromittaukset tehtiin Rb-kellon mukana kuljetetulla aikaerolaskurilla (Keysight 53230A).

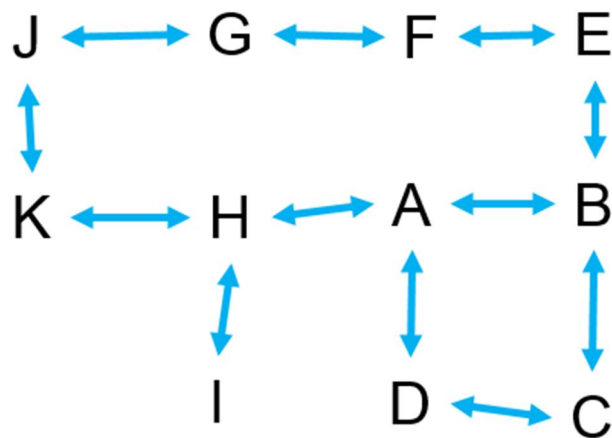


Kuva 5: aikalinkin kalibrointi siirrettävällä GNSS-vastaanotin tai atomikello referenssillä. Jos käytetään GNSS-vastaanotinta mittauseriaate on sama, mutta 1PPS sekuntipulssi tulee kellon sijasta GNSS-vastaanottimesta joka myös vaatii antennin.

### 3.4 Ajan yllöpitö synkronointiverkossa

Aikasykronoinnin toteutettavuutta tutkittiin Monte-Carlo –simuloimalla Matlabissa kuvitteellista aikasykronointiverkkoa, katso Kuva 6. Simuloinnin pohjana käytettiin seuraavia oletuksia:

- Sateliittinavigaatiojärjestelmät eivät ole käytettävissä.
- Synkronointiverkossa on normaaliolosuhteita enemmän katkoksia:
  - Katkon todennäköisyys/(päivä×km)= $5 \times 10^{-6}$
  - Korjauksen todennäköisyys/päivä=0.5
- Kun linkki katkeaa, tieto linkin vaihevirheestä menetetään täysin.
- Kun linkki palautuu, uusi vaihevirhe lasketaan automaattisesti linkin päissä olevien kellojen vaihetiedosta.
- Jos kello menettää referenssinsä, tilannetta yritetään korjata vaihtamalla tilapäisesti linkkien suuntia. Arvio suunnanvaihdoksen aiheuttamalle epävarmuudelle on 2,5 ns.



Kuva 6. Simuloinnissa käytetty kuvitteellinen ajansiirtoverkko. Kirjaimet merkitsevät verkon noodeja joihin on sijoitettu kelloja. Nuolet merkitsevät aikalinkkejä.

Oletus linkin vaihevirhetiedon täydellisestä menettämisestä katkostilanteessa on huonoin skenaario, yleensä muutokset ovat pieniä ja ylärajarajoitettuja. Simuloinnin osalta on myös huomattava, että yleensä toimitaan järjestelmään suunniteltaessa määritellyillä linkin suunnilla (master → slave). Vikatilanteessa on kuitenkin mahdollista automaattisesti muuttaa linkin suuntaa. Jos yhteys voidaan näin palauttaa, on se hyödyllistä, koska yksittäisen kellon vapaa käynti synnyttää nopeasti suuria vaihevirheitä. Simuloinnissa on oletettu vapaiden kellojen vaihevirheominaisuuksiksi:

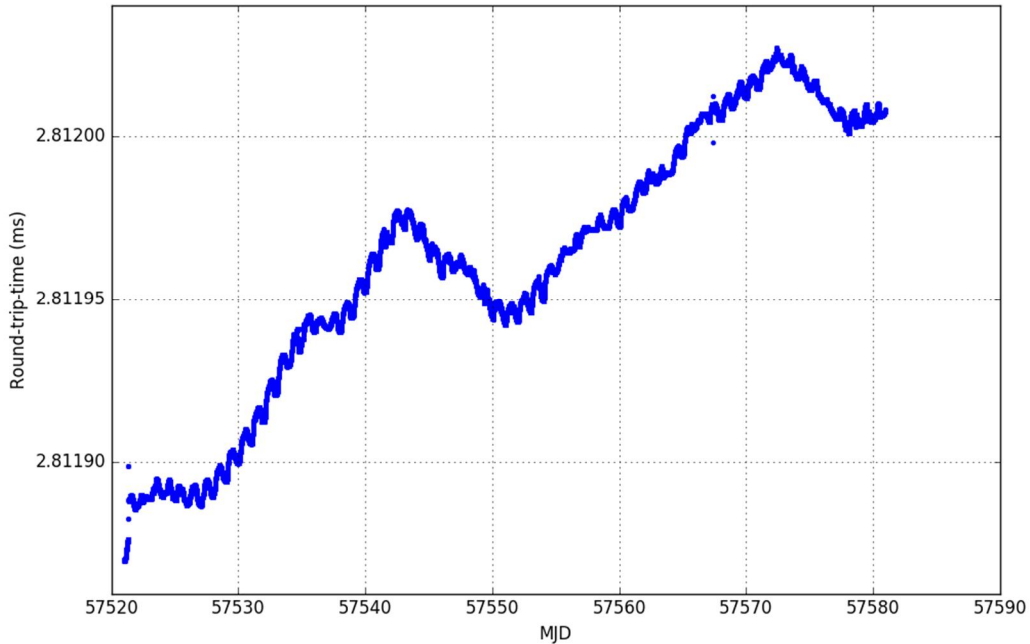
- Cs-kello:                    suurin ajautuma                    7.5 ns/day,  
                                  suurin ajautuman muutos        2.5 ns/day
- Rb-kello:                    suurin ajautuma                    80000 ns/day,  
                                  suurin ajautuman muutos        10 ns/day
- OCXO:                      suurin ajautuma                    300000 ns/day,  
                                  suurin ajautuman muutos        2300 ns/day

## 4 Tulokset ja pohdinta

### 4.1 Aikalinkki

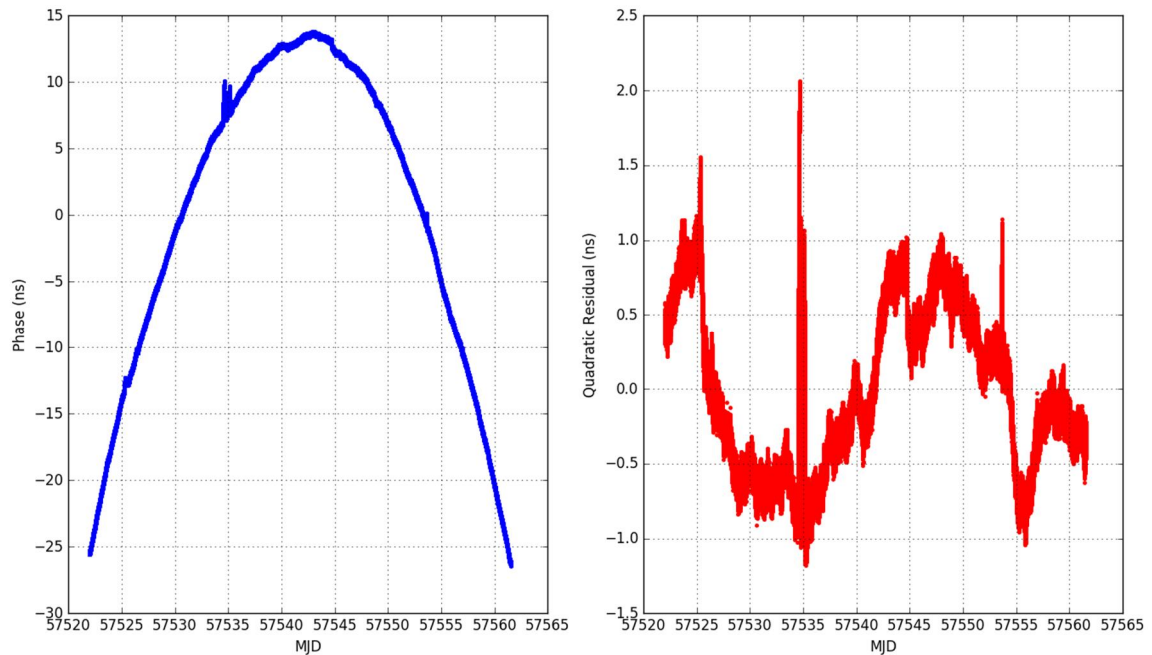
Aikalinkki toteutettiin kuvan 3 mukaan eikä sen käyttöönotossa esiintynyt tietoliikenteeseen liittyviä ongelmia (valotehot, vaimennukset, jne. olivat kunnossa). WR kytkimien ohjelmisto oli päivitettävä, koska CERN oli testannut kytkimiä vain lyhyillä yhteyksillä ja 2,8 ms Round Trip Time -viivettä (RTT-viive) ei saatu mitattua alkuperäisellä kytkimen ohjelmistolla. Päivityksen jälkeen kytkimet mittasivat RTT-viiveen oikein. Mittaustulos on esitetty kuvassa 7. Kuvan päivämäärät on esitetty MJD (Modified Julian Date) muodossa, missä 39 päivän mittausjakso 2016-05-14 ... 2016-06-22 vastaa MJD päivämääriä 57522 - 57561. RTT-viiveen vaihtelussa näkyy laajempi trendi, jossa viive on kasvanut n. +100 ns mittausjakson aikana, sekä nopeampaa aaltoilua joka vastaa vuorokausivaihtelua. Ulkolämpötila vaikuttaa RTT mittaukseen sekä kuidun lämpölaajenemisen, että kuidun taitekertoimen lämpötilakertoimen kautta. Mittaustulos on odotettu eikä siinä esiinny yllättäviä piirteitä.





Kuva 7: Edestakaisen viiveen vaihtelu mittausjakson aikana.

Kuvassa 8 on esitetty aikaerolaskurin mittaustulos tarkastelujakson ajalta sen jälkeen kun aikalinkki oli kalibroitu (kts 4.2). Aiakaerolaskuri mittaa aikalinkin välittämän 1PPS sekuntipulssin ja etäpään vetymaserin 1PPS sekuntipulssin aikaeroa. Tuloksesta on vähennetty 1-kertaluvun polynomi vasemmassa kuvassa ja 2-kertaluvun polynomi oikeassa kuvassa. Mittaustulos on odotettu ja osoittaa että viestiaseman vetymaserin suhteellisen taajuuden muutos on  $n. +2e-15$  / päivä. Koska vetymaserin taajuuden voidaan olettaa muuttuvan lineaarisesti, edustaa oikea kuva, jossa tämä parabolinen vaiheen muutos on poistettu, arviota itse aikalinkin aiheuttamasta virheestä. Tällä oletuksella mittaustulos osoittaa että aikalinkin aiheuttama virhe on ollut alle  $\pm 1$  ns mittausjakson (39 päivää) aikana. Yhden vuorokauden aikana aikalinkin stabiilisuus on tyypillisesti huomattavasti parempi,  $n. \pm 250$  ps.



Kuva 8: Aikaerolaskurin mittaustulos josta (vasemmalla) lineaarinen termi (1-kertaluvun polynomi) on poistettu sekä (oikealla) parabolinen termi (2-kertaluvun polynomi) on poistettu.

## 4.2 Kalibrointimenetelmät

Esimerkki laboratorioissa tehdyistä kokeesta epäsymmetrian kääntö menetelmällä on esitetty taulokossa 2. Menetelmä toimii laboratoriossa mutta sitä ei vielä olla testattu kentällä.

Taulukko 2: epäsymmetrian kääntöön perustuva kalibrointimenetelmä

	Mittaustulos (ns)
Aikaero Slave 1PPS vs. Slave kello, ennen kääntöä	961,711
Aikaero Slave 1PPS vs. Slave kello, käännön jälkeen	829,961
Mittausten keskiarvo	895,836
Referenssi Master 1PPS tulos	894,705
erotus (kalibroinnin virhe)	-1,131 ns

Kalibroinnin virhe (n. -1 ns) johtuu epätäydellisestä epäsymmetrian käännöstä. Kokeessa epäsymmetriaa käännettiin vaihtamalla linkin kaksi kuitua keskenään. Täydellinen epäsymmetrian kääntö vaatisi myös SFP lähetyksien vastaanottimien epäsymmetrian käännön. Tämän huomioonottaminen on oleellista, jos kalibroinnin epävarmuuden tavoite on ns-tasolla.

Tämän työn aikalinkki kalibroitiin siirrettävällä Rb-kellolla, ja kalibrointi toistettiin kaksi kertaa. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

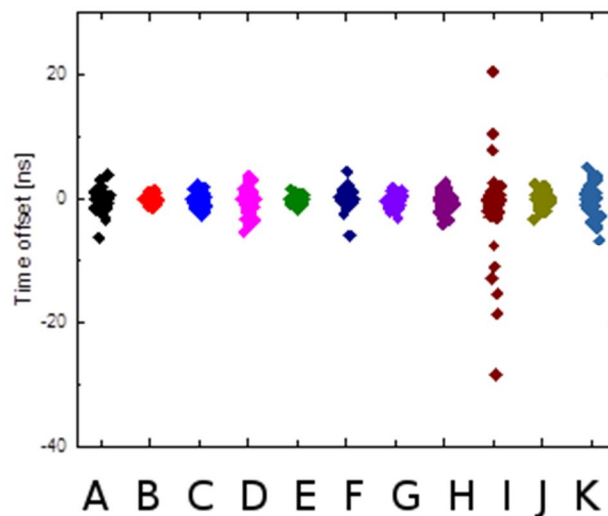
Taulukko 3: Aikalinkin kalibrointi siirrettävällä Rb-kellolla

	Kalibrointi 2016-04-13	Kalibrointi 2016-04-22
Rb-kellon erotus aikalinkin Master-noodiin Espoossa ennen matkaa	0 ns	0 ns
Rb-kellon erotus aikalinkin Slave-noodiin etäpäässä	+ 1060 ns	+1040 ns
Rb-kellon erotus aikalinkin master noodiin Espoossa matkan jälkeen	+265 ns	+ 213ns

Molempien kalibrointimatkojen tuloksena on, että aikalinkin kalibroimaton ( $\alpha=0$ ) WR Slave-noodi välittää aikaa, joka on noin  $1 \pm 0.3 \mu\text{s}$  edellä Master-noodia. Molemmissa kokeissa Rb-kellon vaihe poikkesi noin  $+200\dots+300 \text{ ns}$  Rb-kellon odotetusta ikääntymisestä matkan lopussa Espoossa. Mitattu epäsymmetria vastaa tilannetta jossa  $2.8 \text{ ms}$  edestakainen viive koostuu yhdensuuntaisista viiveistä jotka ovat noin  $1399 \mu\text{s}$  ja  $1401 \mu\text{s}$ . Mittausten jälkeen WR Slave noodiin syötettiin  $\alpha = -1300 \text{ PPM}$  epäsymmetriaparametri 2016-05-11 ennen varsinaisen mittaussjakson alkua 2016-05-14. Epäsymmetria on huomattavasti suurempi, kuin BX10 lähetinvastaanottimilla yhdessä kuidussa toteutetulle aikalinkille voisi odottaa ( $\alpha = n. 250 \text{ PPM}$ ), mutta samaa suuruusluokkaa kuin Espoo-Kajaani linkissä havaittu  $\alpha = n. 800 \text{ PPM}$  [Dierikx]. Aikalinkin hyvä stabiilisuus (kts. 4.1) osoittaa, että kalibrointi on onnistunut. Kalibroinnin validointi vaatisi vertailua toiseen kalibrointimenetelmään, kuten GNSS vastaanottiin tai parempaan siirrettävään atomikelloon (kuten Cs-kelloon), mitä ei kuitenkaan tehty tässä tutkimuksessa.

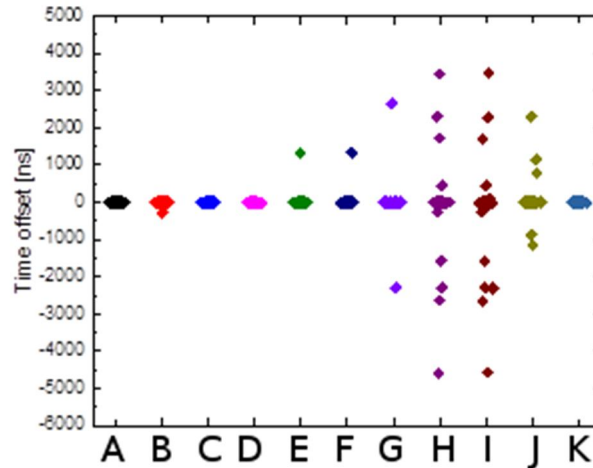
#### 4.3 Simuloinnit: Ajan ylläpito synkronointiverkossa

Laajemman kuvan muodostamiseksi työssä simuloitiin kuvassa 6 esitettyä ajansiirtoverkkoa, jonka aikalinkkien ominaisuudet vastaavat työssä kokeellisesti tutkitun aikalinkin ominaisuuksia. Simulointeja tehtiin aikajaksolla 1 vuosi – 16 vuotta käyttäen kohdassa 3.4 mainittuja oletuksia, ilman mahdollisuutta synkronointiverkon kalibrointiin sen ulkopuolisilla menetelmillä. Alle, kuviin 9 ja 10, on poimittu molempien ääripäiden tulokset, jossa kummassakin on tehty yhteensä 100 simulointikierrosta.



Kuva 9. Verkon synkronoinnin tilanne, kun aikaa on kulunut 1 vuosi. Tänä aikana verkossa on

tapahtunut keskimäärin 5,7 katkosta / simulaatio. Vaihevirheessä on kuitenkin vain muutama isompi poikkeama pienellä todennäköisyydellä kellossa, joka on yksittäisen linkin päässä.



Kuva 10. Verkon synkronoinnin tilanne, kun aikaa on kulunut 16 vuotta. Tänä aikana verkossa on tapahtunut keskimäärin 92,6 katkosta / simulaatio. Synkronointiverkon vaihekoherenssi on kuitenkin muutaman mikrosekunnin sisään oikein. Tuloksissa on nähtävissä vaikutus, joka syntyy useamman linkin samanaikaisesta katkoksesta. Tässä verkossa ja tehdyillä oletuksilla useamman linkin samaan kelloon vaikuttavan katkoksen todennäköisyys on noin 15 % 16 vuoden jakson aikana.

Yhteenvetona simulointien tuloksista voidaan todeta, että automaattisesti vaihevirheet korjauva synkronointiverkko on robusti siinä tapahtuville katkokille. Yksittäisten linkkien katkokset eivät aiheuta suurempia ongelmia ja vaihevirheet on mahdollista korjata automaattisesti tasolle, joka riittää käytännössä kaikkiin käytännön tarkoituksiin. Suurempia virheitä syntyy vain, jos useita samaan kelloon vaikuttavia yhteyksiä katkeaa samaan aikaan. Simuloinnissa käytetyn pisimmän aikajakson, kuudentoista vuoden, jälkeen oli kuitenkin vain noin 15 % todennäköisyys sille, että osa verkosta oli huonosti synkronoitunut muuhun verkkoon. Verkon suorituskykyä voidaan edelleen parantaa käyttämällä parempia kelloja ja valitsemalla hyvien kellojen paikat strategisesti oikein. Erityisesti runkoverkkoon ja sen solmuissa oleviin kelloihin panostaminen on tärkeää ja siten voidaan saavuttaa simuloinnissa esimerkkinä käytettyä verkkoa parempi suorituskyky. On myös huomattava, että lyhyet yhteydet < 50 km kelloilta käyttäjille (joissa ei ole tarpeen käyttää optisia vahvistimia) eivät yleensä tarvitse vaihevirheen korjausta, koska niissä voidaan käyttää yhtä kuitua ja kaksisuuntaista BX10 optiikkaa.

## 5 Loppupäätelmät

### 5.1 Tulokset ja aikaansaannokset tavoitteisiin nähden

Aikalinkki saatiin toteutettua hankkeelle myönnetyn ajan puitteissa ja aikalinkistä saatiin hyödyllistä mittaustietoa useamman kuukauden ajan. Tulokset ovat odotettuja ja hieman parempia kuin aikaisemman Espoo-Kajaani aikalinkin tulokset. Verrattuna aikaisempaan Espoo-Kajaani aikalinkkiin tässä työssä tehdyt mittaukset vetymasereiden välillä tuovat tarkemmin esille aikalinkin todellisen suorituskyvyn.

Kalibrointimenetelmä joka perustuu epäsymmetrian kääntämiseen, osoitettiin toimivaksi laboratorio-olosuhteissa mutta sitä ei kokeiltu kentällä. Aikalinkin kalibrointiin käytettiin menetelmää, joka perustui siirrettävään Rubidium-atomikelloon. Rb-kellon vaiheen poikkeama odotetusta kalibrointimatkan jälkeen (n.2-300 ns) asettaa alarajan kalibroinnin epävarmuudelle.

Synkronointiverkon simulaatio oli ensimmäinen systemaattinen selvitys White Rabbit -ajansiirtoverkon ja siihen liitettyjen kellojen suorituskyvystä ajan funktiona tilanteessa, jossa verkkoa ei ole mahdollista kalibroida ulkopuolisilla menetelmillä. Simulointi tuotti alempana kohdassa 5.2 mainitut havainnot tehdyn suunnitelman mukaisesti.

### 5.2 Keskeiset havainnot

Tulevan IEEE1588-2018 PTP-standardin pilotti-implemентаatio "White Rabbit" pystyy siirtämään aikaa alle nanosekunnin epävarmuudella paikallisverkoissa (<10 km matkat). Tämä hanke vahvistaa käsitystä jonka mukaan WR tekniikkaa voidaan soveltaa myös kuitu-parin yli pitkillä linkeillä ilman suorituskyvyn merkittävää huononemista.

WR aikalinkkien kalibrointi on olennaista, jos tavoite epävarmuus ajansiirrolle on 1  $\mu$ s tai alle pitkillä (>100km) linkeillä, tai jos tavoitellaan nanosekuntiluokan epävarmuutta lyhyillä linkeillä. Epäsymmetrian kääntöön perustuva menetelmä osoitettiin toimivaksi mutta sen käytännöllistä toteuttamista haittaa tietoliikenneverkkojen yhdensuuntaisiin kuitupareihin perustuvat ratkaisut. Siirrettävällä atomikellolla tehtävä kalibrointi on toimiva ratkaisu ja sen epävarmuus riippuu kellon stabiilisuudesta ja herkkyudesta ulkoisiin tekijöihin (syöttöjännite, lämpötila, kiihtyvyyt) matkan aikana. Käytännössä Rubidium-kellolla saavutettiin n. 300 ns epävarmuus kalibroinnissa.

Simuloinnit ja kokeelliset tulokset osoittavat, että maantieteellisesti laajoihin järjestelmiin on mahdollista saada luotettava synkronointi.

### 5.3 Näkymät ja suositukset tutkimuksen jatkosta

Ajan ja taajuuden jakeluun pystyvien synkronointiverkkojen merkitys kasvaa lisääntyneen tarinan ajan tarpeen seurauksena. Pilotoitu White Rabbit tekniikka on IEEE1588-2018 High Accuracy profiilin standardoinnin myötä yksi johtava teknologiaratkaisu jolla ns-tason synkronointiverkkoja voidaan toteuttaa maantieteellisesti laajalle alueelle.

White Rabbit -linkkien kalibrointimenetelmiä on edelleen kehitettävä. Verkoissa, jossa on vain muutama noodi (esim. atomikellojen sijoituspaikat), voidaan kalibroida jokainen noodi siirrettävällä Cs-kellolla, tai kalibroidulla GNSS-vastaanottimella. Jos tekniikkaa halutaan laajentaa verkkoihin, joissa on kymmeniä tai satoja noodeja (esim. digitaaliset sähköasemat IEC61850 standardin mukaan), on kalibrointi käytännön syistä automatisoitava.



White Rabbit -tekniikan siirtämän ajan/taajuuden satunnaisvirhettä (vaihekohinaa) ei tutkittu tässä työssä. Useat tutkimuslaitokset (OP/SYRTE, CERN, ja VTT) ovat kehittämässä seuraavan sukupolven WR laitteita joissa vaihekohinaa on parannettu. Pienempi vaihekohina mahdollistaa kellovertailun tekemisen nopeammin ja tulevaisuudessa todennäköisesti vetymaser-tasoisien taajuussignaalin siirron ilman merkittävää vaihekohinan huononemista.

Tarkat synkronointiverkot mahdollistavat ajan ylläpidon perustuen kellojoukkoon (clock ensemble) missä kellot ovat sijoitettu verkon noodeihin. Kellojoukosta lasketun aikaskaalan stabiilisuus paranee mitä enemmän kelloja verkossa on. Laskenta mahdollistaa myös reaaliaikaisen UTC-realisaation perustuen verkon mihin tahansa kelloon. Kellojoukkoon perustuva aika-kaala on robusti.

## 6 Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit

Esitelmä MATINE-seminaarissa 18.11.2015, Anders Wallin: "Tarkka aikasykronointi ja aikalinkit maanpuolustuksessa"

[http://www.defmin.fi/files/3261/Tarkka\\_aikasykronointi\\_ja\\_aikalinkit\\_maanpuolustuksessa.pdf](http://www.defmin.fi/files/3261/Tarkka_aikasykronointi_ja_aikalinkit_maanpuolustuksessa.pdf)

Esitelmä ITSF2016 konferenssissa Prahassa 31.10.2016 - 3.11.2016. Anders Wallin, "Comparing H-masers over a 280 km White Rabbit link". Esitettiin päätulokset Espoo-Kajaani linkistä, tämän tutkimuksen aikalinkistä, sekä tulevaisuuden tutkimusaiheita liittyen systemaattisten ja satunnaisten virheiden hallintaan WR aikalinkeillä.

## Viitteet

[BIPM] <http://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp.html>

[Wlostowski] <http://www.ohwr.org/documents/80>

[Dierikx] <http://dx.doi.org/10.1109/TUFFC.2016.2518122>

[New SI] <http://www.bipm.org/en/measurement-units/new-si/>

[IEEE1588-2008] <http://ieeexplore.ieee.org/document/4579760/>

[Huang] Compensation for Asymmetry of Physical Line.  
<http://www.ieee802.org/1/files/public/docs2011/as-huang-compensation-for-physical-line-asymmetry-0311.pdf>

[Exel] "Asymmetry Mitigation through Line Swapping in IEEE 802.3 Ethernet" (2012)  
<http://tycho.usno.navy.mil/ptti/2012papers/PTTI2012.p377.pdf>