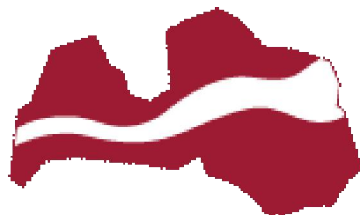


NACIONĀLAIS
ATTĪSTĪBAS
PLĀNS 2020



EIROPAS SAVIENĪBA

Eiropas Reģionālās
attīstības fonds

I E G U L D Ī J U M S T A V Ā N Ā K O T N Ē

ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174 „Laika sinhronizācija ar augstu precizitāti
sadalītai zinātnisku mērījumu sistēmai (DaLaS)”

Notikumu laika noteikšanas metodes laika skalas sinhronizācijai tīkla sistēmās

referents Jevgeņijs Buls



1. Mērķi un uzdevumi
2. Laika un Frekvences Standarti
3. Notikuma laika reģistrators kā pamats
4. Kas ir laika skalas sinhronizācija?
5. Laika skalas sinhronizācija ar satelītu sistēmu palīdzību
6. Laika sinhronizācija datoriem WAN/LAN tīklos
7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai
8. Event Timing līdzekļi laika skalas sinhronizācijai
9. Etalona frekvences pārraide un offset novertēšana
10. Vienlaicīga sinhronizācija JUNO sistēmā
11. Secinājumi



1. Mērķi un uzdevumi

Mērķis: Izstrādāt sinhronizācijas metodes laika mērīšanas izplatītai sistēmai ar augstu precizitāti.

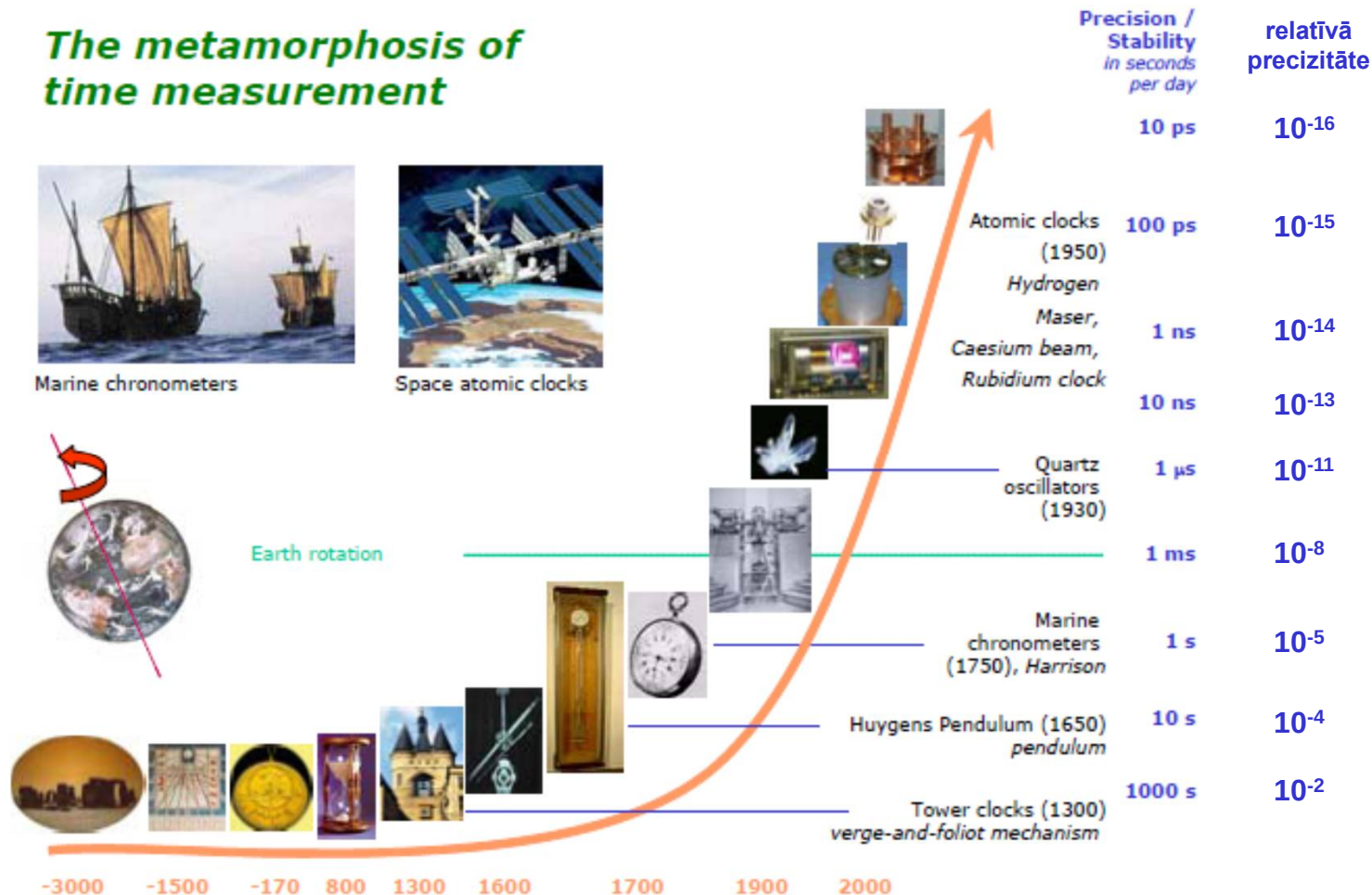
Uzdevumi:

- 1) izskatīt esošas sinhronizācijas metodes
- 2) piedāvāt pieeju, lai nodrošinātu labāku precizitāti
- 3) definēt noteikumus laika mērīšanas ierīcēm



2. Laika un Frekvences Standarti

The metamorphosis of time measurement



Laika mērišanas precizitāte parametru izmaiņas vēsturē

Attēls no: 11. Gaetano Miletì. Atomic Clocks: Basic Principles, Applications and Current Trends. 13th PSI summer school, Zug, 9-15, 2014, 53 pp.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

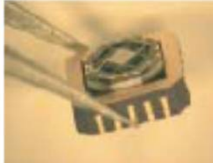
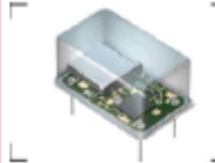
INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

4/24

2. Laika un Frekvences Standarti

	New clocks !					
						
	Primary Standard	Commercial Beam Clock	Compact Atomic Clock	Miniature Atomic Clock	Precision Quartz	Wristwatch Quartz
Accuracy:	10^{-15}	10^{-13}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-7}	10^{-5}
Timing error:	10ns/yr	1 μ s/yr	0.1 μ s/day	1 μ s/day	100 μ s/day	1s/day
Size:	10 ⁷ cm ³	10 ⁴ cm ³	100 cm ³	10 cm ³	1-10 cm ³	10 mm ³
Power:	kW	100's W	1 W	120mW	100 mW	10 μ W
Cost:	>\$1 M	\$50 k	\$2,000	\$300	\$100	\$1

Laika un Frekvences Standartu cenu un precizitātes svārstība

Attēls no: 11. Gaetano Mileti. Atomic Clocks: Basic Principles, Applications and Current Trends. 13th PSI summer school, Zug, 9-15, 2014, 53 pp.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

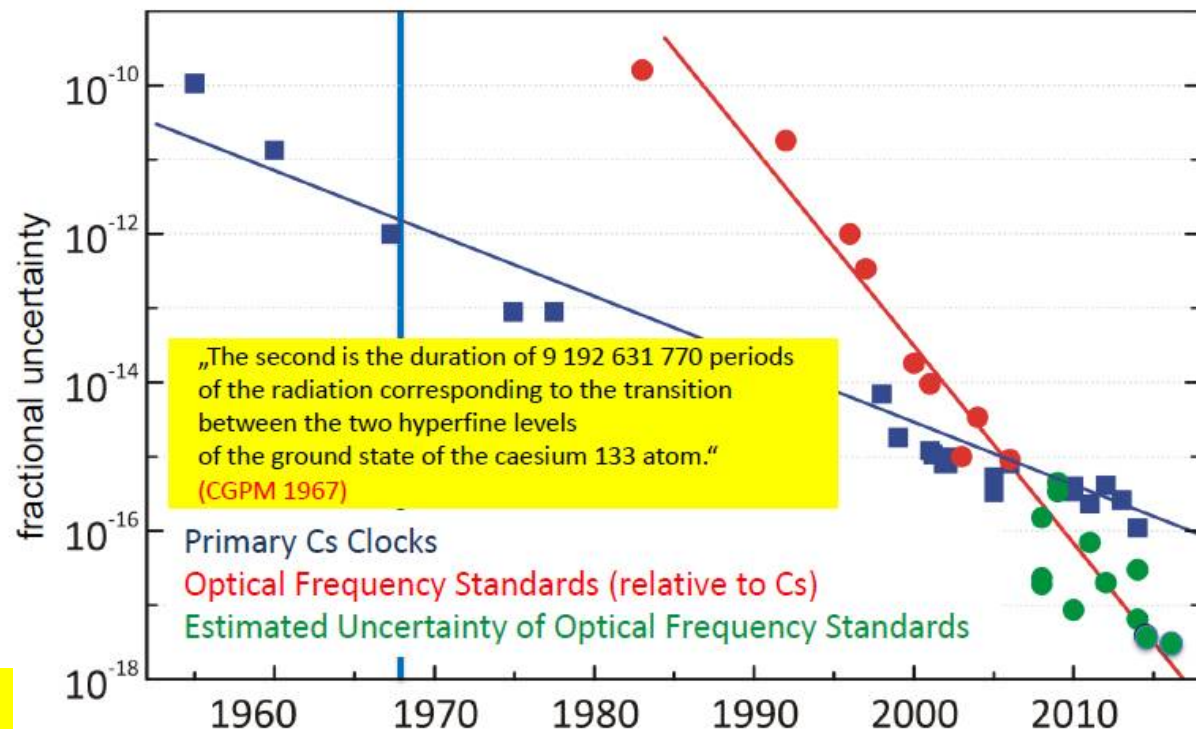
Jevgeņijs Buls Notikumu laika noteikšanas metodes

5/24

2. Laika un Frekvences Standarti

Jebkura laika mērīšana
balstās uz Laika un
Frekvences Standartu

Sekunde ir vienāda ar cēzija
izotopa ^{133}Cs izstarotā mikroviļņa
9 192 631 770 svārstību periodu
kopējo ilgumu, notiekot pārejai
starp diviem atoma pamatstāvokļa
hipersīkstruktūras līmeņiem.
[/lv.vikipedija/](http://lv.vikipedija/)



**Frekvences stabilitāte no tekošā “galvenā” standarta un
no optiskā standarta**

Attēls no: Fritz Riehle. Towards a redefinition of the SI second by optical clocks: Achievements and challenges. 30th European Frequency and Time Forum, April 8, 2016, 35 pp.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

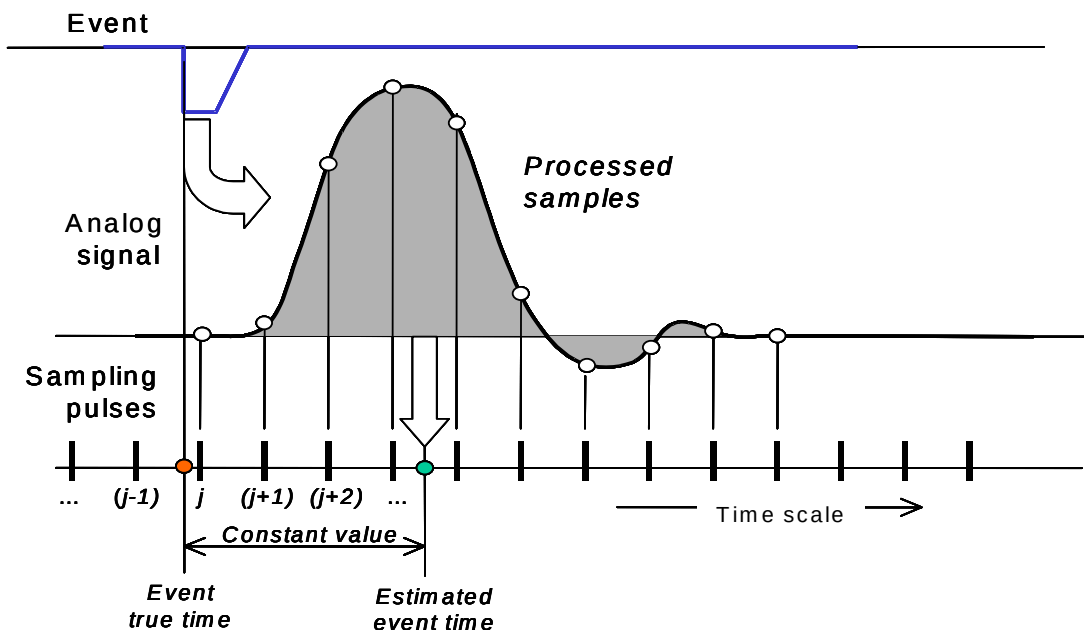
Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

6/24

3. Notikuma laika reģistrators ka pamats

Riga Event Timer family: A010-ET(1999.g) – A013-ET; A031-ET(2002.g) – A033-ET



Notikumu taimēšana ir bāzēta uz digitālo signālu apstrādes (DSA). Īpašs analoga signāls ar noteiktu aizkavi un nemainīgu formu tiek ģenerēts notikuma pienākšanas momentā. Tālāk šis signāls tiek digitalizēts un digitāli apstrādāts, lai novērtētu tā pozīciju attiecībā pret numurēto takts pulsu secību uz laika skalas. Šādā veidā iegūtie aprēķini dod prasīto notikuma laiku.

Takts impulsi ir stingri saistīti ar ārējo 10 MHz no
Laika un Frekvences Standarta.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls Notikumu laika noteikšanas metodes

7/24

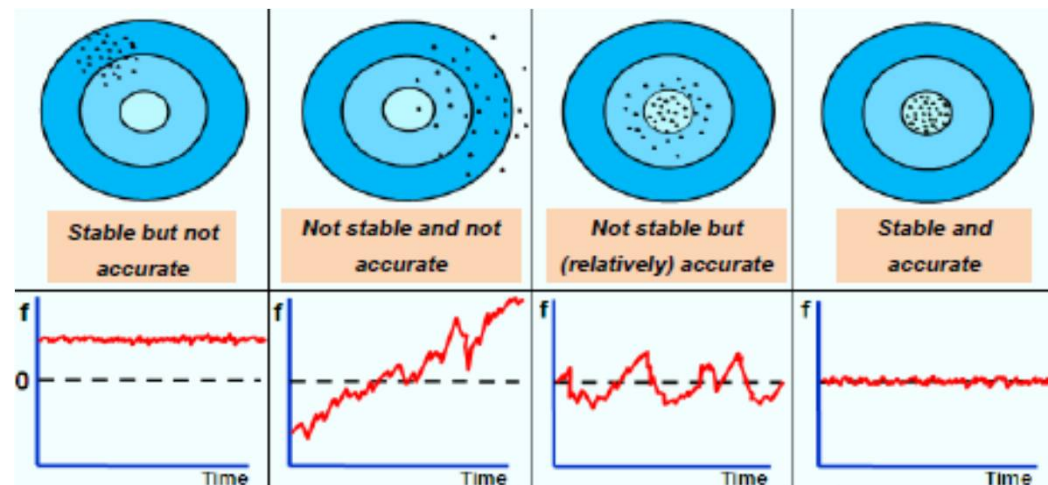
3. Notikuma laika reģistrators ka pamats

Visizplatītākā ierīce no Riga Event Timer family ir A033-ET.

Vairāk kā 75 ierīces ir pārdotas Eiropā, ASV, Japānā, Ķīnā, Krievijā.

A033-ET raksturīgi parametri ir:

- Ātrdarbība = līdz 20 mil. meas./s
- Precision= 3-4 ps
- Accuracy ir 10 ps laika momentiem un 3-4 ps laika intervāliem, bet ir atkarīga no ārējā 10 MHz un 1PPS signāla no **Laika un Frekvences Standarta.**



Kādas īpašības raksturo “precision” un “accuracy”?

Attēls no John Vig “Quartz crystal resonators and oscillators”



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

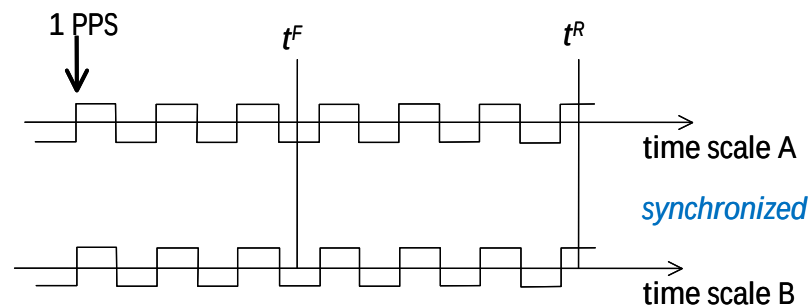
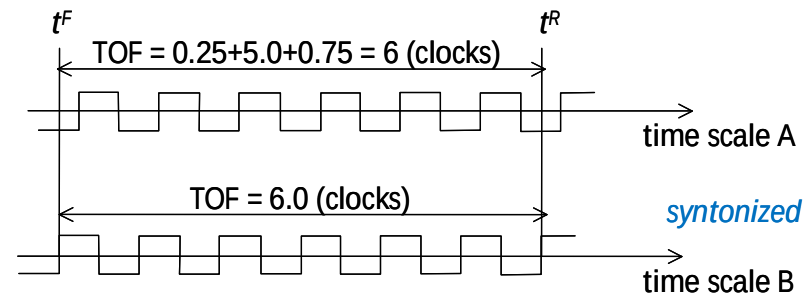
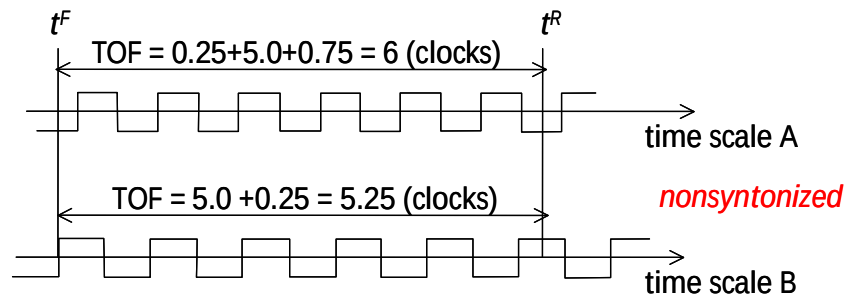
Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

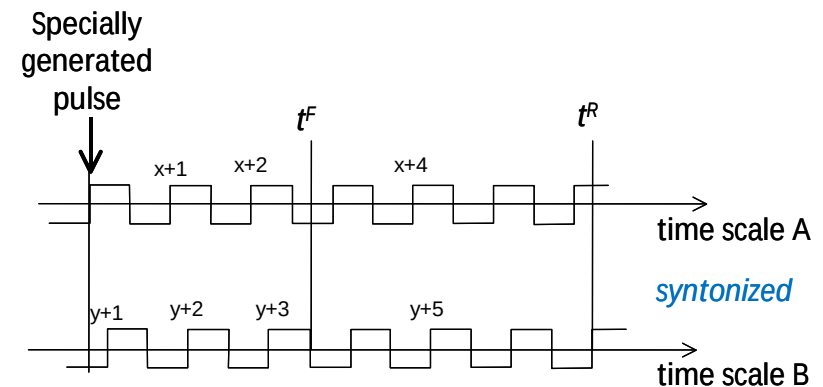
8/24

4. Ko nozīme sinhronizācija?

Time of Flight (TOF) = time of receiving – time of firing = $t^R - t^F$



Tieša sinhronizācija



Sinhronizācija ar offset novērtēšanu

$$\text{offset} = t^{PB} - t^{PA} = (y + 0.75) - (x);$$

$$t^{FA} = x + 2.75;$$

$$t^{FB} = y + 3.5 - \text{offset} = x + 2.75.$$



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

9/24

5. Laika skalas sinhronizācija ar satelītu palīdzību

Visizplatītākā sinhronizācijas metode balstās uz speciālam satelītu sistēmām - Global Navigation Satellite Systems (GNSS).
Tādu sistēmu piemēri: GPS, GLONASS, Galileo, Beidou (China) etc.

Laika un Frekvences Standarti uz GNSS bāzes tiek ražoti simtiem dažādās valstīs un atšķiras pēc izejas signāla 10 MHz un 1PPS **accuracy un precision**.
Cenas svārstās no dažiem simtiem līdz tūkstošiem eiro.

Atkarībā no cenām un uztverošās antenas rūpīgas uzstādīšanam šīs ierīces ļauj iegūt **precision no 10^{-10} līdz 10^{-13}** un laika skalas sakritību ar **accuracy no 100 ns līdz 1 ns**.

Cits risinājums balstās uz Satellite Lazer Ranging (SLR) staciju aprīkojuma izmantošanu un papildu taimeri uz ģeodēziska satelīta. Šis risinājums jau tiek testēts T2L2 (Time Transfer by Laser Link) projekta ietvaros. Rezultātā izdevās iegūt laika skalas sakritību ar **accuracy līdz 60 – 100 ps** un stacijas attālums varētu būt 10000 km un vairāk.



6. Laika sinhronizācija datoriem WAN/LAN tīklos

Gadījumā, kad izplatīta sistēma sastāv no datoriem, saistītiem LAN vai WAN tīklos, sinhronizācijas nolūkam lieto:

- Precision Time Protocol (PTP; IEEE 1588) – laika aizkaves mērīšana;
- Synchronous Ethernet (SyncE; ITU-T G.8261, G.8262, G.8264) – etalona frekvences izplatīšana.

PTP un SyncE izmantošana ļauj iegūt: frekvences **precision $0.5 \cdot 10^{-5}$**
laika skalas sakritību ar **accuracy $1 \mu\text{s}$**

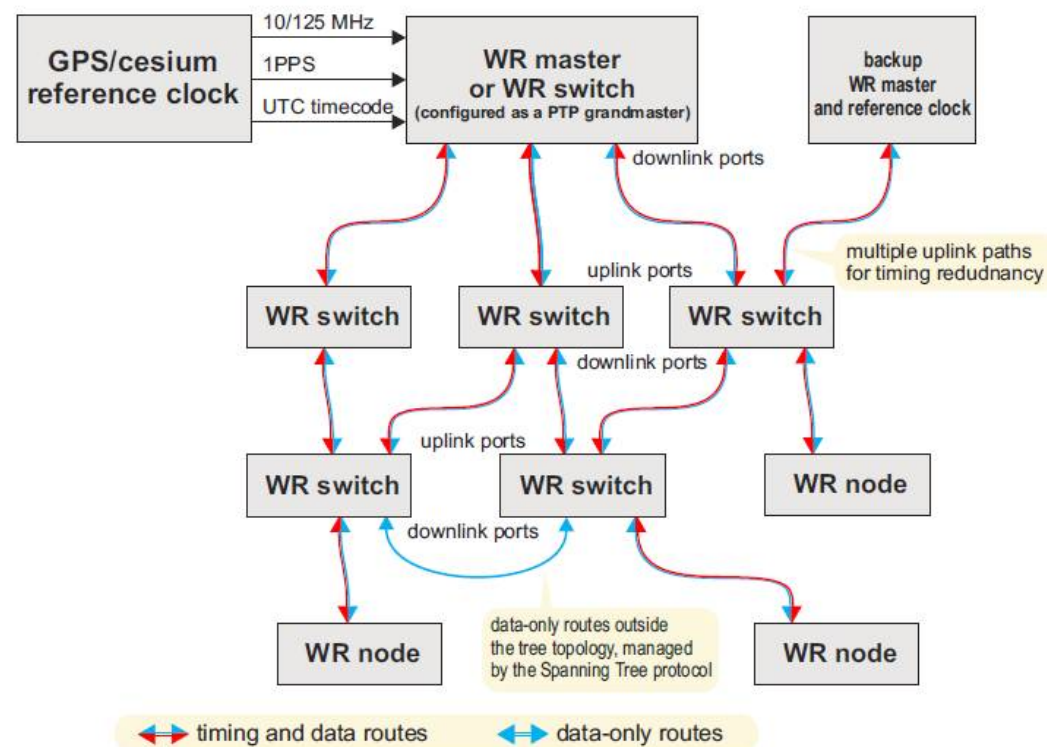
Starptautiskais projekts “White Rabbit” (WR) bija uzsākts 2008.gadā ar mērķi uzlabot frekvences **precision līdz 50 ps** un Laika skalas sakritību ar **accuracy labāk nekā 1 ns**

WR balstās uz uzlabojumiem **PTP** programmatūrā un jaunu **SyncE** realizāciju, taču var arī funkcionēt kopā ar standartiem Ethernet līdzekļiem.



7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai

WR sinhronizācija balstās uz speciāli izstrādātiem mezgliem, kas izpilda visas standarta Ethernet funkcijas un papildina tās ar WR laika sinhronizācijas līdzekļiem.



White Rabbit ierīces hierarhija

Attēls no: Tomasz Włostowski. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network. Master of Science thesis. Warsaw University of Technology. 2011, 98 p.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

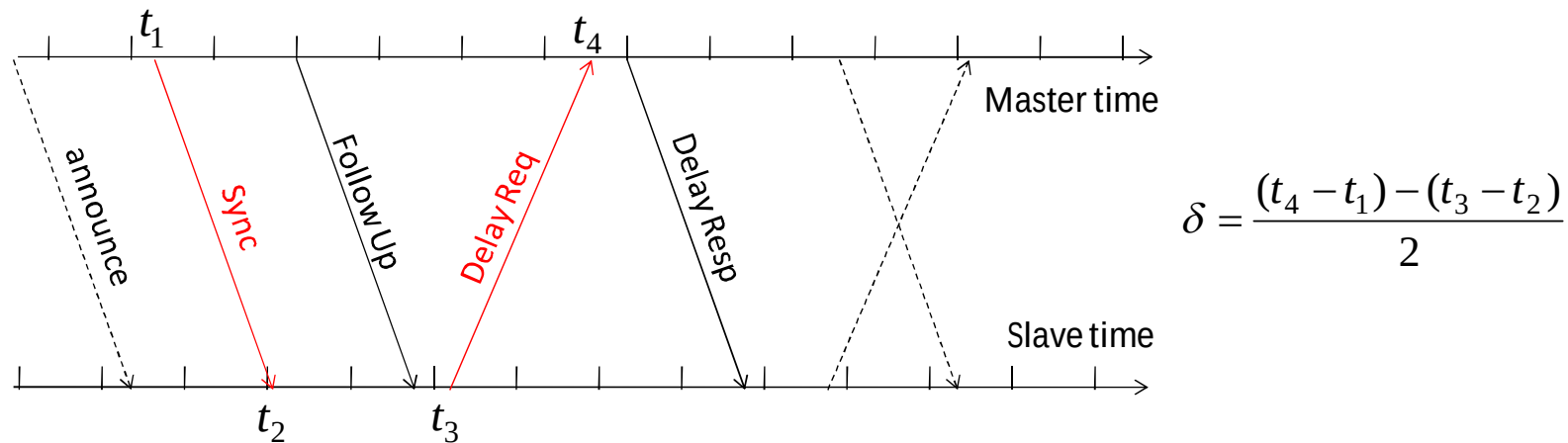
Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

12/24

7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai

PTP ļauj nomērīt laika aizkaves pēc datu pārraides abos virzienos.



Specializēto datu pārraide un aizkaves novērtējums

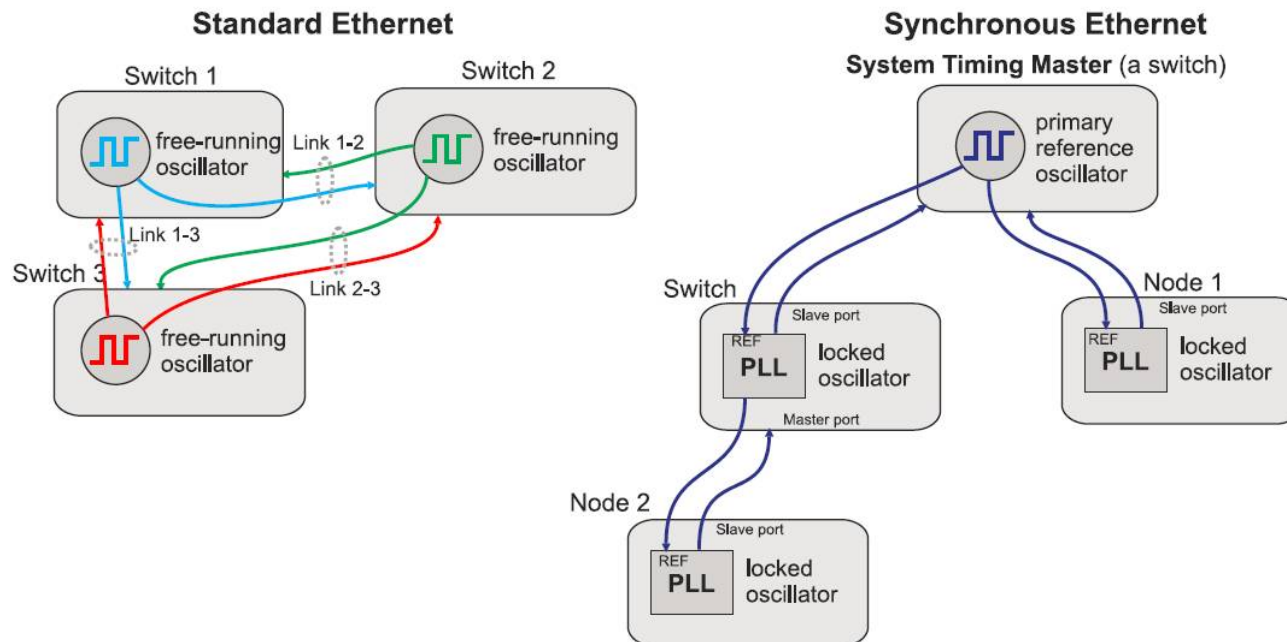
WR papildina standarta PTP funkcijas ar trafiku regulēšanas funkcijām un iespēju precizēt aizkaves novērtējumus ar fāzes starpības mērījumu rezultātiem SyncE realizācijā.



7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai

WR mezglos sintonizācija ar SyncE ir papildināta ar Phase locked loop (PLL) un ar fāzu starpības mērījumiem.

WR mezgli pārraida etalona frekvenci uz apakšējiem mezgļiem. Salīdzinot izejošu un atgriezušos frekvenci, ar PLL palīdzību regulē to sakritību.

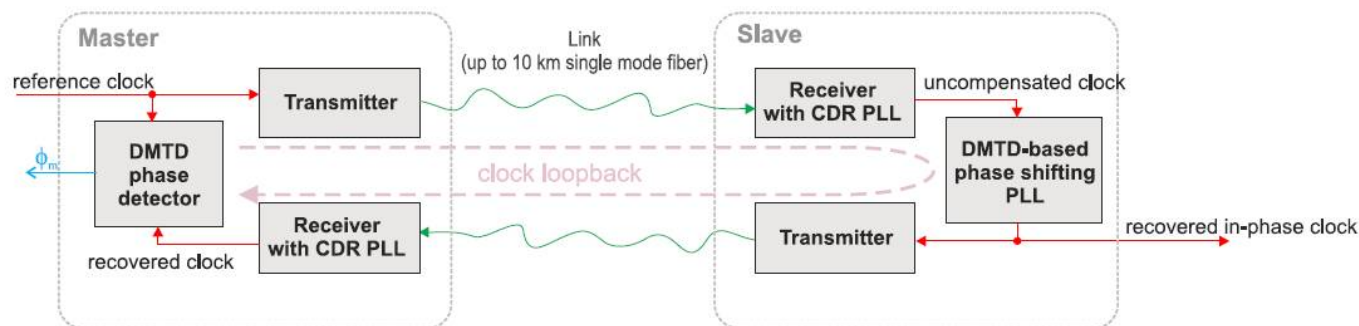


Fiziskā līmeņa sintonizācija standarta tīklā un tīklā uz WR ierīcēm

Attēls no: J. Serano et al. THE WHITE RABBIT PROJECT. Proceedings of IBIC 2013, Oxford, UK, pp.936-942.

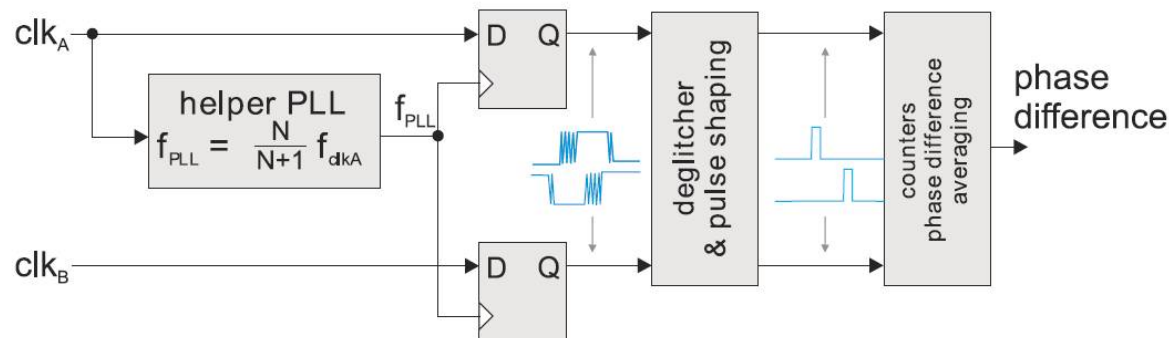


7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai



Frekvences pārraide un tās salīdzināšana ar atgriešanās frekvenci

Attēls no: J. Serano et al. THE WHITE RABBIT PROJECT. Proceedings of IBIC 2013, Oxford, UK, pp.936-942.



Pārraidīto un saņemto signālu fāžu starpību mērīšana ar augstu precizitāti.

Attēls no: Tomasz Włostowski. Precise time and frequency transfer in a White Rabbit network. Master of Science thesis. Warsaw University of Technology. 2011, 98 p.



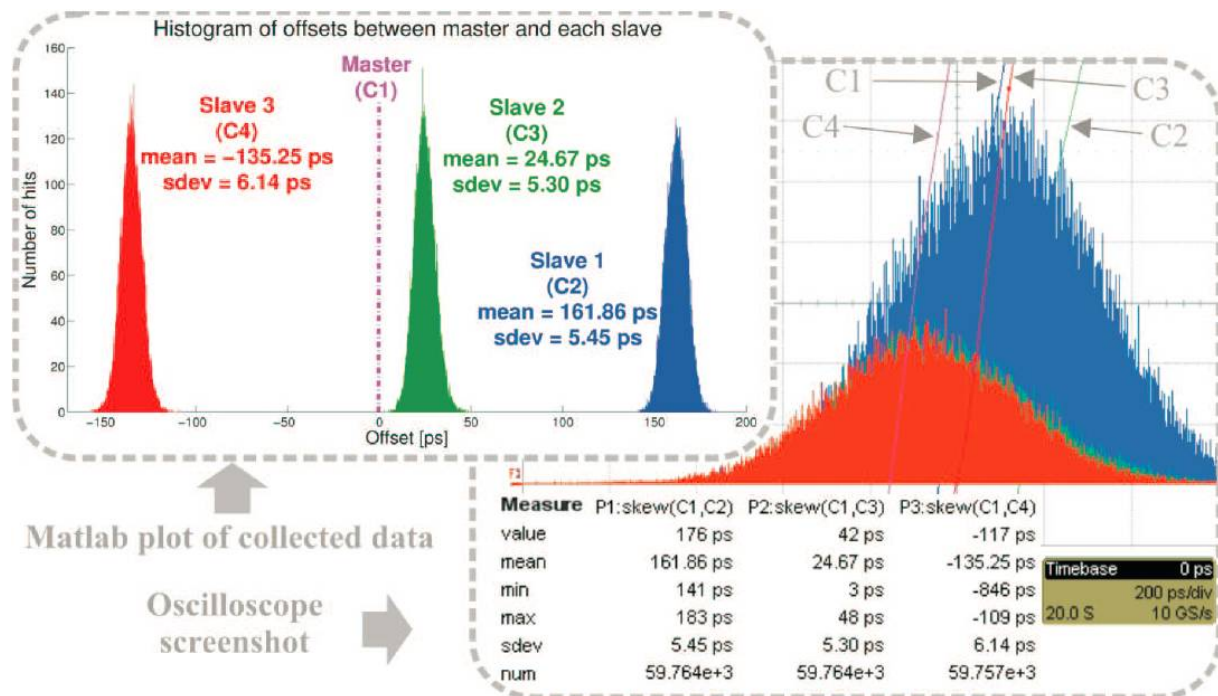
ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls Notikumu laika noteikšanas metodes

15/24

7. White Rabbit līdzekļi laika skalas sinhronizācijai



Precision un accuracy novērtēšanas rezultāti. Tiek salīdzināti 1PPS signāli no trīs kaskada mezgliem (Slave 1, Slave 2, Slave 3) ar 1PPS signālu no vadoša mezgla (Master).

Attēls no: 63. Maciej Lipinski et al. White Rabbit: a PTP Application for Robust Sub-nanosecond Synchronization. Proc. IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, September 2011, Germany, 6 pp.



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls

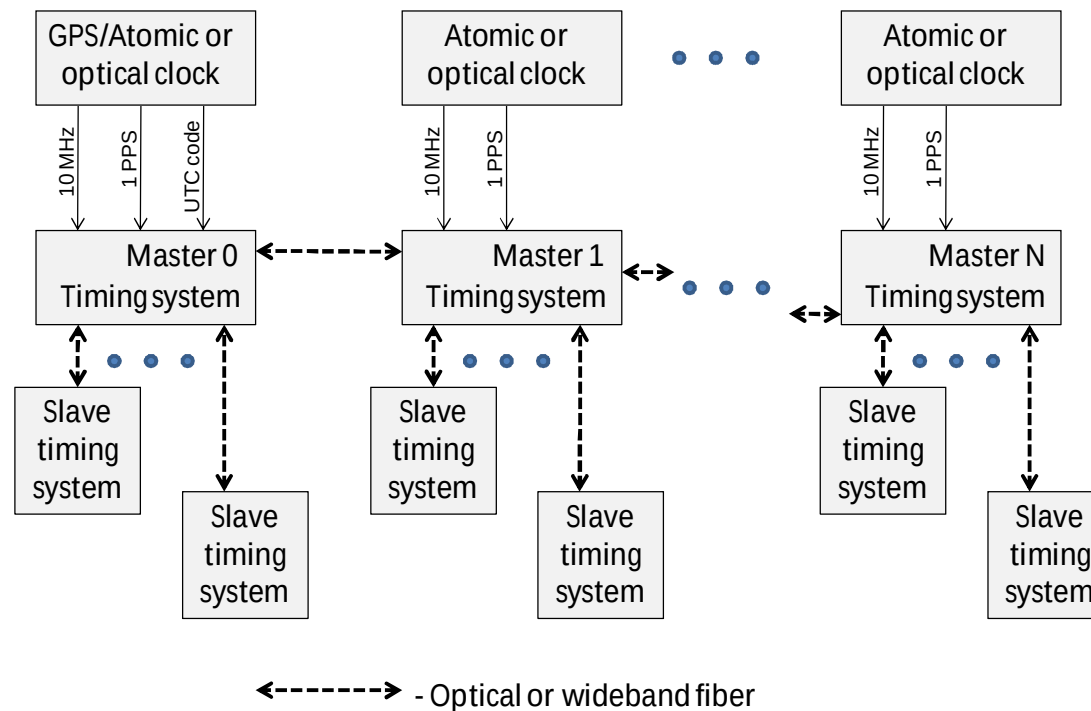
Notikumu laika noteikšanas metodes

16/24

8. Event Timing līdzekļi laika skalas sinhronizācijai

Lai varētu izmantot WR Laika skalas sinhronizācijai, ir nepieciešams iepirkt WR ierīces vai iebūvēt WR tehniskos risinājumus Laika mērīšanas sistēmās izplatītos mezglos.

Mēs piedāvājam lietot sinhronizācijas uzdevumam tās pašas laika mērīšanas ierīces, no kuriem sastāv šī izplatīta sistēma.



**Laika mērīšanas sistēmas hierarhija atkarībā no kvalitatīva
Laika un Frekvences Standarta esamības**



ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts

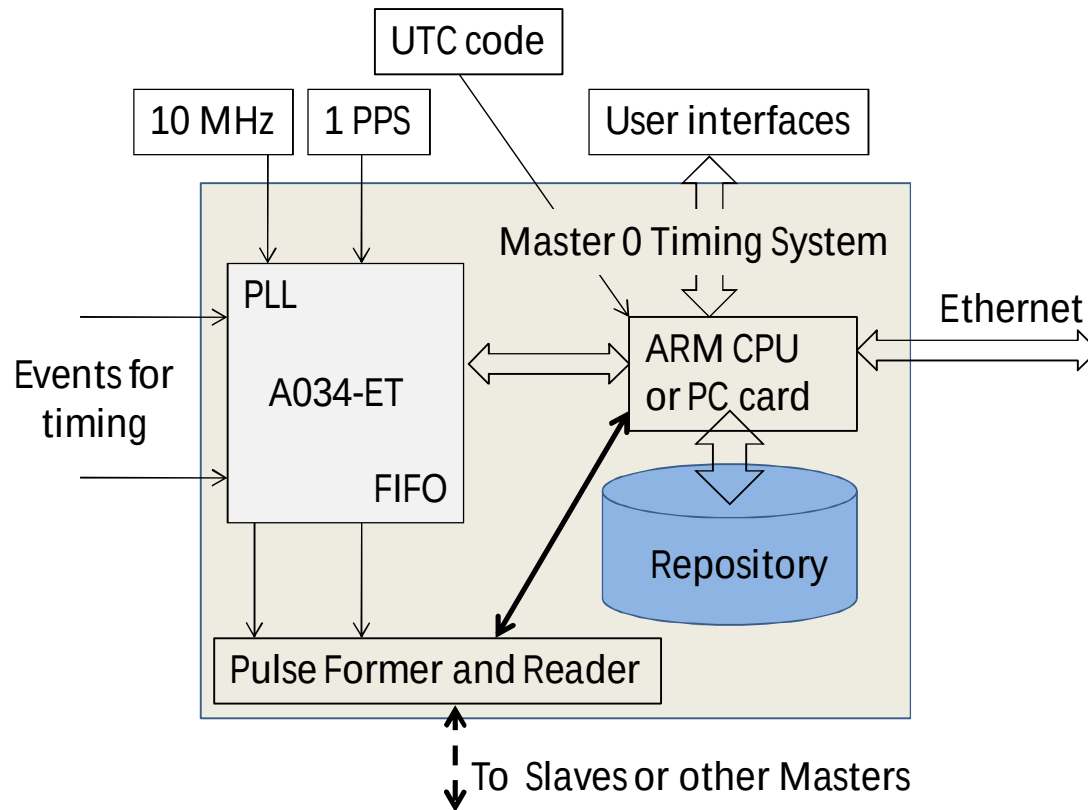
INSTITUTE OF
ELECTRONICS AND
COMPUTER SCIENCE

Jevgeņijs Buls

Notikumu laika noteikšanas metodes

17/24

8. Event Timing līdzekļi laika skalas sinhronizācijai



Galvenā Laika mērīšanas sistēma Master 0. Tai ir savs augstas kvalitātes Laika un Frekvences Standarts un tās laika skala pilnībā atbilst (sakrīt) UTC laika skalai.

Laika skalas atbilstību UTC var nodrošināt Event Timer A033-ET pēc papildinašanas ar iespējām precīzi mērīt 1 PPS signālu un precīzi koriģēt laika skalu saskaņā ar šiem mērījumiem.

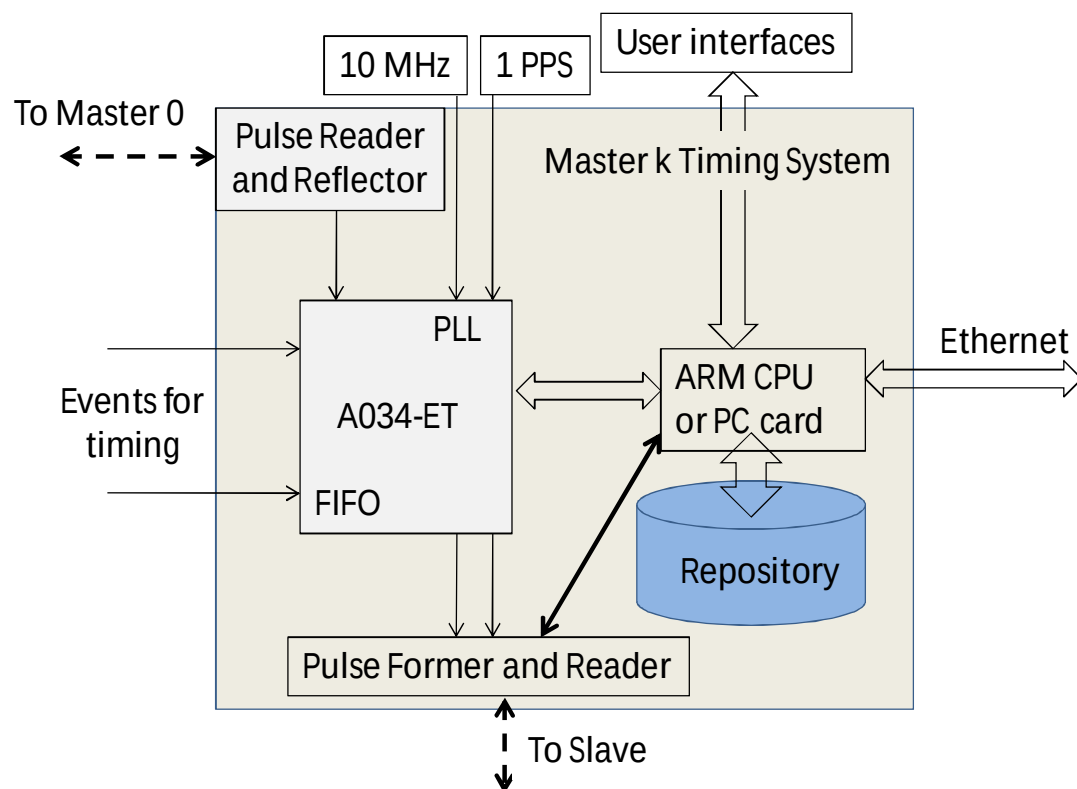
Jaunas ierīces apzīmējums A034-ET.

A034-ET nodrošinās *precision labāk nekā 5 ps un accuracy aptuveni 10 ps.*

Master 0 sāk offset mērījumu visām tieši saistītām sistēmām, iekļaujot Master un Slave sistēmās un saglabā visu offset datu savā HDD



8. Event Timing līdzekļi laika skalas sinhronizācijai



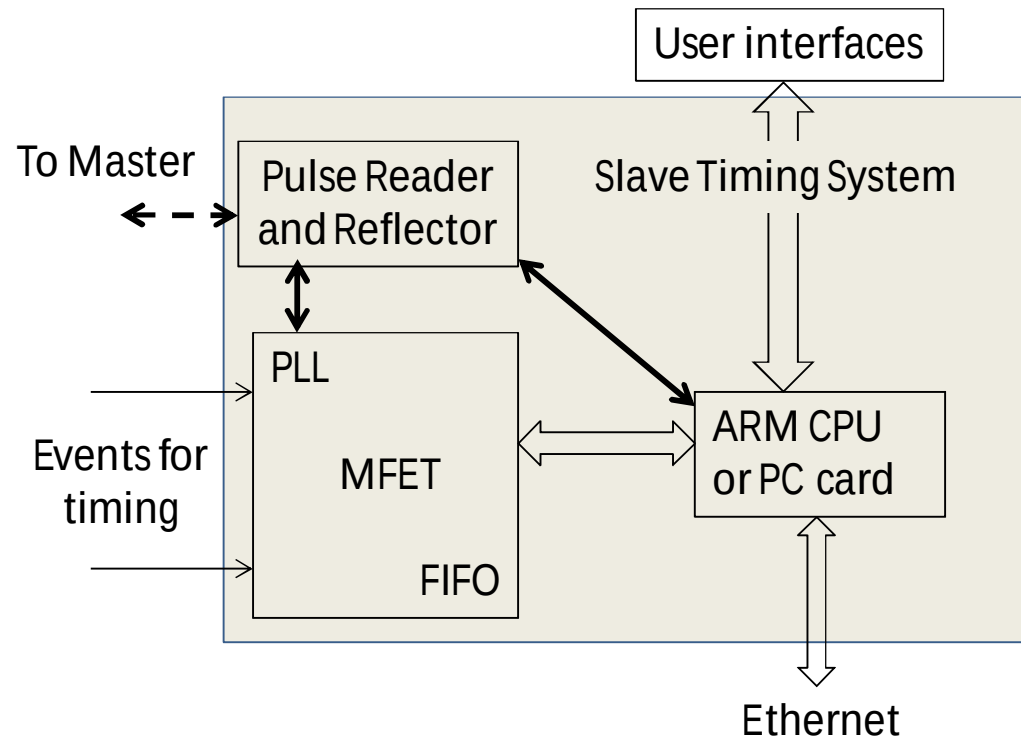
Master k sistēmā ir tads pats A034-ET un Master k var funkcionēt Master 0 vietā, kad Master 0 neizpilda savas funkcijas.

Master k sāk offset mērījumus visam tieši saistītām sistēmām, izņemot Master 0, un saglabā visu offset datu savā HDD

Laika mērīšanas sistēma Master k. Tai ir savs augstas kvalitātes Laika un Frekvences Standarts un arī iespējas sinhronizēties UTC.



8. Event Timing līdzekļi laika skalas sinhronizācijai



Laika mērīšanas sistēma Slave. Tā balstās uz iekšējo quartz oscilator un etalona frekvences saņemtas no sava Master caur optisko vai platjoslas fiberi.

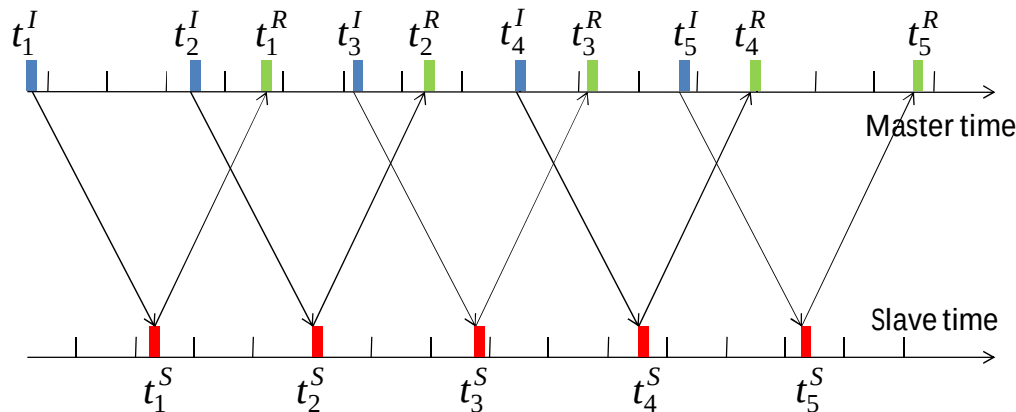
Slave Timing sistēmai ir nedārgs MultiFunctional Event Timer (MFET) ar **precision <10 ps**. Offset novērtēšanas procedūrā Slave sistēma sniedz timēšanas datus par reģistrētiem notikumiem un uz to bāzes Master aprēķina offset vērtējumu. Jebkurš lietotājs, kam ir nepieciešami taimēšanas dati no šīs Slave sistēmas, var saņemt offset vērtējumus no Master sistēmas.



9. Etalona frekvence pārraide un offset novērtēšana

Etalona frekvences pārraide caur optisko kabeli nodrošina ļoti augstu **stabilitāti līdz $2 \cdot 10^{-15}$ vienā sekundē vai 10^{-18} desmit stundās.**

Tāda augsta frekvences pārraides stabilitāte ļauj novērtēt gravitācijas ietekmi un attiecīgi novērtēt augstumu ar 1 cm precizitāti.



$$\delta_1 = \frac{t_1^I + t_1^R}{2}$$

$$\Delta_1 = t_1^S - \frac{t_1^I + t_1^R}{2}$$

Offset novērtējuma procedūra.

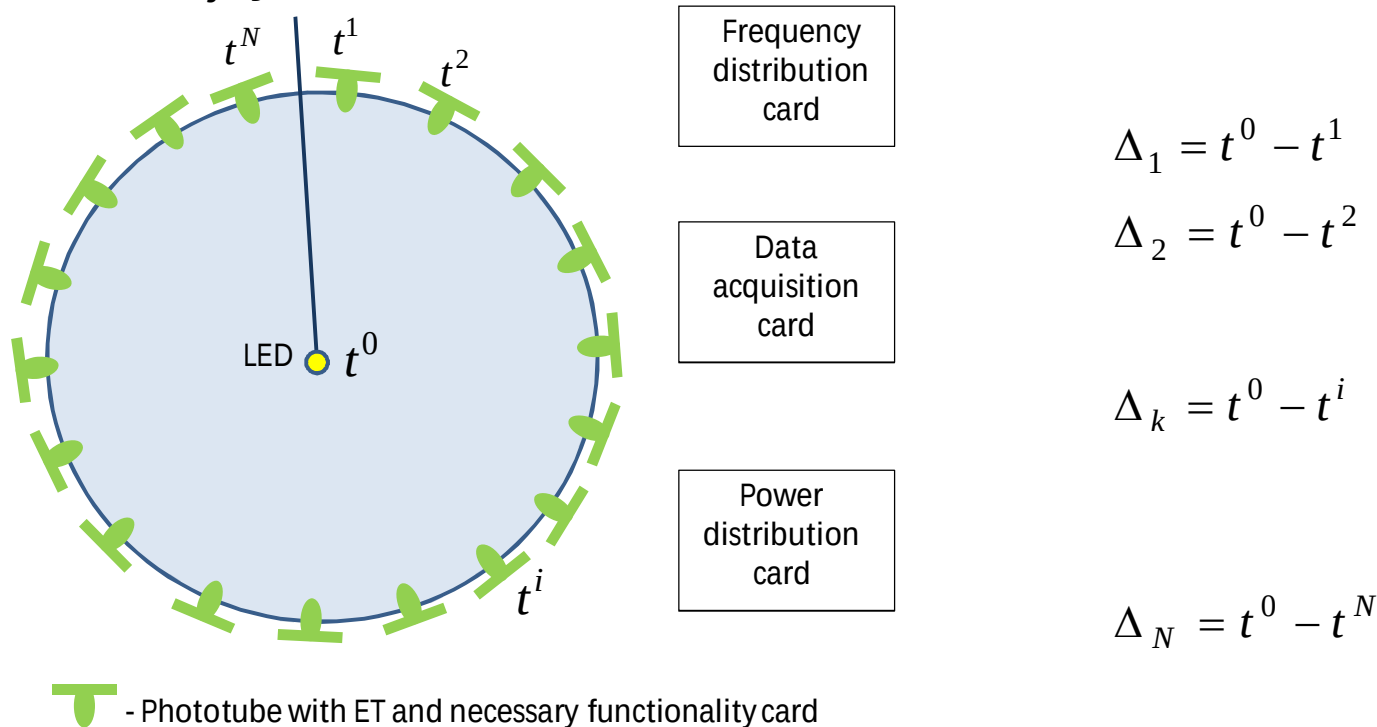
Master sistēma momentā t^I savā laika skalā pārraida impulsu uz Slave sistēmu. Slave sistēmā caurspīdīgs spogulis atstaro šo impulsu, bet MPET reģistrē impulsa pienākšanas momentu savā laika skalā. Procedūras beigās laika momenti no Slave tiek savākti Master sistēmā un Master aprēķina attiecīgus offset vērtējumus un saglabā savā HDD priekš visiem lietotājiem.

Piedāvātās laika mērīšanas ierīces *precision* ir 5 ps Master sistēmā (A034-ET) un 10 ps Slave sistēmā (MFET). Tas nozīmē, ka offset novērtējumam *precision* ir 11 ps. Viduvējot 100 novērtējumus varam sasniegt 1 ps *precision*.



10. Vienlaicīga sinhronizācija JUNO sistēmā

JUNO neutrino teleskops ir 37 metru diametrā sfēra aizpildīta ar ūdeni. 1500 fotoreizinātāji ir vienmērīgi sadalīti pa visu iekšējo virsmu ar attiecīgu elektroniku ārā. Fotoreizinātāji ķer Čerenkov luminiscence, kad neutrino lido caur ūdeni.



Vienlaicīga sinhronizācija JUNO teleskopā.

Vadoša sistēma laika momentā t^0 padod impulsu uz LED un visi fotoreizinātāji reģistrē gaisma impulsu savās laika skalās. Savācot šos laika datus, var novērtēt katra reizinātāja laika skalas nobīdi.

ERAF projekts Nr.1.1.1.1/16/A/174. Informatīvais seminārs, 2018. g. 26. marts



11. Secinājumi

Laika skalas sinhronizācijas izplatītās laika mērīšanas sistēmās nodrošināšana ar WR ierīcēm prasa WR ierīces nopirkšanu vai izgatavošanu un pieslēgšanu visās mērīšanas mezglos. WR sinhronizācija ļauj nodrošināt **frekvences stabilitāti 10^{-15} , laika skalas accuracy <1 ns un precision 50 ps.**

Piedāvāta metode izmanto tajās pašās laika mērīšanas ierīcēs, kas ir katrā mērīšanas sistēmas mezglā.

Frekvences pārraide ar optisko kabeli nodrošina **frekvences stabilitāti augstāku nekā 10^{-18} .**

Projekta ietvaros tiks izstrādātas divas ierīces: dārgāks taču ļoti precīzs A034-ET (<5 ps) un lētāks MFET ar labu, bet zemāku precizitāti (10 ps). Šo laika mērīšanas ierīču lietošanas gaidījumā var nodrošināt **laika skalas accuracy līdz 10 ps un precision līdz 11 ps.**

