

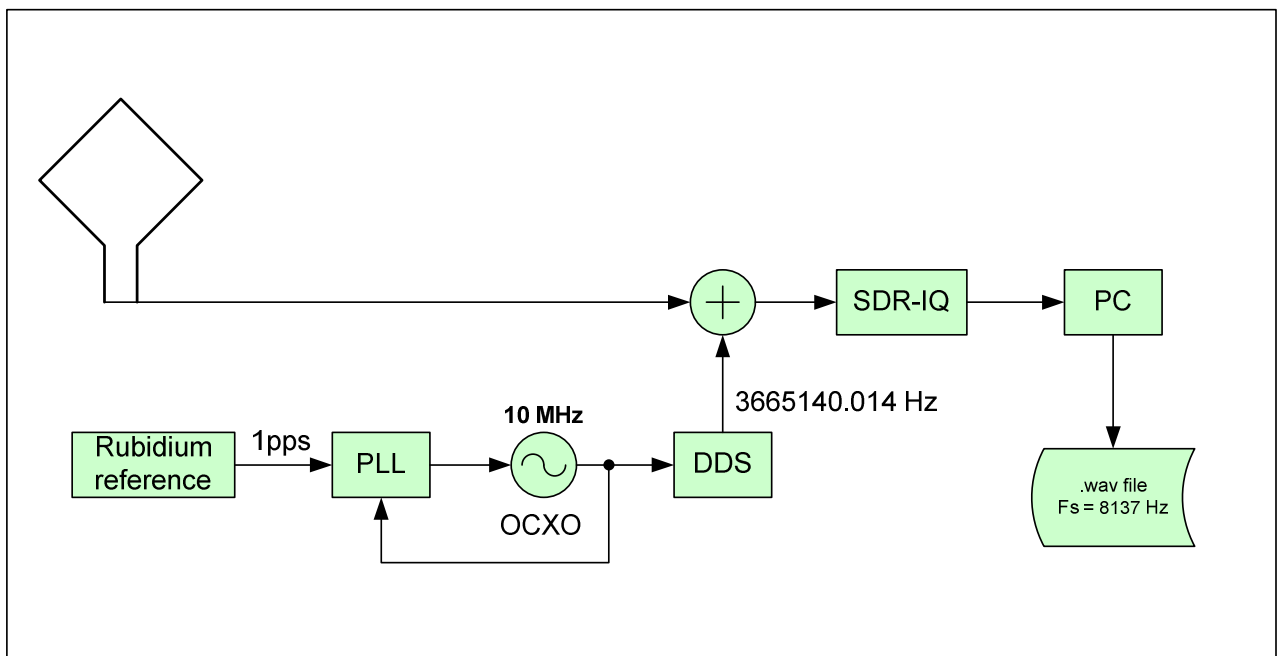
Taajuusmittauskilpailu "Hertsien herruus 2008"

Mittausraportti

Petri Kotilainen OH3MCK

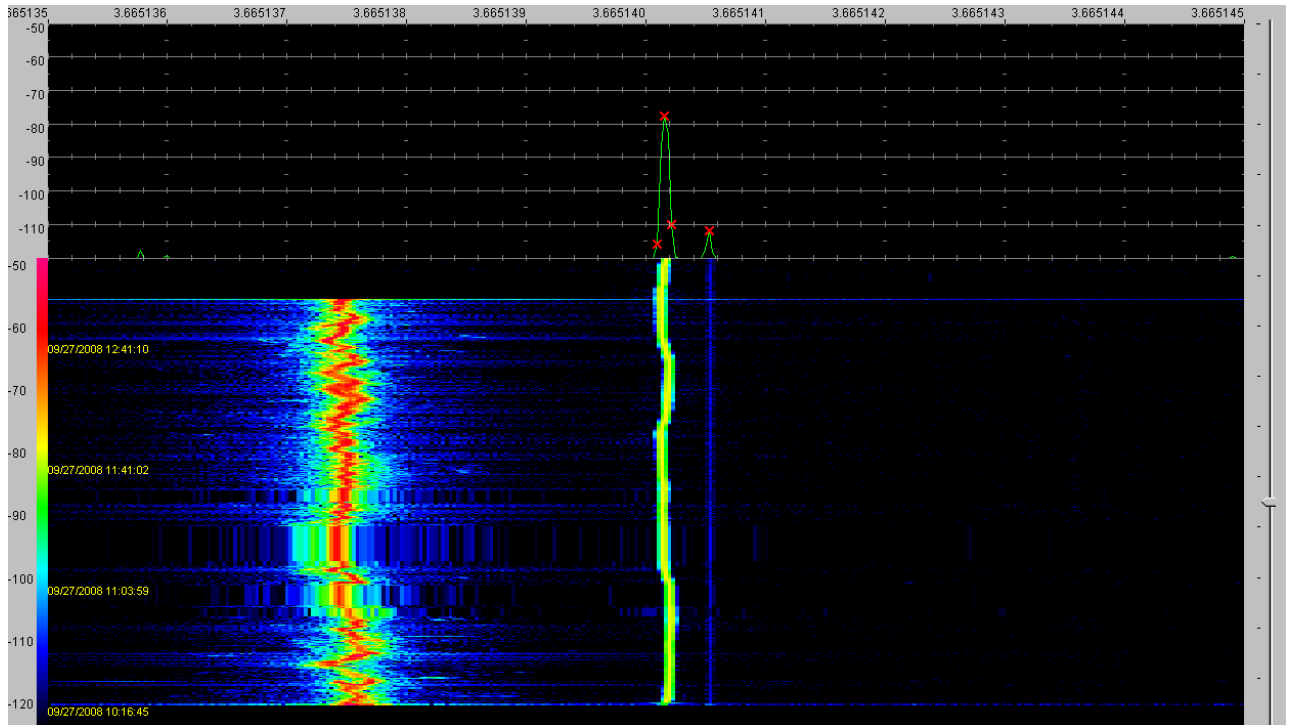
1. MITTAUSJÄRJESTELMÄ

Mittausjärjestelmän lohkoakaavio on kuvattu alla. Vastaanottoon käytettiin magneettisilmukka-antennia ja RFSPACE:n valmistamaa SDR-IQ ohjelmistoradiota (<http://www.rfspace.com/SDR-IQ.html>). SDR-IQ:n näytteistyskellon virheen kompensoimiseksi mitattavaan signaaliin summattiin referenssisignaali, joka synnytettiin 10 MHz:n OCXO:ta referenssinään käyttävällä DDS:llä. OCXO puolestaan oli lukittu rubidium-pohjaiseen aikareferenssiin (FE 5680A). Mitattu signaali digitoitiin 8137Hz näytteistysaajuudella äänitiedostoiksi myöhempää käsittelyä varten. Mittausajankohta oli noin 27.9.2008 10:15...13:00 UTC.



2. MITTAUSSIGNAALIN TARKASTELUA

Mittaussignaali vastaanotettiin ionosfääriheijastuksen kautta (vastaanottoaikan lokaattori KP11WL). Tästä johtuen vastaanotetussa signaalissa oli huomattava, luokkaa +/-0.2Hz suuruinen Doppler-modulaatio, joka oli voimakkaimmillaan kilpailujakson alku- ja loppuvaiheessa. Tämä näkyy selkeästi esim. koko mittauksen ajalta piirretystä spektrogramminäytöstä.



Kuvassa vasemmanpuoleinen jälki on mitattu signaali ja oikeanpuoleinen DDS:llä generoitu referenssisignaali. Jälkimmäisessä näkyy SDR-IQ:n näytteistyskellon ryömintä mittaussjakson aikana.

Mittaussignaalin taajuus oli vakaimmillaan kilpailujakson keskivaiheilla. Tästä johtuen myös taajuusestimaatti laskettiin ajalta noin 11:09 – 11:59 UTC.

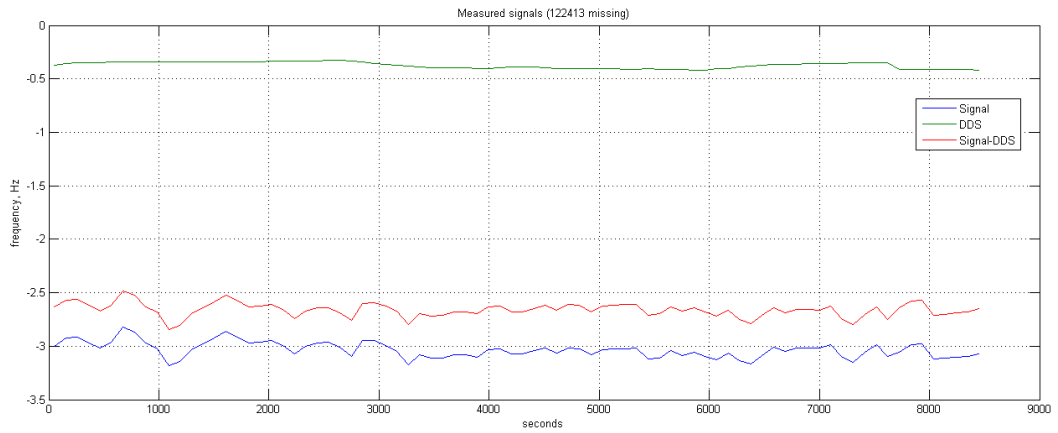
3. TAAJUUSESTIMAATIN LASKENTA

Taajuusestimaatti laskettiin spektrianalyysin avulla käyttäen Matlab-ohjelmistoa. Ensin koko kilpailujakson ajalta tallennettu signaali desimoitiin siten että analysoitavan signaalin näytteistystaajuudeksi tuli 79 Hz, ts. analysoitava taajuuskaista oli $-39.5 \dots +39.5$ Hz. Valitettavasti yksi äänitiedosto (aikaväli 12:24:13 – 12:49:49 UTC) oli vahingoittunut niin että Matlab ei kyennyt lukemaan sitä. Näin ollen kyseisen tiedoston sisältämä data ei ole analyysissä mukana.

Desimoitu mittaussdata segmentoitiin 82 segmentiksi, joiden ajallinen kesto oli noin 110 sekuntia. Kustakin segmentistä laskettiin spektrogrammi mitattavan taajuuden ($-3.5 \dots -2.5$ Hz) ja DDS-taajuuden ($-0.5 \dots -0.3$ Hz) ympäristössä käyttäen Görtzelin algoritmia ja suorakaideikkunaa. Näin saatiin 82 yksittäistä taajuusspektriä sekä mittaussignaalin että DDS-signaalin ympäristöstä ajan funktiona.

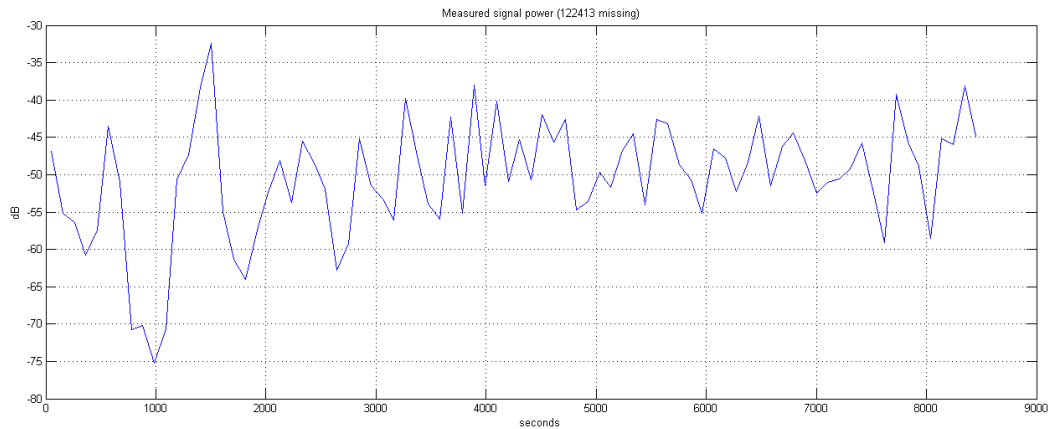
Kustakin taajuusspektristä estimoitiin ko. segmentille todennäköisin keskitaajuus sovittamalla Gaussin tiheysfunktio laskettuun taajuusspektriin. Sovituksen tuloksena saatiin kullekin segmentille taajuusestimaatti ja sen keskihajonta. Lisäksi laskettiin jokaisen segmentin sisältämä kokonaissignaali-teho (tätä ei tehty DDS-segmenteille).

SDR-IQ:n näytteistystaajuuden aiheuttama virhe kompensoitiin vähentämällä mittaussignaalin taajuusestimaatista DDS:n taajuusestimaatti segmenttikohtaisesti. Tulokset on esitetty graafisesti seuraavassa kuvassa.

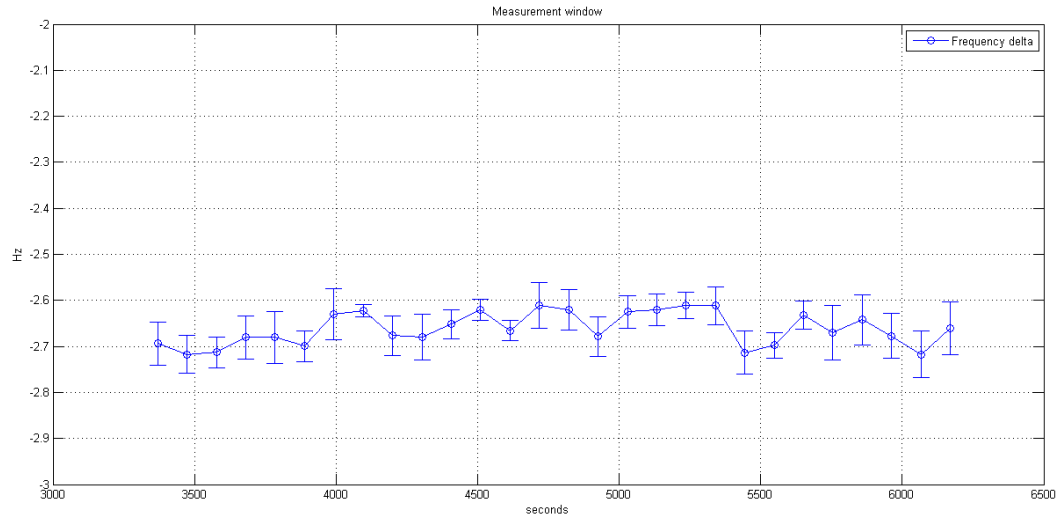


Kuten näkyy, taajuus on stabiileimmillaan välillä noin 3000...7000 sekuntia. Lopulliset taajuusestimatit laskettiin aikaväliltä 3170...6170 sekuntia (11:09...11:59 UTC).

Alla vielä mittaussignaalin suhteellinen kokonaisteho kaistalla -3.5...-2.5 Hz. Myös signaalinvoimakkuus on stabiileimmillaan aikavälillä 3000...7000 sekuntia.



Mittausjakson ajalta lasketut segmenttikohtaiset (28 segmenttiä) taajuusestimaatit ± 1 sigman virherajoiheen:

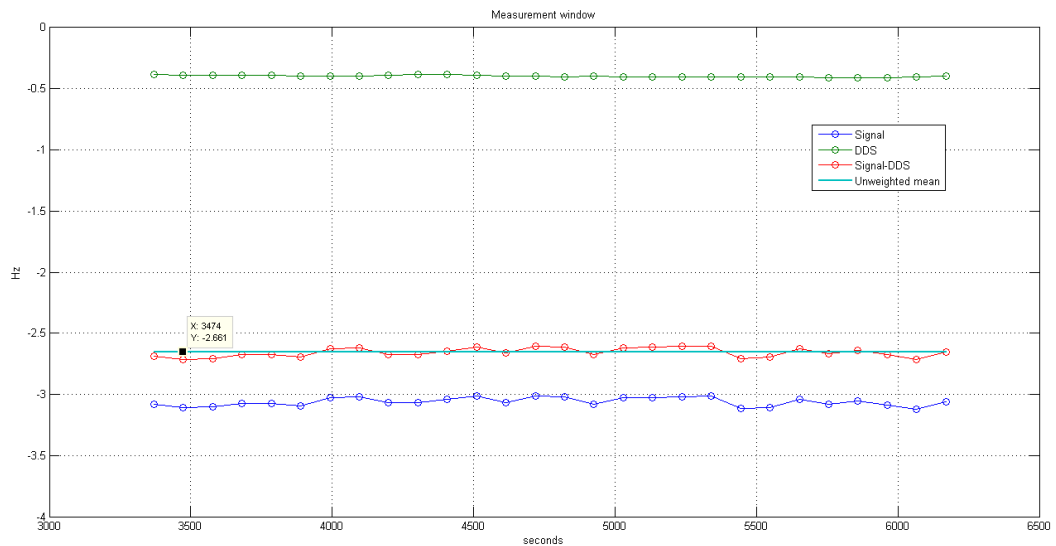


Lopullinen mittaustulos virherajoiheen saadaan laskemalla mittausjakson ajalta segmenttikohtaisten taajuusestimaattien keskiarvo ja keskihajonta. Sekä painottamaton että painotettu keskiarvo ja keskihajonta laskettiin (viite: http://en.wikipedia.org/wiki/Weighted_mean). Painotettujen tulosten laskennassa käytettiin painokertoimia (W_i), jotka määräytyivät sekä segmenttikohtaisen taajuusestimaatin varianssista (σ_i^2) että kokonaistehosta (P_i):

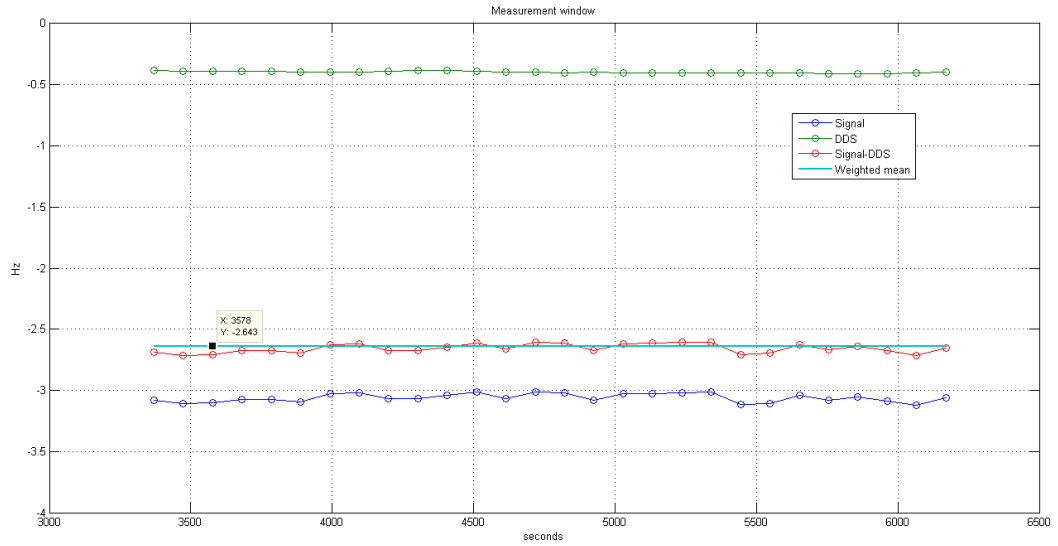
$$W_i = \frac{P_i}{\sigma_i^2} \quad \text{tai} \quad W_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$$

Ensimmäisessä tapauksessa painotettiin sekä amplitudia että varianssia, jälkimmäisessä ainoastaan varianssia.

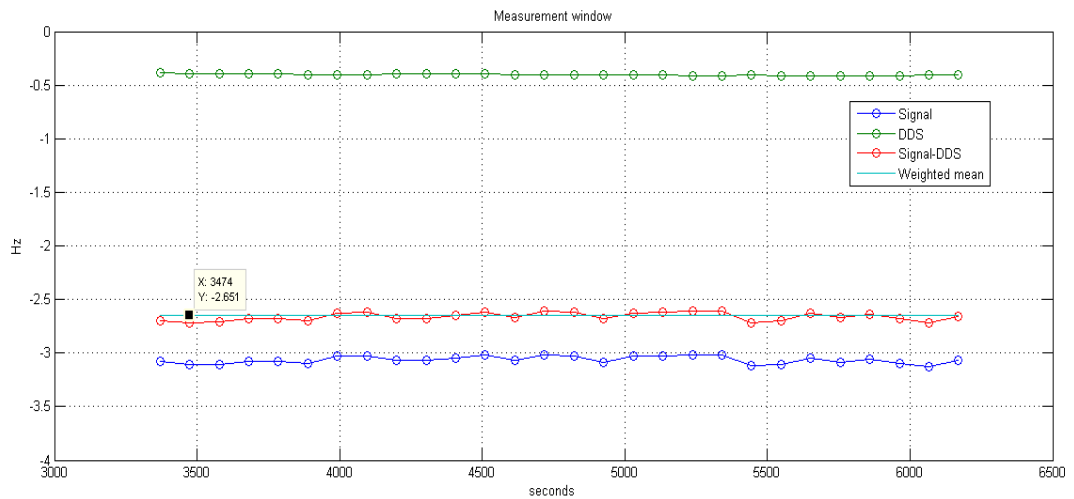
Tulokset graafisesti (painottamaton keskiarvo):



Tulokset graafisesti (amplitudilla ja varianssilla painotettu keskiarvo):



Tulokset graafisesti (varianssilla painotettu keskiarvo):



Tulokset taulukkomuodossa:

	Painottamaton	Amplitudilla ja varianssilla painotettu	Varianssilla painotettu
Keskiarvo	- 2.661 Hz	- 2.643 Hz	- 2.651 Hz
Keskihajonta	± 0.036 Hz	± 0.038 Hz	± 0.036 Hz

Vaikka tulokset eroavat toisistaan noin 20mHz, ne ovat kuitenkin kaikki selvästi ± 1 sigman virherajojen sisällä.

4. LOPULLISET TULOKSET

Saadut taajuusestimaatit on siis ilmoitettu mitatun taajuuden ja DDS:n referenssitaajuuden erotuksena. DDS:n (Analog Devices AD9833) taajuus tasan 10 MHz referenssitaajuudella on 3665140.0104165077 Hz. Tämä voidaan vielä korjata käytetyn rubidiumreferenssin systemaattisella taajuusvirheellä, joka on noin -2.4×10^{-10} . "Tarkaksi" DDS-taajuudeksi saadaan siis 3665140.009536874 Hz, mikä vastaa alle 1mHz referenssistä johtuvaa systemaattista taajuusvirhettä. Tämä virhe on vähäinen verrattuna aiemmin laskettuihin taajuusestimaattien epätarkkuuksiin. Muita virhelähteitä ovat:

- 10MHz OCXO:n lukitukseen käytetyn digitaalisen PLL:n taajuusresoluutio ($< |\pm 0.5 \times 10^{-9}|$ tai $< |\pm 2\text{mHz}|$).
- Rubidium-referenssin stabiiliisuus mittausjakson aikana ($< |\pm 2 \times 10^{-11}|$) sekä lämpötilaryömintä ($< |\pm 3 \times 10^{-10}|$ @ $-5 \dots +50$ °C).
- Rubidium-referenssin retrace virhe ($< |\pm 5 \times 10^{-11}|$).

Lopulliset tulokset on laskettu allaolevaan taulukkoon. Kilpailuvastaukseksi valittiin vihreäksi värjätty, pelkästään varianssilla painotettu keskiarvo. Valinnan perusteena oli lähennä se että amplitudipainotuksesta ei katsottu olevan olennaista etua amplitudin ollessa varsin stabiili ja signaali/kohinasuhteen ollessa hyvä koko mittausjakson ajan.

	Painottamaton	Amplitudilla ja varianssilla painotettu	Varianssilla painotettu
Taajuusestimaatin keskiarvo	- 2.661 Hz	- 2.643 Hz	- 2.651 Hz
Taajuusestimaatin keskihajonta	± 0.036 Hz	± 0.038 Hz	± 0.036 Hz
DDS taajuus (korjattu)	3665140.009536874 Hz		
DDS taajuuden epävarmuus	$< \pm 0.003 $ Hz		
Mittaussignaalin taajuus	3665137.348 Hz	3665137.367 Hz	3665137.359 Hz
Mittaustuloksen virherajat (± 1 sigma)	± 0.036 Hz	± 0.038 Hz	± 0.036 Hz

5. MITTAUSJÄRJESTELMÄN KALIBROINTI

Rubidium-aikareferenssin taajuus kalibroitiin vertaamalla siitä saatavaa 1pps signaalia ja Motorolan Oncore GPS-vastaanottimesta saatavaa 1pps pulssia. Pulssien välistä aikaeroa integroitiin useiden vuorokausien ajan digitaalisella musitioskilloskoopilla. Todettu rubidiumreferenssin ryömintä GPS-vastaanotinta vasten oli noin -2.4×10^{-10} eli -0.24 ppb (parts per billion). Oletuksena on että GPS-vastaanottimen absoluuttinen taajuustarkkuus pitkällä aikavälillä on merkittävästi parempi verrattuna rubidiumoskillaattoriin.

Muita kalibrointitoimenpiteitä ei tehty.