

Kunsten å forstå radiostøy

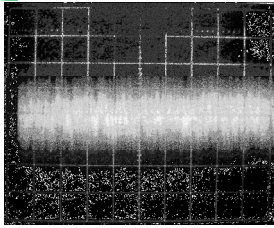


fig 1 Støy

LA3EQ
Jan Henning Holmedal Lustrup
Stavanger 2007



V4.0

Støy har eksistert siden tidens morgen på godt og vondt.

Radiostøy er ikke bare "heavy metal" musikk på P4 fra stue-radioen, men også molykulær /galaktisk/kosmisk partikkel/elektromagnetisk stråling. Ulempene med elektromagnetisk støy er lett å forstå, hvorfor i all verden vil vi lage noe som støyer med vilje? Har støy noen fordeler? Så hvorfor lager vi støygeneratorer, og hva brukes så disse støysignaler til? Og hva med naturlig elektromagnetisk støy? Kan det brukes til noe?

Vi har naturlig støy som genereres over alt. Alt som har en masse, vil generere støy, fra langbølge til lagt opp i mikrobølge regionen. Alt omkring oss (du selv inkludert) generer elektromagnetisk støy også kalt svart legeme stråling "black-body radiation". Jeg snakker om elektromagnetisk støy der amplituden og fasen i hvert gitt øyeblikk endrer seg tilfeldig og uforutsigbart. Når frie elektroner kolliderer og gnisser mot hverandre dannes det varme, og det kalles da for termisk støy. Temperatur og det termiske støynivå henger sammen. Økes temperaturen, så øker støyen. Frekvensen på denne termiske støyen variere fra lavfrekvens langt opp i mikrobølge området. Da dette kan sammenlignes med hvit lys (som inneholder alle farger eller frekvenser) kaller vi også dette for hvitstøy.

Radiostøy / lys støy fra stjernene (og vår Sol) er ikke ren støy, som en skulle tro. En spektral analyse av støyen viser mange linjer med manglende signal. Dette er spektral linjer. Hver linje representere en bestemt energi mengde. Det er bindingsenergien til elektronene til atomene i grunnstoffer som Solen er bygget opp av. Vi kan på en måte kalle dette for en "finger avtrykk" av vår Sol. Av den kan vi lese hvilken gasser og materie den er bygget opp av.

Likeledes kan vi lære om andre stjerner i verdensrommet ved å la lyset til den en stjerne via ett kraftig teleskop falle på en prisme, og så tar vi bilde av dette fargerike spekteret av "lys støy". Farge spektral linjene er informasjon som forteller oss om sammensetningen til stjernen, og eventuell rød/blå farge forskyvning vil forteller oss om hastigheten til/fra oss den har pga doppler effekten.

På akkurat samme måte måler vi radiostøyen fra stjerner for at spektral linjene vil fortelle oss om sammensetningen til stjernen og de gasser den beveger seg i nærheten av.

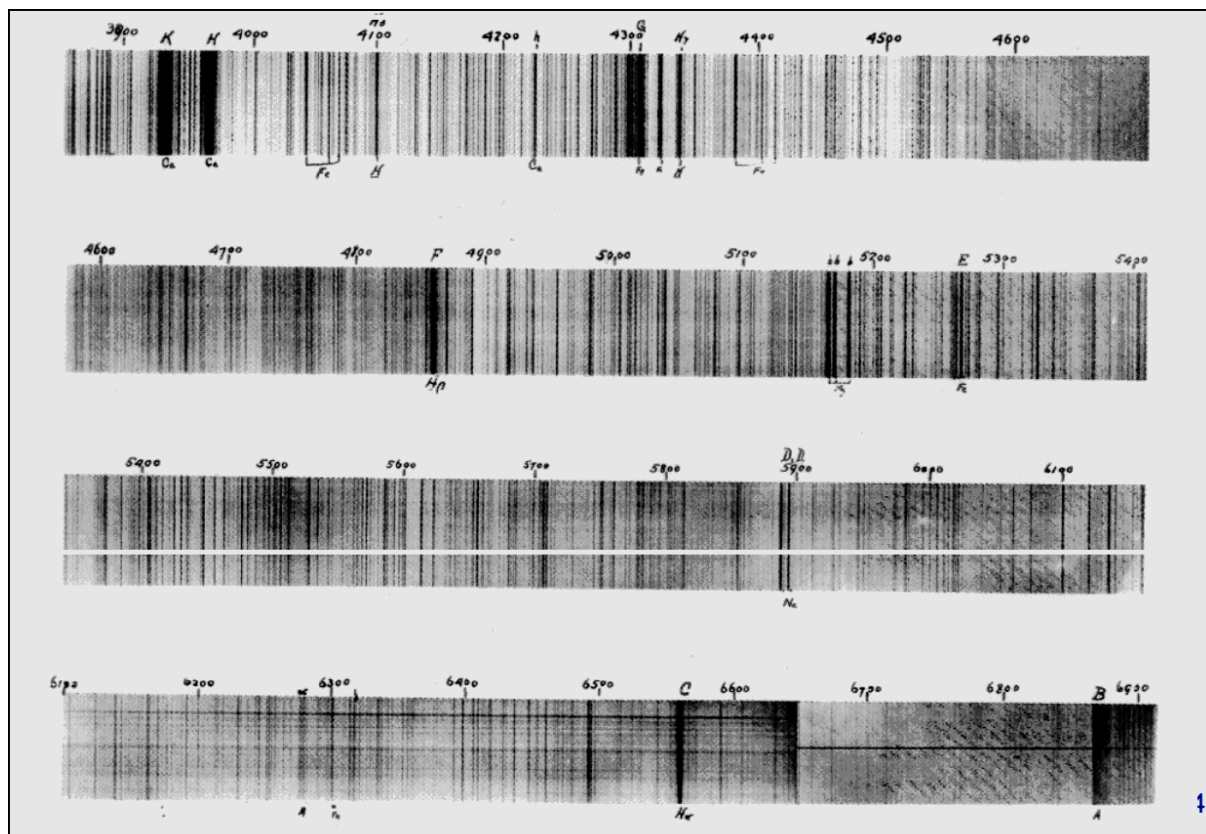


Fig 2 Støy fra Solen

Støy i en motstand:

En motstand som inneholder frie elektroner vil elektronene bevege seg i tilfeldige retninger grunnet termiske energi. I ethvert gitt øyeblikk vil det være flere elektroner i en ende av en motstand enn den andre og dette resultere i en ubalanse som utgjør en svak spenning potensial over motstanden, noe som endre seg til stadighet og over tid så vil potensialet mellom pluss og minus jevne seg ut til null Volt. Igjen så vil spennings amplituden i ethvert øyeblikk være direkte avhengig at motstandens temperatur. Dette kalles for ”Johnson Noise”.⁽¹⁾

Effektivverdi RMS (Root Mean Square):

Siden spenningspotensialet er under stadig forandring, hvordan angi vi verdien? Her er det at RMS (kvadratroten av gjennomsnittet av kvadratene av spenningene) kommer inn i bildet. For en vanlig sinusbølge vil RMS være 0,707 ganger spiss verdien (pluss og minus målt i forhold til 0 volt). Dette gjelder ikke for tilfeldig støy. Kvadratet til en tilfeldig støypuls sin spenning vil alltid gi en bølgeform som har positiv verdi. Tar en så den positive kvadratroten til denne i løpet av minst en hel bølge gir oss RMS verdien. Vi kaller dette for RMS termisk støy spenning (E_n) og den er proporsjonal (stiger/synker på likt med) med temperaturen til motstanden. Vi kan tenke oss at denne motstanden er en støyspennings motstand i serie med en støy fri motstand. E_n for vi ved:

$$E_n = \sqrt{4k_B TR\Delta f}$$

E_n = RMS er den termiske støy spenningen

k_B = Boltzmann's konstant ($1,38 \times 10^{-23}$ Joules/Kelvin)

T = temperaturen til motstanden i Kelvins

R = resistansen i Ohm

Δf = båndbredde i Hertz, der spenningen er målt.

Ifølge Wikipedia ⁽²⁾ (Internettets frie encyklopedi) kan det sies at denne effektverdien vil også kunne uttrykkes for ikke-repetitive signaler med faste statistiske karakteristika som støysignaler.

Støyeffekt og Temperatur:

Altså, støy spenningsnivået er proporsjonal med temperaturen, Vi kan derfor bruke kelvin som mål for et gitt støynivå. Merk at Kelvin og Celsius har samme skala, men at 0 Kelvin tilsvarer $-273,16$ °C. ⁽⁸⁾ Kelvin er enheten for temperatur på den absolutte temperaturskalaen. En grad Kelvin (1 K) er det samme som 1 grad Celsius (1°C). Vi ser fra definisjonen at en temperatur på 0K på denne skalaen svarer til at alle partikler ligger helt i ro, noe som aldri er mulig ifølge usikkerhetsprinsippet i kvantemekanikken ⁽⁴⁾. Det vil alltid være en liten ubestemmelig bevegelse som svaret til en liten mengde energi. Altså, Kelvin er mål for **absolutt temperatur**, mens Celsius er relativ temperatur skala (sett i forhold til frysepunktet 0° og kokepunktet 100°C til vann).

Så kan en spørre om hvor mye effekt kan en støykilde lever til en last med samme impedansen?

Effekten levert fra generatoren (E_n) er nå jevnt fordelt over kilde resistansen (R_S) og lasten (R_L)

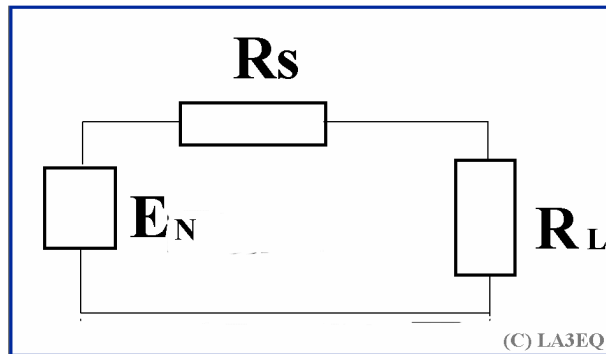


Fig3 Signalkilde og resistans komponenter

Vi kan nå si at avlevert støyeffekt **P** til lasten **R_L** er fra denne formel :

$$P = k T B$$

Igjen ser vi at støyeffekten som avgis kan ansees som ekvivalent temperatur i Kelvin.

For esk. La oss si at en mottaker med 10 kHz filter med en 50Ω antenne inngang som er tilsluttet en 50Ω motstand.

Denne motstanden har en temperatur på 80° F eller i Celsius blir det: $(80-32) \times 5/9 = 26,67^\circ \text{C}$.

Omregnet til Kelvin blir temperaturen $273,16 + (5/9)(F-32) = 300 \text{ Kelvin}$. Hvor stor er effekten inn på mottakeren?

Tar vi formelen **P = kTB**, får vi da:

$$P = kTB = (1,38 \times 10^{-23}) (3 \times 10^2) (1 \times 10^4) = \underline{4,14 \times 10^{-17} \text{ Watt}}$$

P = Watt, k= Boltzmann's konstant, T= temperatur i Kelvin og B= båndbredde i Hz.

Ikke rare effekten inn til mottakeren! Men likevel nok for en følsom mottaker med lav støyttall. Hvis vi nå tenker oss at vi teoretisk varmer opp motstanden til 27.760° C (50.000 °F) , og under forutsetning av at motstandsverdien ikke endre seg, vil mottakeren nå motta en effekt på $6,9 \times 10^{-15} \text{ Watt}$. Hvis vi nå ønsker å regne oss frem til hvilken spenning mottakeren har ved antenne inngangsmotstanden kan vi det.

$$E = \sqrt{RP}$$

$$E = \sqrt{50 \times 6,9 \times 10^{-15}}$$

Utrekningen blir slik: $E = 0,59 \times 10^{-6} \text{ Volt} = \underline{0,59\mu\text{Volt}}$

Over en halv milliontedel av en Volt. Hvis vi nå stiller inn mottakeren til 21MHz vil støyen vi hører hovedsakelig være fra den varmen motstanden. Dersom vi kobler vekk motstanden og setter inn en 4 el. Yagi antenne for 21MHz båndet, som peker oppover mot verdensrommet, vil støynivået ikke endre seg noe særlig. Det er fordi den galaktiske bakgrunns støyen på 21MHz er omtrent 50.000 K. Vi sier nå at antenntemperaturen grunnet galaktiskstøy er nå 50.000 K. Det er ikke det samme som å si at det vi mottar *er* termiskstøy fra en kilde på 50.000 K, med heller at støynivået *tilsvare*r en termisk kilde på 50.000 K.

Egentlig så er strålingsmekanismen for galaktiskstøy bare en av flere typer, for eks. en synkrotronstråling fra relativistiske elektroner som roterer i en spiralformet bane i et galaktisk magnetisk felt!⁽⁵⁾

(Synkrotronstråling er røntgenstråling som er 100 millioner ganger kraftigere enn strålingen fra et alminnelig røntgenrør ⁽⁶⁾.)

Effekt målinger av radiokilder:

For å regn ut "sender effekten" av en fjern radiokilde kan vi bruke formelen: $P = kTB$

Vi forutsetter følgende:

- 1) Signalkilden ligger midt i beam headingen vår.

- 2) Vi tar ikke hensyn til polarisasjon.
- 3) Vi tar ikke hensyn til tap i koaksialkabel.
- 4) Vi tar ikke hensyn til bakgrunnsstøy fra verdensrommet, eller annen kilde.

Vår antennes gain (G) kan vi regne ut når vi vet antenne areal (A_e) og bølgelengde (λ), fra følgende formel.

$$G = 4\pi A_e / \lambda^2$$

Forsterkningen er for en isotropisk kilde og måle resultatet blir i dBi. Vi regner om til vanlig dB slik:

$$G = \text{Log}^{-1}(9,3/10)$$

For eks. ved en antenne gain på 9,3dBi vil vi kunne regne den om til å bli 8,5dB.

A_e for to dipol antenner i fase blir:

$$A_e = G\lambda^2/4\pi$$

Som da blir $8,5 \times 15^2 / (4 \times 3,14) = \underline{150\text{m}^2}$

Jansky:

Å måle støy effekt i Watt blir litt feil ved ør små effekter og ta ikke høyde for bredbånd signaler, som for eks. den støyen en måler fra verdensrommet. Da er det bedre å bruke måle enheten **Jansky**. Denne måleenheten er oppkaldt etter Carl Jansky, til ære for hans oppdagelsen av utenomjordisk støy, som han gjorde ved en tilfeldighet i 1930 årene. Denne måleenheten er nå dominerende innen radioastronomi.

Èn Jansky er definert som:

$$1 \text{ Jansky} = 10^{-26} \text{ W/m}^2 \text{ Hz}$$

Altså, 10^{-26} Watt elektromagnetisk energi pr kvadratmeter antenne areal, mottatt i èn Hertz båndbredde. Dette muliggjør èn felles måleenhet for alle størrelser av antenner og forskjellige radio mottakers båndbredder verden over. Genialt...ikke sant?

Antall Jansky i vårt regnestykke blir da blir da:

$$J = 4,14 \times 10^{-14} / (150 \times 6000) = 4,5 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2 \text{ Hz} = \underline{4,5 \text{ million Jansky.}}$$

Vi kan også bruke måle enheten flux density "S" som er Watt/m²Hz for meget sterke signaler. I fig 1 ser vi en oversikt laget av YU1AW⁽³⁾ om forholdet naturlig støy fra verdensrommet målt i Jansky kontra frekvens fra ca 30MHz til over 10GHz. Kurvene viser Jansky eller flux density $S \times 10^{-26}$ til forskjellige kjente radiostøykilder i verdensrommet.

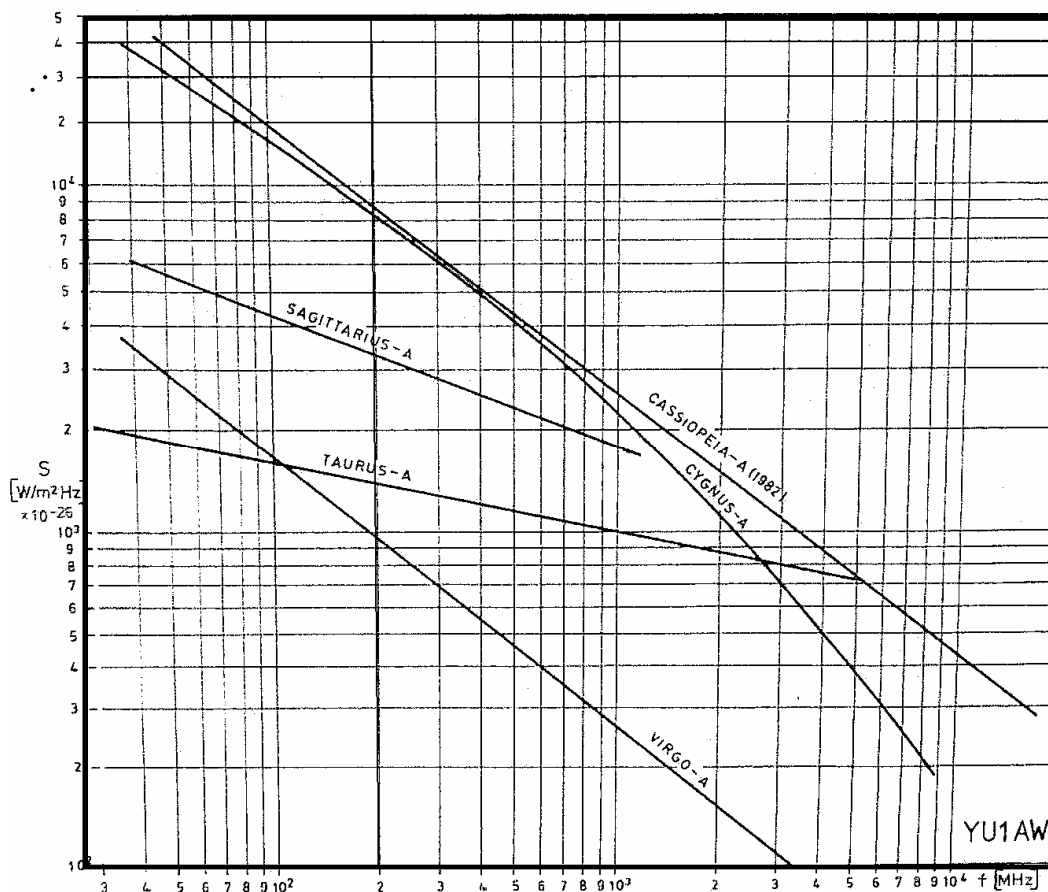


Fig 4. Oversikt av støy fra verdensrommet kontra frekvens.

Mottakerens egenstøy:

Den perfekte mottaker vil bare forsterke de signaler som finnes kun på antenne inngangen og ingenting annet. Men slik er det ikke i virkelighetens verden. Alle mottakere tilfører signalet noe støy. Noen mer enn andre. Felles for alle er at det mottatte signalets kvalitet blir forringet. Ved kraftige signaler blir egenstøyen liten eller umerkbar i forhold, men ved svært svake

signaler som EME eller annen DX blir egenstøyen merkbar og kan i noen tilfeller overdøye radiosignalene vil lytter på. Denne egenstøyen kommer fra alle mottakerens kretser og trinn, men viktigste delen er radioens første RF forsterker, da mottakerens egenstøy kan aldri bli lavere en denne. Vi sier at mottakerens første steg (antenne preamp'en) stort sett angir mottaker systemets egenstøy grense. En annen ting å ta høyde for er hvor peker antennen? Dersom vi har en ultra følsom preamp på la oss si 0,35dB, hjelper dette ikke noe særlig på tropo, troposcatter eller annen DX forhold der antennen vår peker mot horisonten! Dette grunnet blackbody stråling fra bakken, so nå dekker halve antenne åpningen. Hvis vi derimot peker vekk fra bakken og oppover mot en satellitt eller annen radiokilde i verdensrommet, kan vi ha full utbytte av et så lavt støytall. Bakken, bygninger og trær har nemlig et temperatur på 270 K. Peker antennes hovedlobe rett mot horisonten vil antennen kunne se halve denne temperaturen i sin nedre lobe halvdel, og halvparten av temperaturen av det som befinner seg i øverste halvdel av antenneløben. I tillegg kommer støy inn fra de sideløber som ser bakken/bygninger osv! På samme måten med meget store EME antenner der hovedloben dekker månens radio-diameteren (Denne er noe større enn det optiske og synlige diameteren på 0,5°), vil nå stråling fra månen (også 270 K) nå sette en begrensning om hvor lav støytall vi har ubytte av i vårt mottaker system. Likeledes med mindre antenne systemer for EME, må en ta hensyn til hvilken himmelretning antennen peker på, da sterke radiostøykilder bakenfor månen vil overdøve de svake EME ekkoene.

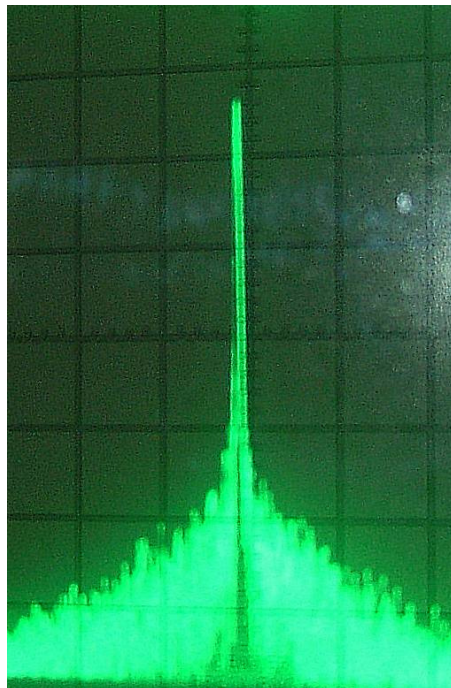


Fig 5 Sidebåndstøy på 10GHz pga PLL jitter og forsterket av LO frekvensmultiplikasjon.

En annen begrensende faktor i mottakeren er sidebåndstøy. Dette er fasestøy fra lokaloscillatoren som da blander seg med signaler og annen støy fra blandettrinnet inngangen. Krystallstyrte oscillatorer har lite fasestøy, mens PLL oscillatorer kan har meget stor fasestøy grunnet mange og meget korte fasekorreksjoner for å holde seg på nøyaktig frekvens over tid. Denne fasestøyen kan være en alvorlig begrensende faktor dersom man bruker frekvensmultiplikasjon i en LO kjede.

Støymåling:

Støytallet (noise factor= NF) defineres som følgende:

$$NF(dB) = ENR (dB) - 10 \log^{10} (Y_{fact} - 1)$$

For å konvertere ENR om til spektraltetthet (N0):

$$0dB ENR = -174 dBm/Hz$$

Så for å kalkulere støyeffekten (noise power) i et gitt båndbredde (BW) fra støy spektraltetthet:

$$Effekt (dBm) = N0 + 10 \log(BW)$$

Y-Faktor:

Dette er forholdet mellom to støynivå, hvor den ene med støyekilden slått på, og den andre med støy kilden slått av. Det forutsettes at ingen andre faktorer varierer. Dersom støykildene er for eks. Solen, så kan vi sjalte ut antennen via et antennerelè som kobler over til en motstand av samme impedanse (Dikky radiometer prinsippet). Eller så kan vi måle en periode med integrering (for eks. 5 sekund), sample verdien, deretter snu antennen vekk fra solen til en relativ støysvak del av verdensrommet og sample på nytt like lenge. Forholdet mellom disse to målinger er også Y-Faktoren. Fordelene her er at all felles støyen i antenne relè, fødekabel, preforsterker, konverter, mikser, post forsterker og detektor har lik verdi og vil utligne hverandre. Det er kun signalene utenfra som vil vise igjen. En vanlig metode for EME amatører for å teste ut følsomheten i antenne/mottaker systemet sitt er å finne sitt Y-faktor, ved å måle solstøyen på LF utgangen i dB eller uV med en multimeter (AGC'en må være slått av), som måle igjen når antennen er snudd vekk fra Solen. La oss si du måler 3,4dB mot Solen, og 2,1dB vekk fra Solen, så er din Y-Faktor $3,4 - 2,1 = 1,3dB$. En må huske på at dette er relative målinger av en støykilde. Skal en måle absolutte verdier av støy, så må en sammenligne målte verder med en kjent kalibret støy kilde(ENR).

Støygeneratoren som støy kilde:

En enkel støy kilde er som nevnt Solen, men også jorden stråler ut støy da den har en temperatur på 290 Kelvin. Men for laboratorier målinger bruker vi en kalibrert støygenerator, eller en kostbar støyalls måleinstrument (PANFI = Precision Noise Figure Indicator). Vi kan også lage en billig og enkel støygenerator av en diode. Jeg skal komme tilbake med en artikkel i Bullen med en bygge beskrivelse på en god diode støygenerator som vil virke langt oppover i mikrobølge regionen og som vi vil kunne bruke til måling og kalibrering av utstyr.

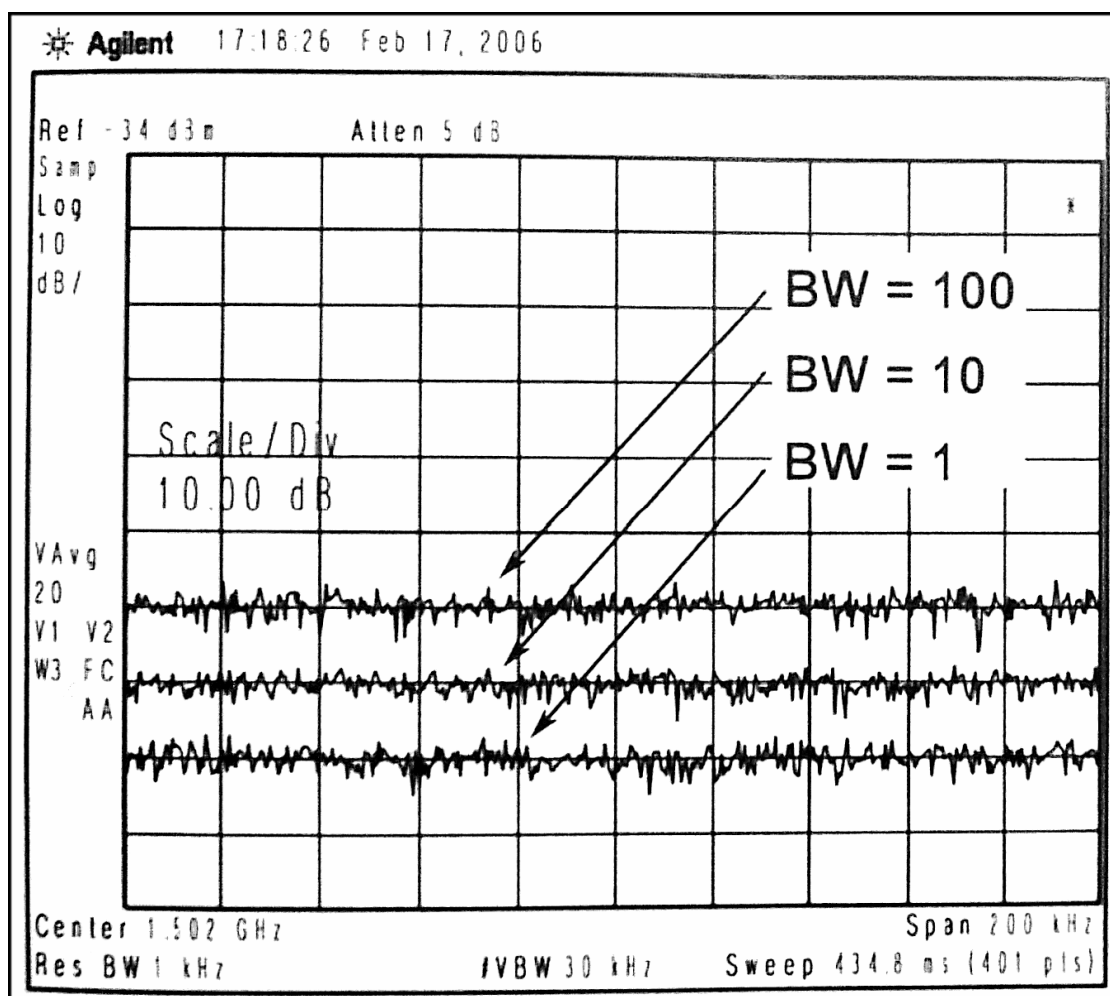


Fig 6 Støy nivået sett i tre forskjellige båndbredder. 1kHz, 10kHz og 100kHz.

Når det gjelder en støygenerator så vil den sende ut på *samlige frekvenser over hele spektrumet på en og samme tid*. Her nytter det ikke med benevnelsen dBm (desibel i forhold til 1 milliWatt). Til støygeneratorer bruker vi betegnelsen ENR (Excess Noise Ratio) med formelen dBm/Hz effekt spektraltetthet. ENR benytter to tilstander, diodestrøm "på" og diodestrøm "av". I diodestrøm stilling "av" gir dioden bare -174dBm/Hz, noe som tilsvarer

støyen av en motstand med en temperatur av 290°K. Så, hvis en sier at en har en ENR på 32dB (-174dBm/Hz - 32dB = -142dBm/Hz) , så har samtidig et effekt spektraltetthet på -142dBm/Hz. Dersom vi måler i en båndbredde på 10Hz sier har vi støyeffekt på -132dBm/10Hz, (10 ganger endring av bredde = 10dB), likeledes måler vi i en båndbredde på 10kHz er støyeffekten nå på -102dBm/10kHz. (Dette er 1000 ganger større båndbredde! Husk at 1000ganger = 30dB endring). Se fig 4 som viser 10dB, 20dB og 30dB endringer.

Så, hva har vi lært om støy?

Er Pavarotti på P4 en søndags formiddag regnet som støy? Vel, det kommer an på ørene som lytter og ikke lydkilden.

KONVERTERINGS TABELL

Celsius	=	$(F-32) \times 5/9$
Fahrenheit	=	$(C \times 9/5) + 32$
Kelvin	=	$(F + 459,67) \times 5/9$
Kelvin	=	$C + 273,15$

Kilder:

- 1) "http://www.physics.ucdavis.edu/Classes/Physics122/Phys122_Johnson_Noise.pdf"
- 2) "<http://no.wikipedia.org/wiki/Effektvverdi>"
- 3) "<http://www.qsl.net/yulaw/engl.html>"
- 4) "<http://www.astro.uio.no/ita/undervisning/AST1010/f04.pdf>"
- 5) "Listening to Jupiter, a guide for the amateur radio astronomer", R.S. Flagg, Radio-Sky publishing 2005, s10-3'
- 6) "<http://forskningsradet.ravn.no/bibliotek/forskning/199604/1996040901.html>"
- 7) "Receiver Noise Temperature, the Quantum Noise Limit, and the Role of the Zero-Point Fluctuations", 8th Int. Symp. On Space Terahertz Tech., March 25-27, 1997, pp. 101-111.
- 8) "Stråling og spektrallinjer", Forelesning 4- AST1010, Uio , 2005
- 9) "Noise Figure Measurement Accuracy- The Y-Factor Method" Application Note 57-2, Agilent Technologies 2004
- 10) "Figuring noise figure", C. Monstein HB9SCT, 2002
- 11) "Radio astronomy 2nd edition", John D. Kraus, Cygnus-Quasar books 1986
- 12) "Antenna Measurements using Sun Noise", Paul Wade N1BWT, 1995,1998 Microwave handbook.
- 13) "Three methods of Noise Figure Measurement", Maxim, App note 2875, 2002
- 14) "An Automatic Noise-Figure Meter", Jim Koehler VE5FP, QEX May/June 2007, pp 39-46
- 15) "A Noise Generator with Defined Noise Power for Applications up in the Microwave Range", Harald Fleckner DC8UG, VHF Commucations, 3/1993, pp 137- 145

Spørsmål eller kommentarer kan rettets til "lustrup@start.no"