

Hochstabile 10-MHz-Referenz vom GPS

Endlich eine genaue Frequenzquelle

Hans Neuendorff, DC7EN

Der Weg zur genauen Frequenzquelle war bei mir lang und steinig. Und so ging's los: Im Jahr 1971 baute ich einen Eichfrequenzempfänger für den britischen Langwellensender Droitwich. Aber die Genauigkeit litt unter Empfangsstörungen, und dann wurde die Sendefrequenz verschoben ...

Zur Person



Hans Neuendorff, DC7EN
Jahrgang 1947, Amateurfunkgenehmigung seit 1973
Gelernter Elektromechaniker, Studium Elektrotechnik/Informatik mit Abschluss Ing. grad. und Dipl.-Ing. TUB, Entwicklungsingenieur Elektronik, Software, seit 2007 Rentner
Besonderes Interesse: Gerätetechnik
Weitere Hobbys: Haus und Garten

Anschrift:
Bernhard-Beyer-Str. 3
14109 Berlin
hans.neuendorff@t-online.de

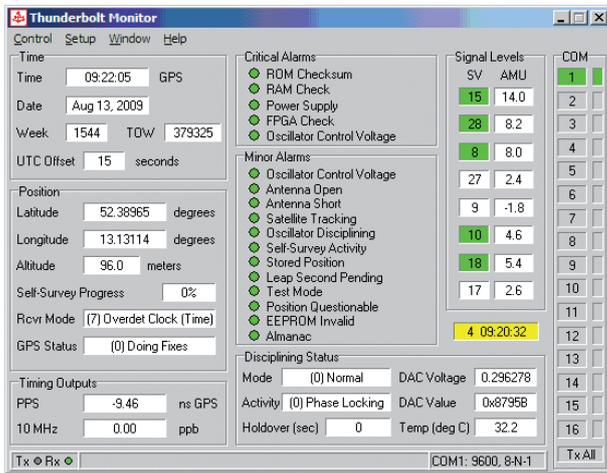


Bild 1: Ansicht des Thunderbolt-Monitors

Im ersten Versuch wurde ein handelsüblicher DCF77-Empfänger für den Anschluss an einen Computer mit einer externen PLL und einem Frequenzverdoppler versehen. Ergebnis: eine Genauigkeit von etwa 10^{-5} je nach Empfangsbedingung und Störträger. Dann versuchte ich es mit dem Sender Donebach auf 153 kHz nach der Schal-

tung von Herrmann Schreiber in der Zeitschrift Funkamateure 6/97. Hiermit betrug die Genauigkeit etwa 10^{-6} je nach Empfangssituation. Das reichte mir noch nicht; ein neunstelliger Frequenzzähler liefert ein wildes Auf und Ab bei den letzten Stellen.

Dann suchte ich nach Rubidium- und Cäsiumoszillatoren. Beim Internet-Auktionshaus ebay gehts bei etwa 80 € los, open end. Aber wer sagt mir, wie alt die Dinger sind und wie lange sie noch halten? Bei den früheren Rubidiumgeneratoren konnte man wenigstens die Rubidiumlampe tauschen, wenn sie verbraucht war.

Im Internet fand ich einige Hinweise bei den Time Nuts, eine Mailingliste von Funkamateuren, die förmlich verrückt nach genauer Zeit sind [1]. Manche von ihnen haben mehrere Zimmer mit Atomuhren vollgestellt, aber pünktlicher sind sie dadurch auch nicht ...

Das GPS wird angezapft

Da kam ich auf folgenden Gedanken: Über unseren Köpfen schweben etwa 30 GPS-Satelliten mit Rubidium- und Cäsiumuhren, die zudem dauernd überwacht und ggf. ausgetauscht werden, Stückpreis etwa 50 Mio. Dollar. Also sollte es über GPS gehen.

Und tatsächlich: Es gibt GPS-Empfänger mit synchronisiertem (disciplined) Oszillatorausgang (GPSDO). So ein Kit kostet z.B. neu 1600 € – so viel Geld wollte ich nicht ausgeben.

Man kann so etwas selber bauen (z.B. nach VE2ZAZ: A Simplified GPS-Derived Frequency Standard). Aber dann fanden sich Hinweise, dass Trimble-

Thunderbolt-Module mit 10-MHz-Ausgang (und 1-s-Ausgang) vom Baujahr 2003 vor einigen Jahren auf dem Surplus-Markt in den USA aufgetaucht sind [2]. Über ebay wurde ich in China fündig. Ein Kit mit Antenne und Netzteil kostet etwa 160 €. Es finden sich auch Angebote für den Thunderbolt allein für 34,96 € (Messepreis HAM RADIO 2008). Und siehe da – endlich hatte ich eine 10-MHz-Eichquelle mit einer Genauigkeit von etwa 10^{-10} . Jetzt stehen alle Stellen des Frequenzzählers still, und es ist reproduzierbar. Jetzt kann ich endlich meine gesammelte HF-Technik kalibrieren.

Die Praxis

Der Thunderbolt hat einen RS-232-Ausgang zum PC. Dort lässt man eines der Thunderbolt-Monitor-Programme laufen, z.B. tboltmon.exe [3] oder Lady Heather's Disciplined Oscillator Control Program.

Das Programm tboltmon sah nach einer halben Stunde Laufzeit so aus, wie es Bild 1 zeigt. Rechts unter Signal Levels sieht man fünf grüne Felder mit den Nummern der Space Vehicles (SV) – er empfängt hier also fünf GPS-Satelliten mit gutem Signal. Die SV-(PRN)-Nummern findet man übrigens in Wikipedia [4]. Man kann sehen, wie teuer der Satellit war, wann er startete, welche Ausrüstung er mitführt usw.

Unter Timing Outputs sieht man den Nachstimmvorgang von der vorherigen Sekunde zur momentanen Sekunde = 10^{-9} parts per billion (ppb).

Bild 2 zeigt den Lady Heathers Monitor als Farb-Negativ [5]. Da muss man schon ein wenig genauer hinsehen. Im Block PRN AZ EL Doppler finden sich hier sechs Satelliten. PRN ist die Satellitennummer, AZ ist der Azimut, EL die

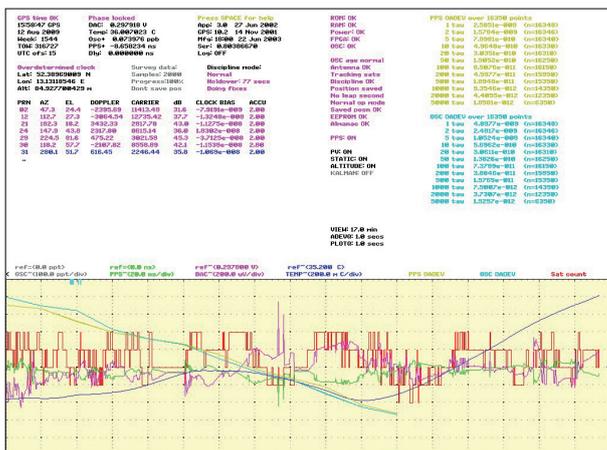


Bild 2: Ansicht des Lady Heathers Monitors

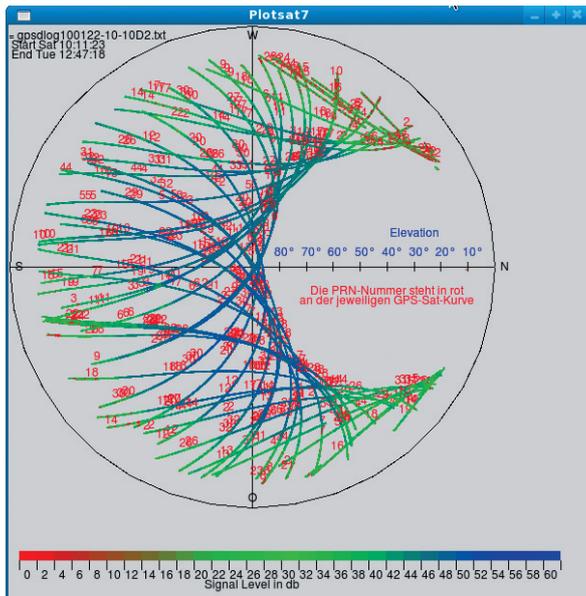
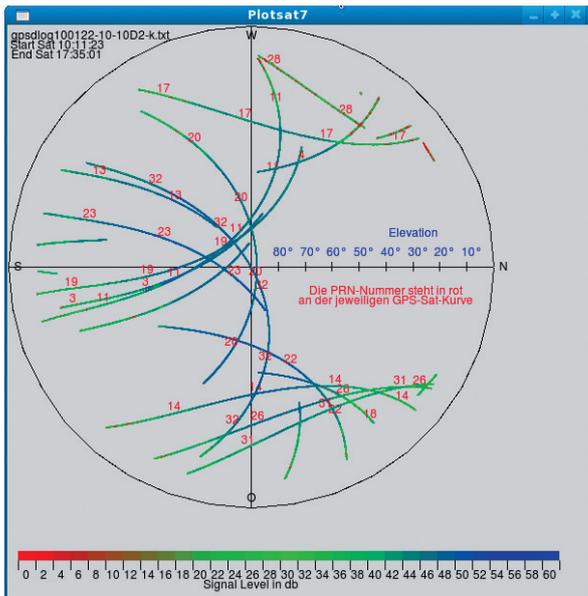


Bild 3 (links): Aufzeichnungen von Satellitenbahnen über 7 h

Bild 4 (rechts): Aufzeichnung von Satellitenbahnen über mehrere Tage

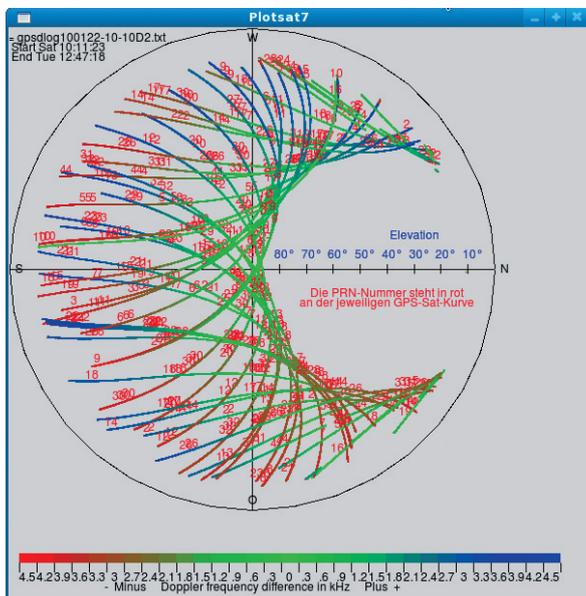
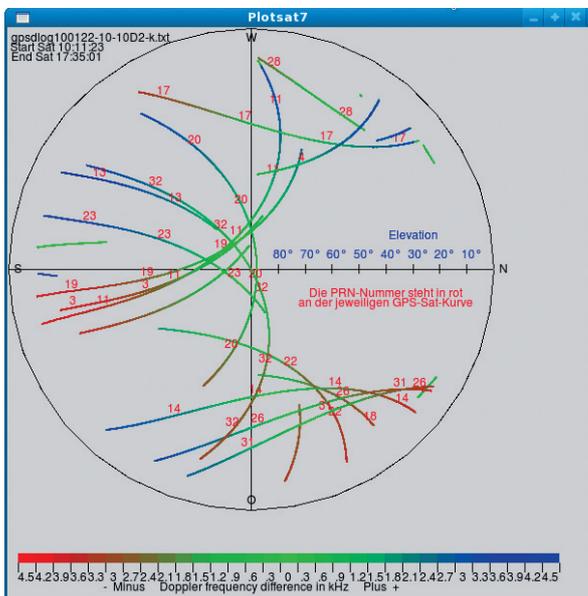


Bild 5 (links): Darstellung des Doppler-Effekts bei der 7-h-Aufzeichnung

Bild 6 (rechts): Darstellung des Doppler-Effekts bei der Aufzeichnung über mehrere Tage

Elevation. Man sieht also, wie weit der Satellit über dem Horizont steht, die Doppler-Verschiebung ist auch dabei, „positiv“ bedeutet Bewegung auf mich zu.

Beim Diagramm unten ist der Sat Count rot dargestellt: Die Gitterlinien zählen von unten nach oben, es sind hier also drei bis sieben Satelliten im Zeitraum von 16 350 s = 4,5 h.

Über die Genauigkeit in Abhängigkeit zur Dauer sieht man die Tabellen PPS OADEV und OSC OADEV (Allan Deviation) [6]. Das sind die Abweichungen der Ausgangssignale 10 MHz und 1 s. Je länger das Messintervall, desto genauer die Messung, es reicht hier bis $1,5 \times 10^{-12}$.

Ein Versuch inmitten von Gebäuden, die nur einen Teil des Nordhimmels freigaben, lieferte nur einen nutzbaren Satelliten und eine Genauigkeit von 10^{-9} . Siehe hierzu auch die Auswer-

tung der Empfangsfeldstärke und das Pol-Loch.

Azimet, Elevation und Empfangsfeldstärke

Der Trimble Thunderbolt liefert die Position der jeweiligen Satelliten, die Feldstärke und die Doppler-Frequenzverschiebung. Mit dem Programm GPSD [7], das allerdings ein wenig modifiziert wurde, konnten die Daten aufgenommen werden. Mit meinem Programm Plotsat7.pl (perl/Tk) werden sie grafisch dargestellt. Die Position der Satelliten wird, von der Empfangsantenne aus gesehen, mit Azimet und Elevation angegeben. Das habe ich im Diagramm so dargestellt: Die Antenne bzw. der Beobachter befindet sich im Zentrum. Da sieht man die vier Himmelsrichtungen entsprechend dem Azimet; die Elevation habe ich vom Rand zur Mitte hin aufgetragen, wie man an der Elevati-

onsskala rechts erkennt. Diese muss man sich um den Mittelpunkt rotierend vorstellen. 90° Elevation ist dann über mir, d.h. im Mittelpunkt des Achsenkreuzes. So habe ich die Kugelkoordinaten auf der Papierfläche abgebildet. Bild 3 zeigt den Zeitraum von etwa 7 h am 22. Januar 2010. Die Farbe stellt die Empfangsfeldstärke nach der unten gezeigten Farbskala dar. Die rote Farbe (geringe Feldstärke) zeigt Abschattungen durch Gebäude und Bäume an. Am Rand hören die Bahnkurven auf, da die Satelliten am Horizont nicht zu empfangen sind. Jede volle Stunde gebe ich neben der Bahnkurve die PRN aus.

Bild 4 zeigt eine längere Aufzeichnung von Sonnabend bis Dienstag. Man sieht also jeden Satelliten etwa sechsfach, da er die Erde jeweils in ungefähr 12 h umkreist. Hier erkennt man gut, dass die Satelliten einen Bogen um den Pol machen (Pol-Loch). Das liegt daran,

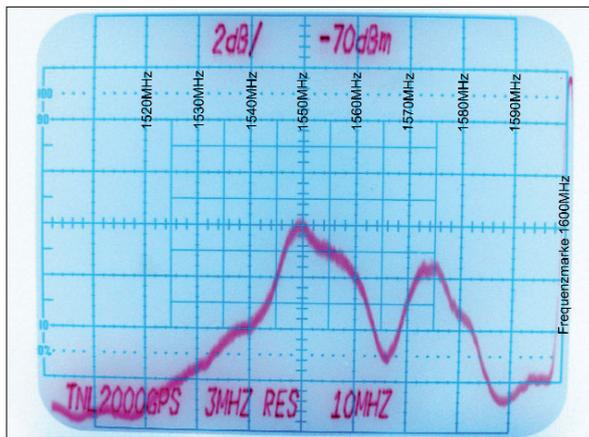


Bild 7: Signalaufzeichnung mit der Antenne TNL-2000

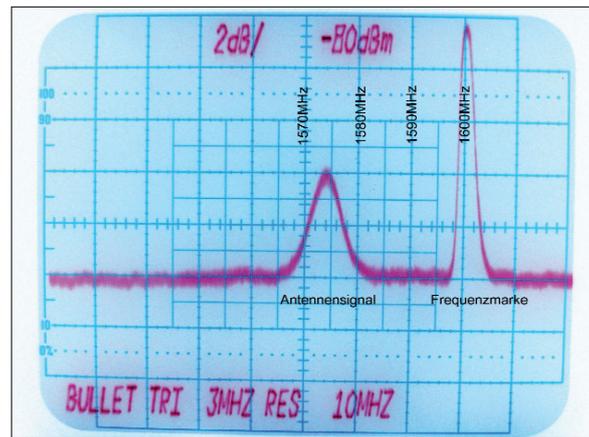


Bild 8: Signalaufzeichnung mit der Antenne Trimble Bullet III

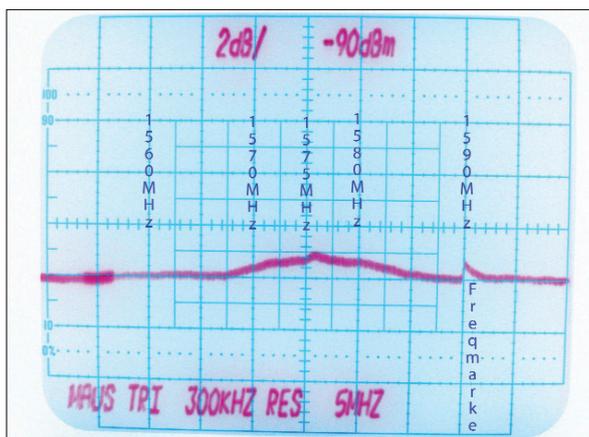


Bild 9: Signalaufzeichnung mit der Antenne Trimble 28367-17

dass sie etwa 55° gegen die Äquatorebene geneigt abgeschossen wurden. Der Azimut ist 0° im Norden, 90° im Osten, 180° im Süden und 270° im Westen. Bei diesen Bahnkurven sieht man, wo der Empfang am besten und am schlechtesten ist. An Ost- und West-

seite stehen abschattende Gebäude, die den Pegel dämpfen, und im Süden steht ein Baum. Im Nordwesten sieht man außen (bei kleiner Elevation) rote Punkte, die noch schlechtere Feldstärke bedeuten – da ist das größere Gebäude.

Verstärker) werden mit 5 V vom Thunderbolt gespeist. Das Auswertegerät ist ein Spectrum Analyzer Tek 7L12.

Bild 7 informiert über das Signal der Antenne TNL-2000 (Trimble 16248-20). Da ist zunächst das Hauptsignal, das zivile L1-Signal mit einer Trägerwelle von 1575,42 MHz, das mit dem normalen GPS-Empfänger ausgewertet wird, hier mit etwa -80 dBm. (Das Empfangssignal hat auf der Erde eine Feldstärke von etwa -130 dBm). Aber links daneben liegt noch ein zweites, höheres Maximum bei 1550 MHz (-78 dBm). Wofür das gut ist, habe ich noch nicht herausgefunden. An der rechten Kante des Bildes sieht man die Hälfte meines 1,6-GHz-Referenzsignals, erzeugt mit einem R&S-Messsender SMS2 plus Tunnelioden-Verdoppler.

Nun in **Bild 8** zur Antenne Trimble Bullet III (weißer Pilz, enthält einen 35-dB-Verstärker): Der große Peak rechts ist wieder das 1,6-GHz-Referenzsignal, und der Peak bei 1575,42 MHz ist das L1-Nutzsignal mit etwa -92 dBm. Jetzt noch die Maus-Antenne Trimble 28367-17 (**Bild 9**): Das Signal ist etwas schwach (etwa -105 dBm, 2 dB pro vertikale Skalenteilung), aber sonst so wie bei der Bullet-Antenne.

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Mailingliste der Time Nuts: <http://leapsecond.com/time-nuts.htm>
- [2] Hinweise zu Trimble-Thunderbolt-Modulen: www.leapsecond.com/tbolt-faq.htm, www.prc68.com/I/ThunderBolt.shtml, <http://trl.trimble.com/docshare/dsweb/Get/Document-10001/ThunderBoltBook2003.pdf>, www.vk4adc.com/gpsdo.php, www.ko4bb.com/Timing/Distribution_Amp
- [3] <http://tinyurl.com/6kdu6sp>
- [4] http://de.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [5] www.thegleam.com/ke5fx/heather/readme.htm
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Allan-Varianz>
- [7] <http://gpsd.berlios.de/Linux>
- [8] <http://stores.ebay.de/Rubidium-and-GPS-DO-From-China>
- [9] <http://gpsdo.i2phd.com/>
- [10] <http://tinyurl.com/3ydcll>

Weitere Webseiten zu GPS:

- [11] www.ae5d.com/nofrills.html
- [12] Air Force: www.ion.org/sections/southcalifornia/L1Cbrief.ppt
- [13] GPSDOs: www.jrmiller.demon.co.uk/projects/ministd/frqstd.htm
- [14] GPSDO Selbstbau: [http://gpsdo.i2phd.com/\(G4JNT\)](http://gpsdo.i2phd.com/(G4JNT))
- [15] GPS-Antennen: www.highbeam.com/doc/1G1-155520615.html
- [16] Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System: <http://tf.nist.gov/general/pdf/1424.pdf>

Dopplereffekt

Der Dopplereffekt zeigt mir, mit welcher Geschwindigkeit der Satellit auf mich zu bzw. von mir weg fliegt. Seine Geschwindigkeit beträgt etwa 3,9 km/s, die Doppler-Abweichung von ±4 kHz entspricht einer Relativgeschwindigkeit von ±761 m/s, was sich mit Cosinus/Sinus-Satz nachrechnen lässt. Rot ist in **Bild 5** die Rotverschiebung gekennzeichnet, d.h., der Satellit fliegt von mir weg (Doppler-Abweichung negativ).

Man sieht in **Bild 6** schön, dass die kompletteren Satellitenbögen auf der einen Seite blau, auf der anderen rot sind. Das bedeutet, dass sich die Satelliten im einen Fall auf mich zu bewegen, im anderen von mir weg.

Das Antennensignal

Es wurden drei Antennen getestet: die Flugzeugantenne TNL2000, die Antenne Trimble Bullet III und die Maus-Antenne Trimble 28367-17. Sie (ihre

Alternative Hardware

Statt des Trimble Thunderbolt kann man auch den Empfänger Rockwell GPS Jupiter TU30 nehmen. Der hat statt des 10-MHz-Ausgangs des Trimble Thunderbolt einen 10-kHz-Ausgang, wird aber schon für unter 50 € angeboten (z.B. [8]), hierzu siehe auch [9] von G4JNT oder [10].

Fazit

Man sieht also, eine gute Normalfrequenzquelle ist mittlerweile bezahlbar.