



ZVEZA RADIOAMATERJEV SLOVENIJE

ASSOCIATION OF RADIO AMATEURS OF SLOVENIA

# Točna ura?

Marko Čebokli, S57UUU

FE Ljubljana, 4 feb 2023

Organizator : Zveza radioamaterjev Slovenije,  
<http://www.hamradio.si>

# Zahteve (želje) za 21cm interferometer

Da bi faza ostala znotraj  $\pm 45^\circ$  vsaj eno minuto.

$45^\circ$  na 1420MHz je 88ps, minuta je 60s, torej približno  $1.5 \text{ E-12}$

Ali je to dosegljivo z amaterskimi sredstvi?

Olajševalna okoliščina: potrebujemo samo sinhronizacijo med postajami, absolutna točnost (glede na UTC...) ni (zelo) važna.

# Kako opisujemo točnost ur?

Ponavadi rečemo: ta ura zaostaja minuto na dan. Tako minuta kot dan sta enoti časa, zato je vrednost neimenovano število, zgoraj n.pr.  $1/1440 = 0.00069444... \approx 6.9E-4$

Tak podatek je dovolj dober za prodajalca Rolex ur, vendar o uri ne pove veliko.

“Ta ura zaostaja minuto na dan, torej zaostaja sedem minut na teden”

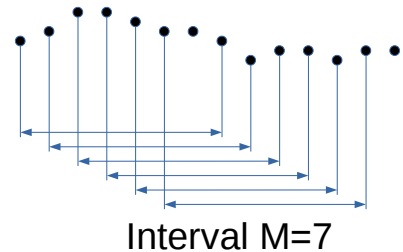
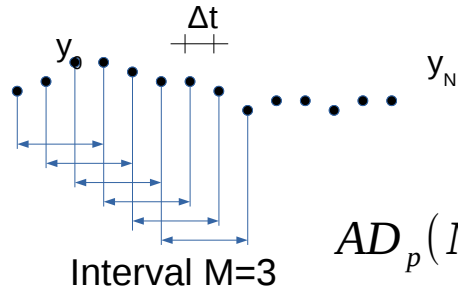
To bi bilo res samo, če bi urin oscilator (nihalo, nemirka, kremenčev kristal) deloval z konstantnim zamikom frekvence, torej s konstantno frekvenco (odličen oscilator!). V resnici pa je frekvenca odvisna od naključnih vplivov (temperatura, zračni tlak, vibracije).

Primer: ura na omrežno frekvenco lahko na uro zaostaja več kot na dan! Operaterji omrežja ponoči “pohitijo”, da nadomestijo padeč frekvence zaradi večjih bremen podnevi. Podobno velja za “radijske” ure, ki (v Sloveniji) signal ujamejo samo občasno (QRM).

# Kako opisujemo točnost ur?

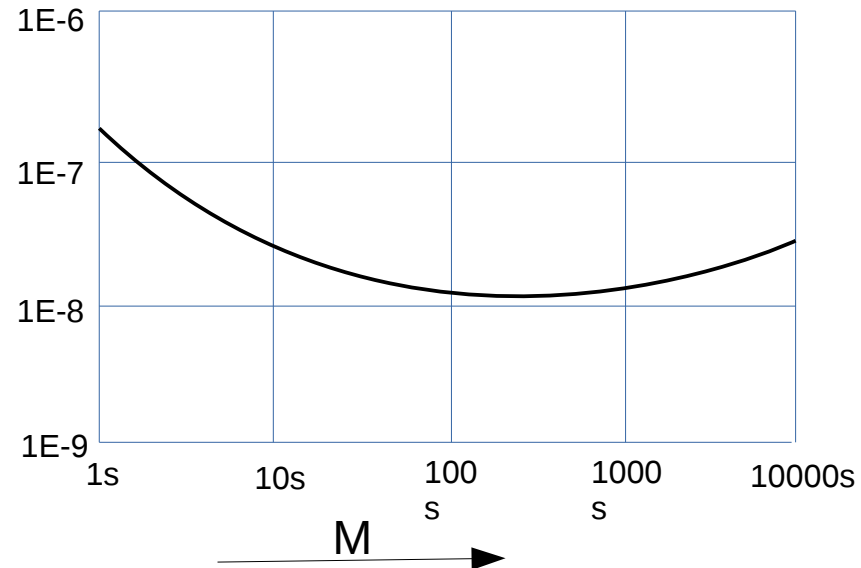
Za natančnejši opis ure moramo torej podati odstopanja za več različnih merilnih intervalov, najbolje za vsak interval povprečje večih meritev.

## Allanova deviacija (s prekrivanjem)



$$AD_p(M) = \sqrt{\frac{1}{(N-M)M\Delta t} \sum_{n=0}^{N-M} (y_{n+M} - y_n)^2}$$

Brez korena:  
Allanova varianca



# Ure skozi čas

oscilatorji

- 5000 sončne ure (Mezopotamija)
- 1600 vodne ure (Egipt)
- 500 klepsidra (Grčija)
- 500 sveče (Kitajska)
- 1200 peščene ure (Evropa)
- 1300 prve mehanske ure, inercijski regulator (Evropa)
- 1656 nihalo (Galileo, Huygens) enačba casa
- 1658 vzmetna nemirka (Thomas Hook)
- 1884 GMT, sekunda= $1/86400$  sončnega dneva
- 1927 kremenčeva ura (Horton, Marrison, ZDA)
- 1955 cezijeva ura (Essen, Parry VB)
- 1960 vodikov maser
- 1960 sekunda= $1/31556925.9474$  tropskega leta
- 1964 HP5060 cezijeva ura gre v serijsko proizvodnjo
- 1967 sekunda= $9192631770$  nihajev cezijeve ure
- 1999 cezijeva fontana NIST-F1
- 2010... ionske pasti, optične mreže, jedrske ure

# Frekvenca, faza, čas

Faza  $\varphi$  je samo drugačno merilo časa  $t$ , ki je odvisno od frekvence  $f$ :

$$\varphi = 2 \pi f t \bmod 2\pi \text{ radianov} \quad \text{ali} \quad \varphi = 360 f t \bmod 360 \text{ stopinj}$$

$$t = \varphi / (2\pi f) + N/f \quad \text{ali} \quad t = \varphi / (360f) + N/f$$

Frekvenca pove, kako hitro se faza spreminja (je časovni odvod faze):

$$f = \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{približek} \quad f \approx \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{\Delta t}$$

Fazo izračunamo kot časovni integral frekvence:

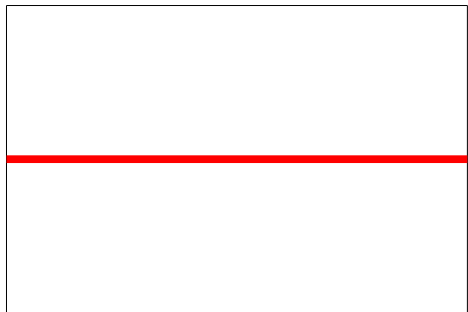
$$\varphi = \int f dt + \varphi_0$$

# Frekvenca in faza

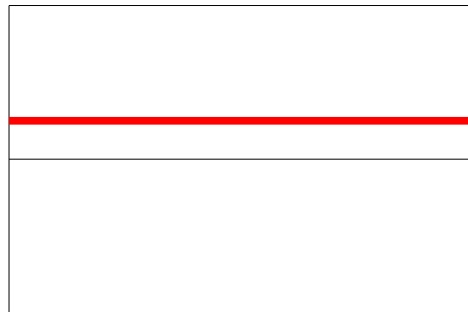
Ura ne prehiteva  
in ne zaostaja

Frekvenca  
(ali razlika  
frekvenc)

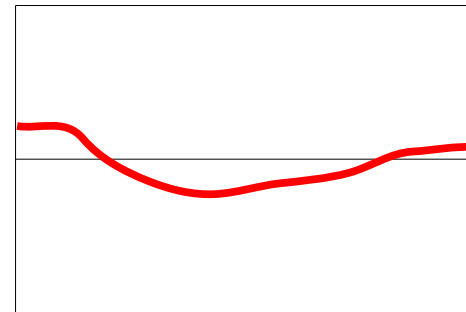
0



Ura stalno enako  
prehiteva



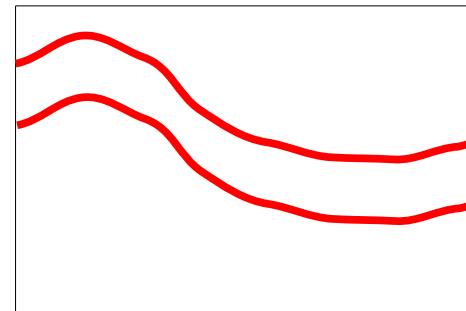
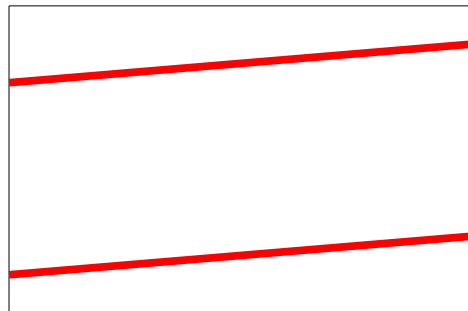
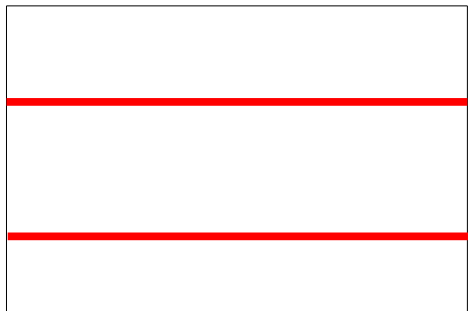
Ura naključno prehiteva  
in zaostaja



Faza

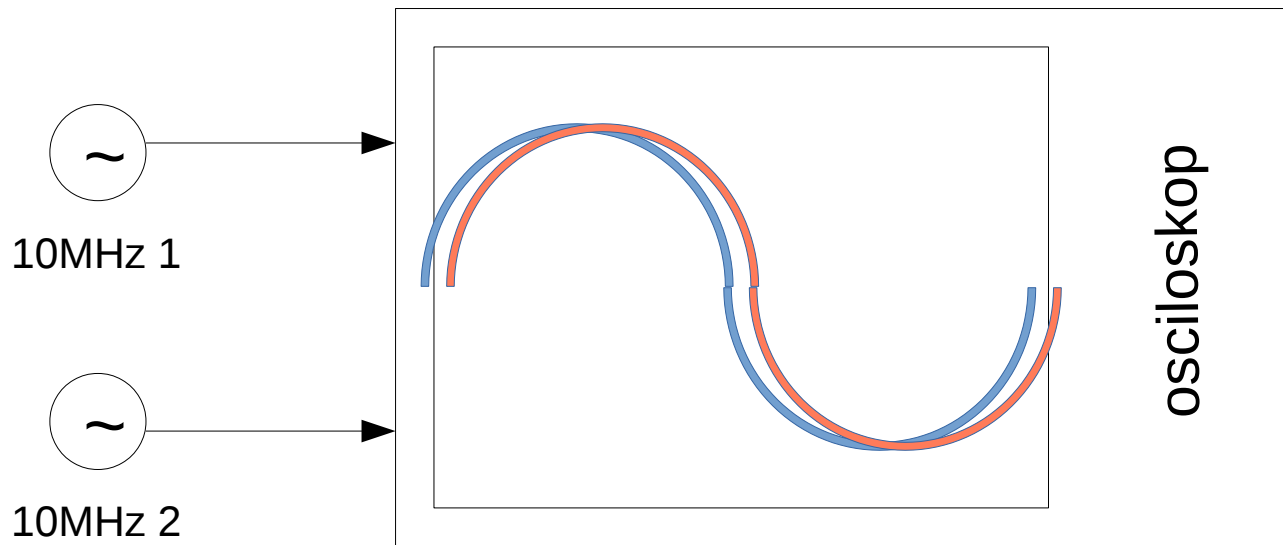
$\varphi_0$

$\varphi_0$



# Kako izmeriti zelo majhne razlike frekvenc?

## 1. "ročna" metoda

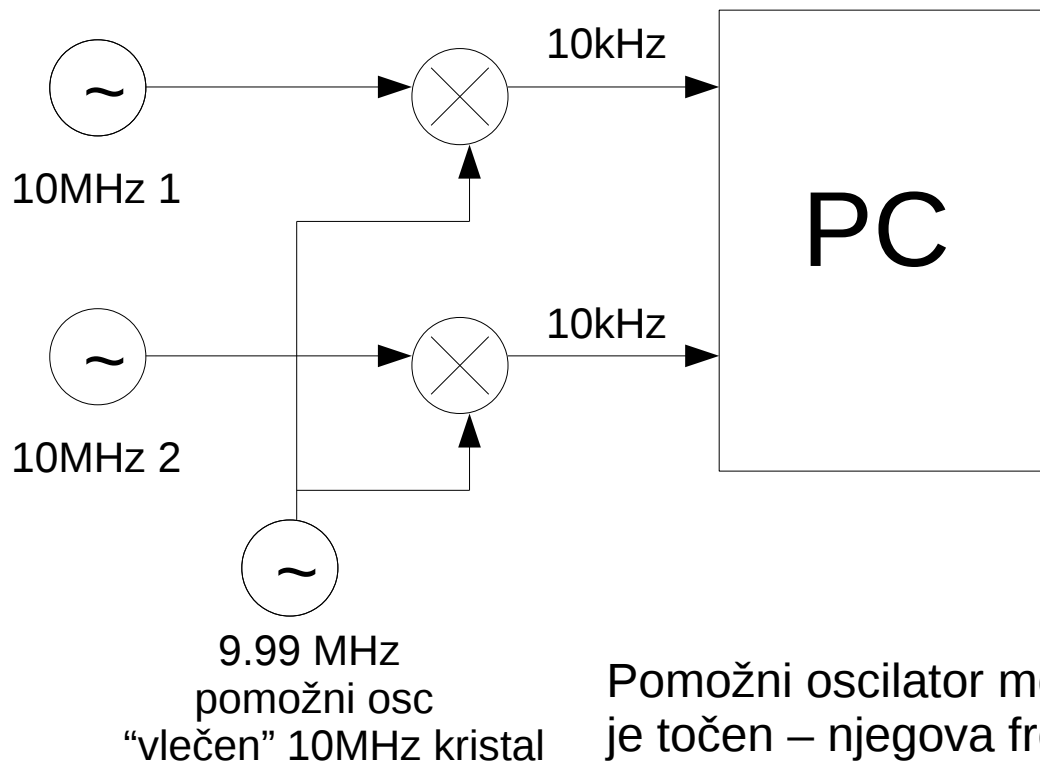


Prožim s prvega kanala, in opazujem, kako drugi vodoravno "drsi".  
 $\Delta F = 1/\Delta t$ , kjer je  $\Delta t$  čas med dvema "prekrivanjema" krivulj.



# Kako izmeriti zelo majhne razlike frekvenc?

## 2. Z računalnikom in zvočno kartico (meritev faze)



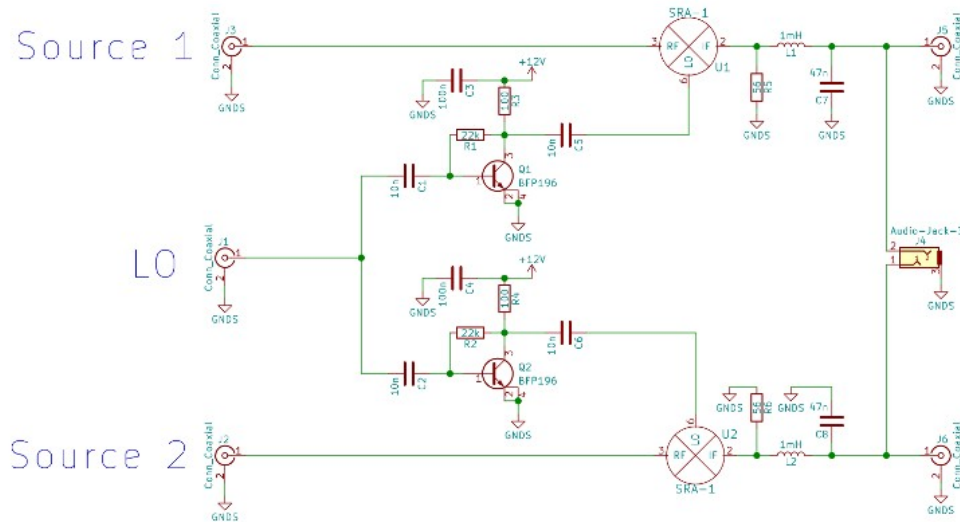
Mešanje ohrani razliko faz, zato deluje kot 1000X "časovna lupa"

10MHz:  $45^\circ = 12,5\text{ns}$ ,

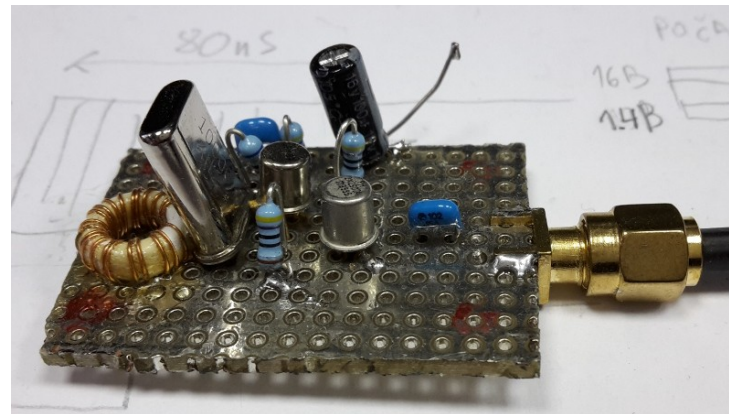
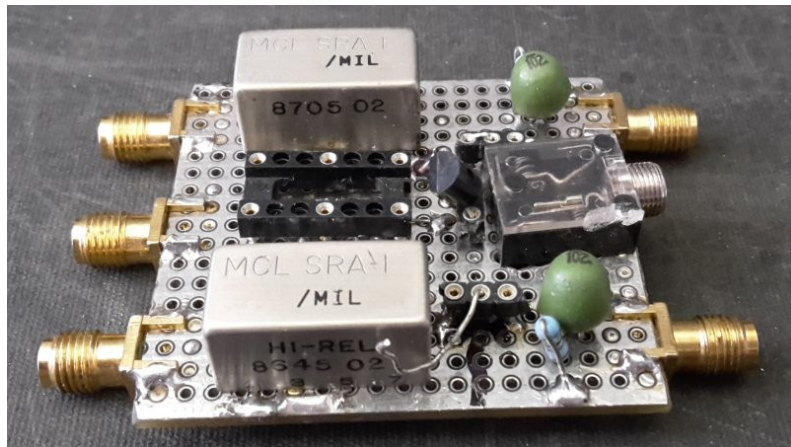
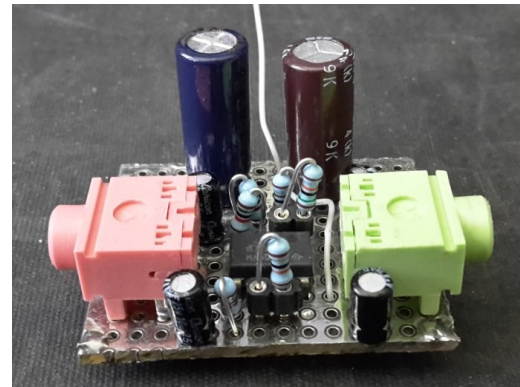
10kHz:  $45^\circ = 12,5\mu\text{s}$

Pomožni oscilator mora biti stabilen, ni pa treba, da je točen – njegova frekvenca se odšteje

# Mešanje, oscilator 9.99MHz, NF predojačevalec



To preamplifier (sound card)



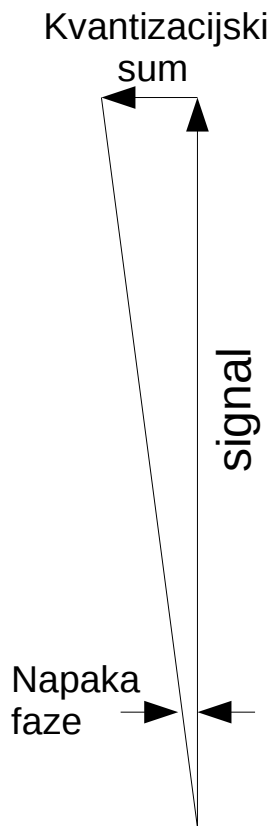
# Merjenje faze z zvočno kartico

Kako natančno lahko izmerim fazo s kartico 16bit, 48kHz?

16 bitov: kvantizacijski šum / max signal  $\approx 1/65536$

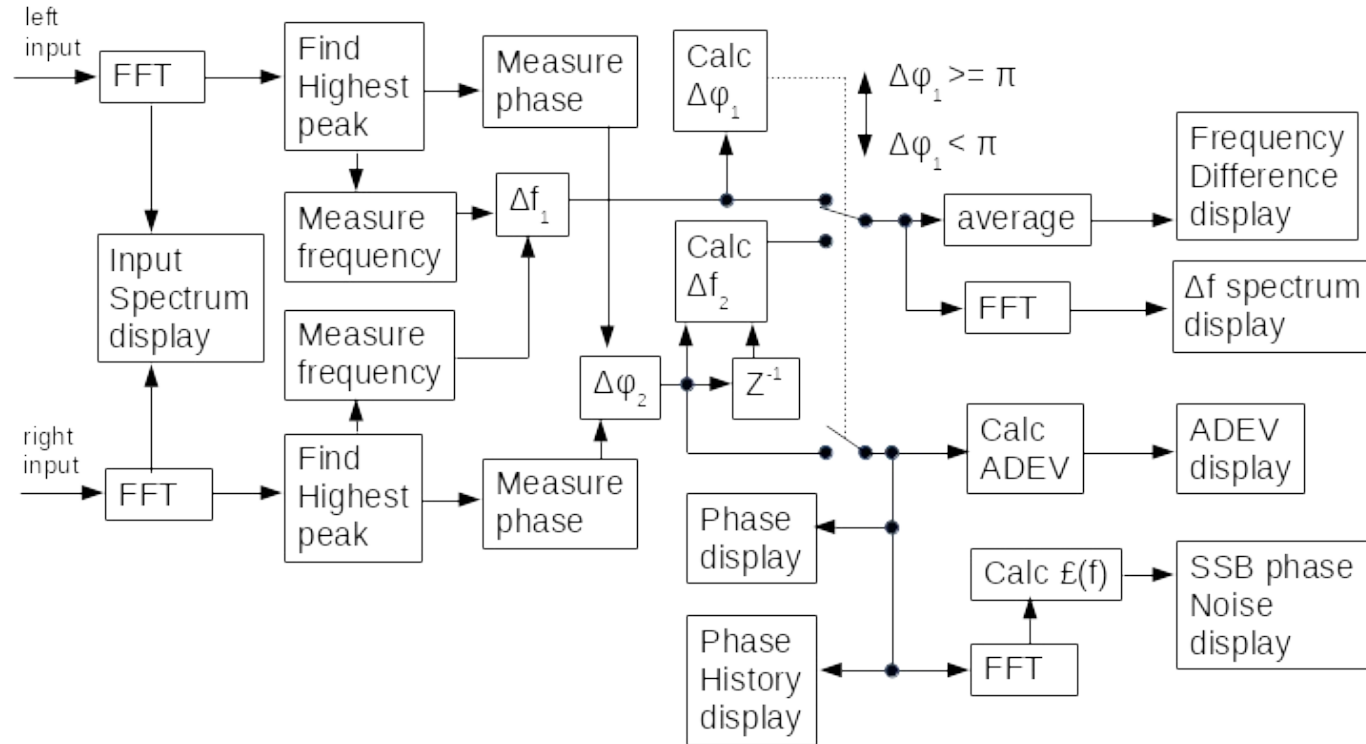
Napaka faze =  $\text{atan}(0.00001526) = 0.00001526$  radiana =  $0.00072$  stopinje pri posamezni meritvi, s povprečenjem jo lahko še zmanjšam. FFT povpreči in omogoča preprosto meritev faze.

Program FRCOMP na vsakem kanalu posebej naredi FFT, poišče maksimum in z metodo težišča določi frekvenco. Če sta frekvenci dovolj blizu, da je fazni korak med zaporednimi FFT manjši od  $90^\circ$  (pol Nyquista), preklopi na meritev razlike frekvenc iz časovnega odvoda medsebojne faze. Napaka ure vzorčenja zvočne kartice se pri tem odšteje.

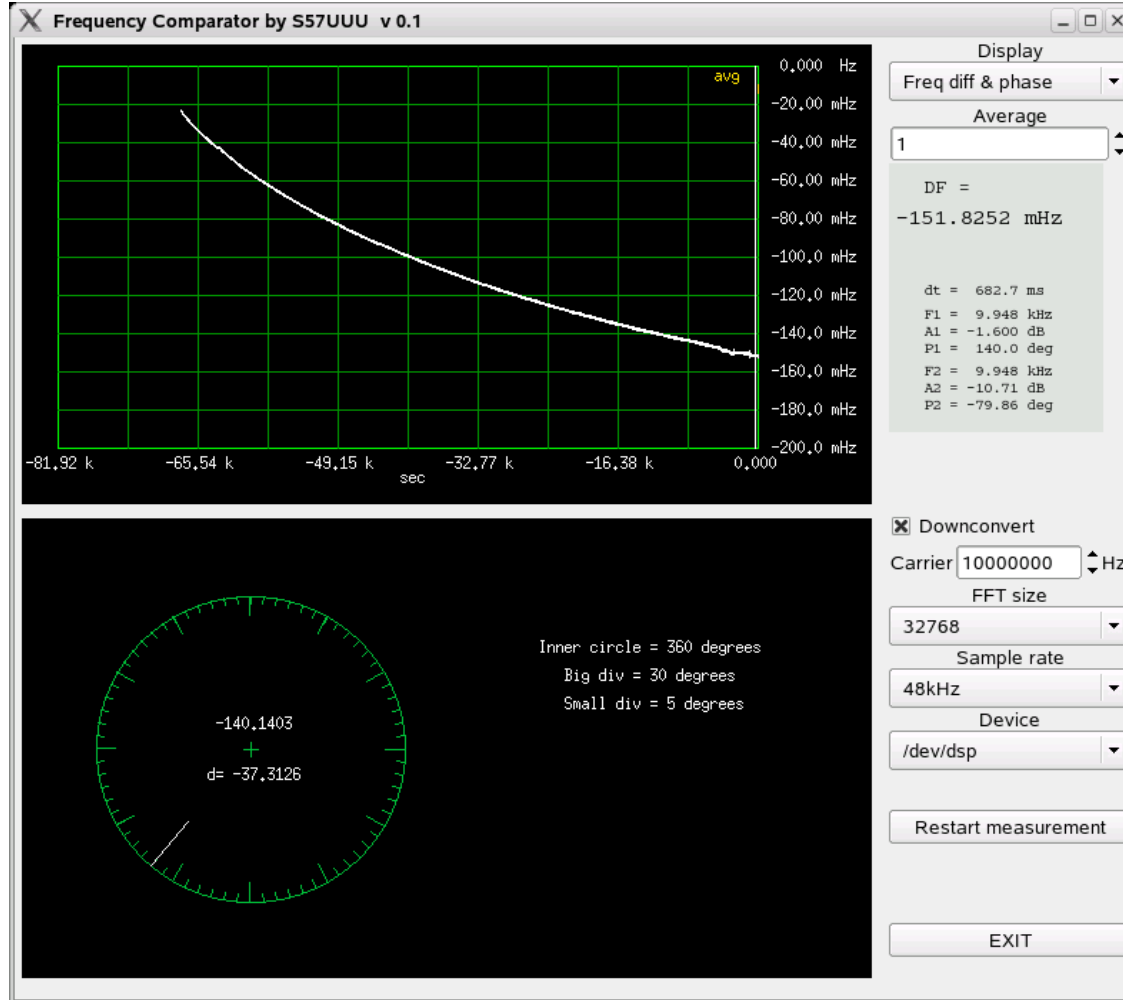


# FRCOMP, program za primerjavo frekvenc

Frcomp block diagram

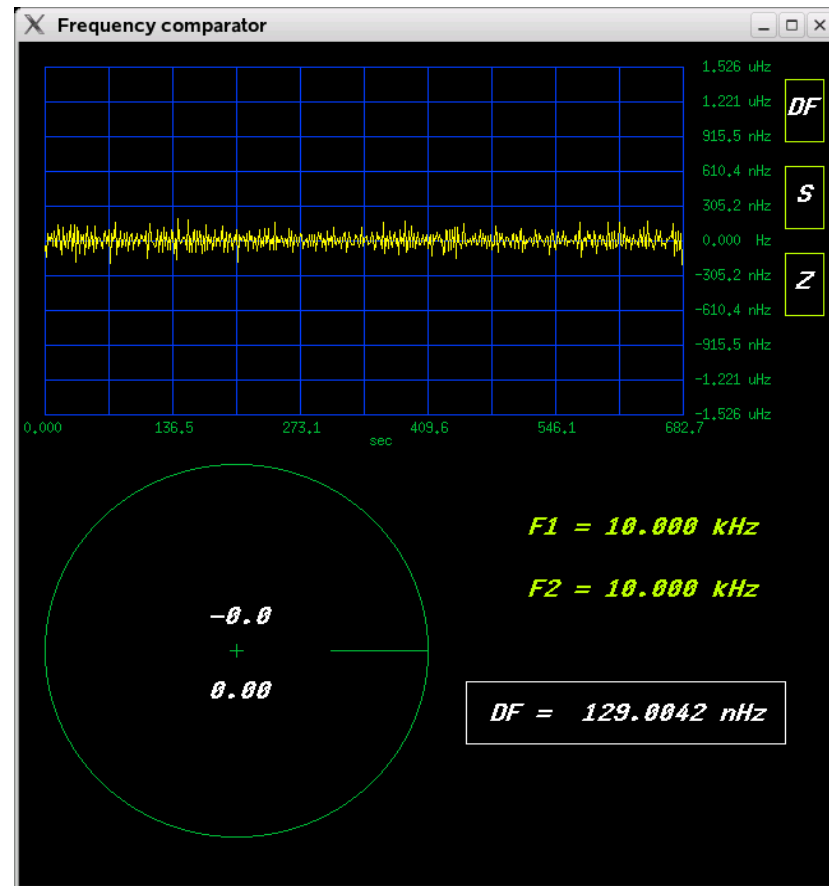
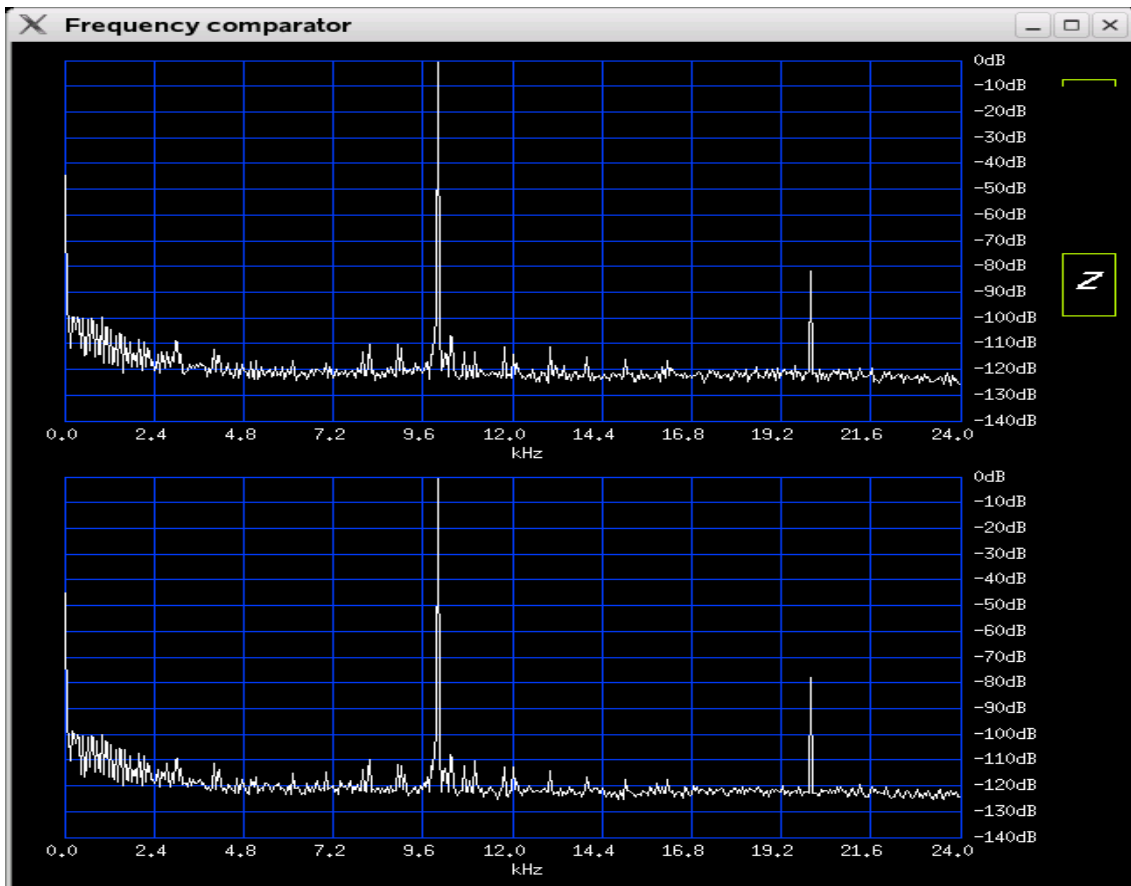


# FRCOMP, program za primerjavo frekvenc



# Merilni šum programa FRCOMP

FFT 65536, Xlib verzija



# Kje sta javno na voljo točen čas in frekvenca?

Nekoč je bilo:

Nekatere TV postaje (RAI, ZDF...) so imele timing analognega videa vezan na nacionalne standarde. Tudi navigacijski sistemi na dolgih valovih (LORAN, Omega), so bili vezani na atomske ure.

Zaenkrat je še:

DCF77 77.5kHz

TDF 162 kHz (močnejši od DCF, drugačno kodiranje)

BBC 198 kHz

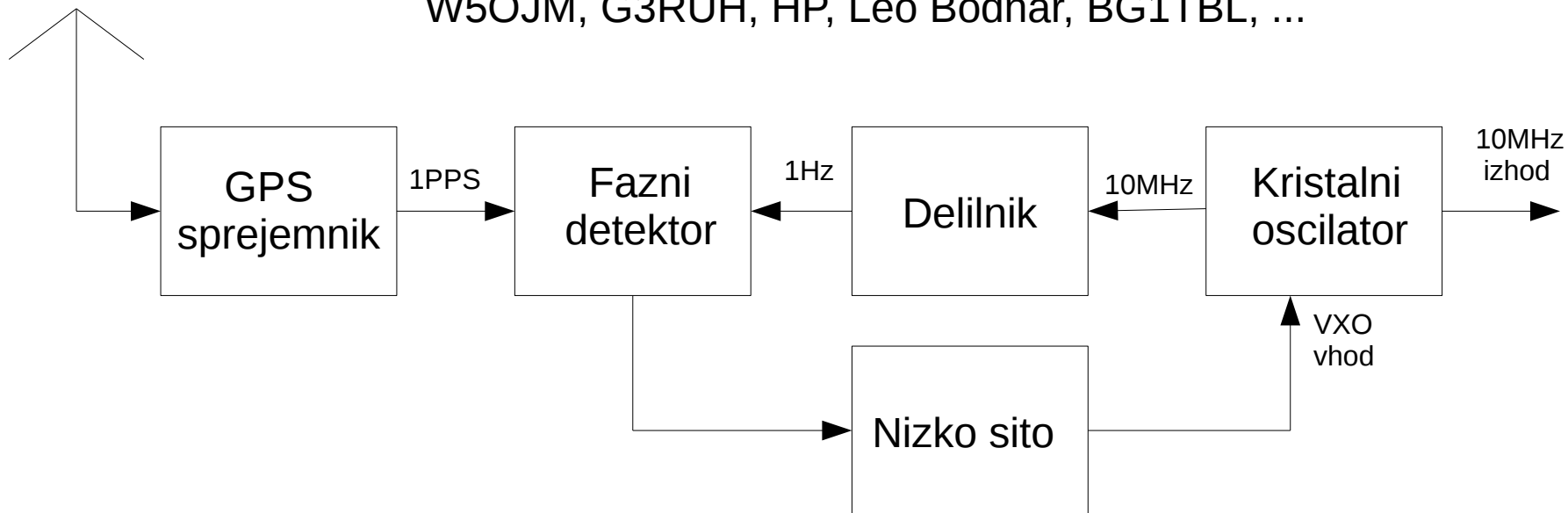
WWV 2500kHz 5000kHz 10000kHz 15000kHz 20000kHz 25000kHz

RWM 4995kHz, 9995kHz, 14995kHz

Satelitska navigacija (GPS, GLONAS, Galileo, Beidou...) L-band

# Klasicna GPS frekvenčna normala

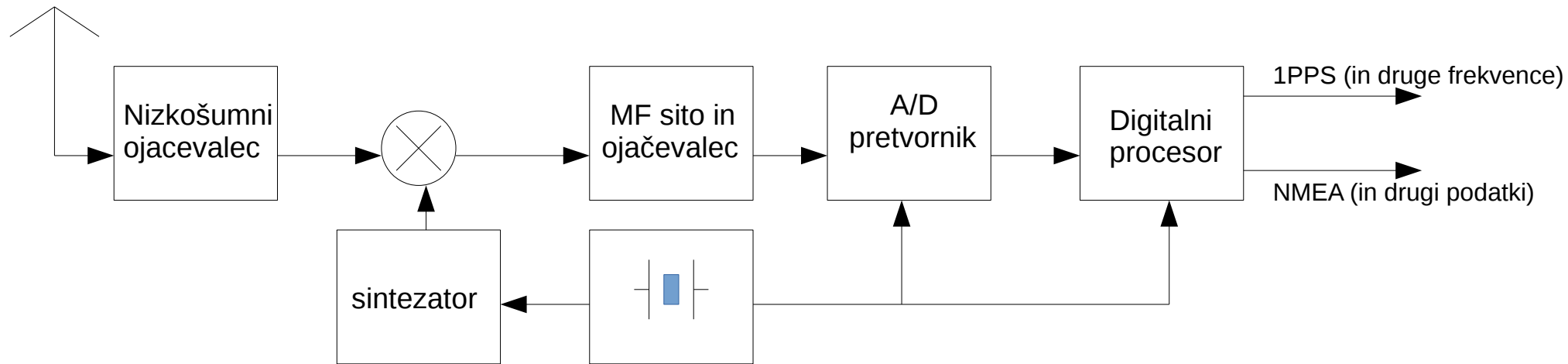
W5OJM, G3RUH, HP, Leo Bodnar, BG1TBL, ...



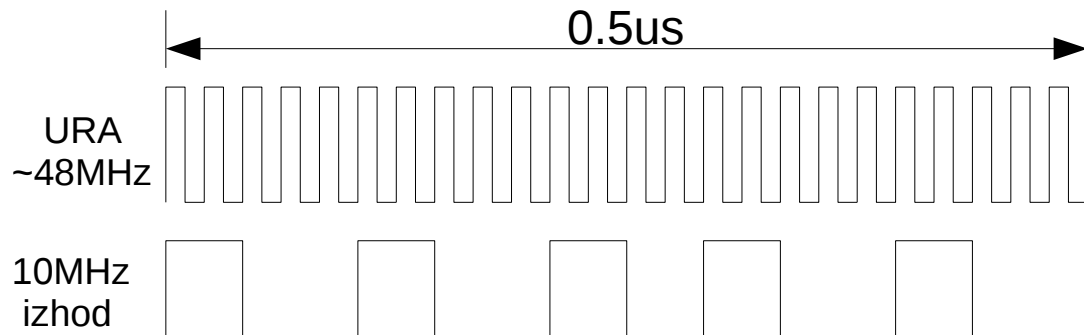
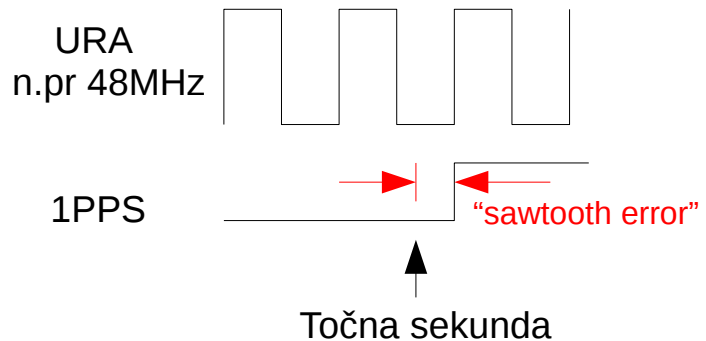
“GPSDO” = GPS Disciplined Oscillator



# Tipičen GPS sprejemnik (modul)

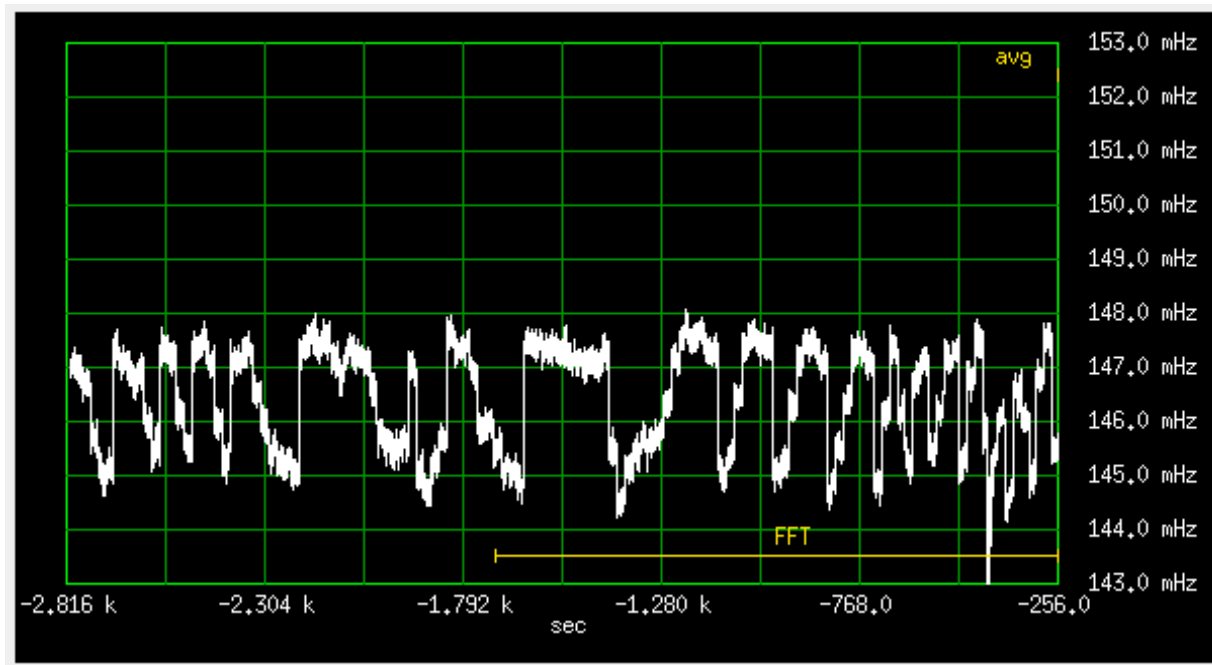


Kvantizacijska napaka:



"Čiste" so samo frekvence, ki so delitelji 48, n.pr. 24MHz, 16MHz, 12MHz, 8MHz, itd

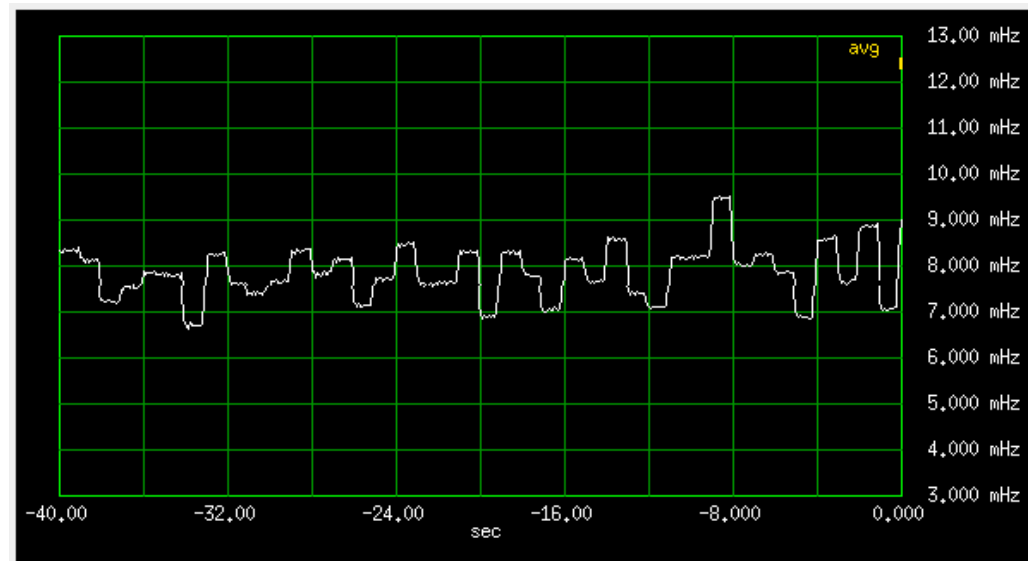
# Oscilloquartz OSA 4350



Horizontalno merilo ~4minute/delec

Tipičen primer kvantizacijske napake na 1PPS signalu, z dobro lokalno referenco (OCXO)

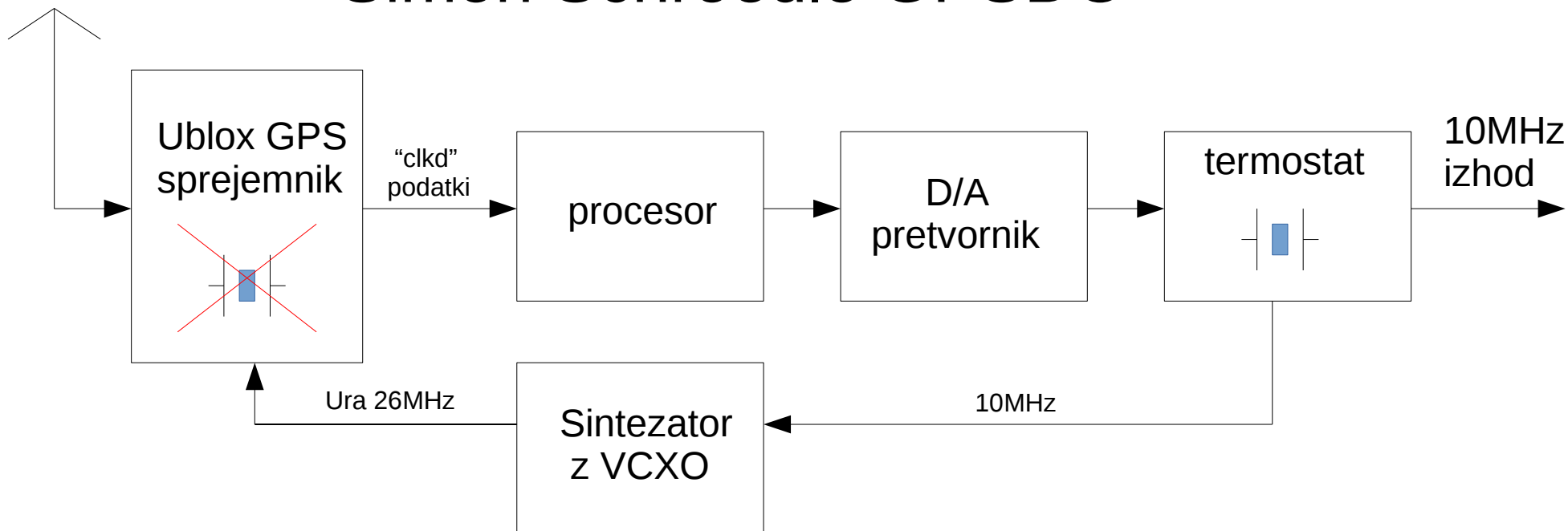
# Trimble 57963-C “UCCM”



Horizontalno merilo 4 sekunde/delec

Hitra zanka “pokvari” dober kristalni oscilator (skok vsako sekundo)

# Simon Schroedle GPSDO



Ublox GPS sprejemnik daje (v svojem UBX formatu) podatek o odstopanju lastne ure, z natančnostjo  $1E-9$ , enkrat na sekundo, ki ga lahko uporabimo kot signal napake za FLL zanko. Odstraniti je treba vgrajeni oscilator v Ublox modulu, in od zunaj pripeljati signal ure, ki ga "vozimo" glede na "clockd" podatek, ki ga pošilja Ublox.

# Simon Schroedle GPSDO

Prednosti:

- ne rabimo zunanje elektronike za meritev (delilnik, fazni detektor)
- izognemo se napaki kvantizacije

Slabosti:

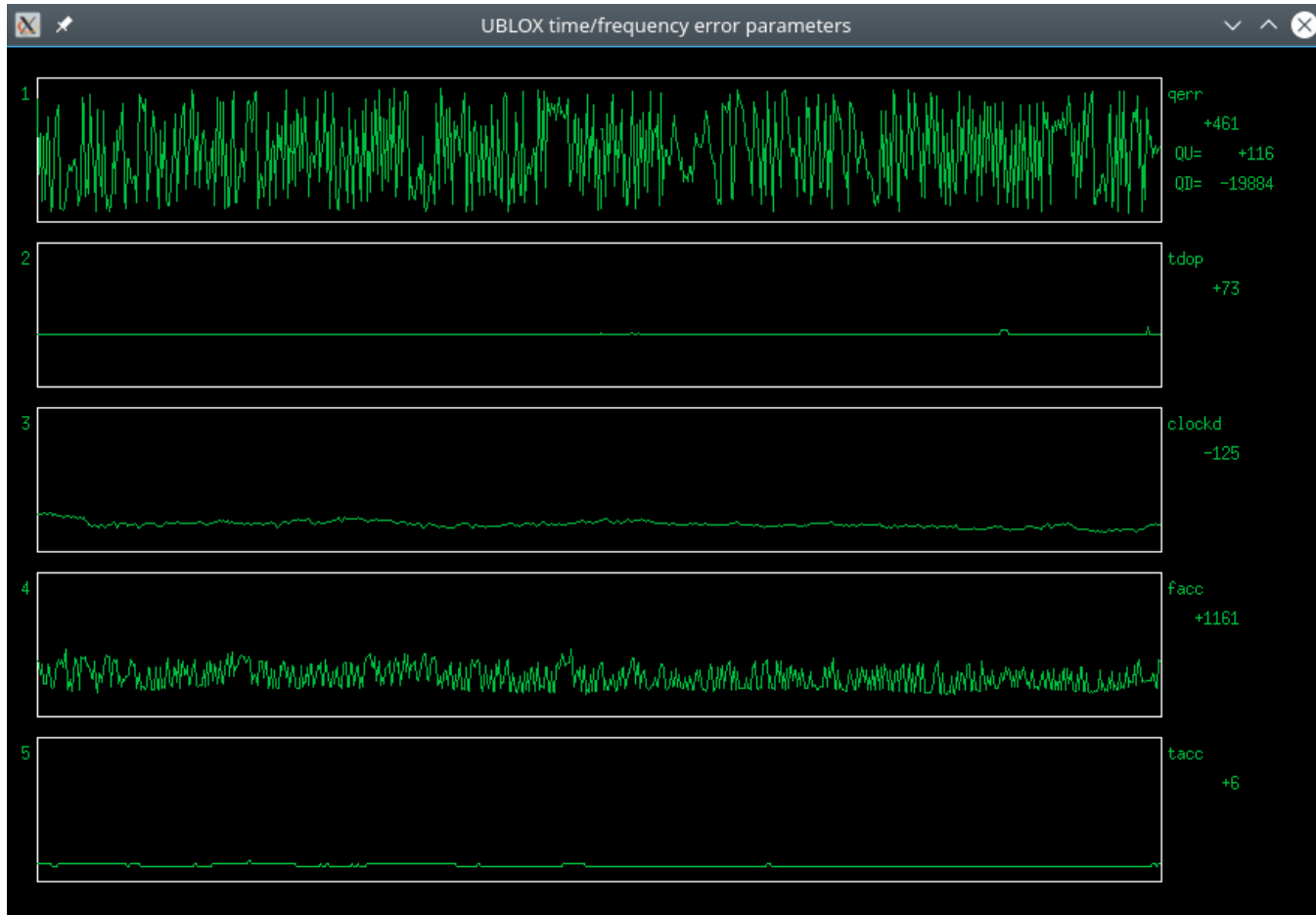
- ločljivost clockd podatka je samo  $1E-9$  v frekvenci
- FLL (faza lahko "odleze")

**Kaj bi se dalo izboljšati?**

Ublox posilja več različnih podatkov. Kvantizacijska napaka ("sawtooth error") bi lahko bila zanimiva, ima numerično ločljivost  $1E-12$ , ampak je ciklična.

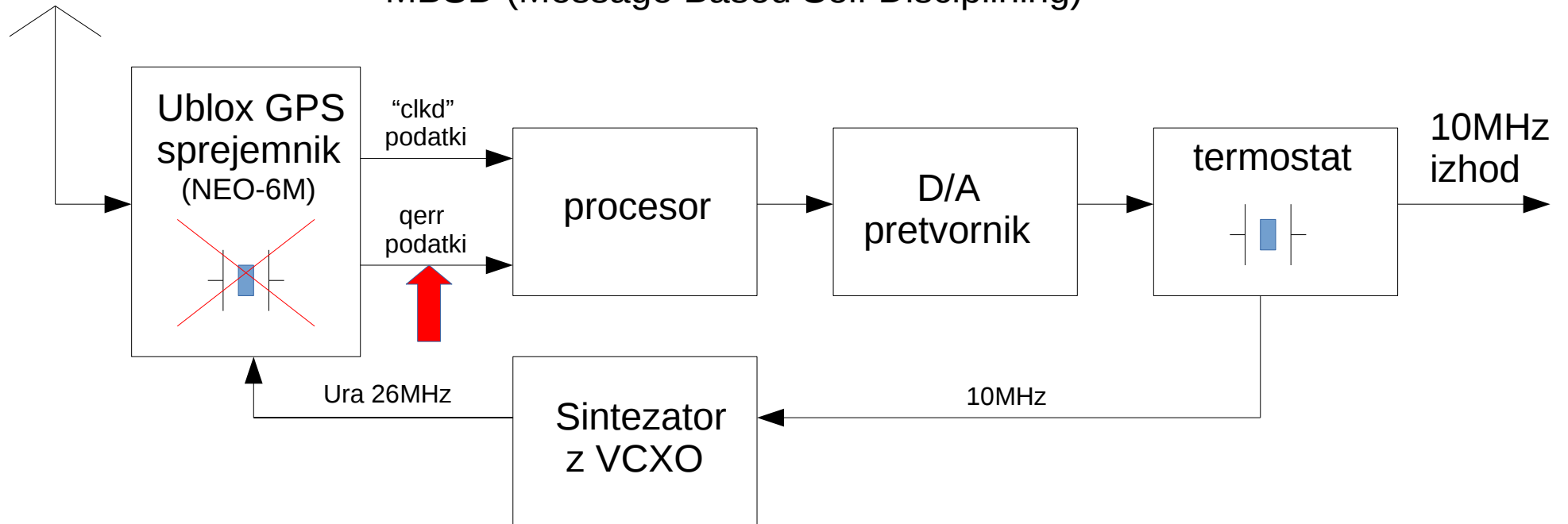
# Nekateri podatki na izhodu Ublox modula

Horizontalno merilo ena sekunda na pixel, skupaj cca 12 min



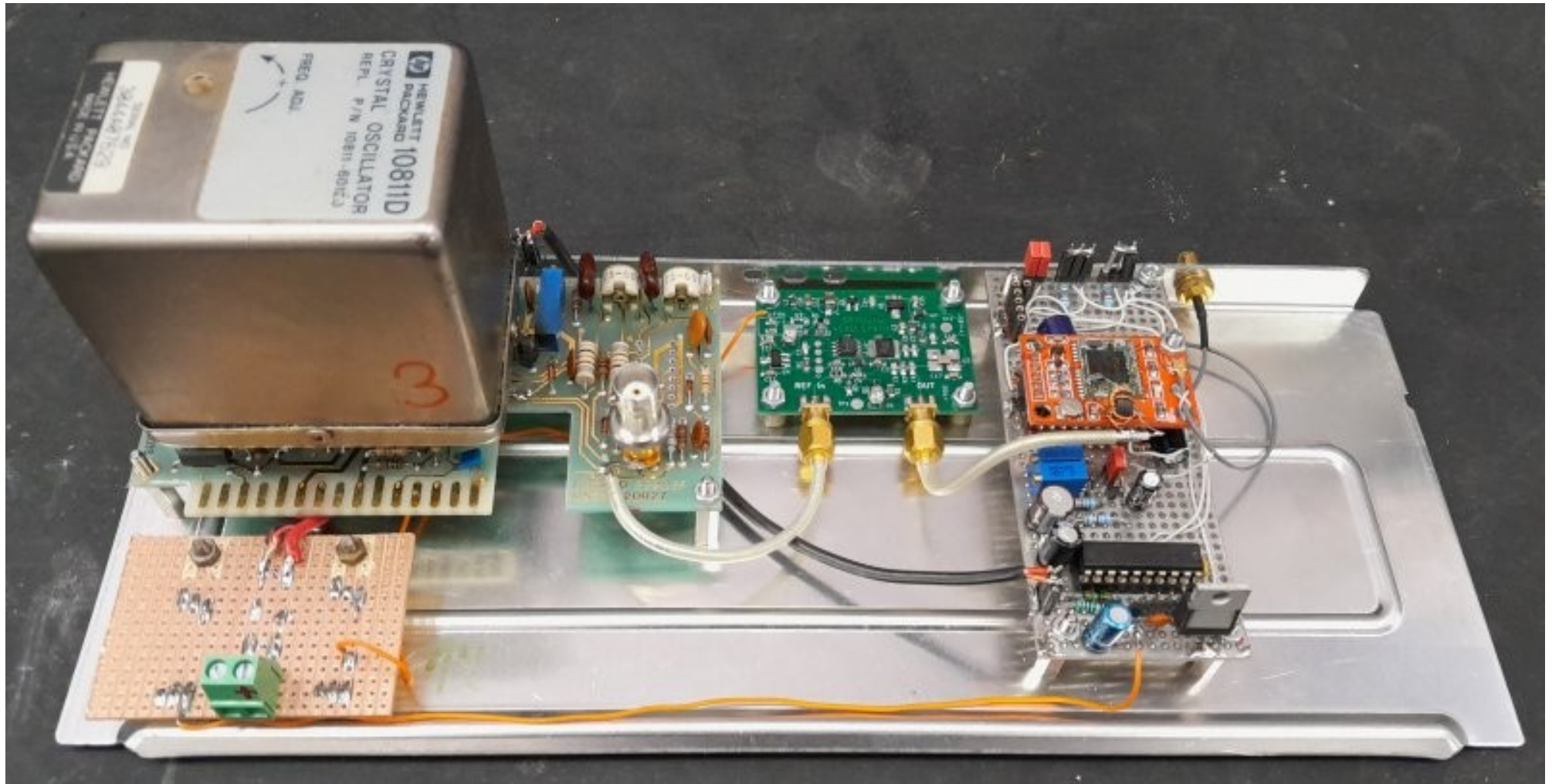
# Dvojna zanka na osnovi clockd in qerr podatkov

MBSD (Message Based Self Disciplining)



Ob vklopu (ali izgubi sinhronizacije) na osnovi clockd pripeljemo oscilator znotraj  $1E-9$ , da je qerr v pravi "coni", nato preklopimo na zanko, ki minimizira qerr.

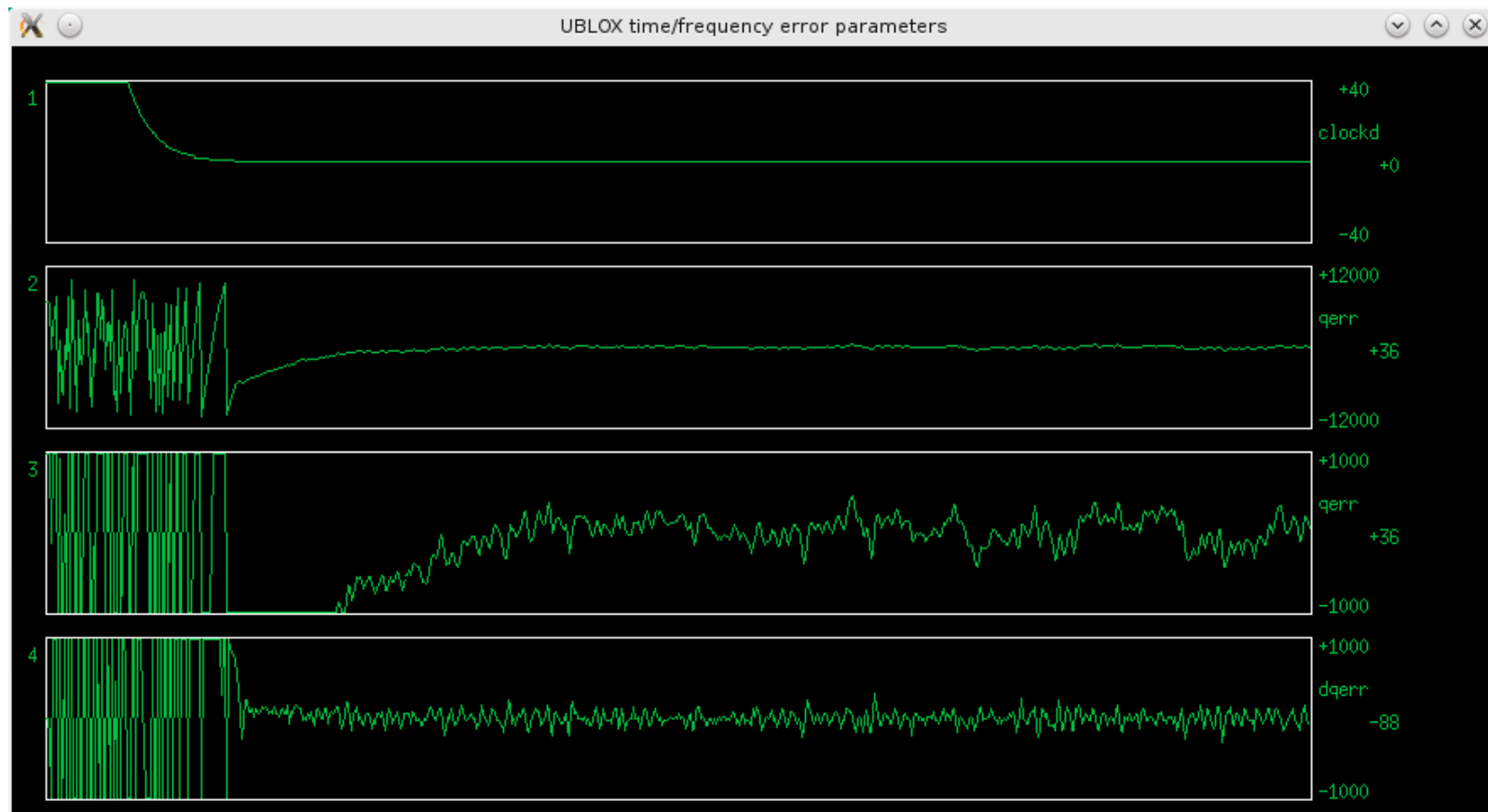
# MBSD, prva verzija





# MBSD, po resetu

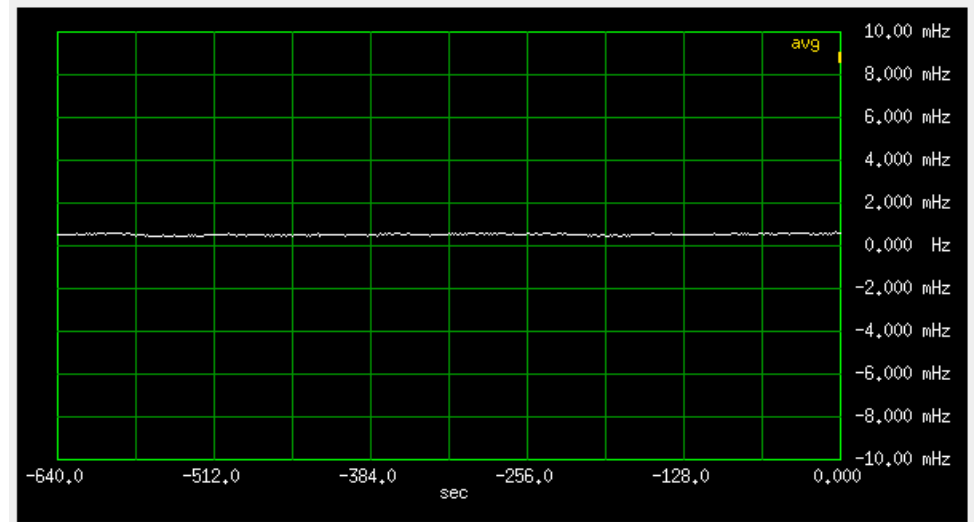
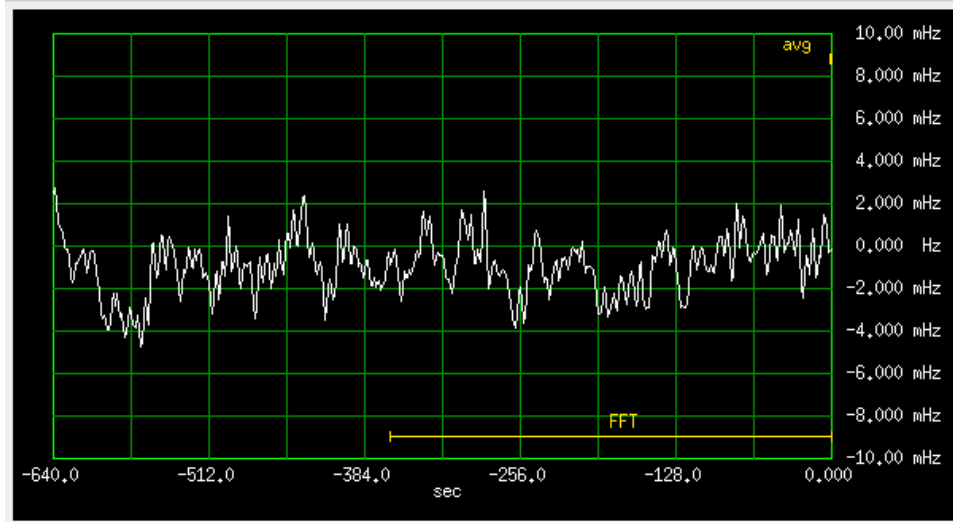
Horizontalno merilo ena sekunda na pixel, skupaj cca 12 min



Hitra zanka, ušlašana na minimalno časovno napako (qerr). Max časovna napaka > 500ps

# MBSD, hitra zanka, frekvenca

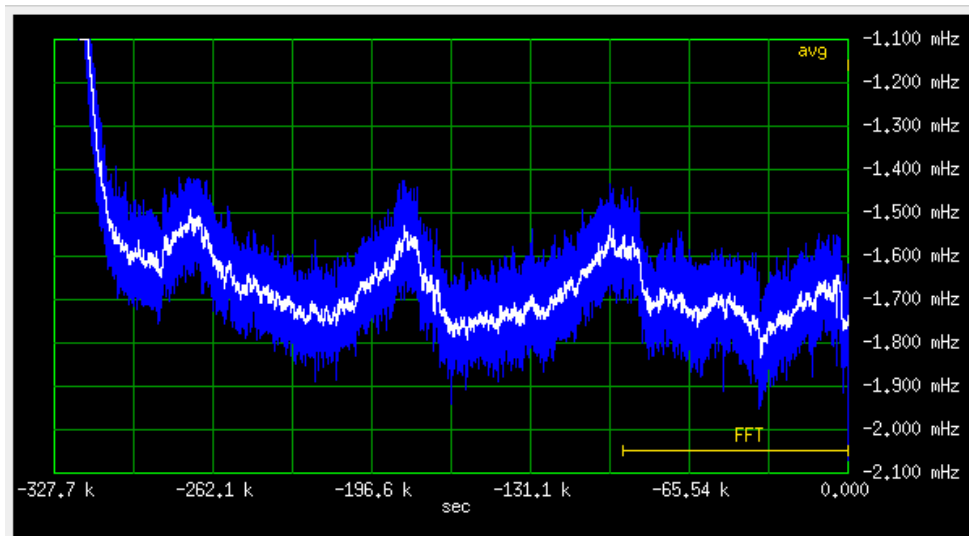
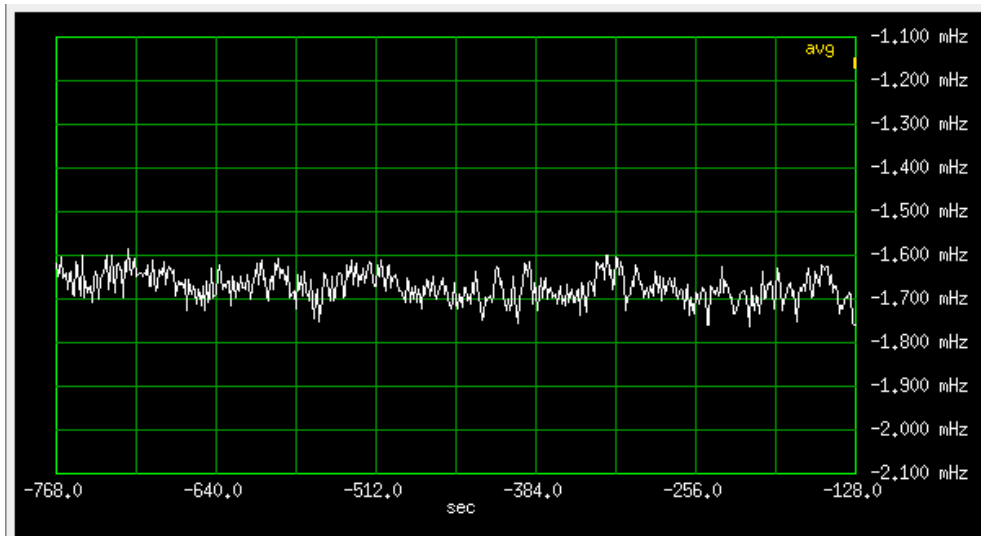
Vertikalno merilo 2mHz/delec



Levo hitra zanka, desno prosto nihajoč OCXO, proti isti rubidijevi normali

# MBSD, počasna zanka, frekvenca

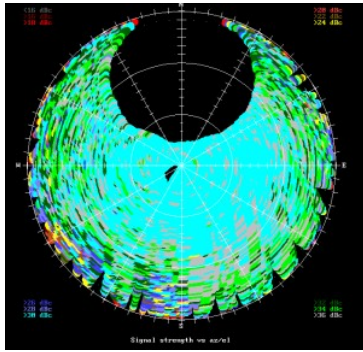
Vertikalno merilo 100uHz/delec



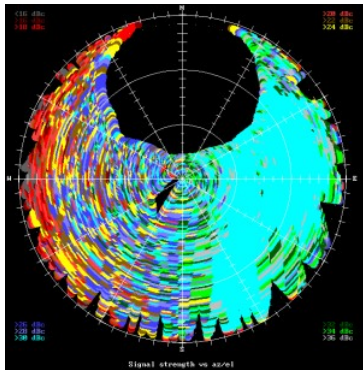
Levo dvanajst minut, desno štirje dnevi

# Vpliv položaja antene (vidnosti neba)

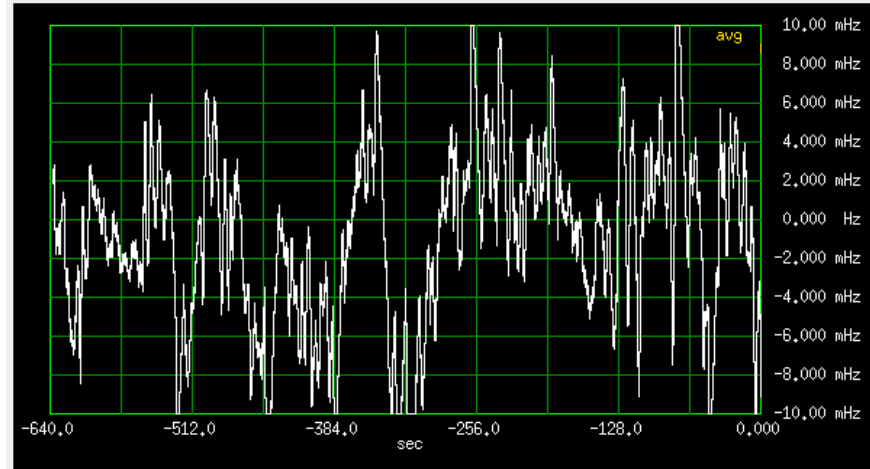
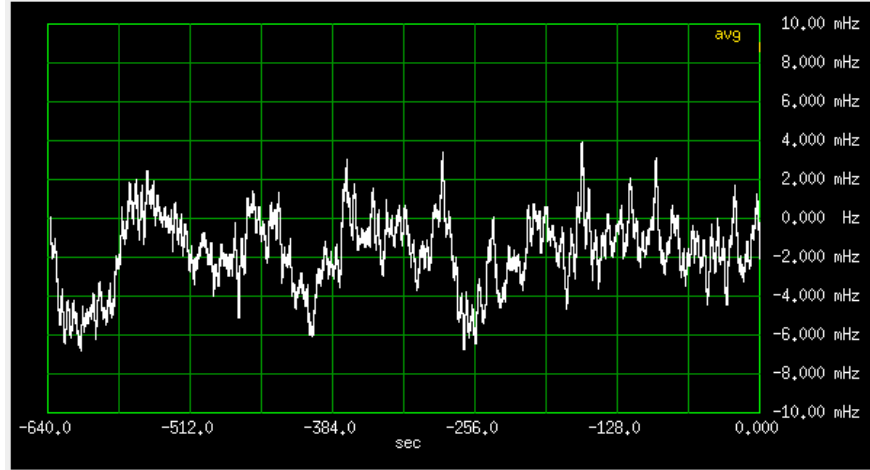
Narisano s programom "Lady Heather"



Dober – vidi vse nebo



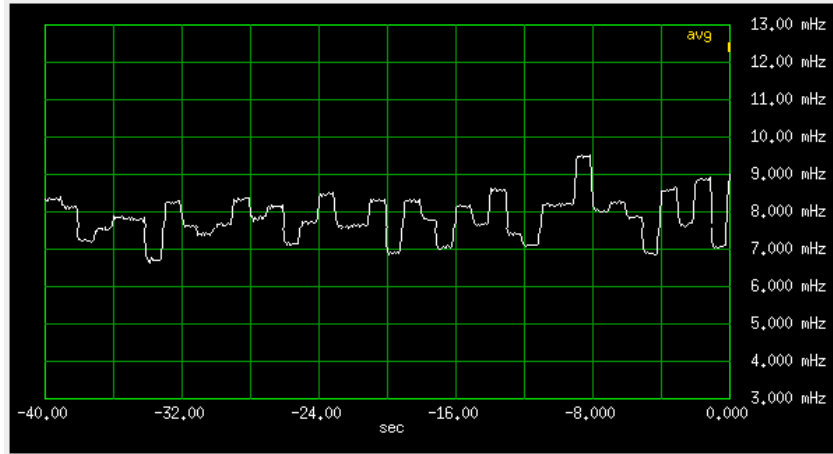
Slab – vidi samo pol neba



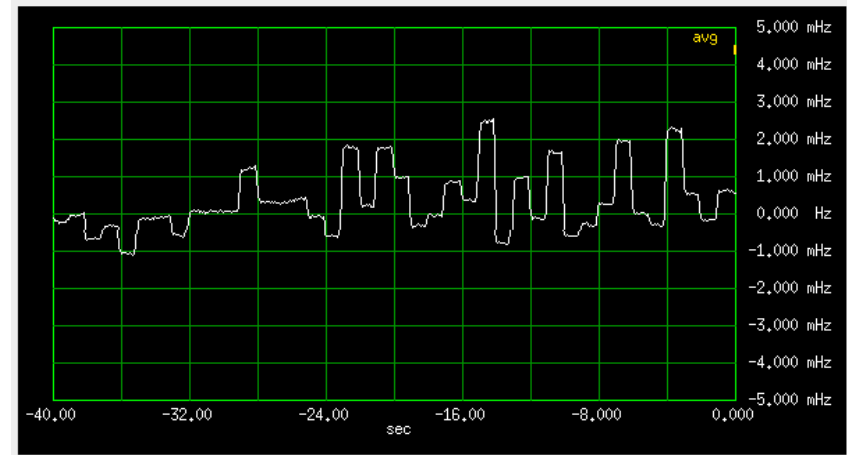
Hitra MBSD zanka, primerjava z rubidijem. Sprejemnik Ublox NEO-6M

# Dva enaka GPSDOja\*, napajana iz skupne antene

Posamezno:



Razlika med dvema:



Pri posameznem napaka naraste šele pri 16 dB atenuatorja v anteni, več kot 90% šuma je torej skupnega za oba sprejemnika, od kod taka razlika?

- Oscilatorja v sprejemnikih sta neodvisna, prosto nihajoča, trenutki vzorčenja niso isti
- Male razlike lahko poveča zaokrožanje pri celoštevilski aritmetiki pri procesiranju signala

# Ocena časovnih napak iz napak položaja

Absolutne ure nimam, vem pa, da se moja antena ne premika (razen drsenja tektonskih plošč :-)

GPS sprejemnik položaj racuna iz časovnih meritev

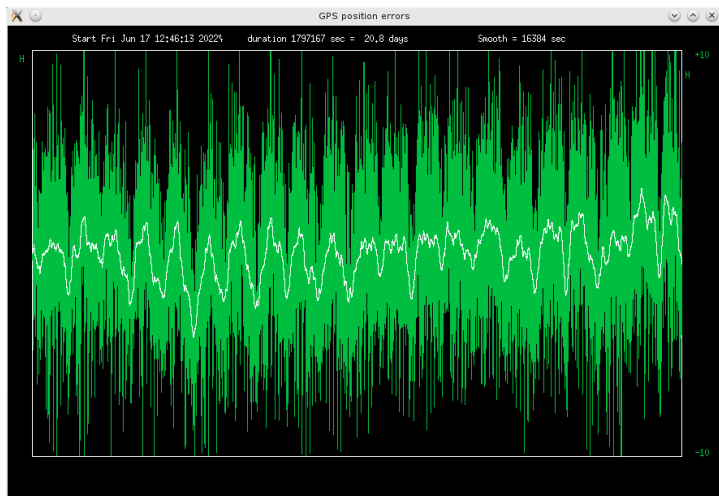
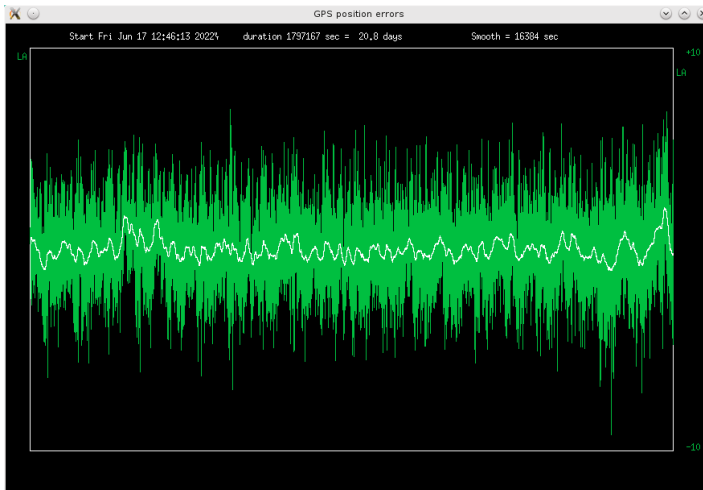
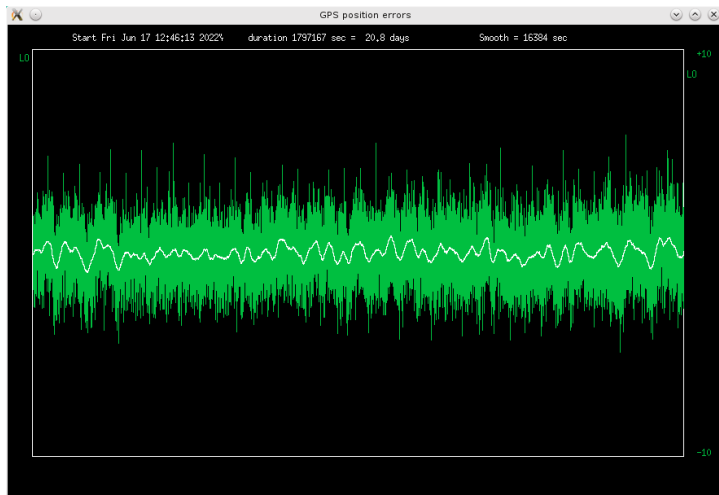
Napaka frekvence je sorazmerna časovnemu odvodu položaja (hitrosti navideznega premikanja)

Napako položaja lahko uporabim kot indikator točnosti časa/frekvence, ne morem pa je uporabiti za korekcijo, ker so izhodni podatki izračunani iz meritev več satelitov

Sprejemnik bi to lahko naredil, ker ima podatke za vsak satelit posebej

Obstajajo posebni "časovni" (timing) sprejemniki, ki to morda delajo

# GPS prostorske napake



dolžina širina

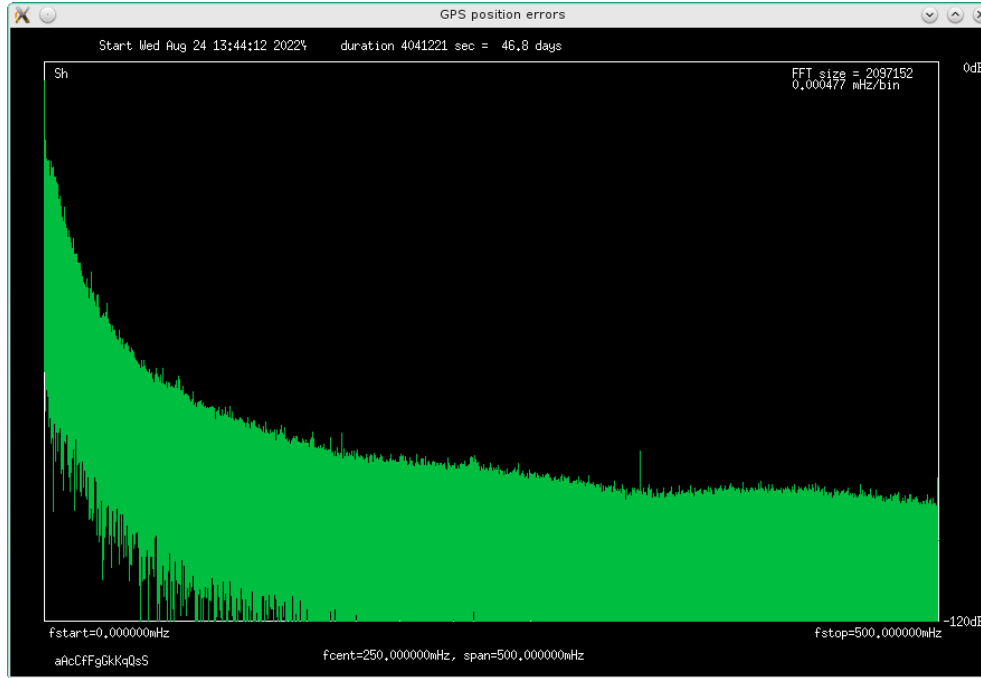
višina

Obseg +/-10m po  
vertikali, 20.8 dni  
po horizontali  
Povprečje (bela  
črta) 4.5h  
junij 2022

Vrhovi (noč) manj variirajo  
kot doline (dan)– povprečje  
samo ponoči?

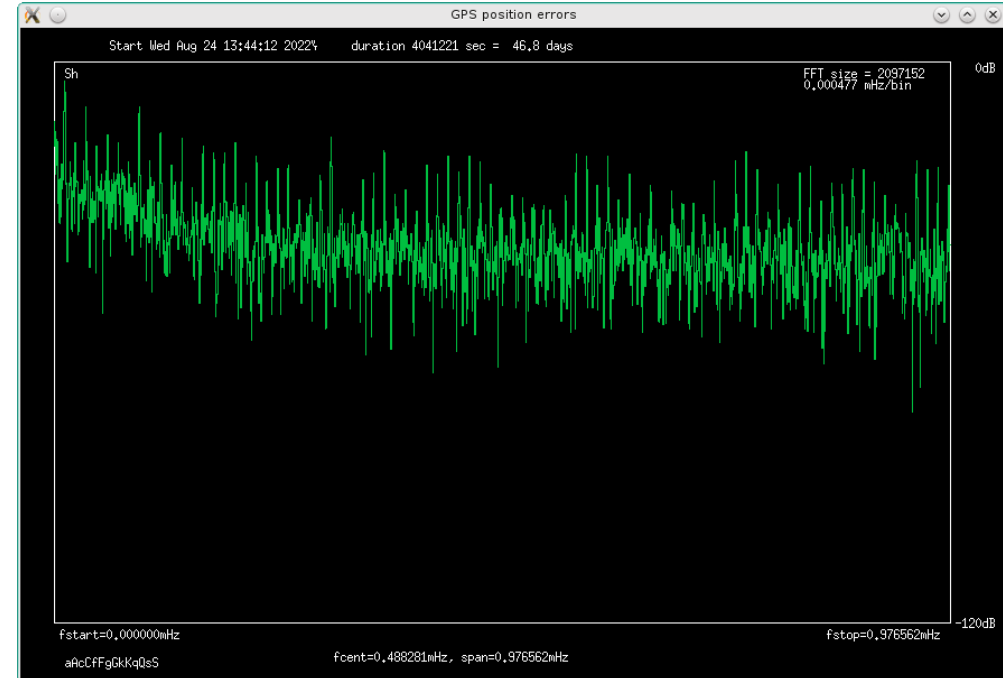
Podobna meritev v septembru,  
razlike povprečij:  
dolžina 3 cm  
širina 22cm  
višina 156cm

# GPS prostorske napake (spekter)



0 do 0.5Hz

Višina, Ublox NEO-6M



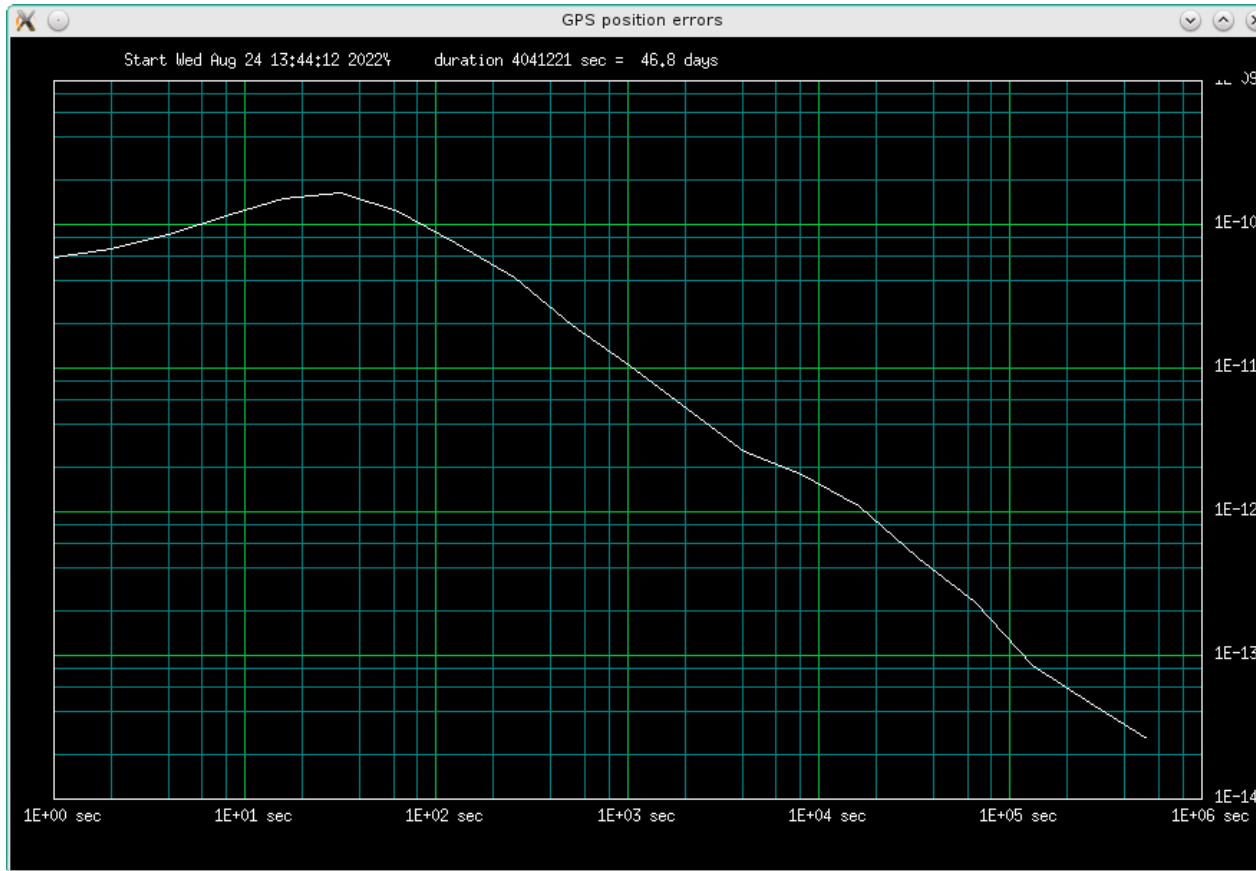
0 do 1mHz

Oblika je približno  $1/f$ , slabe novice za povprečenje...

24h komponenta in njeni harmoniki so izraziti



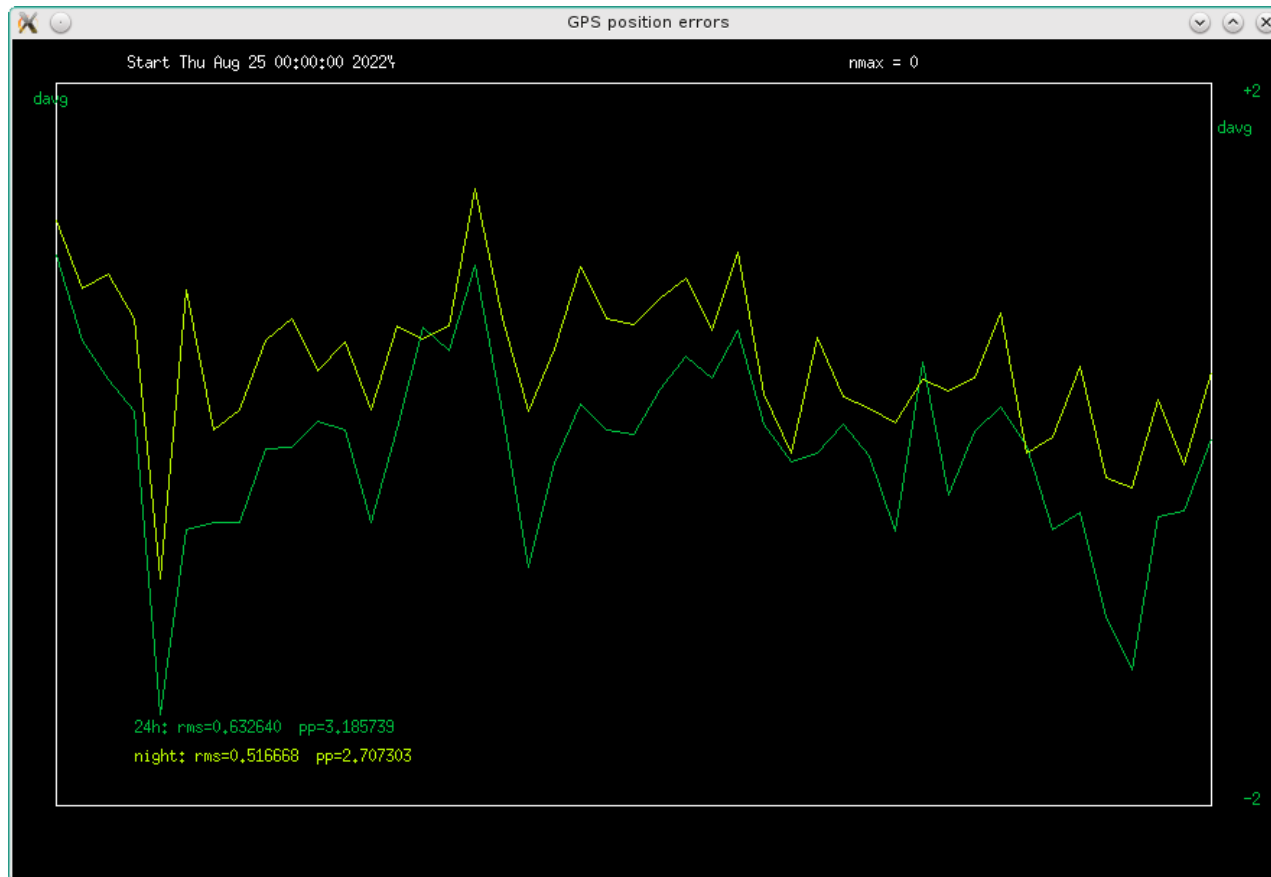
# GPS prostorske napake (kvazi Allan)



“Hrib” zaradi odbojev od tal?

Da bi dosegli  $1E-12$ , je minimalno potrebno povprečenje 20000 sekund ali pet ur in pol. Preveč za kristal, z rubidijem bo verjetno šlo.

# Povprečenje ponoči



12h/12h v septembru

Izboljšanje samo cca 20%

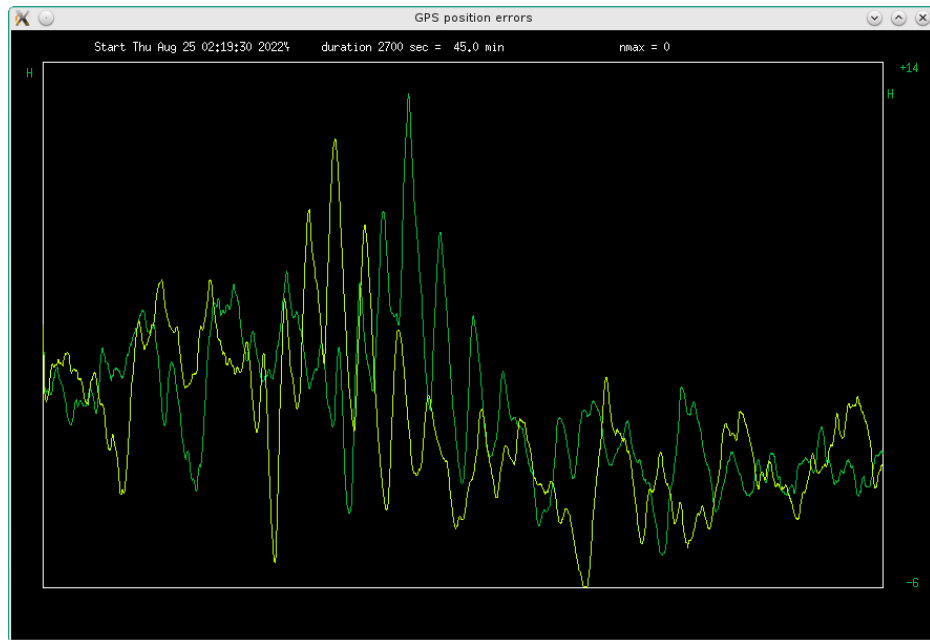
Možna izboljšava: manj kot 12h, ob optimalnem času

Vertikalni obseg +/- 2m

Horizontalni obseg 48 dni

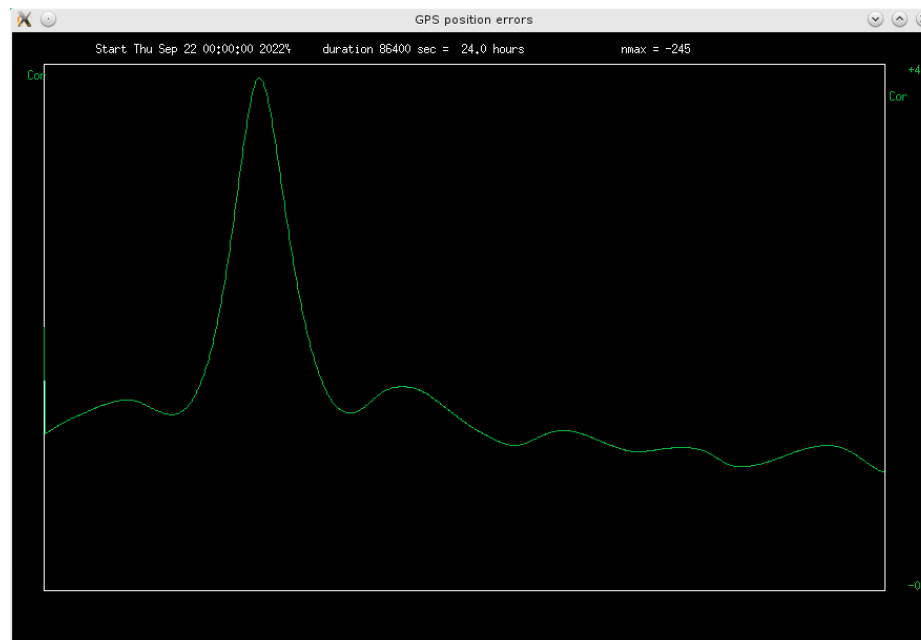
Višina, Ublox NEO-6M

# Odboji od tal - primerjava zaporednih dni



Obseg po vertikali 20m  
Obseg po horizontali 45 minut

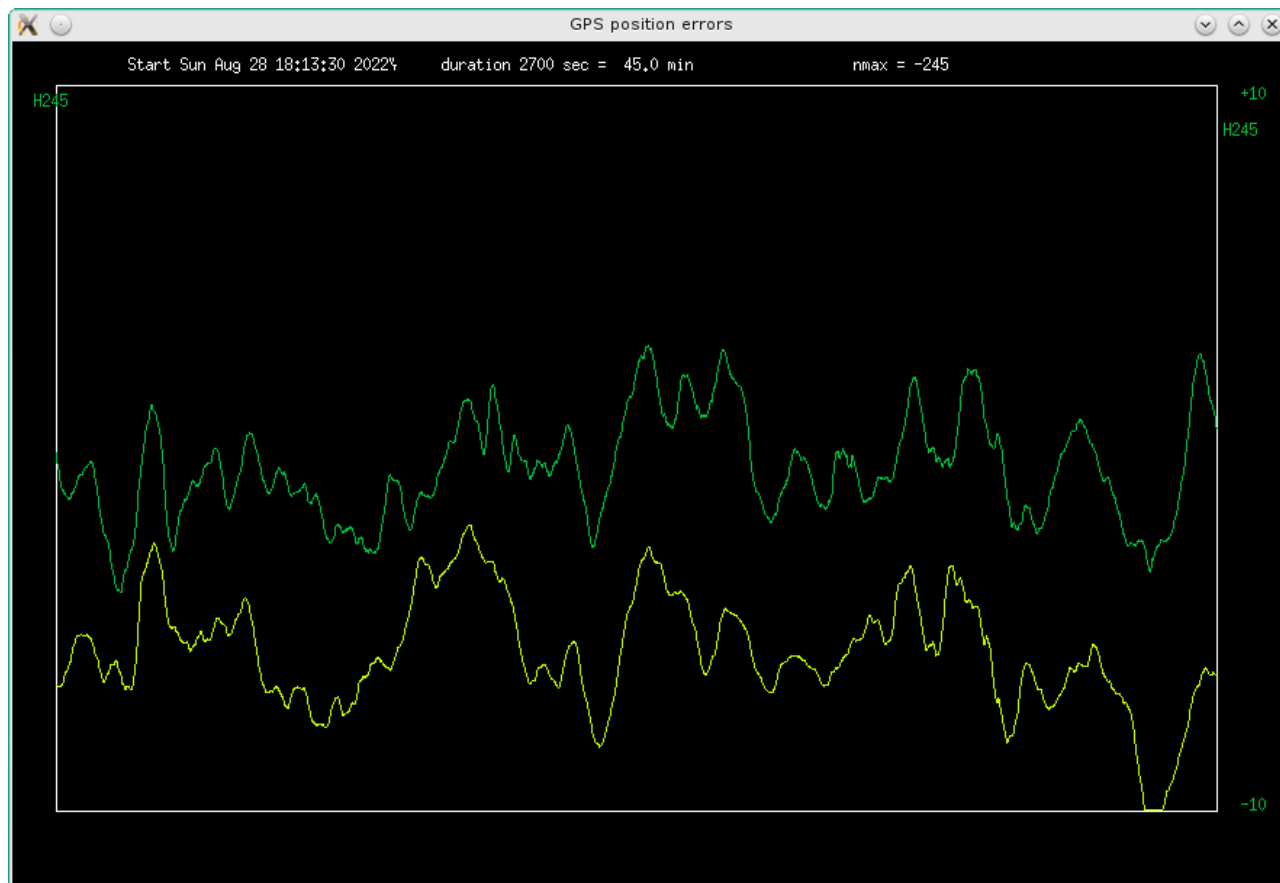
Višina antene nad tlemi ~10m



Avtokorelacija, zamik 24h +- 500 sekund

Maks pri -245 sekundah → vrtenje Zemlje

# Odboji od tal - primerjava zaporednih dni



Dva dneva, zamaknjena za  
245 sekund  
Vertikalni obseg  $\pm 10$ m  
Horizontalni obseg 45 min

Razlika v povprečju je  
verjetno zaradi ionosfere,  
"čire-čare" zaradi odbojev  
od tal

# Kako naprej?

Boljši (novejši, "časovni") sprejemnik – že nabavljeni Ublox LEA-8T

Dvofrekvenčni sprejemnik (n.pr. Ublox NEO-F10T) - drag, zahteva širokopasovno anteno

Optimizacija nastavljivih parametrov sprejemnika – minimalna elevacija....

Boljša (geodetska) antena – ebay, aliexpress od 70 evrov

Rubidijev lokalni standard – predstavitev bo na RIS2024 :-)

# Linki

[1] Characterization of Clocks and Oscillators, NIST Technical Note 1337  
<https://archive.org/details/characterization1337sull>

Simon Schroedle GPSDO  
<http://www.simonsdialogs.com/2018/10/u-blox-gps-receiver-a-self-regulating-clock-and-a-gpsdo-and-all-of-this-for-the-lowest-cost>

FRCOMP:  
<http://lea.hamradio.si/~s57uuu/scdsp/frcomp/index.html>

GPSy dances (MBSD itd):  
<http://lea.hamradio.si/~s57uuu/mischam/gpsy/index.html>

u-blox timing application note:  
[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/Timing\\_AppNote\\_%28GPS.G6-X-11007%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/Timing_AppNote_%28GPS.G6-X-11007%29.pdf)

u-blox protokol, verzija 6:  
[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6-GPS-GLONASS-QZSS-V14\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28GPS.G6-SW-12013%29\\_Public.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6-GPS-GLONASS-QZSS-V14_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-12013%29_Public.pdf)  
[https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6\\_ReceiverDescrProtSpec\\_%28GPS.G6-SW-10018%29\\_Public.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29_Public.pdf)

Eevblog forum debate:  
<https://www.eevblog.com/forum/projects/ebay-u-blox-lea-6t-gps-module-teardown-and-initial-test/>  
<https://www.eevblog.com/forum/projects/my-u-blox-lea-6t-based-gpsdo-%28very-scruffy-initial-breadboard-stage%29/>  
<https://www.eevblog.com/forum/projects/ublox-lea-m8t-module-to-discipline-an-external-oscillator/msg4471393/#msg4471393>  
<https://www.eevblog.com/forum/projects/gpsdogssdo-stm32g4-u-blox-zed-f9t-tdc7200/msg4341235/#msg4341235>  
<http://www.eevblog.com/forum/projects/budget-gpsdo-a-work-in-progress/msg3481886/#msg3481886>  
<http://www.eevblog.com/forum/projects/lars-diy-gpsdo-with-arduino-and-1ns-resolution-tic>

Vprašanja?