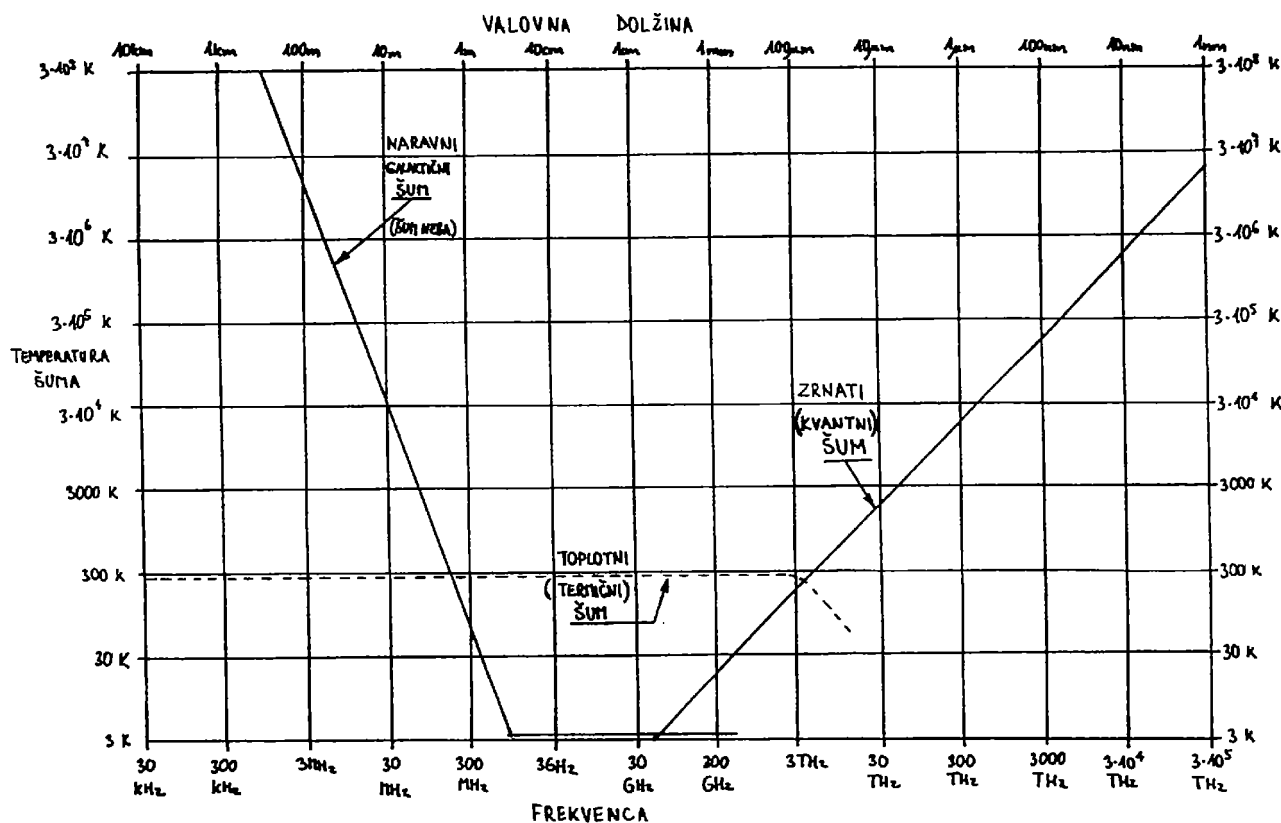


2. Toplotni šum v radijskih zvezah

2.1. Motnje in šumi v radijskih zvezah

Ena od osnovnih omejitev zmogljivosti katerekoli zveze za prenos informacije so neželjeni signali, ki se pojavijo v sprejemniku. Neželjene signale običajno delimo na motnje in šume. Motnje (presluh) povzročajo drugi uporabniki enakih ali podobnih vrst zvez. Šumi so naravna omejitev zvez in so vedno prisotni ne glede na ostale uporabnike podobnih vrst zvez. Občutljivost sprejemnika je torej omejena s šumi, saj število ojačevalnih stopenj znotraj sprejemnika danes zagotovo ni več omejeno s ceno sprejemnika.

Nastanek šuma je lahko vezan na lastnosti uporabljene fizikalne veličine za prenos informacije. Elektromagnetno valovanje je naprimer sestavljeno iz končnega števila fotonov, kar koristnemu signalu dodaja zrnati (kvantni) šum. Ker se z rastočo frekvenco zvišuje energija posameznih fotonov, se pri enaki moči signala manjša število fotonov. Jakost zrnatega šuma je zato premosorazmerna frekvenci elektromagnetnega valovanja.



Slika 2.1 – Naravni šumi v radijskih zvezah.

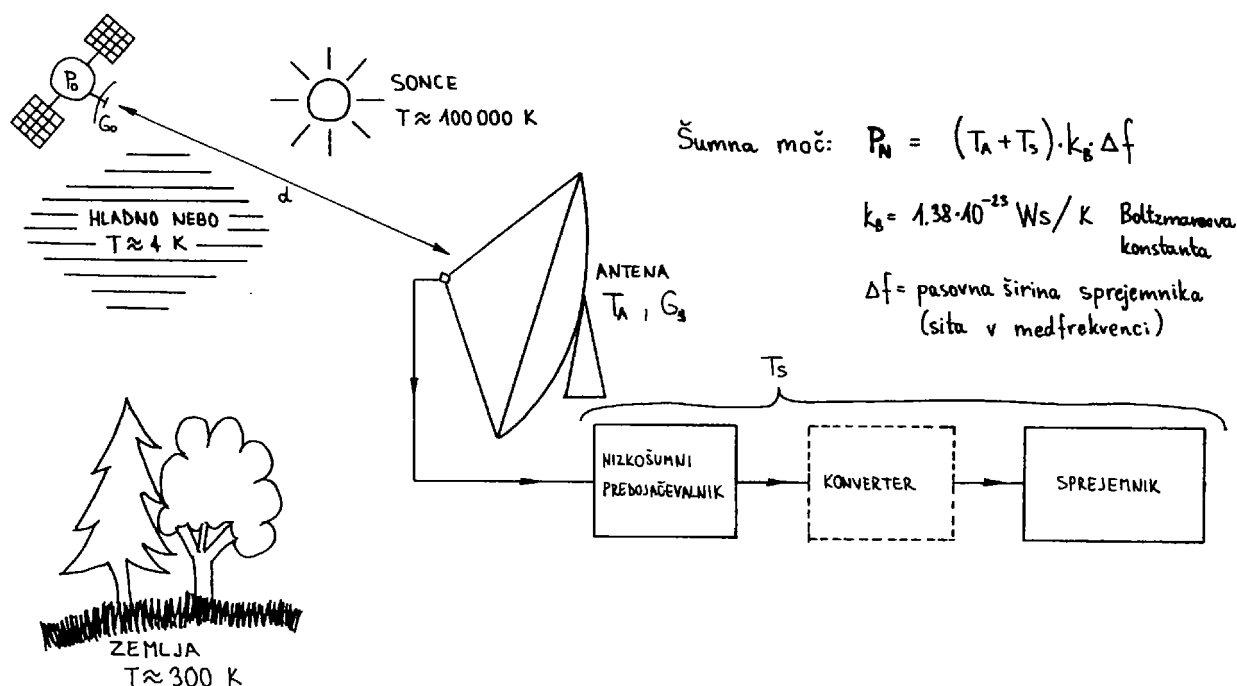
Toplotno sevanje predmetov v okolici zveze kot tudi gradnikov same zveze (oddajnikov, sprejemnikov, prenosne poti) proizvaja toplotni šum. V frekvenčnem področju radijskih (mikrovalovnih) zvez predstavlja toplotno (termično) sevanje daleč največji izvor šuma, kot je to prikazano na sliki 2.1. Jakost šuma v radijskih

zvezah zato opisujemo kar z nadomestno temperaturo šuma sevanja črnega telesa, čeprav izvor šuma ni nujno toplotno sevanje.

Iz slike 2.1 je razvidno, da je v področju radijskih frekvenc (pod 100GHz) zrnati (kvantni) šum zanemarljivo majhen v primerjavi s toplotnim sevanjem predmetov v okolju, v katerem živimo na temperaturi okoli 300K. Zrnati šum lahko postane pomemben edino v radijskih zvezah na zelo visokih frekvencah v vesolju ali na nekem planetu, kjer so temperature precej nižje in frekvence radijske zveze ne omejuje slabljenje ozračja.

Radijske zveze na zelo nizkih frekvencah pod 100MHz lahko moti netoplotno sevanje nekaterih nebesnih teles (Sonce, nekatere zvezde, predvsem pa velika črna luknja v središču naše galaksije, Rimske ceste). Za netoplotno sevanje nebesnih teles je značilno, da jakost hitro upada s frekvenco. Zmogljivost radijskih zvez na frekvencah pod 100MHz sicer omejuje zelo majhna razpoložljiva pasovna širina in so zato danes manj pomembne.

Primer različnih izvorov toplotnega šuma pri sprejemu satelita je prikazan na sliki 2.2. Naravni izvori so lahko zelo šibki, temno nebo seva kot črno telo s povprečno temperaturo komaj 4K. Nekateri naravni izvori so zelo močni, celo mirno Sonce naprimer seva kot črno telo s temperaturo okoli 100000K v frekvenčnem področju okoli 1GHz. V slučaju burnega dogajanja na površini (izbruhi) pa se šum Sonca lahko tudi več kot desetkrat poveča za obdobje nekaj dni. Večina predmetov na zemlji seva s temperaturo okoli 300K oziroma se na njih zrcalijo nebesni izvori šuma.



slika 2.2 - Toplotni šum v radijski zvezi.

Smerni diagram sprejemne antene določa, v kolikšni meri posamezni naravni izvori šuma dodajajo svoj prispevek na vhodnih

sponkah sprejemnika. Nekaj toplotnega šuma dodajo tudi vezja sprejemnika. Toplotni šum sprejemnika je v istem velikostnem razredu kot fizična temperatura sestavnih delov sprejemnika, to se pravi okoli 300K. Z dobrim načrtovanjem sprejemnika lahko dosežemo do desetkrat nižjo šumno temperaturo sprejemnika T_s .

Povezava med šumno temperaturo in močjo šuma je zelo preprosta. Spektralno gostoto šuma dobimo kar iz šumne temperature, pomnožene z Boltzmann-ovo konstanto. Moč šuma dobimo tako, da spektralno gostoto šuma pomnožimo še s pasovno širino sprejemnika (medfrekvenčnega sita).

Ker je toplotni šum povsem naključen signal, ki je vsota velikega števila majhnih naključnih dogodkov, porazdelitev gostote verjetnosti šumne napetosti ali toka ustreza Gauss-ovi porazdelitvi. Jakost šuma preprosto opišemo s povprečno močjo šuma. Ker so različni izvori šuma med sabo popolnoma nekorelirani, preprosto seštevamo moči šumov posameznih izvorov oziroma njihove šumne temperature.

2.2. Šumna temperatura antene

Šumna temperatura brezizgubne antene je odvisna od temperature predmetov, ki se nahajajo v vidnem polju antene. Šumna temperatura brezizgubne antene je tedaj povprečje temperatur vidnih predmetov, uteženo z močnostnim smernim diagramom antene, kot je to prikazano na sliki 2.3.

$$T_{\text{ANTENE}} = \frac{\int_{4\pi} T(\theta, \phi) \cdot |F(\theta, \phi)|^2 \cdot d\Omega}{\int_{4\pi} |F(\theta, \phi)|^2 \cdot d\Omega}$$

Slika 2.3 – Šumna temperatura brezizgubne antene.

Če izgube v anteni niso zanemarljive, moramo pri izračunih upoštevati dvoje. Prvič, izgube zmanjšujejo sevalni izkoristek in dobiček antene in to ne glede na to, če anteno uporabljamo za oddajo ali za sprejem. Drugič, izgube v anteni sevajo dodatni toplotni šum s temperaturo, ki ustreza fizični temperaturi antene in na ta način povečujejo toplotni šum v sprejemniku.

Zmogljivost občutljivega (satelitskega) sprejemnika običajno določimo z razmerjem G/T , kjer je G dobiček sprejemne antene in T vsota šumnih temperatur sprejemne antene in električnih vezij sprejemnika. Končno razmerje signal/šum je namreč na sprejemni strani odvisno izključno od razmerja G/T sprejemnika, kot je to

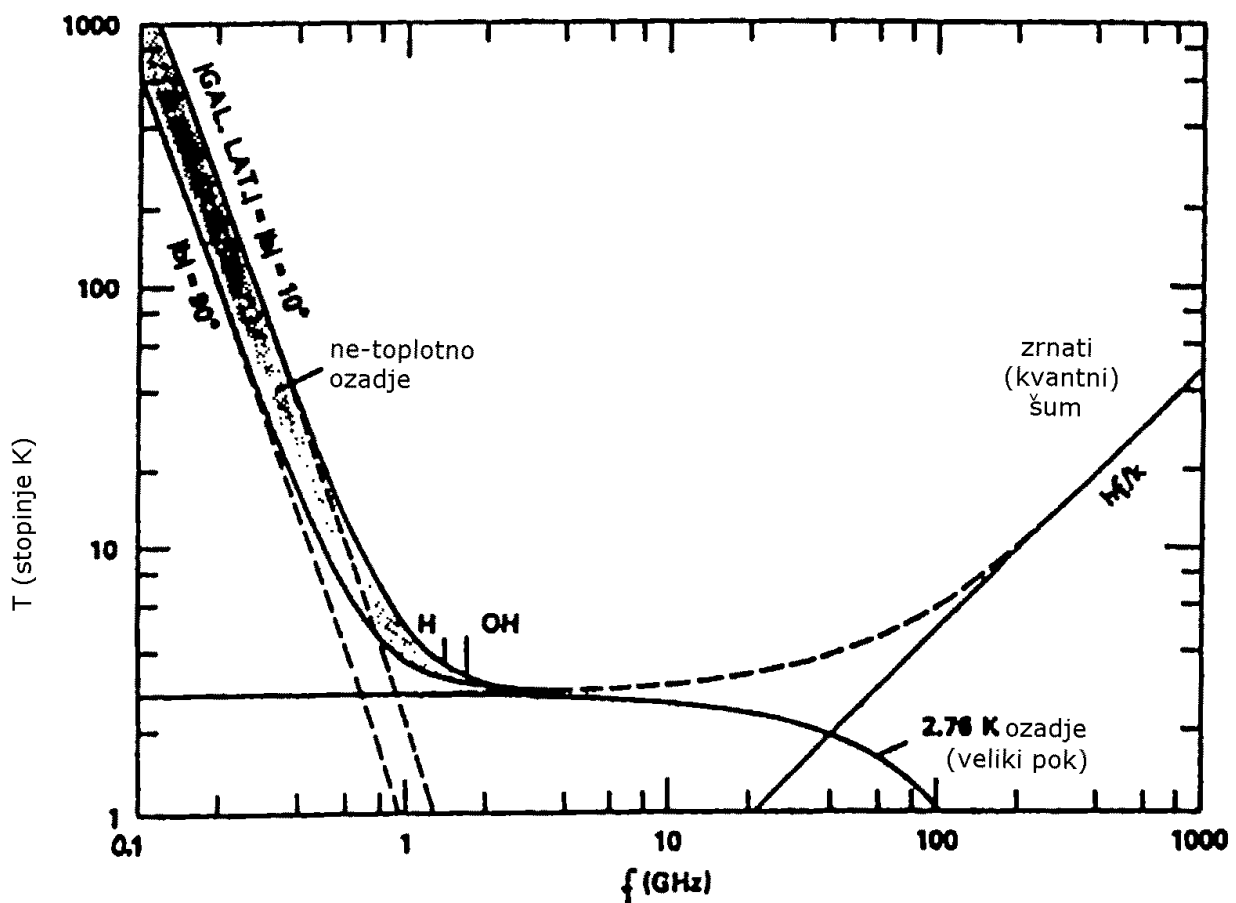
prikazano na sliki 2.4.

$$\frac{P_s}{P_n} = \frac{P_0 \cdot G_0 \cdot G_s \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2}{(T_A + T_s) \cdot k_B \cdot \Delta f} = \frac{P_0 \cdot G_0}{k_B \cdot \Delta f} \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \frac{G_s}{T} \quad ; \quad \frac{G_s}{T} = \frac{G_s}{T_A + T_s}$$

slika 2.4 - Razmerje G/T sprejemnika.

Če naj bo šum električnih vezij sprejemnika čim manjši, načrtovanje sprejemne antene za najboljše razmerje G/T ni tako preprosto. Pri sprejemni anteni moramo izvleči čimvečji dobitek in sevalni izkoristek ter hkrati zmanjšati stranske snope, ki sprejemajo toplotni šum iz vroče okolice.

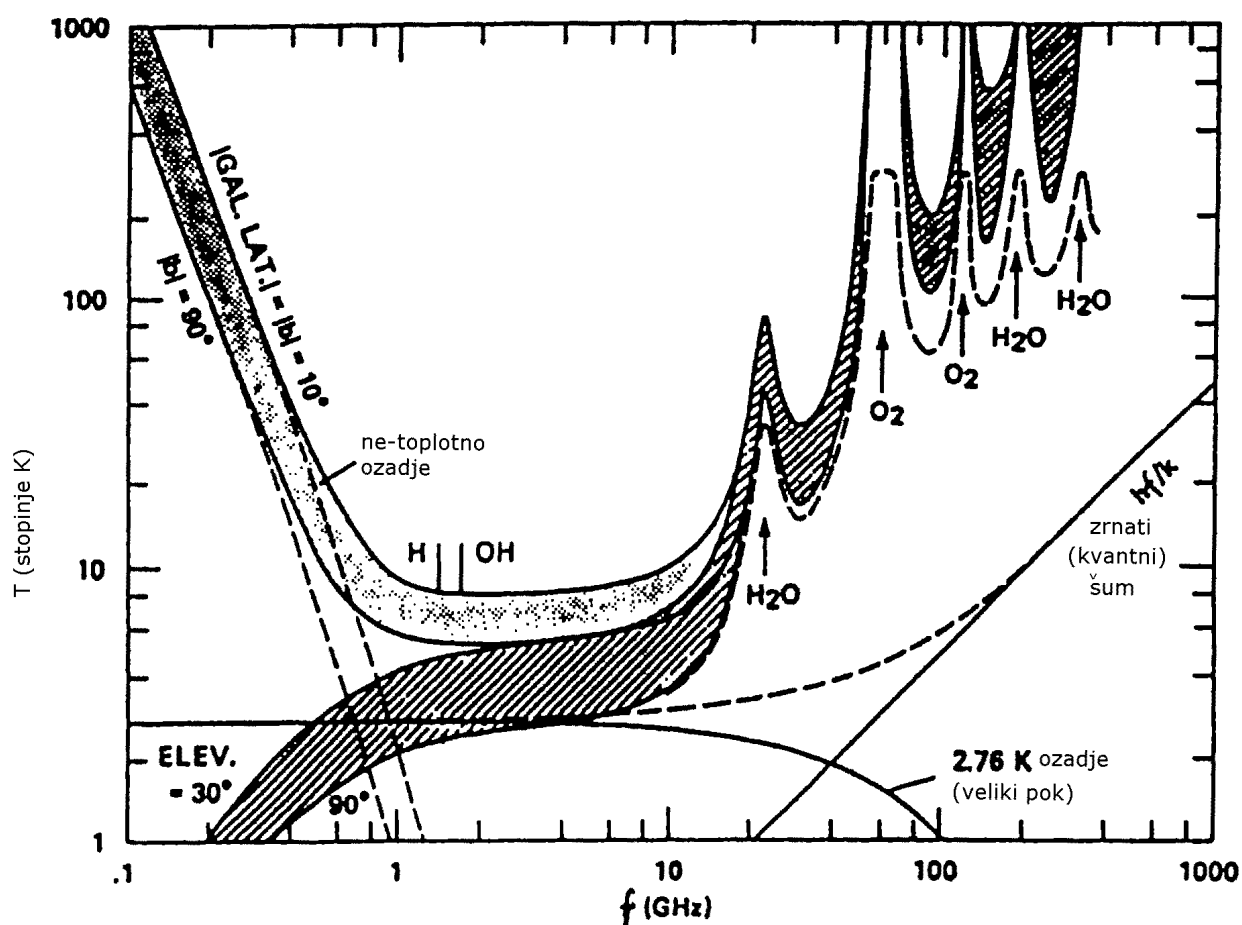
Iz omenjenih razlogov pri satelitskih zrcalnih antenah običajno nekoliko podosvetlimo zrcalo. Dobitek je nekoliko manjši, vendar na ta način močno znižamo stranske snope, ki vidijo toplo okolico (približno 300K) na Zemlji. Šumna temperatura antene v tem primeru ustreza ozadju satelita na nebu, to je običajno manj kot 10K.



slika 2.5 - Radijski šum v vesolju.

Radijski šum v vesolju je sicer zelo majhen, kot je to prikazano na sliki 2.5. Toplotno sevanje temnega neba ima temperaturo komaj 2.76K kot odmev nastanka vesolja z velikim pokom pred 15 milijardami let. Nebesna telesa seveda povečujejo radijski šum, še posebno zelo številne zvezde v ravnini naše galaksije, Rimske ceste. Pravokotno na ravnino Rimske ceste je povprečni radijski šum seveda šibkejši.

Čeprav imamo sprejemno anteno obrnjeno v nebo, mora radijski signal do sprejemnika na Zemlji še skozi zemeljsko ozračje. Na frekvencah pod 30MHz lahko nagaja ionosfera, na frekvencah nad 10GHz pa rezonance nevtralnih plinskih molekul slabijo radijske signale in hkrati sevajo toplotni šum. Skupni učinek vseh teh pojavov je povečan radijski šum, kot je to prikazano na sliki 2.6.



Slika 2.6 – Radijski šum satelitskega sprejemnika na Zemlji.

Radijsko frekvenčno področje na Zemlji v glavnem omejujejo pod okoli 100GHz rezonance molekul kisika O_2 in vodnih hlapov H_2O . Na sliki 2.6 je s črtno črto narisan toplotno sevanje molekul kisika in vodnih hlapov, s polno črto pa navidezno dodatno povečanje šumne temperature zaradi slabljenja koristnega signala.

Končno moramo pri računanju z razmerjem G/T paziti na merske enote. V linearnih enotah ni težav, merska enota za G/T je $[K]$. Vendar se G/T običajno podaja v logaritemskih enotah $[dB/K]$. Pri

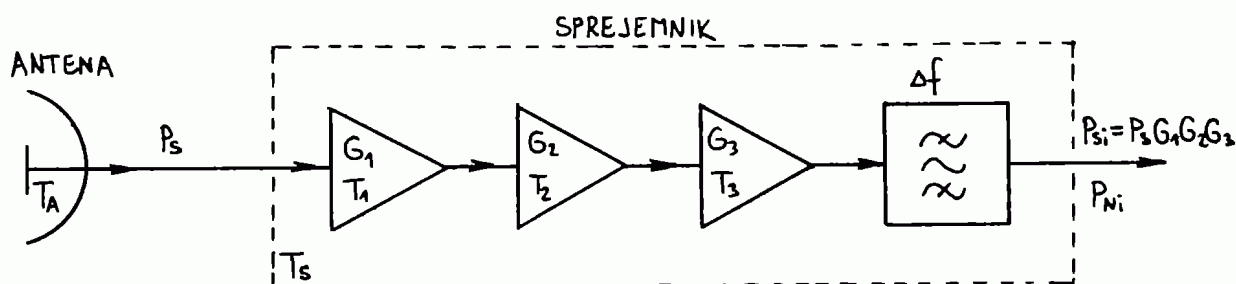
tem moramo obvezno preveriti, če je osnova razmerja pod logaritmom enota 1K ali mogoče sobna temperatura $T_0=293K$?

2.3. Šumna temperatura sprejemnika

Vsak sprejemnik dodaja signalu tudi nekaj lastnega šuma. V primeru smotrno načrtovanega radijskega sprejemnika je tudi šum sprejemnika v glavnem toplotnega izvora. Šum sprejemnika je težje natančno izmeriti kot pa šum antene, saj lahko merimo le na koncu verige ojačevalnih stopenj, frekvenčnih sit in drugih sestavnih delov sprejemnika.

Radijski sprejemniki vsebujejo verigo ojačevalnih stopenj z zelo visokim skupnim ojačenjem, tudi preko 100dB. Ojačenje verige se s staranjem vezij sprejemnika, spreminjanjem napajalne napetosti in temperature okolice lahko precej spreminja. Ker kljub znatnim spremembam ojačenja sprejemne verige ostanejo šumne lastnosti sprejemnika skoraj nespremenjene, velja dogovor, da šum sprejemnika vedno definiramo kot navidezno veličino na vhodnih sponkah sprejemnika (ojačevalnika, mešalnika ipd).

Šumne lastnosti (radijskega) ojačevalnika najpreprosteje definiramo kot temperaturo šuma, ki se navidezno dodaja na vhodnih sponkah ojačevalnika. Dodatni šumni signal seveda lahko izmerimo le na izhodnih sponkah ojačevalnika.



$$\frac{P_{Si}}{P_{Ni}} = \frac{P_s G_1 G_2 G_3}{\Delta f k_B (T_A G_1 G_2 G_3 + T_1 G_1 G_2 G_3 + T_2 G_2 G_3 + T_3 G_3)}$$

$$\frac{P_{Si}}{P_{Ni}} = \frac{P_s}{\Delta f k_B \left(T_A + T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} \right)}$$

$$T = T_A + T_s \quad T_s = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2}$$

slika 2.7 - šum sprejemne verige.

šumne lastnosti sprejemne verige računamo tako, kot je to

prikazano na sliki 2.7. Vse šumne temperature posameznih stopenj preračunamo na vhodne sponke sprejemnika. Na vhodne sponke sprejemnika tudi preračunamo navidezno skupno šumno moč sistema, to je vsoto šumnih moči antene in sprejemnika.

Iz izrazov na sliki 2.7 je razvidno, da daje prva ojačevalna stopnja sprejemnika največji prispevek k šumu celotne verige. Prispevek naslednjih stopenj se manjša sorazmerno z ojačenjem predhodnih stopenj. Razlaga pojava gre v obratni smeri: šum prve stopnje v resnici ojačajo vse naslednje stopnje, šum druge stopnje ne gre skozi prvo stopnjo, šum tretje niti skozi prvo niti drugo in tako naprej.

Pri načrtovanju vezij sprejemnika moramo torej najbolj paziti na šum prve stopnje. Šum naslednjih stopenj je lahko nekoliko višji, tam so druge lastnosti ojačevalnih stopenj bolj pomembne. Končno ne smemo zanemariti položaja pasovnih sit v sprejemniku: na sliki 2.7 je narisano eno samo sito na izhodu sprejemnika, v resničnem sprejemniku pa potrebujemo celo vrsto pasovnih sit med stopnjami od vhoda do izhoda sprejemnika, da preprečimo prekrmljenje sprejemne verige z neželjenimi signali ob upoštevanju tehnoloških omejitev pri izdelavi pasovnih sit.

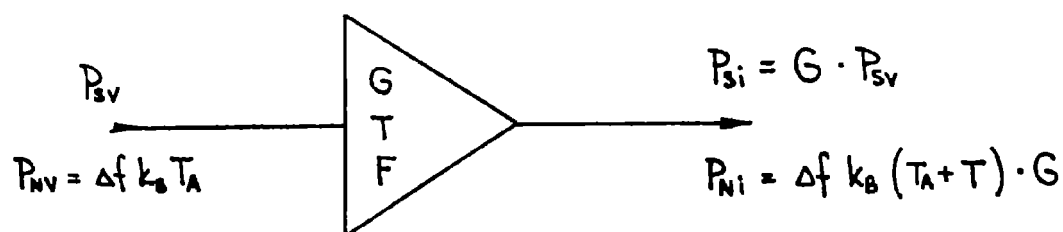
2.4. Šumno število ojačevalnika

Inženirji imajo radi logaritemske enote, še posebno decibele, ker množenje zamenjajo z bolj preprostim seštevanjem in tako olajšajo računanje na pamet. Čeprav šumna temperatura v celoti opisuje šumne lastnosti ojačevalnika, so se izmislili novo, povsem enakovredno mersko enoto z imenom šumno število ali šumni faktor (noise figure), označeno kot razmerje F oziroma v decibelih F_{dB} .

Definicija nove merske enote "šumno število" je bila žal nesrečno izbrana v času, ko radijskih zvez v vesolju še niso poznali in ko je bil šum mikrovalovnih sprejemnikov vsaj za velikostni razred večji od šuma antene. Posledica so pogoste napake pri računanju s šumnim številom, ki so zašle tudi v marsikatero knjigo oziroma učbenik.

Izvorna (protislovna) definicija šumnega števila pravi, da je šumno število preprosto razmerje med vhodnim in izhodnim razmerjem signal/šum ojačevalnika. Razmerje med izhodno in vhodno močjo signala opisuje ojačenje G ojačevalnika, prispevek šuma ojačevalnika pa njegova šumna temperatura T . Za izračun šumnega števila ojačevalnika nam manjka še en podatek in sicer, koliko šuma privedemo na vhodne sponke ojačevalnika $T_A=?$ To zagotovo ni lastnost ojačevalnika, T_A je kvečjemu lastnost antene!

Šumno število ojačevalnika lahko definiramo edino tako, da privzamemo za T_A neko dogovorjeno vrednost, naprimer sobno temperaturo 20 stopinj Celzija, kar ustreza 293K. Takšna definicija šumnega števila ojačevalnika je prikazana na sliki 2.8. Navsezadnje, antene zemeljskih mikrovalovnih zvez s svojim smernim diagramom vidijo predmete na temperaturi, ki se bistveno ne razlikuje od 293K. Prav tako vidijo izgubno breme (črno telo) na temperaturi blizu 293K ojačevalniki za nadomeščanje izgub v žični zvezi preko koaksialnega kabla.



$$\frac{P_{si}}{P_{ni}} = \frac{T_A}{T_A + T} \cdot \frac{P_{sv}}{P_{nv}} = \frac{1}{1 + \frac{T}{T_A}} \cdot \frac{P_{sv}}{P_{nv}}$$

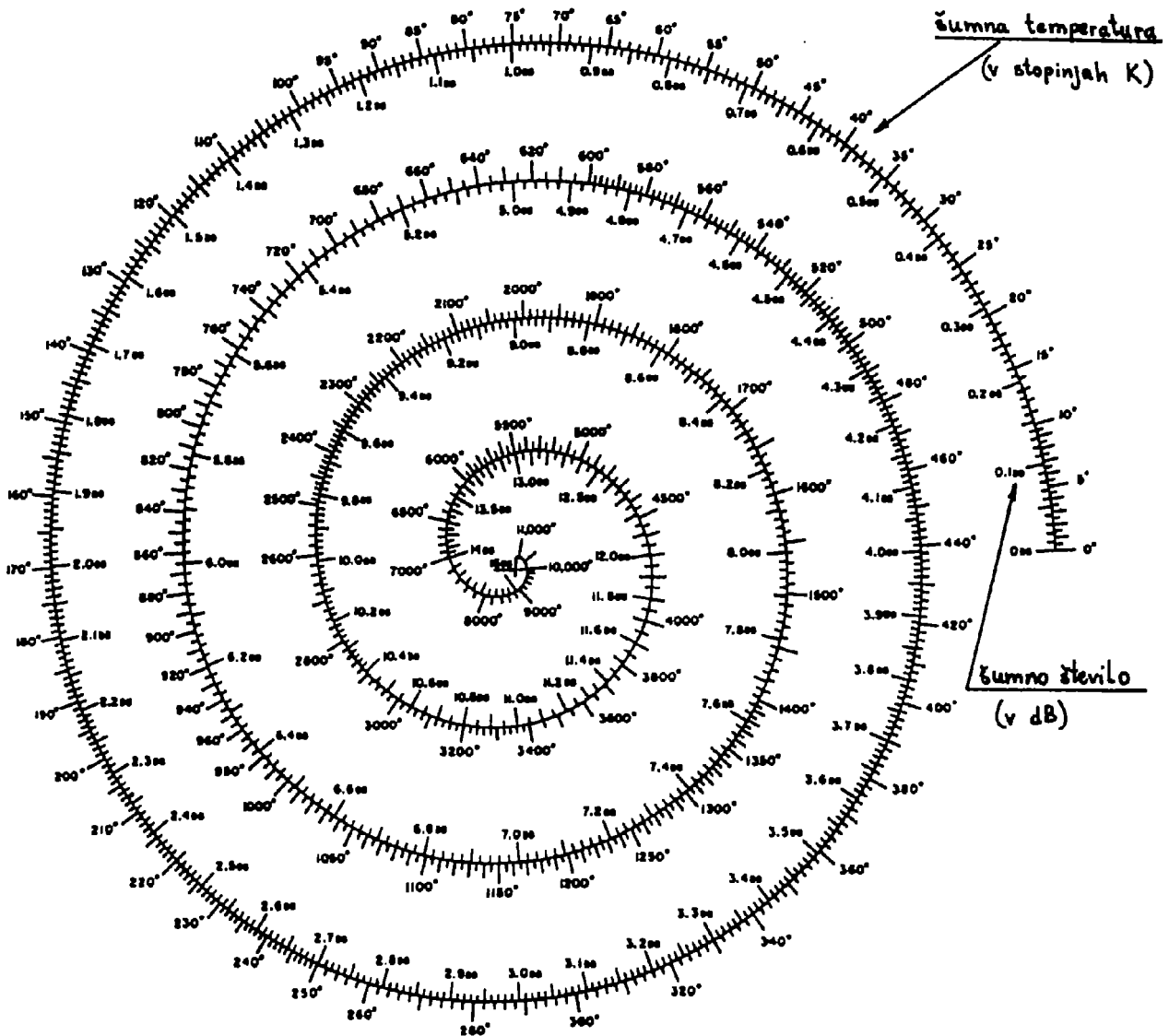
Definicija: $F = 1 + \frac{T}{T_0}$; $F_{dB} = 10 \log \left(1 + \frac{T}{T_0} \right)$; $T_0 \approx 293 \text{ K}$

Samo v slučaju $T_A = T_0$ velja: $\frac{P_{si}}{P_{ni}} = \frac{1}{F} \cdot \frac{P_{sv}}{P_{nv}}$

Slika 2.8 - Šumno število ojačevalnika.

Med šumno temperaturo in šumnim številom tedaj velja točna povezava, ki je prikazana z računskimi izrazi in priročnim grafom na sliki 2.9. Pri uporabi šumnega števila moramo paziti še na to, ali je navedeno kot neimenovano razmerje v linearnih enotah oziroma v decibelih. Šumno število običajno navajamo v decibelih.

Za točen račun moramo v večini primerov decibele najprej pretvoriti v linearno razmerje. Najbolj varno je seveda pretvoriti šumno število v šumno temperaturo in računati v celoti s šumnimi temperaturami: jasna fizikalna slika zagotavlja najmanjšo možnost napake!



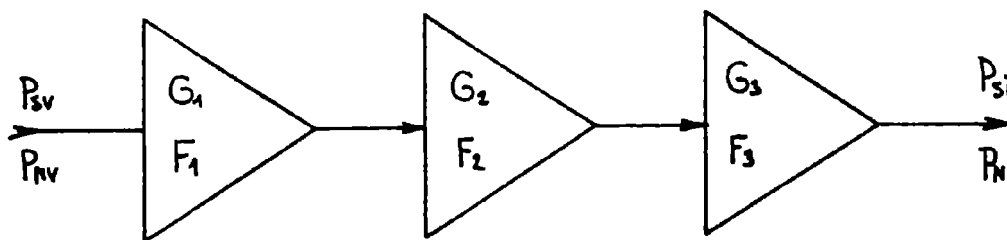
$$F_{dB} [dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(1 + \frac{T}{293K} \right)$$

$$T [K] = 293K \cdot \left(10^{\frac{F_{dB}}{10}} - 1 \right)$$

slika 2.9 – Povezava med šumno temperaturo in šumnim številom.

Izračun šumnega števila verige ojačevalnikov (sprejemnika) je prikazan na sliki 2.10. Za izračun potrebujemo šumna števila v obliki linearnih razmerij. ko uporabljamo aktivne sestavne dele blizu njihove zgornje frekvenčne meje, kjer je ojačenje posamezne stopnje G' razmeroma majhno in šumno število F' visoko, postane zelo pomembna veličina šumno število neskončne verige ojačevalnikov. Šumno število neskončne verige nam opisuje, kaj v

resnici zmoremo narediti z razpoložljivimi polprevodniki.



$$T = T_1 + \frac{T_2}{G_1} + \frac{T_3}{G_1 G_2} + \dots$$

$$F = 1 + \frac{T}{T_0} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots$$

$F, F_1, F_2, F_3, \dots \equiv$ šumna števila v linearnih enotah moči!

$$F = 10^{\frac{F_{dB}}{10}} ; F_{dB} = 10 \log F$$

Neskončna veriga enakih ojačevalnikov $F'; G'$: $F = 1 + (F' - 1) \cdot \frac{G'}{G' - 1}$

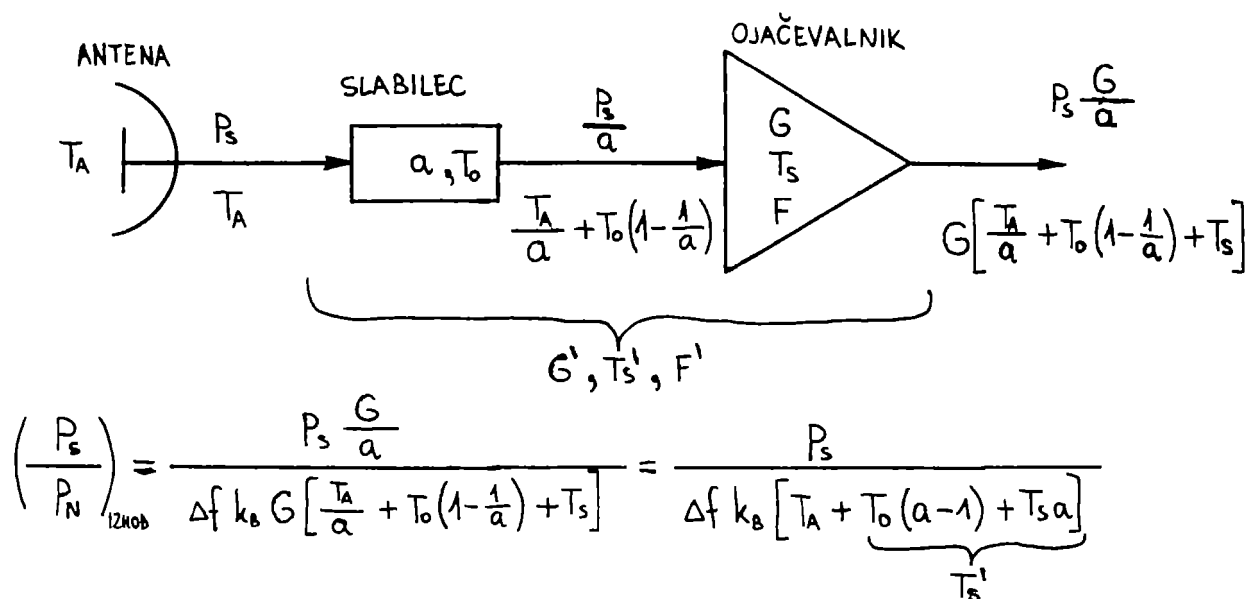
slika 2.10 - šumno število verige ojačevalnikov.

Zelo pogost praktični primer je vezava slabilca in ojačevalnika, kot je to prikazano na sliki 2.11. Slabilca tja seveda ne vstavljamo namenoma, saj nam slabi signal in povečuje šum! Slabilec je v tem slučaju nujno zlo, naprimer povezovalni vod med anteno in sprejemnikom, ki nima zanemarljivo majhnih izgub. Na povsem enak način vstavimo v izračun šuma tudi izgube v resnični anteni, ki ima sevalni izkoristek manjši od enote.

Vpliv slabilca se kaže na več načinov. Povsem jasno slabilec slabi koristni signal. Poleg koristnega signala slabilec slabi tudi šum antene T_A . Končno je slabilec izgubni sestavni del (črno telo!) in kot takšen sam seva toplotni šum, ki ustreza fizični temperaturi slabilca. V večini praktičnih primerov se fizična temperatura slabilca bistveno ne razlikuje od referenčne temperature $T_0 = 293K$.

Neidealni sevalni izkoristek antene oziroma izgube v prenosnemvodu med anteno in sprejemnikom zagotovo poslabšajo razmerje signal/šum. Točen račun na sliki 2.11 pokaže, da je v tem primeru računanje z logaritemskimi enotami silno enostavno: ojačenje se zmanjša za decibele slabilca, šumno število celotne vezave pa se poveča natančno za decibele slabilca. Ker gre

verjetno za najpogostejši praktični izračun šuma, je šumno število v decibelih F_{dB} silno priljubljena merska enota!



$$\left(\frac{P_s}{P_N} \right)_{\text{izhod}} = \frac{P_s \frac{G}{a}}{\Delta f k_B G \left[\frac{T_A}{a} + T_0 \left(1 - \frac{1}{a} \right) + T_s \right]} = \frac{P_s}{\Delta f k_B \left[T_A + T_0 (a-1) + T_s a \right]}$$

$$F' = 1 + \frac{T_s'}{T_0} = 1 + \frac{T_0 (a-1) + T_s a}{T_0} = \left(1 + \frac{T_s}{T_0} \right) a = F a$$

$$F'_{dB} = F_{dB} + a_{dB} \quad G'_{dB} = G_{dB} - a_{dB}$$

slika 2.11 - Vezava slabilca pred ojačevalnikom.

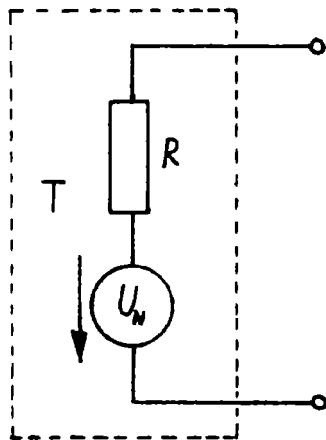
V preteklosti so se uporabljale tudi druge merske enote s ciljem čimbolj poenostaviti izračune. Zelo pogosta merska enota je $k_B T_0$, to je produkt Boltzmann-ove konstante in referenčne temperature $T_0 = 293K$. Jakost šuma se tedaj podaja kot mnogokratnik $k_B T_0$ oziroma razmerje v decibelih do $k_B T_0$. $k_B T_0$ je sicer merilo za spektralno gostoto toplotnega šuma na referenčni temperaturi. Ta fizikalna konstanta ustreza moči $-174dBm$ v pasovni širini $1Hz$.

2.5. Šum pasivnih in aktivnih sestavnih delov

Toplotni šum seva vsaka izgubna snov (črno ali sivo telo), ki se nahaja na temperaturi različni od absolutne ničle. V elektrotehniki so najpogostejši izvori toplotnega šuma upori vseh vrst. Brezizgubni reaktivni sestavni deli (kondenzatorji, tuljave ipd) šuma ne sevajo. Resnični reaktivni sestavni deli sevajo sorazmerno malo, kar znaša njihova izgubna upornost.

Šumna napetost in šumna moč upora sta prikazani na sliki 2.12. Šumna napetost je sicer odvisna od ohmske upornosti upora, šumna moč na prilagojenem bremenu pa je za vse upornosti enaka. Če povežemo vzporedno dva enaka upora, običajno ne dobimo nobenega pretoka moči, saj oba upora proizvajata enako šumno moč. Pretok moči dobimo le v primeru, ko je en upor toplejši in drugi hladnejši. V tem primeru skuša pretok moči šuma izenačiti

temperaturi obeh uporov.



Šumni napetostni izvor:

$$U_N = \sqrt{4 \cdot R \cdot \Delta f \cdot k_B \cdot T} \quad [V_{\text{eff}}]$$

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad ; \Delta f \equiv \text{pasovna širina}$$

$$P_N = \Delta f \cdot k_B \cdot T \quad (\text{na prilagojenem bremenu})$$

slika 2.12 – šumna napetost in šumna moč upora.

Šum aktivnih sestavnih delov: elektronk, tranzistorjev in drugih polprevodnikov je v večini primerov toplotnega izvora. Primeri šuma teh delov na sobni temperaturi so prikazani na sliki 2.13. Šum vakuumskih elektronk s krmilno mrežico je sorazmeren fizični temperaturi vroče katode in je zelo visok. Mikrovalovne elektronke s hitrostno modulacijo snopa elektronov (klistron, TWT) proizvajajo še več šuma. Parametrični ojačevalniki dosežejo nizek šum tako, da kot aktivni sestavni del uporabijo reaktiven (brezizgubni) nelinearen sestavni del, naprimer nelinearen kondenzator v obliki varaktorske diode.

Šum različnih vrst tranzistorjev je v istem velikostnem razredu kot fizična temperatura polprevodniškega spoja. Segrevanje čipa tranzistorja, naprimer zaradi nastavitve enosmerne delovne točke ojačevalnika, sorazmerno povečuje šum polprevodniškega ojačevalnika. Šum tranzistorskega ojačevalnika lahko seveda zmanjšamo s hlajenjem polprevodnika. Pri temperaturi tekočega dušika (77K) dosežejo poljski tranzistorji približno trikrat nižjo šumno temperaturo kot pa na sobni temperaturi na sliki 2.13.

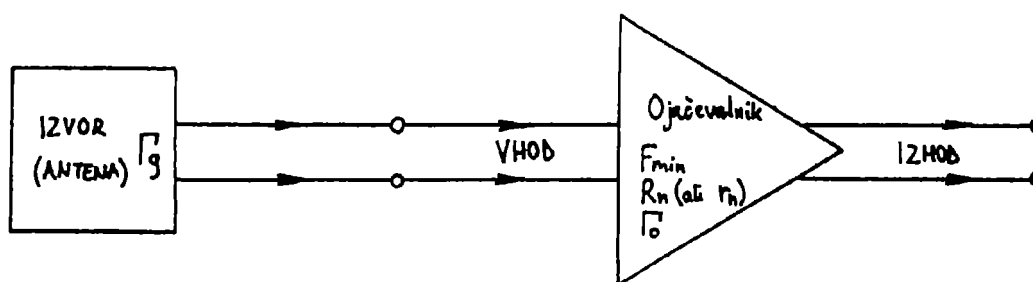
Šum ojačevalnika lahko poveča povratna vezava, če vsebuje izgubne sestavne dele (upore). Takšen primer so (priljubljeni) MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) širokopasovni ojačevalniki, ki vsebujejo par tranzistorjev in vgrajeno uporovno povratno vezavo, da sta vhodna in izhodna impedanca zelo blizu nazivne vrednosti 50ohm in je hkrati ojačevalnik še brezpogojno stabilen. MMIC-ji zato niso primerni za prvo stopnjo sprejemnika, tam smemo uporabiti le brezizgubno povratno vezavo s kondenzatorji, tuljavami ali transformatorji.

Vrsta ojačevalnika	Ojačenje G [dB]	Šumna temp. T [K]	Šumno število F _{dB} [dB]
Elektronka s lamilno mrežico (trioda, pentoda)	10 ÷ 20	2000 ÷ 9000	9 ÷ 15
Elektronka z modulacijo hitrosti (klitron, TWT)	20 ÷ 50	3000 ÷ 30000	10 ÷ 20
Parametrični ojačevalnik (na sobni temperaturi)	10 ÷ 15	75 ÷ 300	1 ÷ 3
Si bipolarni tranzistor Si MOS FET	10 ÷ 20	75 ÷ 300	1 ÷ 3
GaAs FET HEMT	10 ÷ 15	20 ÷ 120	0.3 ÷ 1.5
MMIC ojačevalnik (Si ali GaAs)	10 ÷ 25	170 ÷ 1600	2 ÷ 8
Operacijski ojačevalnik	60 ÷ 100	10 ⁴ ÷ 10 ⁹	16 ÷ 66

slika 2.13 - Šum aktivnih sestavnih delov.

Med ojačevalniki so najslabši operacijski ojačevalniki. V operacijskih ojačevalnikih izberemo načrt vezja ter nastavimo delovne točke tranzistorjev tako, da je vhodna impedanca zelo visoka, izhodna impedanca zelo nizka in visoko ojačenje samega ojačevalnika znižujemo z zunanjo povratno vezavo. Vsi ti ukrepi silno povečajo šum. Slabo načrtovani operacijski ojačevalniki lahko vsebujejo celo plazovne diode, ki proizvajajo zelo močen šum netoplotnega izvora. Operacijski ojačevalniki zato niso primerni za nizkošumne ojačevalnike. V radijskih sprejemnikih in oddajnikih jih prav zaradi visokega šuma običajno ne uporabljamo.

Pri načrtovanju vhodnih stopenj sprejemnika moramo skrbno izbrati delovno točko uporabljenih polprevodnikov ter poskrbeti za prilagoditev impedance. Pri tem prilagoditev impedance za najmanjši šum ne ustreza prilagoditvi impedance za največje ojačenje oziroma najnižjo vhodno odbojnost! Šumne lastnosti ojačevalnika moramo zato opisati z dodatnimi parametri, kot je to prikazano na sliki 2.14.



$$F = F_{\min} + 4 \frac{R_n}{Z_k} \cdot \frac{|\Gamma_g - \Gamma_o|^2}{(1 - |\Gamma_g|^2) \cdot |1 + \Gamma_o|^2} = F_{\min} + 4r_n \cdot \frac{|\Gamma_g - \Gamma_o|^2}{(1 - |\Gamma_g|^2) \cdot |1 + \Gamma_o|^2}$$

$F_{\min} \equiv$ najnižje šumno število pri $\Gamma_g = \Gamma_o$, v linearnih enotah (ne v dB!)

$\Gamma_o \equiv$ optimalna odbojnost izvora za F_{\min}

$r_n = \frac{R_n}{Z_k} \equiv$ normirana šumna upornost (običajno $Z_k = 50 \Omega$)

slika 2.14 – šumni parametri ojačevalnika.

Šumne lastnosti ojačevalnika opišemo s tremi števili: (1) najnižjim šumnim številom F_{\min} , (2) optimalno odbojnost izvora Γ_o , ki omogoča F_{\min} in (3) normirano šumno upornost r_n oziroma podatek, kako hitro se šumno število F slabša z oddaljevanjem od optimalne prilagoditve.

Ko je ojačenje ojačevalnika majhno in šum ojačevalnika visok, se prilagoditev za največje ojačenje običajno kaj dosti ne razlikuje od prilagoditve za najnižji šum. Ko pa je šum polprevodnika zelo majhen in precej nižji od fizične temperature polprevodnika, je med prilagoditvijo za šum in prilagoditvijo impedance za ojačenje običajno velika razlika. Pogosto imajo polprevodniki v tem režimu delovanja celo negativen realni del vhodne impedance (vhodna odbojnost večja od enote), so potencialno nestabilni in iskanje največjega ojačenja niti ni smiselno. Kljub temu takšne potencialno nestabilne ojačevalnike pogosto uporabljamo v vhodnih stopnjah sprejemnikov, ko je naš cilj najnižji šum sprejemnika.

2.6. Merjenje šumne temperature in šumnega števila

Šumno temperaturo, šumno število oziroma občutljivost sprejemnika nasploh merimo v različnih okoliščinah. Prva meritev je v laboratoriju, ko praktično preverimo rezultat teoretskega načrtovanja na prototipu radijskega sprejemnika. Nadalje meritev potrebujemo v serijski proizvodnji sprejemnikov za uglaševanje ter za preverjanje kakovosti izdelkov. Končno lahko potrebujemo

preprosto meritev pri uporabi sprejemnika, da preverimo njegovo pravilno delovanje ter ugotovimo možno okvaro. Vse te meritve se seveda razlikujejo še po tem, kako točen rezultat potrebujemo, koliko časa imamo na razpolago za meritev in koliko merilne opreme si lahko privoščimo.

Če bi poznali točno ojačenje verige ojačevalnikov v sprejemniku, bi za meritev šuma sprejemnika zadoščala ena sama meritev moči na izhodu sprejemnika, ko vhod sprejemnika priključimo na upor na znani temperaturi. Takšna meritev sicer lepo izgleda v obliki računskih izrazov na papirju, je pa v praksi popolnoma neuporabna. Ojačenje sprejemnika se lahko spreminja v zelo širokih mejah iz različnih razlogov: spremembe napajalne napetosti, spremembe temperature vezij, staranje sestavnih delov in nenazadnje samodejno nastavljanje ojačenja, s katerim je opremljena večina sprejemnikov.

Šum sprejemnika bi lahko izračunali iz meritve občutljivosti sprejemnika. Tu opravimo dve meritvi moči: prvič privedemo na vhod sprejemnika samo znan izvor toplotnega šuma, drugič pa poleg znanega šuma še signal znane jakosti. Iz razmerja obeh moči dobimo razmerje signal/šum, iz tega pa lahko izračunamo šum sprejemnika. Za takšno meritev potrebujemo kompliciran in drag izvor šibkega signala. V končnem rezultatu nastopa še pasovna širina medfrekvenčnega siva sprejemnika, ki je ponavadi ne poznamo dovolj natančno.

Šum sprejemnika najbolj natančno izmerimo po postopku "vroče-hladno" tako, da vhod sprejemnika izmenoma priključimo na dva (impedančno prilagojena) izvora z znanima, a različnima temperaturama šuma. Iz razmerja moči, ki ju izmerimo na izhodu sprejemnika, lahko zelo natančno določimo šumno temperaturo ali šumno število sprejemnika. Vse nezanimive neznanke: ojačenja stopenj sprejemnika in pasovna širina se krajšajo in ne nastopajo v končnem rezultatu.

Meritev vroče-hladno preprosto izvedemo tako, da sprejemno anteno zasukamo v dva cilja, ki sevata na znanih, a različnih temperaturah. Vroči cilj je lahko preprosto predmet na Zemlji. Drevesa in grmovje sevajo kot črno telo s temperaturo bližnje okolice. Pri tem se izogibamo odbojnim površinam, kot so vodna gladina ali pločevinasta streha, ki same malo sevajo in se hkrati v njih zrcali drugačen cilj. Hladen cilj je temno nebo s temperaturo pod 10K, proč od Sonca, znanih nebesnih izvorov šuma in oddajnikov na satelitih.

Z obračanjem antene poceni in zanesljivo preverimo delovanje našega sprejemnika. Rezultat meritve je šum celotnega sprejemnega sistema vključno s šumom antene in njenimi stranskimi snopi. Meritev je sicer enostavna, a nenatančna za uporabo v razvoju oziroma zamudna pri proizvodnji sprejemnikov. Razen tega moramo skrbno izbrati frekvenco sprejemnika, da se izognemo motnjam radijskih oddajnikov na Zemlji oziroma na satelitih.

Za laboratorijsko uporabo bi želeli izvor šuma, ki je neodvisen od zunanjih dejavnikov (predvsem motenj oddajnikov) in ki lahko hitro preklaplja med dvema različnima temperaturama šuma. Nekaj merilnih izvorov je predstavljenih na sliki 2.15. Razmerje

med vročo in hladno temperaturo imenujemo tudi ENR (Excess Noise Ratio) in ga običajno navajamo v logaritemskih enotah (decibeli).

Vrsta šumnega izvora	T_1 (hladno)	T_2 (vroče)	ENR [dB]
Vakuumska šumna dioda	293K	$\sim 10^4$ K (nastavljivo)	~ 15 dB (nastavljivo)
Plinska šumna dioda	293K	$\sim 10^4$ K	~ 15 dB
Plazovna dioda ($U_2 = 18$ V)	293K	$\sim 10^6$ K	~ 36 dB
Hlajeni upor (tekoči N_2)	77 K	293K	-5.8 dB

Slika 2.15 – Merilni izvori šuma.

Najpreprostejša rešitev je, da upor hladimo (naprimer s tekočim dušikom) ali grejemo (nitka žarnice). S takšno rešitvijo seveda ne moremo doseči velikega razmerja ENR. Hitrost preklopa lahko povečano tako, da istega upora izmenično ne hladimo ali segrevamo, pač pa uporabimo dva ločena upora in preklaplamo električni priključek med hladnim in vročim uporom.

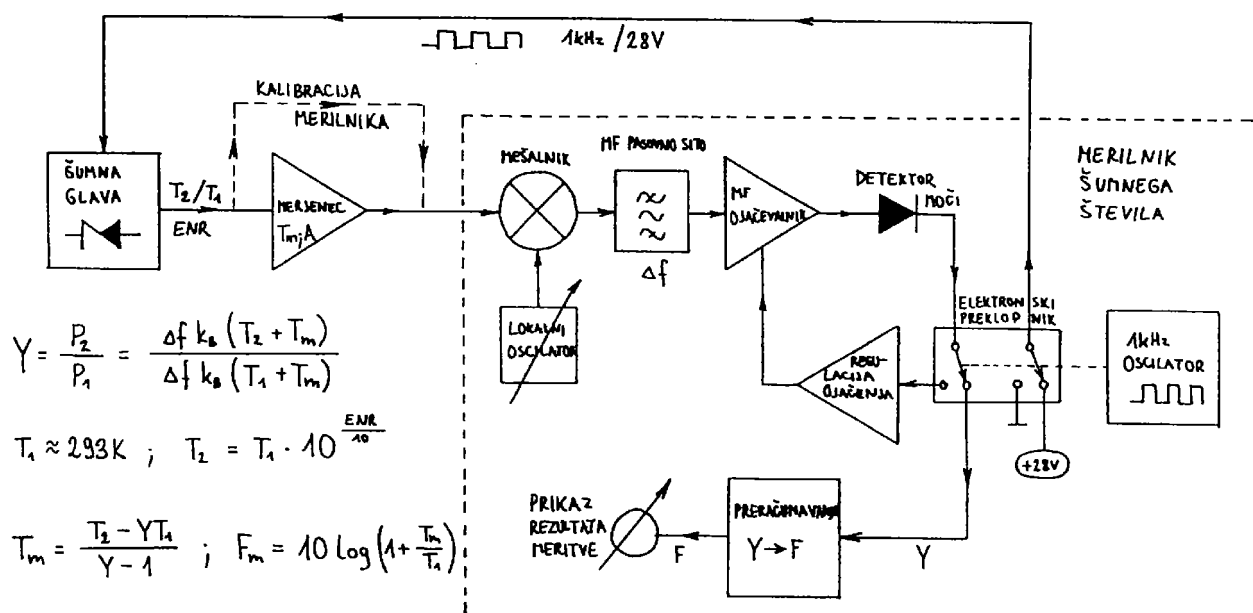
Večji ENR lahko dosežemo tako, da kot hladni izvor uporabimo upor, kot vroči izvor pa netoplotni izvor šuma. Močen izvor šuma je zrnatost enosmernega konvektivnega toka v vakuumski diodi. Jakost šuma je v tem primeru določena z jakostjo enosmernega toka in nabojem elektronov. Ioniziran plin v plinski šumni diodi je prevoden in kot tak električni upor na razmeroma visoki temperaturi, ki je v glaven določena z vrsto plina.

Zelo močen netoplotni izvor šuma je plazovni preboj v polprevodniških spojih, ki lahko doseže temperaturo šuma preko milijon K. Prebojna napetost polprevodniške šumne diode mora biti dovolj visoka, da plazovni preboj povsem prevlada nad tunelskim (Zener-jevim) prebojem. V siliciju je ta meja okoli 6V, silicijeve šumne diode so običajno izdelane za prebojno napetost okoli 18V. Jakost (temperatura) šuma plazovnega preboja je odvisna od enosmernega toka skozi diodi in še cele množice drugih podatkov o polprevodniškem spoju. Šumni izvor s plazovno diodo moramo zato pred uporabo najprej umeriti.

Ker je impedanca vhodne stopnje sprejemnika prilagojena za najnižji šum, se ojačenje sprejemne verige lahko zelo spreminja že pri majhnih spremembah impedance antene ali merilnega izvora šuma. Pri vseh merilnih izvoriših šuma moramo zato poskrbeti za točno izhodno impedanco, predvsem pa se mora ta impedanca čimmanj

spreminjati, ko izvor šuma preklapljamemo iz hladnega stanja v vroče stanje in obratno. Pri šumnih izvorihi s plazovnimi diodami preprosto vgradimo 20dB ali 30dB slabilec za diodo, kar omogoča slabljenje odbitega vala za 40dB do 60dB tudi pri skrajnih spremembah impedance plazovne diode.

Pri laboratorijskih meritvah pogosto naletimo na primer, da moramo izmeriti šum ene same ojačevalne stopnje z razmeroma majhnim ojačenjem. Šumi na izhodu ene same stopnje so prešibki, da bi jih lahko merili z običajnimi merilniki moči. Tudi pri merjenju šuma celih radijskih sprejemnikov pogosto naletimo na primer, ko se moramo priključiti z merilnikom po prvih nekaj stopnjah sprejemnika, saj delajo naslednje stopnje v nelinearnem režimu. V vseh teh primerih je smiselno uporabiti merilnik šumnega števila, ki je prikazan na sliki 2.16.



slika 2.16 - Merilnik šumnega števila.

Merilnik šumnega števila je občutljiv radijski sprejemnik, ki je opremljen z merilnikom moči, krmilnim vezjem za šumno glavo in računalnikom, ki iz izmerjenih moči izračuna šumno temperaturo oziroma šumno število merjenca. Šumna glava se preklaplja med stanji hladno in vroče s frekvenco okoli 1kHz, kar omogoča novo meritev vsako milisekundo oziroma udobno ročno uglaševanje merjenca za najnižje šumno število.

Pri uporabi merilnika šumnega števila se moramo najprej zavedati omejitev meritve. Jakost toplotnega šuma je razmeroma nizka, zato moramo poskrbeti za primerno oklapljanje merjenca, da meritve ne motijo močni radijski oddajniki. Na drugi skrajnosti moramo paziti, da merjenec z visokim ojačenjem ne pride v zasičenje. Ker je toplotni šum naključen signal, mora biti njegova jakost vedno vsaj 10dB (smiselno je še dosti več) pod mejo zasičenja (P1dB) ojačevalnika.

Ker merimo jakost naključnega signala, moramo rezultat

meritve povprečiti, da sploh pridemo do rezultata. Točnost meritve je obratno sorazmerna kvadratnemu korenu produkta pasovne širine sprejemnika in časa meritve. Pri širini medfrekvenčnega sita 1MHz in času meritve 1ms znaša srednje kvadratno odstopanje ene same meritve moči kar 3%, pri času meritve 1s pa 0.1%. Ker se pri računanju razmerja moči vroče/hladno γ točnost še dvakrat poslabša, so vsi merilniki šumnega števila opremljeni z možnostjo nastavljanja trajanja meritve oziroma faktorja povprečenja rezultata.

Točnost končnega rezultata se lahko še bistveno poslabša takrat, ko sta bodisi števec ali pa imenovalec izraza za šumno temperaturo merjenca T_m razmeroma majhni razliki dveh velikih števil (glej izraz na sliki 2.16). Števec izraza postane majhen takrat, ko je ENR izvora zelo velik in šumno število merjenca F majhno. Obratno postane imenovalec izraza majhen takrat, ko je ENR izvora majhen in je šumno število merjenca F visoko. Če želimo smiselno točnost rezultatov v doglednem času, moramo ENR izvora prilagoditi pričakovanemu šumnemu številu merjenca F .

Opisana meritev seveda izmeri šumno temperaturo oziroma šumno število celotne verige, ki jo sestavljajo merjenec s svojim šumom in ojačenjem ter šum merilnega sprejemnika. Ko je ojačenje merjenca majhno, šum merilnika seveda ni zanemarljiv. V tem primeru si pred meritvijo pomagamo z umerjanjem (kalibracijo) merilnika. Iz štirih meritev moči: dve brez merjenca in dve z merjencem, lahko izračunamo štiri neznanke: (1) šum merjenca, (2) ojačenje merjenca, (3) šum merilnika ter (4) produkt pasovne širine in ojačenja merilnika.

Računalnik večine merilnikov šuma je sicer že opremljen s programom za umerjanje, ki zna samodejno določiti iskane štiri neznanke iz štirih razpoložljivih meritev. Ker je vstavljanje merjenca zamudno opravilo in se medtem lahko spremenijo temperatura oziroma drugi pogoji meritve, je smiselno vključiti merilnik vsaj pol ure pred začetkom umerjanja in meritve. Merilnik šumnega števila nam torej lahko nudi zelo veliko podatkov o merjencu, če ga le znamo smotrno uporabljati.