



# Ultra Stabiele Oscillatoren

HOE GOED ZIJN ZE, HOE BEPALEN WE DAT, WAT IS NODIG? DE GPS-DO

---

ERNST SCHRAMA PA1EJO

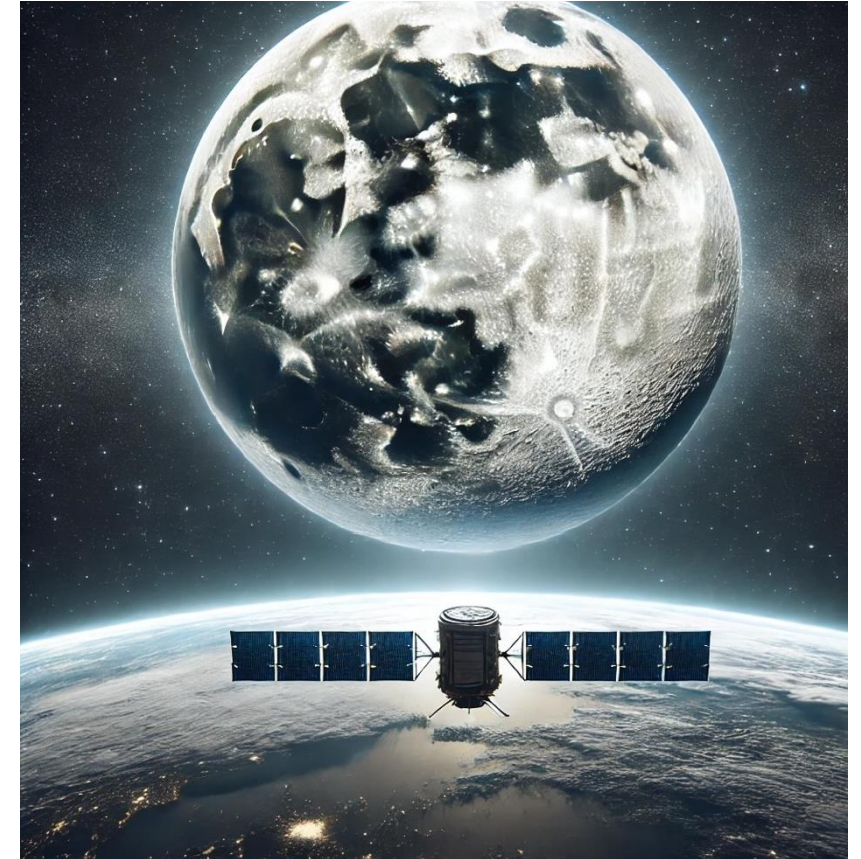
27-APRIL-2025

# Wat maakt iets een USO?

## OXFORD REFERENCE

A device carried on some spacecraft to provide a more stable downlink frequency. In normal conditions, a spacecraft receives a stable uplink frequency and then uses it to generate a stable downlink frequency. The USO is used when an uplink is impossible, as when the spacecraft passes behind the Moon or a planet. Low-mass oscillators are also used for this purpose, but they are affected by temperature changes and are not highly stable. The USO, however, is kept in a temperature-controlled unit.

Geraadpleegd op 28-Feb-2025

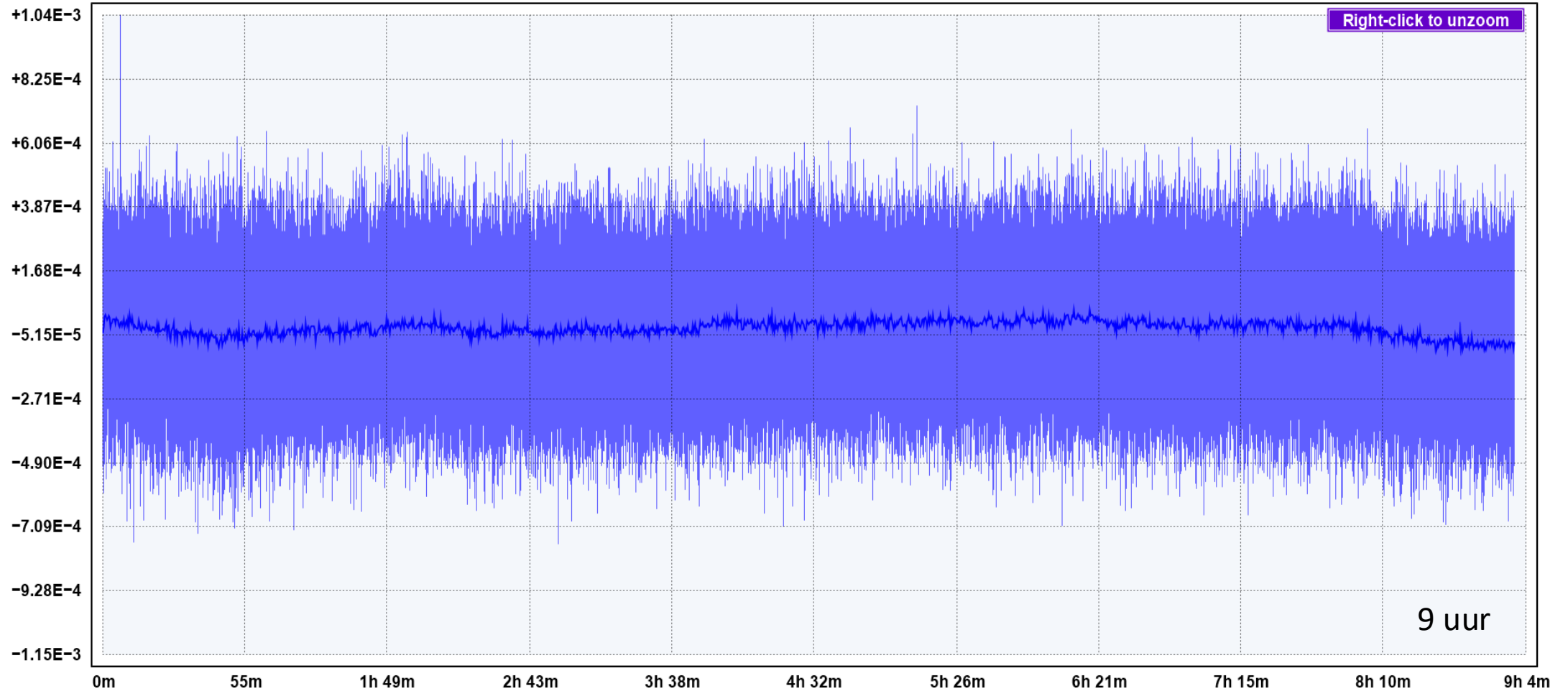


(Indruk van ChatGPT)

# Hoe goed is mijn beste 10 MHz oscillator?

+0.001 Hz

Frequency Difference (Linear residual Hz, zero-based)  
Averaging window: Per-pixel



-0.001 Hz

Trace	Notes	Input Freq	Sample Interval	Freq at 0m	Duration	Elapsed	Acquired	Trace Window
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s		9h	9h	324000 pts	324000 pts



# Werken met grote getallen

In het dagelijks leven, getallen tot 1000 bv, daarboven wordt het voor velen onvoorstelbaar groot tenzij het om de aankoop van een huis of een auto gaat. (RZAM: kilo mega en giga bekend)

In de techniek maken van 1000 →  $10^3$

Vermenigvuldigen van grote getallen

$$1000 \times 100000 = 10^3 \cdot 10^6 = 10^9 \quad (\text{hint laat de } x \text{ gewoon weg})$$

Delen van grote getallen

$$1000 / 100000 = 10^3 \cdot 10^{-6} = 10^{-3} \quad (\text{het antwoord is 1 promille})$$

En nu kijken of jullie me snappen:

- Een schip van 100 bij 30 bij 300 meter bevat ..... liter aan lading

Velen kunnen het niet zonder een reken machientje

# Deviaties

Om de kwaliteit te bepalen gaan we het over deviaties hebben, meet de lengte van de kamer, 1 keer is niet genoeg, 5 keer meten:

#	W	V	(V) <sup>2</sup>	dW/W
1	10.223	-0.0058	3.3640 10 <sup>-5</sup>	-5.6735 10 <sup>-4</sup>
2	10.231	+0.0022	4.8400 10 <sup>-6</sup>	+2.1503 10 <sup>-4</sup>
3	10.225	-0.0038	1.4440 10 <sup>-5</sup>	-3.7164 10 <sup>-4</sup>
4	10.224	-0.0048	2.3040 10 <sup>-5</sup>	-4.6948 10 <sup>-4</sup>
5	10.241	+0.0122	1.4884 10 <sup>-4</sup>	+1.1913 10 <sup>-3</sup>
gemiddelde	10.2288		2.2480 10 <sup>-4</sup>	7.4967 10 <sup>-3</sup>

$\sqrt{(\text{som } V \text{ in het kwadraat}) / (N-1)} = 7.4967 \cdot 10^{-3}$  met N=5, dit noemen we de standaard deviatie

Een keer de SD bevat 68%, 2 keer bevat 95%, 3 keer: 99% Volgens de zgn Gaussische verdeling

# Maar wat heb je nu gemeten?

Voor de lengte van de kamer is het antwoord:

10.229 +/- 0.015 met een betrouwbaarheid van 95%

De relatieve fout van de lengtemeting is ca  $10^{-4}$  (fout als  $dw/w$ )

Deviatie “lengte vd kamer” IS NIET “frequentie van oscillatoren”

Je zult enige **tijd** nodig hebben om de frequentie vd oscillator te bepalen, de zogenaamde integratie tijd  $\tau$  (Griekse letter tau)

We gaan naar mijn eerste zelfbouw project: de kwartsklok

# Schema zelfbouw kwartsklok



10 MHz



1 Hz



- Setting
- Latching
- Readout

Het hart van de klok is natuurlijk de oscillator, Gebaseerd op een kwarts kristal, met een trimmer van een paar pf. En zo regel je hem af ten opzichte van een radiotijdsein

# Oven gecontroleerde kwarts oscillatoren

Om het goed te doen moet de oscillator in een oven (bv 80C)

Zo weinig mogelijk temperatuursinvloeden van buitenaf.

Dubbelwandig thermostaat etc

SC-cut kristal voor lage fase ruis  
(SC-cut = stress compensated cut)

$2.10^{-12}$  Allan deviatie (1sec)

Veroudering : minder dan  $2.10^{-10}$ /dag

Werkbereik : 15-24 Volt DC

Elektronische frequentie controle

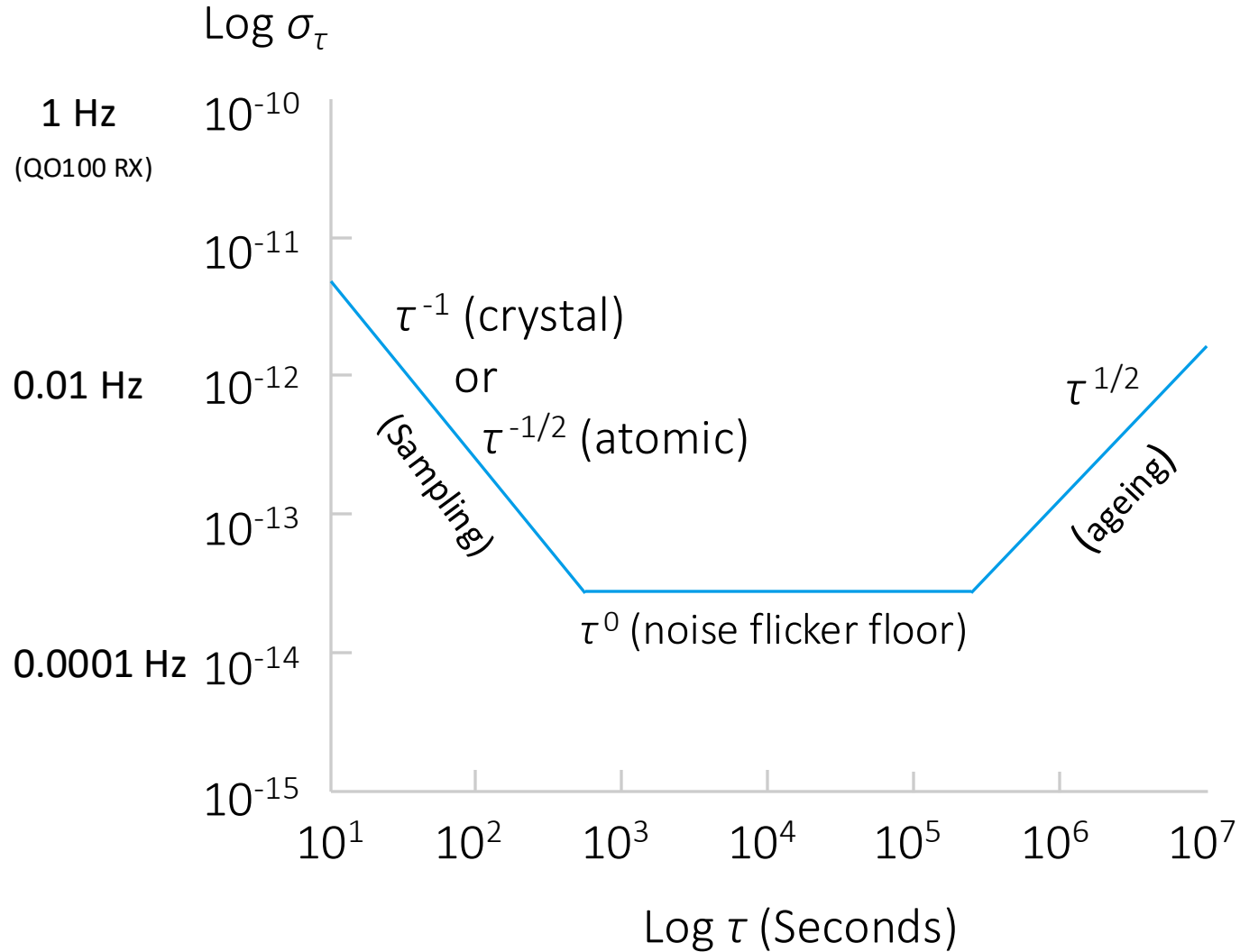




# Klok oscillator fouten variantie

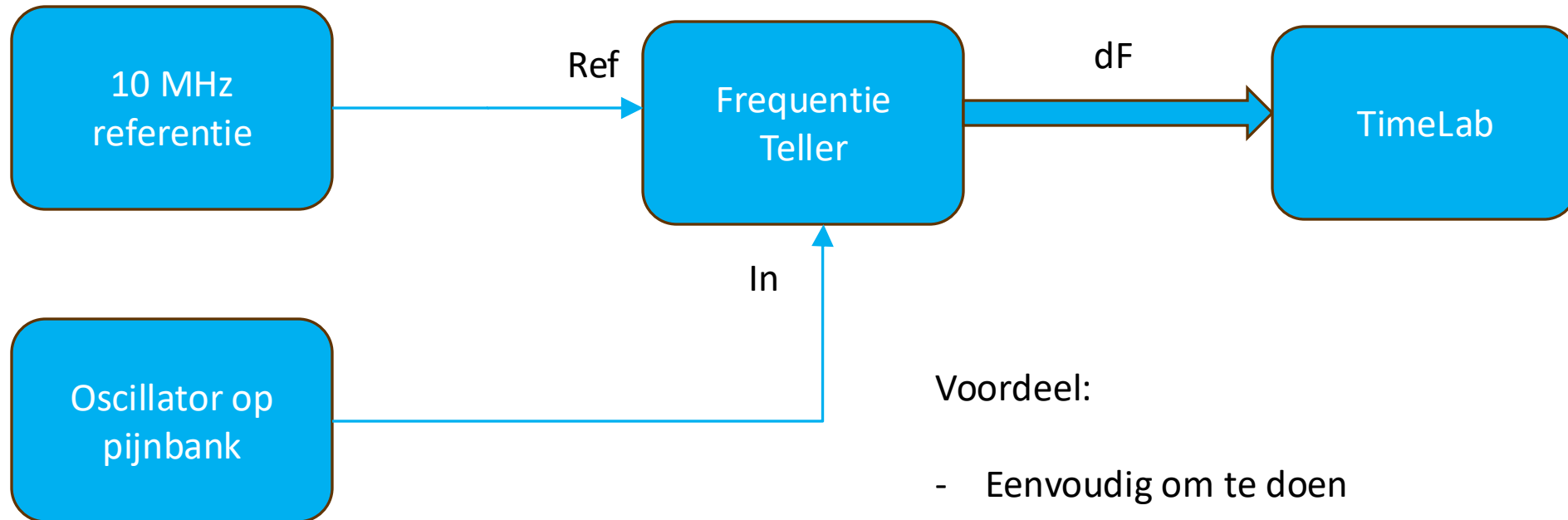
- De klok telt (integreert) oscillaties en zo krijg je tijd en de foutmaat ( $\Delta t$ ) kunnen we pas na bv een week bepalen, bv 1 seconde verschil ten opzichte van een extern tijdsein.
- De integratie tijd T zit dus in het probleem, de foutmaat is daarom  $\Delta t/T = \Delta f/f$  en dit is wat je waarneemt (1sec/wk =  $1.65 \cdot 10^{-6}$ ) we halen de  $10^{-9}$  of nog kleiner bij lange na niet.
- Ik heb een externe referentie nodig om dit te kunnen bepalen.
- De onzekerheid van  $\Delta f/f$  wordt nu aangegeven met de Allan deviatie  $\sigma_\tau$  die afhangt van  $\tau$  (Griekse letter tau)
- Vanaf hier wordt het wiskunde waarvan ik alleen het resultaat laat zien

# Allan deviations (zoeken in de literatuur)



Oscillator	Noise flicker floor
Unconditioned quartz	$10^{-7}$
Oven special cut quartz	$10^{-10}$
Rubidium cell	$10^{-12}$
Cesium reference	$10^{-14}$
Hydrogen maser	$10^{-14}$
CS fountain	$10^{-15}$

# Meten met een frequentie teller



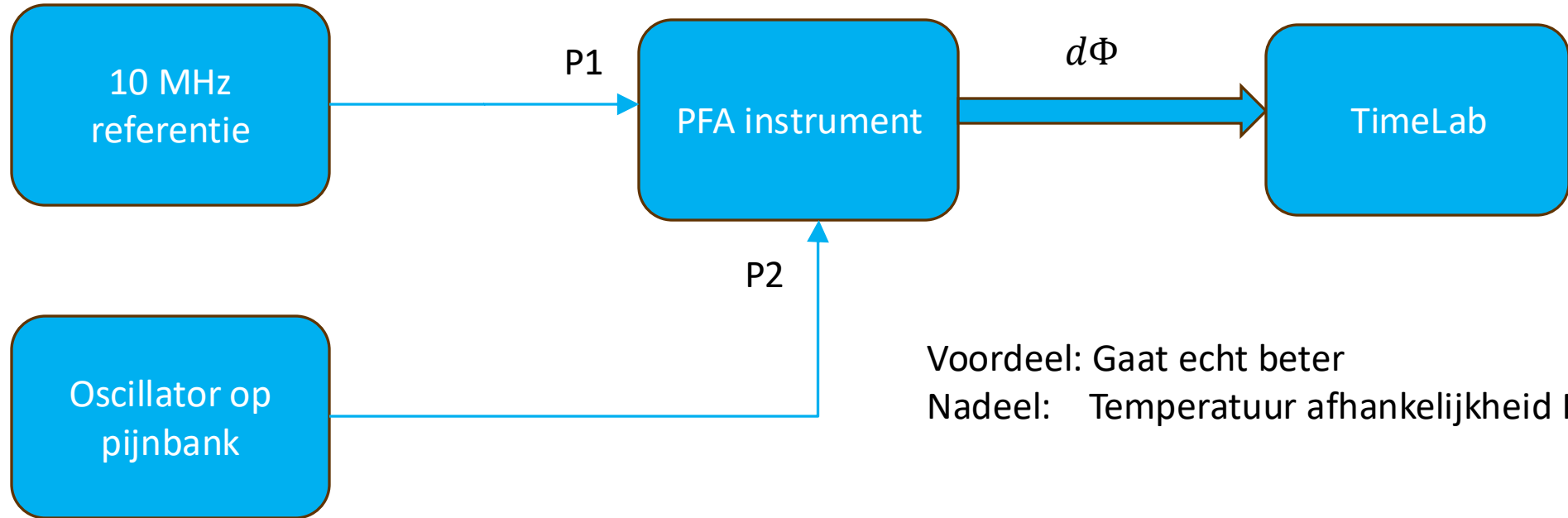
Voordeel:

- Eenvoudig om te doen

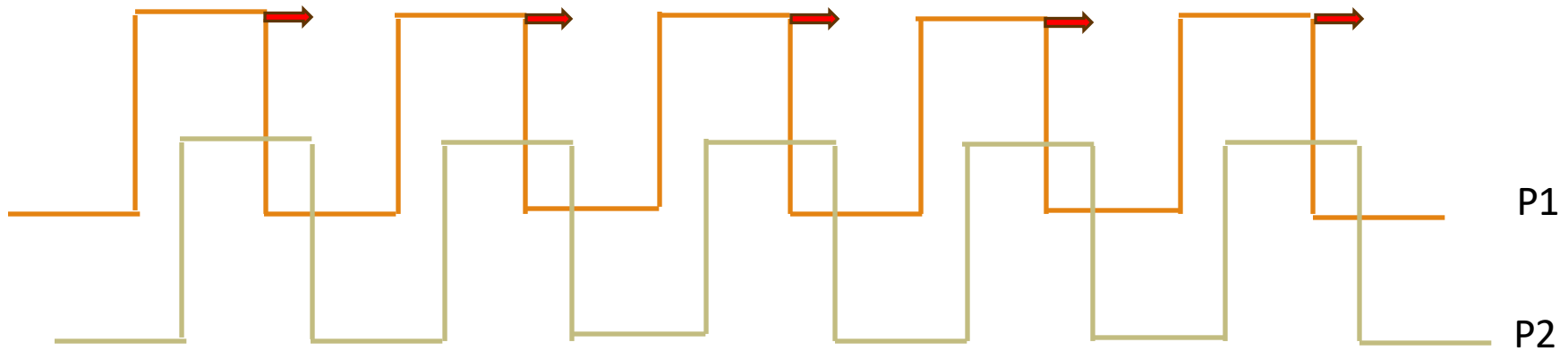
Nadeel:

- Kleine frequentie verschillen = lange gate tijd
- (Sommige counters zijn iets slimmer)

# Meten met een PFA instrument



Voordeel: Gaat echt beter  
 Nadeel: Temperatuur afhankelijkheid PFA



# En toen wou ik het zelf eens gaan doen



Je vindt ze op eBay

Ze komen uit b.v. oude telefoon netw.

De Rb lamp gaat 20 jaar mee

Het beste 10 MHz signaal in het huis

Kost ca 150 euro

Lock tijd ca 3 minuten

Redelijk verbruik (ca 10 tot 20 Watt) bij 15 Volt DC



# Gebruik een frequentie teller

Telt het aantal oscillaties binnen een gate tijd die je instelt

Doet een poging om een fractionele frequentie waarde te bepalen

Heeft zijn eigen stabiele referentie

Je kunt ook zelf een 10 MHz als referentie aanbieden.

Uitleesbaar via de PC

Op de pijnbank : een Arduino gestuurde DDS, de AD9851 wat zeker geen USO is



# Ga meten met een "counter" (10 MHz uit de Rb)

100 Hz  
(qo100)

1 Hz

0.01 Hz



Beetje teleurstellend resultaat omdat je niet overtuigend de Allan deviatie plotjes ziet verschijnen.

Dit doe je in timelab die de frequentie of fase metingen van de teller krijgt

# Vergelijk twee GPS DOs met de counter





# De leercurve is redelijk stijl

Ga niet met een counter meten maar met een PFA instrument (RF seminar van Erik Kaashoek)

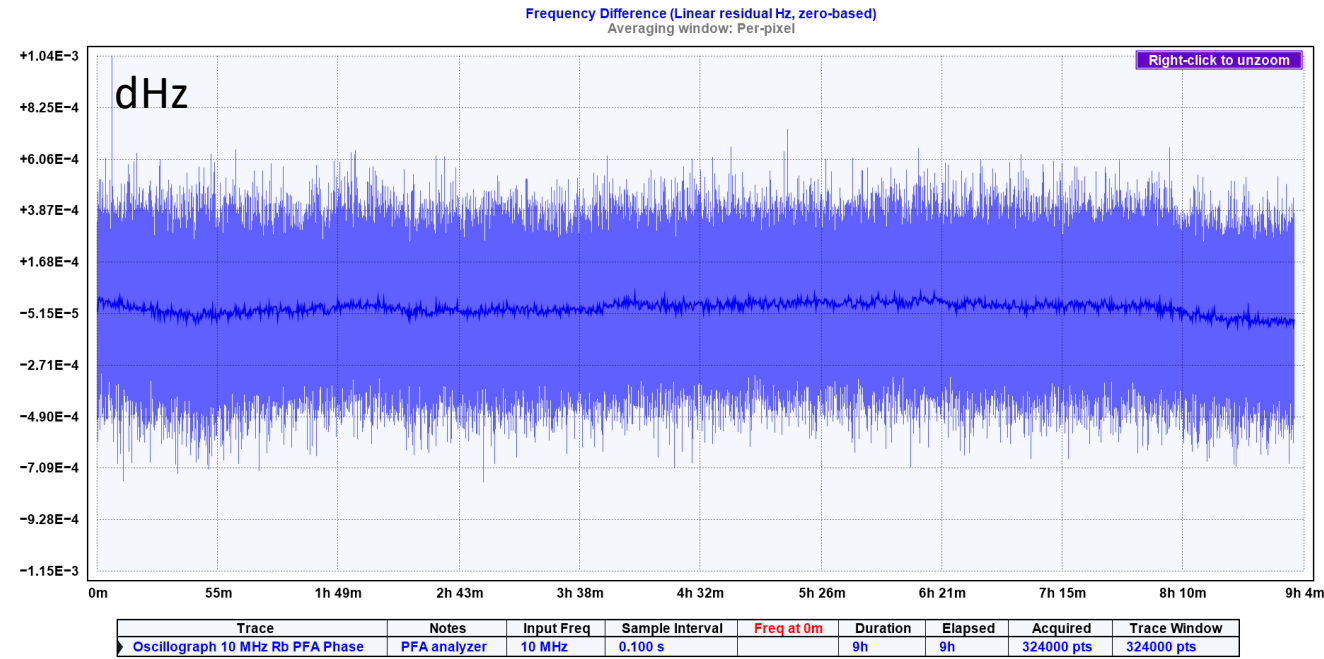
Het PFA instrument meet direct de fase verschillen (in seconden) van twee aangeboden 10 MHz signalen

- Eentje komt van de Rubidium standaard
- De ander van de oscillator op de pijnbank

Laat de alles eens een paar uur draaien (acclimatiseren)

Gebruik goede kabels (doormeten met een VNA)

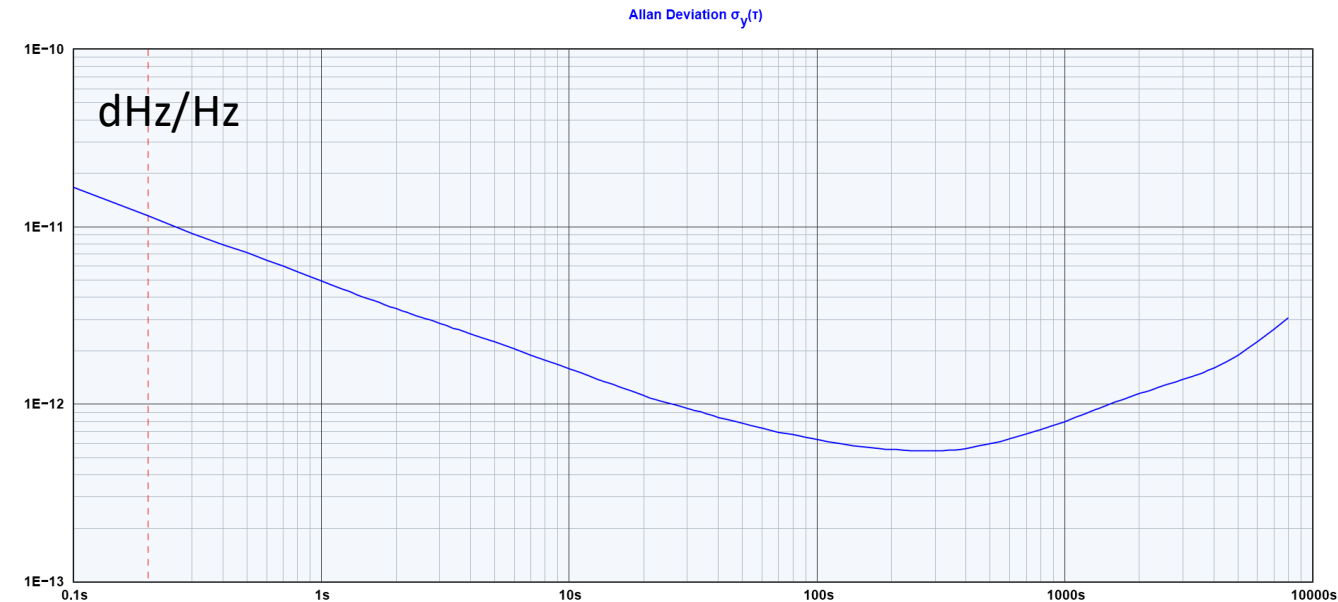
Gebruik 20 dB verzwakkers voor het PFA strument



Tijdserie vd 10 MHz oscilloquartz:

- Hertz op de y-as (uit PFA instr.)
- Tijd in uren op de x-as

Info: +/- 5 10<sup>-4</sup> Hz of zo 9 uur reeks



Allan deviatie plot

- Korte termijn meer ruis
- Optimum bij ca 400 seconde
- Vanaf daar neemt de thermostaat in de huiskamer (etc) het over

Kortom, meer info dan de tijdserie

Iedere oscillator → eigen adev

# Vijf keer mijn beste oscillator meten met het PFA instrument



0.001 Hz

Trace	Notes	Input Freq	Sample Interval	ADEV at 0.4s	Duration	Elapsed	Acquired	Trace Window
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	8.08E-12	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	8.10E-12	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	8.29E-12	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	8.30E-12	9h	9h	324000 pts	324000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	7.95E-12	9h	9h	324000 pts	324000 pts

Bevat alle elementen die je in de Allan deviatie plot verwacht

De eerste keer (die rode) ging niet zo goed, duurde een uur om daarachter te komen. Daarna moet je hem een paar keer laten lopen, tenslotte, 2 keer 9 uur

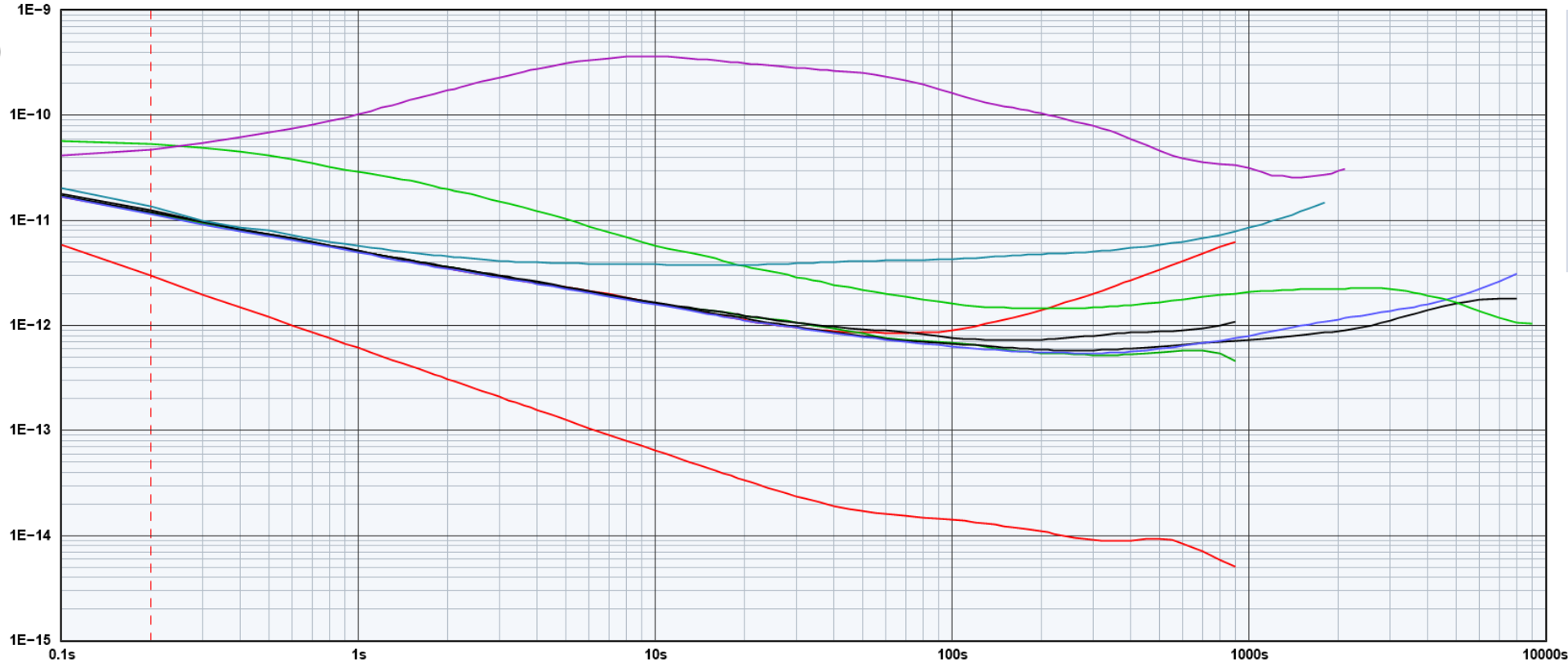
- Sampling
- Floor ( $5.6 \cdot 10^{-13}$  @ 400s)
- Random walk

# Alle oscillatoren die ik heb op de PFA analyzer

Allan Deviation  $\sigma_y(\tau)$  100s

10 Hz  
(qo100)

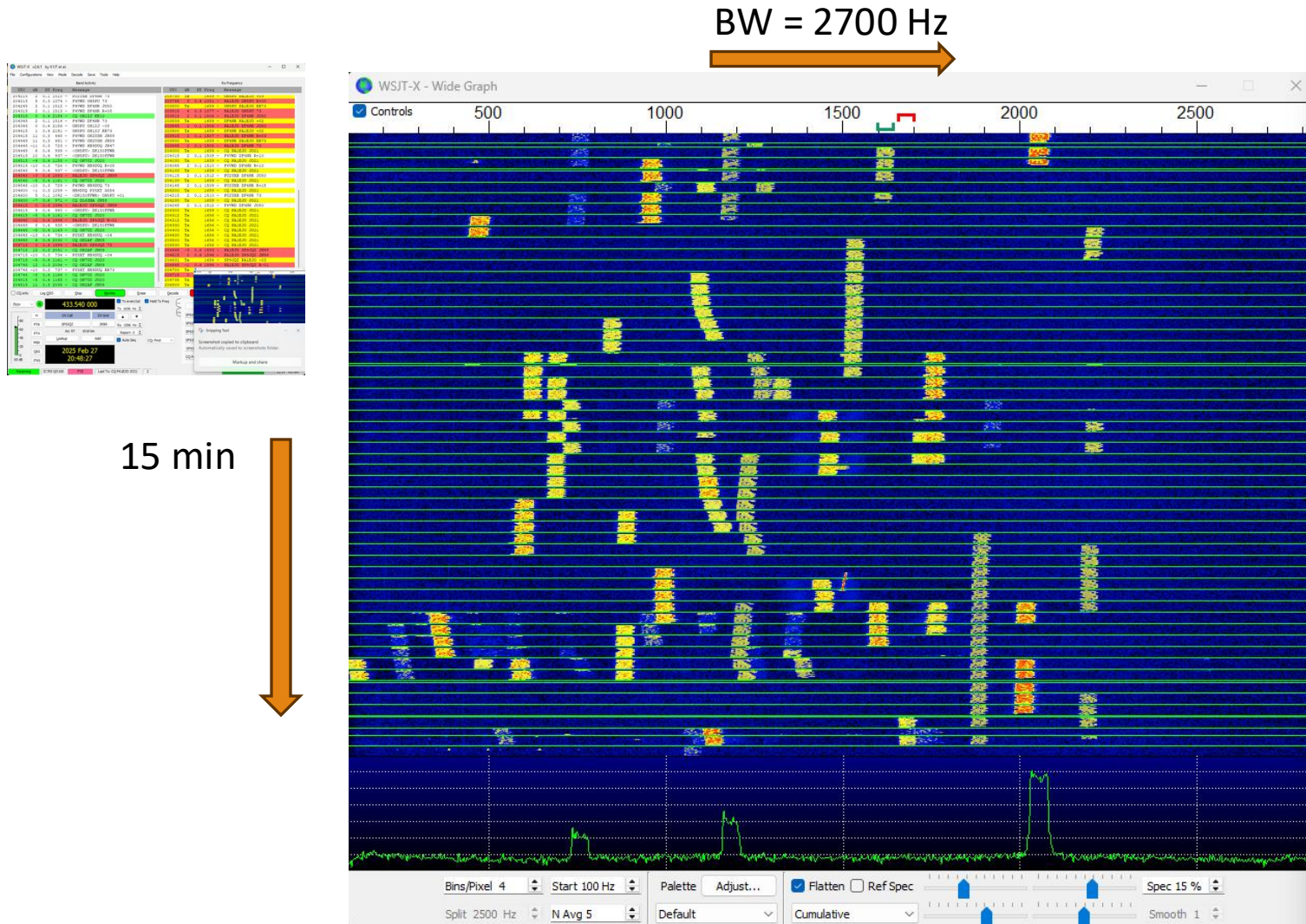
0.01Hz



Tau	Sigma(Tau)
1s	5.69E-12
2s	4.54E-12
4s	3.98E-12
8s	3.85E-12
10s	3.81E-12
20s	3.76E-12
40s	4.04E-12
80s	4.21E-12
100s	4.28E-12
200s	4.79E-12
400s	5.46E-12
800s	7.25E-12
1000s	8.51E-12

Trace	Notes	Input Freq	Sample Interval	ADEV at 0.2s	Duration	Elapsed	Acquired	Trace Window
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.17E-11	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.17E-11	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.25E-11	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.21E-11	9h	9h	324000 pts	324000 pts
Oscillograph 10 MHz Rb PFA Phase	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.16E-11	9h	9h	324000 pts	324000 pts
Null test Rb PFA Freq	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	2.96E-12	1h	1h	36000 pts	36000 pts
Bodnar 10 MHz to Rb 0p1s PFA 10h	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	5.39E-11	10h	10h	360000 pts	360000 pts
REF 10 MHz to Oscillograph Op1s PFA	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	4.72E-11	2h 24m 27s	2h 24m 27s	86674 pts	86674 pts
OSC5a Isolated 10 MHz to Rb 1s PFA	PFA analyzer	10 MHz	0.100 s	1.35E-11	2h	2h	72000 pts	72000 pts

# Wat hebben we nu eigenlijk nodig?



WSJT-X op 10.5 GHz QO-100 Rx

RX : 10 MHz oscilloquartz

TX : 10 MHz Bodnar

Overduidelijk zichtbaar dat velen met bv een TCXO werken

$$0.1 \text{ Hz} = 10^{-11}$$

$$1 \text{ Hz} = 10^{-10}$$

$$10 \text{ Hz} = 10^{-9}$$

$$100 \text{ Hz} = 10^{-8}$$

Wat we nodig hebben is wat een narrow band FSZ demodulator aan kan

Bv < 1 Hz over 15 minuten?

Dit is een adev grens vd 10 MHz

Hoe beter je df/f hoe groter de kans dit spel te winnen?

# Gebruikseisen aan WSJT-x op QO100



Eigenlijk wil je de frequentie drift zo klein mogelijk hebben, daarvoor moeten de UP en DOWN converter gelockt worden mbv 10 MHz.

Een frequentie fout van 1 Hz op QO100 betekent  $(\Delta f/f) = 10^{-10}$  terwijl de sessie duur ca 900s is (we lieten een kwartier zien)

Maak het wat makkelijker voor de decoder,  $(\Delta f/f) = 10^{-11}$  by 1000 sec.

De WSJT-x decoder kan omgaan met enige frequentie drift

Geen GPS/DO nodig, een OCXO (zelfs een OSC5 van CTI) kan dit

GPS/DOs zijn zelfs ruiziger by  $\tau < 100s$

WSJT-x is een extreme situatie, WSPR zou het nog extremer maken

Daarna komen pas CW and SSB modes aan de orde, wat je regelmatig ziet is +/- 100 Hz verstemmen nodig is om een QSO te voeren

# Samenvatting

Wat is een Allan deviatie analyse, hoe gebruik je timelab?

Het voordeel van een PFA instrument tov een freq. counter

Type oscillatoren bij  $\tau = 400\text{s}$ :

- Niet-geconditioneerde kwarts oscillator ( $10^{-7}$ )
- Geconditioneerde kwarts oscillator in een oven ( $10^{-12}$ )
- GPS gedisciplineerde oscillator (leen de GPS klok) ( $10^{-10}$ )

Beter dan  $10^{-8}$  heeft zin bij NB digitale modes  $> 1\text{ GHz}$