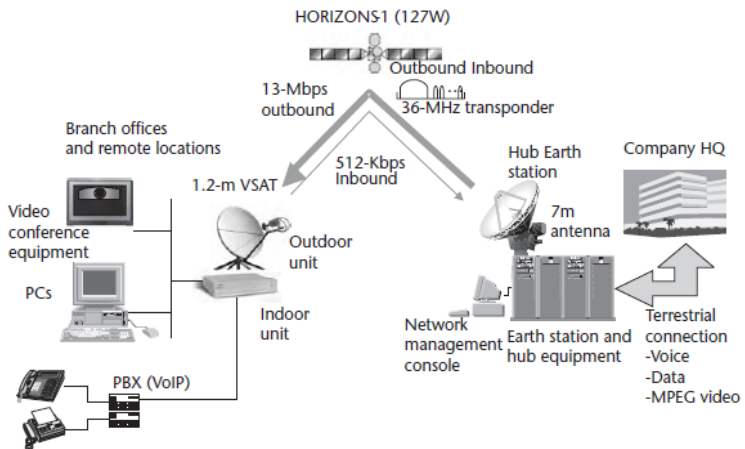


BAB II DASAR TEORI

2.1 VERY SMALL APERTURE TERMINAL (VSAT)

Very Small Aperture Terminal (VSAT) merupakan sebuah perangkat stasiun penerima sinyal dari satelit dengan bentuk menyerupai piringan sebagai antena penerimanya dengan diameter kurang lebih 3 meter. Fungsi utama dari VSAT adalah untuk menerima sinyal dari satelit dan mengirim data ke satelit. Satelit berfungsi sebagai penerus sinyal untuk dikirimkan ke titik lainnya di atas bumi.^[4]



Gambar 2.1 Sistem Komunikasi Stasiun Bumi dan VSAT untuk komunikasi data ^[8]

Satelit merupakan suatu *micro wave repeater station* (stasiun pengulang gelombang mikro) yang berfungsi untuk memperkuat sinyal yang berasal dari Stasiun Bumi serta memperkuat sinyal yang berasal dari Stasiun Bumi serta memproses translasi frekuensi dari up link frequency yang terletak pada lebar bidang frekuensi mulai dari 5,925 Ghz sampai dengan 6,425 Ghz menjadi downlink frequency dari 3,7 Ghz sampai dengan 4,2 Ghz. Seperti pada gambar 2.1 merupakan sistem komunikasi stasiun bumi dan VSAT untuk komunikasi data.

Sinyal-sinyal RF dari Stasiun Bumi dengan frekuensi pancar 6 Ghz setelah diterima oleh antena akan dilewatkan pada *Band Pass Filter* (BPF) untuk melewatkan frekuensi yang dikehendaki saja dan terjadi proses pemisahan sinyal komando dari sinyal komunikasi.

Sinyal komunikasi yang mempunyai lebar bidang frekuensi 5,925 Mhz-6425 Mhz setelah diperkuat oleh *Low Noise Amplifier* (LNA), kemudian dicampur dengan frekuensi 2225 Mhz yang di hasilkan oleh *Local Oscillator* (LO), sehingga keluaran *mixer* merupakan sinyal yang mempunyai lebar bidang frekuensi antara 3700 Mhz-4200 Mhz. Sebelum sinyal tersebut dipancarkan kembali ke bumi, terlebih dahulu diperkuat oleh *High Power Amplifier* (HPA) dan dilakukan dalam sebuah *Band Pass Filter* (BPF) bersama-sama dengan sinyal yang berasal dari *telemetry transmitter* yang berisi antara lain data kondisi peralatan satelit.^[9]

2.1.1 Kelebihan dan Kekurangan VSAT

Teknologi VSAT memiliki beberapa keuntungan, diantaranya adalah :

1. Biaya membangun sarana telekomunikasi untuk menghubungkan antara dua tempat tidak tergantung jarak (untuk tempat-tempat yang terletak dalam cakupan satelit), serta mudah dibangun tanpa terhalang oleh biaya akibat sulitnya kondisi geografi.
2. Satelit dengan GSO dapat mencakup daerah yang sangat luas, untuk cakupan seluruh dunia hanya ada 3 buah satelit.
3. Satelit dengan mudah melayani telekomunikasi tetap dan telekomunikasi bergerak seperti pesawat telepon, kapal laut dan kendaraan bergerak lainnya.
4. Memungkinkan dibangun hubungan *multiple access* dan *broadcast*. Sehingga memudahkan pengumpulan dan penyebaran informasi ke lokasi yang terpecah.

VSAT juga memiliki kelemahan, antara lain :

1. Biaya investasi besar.
2. Untuk luar angkasa harus tersedia peralatan-peralatan : satelit, *launcher* (kendaraan peluncur), asuransi peluncuran, stasiun pengendali baik untuk peluncuran maupun saat beroperasi.
3. Jarak satelit GSO cukup jauh, hal ini mengakibatkan *delay time* yang cukup lama (240 ms) yang memungkinkan dapat menimbulkan masalah dalam *signalling* dan komunikasi data.
4. Jika terjadi gangguan pada satelit dapat melumpuhkan seluruh sistem.^[9]

2.1.2 Jenis Very Small Aperture Terminal (VSAT)

Berdasarkan teknologi komunikasi yang digunakan, VSAT dibagi menjadi tiga jenis, yaitu :

1. VSAT *Link*

VSAT *Link* dapat memberikan bandwidth pribadi untuk kebutuhan sendiri untuk komunikasi dalam jumlah besar dan terus menerus dengan lokasi yang tidak tercakup oleh jaringan kabel. Layanan ini dapat digunakan untuk komunikasi data, suara maupun video.

2. VSAT *Net*

Pada VSAT *Net* menggunakan antenna parabola yang memiliki diameter sekitar 1,8 meter. VSAT *Net* sepenuhnya dikendalikan oleh stasiun induk. VSAT *Net* mempunyai dua jenis sistem layanan, yaitu:

- a. Sistem *Single hop*
- b. Sistem *Double hop*

3. VSAT IP

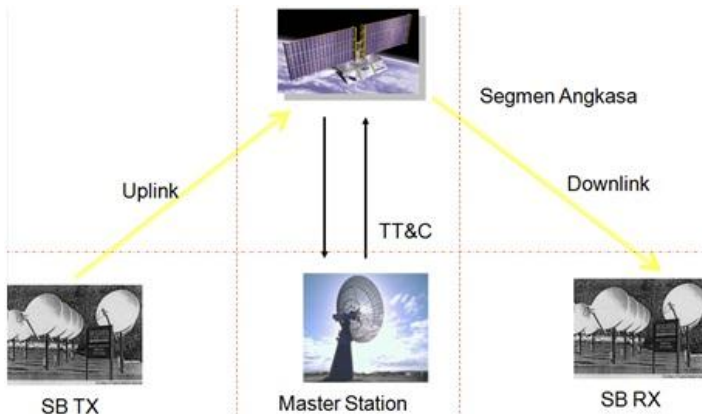
VSAT IP merupakan layanan komunikasi data dengan menggunakan media akses satelit dengan teknologi *Time Division Multiplex (TDM)/Time Division Multiple Access (TDMA)* yang berbasis pada standar *Internet Protocol (IP)*. Sering digunakan untuk komunikasi data akses internet, ATM bank, serta *database* pada pemerintahan.

4. VSAT SCPC

VSAT *Single Channel per Carrier (SCPC)* merupakan salah satu konfigurasi yang menggunakan metode akses *point-to-point*. Layanan komunikasi data atau *voice* yang menggunakan media akses satelit dengan teknologi *Single Channel Per Carrier (SCPC)* untuk hubungan titik ke titik (*point-to-point*) dan dapat dikembangkan menjadi hubungan titik ke titik banyak titik atau lebih dikenal dengan *Multiple Channel per Carrier (MCPC)*. Teknologi metode akses SCPC ini menempatkan masing-masing satu buah sinyal pembawa (*Carrier*) untuk setiap *node link* komunikasinya. *Link* VSAT SCPC memberikan *bandwidth* pribadi yang memerlukan komunikasi dalam jumlah besar. Layanan ini dapat digunakan untuk komunikasi data, suara, gambar, dan video.^[12]

2.1.3 Prinsip Dasar Sistem Komunikasi Satelit

Prinsip dasar sistem komunikasi satelit adalah sistem komunikasi radio dengan menggunakan satelit sebagai stasiun pengulang atau *repeater*. Arsitektur satelit dibedakan menjadi dua, yaitu *space segment* dan *ground segment*. Pada *space segment*, hanya terdapat satelit itu sendiri. Sedangkan, pada *ground segment* terdapat Stasiun Bumi pengirim dan penerima serta *Master Station* untuk *Telemetry, Tracking, dan Command (TTC)*. Arsitektur satelit dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Arsitektur Satelit ^[2]

Bagian utama dari sistem komunikasi satelit adalah ruas bumi dan ruas angkasa. Ruas bumi terdiri dari beberapa stasiun bumi yang berfungsi sebagai stasiun bumi pengirim dan stasiun bumi penerima. Sedangkan ruas angkasa berupa satelit yang menerima sinyal yang dipancarkan dari stasiun bumi pengirim kemudian memperkuatnya dan mengirimkan sinyal tersebut ke stasiun bumi penerima.

Jalur pada setiap kanal transponder pada satelit dari antena penerima ke antena pemancar disebut transponder. Transponder merupakan salah satu sub sistem satelit yang berfungsi memperkuat sinyal yang diterima, menggeser frekuensinya, dan memperkuat sinyal yang telah digeser frekuensinya itu kemudian disalurkan ke antena untuk dipancarkan kembali. Selain itu untuk single carrier, transponder satelit juga digunakan untuk pentransmisi multiple carrier. Pentransmisi ini mempengaruhi daya keluaran transponder. Untuk memberikan daya keluaran yang baik, transponder menggunakan suatu sistem penguatan

TWTA (Travelling Wave Tube Amplifier) atau SSPA (Solid State Power Amplifier).^[2]

2.2 PERANGKAT VSAT

2.2.1 Outdoor Unit (ODU)

A. Antena

Antena berfungsi untuk memancarkan dan menerima gelombang radio RF. Antena yang digunakan dalam jaringan VSAT adalah jenis antena *solid disc antenna* yang berbentuk parabola berjenis *offset*. Seperti pada gambar 2.3 merupakan gambar dari antena VSAT. Fungsi antena pada komunikasi VSAT adalah sebagai berikut:

- a. Memancarkan gelombang radio RF dari stasiun bumi ke satelit dengan *range* frekuensinya dari 5,925 GHz sampai dengan 6,425 GHz.
- b. Menerima gelombang radio RF dari satelit ke stasiun bumi dengan *range* frekuensinya dari 3,7 GHz sampai dengan 4,2 GHz.^[3]



Gambar 2.3 Antena VSAT^[3]

Mencari nilai penguatan (*gain*) antena dimaksudkan untuk mengetahui karakteristik antena yang digunakan Stasiun Bumi, sehingga dapat dicari nilai side lobe-nya.^[12]

$$G_{max} = 10 \log \eta + 20 \log (\pi D f / c) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

- η : Nilai efisiensi antena
 D : Diameter Antenna (m)
 f : Frekuensi Uplink (Hz)
 C : Kecepatan cahaya 3×10^8 ^[14]

B. Low Noise Amplifiers (LNA)

LNA berfungsi memberikan penguatan terhadap sinyal yang datang dari satelit melalui antena dengan *noise* yang cukup rendah dan *bandwidth* yang lebar. Lemahnya sinyal dari satelit yang diterima oleh LNA disebabkan oleh faktor berikut :

- a. Jauhnya letak satelit, sehingga mengalami redaman yang cukup besar disepanjang lintasannya.
- b. Keterbatasan daya yang dipancarkan oleh satelit untuk mencakup wilayah yang luas.

Untuk dapat memberikan sensitivitas penerimaan yang baik, maka LNA harus memiliki *noise* temperatur yang rendah dan mempunyai penguatan / *gain* yang cukup tinggi (*Gain* LNA = 50 dB). LNA harus sanggup bekerja pada band frekuensi antara 3,7 GHz sampai dengan 4,2 GHz (bandwidthnya 500 MHz).

C. *Solid State Power Amplifier (SSPA)*

SSPA berfungsi untuk memperkuat daya sehingga sinyal dapat dipancarkan pada jarak yang jauh. SSPA ini merupakan penguat akhir dalam rangkaian sisi pancar (*transmit side*) yang merupakan penguat daya frekuensi sangat tinggi dalam orde Giga Hertz. Tujuan penggunaan SSPA adalah untuk memperkuat sinyal RF pancar pada band frekuensi 5,925 GHz sampai dengan 6,425 GHz dari *Ground Communication Equipment* (GCE) pada suatu level tertentu yang jika digabungkan dengan *gain* antena akan menghasilkan daya pancar (EIRP) yang dikehendaki ke satelit.

D. *Up / Down Converter*

Up Converter berfungsi untuk mengkonversi sinyal *Intermediate frequency* (IF) atau sinyal frekuensi menengah dengan frekuensi senternya sebesar 70 MHz menjadi sinyal RF Up link (5,925 – 6,425 GHz). Sedangkan *down converter* berfungsi untuk mengkonversi sinyal RF Down link (3,7 MHz – 4,2 MHz) menjadi sinyal *Intermediate Frequency* (IF) dengan frekuensi center sebesar 70 MHz.^[3]

2.2.2 *Indoor Unit (IDU)*

Indoor Unit (IDU) adalah perangkat yang terletak pada bagian pelanggan. IDU terdiri modem. Perangkat IDU terbagi menjadi dua bagian, yaitu bagian pengirim dan penerima, yang mendukung *interface* komunikasi untuk aplikasi komunikasi, seperti *Local Area Network* (LAN), server, *Personal Computer* (PC) dan televisi. ^[17]

2.2.3 Modem

Modem adalah sebuah alat yang digunakan untuk menghubungkan komputer dengan internet melalui telepon, *line* kabel dan layanan dari penyedia jasa telekomunikasi lainnya. Modem merupakan singkatan dari modulator-demodulator. Dua kata itu sendiri mewakili dua macam fungsi yang dijalankan oleh sebuah modem

Fungsi modem yang pertama adalah melakukan modulasi sinyal digital ke sinyal analog untuk di transfer. Dan fungsi yang kedua adalah melakukan demodulasi sinyal untuk mengembalikan sinyal ke bentuk digital sehingga merepresentasikan informasi tertentu. Jadi fungsi modem secara sederhana yaitu mengubah sinyal analog menjadi sinyal digital begitu pula sebaliknya. Dengan demikian, data dapat dikirimkan melalui media apapun yang mampu mentransmisikan sinyal analog, mulai dari dioda sampai radio.^[1]

2.2.3.1 Tipe Modem Comtech CDM-600

Modem CDM-600 merupakan jenis modem untuk jaringan satelit terbuka yang ditujukan untuk komunikasi menggunakan satelit dengan aplikasi jaringan tertutup, yang beroperasi dengan menggunakan frekuensi IF 70/140 Mhz dan telah mendukung untuk koneksi eksternal transfer data.

2.2.3.2 Parameter Modem Comtech CDM 600

Berikut beberapa parameter modem CDM 600 :

a. *Transmited Frequency (Tx Freq)*

Transmited frequency (Tx Freq) yaitu parameter nilai input frekuensi untuk mengirimkan data.

b. *Receive Frequency (Rx Freq)*

Receive Frequency (Rx Freq) yaitu parameter nilai input frekuensi untuk menerima data.

c. *Forward Error Correction (FEC)*

Forward Error Correction (FEC) yaitu parameter nilai input yang digunakan untuk memonitor atau mengkoreksi kegagalan dalam proses pengiriman dan penerimaan data.

d. *Modulation (Mod)*

Modulation (Mod) yaitu parameter nilai input yang digunakan untuk menentukan kompresi data dari segi pengiriman data. Modulasi

yang tersedia dalam modem CDM 600 yaitu *BPSK*, *QPSK*, *8-PSK*, *16-QAM*

e. Demodulation (Demod)

Demodulation (Demod) yaitu parameter nilai input yang digunakan untuk menentukan kompresi data dari segi penerimaan data.

f. Information Rate (IR)

Information Rate yaitu parameter nilai input yang digunakan dalam menentukan kecepatan data yang akan dikirim dan diterima yang merupakan suatu nilai perbandingan dari bandwidth (lebar frekuensi).

g. Data Interface

Data interface yang digunakan sesuai dengan standar secara umum.^[19]

2.3 PERHITUNGAN LINK BUDGET SISTEM KOMUNIKASI SATELIT

Perhitungan *link budget* berguna untuk menilai kualitas *link* agar dicapai rancangan system dengan kualitas yang sesuai dengan yang diharapkan. Hasil akhir perhitungan *link budget* akan memperlihatkan pemakaian *power* dan *bandwidth* yang dibutuhkan sejumlah *carrier* pada transponder satelit.^[2]

2.3.1 Antena Pointing

Pointing antena bertujuan untuk menghadapkan arah antena di Stasiun Bumi ke satelit agar dapat mengakses satelit yang dituju. Untuk *pointing* antena secara benar ada dua parameter yang harus diperhatikan yaitu bidang vertikal yang disebut *elevasi* dan horizontal yang disebut *azimuth*.

$$A = \tan^{-1} \left(\frac{\tan(\theta_S - \theta_L)}{\sin \theta_i} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

$$E = \tan^{-1} \left(\frac{r - R_e \cos \theta_i \cos(\theta_S - \theta_L)}{R_e \sin(\cos^{-1}(\cos \theta_i \cos(\theta_S - \theta_L)))} \right) - \cos^{-1}(\cos \theta_i \cos(\theta_S - \theta_L)) \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana :

A = Sudut Azimuth

E = Sudut Elevasi

- R_E = Jari-jari Bumi (6.378 km)
- R = Jari-jari Orbit Geostationer (42,164,2 km)
- θ_i = Latitude Stasiun Bumi (“-“ Untuk LS dan “+” Untuk LU)
- θ_S = Longitude Stasiun Bumi (“-“ Untuk BB dan “+” Untuk BT)
- θ_L = Longitude Satelit (“-“ Untuk BB dan “+” Untuk BT) ^[14]

2.3.2 Perhitungan *Slant Range*

Daerah kemiringan (*Slant Range*) merupakan jarak sebenarnya antara Stasiun Bumi dengan satelit yang diukur dari Stasiun Bumi ditarik garis lurus menuju posisi satelit diatas.

$$d^2 = (R_e + H)^2 + R_e^2 - 2R_e(R_e + H) \sin \left[E + \sin^{-1} \left(\frac{R_e}{R_e + H} \cos E \right) \right] \dots(2.4)$$

Dimana :

R_e = Jari – jari ekuator bumi (6378 km)

E = Sudut elevasi

H = Ketinggian orbit satelit (35.786 km) ^[12]

2.3.3 *Signal To Noise Ratio (S/N)*

S/N adalah perbandingan level sinyal dengan level noise yang dinyatakan dalam dB.

$$S/N = 10 \log \frac{\text{Daya sinyal (Watt)}}{\text{Noise (Watt)}} \text{ dB}$$

Atau

$$S/N \text{ (dB)} = \text{level signal (dBm)} - \text{level noise (dBm)} \dots\dots\dots(2.5)$$

2.3.4 *Figure of Merite (G/T)*

Gain to Noise Temperature Ratio (G/T) merupakan ukuran penampilan baik-buruknya (*perfomance*) sistem penerimaan pada suatu SB.

$$G/T = \frac{\text{Gain antena (dB)}}{\text{Temperature sistem } (^{\circ}K)} \text{ (dB/}^{\circ}K\text{)a}$$

Atau(2.6)

$$G/T = G - 10 \log T \text{ (dB/}^{\circ}K\text{)}$$

Dimana :

G = penguatan antena Rx

T = temperatur sistem (antena/LNA/receiver) ^[7]

2.3.5 *Effective Isotropic Radiated Power (EIRP)*

EIRP adalah besarnya daya suatu *carrier* yang dipancarkan oleh suatu antena, satuannya dinyatakan dalam dB Watt. EIRP menyatakan besarnya level daya efektif yang dipancarkan secara isotropis oleh antena stasiun bumi atau satelit yang memancar sama ke semua arah. EIRP juga menyatakan hasil kali daya pancar sinyal pembawa (P_{TX}) dengan gain pada sistem pemancar (G_{TX}). EIRP dirumuskan sebagai berikut :

$$EIRP (dBW) = P_{TX}(dBW) \times G_{TX}(dBi) \quad \dots(2.7)$$

Atau secara logaritmis

$$EIRP (dBW) = 10 \log P_{TX} (dBW) + 10 \log G_{TX} (dBi)$$

Dimana :

P_{TX} = daya pancar pada antena pemancar (dBW)

G_{TX} = Gain antena pemancar (dBi)

EIRP_{SB} selain dicari dengan penjumlahan logaritma P_{TX} dan G_{TX} untuk system pemancar dapat juga dicari dari spesifikasi satelit yaitu:

$$EIRP_{SB \text{ Linear}}(dBW) = SFD + 10 \log(4\pi d^2) + PAD - IBO_{Carrier} \dots(2.8)$$

EIRP_{SAT} sendiri terbagi menjadi dua macam yaitu EIRP_{SAT Saturasi} yang nilainya disertakan pada spesifikasi satelit yang bersangkutan dan EIRP_{SAT} sangat dipengaruhi oleh besarnya EIRP_{SAT Saturasi} dan $OBO_{Carrier}$ yaitu: ^[2]

$$EIRP_{SAT \text{ Linear}}(dBW) = EIRP_{SAT \text{ Saturasi}} - OBO_{Carrier} \dots(2.9)$$

2.3.6 Free Space Loss (FSL)

Free space loss atau redaman ruang bebas yaitu redaman yang dialami sinyal yang dikirim satelit ketika sedang mengirim sinyal kembali ke Stasiun Bumi. Untuk menentukan besarnya nilai *free space loss up link*, digunakan asumsi *slant range* menentukan kemiringan.

$$L_u = \left[\frac{4\pi f_u d_u}{c} \right]^2 \quad \dots(2.10)$$

Dimana :

L_u = *free space loss up link*

d_u = *slant range up link* (m)

λ_u = panjang gelombang *up link* (m)

f_u = frekuensi *up link* (Hz)

C = kecepatan cahaya ($2,997925 \times 10^8$ m/s)

2.3.7 Kuat Daya Carrier Up Link

Daya *carrier up link* adalah daya yang diterima oleh antena pada satelit, setelah daya *carrier* yang dikirim Stasiun Bumi mengalami redaman-redaman pada saat *up link*.

$$C_u = \frac{EIRP}{L} \left(\frac{4\pi f u d_u}{c} \right)^2 G_u \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana :

- C_u = daya *carrier up link* (dB)
- EIRP = *Effective Isotropic Radiated Power* (dB)
- L = *loss tracking + atmosphere attenuation* (1,2-1,5 dB)
- L_u = *free space loss up link*
- D_u = *slant range uplink*
- C = kecepatan cahaya (3×10^8 m/s)
- G_u = *gain* antena penerima satelit (dBi).

2.3.8 Noise Power Up Link

Noise power up link dapat diartikan sebagai noise yang mempengaruhi atau mengurangi daya pada saat suatu sistem Stasiun Bumi mengirimkan sinyal ke satelit.

$$N_u = kT_u B \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana :

- K = konstanta *Boltzman* ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
- T_u = *noise temperatur* (K)
- B = *noise bandwidth* (Hz)

2.3.9 Carrier to Noise Ratio (C/N)

Carrier to Noise Ratio (CN) *up link* merupakan nilai perbandingan antara *carrier* yang diterima dengan sinyal noise yang dihasilkan dalam satu *link*.^[16] Persamaan *up link* untuk transmisi ke satelit dapat ditulis secara langsung dengan mensubstitusi nilai-nilai parameter sistem komunikasi satelit ke dalam persamaan dasar *link*.^[9]

$$C/N_{up} = EIRP_{SB\ HUB} - L_{TOT} + G/T_{SB} - K - 10 \log Bn^{[2]} \dots(2.13)$$

Diatas untuk menghitung arah *uplink* dan dibawah ini untuk arah *downlink*.

$$C/N_{down} = EIRP_{SAT} - L_{TOT} + G/T_{SAT} - K - 10 \log Bn^{[11]} \dots(2.14)$$

Dimana :

- EIRP_{SBHUB} = *Effective Isotropic Radiated Power* Stasiun Bumi (dBW)
- EIRP_{SAT} = *Effective Isotropic Radiated Power* Saturasi
- G/T_{SAT} = penguatan antena satelit (dBi)
- G/T_{SB} = penguatan antena stasiun bumi (dBi)
- K = konstanta *Boltzman* (1,38 x 10⁻²³ J⁰/K)
- Bn = *Bandwidth* yang digunakan (Hz)
- L_{TOT} = Redaman total yang terjadi (L_{FS}+L_{RAIN}+L_{SAL}+L_{ANT}).

Nilai dari C/N Total merupakan penjumlahan dari C/ uplink dan C/N downlink dengan menggunakan rumus sebagai berikut :^[9]

$$C/N_{Total} = ((C/N_{up})^{-1} + (C/N_{down})^{-1}) \dots\dots\dots(2.15)$$

Carrier to Noise adalah perbandingan *power* sinyal informasi dengan *noise* yang dihasilkan oleh internal perangkat. Untuk membandingkan keseluruhan *noise* terhadap setiap symbol informasi dalam *bandwidth* tertentu digunakan *Carrier To Noise*. *Carrier To Noise* ini menunjukkan perbandingan kuat sinyal radio dan *noise* yang ditimbulkan oleh perangkat internal. Semakin tinggi nilai *Carrier to Noise* semakin bagus sistem itu dalam menerima informasi. *Carrier To Noise* yang bagus menghindari kerusakan sinyal sehingga BER (*Bit Error Rate*) atau probabilitas kerusakan bit rendah. ^[17]

2.4 PARAMETER TRANSPONDER SATELIT

Transponder (Transmitter – Responder) berfungsi untuk menerima sinyal dari Stasiun Bumi, memperkuatnya dan mengirimkan kembali ke Stasiun Bumi tujuan.

2.4.1 Saturated Flux Density (SFD)

Saturated Flux Density (SFD) atau rapat fluks daya Satelit saturasi merupakan nilai yang menunjukkan sensitivitas dari satelit. SFD inilah yang membuat EIRP_{SAT} mencapai saturasi dan menentukan besarnya *power* yang akan dikirim stasiun bumi. Nilai SFD dapat diketahui dari spesifikasi satelit bersangkutan. ^[2]

2.4.2 Carrier Power Flux Density (PFD)

Parameter SFD menyatakan besaran kerapatan daya pancar Stasiun Bumi untuk menjenuhkan/saturasi transponder. Parameter ini menunjukkan tingkat kepekaan (*sensitivitas*) suatu transponder.

$$\Omega = \frac{EIRP}{4\pi d_u^2 L} \dots\dots\dots(2.16)$$

Atau

$$PFD = EIRP_{SB} - Spreading\ loss - Rain\ Att_{up} - Atmosfer\ Att_{up}^{[14]}$$

Dimana :

Ω = daya carrier power flux density (W/m²)

EIRP = Effective Isotropic Radiated Power (dBW)

d_u = slant range up link (m)

L = loss tracking + atmosphere attenuation (1,2-1,5 dB) [9]

2.4.3 Redaman PAD

PAD merupakan redaman pada transponder satelit yang ditambahkan kepada rapat fluks density yang diterima satelit, sistem satelit secara otomatis meredam rapat daya yang diterima. Redaman PAD berfungsi untuk mengoptimalkan sinyal yang diterima satelit.

2.5 INPUT BACK OFF (IBO) DAN OUTPUT BACK OFF (OBO)

IBO dan OBO menunjukkan penempatan titik kerja di bawah titik saturasi, yang masih berada pada kelinieran daerah kerja dari penguat transponder satelit. Pada umumnya input-output suatu penguat transponder satelit mempunyai karakteristik yang linier sampai pada batas tertentu dan selanjutnya akan mempunyai karakteristik tidak linier yang merupakan batas daerah saturasi dari penguat tersebut. Titik operasi dimana daya output HPA adalah maksimum disebut “titik saturasi”.

$$IBO_{Carrier} = SFD + PAD - PFD \dots\dots\dots(2.17)$$

$$OBO_{Carrier} = OBO_{Carrier} - (IBO_{Agg} - OBO_{Agg})^{[14]} \dots\dots\dots(2.18)$$

2.6 PENGUKURAN BESARNYA POWER DAN BANDWIDTH

Besarnya power dan bandwidth untuk satu carrier ditentukan dari perhitungan linknya. Hasil perhitungan link ini dapat memperlihatkan besarnya kapasitas power dan kapasitas bandwidth yang dibutuhkan carrier. Desain yang paling baik jika kapasitas bandwidth mendekati dengan kapasitas power. Jumlah carrier untuk satu transponder dilihat dari segi bandwidth dapat dirumuskan sebagai berikut :

Jumlah *carrier* untuk satu *transponder* dapat dihitung dari segi *bandwidth* sebagai berikut :

$$\text{Jumlah Carrier} = \frac{BW_{XPDR}}{BW_{ALL}} \dots\dots\dots(2.19)$$

Sedangkan untuk *prosentase bandwidth* per cariernya dirumuskan sebagai berikut :

$$\%BW = \left[\frac{(BW_{OCC})(Hz)}{(BW_{XPDR})(Hz)} \right] \times 100\% \dots\dots\dots(2.20)$$

Sedangkan untuk *prosentase power* per cariernya dirumuskan sebagai berikut :

$$\% \frac{\text{Power}}{\text{Carrier}} = 10^{-\left[\frac{(\text{Link Calculation})}{10} \right]} \times 100\% \dots\dots\dots(2.21)$$

$$\text{Link Calculation} = \text{EIRP}_{\text{SAT Linear}} - \text{EIRP}_{\text{SAT Operasi}}$$

Sedangkan untuk jumlah *carrier* dalam *transponder* dilihat dari segi *power* dapat dirumuskan sebagai berikut : ^[2]

$$\text{Jumlah Carrier} = 10^{\frac{(\text{EIRP}_{\text{SAT Saturasi}} - \text{OBO} - \text{EIRP}_{\text{SAT Operasi}})}{10}} \dots\dots\dots(2.22)$$

2.7 RUGI-RUGI PADA LINTASAN

Rugi-rugi pada lintasan transmisi adalah redaman yang terjadi pada proses pentransmision signal dari Tx (Pengiriman) hingga diterima di Rx (Penerima), rugi-rugi tersebut antara lain :

1. Rugi – rugi Saluran (L_{SAL})

Rugi-rugi pada saluran merupakan besarnya redaman yang terjadi sepanjang saluran yang dipergunakan. Dalam konfigurasinya redaman yang terjadi pada pengkoneksian konektor kabel dapat disimpulkan diantaranya L_{SAL} kabel IF (BNC Kabel) 1,3 dB/30 meter dan L_{SAL} kabel RF (IFL Kabel) 0,7 dB/meter.

2. Rugi – rugi Pancaran Antena (L_{ANT})

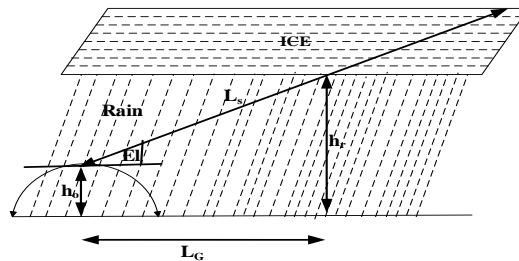
Rugi-rugi pada arah pancar antena biasanya dipengaruhi oleh daya maksimum. Hal ini berkaitan dengan keterarahan antena stasiun bumi yang tidak pas pada arah pancar posisinya, sehingga menyebabkan loss pada daya maksimum yang diperlukan dalam pancaran, umumnya besar rugi pancaran $\leq 1,5$ dB.

3. Rugi – rugi Atmosfir (L_{ATM})

Rugi-rugi atmosfer adalah rugi-rugi yang disebabkan akibat dari hasil proses absorpsi energi dengan gas atmosfer, proses absorpsi tersebut terjadi karena pengaruh cuaca. Nilai rugi-rugi atmosfer sangat kecil sehingga dapat diabaikan dalam perhitungan.

4. Rugi – rugi Redaman Hujan (L_{RAIN})

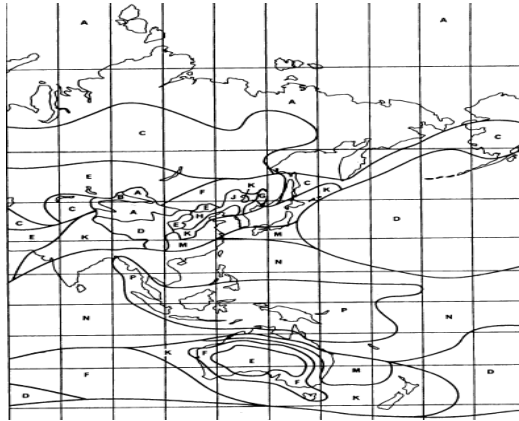
Redaman hujan merupakan redaman yang dimiliki pengaruh besar terhadap propagasi gelombang pada frekuensi diatas 1GHz. Adapun gambar 2.4 merupakan ilustrasi Sketsa Penentuan Redaman Hujan.^[10]



Gambar 2.4 Sketsa Penentuan Redaman Hujan^[12]

Dengan :

- a. Menurut *International Telecommunication Union (ITU)*, Indonesia digolongkan di *Region P* dimana memiliki intensitas hujan yang termasuk sangat tinggi. Intensitas hujan yang dapat mengakibatkan *link* komunikasi terputus sebesar 0,01% per tahun di Indonesia adalah 145 mm/h. Adapun Indonesia di golongankan dalam *Region P* dapat di ilustrasikan pada gambar 2.5 *Recomendation ITU-R PN.837-1*. R = *Rain rate point*, Adapun R dapat dilihat berdasarkan Tabel 2.2 *Rainfall Intensity Exceeded (mm/h)* dan untuk Tabel 2.3 mengenai *Frequency Dependent Coefficients For Estimating Specific Attenuation Using Equations*.



Gambar 2.5 Recommendation ITU-R PN.837-1^[13]
 Tabel 2.1 Rainfall Intensity Exceeded (mm/h)^[13]

Percented of time (%)	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
1.0	<0.1	0.5	0.7	2.1	0.6	1.7	3	2	8	1.5	2	4	5	12	24
0.3	0.8	2	2.8	4.5	2.4	4.5	7	4	13	4.2	7	11	15	34	49
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65	72
0.03	5	6	9	13	12	15	20	18	28	23	35	40	65	105	96
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145	115
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200	142
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250	170

Tabel 2.2 Frequency Dependent Coefficients For Estimating Specific Attenuation Using Equations^[13]

Frequency (GHz)	k_H	k_V	α_H	α_V
1	0,0000387	0,0000352	0,9122	0,8801
1.5	0,0000868	0,0000784	0,9341	0,8905
2	0,0001543	0,0001388	0,99629	0,9230
2.5	0,0002416	0,0002169	0,9873	0,9594
3	0,0003504	0,0003145	1,0185	0,9927
4	0,0006479	0,0005807	1,1212	1,0749
5	0,001103	0,0009829	1,22338	1,1805

6	0,001813	0,001603	1,3068	1,2662
7	0,002915	0,002560	1,3334	1,3086
8	0,004567	0,003996	1,3275	1,3129
9	0,006916	0,006056	1,3044	1,2937
10	0,01006	0,008853	1,2747	1,2636
12	0,01882	0,01680	1,2168	1,1994
15	0,03689	0,03362	1,0549	1,1275
20	0,07504	0,06898	1,0995	1,0663
25	0,1237	0,1125	1,0604	1,0308
30	0,1864	0,1673	1,0202	0,9974
35	0,2632	0,2341	0,9789	0,9630
40	0,3504	0,3104	0,9394	0,9293
45	0,4426	0,3922	0,9040	0,8981
50	0,5346	0,4755	0,8735	0,8705
60	0,7039	0,6347	0,8266	0,8263
70	0,8440	0,7735	0,7943	0,7948
80	0,9552	0,8888	0,7719	0,7723
90	1,0432	0,9832	0,7557	0,7558
100	1,1142	1,0603	0,7434	0,7434
120	1,2218	1,1766	0,7255	0,7257
150	1,3293	1,2886	0,7080	0,7091
200	1,4126	1,3764	0,6930	0,6948
300	1,3737	1,3665	0,6862	0,6869
400	1,3163	1,3059	0,6840	0,6849

Berdasarkan Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 maka terdapat persamaan 2.23a dan 2.23b.

$$a_c = \frac{\alpha_H + \alpha_V}{2} \dots\dots(2.23a)$$

$$b_c = \frac{\alpha_H b_H + \alpha_V b_V}{2 a_c} \dots\dots(2.23b)$$

b. Dengan demikian redaman hujan spesifik (dB/km) dapat dinyatakan pada persamaan 2.24.

$$\alpha = a_c R^{b_c} \dots\dots\dots(2.24)$$

c. Tinggi atmosfer terjadi hujan (h_r), terdapat pada persamaan 2.25.

$$h_r(km) = \begin{cases} 3 + 0,028, & \text{jika } 0 < \text{latitude} < 36^\circ \\ 4 - 0,075, & \text{jika } \text{latitude} \geq 36^\circ \end{cases} \dots\dots(2.25)$$

d. Panjang lintasan hujan efektif (L_s) untuk sudut elevasi antena $\geq 10^\circ$. Adapun terdapat pada persamaan 2.26.

$$L_s = \left(\frac{h_r - h_o}{\sin E} \right) \dots\dots\dots(2.26)$$

e. Jarak lintasan hujan (LG) terdapat pada persamaan 2.27.

$$L_G = L_S \cos E \dots\dots\dots(2.27)$$

f. r_p = rain rate reducing factor, dimana p (reduction factor) bergantung pada kondisi daerah masing – masing

$$\text{for } p = 0.001 \% \rightarrow r_{0.001} = \frac{10}{10 + L_G}; \text{for } p = 0.01\% \rightarrow r_{0.01} = \frac{90}{90 + 4L_G}$$

$$\text{for } p = 0.1 \% \rightarrow r_{0.1} = \frac{180}{10 + L_G}; \text{for } p = 1\% \rightarrow r_1 = 1$$

Faktor reduksi lintasan hujan pada wilayah Indonesia, memiliki presentase unavailability 0,01 % sehingga dapat ditulis pada persamaan 2.28.

$$r = \frac{90}{90 + 4L_G} \dots\dots\dots(2.28)$$

g. Maka besarnya redaman hujan total presentase curah hujan sebesar 0.01% terdapat pada persamaan 2.29.

$$L_{Rain(dB)}^{(r=0,01\%)} = \alpha L_S r_{0,01} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dengan : E = sudut elevasi

h_r = ketinggian hujan (km)

h_o = tinggi stasiun bumi dari permukaan laut (km)^[14]

2.8 ENERGI BIT TO NOISE RATIO (EB/NO)

Kualitas sinyal yang diterima ditentukan oleh perbandingan energi sinyal pembawa per bit per hertz yang diterima terhadap *derau temperature*.

$$Eb/No = C/N_{Total} + 10 \log \frac{BW}{Rb} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana :

C/N Total = *Carrier to noise ratio* (dB)

BW = *Bandwidth* (Hz)

Rb = *Bit rate* informasi (bps) ^[2]

2.9 BIT ERROR RATE (BER)

Berdasarkan hasil perhitungan *Energy Bit to Noise Ratio* (EB/No) pada perhitungan diatas, maka nilai *Bit Error Rate* (BER) dapat dihitung menggunakan persamaan 2.31^[10]

$$BER = \frac{e^{-\frac{Eb}{No}}}{\sqrt{4\pi \frac{Eb}{No}}} \dots\dots\dots(2.31)$$

BER Merupakan perbandingan dengan jumlah bit yang diterima secara tidak benar dengan jumlah bit informasi yang ditransmisikan pada selang waktu tertentu. Parameter BER adalah parameter yang digunakan untuk menilai *performance* transmisi digital. Semakin rendah parameter BER yang dihasilkan oleh suatu transmisi digital, semakin baik *performance* transmisi digital tersebut. ^[18]

2.10 **BANDWIDTH**

Bandwidth adalah suatu ukuran rentang frekuensi maksimum yang dapat mengalir data dari suatu tempat ke tempat lain dalam suatu waktu tertentu. Satuan yang dipakai untuk *bandwidth* adalah bit per *second* (bps) atau Byte *persecond* (Bps) dimana 1Byte = 8 bit. Bit atau binary digit adalah basis angka yang terdiri dari angka 0 dan 1. Satuan ini menggambarkan seberapa banyak bit (angka 0 dan 1) yang dapat mengalir dari satu tempat ke tempat yang lain dalam setiap detiknya melalui suatu media. Sedangkan dalam sinyal analog, *bandwidth* diartikan sebagai rentang antara frekuensi tinggi dan frekuensi terendah di ukur dalam satuan *Hertz* (HZ).

Manajemen *bandwidth* adalah sebuah proses penentuan besarnya *bandwidth* kepada tiap pemakai dalam jaringan komputer. Besarnya *bandwidth* akan berdampak kepada kecepatan transmisi, *Bandwidth* internet disediakan oleh provider internet dengan jumlah tertentu tergantung sewa pelanggan. Dengan QoS dapat diatur agar user tidak menghabiskan *bandwidth* yang di sediakan oleh provider. *Bandwidth* mempresentasikan jarak keseluruhan atau jangkauan di antara sinyal tertinggi dan terendah pada kanal komunikasi. Pada dasarnya *bandwidth* mempresentasikan kapasitas dari koneksi, semakin tinggi kapasitas, maka umumnya akan diikuti oleh kinerja yang lebih baik, meskipun kinerja keseluruhan juga tergantung pada faktor-faktor lain, misalnya *latency* yaitu waktu tunda antara masa sebuah perangkat meminta akses ke jaringan dan masa perangkat itu memberi izin untuk melakukan transmisi.

Bandwidth merupakan besarnya sebuah jalur komunikasi yang dapat dilihat dari selisih antara frekuensi tertinggi dengan frekuensi terendah. *Bandwidth* dapat juga merupakan fungsi dari kecepatan informasi, FEC, jumlah bit dalam satu simbol, dan roll of factor. Dalam

pencarian *bandwidth* yang dibutuhkan secara umum dapat dituliskan sebagai berikut: ^[5]

$$BW_{occ} (Hz) = \left[\left(\frac{R_{info}}{m_{FEC}} \right) (1 + \alpha) \right] \dots\dots\dots(2.32)$$

Untuk *bandwidth* yang dibutuhkan dapat dicari dengan rumus berikut :

$$BW_{All} = BW_{occ}(1 + GB) \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana : BW_{occ} = *bandwidth* yang dibutuhkan (Hz)

BW_{ALL} = *bandwidth* yang dialokasikan (Hz)

RINFO = bit rate (bps)

GB = *guard band* = 20%

m = jumlah bit untuk 1

simbol a = *roll of factor* ($0 \leq a \leq 1$) ^[2]

2.11 TCP/IP

TCP/IP *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* adalah salah satu jenis protokol yang memungkinkan kumpulan komputer untuk berkomunikasi dan bertukar data di dalam satu jaringan. Dalam protokol ini, tersedia berbagai macam layanan, antara lain:

1. *File Transfer Protocol* (FTP)
2. *Remote login* ^[11]

2.12 ALAMAT IP

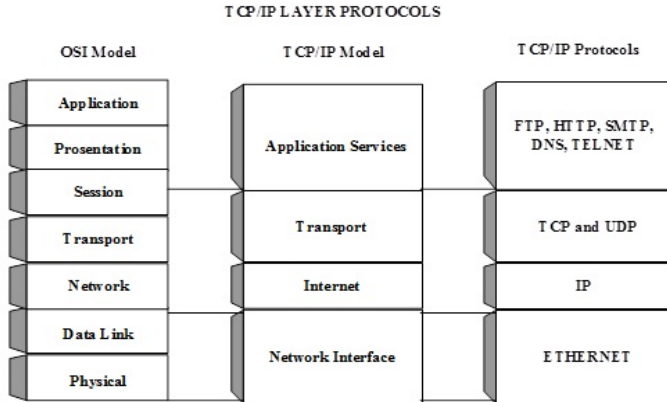
IP *Address* atau alamat IP adalah pengenal suatu *host* dalam suatu jaringan. Pada IP *address* sendiri terdapat kelas-kelas. Pembagian alamat IP didasarkan pada dua hal, yaitu *network ID* dan *host ID*. Kelas-kelas alamat IP sebagai berikut :

1. Kelas A
 - a. Panjang *network ID* adalah 8 bit, panjang *host ID* adalah 24 bit.
 - b. Kelas A digunakan untuk jaringan yang sangat besar.
2. Kelas B
 - a. Panjang *network ID* adalah 16 bit, panjang *host ID* adalah 16 bit.
 - b. Kelas C diimplementasikan untuk jaringan yang relatif besar.
3. Kelas C
 - a. Panjang *network ID* adalah 24 bit, panjang *host ID* adalah 8 bit.
 - b. Jumlah *host* yang mampu ditampung adalah 254 *host*.
4. Kelas D
 - a. Alamat IP kelas D digunakan untuk keperluan multicasting.
5. Kelas E

- a. Alamat IP di kelas E tidak digunakan untuk umum.^[2]

2.13 PROTOKOL JARINGAN *OSI LAYER*

Model *OSI* menerapkan konsep yang dikenal dengan enkapsulasi. Enkapsulasi adalah metode membungkus data dari satu lapisan model *OSI* dalam struktur data baru.^[10]



Gambar 2.6 *Layer TCP/IP*^[10]

Berdasarkan gambar 2.6 merupakan *layer TCP/IP* yang terdiri atas :

1. *Network interface layer*
2. *Internet layer*
3. *Transport layer*
4. *Application layer*^[12]

2.14 MODULASI

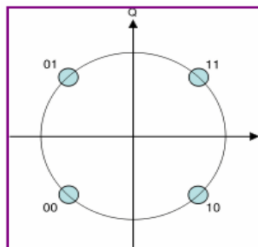
Modulasi adalah proses menumpangkan sinyal informasi pada sinyal pembawa (*carrier*). Modulasi dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu modulasi analog dan modulasi digital. Modulasi analog adalah modulasi yang sinyal sumbernya merupakan sinyal analog. Beberapa bentuk umum dalam sistem pentransmisiian yang terdapat pada modulasi analog yaitu *Amplitude Modulation* (AM), *Frequency Modulation* (FM), dan *Pulse Amplitude Modulation* (PAM). Modulasi AM adalah modulasi dimana frekuensi pembawa diubah amplitudonya sesuai dengan sinyal informasi yang dikirimkan.

Sedangkan modulasi digital yaitu proses penumpangkan sinyal informasi yang berupa sinyal digital kepada suatu sinyal pembawa yang berupa sinyal sinusoida atau dengan kata lain modulasi digital merupakan suatu proses dimana simbol-simbol digital diubah menjadi bentuk gelombang sesuai dengan karakteristik kanal yang akan dilewati baik berupa amplitudo, frekuensi maupun *phase*. Pada sistem komunikasi modulasi yang digunakan adalah modulasi digital karena modulasi digital lebih kebal terhadap *noise*, mudah dimultipleks menjadi berbagai bentuk (*voice*, data, dan video). Selain mempunyai banyak keuntungan, modulasi digital juga mempunyai kelemahan, yaitu adanya interferensi antar kanal (*Interchannel Interference*, ICI) dan interferensi antar simbol (*Intersymbol Interference*, ISI).

Jenis modulasi digital adalah *Amplitudo Shift Keying* (ASK) yaitu mengubah besar amplitudo gelombang pembawa, *Frequency Shift Keying* (FSK) yaitu mengubah frekuensi gelombang pembawa, dan *Phase Shift Keying* (PSK) yaitu mengubah fase gelombang pembawa. Bentuk variasi modulasi digital yang lain adalah modulasi *Quadrature Amplitudo Modulation* (QAM) yaitu modulasi yang mengubah amplitudo dan fase gelombang pembawa. ^[6]

2.14.1 Modulasi *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK)

Modulasi QPSK atau dengan kata lain modulasi penguncian penggeseran fase *quadrature* adalah modulasi digital dengan amplitudo tetap sedangkan fase sinyal termodulasinya berubah. Modulasi QPSK dikenal juga dengan PSK 4-er (4-ary PSK), yakni $M=2N$, dengan $N=2$ sehingga $M=4$. Cara yang digunakan untuk merepresentasikan informasi yang dibawa dalam modulasi QPSK adalah menggunakan diagram konstelasi seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 ^[8]



Gambar 2.7 Diagram konstelasi sinyal QPSK ^[6]

Titik-titik konstelasi biasanya dipilih pada posisi angular pada sudut 45o terhadap setiap sumbu konstelasi sehingga QPSK memiliki empat titik konstelasi simbol yang masing-masing mewakili dua buah bit yang berurutan yaitu 00, 01, 10, dan 11.

Arus data “00” dinyatakan dengan fase 45°

Arus data “01” dinyatakan dengan fase 135°

Arus data “10” dinyatakan dengan fase 225°

Arus data “11” dinyatakan dengan fase 315°

Modulasi QPSK memiliki efisiensi *bandwidth* 2 kali lebih besar jika dibandingkan dengan BPSK. Hal ini disebabkan karena QPSK merepresentasikan 2 bit data sedangkan BPSK hanya 1 bit data.

Perhitungan bandwidth modulasi QPSK

$$BW_{QPSK} = \left(\frac{R_t}{2}\right) (1 + \alpha) \dots\dots\dots(2.34)$$

Dimana:

α = roll of factor yang menyatakan unjuk kerja sebuah modulator

R_t = kecepatan transmisi (bit/s) ^[2]

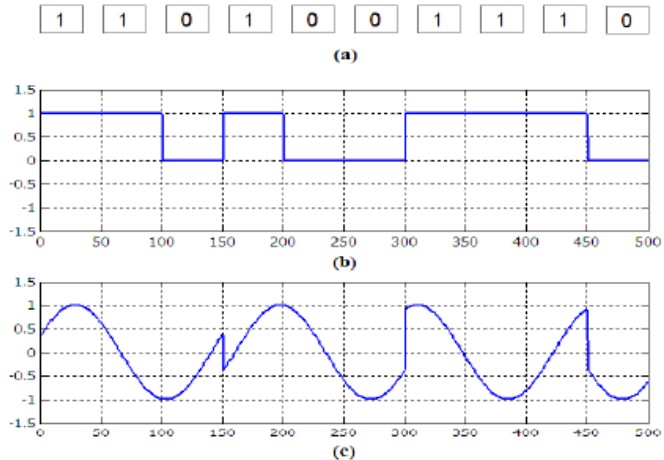
QPSK termasuk dalam teknik modulasi digital koheren, dimana dalam implementasi yang sebenarnya penerima membutuhkan rangkaian pengembali fase (*phase recovery circuit*). Rangkaian pengembali fase ini berguna untuk sinkronisasi osilator gelombang sinusoidal pada pengirim dan penerima. Modulasi QPSK memiliki blok diagram modulator dan demodulator. ^[6]

2.14.2 Modulasi Phase Shift Keying (PSK)

Modulasi *Phase Shift keying (PSK)* adalah modulasi digital yang menyampaikan data dengan mengubah atau memodulasi fase dari sinyal *carrier*. Dalam proses modulasi ini fase dari frekuensi gelombang pembawa berubah-ubah sesuai dengan perubahan status sinyal informasi digital. Sudut fase sangat berpengaruh untuk stabilitas frekuensi pada penerima. ^[6]

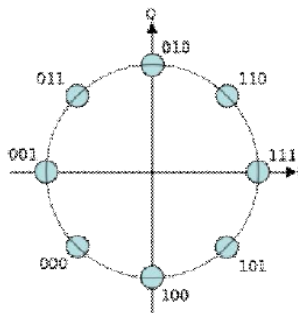
2.14.3 Eight Phase Shift Keying (8PSK)

Eight-PSK (8-PSK) merupakan teknik Mary encoding dimana $M = 8$. Dengan modulator 8PSK akan menghasilkan delapan perbedaan phase output. Untuk menghasilkan delapan phase output yang berbeda, maka diperlukan pengelompokan 3 bit input yang dinamakan tribits ($2^3 = 8$). Tiap simbol dari modulasi 8PSK berisi 3 bit binari. Seperti pada gambar 2.8 menunjukkan gambar sinyal 8-PSK.^[7]



Gambar 2.8 (a) Databinari, (b) Sinyal binari, (c) Sinyal binari yang di modulasi 8PSK^[7]

Sebagai catatan, bahwa tribit kode pada phase yang berdekatan mempunyai perbedaan hanya satu bit yang berbeda. Gambar 2.9 menunjukkan konstelasi 8-PSK. Maka kondisi input yang mungkin adalah tribit 001, 010, 011, 100, 101, 110, dan 111. Setiap tribit (tiga) bit code code menghasilkan satu dari delapan output phase yang dihasilkan.



Gambar 2.9 Gambar diagram konstelasi 8PSK^[7]

2.14.4 Modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM)

Quadrature amplitude modulation (QAM) adalah Teknik modulasi QAM termasuk teknik modulasi digital yang merupakan gabungan antara teknik modulasi fasa dan modulasi amplitudo. Jadi beberapa bit dibawa oleh sinyal carrier dalam bentuk perubahan phase dan beberapa bit yang lainnya dalam bentuk perubahan amplitudo.

2.14.5 *Sixteen-state Quadrature Amplitude Modulation* (16 QAM)

Pada *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), modulasi yang dilakukan meliputi modulasi amplitudo dan modulasi fasa, atau dapat dikatakan bahwa modulasi QAM merupakan gabungan dari modulasi ASK dan modulasi PSK sehingga modulasi *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) ini lebih sering dikenal dengan modulasi *Amplitude Phase Keying* (APK). Sehingga besar $m = 4$ ($2^m=16$) maka kecepatan bit informasinya sebesar empat kali kecepatan simbolnya. Bandwidth yang diutuhkan untuk perubahan fasa tiap detik adalah sebagai berikut:

$$BW_{16QAM} = \left(\frac{R_t}{4}\right)(1 + \alpha) \quad \dots\dots\dots(2.35)$$

Dimana:

α = roll of factor yang menyatakan unjuk kerja sebuah modulator

R_t = kecepatan transmisi (bit/s) ^[2]