



Tarkka aikasynkronointi ja aikalinkit maanpuolustuksessa

rahoitus: 90 855 eur

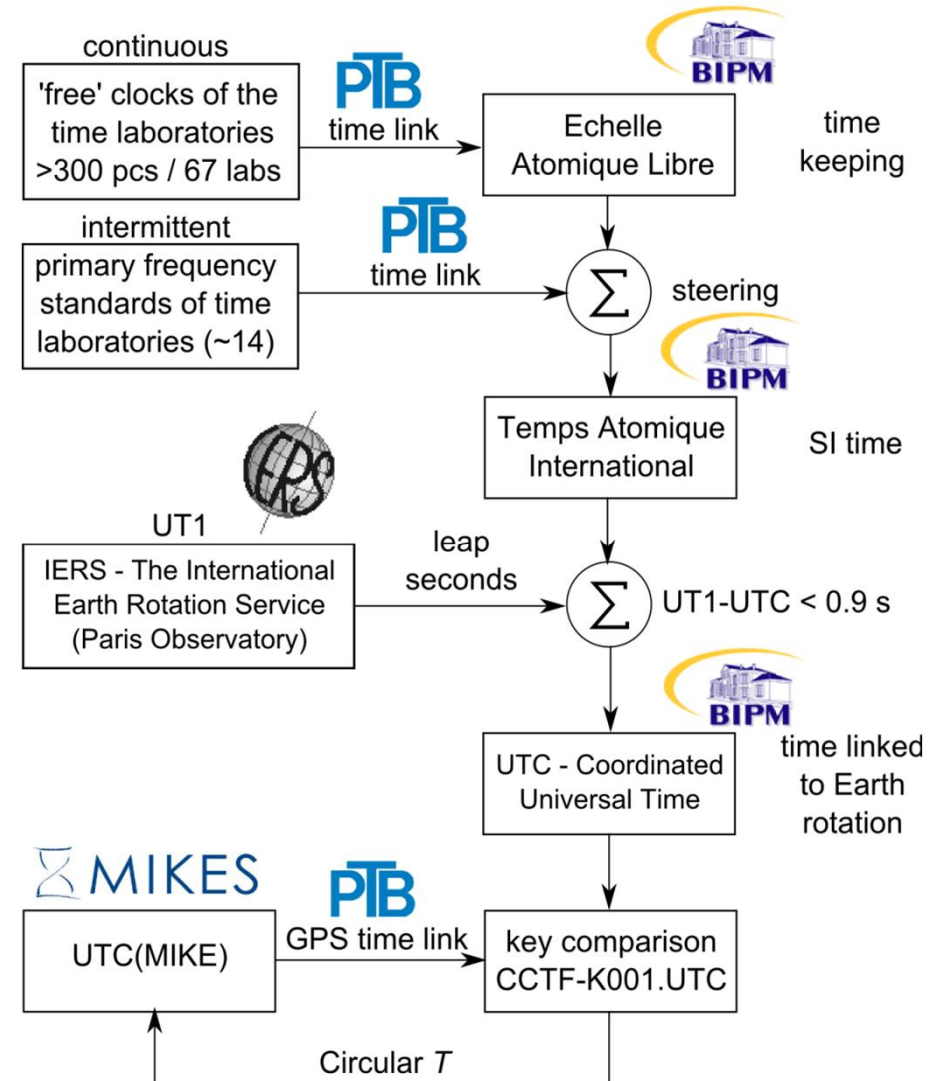
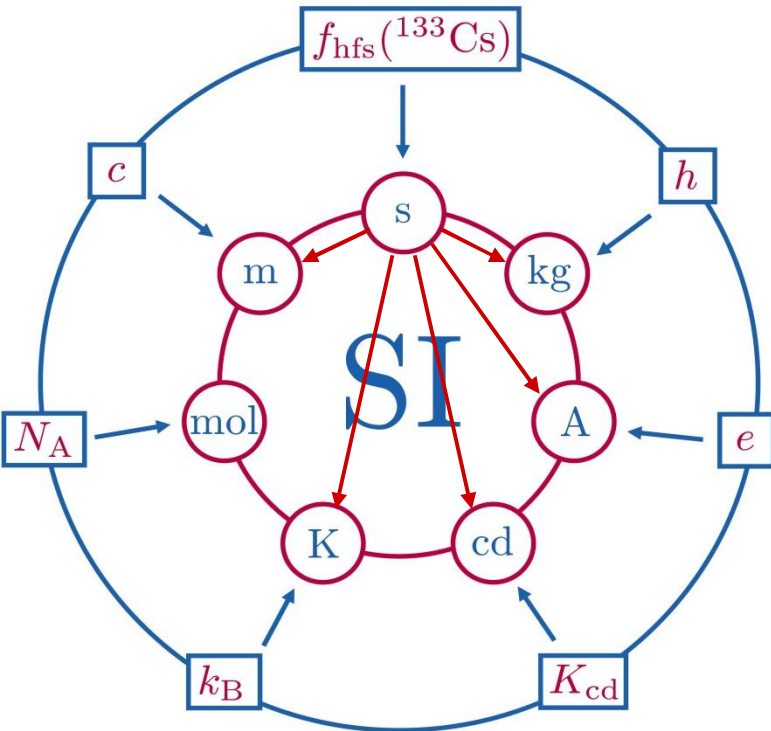
Anders Wallin

Mikko Merimaa

MIKES Metrology, VTT Technical Research
Centre of Finland Ltd.

MIKES, SI järjestelmä ja Suomen aika

The "New SI"



Time & Frequency Distribution in data networks

time.mikes.fi

NTP: milliseconds



(software time-stamping, unpredictable delays in routers/switches/gateways)

PTP: microseconds
(hardware time-stamping)

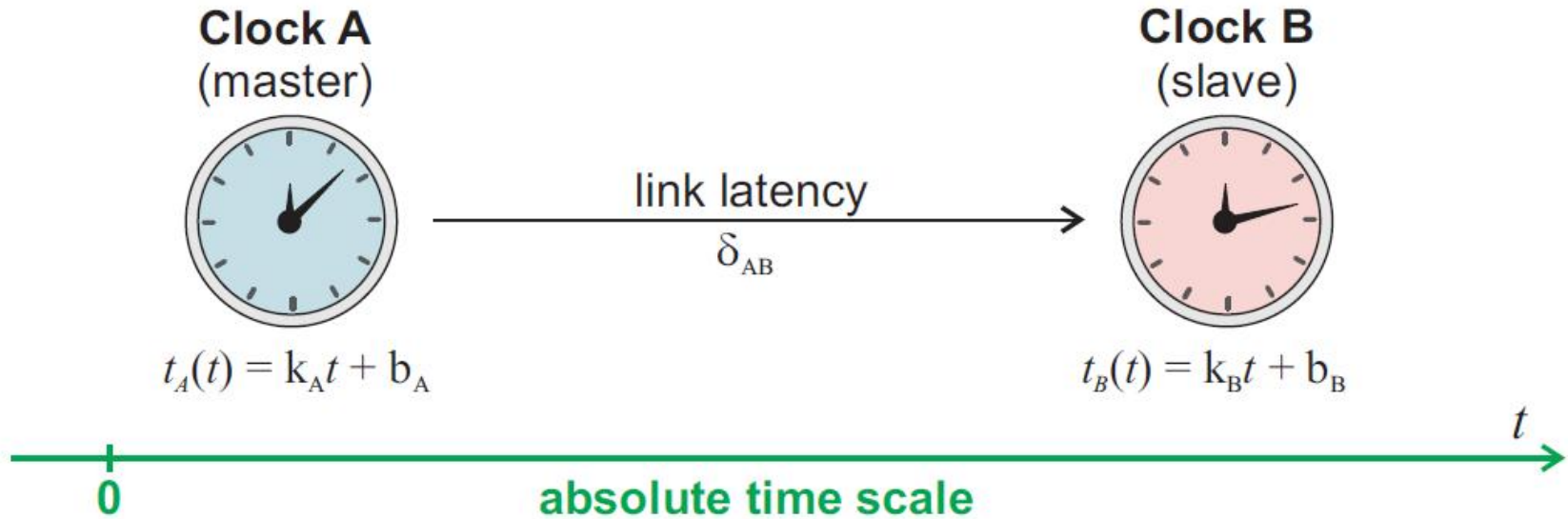
PTP = Precision Time Protocol
(IEEE 1588)



White Rabbit (PTP-WR): nanoseconds
- sub-ns hardware time-stamping
- 10km link length



Syntonzation & Synchronization



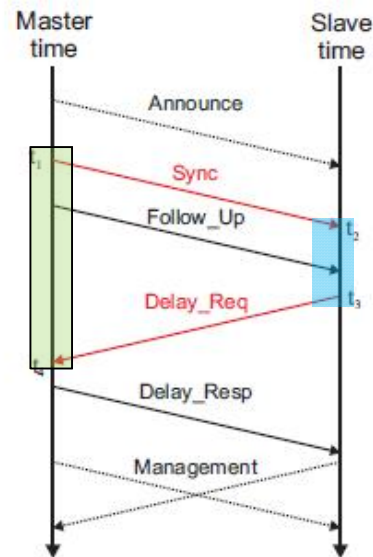
Problem	White Rabbit Solution
$k_A = k_B$ <u>syntonization</u>	Synchronous Ethernet at 1.25 GPS
$b_A = b_B$ <u>synchronization</u>	Precision Time Protocol (PTP) + DMTD

White Rabbit – towards a IEEE-1588 high resolution standard

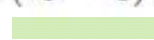
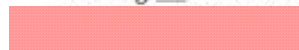


“I’m late, I’m late, for a very important date! No time to say hello, goodbye...”

Step 1.
Hardware time-stamping of t_1-t_4
Gives coarse (8 ns) RTT

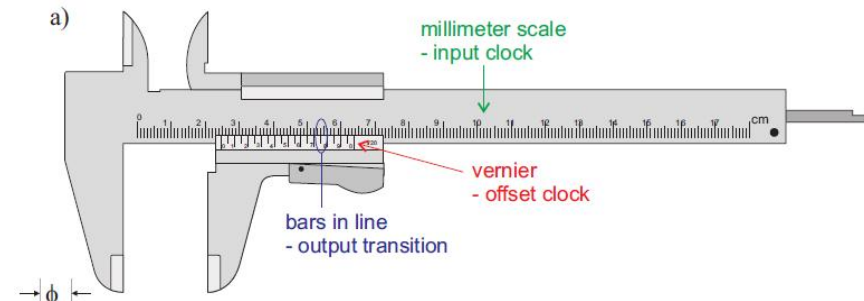


$$delay_coarse = (t_4 - t_1) - (t_3 - t_2)$$



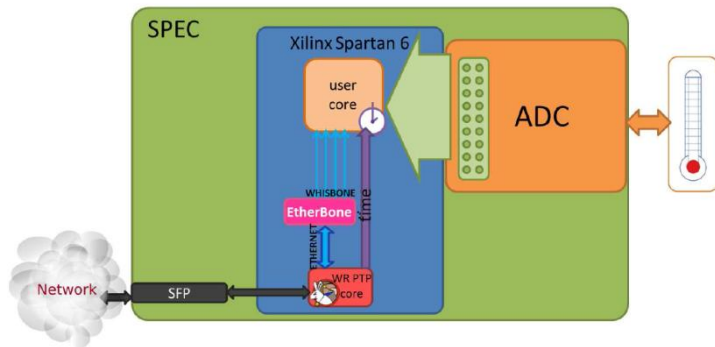
-> Round-trip-time measurement with sub-nanosecond precision

Step 2.
Phase measurement to enhance T2 and T4



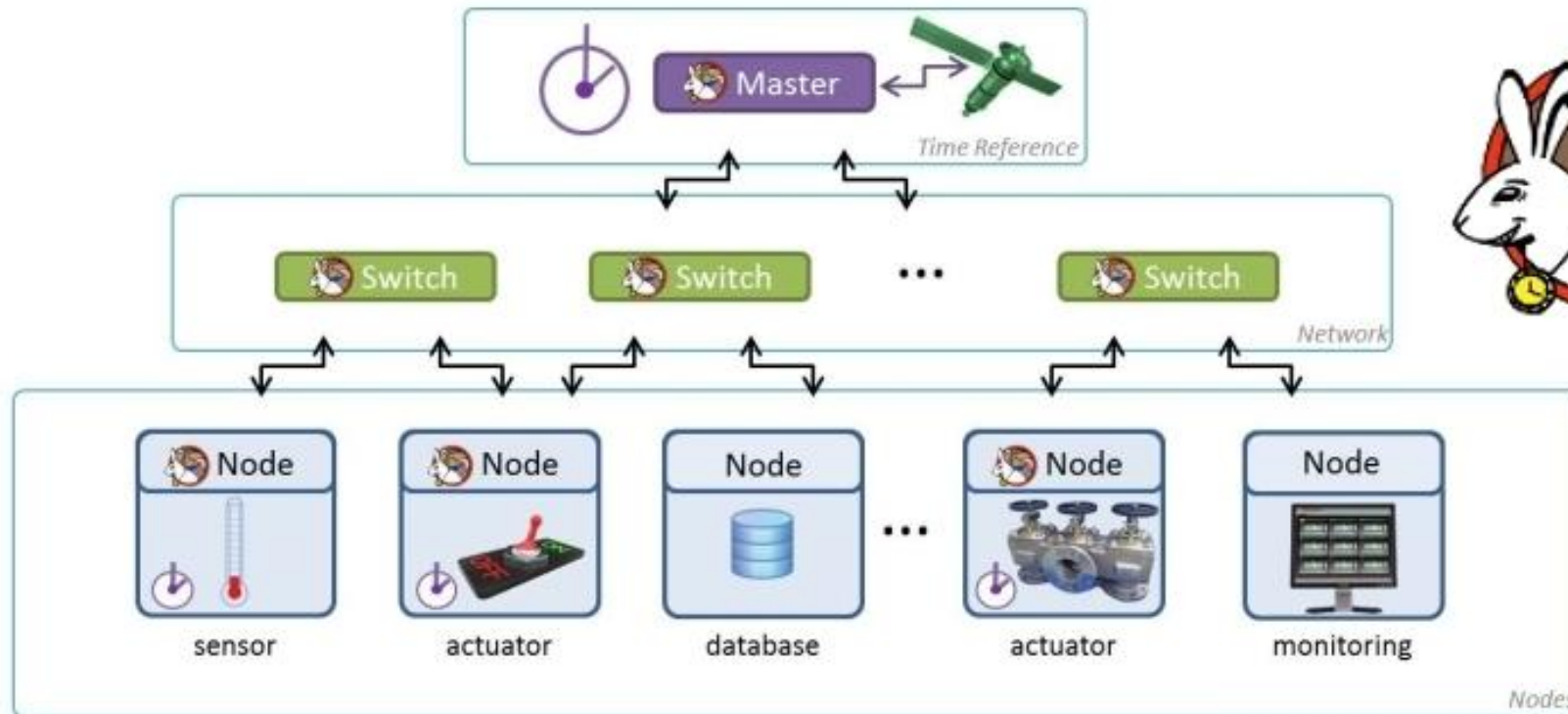
Measuring picoseconds with ~125 MHz clocks on FPGAs

White Rabbit – hardware, software, networks



WR Node:

- SFP + FPGA + FMC front-end
- hardware/firmware/software
- CERN/7-solutions/others



[ohwr.org]

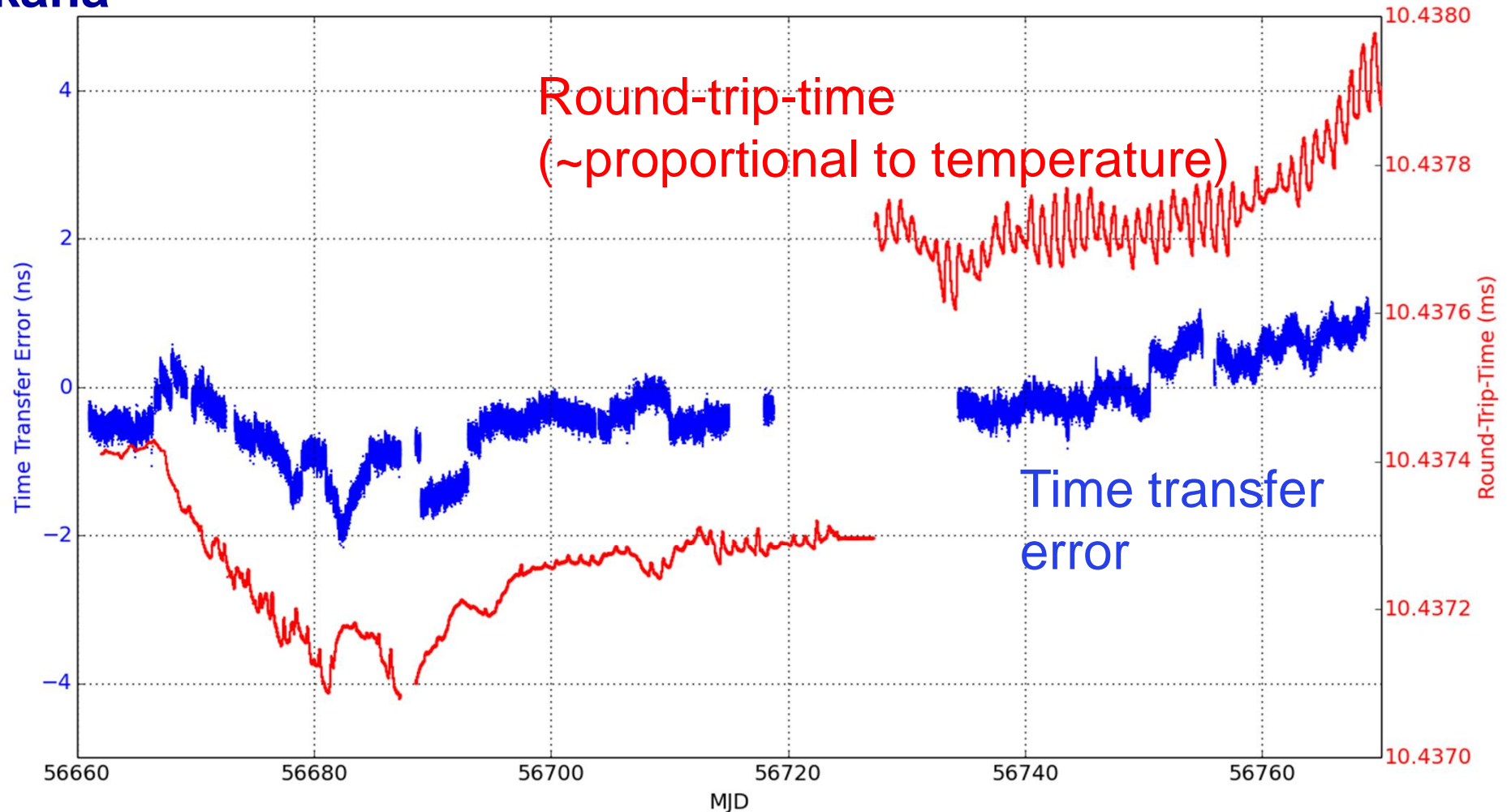
Hankkeen Tavoitteet



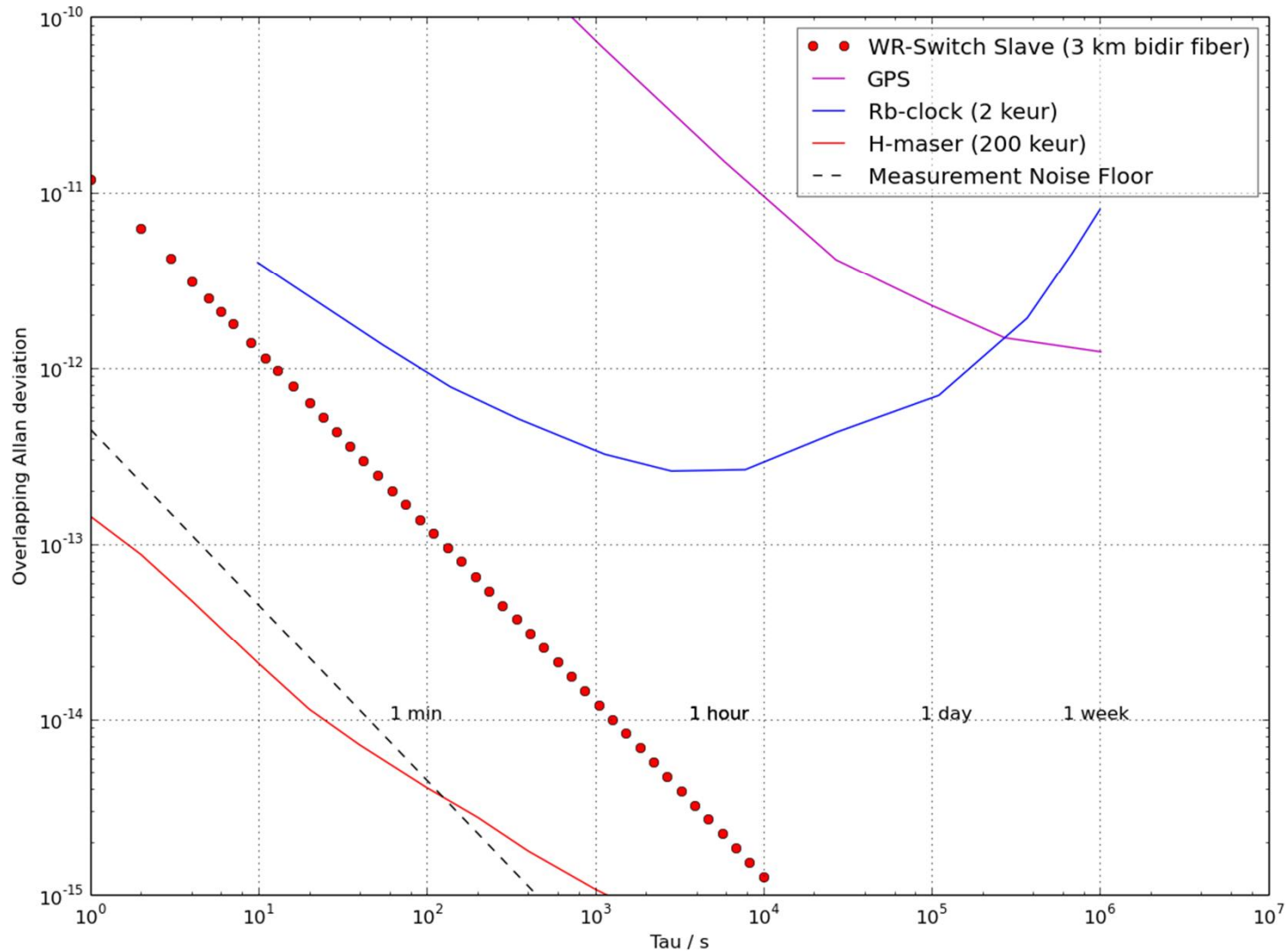
1. selvittää pitkän etäisyyden White Rabbit – aikalinkin toimivuus Puolustusvoimien verkossa sekä White Rabbit –tekniikan suorituskyvyn rajoitukset käyttäen linkin molemmissa päissä sijaitsevia vetymasereita
 - Suorituskykymittauksia tehty lyhyillä etäisyyksillä
 - Pitkän etäisyyden linkki voidaan toteuttaa 2016
2. kehittää uusia menetelmiä linkin epäsymmetrian määrittämiseen.
 - Menetelmä joka perustuu up/down-link kääntöön
3. ja evaluoida Mittatekniikan keskuksen tuottaman Suomen ajan UTC(MIKE) käyttökelpoisuus Puolustusvoimien aikasynkronoinnin ylläpitoon poikkeustilanteissa, joissa synkronointi navigaationsatelliittien tuottamaan aikaan ei ole mahdollista.
 - Simuloitu redundanttia synkronointiverkkoa
 - Evaluaatio voidaan tehdä tavoitteen 1. jälkeen

Aikalinkin toimivuutta puolustusvoimien verkossa ei vielä kokeiltu – hanke jatkuu 2016

Espoo-Kajaani ~1000 km aikavirhe +/-2 ns 100 päivän aikana



Suorituskyvyn rajoitukset, 3 km kuitu



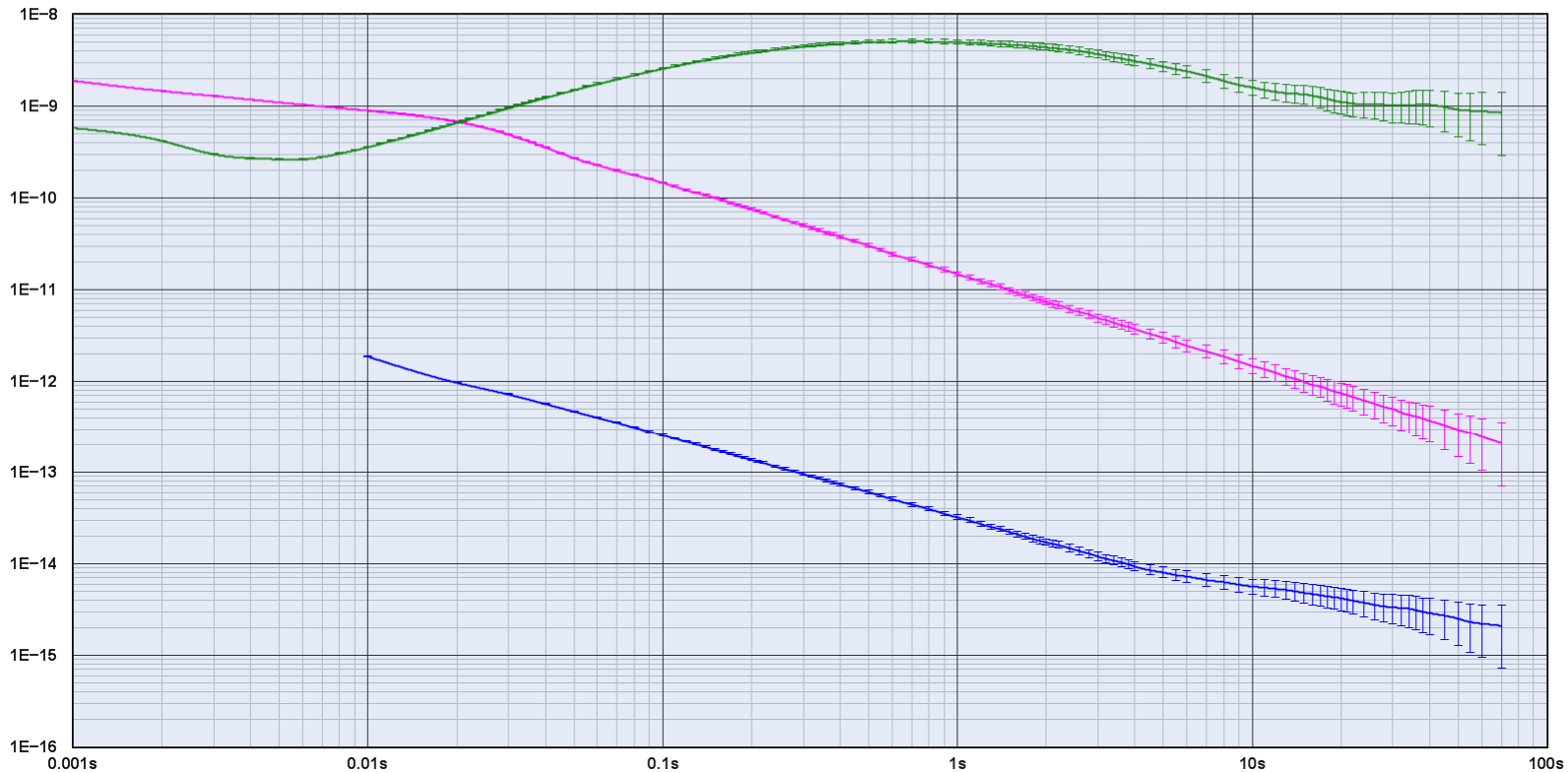
Suorituskyvyn rajoitukset



White Rabbit kytkin aikälähteenä, rajoittavat tekijät:

- Vaihelukko Atomikellosta kytkimeen
- Kytkimen sisäiset oskillaattorit

Allan Deviation $\sigma_y(\tau)$

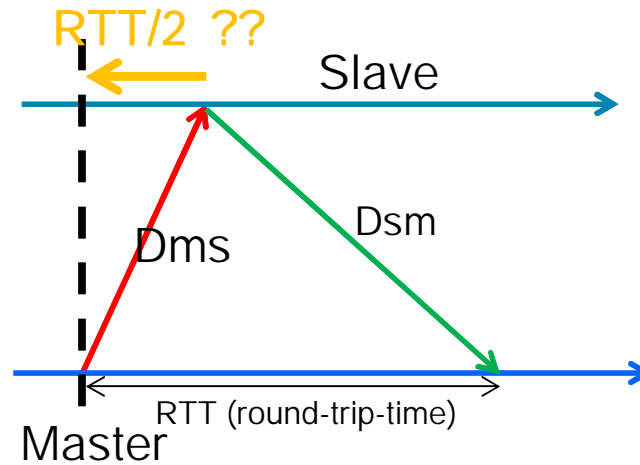


Tau	Sigma(Tau)
1s	1.49E-11
2s	7.44E-12
4s	3.75E-12
8s	1.88E-12
10s	1.49E-12
20s	7.48E-13
40s	3.74E-13

Trace	Notes	Input Freq	Input Amplitude	Ref Freq	Ref Amplitude	ENBW	Duration	Instrument	Device ID
3120A noise floor at 10 MHz	AHM3 10MHz thru ZFSC-2-1+	10.000 MHz	7.7 dBm	10.000 MHz	7.8 dBm	50 Hz	5m 0s	Symmetricon 3120A	SSJ501200012
WR-Switch GM-locked	CLK2 output	10.000 MHz	15.3 dBm	10.000 MHz	7.7 dBm	500 Hz	5m 0s	Symmetricon 3120A	SSJ501200012
WR-Switch free running	CLK2 output	10.000 MHz	15.3 dBm	10.000 MHz	7.7 dBm	500 Hz	5m 0s	Symmetricon 3120A	SSJ501200012

Epäsymmetrian vaikutus ja mittaus

Ideal symmetric
Links can assume
A time-offset of $RTT/2$



Asymmetry

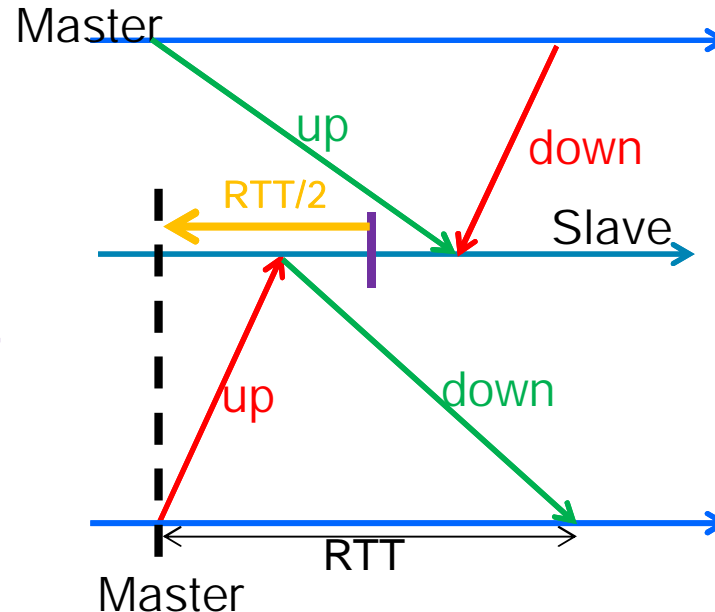
Cause:

- Chromatic dispersion
- Unequal fiberpaths

Problem: time-transfer

$$\text{Error} = (D_{ms} - D_{sm})/2$$

Virtual/calculated
point at
 $RTT/2$

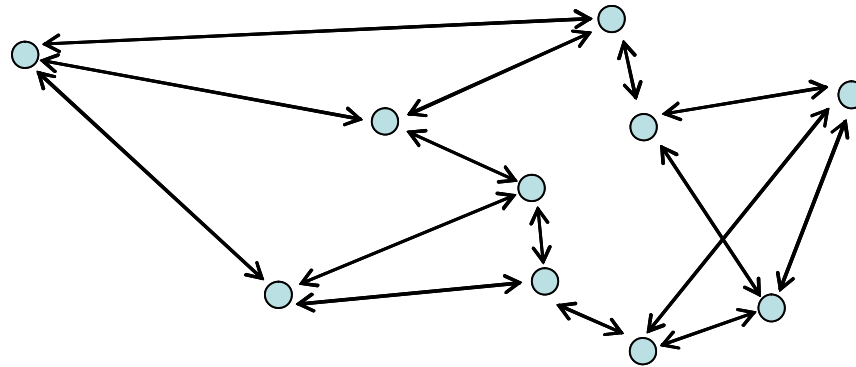


Slave does two
measurements against
Local clock -> fiber
asymmetry can be
determined. [Huang 2013,
China Mobile]

Works! But impractical for
installed fiber networks

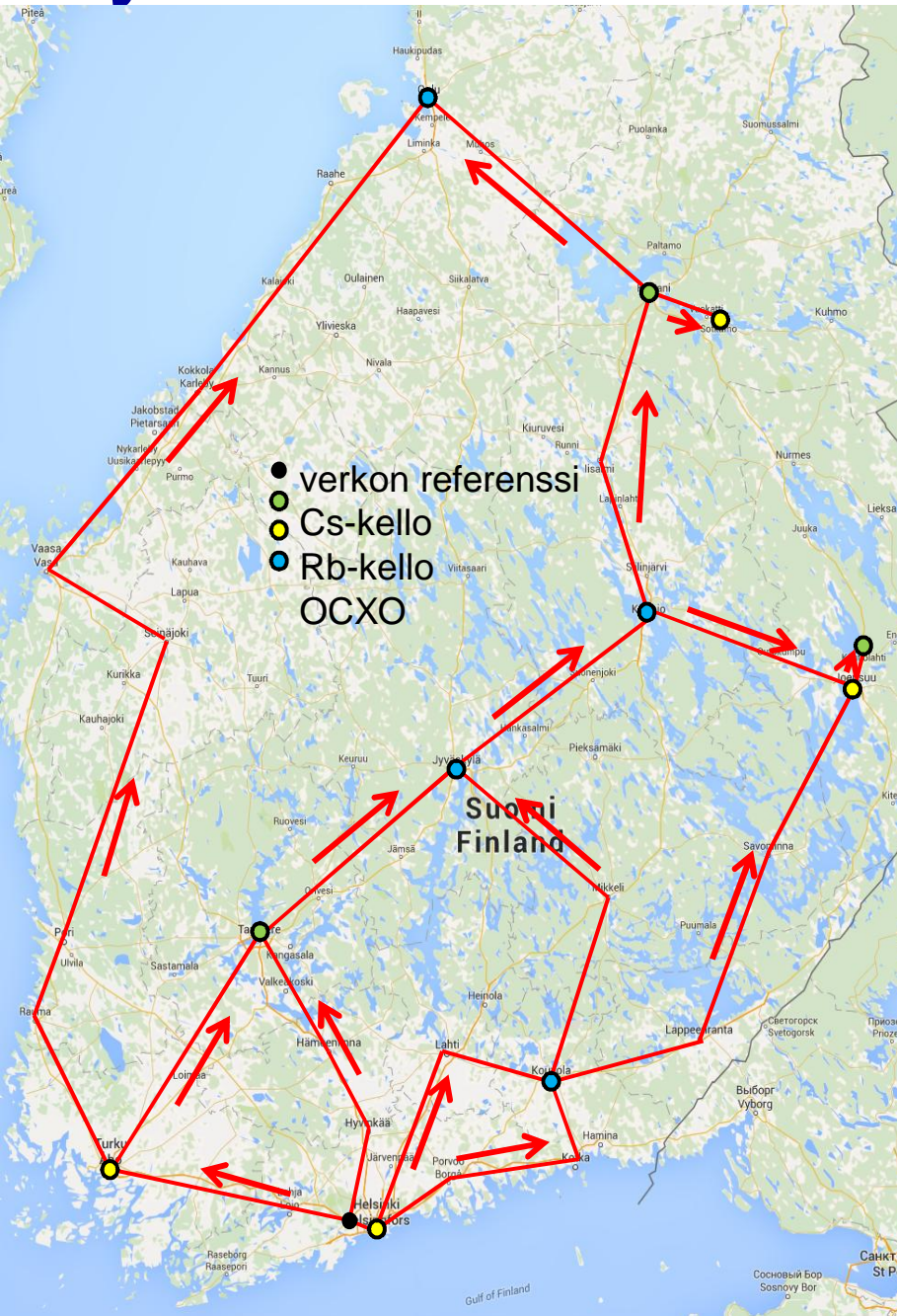
Epäsymmetrian vaikutus ja mittaus

- **Tietoliikenneverkot eivät ole staattisia** → epäsymmetrian muutoksia syntyy **huoltojen ja vaurioiden korjauksen** seurauksena
- Robustit järjestelmät ovat **verkkoja** → muutokset yksittäisissä yhteyksissä voidaan mitata → saadaan muuttuneen yhteyden epäsymmetria.



- Tämä voidaan tehdä osaverkoille tai jopa yhdelle noodille, joka menettää hetkeksi yhteytensä kokonaan, jos kellon ajautuma voidaan **ennustaa** riittävän tarkasti.
- **Kysymys:** Kuinka ajansiirron epävarmuus **verkossa** kasvaa satunnaisissa paikoissa tapahtuvien epäsymmetriamuutosten seurauksena, kun niitä aktiivisesti korjataan.

Synkronointiverkon simulointi



Simulaation oletukset

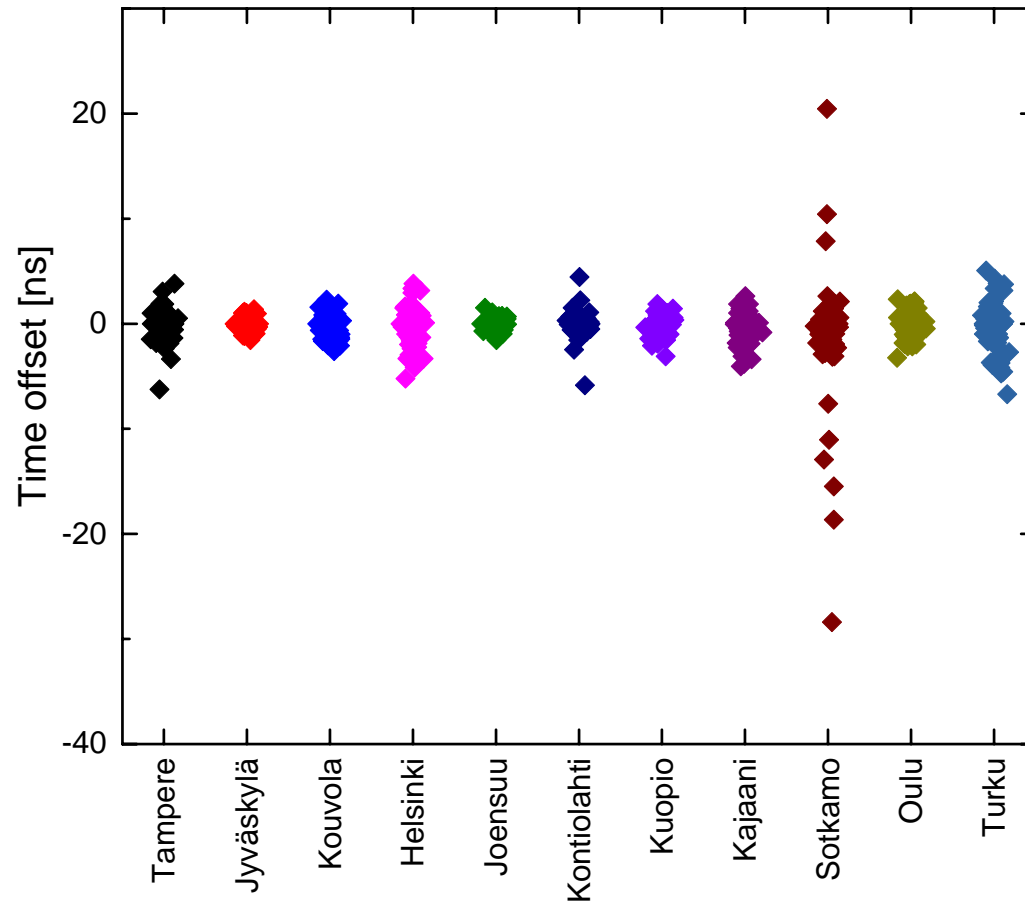
- Katkon todennäköisyys/(päivä*km)= $5E-6$
- Korjauksen todennäköisyys/päivä=0.5
- Kun linkki katkeaa, tieto linkin vaihevirheestä menetetään täysin
 - Kun linkki palautuu, uusi vaihevirhe saadaan päissä olevien kellojen vaihetiedosta.
 - Vaiheeseen lisätään vielä satunnainen 2 ns epävarmuus.
- Jos kello ei saa referenssiä,
 - Tilannetta yritetään korjata vaihtamalla tilapäisesti linkkien suuntia
 - Yleensä toimitaan karttaan merkityillä linkin suunnilla
 - Jos tämä ei onnistu, paras arvaus on kellon vapaa käynti → tästä kuitenkin isoja vaihevirheitä
- Vapaille kelloille:
 - Cs-kello: max drifti 7.5 ns/day, max muutos 2.5 ns/day
 - Rb-kello: max drifti 80000 ns/day, max muutos 10 ns/day
 - OCXO: max drifti 300000 ns/day, max muutos 2300 ns/day

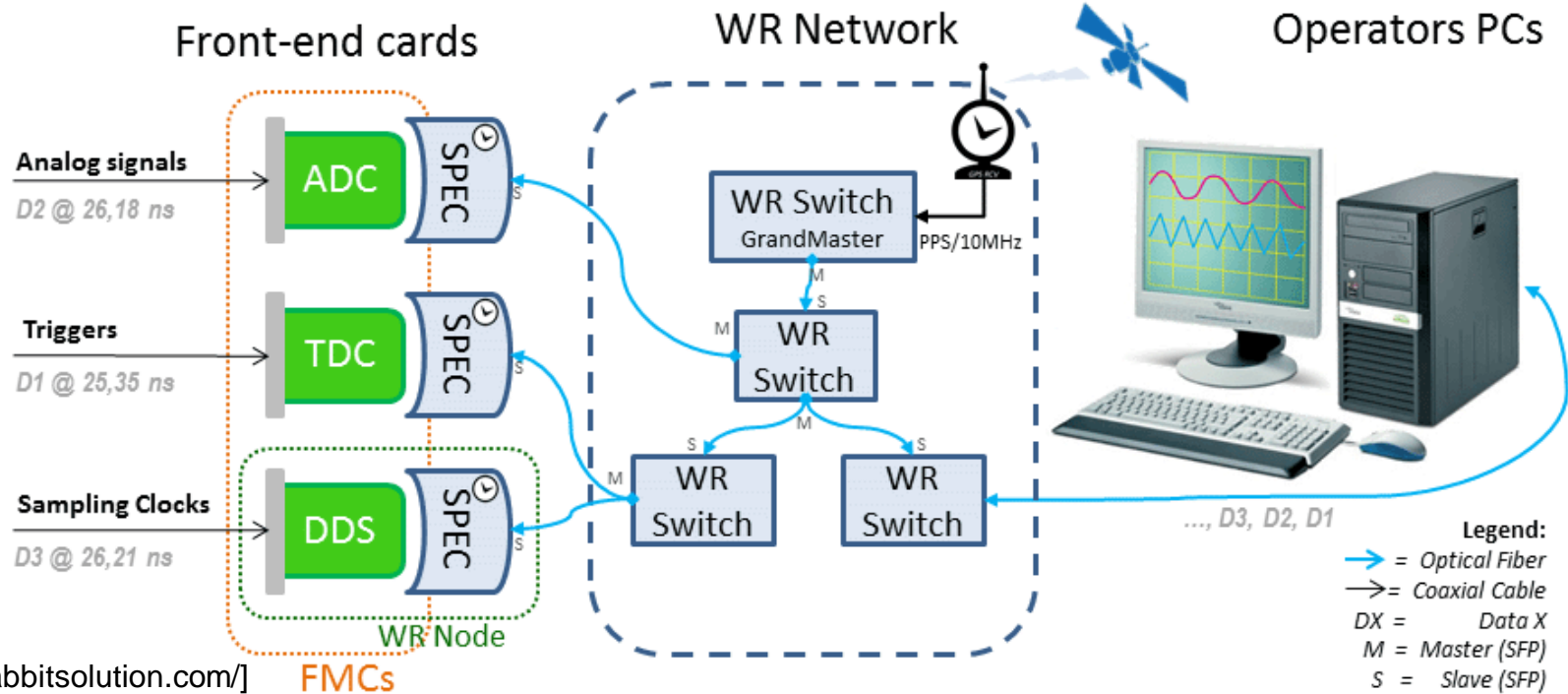
Synkronointiverkon simulointi



Tilanne kun aikaa on kulunut: 1 vuosi

- 100 simulaatiota
- Keskimäärin 5,7 katkosta järjestelmän sisällä / simulaatio
- Vain muutama isompi poikkeama pienellä todennäköisyydellä
 - =Sotkamo, jonne vain yksi linkki

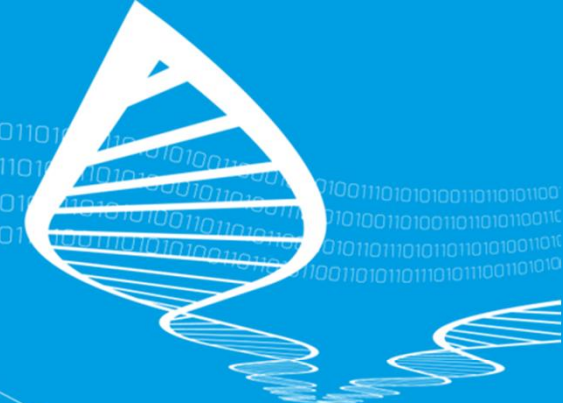




Synkronointiverkon noodeissa on sama aika.

- 1-PPS ja 10MHz (ilman GPS riippuvuutta)
- Aikaleimaus (tapahtumat/sensorit)
- Pulssien generointi (samanaikainen hajautettu ohjaus)
- ADC: Analogisignaalien digitointi ("hajautettu oskilloskooppi")
- DAC: hajautettu signaaligenerointi
- DDS: Digital-direct-synthesis (RF jakelu)

- Tavoite 1: Vaikka Mikes – PV yhteys ei vielä ole olemassa, on osatuloksia on saatu Espoo-Kajaani White Rabbit -linkillä
 - Mittaustulos verifiointimenetelmän rajoittama
 - Seuraavat kokeet linkittävät kaksi H-maseria
 - Lyhyellä linkillä mitattu $ADEV < 2 \times 10^{-11} / \tau(s)$
- Tavoite 2: Tutkittu epäsymmetrian mittaussuunnitelmia
 - Up/Downlink kuitujen vaihto toimii
 - hankalaa linkillä jossa vahvistimia
 - Simuloitu redundantin synkronointiverkon toimintaa.
- Tavoite 3: aikasykronointi MIKES / Puolustusvoimat, **odottaa** yhteyden valmistumista (vaikuttaa myös muihin tavoitteisiin).
 - Simuloitu redundantin synkronointiverkon toimintaa.
- Jatko: Sovellukset kuten radio lähettimet/vastaanottimet, hajautettu tutka, tietoliikenneverkot, sähköverkkomittaukset, laajemman verkon synkronointi, jne.



TECHNOLOGY «FOR BUSINESS»

