

I. Link Layer Sebagai Eleman Utama

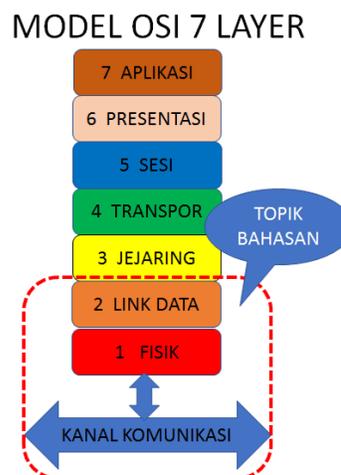
Link Layer adalah elemen utama dalam membangun jaringan komunikasi data, yang merupakan dua lapisan terbawah dalam model lapisan OSI. Lapisan ini adalah yang paling rumit dan memiliki fungsi dan kewajiban yang kompleks. Link Layer menutup detail perangkat keras yang menjadi platformnya, dan merepresentasi dirinya ke lapisan atas sebagai media untuk berkomunikasi. Atau dengan kata lain dapat dinyatakan bahwa Link Layer adalah komponen perangkat lunak dari perangkat keras yang menjadi platform-nya (lazim disebut Physical Layer).

Link Layer berfungsi menghubungkan dua host yang terhubung secara langsung. Koneksi langsung ini dapat berupa point to point atau broadcast dalam sistem jaringan yang berada pada segmen link yang sama. Pekerjaan Link Layer akan menjadi lebih kompleks ketika berhadapan dengan banyak host yang memanfaatkan kanal tunggal. Keadaan ini lazim disebut *multiple access*.

Link Layer bertugas untuk mengubah aliran bit data menjadi sinyal elektrik, dan mengirimkannya melalui perangkat keras yang menjadi platformnya (Physical Layer). Pada sisi penerima, Link Layer mengambil data dari perangkat keras (Physical Layer) yang berupa sinyal listrik, kemudian menyusunnya menjadi deretan bit dalam format frame sesuai standar, dan selanjutnya menyerahkannya ke lapisan/layer di atasnya untuk proses selanjutnya.

Link Layer memiliki dua sub-layer:

- **Logical Link Control:** Ini berkaitan dengan protokol/tata cara , *flow control*, dan *error control*
- **Media Access Control:** Ini berkaitan dengan kontrol media beserta perangkat kerasnya (untuk memeriksa keberadaan sinyal pada link/kanal komunikasi via pengendalian terhadap radio, atau Network Interface Card – NIC guna menghindari *collision* atau tabrakan sinyal).



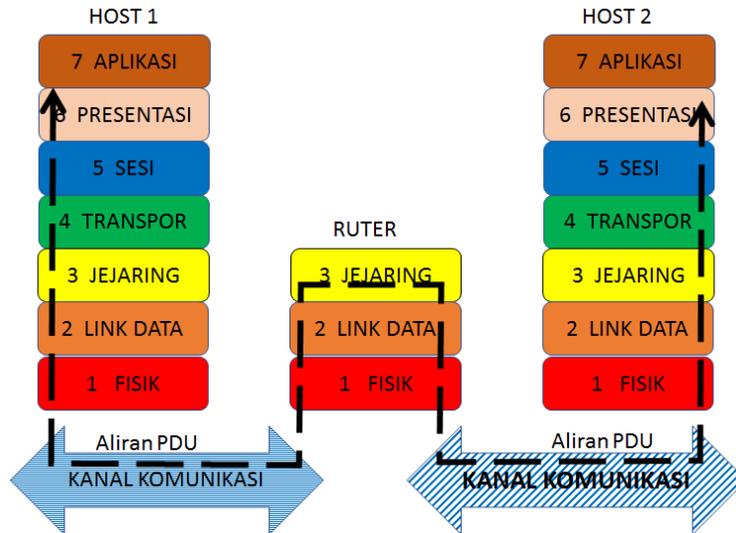
Gambar I-1: Link Layer dalam hubungannya dengan lapisan OSI

Link Layer menyediakan layanan komunikasi antara dua host. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar I-2, dimana jalur komunikasi ini dimulai pada host sumber, melewati kanal komunikasi dan berakhir di host tujuan. Untuk memindahkan datagram dari host sumber ke host tujuan, satu satunya faktor yang harus diperhatikan adalah integritas datagram. Untuk itulah diperlukan protokol pengiriman datagram yang menyangkut topik deteksi dan koreksi kesalahan. Dalam contoh Gambar I-2, ditunjukkan bahwa komunikasi data sedang berlangsung antara Host1 ke Host2 melewati dua segmen kanal komunikasi yang dihubungkan melalui sebuah ruter. Aliran protokol data unit (PDU) digambarkan dalam garis putus warna hitam. Dalam paket praktikum ini yang akan kita bahas adalah satu segmen jaringan yang melewati satu segmen komunikasi.

I.1 Tugas/layanan yang dikerjakan oleh Link Layer

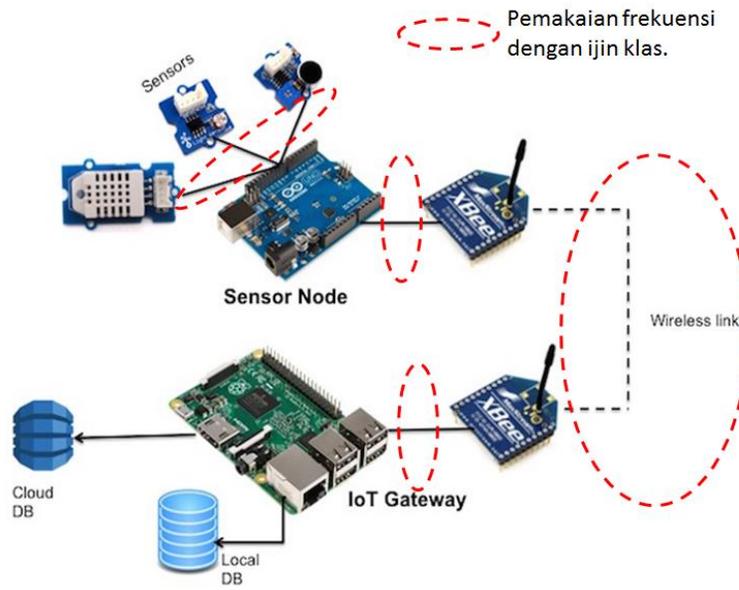
Protokol/tata-cara link-layer digunakan untuk memindahkan datagram diantara host dalam sebuah link/kanal komunikasi. Istilah Datagram itu sendiri hanyalah konstruksi dari sederetan bit data ditambah dengan bit-bit header. Datagram yang beroperasi di setiap layer mempunyai nomenklatur penamaannya sendiri-sendiri. Perhatikan Gambar I-1, Frame adalah Datagram pada link-layer, Paket adalah Datagram pada network-layer, sedangkan segmen adalah Datagram pada transport-layer. Protokol (tata cara) link-layer mendefinisikan format datagram yang dipertukarkan antara host di ujung-ujung link, serta tindakan yang diambil oleh host ketika mengirim dan menerima paket data. Deretan data yang dipertukarkan berdasarkan protokol link-layer ini disebut sebagai Frame. Setiap Frame Link-layer merangkum Paket data dari *network layer* (lapisan diatas Link-layer).

Proses yang dilaksanakan berdasarkan protokol link-layer saat mengirim dan menerima Frame adalah *error detection*, *retransmission*, *flow control* dan *random accses*. Contoh protokol link-layer yang sudah mapan karena sudah dipakai sebagai standar jaringan Internet diataranya adalah Ethernet, token ring, FDDI, dan PPP, ATM dan frame relay. Protokol link-layer masa kini yang sedang berlomba untuk diperkenalkan guna mendukung teknologi IoT diantaranya adalah, Radio Frequency Identification (RFID), Near Field Communication (NFC), Bluetooth Low Energy (BLE), Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), Z-Wave and IEEE 802.11 a/b/g/n/ah, Narrow Band IoT (NB-IoT), Long Term Evolution (LTE), Long Range Protocol (LoRa), dan SigFox.



Gambar I-1: Aliran data berdasarkan Protocol Data Unit (PDU)

Dalam era IoT dewasa ini sangat terbuka kemungkinan untuk mengembangkan sistem jaringan komunikasi nirkabel tertutup untuk keperluan sendiri, apalagi dengan diterbitkannya PM Menteri Kominfo No.1 Tahun 2019 Tentang Penggunaan Spektrum Frekuensi Radio Berdasarkan Kelas, berisi panataan frekuensi untuk keperluan IoT dengan daya kecil. Dengan demikian pengetahuan perihal pengembangan Link-layer akan menjadi sangat relevan dan dapat diimplementasi oleh siapa saja, tidak perlu perusahaan raksasa multi nasional, cukup dengan kumpulan anak muda dengan pengetahuan teknik telekomunikasi yang mumpuni, akan mampu untuk membuat/mengembangkan sistem komunikasinya sendiri. Hal ini tentu saja didorong oleh membanjirnya peranti-peranti IoT “kosong” dengan harga terjangkau yang akan menjadi suatu sistem dengan harga berlipat setelah diisi oleh sistem komunikasi yang dikembangkan sendiri. Gambar I-3 menunjukkan pada kita bahwa Link-layer dengan sinyal kecil atau wireless-link merupakan komponen utama membentuk jaringan IoT lokal dan tertutup, sebelum akhirnya terhubung dengan gateway menuju jaringan global.



Gambar I-3: Komponen utama IoT adalah jaringan Wireless-link lokal yang memanfaatkan frekuensi dengan ijin kelas

I.2 Ilustrasi Link Layer

Untuk mendapatkan wawasan tentang banyaknya jenis link-layer seperti pada contoh diatas, mari kita analogikan dengan sistem transportasi. Sebuah agen perjalanan kita minta untuk merencanakan perjalanan wisata dari Sukolilo ke Gunung Fuji di Jepang. Misalkan agen perjalanan memutuskan bahwa paling nyaman bagi wisatawan untuk naik Bluebird dari Sukolilo ke Bandara Juanda, kemudian dari bandara Juanda penerbangan langsung dengan pesawat Garuda ke bandara Narita, dan akhirnya kereta dari bandara Narita ke sebuah hotel dekat stasiun dikawasan gunung Fuji. Setelah agen perjalanan melakukan tiga pemesanan, maka Bluebird bertanggung jawab membawa kita dari Sukolilo ke bandara Juanda. Selanjutnya Garuda bertanggung jawab untuk membawa kita dari bandara Juanda ke bandara Narita, dan selanjutnya Japan Railway (JR) bertanggung jawab membawa kita dari bandara Narita ke stasiun Fuji, dan selanjutnya berjalan kaki ke hotel Ryokan dekat stasiun Fuji. Masing-masing dari tiga segmen perjalanan adalah langsung karena memang berdekatan. Perhatikan bahwa tiga segmen transportasi dikelola oleh perusahaan yang berbeda dan menggunakan moda transportasi yang sama sekali berbeda (taxi, pesawat dan kereta api). Meskipun moda transportasi berbeda, masing-masing menyediakan layanan dasar yakni memindahkan penumpang dari satu lokasi ke lokasi lain yang berjauhan. Layanan ini digunakan oleh agen perjalanan untuk merencanakan perjalanan wisata. Dalam analogi transportasi ini, turis dianalogikan dengan datagram, setiap segmen transportasi dianalogikan sebagai link/kanal komunikasi, mode transportasi dianalogikan dengan protokol link-layer, dan agen perjalanan yang merencanakan perjalanan dianalogikan dengan protokol routing. Itulah kenapa saat ini protokol Link-Layer yang ditawarkan sedemikian

banyaknya, karena masing masing sengaja dirancang untuk keperluan yang spesifik tergantung dari sifat segmen perjalanan yang akan dilalui. Jauh, dekat, penumpang rombongan atau perorangan, faktor kesulitan medan perjalanan, hal-hal inilah yang membuat banyak diperlukan protokol Link-Layer yang berbeda sesuai kebutuhan, meskipun harus tetap berpegang pada prinsip efisiensi dan keamanan.

1.2 Tugas/layanan Spesifik Dari Link-layer

Tugas dasar dari Link-layer adalah "memindahkan" datagram dari satu host ke host yang berdekatan melalui satu link komunikasi. Perincian layanan Link-layer bergantung pada protokol Link-layer yang secara khusus telah didesain untuk keperluan yang spesifik. Tugas/layanan yang dapat ditawarkan oleh protokol Link-layer meliputi:

Framming dan akses link: Hampir semua protokol Link-Layer mengkapsulasi setiap datagram milik network-layer di atasnya, menjadi Frame pada Link-layer, sebelum dikirim ke link/kanal komunikasi. Satu Frame terdiri dari kumpulan data berasal dari datagram milik network-layer di atasnya, dan ditambah dengan sejumlah bit header. Protokol Link-Layer menentukan struktur frame, serta tata-cara akses kanal yang menentukan aturan-aturan yang digunakan frame saat ditransmisikan ke link komunikasi.

Suatu link komunikasi point-to-point artinya hanya memiliki satu pengirim di satu ujung link dan satu penerima di ujung link yang lain. Pengirim dapat mengirim frame data kapan saja karena link selalu kosong/nganggur. Kasus yang lebih menarik adalah ketika banyak host berbagi link tunggal - yang lazim disebut *multiple access*. Di sini, protokol akses saluran berfungsi untuk mengoordinasikan transmisi frame ke banyak host. Header frame juga sering menyertakan bit-bit untuk keperluan pengalamatan fisik dari host.

Pengiriman data yang handal: Jika protokol Link-Layer menyediakan layanan pengiriman-andal, maka hal ini akan menjamin proses pemindahan setiap datagram dari network-layer ke link/kanal komunikasi terjadi dengan tanpa kesalahan. Setiap layanan Link-layer yang handal pasti dilaksanakan dengan menyertakan sistem *acknowledgement* dan *retransmit*. Layanan pengiriman link-layer yang handal sering digunakan untuk link/kanal yang rentan terhadap tingkat eror tinggi, seperti link nirkabel, dengan tujuan memperbaiki kesalahan secara lokal pada segmen link di mana kesalahan terjadi, dibanding jika harus memaksakan transmit ulang dari ujung transmisi end-to-end. Namun, pengiriman tautan-lapisan yang handal sering dianggap sebagai biaya yang tidak perlu untuk link/kanal komunikasi dengan karakter sedikit nois (BER kecil), seperti serat optik, kabel koaksial dan kabel twisted-pair. Karena alasan ini, protokol link-layer memang dirancang untuk keperluan transmisi data dengan karakter link/kanal komunikasi tertentu.

Flow Control dan Sinkronisasi: Setiap host mempunyai kapasitas buffering terbatas. Ini adalah potensi masalah, karena host penerima dapat menerima Frame pada kecepatan yang lebih tinggi dibanding proses pengolahan Frame disisi host penerima. Tanpa flow kontrol, buffer penerima bisa meluap yang mengakibatkan beberapa Frame akan hilang. Protokol Link-layer dapat

memberikan flow-control untuk mencegah pengiriman oleh host dari sisi pemancar jika host penerima belum menyelesaikan prosesnya. Ketika Frame data dikirim pada link/kanal komunikasi, kedua mesin harus disinkronkan untuk menghindari jitter sehingga transfer data dapat dilakukan dengan tanpa kesalahan pergeseran waktu.

Error Detection: Host penerima dapat secara keliru mendekode simbol dalam frame sebagai bit “0” padahal bit yang dikirim adalah “1” (atau sebaliknya). Kesalahan ini disebabkan oleh atenuasi sinyal dan juga noise elektromagnetik. Datagram yang memiliki kesalahan tidak akan diteruskan ke link/kanal komunikasi, sehingga protokol Link-layer menyediakan mekanisme bagi sebuah segmen link komunikasi untuk mendeteksi keberadaan error. Hal ini dilakukan dengan meminta host menyertakan bit kontrol deteksi error dalam Frame, dan meminta host penerima melakukan deteksi error. Hal ini merupakan layanan yang sangat umum dalam protokol-protokol Link-layer.

Error Corection: Koreksi error mirip dengan deteksi error, kecuali bahwa penerima tidak hanya mampu mendeteksi apakah error telah muncul dalam frame, tetapi juga dapat menentukan dengan tepat posisi error didalam frame (dan karenanya error segera dapat diperbaiki). Beberapa protokol (seperti ATM) menyediakan koreksi kesalahan link-layer untuk bit-bit header saja.

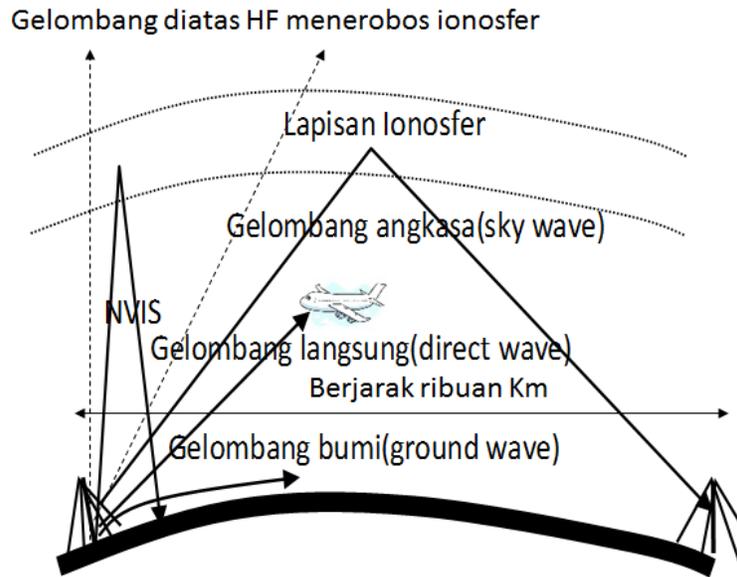
I.3 Praktikum Merakit Link Layer Nirkabel Laju Bit Rendah



Gambar I-2: Satu segmen jaringan merupakan elemen dasar saat mulai membangun jaringan komunikasi data yang rumit.

Tema praktikum kali ini adalah merakit Link Layer nirkable dengan laju bit rendah. Frekuensi yang dipakai untuk kanal komunikasi adalah HF (High Frequency) yang terletak diantara 3 MHz s/d 30 MHz. Saat ini antenna HF yang kita miliki adalah Log-periodic dengan range frekuensi antara 13 MHz s/d 30 MHz, sehingga pada praktikum ini akan memanfaatkan frekuensi kerja pada pita antara 13 MHz s/d 30 MHz.

I.4 Sifat Propagasi Gelombang HF



Gambar I-3: Moda propagasi gelombang HF

Pita HF atau High Frequency adalah sebutan untuk pita spektrum frekuensi antara 3MHz s/d 30MHz. Ada juga yang menyebut gelombang **dekameter** karena panjang gelombang HF ada pada kisaran puluhan meter. Dibandingkan dengan pita spektrum frekuensi di atasnya (VHF, UHF, pita L, pita S, dst), maka gelombang radio pada pita HF mempunyai fitur yang tidak dimiliki oleh gelombang radio pada spektrum frekuensi di atasnya. Untuk gelombang radio dengan frekuensi VHF, UHF atau yang lebih tinggi, akan merambat sepanjang atmosfer ke arah angkasa, hampir tanpa gangguan arah, selain redaman karena propagasi saja. Tidak demikian dengan gelombang radio pada pita HF, pada saat melewati lapisan ionosfer pada kondisi tertentu gelombang radio HF akan sedikit demi sedikit berbelok arah hingga akhirnya kembali menuju bumi. Sehingga dapat dikatakan lapisan Ionosfer ini terhadap gelombang radio HF adalah merupakan kaca pemantul. Lapisan Ionosfer mempunyai ketinggian terhadap permukaan bumi antara 100Km hingga 300Km.

Moda rambatan atau propagasi gelombang radio HF dapat diklasifikasi menjadi 4 moda, yakni :

- a) Moda propagasi gelombang bumi (ground wave)
- b) Moda propagasi gelombang langsung (direct wave)
- c) Moda propagasi gelombang angkasa (sky wave)
- d) Moda propagasi NVIS (Near Vertical Incident Skywave)

Empat moda propagasi gelombang radio HF dapat dilihat pada Gambar I-4. Dalam ranah propagasi HF, bumi dapat dikategorikan sebagai penghantar gelombang yang mempunyai sifat konduktivitas buruk. Sehingga gelombang bumi atau gelombang menyusur bumi akan mengalami

redaman propagasi yang besar. Moda komunikasi ground wave masih bisa terlaksana pada pita 3,5MHz, namun untuk pita-pita spektrum frekuensi diatas itu, implementasi moda ground wave sudah tidak terjadi lagi.

Moda propagasi gelombang langsung atau direct wave mempunyai sifat merambat langsung baik dengan cara menyusuri bumi atau langsung menuju angkasa menuju tujuan. Moda ini mempunyai sifat Lone-of-Sight(LOS) sehingga sangat rentan terhadap halangan kontur bumi seperti gunung, bukit maupun bangunan-bangunan tinggi. Moda ini sudah tergantikan dengan keberadaan komunikasi radio dengan frekuensi VHF keatas yang mempunyai fitur dasar yakni Line-of-Sight (LOS). Komunikasi radio dengan fitur LOS hanya bisa terlaksana jika posisi pemancar dan penerima masih didalam batas cakrawala. Untuk menghindari interferensi kompatibilitas, maka pelaksanaan moda ini tidak boleh mengoperasikan frekuensi dibawah pita 14MHz karena pita spektrum frekuensi dibawah 14MHz ini mempunyai sifat rambatan relatif mudah kemana-mana. Jarak jangkauan pemakaian moda ini tidak lebih dari 40Km. Selanjutnya moda ini lebih lazim dimanfaatkan untuk komunikasi pesawat terbang dengan menara kontrol pada saat posisi terbang jelajah.

Moda propagasi gelombang angkasa atau sky wave merambat ke arah angkasa dengan sudut elevasi lebih besar 0° hingga di bawah 90° . Jarak jangkauan moda gelombang angkasa ini bisa mencapai ribuan kilometer. Moda propagasi ini bisa melewati batas cakrawala. Karena sifatnya yang melewati batas cakrawala ini maka moda ini selain dimanfaatkan untuk komunikasi titik-ke-titik, juga secara intensif dipakai untuk aplikasi RADAR lewat batas cakrawala atau lazim disebut Over The Horizon RADAR (OTHR), yakni radar yang mampu mendeteksi objek-objek terbang dibalik batas cakrawala. Negara-negara seperti Australia, Iran dan Rusia hinggga saat ini masih secara intensif memakai dan mengembangkan OTHR ini.

Yang terakhir adalah moda propagasi NVIS atau Near Vertical Incident Sky wave. Jarak jangkauan moda ini berkisar antara puluhan kilometer hingga 500 Km. Jarak jangkauan moda ini hanya relatif pendek (tidak lebih dari 500km) tapi sifat propagasinya adalah gelombang langit yang sama sekali tidak terpengaruh oleh hambatan kontur bumi. Karena itu moda ini banyak dipakai untuk komunikasi pasukan tempur yang sedang beroperasi. Namun demikian saat terjadi bencana yang kebetulan didaerah blank spot tentu moda ini dapat dimanfaatkan untuk menghubungkan wilayah bencana dengan pusat stasiun kendali mitigasi yang berjarak puluhan kilometer hingga beberapa ratus kilometer dari titik bencana.

Pada saat gelombang radio merambat menuju ionosfer, maka komponen medan listriknya akan membuat elektron-elektron dalam lapisan ionosfer akan ikut berosilasi secara sinkron. Dengan demikian dapat diibaratkan di dalam lapisan ionosfer terdapat banyak antena-antena renik yang memancarkan ulang gelombang radio yang datang. Proses pancar ulang ini menyebabkan perubahan kecepatan gelombang-gelombang radio tersebut. Selanjutnya pembiasan arah gelombang radio akan terjadi pada saat kerapatan elektron didalam lapisan ionosfer itu berubah, dan jika ada beberapa sub-lapisan ionosfer yang mempunyai kerapatan elektron lebih besar

$$N = N_0 B$$

Dimana:

- C: Kapasitas kanal dalam bit/detik
- B: Bandwidth kanal dalam Hz
- S: Power sinyal dalam watt
- N_0 : Kerapatan Spektral Nois (NSD) dalam watt/Hz
- N: Power nois dalam watt

Contoh:

Bandwidth kanal telepon = 3100 Hz

S/N = 30 dB, maka

$$10 \log_{10} (S/N) = 30$$

$$\log_{10} (S/N) = 3$$

S/N = $10^3 = 1000$, maka kapasitas kanal maksimum adalah

$$C = 3100 \log_2 (1+1000) \\ = 30.894 \text{ bps.}$$

Beberapa komentar terhadap teorema Shannon ini adalah:

- Bit-bit data yang dikirim diasumsikan bersifat random
- Teorema Shannon hanya mempertimbangkan keberadaan nois Gaussian random, namun sama sekali mengabaikan kenyataan gangguan keberadaan didunia nyata seperti fading, interferensi, distorsi, dll.
- Teorema Shannon hanya menyatakan batasan kapasitas maksimum, namun sama sekali tidak menyebut cara (modulasi maupun teknik koding) untuk mendapatkan kapasitas itu. Bisa dikatakan bahwa upaya mencapai kapasitas itu sama saja kita memimpikan realisasi "Perpetual Motion Mechine". Dalam dunia fisika modern ada juga rumus relativitas Einstein $E=mc^2$, dimana dia sendiripun tidak mampu menjelaskan dengan cara bagaimana rumus itu dapat direalisasi didunia nyata. Barulah kemudian fisikawan AS yang lebih teknis bernama Julius Robert Oppenheimer memimpin proyek Manhattan untuk pembuatan bom atom yang akhirnya dijatuhkan di 2 kota di Jepang pada tahun 1945.
- Kita dapat mengirim data lebih cepat dari kapasitas kanal, tetapi hal itu tidak akan bebas dari eror. Jika kita tambahkan bit redundan untuk kode koreksi eror guna menangani kesalahan, maka laju data yang dikoreksi akan selalu lebih kecil dari kapasitas saluran, namun paling tidak kita telah berupaya, dan karena upaya inilah yang akhirnya dapat dinikmati oleh pengguna teknologi saat ini.

1.6 Hubungan S/N dan Eb/N0

Perhatikan hubungan antara energi per bit dan total power sinyal dibawah ini,

$$E_b = \frac{S}{R_b}$$

Dimana: E_b : energi per bit data dalam satuan Joule/bit

S : total power sinyal dalam satuan watt

R_b : bit rate atau laju bit dalam satuan bit/detik

Ingat bahwa

Energi = Power \times Waktu, maka Power = Energi/Waktu,

atau dalam rumus,

$$Power = \frac{Energi}{Waktu}$$

$$E_b = \frac{S}{R_b} = \frac{\text{watt}}{\frac{\text{bit}}{\text{detik}}}$$

E_b adalah energi(Joule) per bit,

$$E_b = \frac{\text{Joule}}{\text{bit}}$$

$$\frac{\text{watt}}{\text{bit/detik}} = \frac{\text{Joule}}{\text{bit}}$$

$$\text{Joule} = \text{watt} \times \text{detik} \quad (\text{definisi Energi})$$

Kembali kepada

$$E_b = \frac{S}{R_b}$$

Jika power noise adalah

$$N = N_0 B$$

Dimana:

N_0 : Noise Spectral Density dalam watt/Hz

B : Bandwidth (BW),

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S}{R_b N_0}$$

Dimana N_0 adalah noise power untuk BW 1 Hz.

$$\left[\frac{S}{N_0} \right]_{1\text{Hz}} = \left[\frac{E_b}{N_0} \right]_{1\text{Hz}} R_b$$

atau,

$$\frac{S}{BN_0} = \frac{E_b}{BN_0} R_b$$

$$SNR = \frac{E_b}{BN_0} R_b$$

Kembali kepada

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

Ini artinya bahwa, menduakalikan BW bukan serta merta akan dapat menduakalikan kapasitas kanalnya, karena noisnya juga akan menjadi dua kali lipat.

Benarkah menaikkan bit rate (menambah bit redundan akibat proses ECC) akan menaikkan SNR. Jawabannya adalah tidak. Karena menaikkan bit rate sama dengan menambah BW. Namun ada cara lain untuk menambah bit rate tapi tidak menambah BW, yakni dengan menambah level modulasi (QAM) guna meningkatkan spectral efficiency (bit/detik/Hz), meskipun masih ada tradeoff mempertahankan BER antara menambah bitrate dan pada saat sama menerapkan ECC.

Manfaat coding utamanya adalah untuk mengurangi power sinyal saat proses transmisi data, yang pada gilirannya akan dapat menambah usia baterai, mengurangi harga perangkat pemancar, dan mengurangi efek pengrusakan sel hidup akibat radiasi gelombang elektromagnetik.

Pengurangan power sinyal dengan cara coding dilakukan dengan menambah BW. Contoh: modulasi QPSK tanpa coding memerlukan $E_b/N_0 = 10$ dB untuk mendapatkan BER sekitar 10^{-5} . Selanjutnya QPSK dengan tambahan kode Viterbi dengan rate $\frac{1}{2}$ dan $k=7$, memerlukan $E_b/N_0 = 4$ dB untuk mendapatkan angka BER yang sama. Ini artinya hanya memerlukan daya $\frac{1}{4}$ nya untuk mendapatkan BER yang sama jika memakai *convolution code*, akan tetapi perlu bandwidth $2\times$ lebih lebar. Biasanya "hukuman bandwidth" ini dibayar dengan memanfaatkan skema modulasi dengan level lebih tinggi (QAM) agar mendapatkan spectral efficiency (bit/detik/Hz) lebih baik. Sehingga langkah teknis yang seakan-akan berlawanan untuk dilakukan guna menjaga BER tetap, adalah menaikkan level modulasi (QAM) guna menambah bit rate sehingga menaikkan syarat nilai SNR, dan pada saat yang sama menyisipkan algoritma ECC guna menurunkan syarat SNR.

1.7 Memperhatikan Drift Frekuensi dari Radio Transceiver

Drift frekuensi adalah penyimpangan osilator yang tidak disengaja terhadap frekuensi nominalnya. Penyebabnya yang mungkin adalah penuaan komponen, perubahan suhu yang mengubah efek piezoelektrik dalam osilator kristal, atau masalah pada regulator tegangan yang mengontrol tegangan bias ke osilator. Terminologi stabilitas frekuensi mengacu kepada suatu kondisi tanpa drift atau drift sangat kecil terhadap nominal frekuensinya. Stabilitas frekuensi biasa diukur dalam ppm (parts per million).

- Drift frekuensi mid-term dan long-term.
Mid-term hingga hingga long-term adalah katagori untuk frekuensi drift dalam perioda selama berjam-jam atau berhari-hari. Dalam hal ini umumnya disebabkan oleh perubahan suhu lingkungan antara siang dan malam, atau perubahan suhu musiman.
- Drift frekuensi short-term.
Short-term drift frekuensi akan terjadi selama perioda transmisi itu sendiri. Ada tiga kemungkinan penyebab drift frekuensi short-term.
 - 1) Drift frekuensi di stasiun pemancar.
 - 2) Drift frekuensi di stasiun penerima.
 - 3) Efek propagasi, seperti efek Doppler ionosfer sebagai fungsi ketinggian lapisan reflektif ionosfer yang berubah dengan cepat pada waktu-waktu tertentu, atau efek dispersi ionosfer.

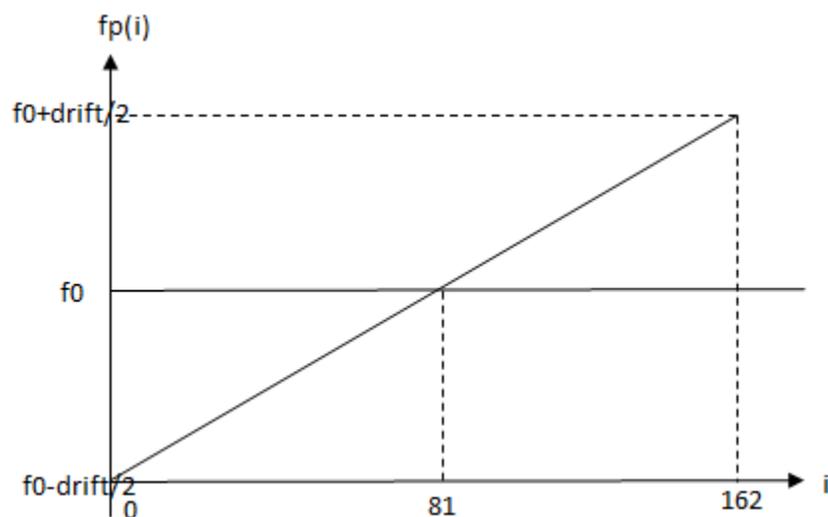
Pada pemancar radio, drift frekuensi dapat menyebabkan stasiun radio bergeser ke saluran yang berdekatan, menyebabkan gangguan interferensi. Karena itu, regulasi perangkat telekomunikasi menentukan toleransi yang diperbolehkan untuk osilator dalam perangkat yang secara legal boleh dipakai. Contohnya adalah pada Peraturan Menteri KOMINFO 17/2018 ada pasal yang menyatakan bahwa untuk pemancar 4 MHz - 29,7 MHz dibawah 500 watt maka drift yang diperbolehkan sebesar maksimum 50 ppm (part per million) , sedangkan diatas 500 watt maksimum sebesar 20 ppm. Spesifikasi transceiver HF kualitas paling rendah (misalnya Icom IC-718) berkisar 30 ppm, sedangkan untuk tipe yang lebih baik seperti IC-7410 berkisar 0,5 ppm, dan untuk yang kualitas bagus seperti IC-7850 bisa mencapai hanya 0,05 ppm pada suhu kamar.

Jika pada frekuensi karier 28 MHz (10 m band) terjadi drift hingga 2Hz selama transmisi, maka pada 14MHz (pita 20 m) akan terjadi drift sedikit di atas 1Hz, setengah dari yang yang terjadi pada 28 MHz. Karena drift terjadi secara proporsional terhadap frekuensi kariernya, maka

frekuensi 7 MHz (pita 40m) akan terjadi drift 0,5Hz. Dengan demikian untuk kualitas ppm yang sama maka secara proporsi frekuensi drift akan menjadi lebih besar/buruk untuk frekuensi-frekuensi lebih tinggi.

Untuk keperluan proses korelasi pada komunikasi digital tentu diperlukan drift yang lebih kecil, atau dengan metoda kompensasi jika tetap memakai radio penerima dengan ppm relatif besar. Kompensasi dilakukan dengan cara pemodelan linear atau non-linear tergantung derajat akurasi yang diinginkan.

Stasiun penerima menjalankan perangkat lunak penguraian WSPR pada komputer Raspberry Pi, yang menerapkan Digital Signal Processing (DSP) terhadap sinyal audio yang diterima, dalam upaya mencari sinyal lemah dari pemancar WSPR yang dipancarkan dari tempat yang sangat jauh. Perangkat lunak ini mampu mendekode sinyal dengan benar dengan toleransi drift hingga 4Hz (2 Hz naik atau 2 Hz turun) selama transmisi. Pemodelan frekuensi drift yang diterapkan adalah drift linier dari awal hingga akhir. Grafik pemodelan linear dari drift frekuensi dapat dilihat pada Gambar 6, Dimana f_0 adalah kandidat frekuensi tengah (frekuensi acuan dalam modulasi FSK).



Gambar I-6: Pemodelan linear dari frekuensi drift terhadap waktu

I.8 Sisi Pemancar Dari WSPR

Input data WSPR yang akan dipancarkan terdiri dari:

1. Callsign yang terdiri dari 6 karakter A – Z, 0 – 9 dan [spasi]
2. Penunjuk lokasi (locator) yang ditulis berdasarkan standar MAIDENHEAD LOCATOR SYSTEM (misalnya OI62 untuk wilayah Sukolilo)
3. Catatan daya pancar (power level) dalam dBm dalam rentang 0 sampai 60.

a). Format CALLSIGN

Struktur format callsign berdasarkan standar IARU dalam format 6 karakter yang terdiri dari 2 karakter prefiks huruf, 1 karakter angka dan 3 karakter sufiks huruf,

Contoh:

Y	B	3	P	E	T
---	---	---	---	---	---

Y	B	0	A	Z	[spasi]
---	---	---	---	---	---------

[spasi]	K	1	J	T	[spasi]
---------	---	---	---	---	---------

Semua karakter dalam huruf besar. Karakter ke tiga selalu dalam angka. Jika prefiks hanya terdiri dari 1 karakter maka karakter pertama disisip "spasi", demikian juga jika sufiks hanya terdiri dari satu atau dua karakter maka akan disisipi dua atau satu karakter agar format 6 karakter terpenuhi. Dengan demikian terdapat 37 karakter yang mungkin, yakni 10 karakter angka "0 – 9", 26 karakter huruf "A – Z", dan "spasi". Sehingga karakter dapat diwakili oleh indeks integer 0 sampai 36 dimana indeks integer 0 sampai 9 mewakili angka, selanjutnya indeks integer 10 s/d 36 mewakili huruf. Sehingga callsign dapat dimpatkan menjadi bilangan integer **N** sbb:

$$N = 37 \times 36 \times 10 \times 27 \times 27 \times 27 = 262177560$$

dapat didekati dengan 28 bit integer $2^{28} = 268435456$.

Atau dengan perhitungan seperti pada tabel dibawah ini; K1 adalah karakter ke-1; K2 adalah karakter ke-2; K3 adalah karakter ke-3; K4 adalah karakter ke-4; K5 adalah karakter ke 5; K6 adalah karakter ke-6;

Tabel I-1: Paking data pada input WSPR callsign

N1	[K1]	Karakter pertama dari prefiks adalah satu diantara 37 karakter
N2	$N1 * 36 + [K2]$	Karakter kedua dari prefiks adalah satu diatara 36 karakter (tanpa karakter spasi)
N3	$N2 * 10 + [K3]$	Karakter ketiga hanya angka, sehingga hanya ada 10 kemungkinan
N4	$27 * N3 + [[K4] - 10]$	Sufiks hanya akan terdiri dari karakter huruf dan [spasi] sehingga hanya ada 27 kemungkinan
N5	$27 * N4 + [[K5] - 10]$	
N	$27 * N5 + [[K6] - 10]$	

Selanjutnya pada sisi dekode integer **N** dapat diurai kembali menjadi sbb,

$$N5 = N/27 + \text{sis}a \rightarrow K6 = \text{sis}a - 10$$

$$N4 = N5/27 + \text{sis} \rightarrow K5 = \text{sis} - 10$$

$$N3 = N4/27 + \text{sis} \rightarrow K4 = \text{sis} - 10$$

$$N2 = N3/10 + \text{sis} \rightarrow K3 = \text{sis}$$

$$N1 = N2/36 + \text{sis} \rightarrow K2 = \text{sis}$$

$$K1 = N1$$

Harga maksimum **N** adalah $37 * 36 * 10 * 27 * 27 * 27 = 262177560$, namun demikian untuk memudahkan perhitungan ditetapkan integer 28 bit atau $2^{28} = 268435456$, yang juga akan mengakomodasi kebutuhan perkembangan jumlah callsign dan tanda-tanda yang lain, kelak dikemudian hari.

b). Format Locator-power-level

L_1	L_2	L_3	L_4
0	1	6	2

Format locator mempunyai bentuk seperti gambar diatas. Dua karakter pertama adalah huruf antara A s/d R, sehingga hanya perlu 18 index (0 – 17) untuk merepresentasinya. Selanjutnya karakter ke tiga dan empat berupa karakter numerik sehingga hanya perlu 10 indeks (0 – 9) untuk merepresentasikannya.

Selanjutnya harga integer M_1 yang merepresentasikan locator mengikuti rumus pemetaan dibawah ini,

$$M_1 = [(179 - 10L_1 - L_3)180] + 10L_2 + L_4$$

dimana akan didapat rentang karakter “AA00” = 32220 s/d “RR99” = 179. Selanjutnya untuk memudahkan maka M_1 akan direpresentasikan dgn bilangan integer 15 bit ($2^{15} = 32768$), sehingga masih menyediakan bit jika ada perkembangan sistem lebih lanjut.

Selanjutnya informasi daya pancar (power level) disediakan mempunyai rentang 0 – 60, dengan rumus pengkodean seperti dibawah ini,

$$M = 128(M_1) + [Pwr] + 64,$$

dimana M adalah informasi locator-power-meter mempunyai rentang 0 s/d $[(128*32220)+60+64=4124284]$, yang akan direpresentasikan dalam bilangan integer 22 bit (maksimum $2^{22} = 4194304$). Dengan demikian masih menyediakan banyak bit untuk mengembangkan sistem lebih lanjut.

c). Bit Packing

Bit informasi yang akan dikirim yaitu **N** (28 bit) untuk informasi callsign dan **M** (22 bit) untuk informasi locator dan power level. Selanjutnya **N** dan **M** disambung menjadi 50 bit informasi, dan ditata menjadi sederetan bit-bit yang dipartisi menjadi 11 byte, sbb,

b[0], b[1],..., b[9], b[10]

dimana masing-masing byte b[0,1,2,...,10] terdiri dari 8 bit message, dimana elemen bit ke 0 s/d ke 7 dari b[0] adalah elemen-elemen MSB dari bit-bit callsign, demikian seterusnya untuk lanjutan bit berikutnya menjadi elemen dari b[1], b[2],...,dst. Ingat bahwa b[3] akan terdiri dari 4 bit LSB dari message callsign dan 4 bit MSB dari message locator-power-level. B[6] hanya terdiri dari 2 bit LSB milik informasi locator-power-meter, sedangkan sisa 6 bit akan diisi nilai nol. Demikian juga bit-bit b[7], b[8], b[9], b[10], semua diinisiasi dengan nilai nol.

Tabel I-2: Struktur bit dari input data WSPR

	MSB CALLSIGN							
b[0]	bit ke 0	bit ke 1	2	3	4	5	6	7
b[1]	8	9	10	11	12	13	14	15
	...			LSB Callsign	MSB locator			
b[3]	24	25	26	27	28	29	30	31
b[4]	32	33	34	35	36	37	38	39
	LSB locator		...					
b[6]	48	49	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol
b[7]	56 diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol
b[8]	64 diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol
b[9]	72 diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol	diset nol
b[10]	80 diset nol	tidak dipakai						

Dengan demikian jumlah bit informasi saat ini menjadi 81 bit termasuk 31 bit dengan seting nilai nol.

Sebagai tes: signed char message[]={-9,13,-35,123,57,-39,64,0,0,0,0};

untuk mendapatkan message: **K1JT FN20 37**

Delapan puluh satu bit data informasi selanjutnya diperluas dengan menambahkan bit redundansi dengan memakai teknik Forward Error Control (FEC) dengan rate $\frac{1}{2}$ dan panjang konstrain 32. Pengkodean Konvolusi yang dipakai oleh sistem WSPR ini adalah seperti pada gambar dibawah ini.

d). Dasar-dasar kode konvolusi

Sebelum lebih jauh mempelajari kode konvolusi yang dipakai oleh protokol WSPR, mari kita sebentar mengingat kembali dasar-dasar pembangkitan kode konvolusi (n,k,v),

dimana:

- n : panjang kode
- k : panjang message
- v : panjang delay konvolusi

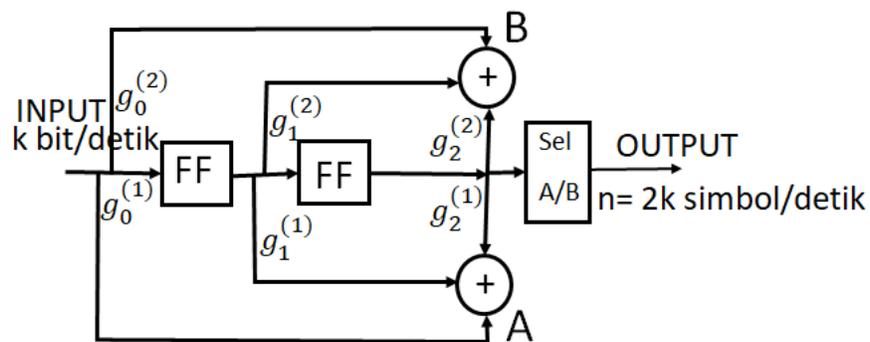
Kita lihat N bit codewords $c_t = \{c_t^{(1)}, c_t^{(2)}, \dots, c_t^{(N)}\}$

$$c_t^{(j)} = \sum_{i=0}^{v-1} g_i^{(j)} \cdot m_{t-i}$$

Dimana:

- j=1,2,3,...,N adalah panjang codewords.
- $g_i^j \in \{0,1\}$ adalah kode generator konvolusi, dengan kata lain g_i^j adalah saklar penghubung antara bit delay dengan elemen penjumlah.
- T: urutan bit sumber informasi.
- l: waktu tunda terhadap waktu saat ini t.

Contoh kode konvolusi dgn (2,1,v)



Gambar I-7: blok diagram generator konvolusi (2,1,v)

Panjang bit kode 2, panjang bit berita 1 (artinya 1 bit berita akan dikodekan menjadi 2 bit kode), dan panjang delay konvolusi adalah 3.

Jika ditentukan kode generator 7 dan 5 atau 111 dan 101 maka

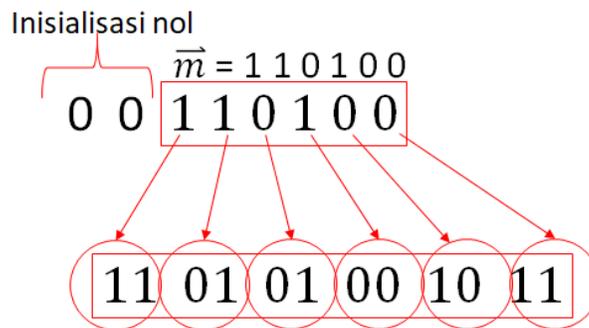
$$g_i^{(1)} = 111 \rightarrow g_0^{(1)} = 1, g_1^{(1)} = 1, g_2^{(1)} = 1$$

$$g_i^{(2)} = 101 \rightarrow g_0^{(2)} = 1, g_1^{(2)} = 0, g_2^{(2)} = 1$$

$$c_t^{(1)} = g_0^{(1)} m_t \oplus g_1^{(1)} m_{t-1} \oplus g_2^{(1)} m_{t-2}$$

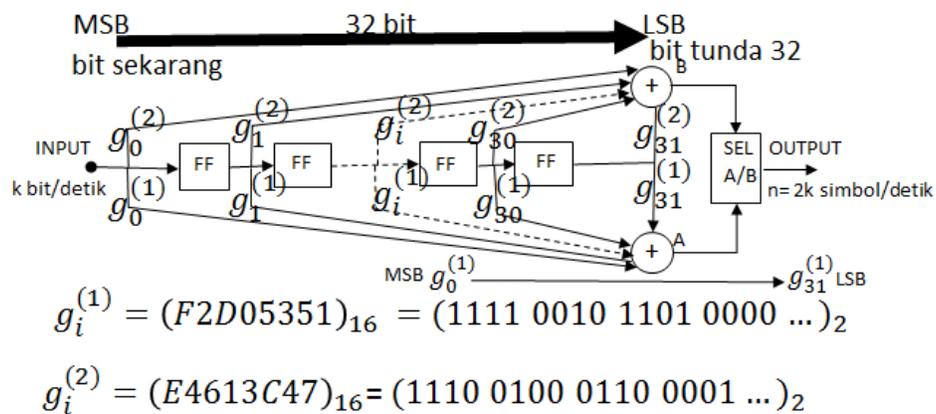
$$c_t^{(2)} = g_0^{(2)} m_t \oplus g_2^{(2)} m_{t-2}$$

Contoh perhitungan diatas kertas:



Gambar I-8: Ilustrasi perhitungan kode konvolusi dengan kode generator (1,1,1) dan (1,0,1)

Kembali pada sistem WSPR dengan kode konvolusi (2,1,32), yang berarti $n=2$, $k=1$ dan $v=32$, seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar I-9: Pengkodean Konvolusi yang dipakai oleh sistem WSPR

$g_i^{(1)}$ adalah saklar penghubung bit tertunda ke i dengan elemen penjumlah (Exclusive-OR) generator pariti A.

$g_i^{(2)}$ adalah saklar penghubung bit tertunda ke i dengan elemen penjumlah (Exclusive-OR) generator pariti B.

Pembangkitan pariti langsung dilaksanakan pada saat bit pertama muncul pada register FF (harus diinisialisasi dengan nol).

Dibawah ini adalah proses pembangkitan bit parity:

1. Proses inisialisasi dilaksanakan dengan memasang bit pertama sampai bit ke 32 dengan nol.
2. Geser register 1 bit ke arah LSB, masukkan 1 bit data pada MSB.
3. AND masing-masing bit informasi dengan 0xF2D05351 sesuai urutan binernya.
4. Dapatkan bit parity dengan cara menjumlahkannya semua hasil proses nomor 3.
5. Pasangkan pada bit aliran data.
6. AND masing-masing bit informasi dengan 0xE4613C47 sesuai urutan binernya.
7. Dapatkan bit parity dengan cara menjumlahkannya semua hasil proses nomor 3.
8. Pasangkan pada bit aliran data.
9. Ulangi langkah 2 hingga bit data ke 81.

Ekspansi bit berita dari 50 bit menjadi 162 bit dengan cara menambahkan bit-bit redundan diharapkan mampu untuk melaksanakan Forward Error Correction (FEC) akibat berbagai jenis nois yang menimbulkan suatu random error.

e). Interleaving

Kode konvolusi sangat handal dalam mengoreksi error bit tunggal, namun kurang tahan terhadap error burst akibat munculnya noise burst yang terjadi pada kanal frekuensi radio. Error burst tidak efektif jika dikoreksi dengan metoda kode konvolusi. Sehingga langkah terakhir pada proses encode ini adalah dengan mengacak data dengan suatu proses interleave. Maksud proses mengacak ini agar bit-bit data sumber yang membentuk simbol-simbol tersebut akan teracak atau tidak bergerombol berdampingan pada satu blok waktu saja, yang pada gilirannya akan rapuh terkena nois burst yang menyebabkan suatu error burst yang akan sulit ditangani oleh FEC kode konvolusi.

Proses Interleaving dilaksanakan pertama-tama dengan memberi label kepada 162 bit data sumber, $S[0]$ s/d $S[161]$. Selanjutnya nomor label diproses dengan bit-reverse. Berdasarkan label bit-reverse ini selanjutnya $D[0]$ s/d $D[161]$

Algoritma sbb,

1. Inisialisasi counter $P = 0$
2. Siapkan integer I 8 bit, $0 - 255$
3. Laksanakan bit-reverse I untuk mendapatkan J
Contoh: jika $I = 1$ maka didapat J , jika $I = 13$ maka didapat $J = 176$, dst...
4. Jika hasil bit-reverse J kurang dari 162,

maka set bit destinasi $D[j] = \text{bit sumber } S[p]$

5. Berhenti jika counter P mencapai 162.

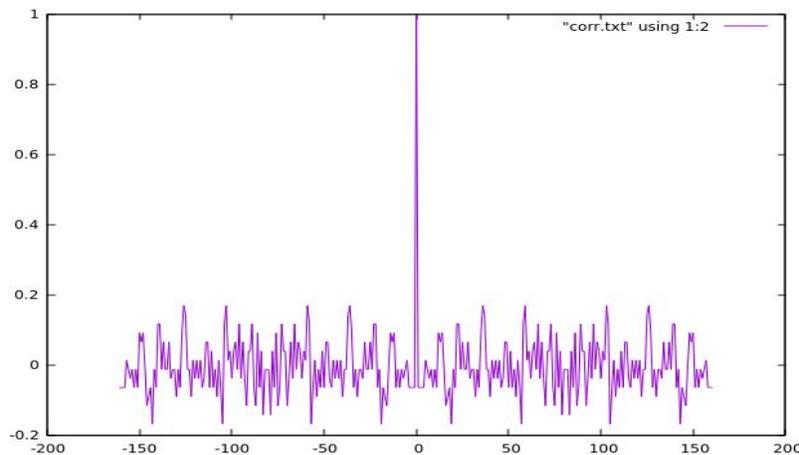
Dengan demikian didapat satu persatu bit sudah diproses acak untuk memisahkan dari bit-bit yang berdampingan.

f). Penggandengan dengan bit sinkronisasi

Selanjutnya setiap bit dari 162 bit tersebut diberi sandingan 162 bit psudeo random berfungsi untuk sinkronisasi. 162 bit pseudo random dibuat mempunyai properti autokorelasi yang baik untuk menjamin derajat random dari 162 bit sinkronisasi tersebut.

Unsigned char pr3[162]=

```
{1,1,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,1,0,  
0,1,0,1,1,1,1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,1,0,1,  
0,0,0,0,0,0,1,0,1,1,0,0,1,1,0,1,0,0,0,1,  
1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,0,0,1,  
0,0,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,1,0,1,0,0,0,1,0,  
0,0,0,0,1,0,0,1,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0,1,1,  
0,1,0,0,0,1,1,1,0,0,0,0,0,1,0,1,0,0,1,1,  
0,0,0,0,0,0,0,1,1,0,1,0,1,1,0,0,0,1,1,0,  
0,0};
```



Gambar I-10: Grafik autokorelasi dari pseudo random 162 bit sinkron.

Gambar sinyal autokorelasi dari 162 bit pseudo random, dapat dilihat bahwa tidak nampak properti periodisasi sepanjang 162 bit tersebut, selain daripada perioda 162 bit itu sendiri.

Cara menyandingkan bit data dengan bit sinkronisasi adalah sbb:

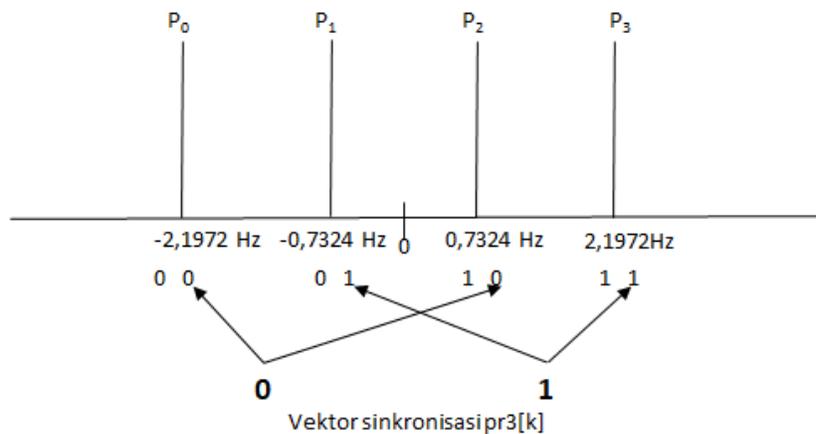
$$\text{Simbol}[n] = \text{Sync}[n] + 2 * \text{Data}[n]$$

Masing-masing bit data akan diwakili oleh 2 bit simbol biner dengan nilai antara 0 s/d 3 (00, 01, 10, 11).

Tabel I-3: Proses penggandengan antara data input dan data sinkronisasi

Data	2*Data	Sync	Simbol = Sync + (2*Data)
00	00	00	00
00	00	01	01
01	10	00	10
01	10	01	11

Laju kunci (keying rate) = $12000/(2^{13}) = 1,4648$ baud. (Catatan: $2^{13} = 8192$). Sistem modulasi menggunakan continuous 4-FSK dengan separasi masing-masing simbol (nada) adalah 1,4648 Hz. Atau dengan kata lain laju pengiriman simbol atau baud rate adalah $1/1,4648 = 0,683$ detik. Lebar bidang menempati kurang lebih 6 Hz. Sinkronisasi dengan menggunakan 162 bit sinkronisasi pseudo random. Setiap blok sinyal membawa 1 bit vektor penyinkron dengan posisi LSB, dan 1 bit data dengan posisi MSB. Laju pengiriman adalah $162*(8192/12000)=110,6$ detik. Pengiriman data selalu dilakukan saat menit genab UTC.



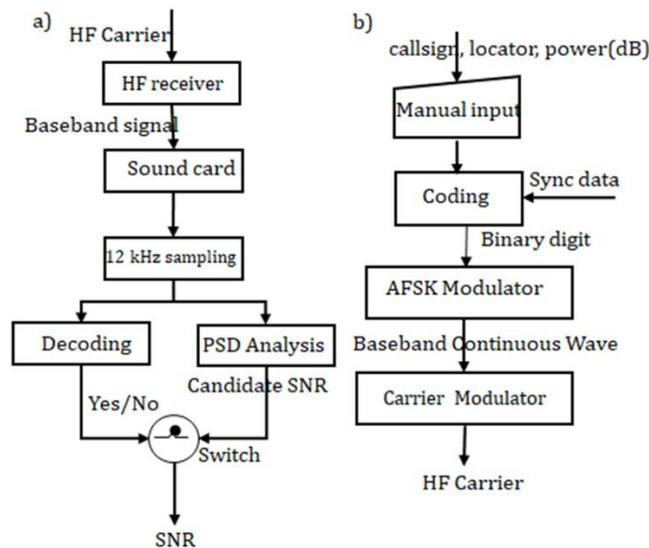
Gambar I-11: Sebaran frekuensi relatif terhadap frekuensi pusat pada FSK-4 yang dipakai pada WSPR

g). Data storage and packing

Untuk keperluan penyimpanan data, maka 162 bit data ini disimpan dalam 41 byte dengan masing-masing byte penyimpanan diisi dengan 4 bit data yang diletakkan pada bagian MSB.

1.9 Sistem Pemancar dan Penerima WSPR

WSPR atau weak signal propagation report adalah perangkat komunikasi yang didesain untuk memeriksa kondisi propagasi HF dengan memanfaatkan prinsip-prinsip komunikasi digital yang didesain dengan bandwidth sangat sempit namun sangat handal terhadap gangguan noise maupun terhadap redaman ruang. Sistem ini terdiri dari unit radio komunikasi HF biasa, yang dikendalikan oleh seperangkat komputer yang memiliki kemampuan untuk menganalisis kondisi propagasi berdasarkan pada, RTCE (Real Time Channel Evaluation), atau pada prediksi dan analisis. WSPR (Weak Signal Propagation Reporter) adalah nama program komputer dalam domain mode radio digital yang dikembangkan oleh Dr. Joe Taylor (HAM radio callsign K1JT), peraih Nobel dalam astrofisika 1993. Blok diagram pemrosesan sinyal pada aplikasi ini digambarkan dalam Gambar I-12a dan I-12b. Sisi penerima digambarkan dalam Gambar I-12a, gelombang pembawa HF pertama diterima oleh penerima HF diubah menjadi sinyal baseband untuk didemodulasi. Kemudian dengan menggunakan USB-soundcard, sinyal baseband diambil sampelnya dengan menggunakan frekuensi sampling 12 kHz. Frekuensi sampling ini umum digunakan sebagai preprocessing yang dilakukan di bidang pengolahan informasi sinyal wicara.



Gambar I-12: Blok diagram pemrosesan sinyal WSPR

Sinyal baseband mempunyai struktur AFSK (Audio Frequency Shift Keying) yang terdiri dari informasi digital yang dikodekan 162 bit yang isinya adalah informasi dari stasiun radio pengirim yang terdiri dari callsign, lokasi dan power dalam dB. AFSK adalah FSK 4-nada. Simbol-simbol memiliki 1.465 Hz separasi nada, sehingga lebar bidangnya sekitar 6 Hz. Data ditransmisikan dalam transmisi data laju bit rendah hanya 1,46 baud. Selanjutnya, gelombang yang didemodulasi kemudian diproses dalam proses paralel, pertama: dekoding dan *unpacked* untuk memperoleh kembali informasi digital dari sisi pemancar. Dan kemudian proses kedua: analisis

spektrum daya untuk mengukur kandidat SNR. Keberhasilan dan kegagalan decoding informasi pengiriman adalah saklar dari kandidat SNR menjadi valid atau tidak valid. Sisi pemancar digambarkan dalam Gambar I-12b. Proses transmisi diinisialisasi secara manual dengan satu set karakter yang terdiri dari tanda panggilan, lokasi, dan daya yang ditransmisikan dalam dB. Kumpulan data ini kemudian dikodekan menjadi biner digit data dan diumpankan sebagai input modulator. Selanjutnya, keluaran modulator menjadi sinyal gelombang kontinyu baseband yang diumpankan sebagai sinyal informasi ke pemancar. Audio-FSK modulator akan memodulasi sinyal informasi baseband menjadi sinyal pembawa HF yang ditransmisikan.