

SISTEM PENERIMA EMISI RADIO MATAHARI

Suratno dan S.L. Manurung
Peneliti Matahari dan Lingkungan Antariksa
Bidang Matahari dan Antariksa

Ringkasan

Sistem penerima signal radio Matahari memerlukan kepekaan penangkapan yang tinggi, karena daya yang akan dideteksi sangat lemah. Dirancang sistem penerima, dan diperoleh syarat kepekaan dan penguatan minimal berturut-turut -94 dBm dan 76 dB. Disamping persyaratan itu sistem detektornya harus menggunakan detektor hukum pangkat (*square law detector*). Sistem penerima ini dalam operasi pemakaian hariannya perlu dikalibrasi secara periodik, karena penguatannya dapat berubah.

Abstract

The receiver system for solar radio noise needs high sensitivity, because the power to be detected is very weak. The conditions in designing the system the minimum sensitivity and the minimum gain are -94 dBm and 76 dB respectively. Besides those conditions, the square law detector should be used in detection system. Since the gain of the system can change the daily operation, the system should be calibrated periodically.

1. Pendahuluan

Radiasi matahari memancarkan seluruh gelombang elektromagnetik, dari gelombang sangat pendek, sinar-X sampai gelombang panjang termasuk gelombang radio. Terdapat dua jendela yang merupakan lorong yang secara langsung dapat mengamati matahari dari Bumi yaitu jendela optis dan jendela radio. Jendela radio memiliki rentang panjang gelombang lebih besar dari 1mm s.d. lebih kecil dari 30 m. Radiasi panjang yang lebih kecil dari 1 milimeter diabsorpsi secara total oleh uap air dan gas-gas di atmosfer dan gelombang yang panjang gelombangnya lebih besar dari 30 meter dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Pita radio ini dapat dipisahkan dalam dua kelompok yaitu gelombang mikro dan gelombang meter.

Aktivitas matahari bervariasi hampir periodik dengan siklus rata-rata 11 tahun. Pada periode minimum matahari relatif tenang dengan kerapatan fluks emisi radionya berkisar 10 sfu ($1 \text{ sfu} : 1 \text{ solar flux unit} = 10^{-22} \text{ watt m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). Ketika aktivitas matahari meningkat menuju maksimum, jumlah sunspot dan aktivitas lain juga akan meningkat. Emisi radio matahari juga meningkat hingga mencapai magnitudo 6 kali lebih tinggi, ($10^{-15} \text{ watt m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$).

Semburan radio (*radio bursts*) matahari adalah komponen aktivitas dengan ciri emisi yang sporadik dan diasosiasikan sebagai peristiwa ledakan matahari (*solar flare*). Semburan radio matahari dapat diamati pada seluruh panjang gelombang dari

panjang gelombang milimeter, centimeter meter sampai dekameter, dan masing-masing gelombang tersebut bersumber dari level ketinggian atmosfer matahari yang berbeda, dari ketinggian di atas fotosfer sampai jauh di korona.

Pada dasarnya matahari merupakan sebuah stasiun pemancar, hanya saja matahari memancarkan signal radio pada gelombang dengan pita frekuensi yang lebar dan kontinu sedangkan pemancar radio buatan memancarkan signal pada frekuensi tertentu. Signal-signal dari matahari dengan daya yang sangat lemah diterima dan dihimpun oleh antena kemudian disalurkan ke sistem penerima radiometer. Signal tersebut pada akhirnya keluar dari sistem sebagai tegangan searah (*D.C. voltages*), yang dapat direkam pada *analog chart recorder* atau alat rekam lain yang bekerja secara digit dilengkapi dengan komputer. Luaran dari sistem penerima ini menggambarkan kekuatan dan karakter signal-signal radio matahari.

Makalah ini membahas tentang syarat-syarat yang harus dipenuhi dalam perancangan sistem penerima agar signal yang lemah dari matahari diperkuat dan diproses sedemikian tanpa kehilangan informasi yang diperlukan.

2. Konsep Temperatur

Konsep temperatur yang digunakan pada sumber emisi radio dan antena tidak ada hubungannya dengan temperatur fisik keduanya. Konsep ini menggambarkan daya atau kerapatan fluks emisi yang dinyatakan dalam temperatur.

Persamaan transfer radiasi dari sumber emisi radio pada umumnya ditulis sebagai bentuk fungsi sumber (*source function*) S_λ . Pada gelombang radio berlaku $hc/\lambda \ll kT$ (persamaan Rayleigh-Jeans) dengan h : konstanta Planck, k : konstanta Boltzman, λ : panjang gelombang dan T : temperatur. Perubahan S_λ dengan berubahnya T_{eff} sumber, berlaku (Krauss, 1963) :

$$S_\lambda = \frac{2kT_{eff}}{\lambda^2} \quad 2.1$$

Kaitan kerapatan fluks S dari sumber radio dengan temperatur efektif T_{eff} memenuhi persamaan:

$$S = \frac{2kT_{eff}}{\lambda^2} \Omega_s \quad 2.2$$

dengan Ω_s adalah luas angular dari sumber radio tersebut.

Temperatur antena didefinisikan sebagai temperatur absolut yang memanaskan atau mendinginkan (bukan pemanasan fisik) resistansinya, sedemikian sehingga membuat *match* dengan level signal sumber emisi radio.

Daya sumber emisi radio yang diterima oleh antena dapat dinyatakan dengan konsep temperatur yang memenuhi persamaan:

$$P = kT_A \quad 2.3$$

Kerapatan fluks sumber emisi radio yang diamati dengan antena dengan pola daya (*power pattern*) $P_n(\theta, \phi)$ dinyatakan oleh persamaan :

$$S_{obs} = \iint_{source} S_{\lambda}(\theta, \phi) P(\theta, \phi) d\Omega \quad 2.4$$

dengan θ dan ϕ adalah sudut-sudut dalam sistem koordinat bola yang diaplikasikan pada antena. Daya per satuan lebar pita yang diterima oleh antena adalah :

$$p = \frac{1}{2} A_e \iint S_{\lambda}(\theta, \phi) P(\theta, \phi) d\Omega \quad 2.5$$

Kerapatan fluk radio dari sumber (matahari) dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$S_{\lambda} = \frac{2kT_A l}{A_{eff}} \quad 2.6$$

dengan k : konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

T_A : temperatur antena

$l = \Omega_S / \Omega_A$: perbandingan luas angular sumber emisi terhadap beam width antena (bernilai 1 bila $\Omega_A \geq \Omega_S$)

A_{eff} : luas efektif antena

Ditetapkan nilai $l=1$ (untuk beamwidth antena lebih besar dari luas angular sumber emisi radio), maka persamaan 2.6 menjadi :

$$S_{obs} = \frac{2kT_A}{A_{eff}} \quad 2.7$$

Ditinjau dari sistem penerima, emisi dari sumber radio yang tak lain berciri sebagai sumber noise, maka daya noise dari antena adalah :

$$P_A = kT_A \Delta\nu \quad 2.8$$

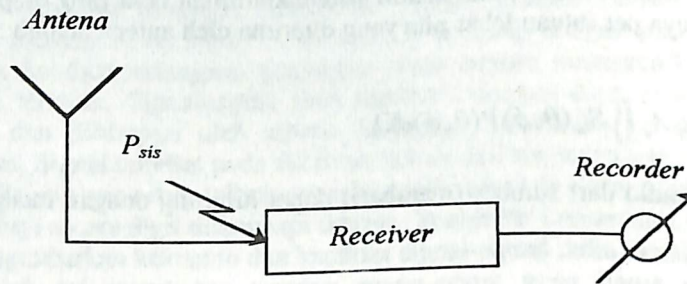
dengan $\Delta\nu$ adalah bandwidth receiver.

Receiver juga menghasilkan noise yang disebabkan oleh noise termal dari komponen-komponen receiver, shot noise dan noise internal lainnya. Disamping itu, saluran transmisi (kabel koaksial atau waveguide) juga akan menambah noise di dalam receiver. Noise total (disebut: sistem noise), pada ujung antena memiliki daya sebesar :

$$P_{sis} = P_A + P_R = k(T_A + T_R) \cdot \Delta\nu \quad 2.9$$

$$T_{sis} = T_A + T_R \quad 2.10$$

Noise temperatur total yang berada pada ujung antena adalah seperti ditunjukkan pada gambar 2.1.



Gambar 2.1: Blok diagram sistem penerima radio dengan antena, saluran transmisi dan keseluruhan receiver menghasilkan sistem noise temperatur

Luaran dari radiometer merupakan bentuk fluktuasi noise temperatur ΔT , dan noise temperatur minimum yang dapat dideteksi oleh sistem penerima adalah :

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_{\text{sis}}}{\sqrt{\Delta\nu \cdot \tau}} \quad 2.11$$

dengan τ adalah perioda integrasi efektif dari receiver (berkaitan dengan sistem detektor).

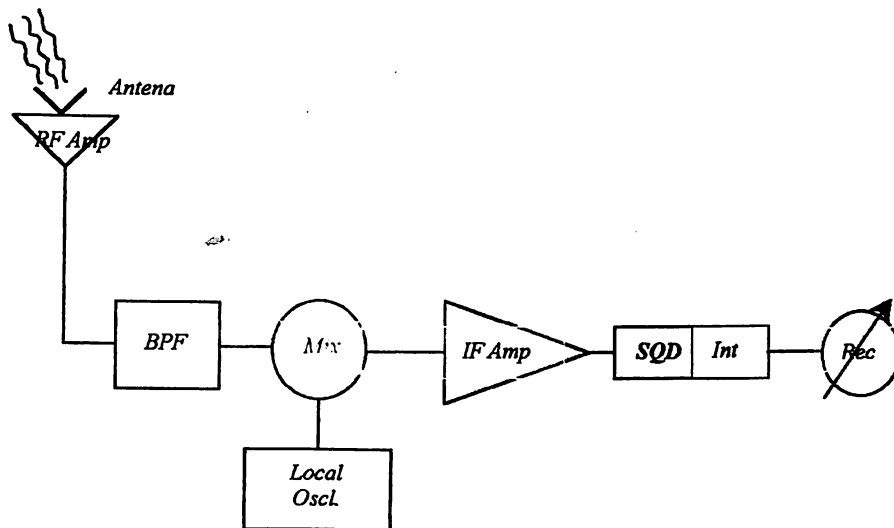
Sensitivitas atau signal minimum yang dapat dideteksi oleh sistem penerima dapat dinyatakan oleh persamaan, (Krauss, 1966) :

$$\Delta S_{\min} = \frac{2k\Delta T_{\min}}{A_{\text{eff}}} = \frac{2kT_{\text{sis}}}{A_{\text{eff}}\sqrt{\Delta\nu \cdot \tau}} \quad 2.12$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa sensitivitas berbanding terbalik dengan lebar pita (*bandwidth*) receiver $\Delta\nu$ dan perioda integrasi τ . Kedua faktor ini diperankan oleh subsistem detektor dan integratornya.

3. Perancangan Sistem Penerima (*Receiver System*)

Di dalam *receiver*, signal datang akan melalui sejumlah proses, yaitu penyaringan (*filtering*), penguatan (*amplification*), proses perubahan frekuensi yaitu *mixing* atau *heterodyning*, deteksi (*detection*) dan integrasi (*integration*). Gambar 3.1 di bawah adalah blok diagram radiometer tipe *superheterodyne*.



Gambar 3.1: Blok diagram sistem penerima (radiometer) tipe superheterodyne receiver, (Penjelasan: baca teks)

Signal datang dari sumber dikumpulkan oleh antena, diperkuat oleh *RF Amplifier*. *Bandpass filter (BPF)* berfungsi sebagai penyaring atau pembatas sehingga signal datang yang diteruskan hanya signal berfrekuensi di sekitar frekuensi yang diinginkan. Bagian ini (*Antena dan RF Amplifier*) disebut bagian *front end*. Melalui saluran transmisi signal menuju ke bagian *back end*. Pada bagian ini signal mengalami proses *mixing* atau *heterodyning* (*Mixer dan Local Oscillator*) yang pada dasarnya adalah proses pengubahan frekuensi gelombang pembawa, *carrier*, dari frekuensi tinggi (*high frequency*) menjadi frekuensi menengah (*intermediate frequency*) tanpa menghilangkan signal informasi. Untuk keperluan proses deteksi, signal perlu diperkuat dengan *IF (Intermediate Frequency) Amplifier*.

Untuk memberikan gambaran ditampilkan contoh rancangan sistem radiometer yang akan dioperasikan pada frekuensi tunggal 3 GHz (atau pada panjang gelombang 10 cm). Antena yang digunakan adalah parabola berdiameter dua meter. *Bandwidth* sistem radiometer tersebut ditetapkan 20 MHz. *IF Amplifier* dioperasikan pada pusat pita frekuensi 50 MHz.

3.1 Kepekaan, Rentang Penerimaan Daya dan Detektor Hukum Pangkat

Untuk menghitung signal minimum yang dapat dideteksi oleh radiometer, digunakan persamaan 2.12, dimana T_{sis} terdiri atas temperatur antena (T_A) dan temperatur receiver (T_R). Dalam perhitungan ini sistem penerima minimal harus mampu menangkap signal yang berasal dari sumber emisi pada saat matahari dalam keadaan tenang. Oleh karena itu T_A akan identik dengan temperatur sumber emisi radio matahari pada keadaan matahari tenang (T_0), jadi :

$$T_{sis} = T_R + T_0$$

Temperatur sumber emisi radio matahari pada keadaan matahari tenang memenuhi hubungan (Kundu, 1965) :

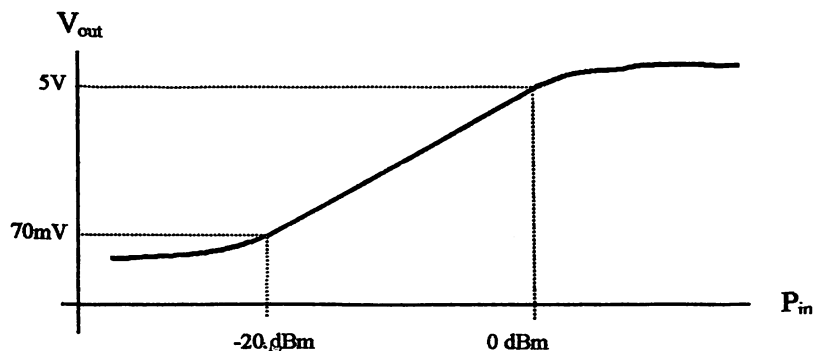
$$T_0 = T_{eff} \left[\frac{\theta_{quiet}}{BW} \right] \quad 3.2$$

Dengan T_{eff} adalah temperatur efektif sumber emisi radio, θ_{quiet} adalah sudut ruang (dalam satuan derajat) matahari pada frekuensi 3 GHz yang berturut-turut bernilai 5×10^4 °K dan $32'$. Sedangkan $B.W.$ adalah *beam width* antenna; secara pendekatan antenna dengan diameter 2 meter yang dioperasikan pada frekuensi 3 GHz adalah 4° , sehingga T_0 dapat dihitung, dan diperoleh ≈ 900 °K. Secara pendekatan pula, nilai (maksimum) temperatur sistem penerima (T_R) adalah ≈ 500 °K. Dengan demikian nilai seluruh temperatur sistem penerima (T_{siv}) adalah ≈ 1400 °K.

Luas efektif antenna parabola hanya berkisar 0.3 – 0.4 kali luas fisik. Misalkan luas efektif antenna sama dengan 0.3 kali luas fisiknya, sehingga $A_{eff} \approx 0.95$ m² dan waktu integrasi sistem detektornya dirancang 0.1 milisekon, maka kepekaan sistem dapat dihitung (persamaan 2.12), diperoleh $(\Delta S)_{min} \approx 9 \times 10^{22}$ Watt m²Hz⁻¹ atau ≈ 9 sfu (1 solar flux unit = 10^{22} Watt m²Hz⁻¹). Daya minimum yang dapat diterima atau kepekaan sistem radiometer, dihitung dengan menggunakan persamaan 2.9, diperoleh : $P_{min} \approx -94$ dBm.

Wild (1963) mengungkapkan bahwa kerapatan fluks matahari pada saat keadaan tenang adalah ≈ 10 sfu, sedangkan kerapatan fluks maksimum pada waktu terjadi semburan emisi radio tidak lebih dari 10^5 sfu (Kundu, 1965), maka sistem penerima emisi radio matahari harus bisa beroperasi secara linier dengan rentang minimal 40 dB.

Rentang penerimaan daya ini akan diperankan oleh sistem deteksinya yang harus menggunakan detektor hukum pangkat (*Square Law Detector, SQD*). Prinsip dasar detektor ini adalah bahwa tegangan luarannya (V_{out}) berbanding lurus dengan daya masukan (P_{in}). Gambaran tentang karakteristik sistem detektor tipe ini seperti telah dibuat oleh Suratno (1987, tidak dipublikasikan), nampak pada gambar 3.2.



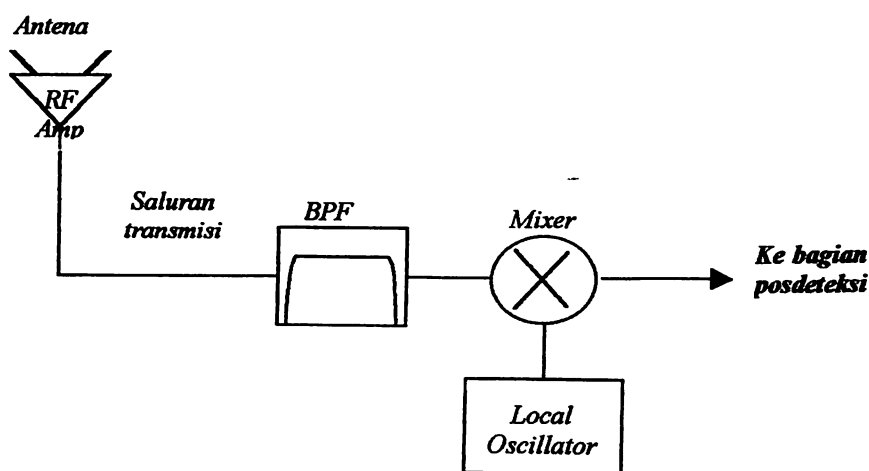
Gambar 3.2: Contoh karakteristik detektor hukum pangkat (Square Law Detector)

Detektor tidak responsif pada masukan daya di bawah -20 dBm dan mulai jenuh pada masukan daya di atas 0 dBm. Linieritas baik bila daya masukan antara -20 dBm dan 0 dBm yang menghasilkan tegangan luaran antara 70 mVolt dan 5 Volt. Pada rentang daya ini sistem penerima dioperasikan.

Oleh karena itu, pada subsistem IF Amplifier harus memiliki gain sedemikian besarnya agar masukan daya minimalnya mampu diperkuat sehingga luarannya tidak kurang dari -20 dBm. Namun, bila daya masukan dari sistem ini cukup tinggi sehingga menghasilkan daya luaran lebih dari 0 dBm, SQD akan berada pada daerah operasi saturasi (jenuh). Hal ini dapat diatasi dengan cara menempatkan attenuator otomatis (*auto attenuator*) yang baru akan bekerja bila daya masukannya berada pada tingkat daya tertentu.

3.2 Bagian Pradeteksi (*Predetection Section*)

Bagian deteksi awal disebut juga *Converter* terdiri atas *Preamplifier* atau *Radio Frequency (RF) Amplifier*, *Mixer* dan *Local Oscillator* serta dilengkapi dengan kabel transmisi (*transmission line*) dan *Band Pass Filter*, terlihat pada gambar 3.3.



Gambar 3.3: Bagian Pradeteksi (*Predetection Section*) dari radio tipe superheterodyne

Mengingat bahwa tingkat daya signal datang yang diterima dan dikumpulkan oleh antena sangat rendah, maka *RF Amplifier* (disebut juga *Low Noise Amplifier, LNA*) haruslah merupakan sistem penguat awal yang memiliki kepekaan yang tinggi dan noise internal rendah dan dipasang langsung pada ujung terminal antena. Demikian pula saluran transmisi haruslah berupa kabel koaxial dengan faktor kehilangan daya (*losses*) yang rendah. *Band Pass Filter (BPF)* berfungsi membatasi dan hanya akan meloloskan signal pada pita frekuensi yang diinginkan. Proses *heterodyning* dilakukan oleh *mixer* dan *local oscillator*, yang akan menghasilkan signal luaran pada frekuensi menengah (*intermediate frequency*).

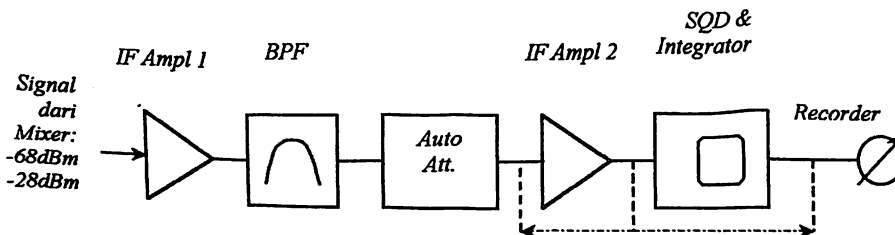
Karakteristik komponen dan tingkat daya signal yang diinginkan pada setiap titik dari bagian deteksi awal ini, dapat dituliskan pada semi-tabulasi sebagai berikut:

Rentang daya input	: -94 dBm sampai -54 dBm
Respon mixer (umumnya)	: <-20 dBm
Gain pre amplifier	: 40 dB
Losses filter dan saluran transmisi	: <-4 dB
Rentang dinamik daya input pada mixer	: -60 dBm sampai -20 dBm
Frekuensi osilator lokal	: 2,95 GHz
Frekuensi signal input	: 3 GHz
Frekuensi signal output dari mixer	: 50 MHz
Conversion losses dari mixer	: -8 dB
Rentang dinamik konverter	: -68 dBm sampai -28 dBm

Level signal luaran *post detection section* dengan rentang -68 dBm sampai -28 dBm dikirimkan ke sistem deteksi berikutnya (*post detection section*), dan merupakan signal masukan bagi *IF-Amplifier*.

3.3 Bagian Posdeteksi (*Postdetection Section*)

Subsistem utama pada bagian ini adalah *IF Amplifier*, *Square Law Detector (SQD)* dan *Recorder*, dan untuk keperluan penyesuaian tingkat umumnya dilengkapi dengan *filter* dan *attenuator*. Diagram blok bagian ini digambarkan sebagai berikut (gambar 3.4):



Gambar 3.4: Bagian Posdeteksi (*Postdetection Section*) dari Radiometer tipe superheterodyne.

Jika akan digunakan detektor hukum pangkat (*SQD*) dengan karakteristik seperti pada gambar 3.2, maka daya luaran subsistem *IF Amplifier* minimal harus -20 dBm yang akan menjadi daya masukan bagi *SQD*. Agar dapat mendeteksi signal minimum (-68 dBm) maka *IF Amplifier* harus memiliki gain minimal sebesar 48 dB. Tetapi dengan gain sebesar ini, ketika daya masukan *IF Amplifier* sebesar -28 dBm akan diperoleh daya luaran sebesar +20 dBm, padahal liniertitas *SQD* dipenuhi bila daya masukan maksimum sebesar 0 dBm. Oleh karena itu perlu dipasang attenuator otomatis (*auto attenuator*) agar *SQD* tetap beroperasi pada daerah liniernya. Perlu dirancang sistim umpan balik untuk memfungsikan attenuator (gambar 3.4) dan menandai skala pencatatan pada *recorder*.

3.4 Gain Total

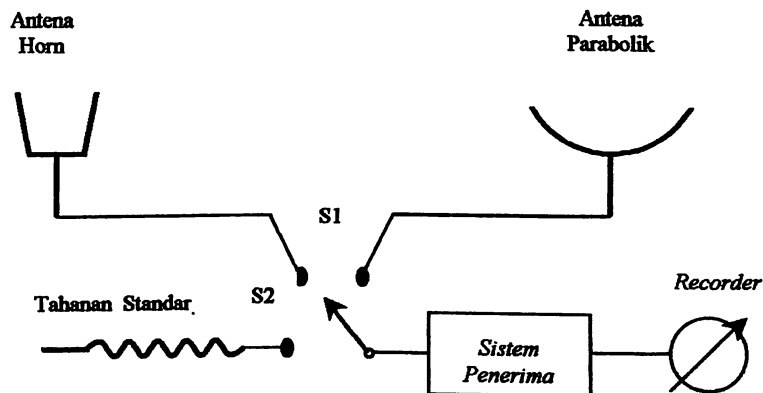
Dari uraian pada sub bab 3.2 dan 3.3, gain dan losses pada setiap tingkat dari sistem penerimanya dapat ditunjukkan pada tabel di bawah:

▪ Gain preamplifier	:	40 dB
▪ Losses filter dan saluran transmisi	:	-4 dB
▪ Conversion losses	:	-8 dB
▪ Gain sistem IF Amplifier	:	48 dB

Dengan demikian jika sistem penerima bekerja secara penuh maka gain total adalah 76 dB, dengan catatan bahwa daya masukan sistem akan menghasilkan luaran yang apabila daya lebih dari batas linieritas operasional *SQD* sistem akan mengalami atenuasi.

4. Kalibrasi Pengukuran Fluks Matahari

Untuk menetapkan besar kerapatan fluks yang belum diketahui dari suatu sumber radio (pada frekuensi tertentu), gain antenna dan skala pencatatan terlebih dahulu harus dikalibrasi. Perlu dibangun suatu antenna standar bentuk *horn* dengan gain (G_H) yang dihitung secara teori berdasar ukuran fisik (Allan W. Love, 1984). Metoda kalibrasi dapat digambarkan pada gambar 4.1.



Gambar 4.1: Skema metoda kalibrasi antenna dan skala pencatatan/perekaman

Antena akan dihubungkan dengan sistem penerima dengan saluran transmisi (*waveguide* atau *coaxial cable*). Langkah-langkah kalibrasinya dilakukan sebagai berikut:

- pertama mencatat tingkat noise temperatur dari resistor atau sumber noise standar T_0 .

- antena *horn* dihubungkan dengan sistem penerima melalui S_1 dan S_2
- kemudian berturut-turut diarahkan ke matahari (pada saat keadaan tenang) dan ke langit bersih (*clear sky*); berturut-turut tercatat tingkat noise T_{\oplus} dan T_{sky} .

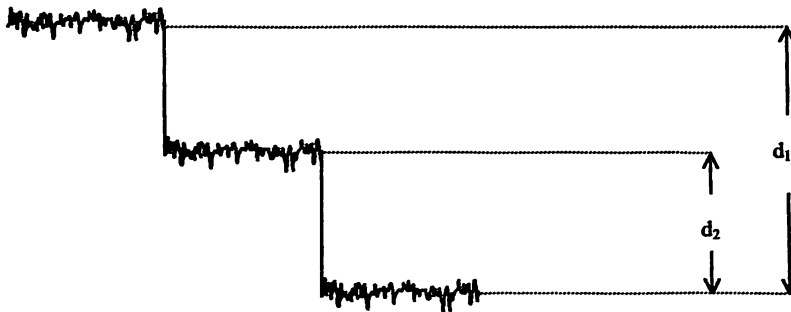
Pada recorder akan diperoleh pencatatan tingkat-tingkat noise yang dapat disketsakan seperti pada gambar 4.2. Jika selisih skala tingkat noise T_0 dan T_{sky} , T_{\oplus} dan T_{sky} berturut-turut d_1 dan d_2 maka kenaikan noise temperatur oleh matahari dapat dihitung berdasarkan hubungan :

$$\Delta T = T_0 \frac{d_2}{d_1} \quad 4.1$$

Maka kerapatan fluks matahari tenang F_{\oplus} adalah :

$$F_{\oplus} = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{\Delta T}{G_H} \quad 4.2$$

dengan k adalah *konstanta Boltzman*, λ panjang gelombang dan G_H adalah gain antena horn yang telah diketahui (dihitung).



Gambar 4.2. Pencatatan tingkat noise pada recorder

Selanjutnya, antena parabola yang akan dikalibrasi dihubungkan ke sistem penerima. Dengan langkah-langkah yang sama, maka dengan antena parabola ini dapat diperoleh noise temperatur T_0 , T_{\oplus} dan T_{sky} .

Dengan menggunakan persamaan seperti persamaan 4.1 dan 4.2, dapat diturunkan gain antena parabola G_A , yaitu :

$$G_A = \frac{8\pi k}{\lambda^2} \frac{T_{\oplus}}{F_{\oplus}} \quad 4.3$$

dengan F_{\odot} adalah kerapatan fluks matahari tenang yang telah diperoleh dari pengamatan dengan menggunakan antena *horn* (persamaan 4.2).

Kalibrasi gain antena dengan menggunakan antena horn standar seperti di atas disebut kalibrasi absolut. Jika gain antena parabola tersebut telah diperoleh maka antena dapat dioperasikan untuk pengamatan matahari harian.

Pengamatan matahari harian akan memperoleh hasil tingkat fluks radio baik saat matahari tenang maupun saat matahari aktif atau memancarkan semburan (*bursts*) radio. Untuk menentukan berapa besar fluks puncak suatu semburan radio (F_s) yang muncul pada suatu hari, maka perlu dilakukan kalibrasi harian. Karena gain antena telah diperoleh maka kalibrasi harian cukup didasarkan pada sumber noise yang telah diketahui noise temperaturnya (T_0) dan tingkat noise langit (T_{sky}). Dengan membandingkan tingkat/skala tingkat noise (persamaan 4.1), maka dapat diturunkan fluks puncak suatu semburan radio adalah :

$$F_s = \frac{87k \Delta T}{\lambda^2 G_A} \quad 4.4$$

5. Penutup

Kepekaan daya suatu sistem penerima radio dapat ditingkatkan dengan cara menambah lebar pita, bandwidth dan meninggikan waktu integrasi. Namun, cara ini akan menambah kehilangan (*losses*) informasi. Pemeran utama dalam meningkatkan kepekaan tanpa mengurangi nilai informasi adalah pada bagian predeteksi, yaitu dengan menggunakan komponen preamplifier yang memiliki noise temperatur dan noise figure rendah (*low noise amplifier and low noise figure*), serta menggunakan saluran transmisi yang faktor kehilangan daya dan noise yang rendah pula.

Sedapat mungkin integrator dibangun sedemikian sehingga karakteristiknya memiliki *bandwidth* yang berbentuk segi empat dengan kurva yang lurus (keterangan: idealnya demikian), sehingga tegangan luaran *SQD* akan berbanding lurus dengan daya masukan yang diterima oleh antena.

Kalibrasi absolut untuk menetapkan gain antena parabola dan kalibrasi harian yang dipergunakan dalam perhitungan tinggi fluks semburan radio dapat mengeliminasi pengaruh fenomena alam terhadap pengamatan (misalnya adanya uap air konsentrasi tinggi).

Daftar Rujukan

- Allan W. Love, (1984), "Horn Antenna", Antena Engineering Handbook, Mc Graw-Hill Book Co.
 Kraus, J.D., (1963), "Radio Astronomy", Mc Graw-Hill Book Co.
 Kundu, M.R., (1965), "Solar Radio Astronomy", Interscience Publisher
 Price, R.M., "Radiometers, Astrophysics", 12, ed. M.L. Meeks.
 Robinson, B.J., (1964), "Annual Review Astronomy and Astrophysics", 2, 401.
 Suratno, (1987), "An Experiment of Square Law Detector", tidak diterbitkan.