

BAB II

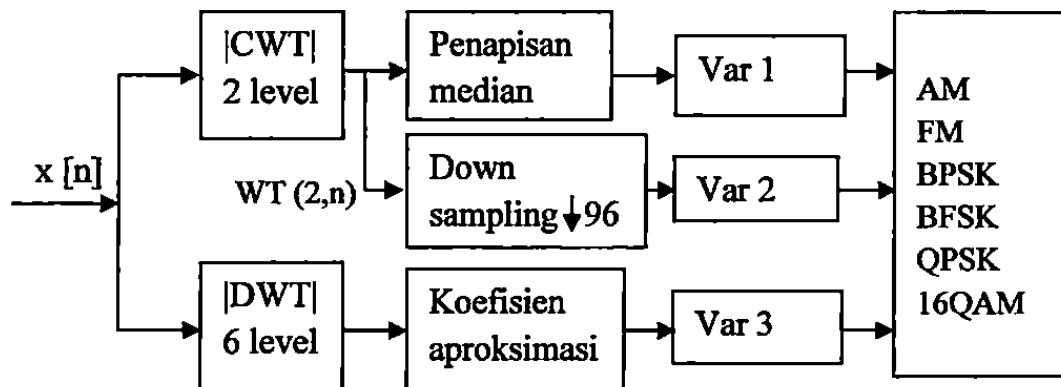
STUDI AWAL

2.1 Karya yang Berkaitan

2.1.1 Klasifikasi Tipe Modulasi Sinyal Komunikasi Menggunakan Transformasi Wavelet

Pendekatan Transformasi Wavelet digunakan untuk mengklasifikasikan sinyal komunikasi modulasi analog dan digital. Transformasi wavelet dapat mengekstraksi fitur dari karakteristik transien pada sinyal termodulasi. Metode yang dikemukakan merupakan kombinasi dari *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dan *Discrete Wavelet Transform* (DWT) untuk mengklasifikasikan AM, FM, BPSK, QPSK, BFSK dan 16 QAM. Kinerja pengklasifikasian dengan basis Transformasi Wavelet diuji dengan simulasi. Prototipe *Graphical User Interface Software for Communication Signal Analyzer* telah dikembangkan sebagai alat/media untuk menganalisis sinyal komunikasi.

Metodologi dan konsep klasifikasi berbasis transformasi wavelet digunakan untuk membedakan sinyal termodulasi analog (AM dan FM) dengan sinyal termodulasi digital (BPSK, QPSK, BFSK, dan 16QAM). Pengklasifikasiannya disajikan pada gambar di bawah ini:



Gambar Pengklasifikasian berbasis Tranformasi Wavelet

Variansi amplitudo adalah salah satu fitur yang dapat digunakan untuk membedakan *Amplitude Modulation*(AM) dengan *Phase Modulation*(PM) dan *Frequency Modulation*(FM). Skala koefisien DWT adalah perkiraan dari sinyal yang dianalisis. Sinyal dapat didekomposisi menggunakan DWT sampai pada tingkat tertentu. Koefisien aproksimasi sinyal BPSK dan QPSK sampai tingkat 6 menunjukkan tingkatan konstan, sedangkan sinyal QAM menunjukkan variasi amplitudo. Pada penelitian dihitung variansi dari koefisien aproksimasi dekomposisi DWT sampai tingkat 6 untuk membedakan AM dan QAM dengan sinyal termodulasi frekuensi dan fasa (FM, BPSK, QPSK, dan BFSK). Variansi CWT digunakan untuk mengekstraksi kondisi transien sinyal modulasi amplitudo untuk mengklasifikasi AM dengan QAM, juga digunakan untuk mengekstraksi perbedaan kondisi transien untuk mengklasifikasi sinyal modulasi fasa seperti BPSK dan QPSK dan sinyal modulasi frekuensi seperti FM dan BFSK.

Nilai ambang batas ditentukan untuk klasifikasi tiap modulasi sinyal. Nilai ambang batas didapat dari kurva variansi fungsi C/N tiap tipe modulasi sinyal. Program pengklasifikasian bekerja dengan tingkat keberhasilan 98,9% untuk sinyal dengan SNR minimum 12 dB. [Koeftin Sestraminata, 2007]

2.1.2 Klasifikasi Sinyal Modulasi dengan Metode Statistik dan Neural Networks

Sinyal komunikasi yang biasa digunakan terdiri dari beberapa tipe modulasi dan frekuensi yang berbeda pada pita frekuensi yang sangat lebar. Pengklasifikasian sinyal komunikasi diperlukan untuk membangun berbagai aplikasi, seperti konfirmasi sinyal, identifikasi interferensi, dan manajemen spektrum. Pada penelitian ini, dilakukan pengklasifikasian sinyal-sinyal yang termodulasi analog dan digital menggunakan metode statistik dan *Neural Networks*. Pengklasifikasian sinyal-sinyal ini terdiri dari dua subsistem: (1) pegekstrakan fitur-fitur kunci (2) pengklasifikasian sinyal. Sebagai fitur-fitur kunci telah dipilih densitas spektral daya maksimum, standar deviasi fasa absolut, standar deviasi fasa langsung, standar deviasi amplituda sesaat ternormalisasi, standar deviasi frekuensi sesaat ternormalisasi, kurtosis amplituda sesaat ternormalisasi, dan kurtosis frekuensi sesaat ternormalisasi. Pengklasifikasian modulasi ini menggunakan *Neural Networks* dengan dua jaringan yang masing-masing menggunakan dua dan satu layer tersembunyi. Hasilnya sinyal-sinyal akan diklasifikasikan menjadi sinyal termodulasi AM, DSB-AM, LSB-AM, USB-AM, FM, BPSK, QPSK, BFSK, dan QFSK. Hasil yang didapat dari penelitian ini berupa laju keberhasilan minimum pengklasifikasian modulasi yaitu sebesar 50% pada SNR 7dB , 70% pada SNR 15dB dan 80% pada SNR 20dB dan dapat

Menjadi Kunci dari Fitur-Fitur Kunci dalam proses pengklasifikasian modulasi

2.2 Dasar Dasar Teoritis

2.2.1 Sistem Komunikasi

Tujuan sebuah sistem komunikasi adalah untuk mengirimkan sinyal yang membawa informasi melalui sebuah kanal komunikasi yang memisahkan antara pemancar dan penerima. Sinyal yang membawa informasi disebut sinyal *baseband*. Bentuk sinyal *baseband* berbeda-beda frekuensi dan bentuknya tergantung dari jenis informasi yang dikandungnya.

Keberhasilan dalam sebuah sistem komunikasi terlihat dari apakah sistem penerima dapat mensintesis kembali sinyal *baseband* yang telah dikirim oleh sistem pengirim. Pada sistem komunikasi pada umumnya, diantara pemancar dan penerima terdapat sebuah medium yang disebut kanal. Kanal adalah medium perambatan sinyal komunikasi dari pemancar ke penerima. Kendala dalam sistem komunikasi jarak jauh umumnya berpusat pada kanal, karena sebagian besar sinyal-sinyal asing (derau), redaman, pantulan yang dapat mengganggu receiver untuk kembali membentuk sinyal *baseband* masuk di dalam kanal.

Penggunaan kanal komunikasi umumnya membutuhkan perubahan daerah frekuensi dari frekuensi *baseband* menjadi frekuensi yang lain. Sebagai contoh, untuk mengirimkan sebuah sinyal siaran radio, dibutuhkan frekuensi tinggi di atas 1 MHz, sedangkan sinyal *baseband*-nya merupakan sinyal audio yang berkisar antara 20 – 20000 Hz. Maka untuk melakukan perubahan wilayah dari frekuensi

yang akan dikirimkan dilakukan proses modulasi. [Kasfian]

2.2.2 Modulasi

Modulasi adalah proses pengkodean informasi dari sumber pesan dengan tujuan agar sesuai saat ditransmisikan. Pada umumnya melibatkan pentranslasi sinyal *baseband* pesan (disebut sumber) ke sinyal *bandpass* pada frekuensi sangat tinggi apabila dibandingkan dengan frekuensi *baseband*. Sinyal *bandpass* disebut sinyal termodulasi dan sinyal *baseband* pesan disebut sinyal pemodulasi. Modulasi bisa dilakukan dengan mengubah amplitudo, fasa, atau frekuensi dari sinyal pembawa berfrekuensi tinggi yang bersesuaian dengan amplitudo sinyal pesan. Tujuan utama dari teknik modulasi adalah mengirimkan sinyal pesan melalui gelombang radio dengan kemungkinan kualitas terbaik.

Pada sinyal analog, beberapa modulasi yang umum digunakan berupa *Amplitude Modulation* (AM), *Frequency Modulation* (FM), dan *Phase Modulation* (PM). Sedangkan untuk sinyal digital, beberapa modulasi yang umum digunakan adalah *Phase Shift Keying* (PSK), *Frequency Shift Keying* (FSK), *Minimum Shift Keying* (MSK), dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM).

2.2.3 Modulasi Analog

2.2.3.1 *Amplitude Modulation* (AM)

Pada *Amplitude Modulation*, amplitudo dari sinyal *carrier* berfrekuensi tinggi dimodulasi secara linear oleh sinyal *baseband*. Persamaan sinyal *carrier* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t), \text{ dengan:} \quad (2.1)$$

$c(t)$ = sinyal *carrier*, A_c = amplitudo sinyal *carrier*

f_c = frekuensi sinyal *carrier*

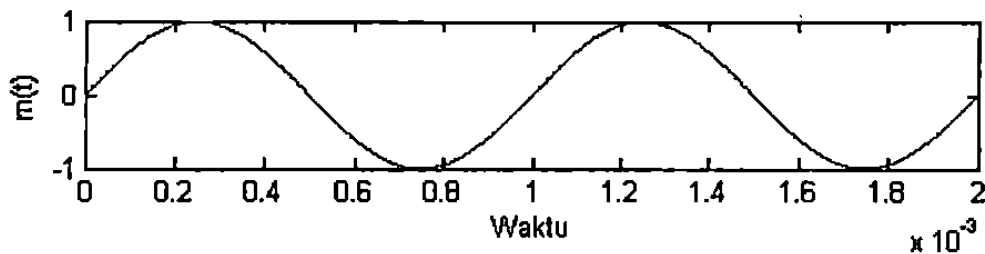
Jika $m(t)$ adalah sinyal *baseband*, maka fungsi sinyal AM dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$s_{AM}(t) = A_c [1 + m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (2.2)$$

Indeks modulasi k dari sinyal AM didefinisikan sebagai rasio amplitudo sinyal pesan dibandingkan dengan amplitudo sinyal *carrier*. Untuk sinyal pemodulasi sinusoidal:

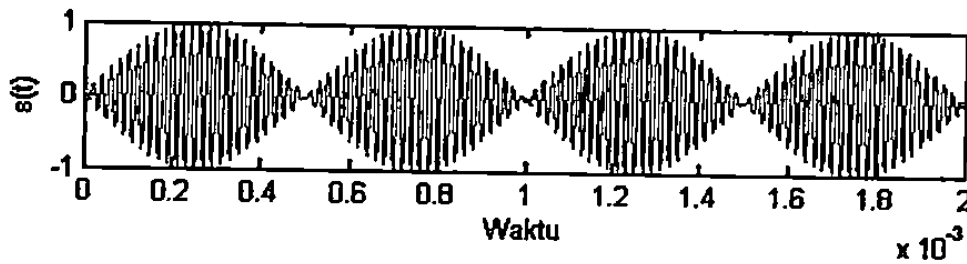
$$m(t) = \frac{A_m}{A_c} \cos(2\pi f_m t), \text{ index modulasi dijabarkan } k = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.3)$$

Indeks modulasi seringkali diekspresikan dengan persentase, dan disebut persentase modulasi. Gambar 2.1 menunjukkan sinyal *baseband* sinusoidal dan sinyal AM yang bersesuaian. Maka sinyal AM yang akan dihasilkan adalah sebagai berikut:



(a)





(c)

Gambar 2.1 Modulasi AM; (a) Sinyal *baseband*; (b) Sinyal *carrier*;

(c) Sinyal pesan

2.2.3.2 Frequency Modulation (FM)

Modulasi frekuensi adalah bagian dari *Angle Modulation* (modulasi sudut). Modulasi sudut memvariasikan sinyal *carrier* sinusoidal dimana sudut sinyal *carrier* berubah sesuai dengan perubahan amplitudo sinyal *baseband*. Pada metode ini, amplitudo gelombang *carrier* konstan (oleh karena itu mengapa FM disebut *constant envelope*). Ada beberapa cara dimana fasa $\theta(t)$ sinyal *carrier* dapat divariasikan linear terhadap sinyal *baseband*. Dua kelas paling penting dari *Angle Modulation* adalah *Frequency Modulation* dan *Phase Modulation*. *Frequency Modulation* (FM) adalah bentuk dari *Angle Modulation* dimana frekuensi sesaat sinyal *carrier* berubah secara linear terhadap sinyal *baseband* $m(t)$. Jika sinyal *baseband* memiliki persamaan:

$$m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t), \text{ dengan:} \quad (2.4)$$

A_m = amplitudo sinyal *baseband*

f_m = frekuensi sinyal *baseband*

Maka persamaannya menjadi :

A_c = amplitudo sinyal *carrier*, f_c = frekuensi sinyal *carrier*, dan k_f = konstanta simpangan frekuensi (dengan satuan Hz/V).

Frekuensi sesaat dari sinyal FM hasil modulasi adalah:

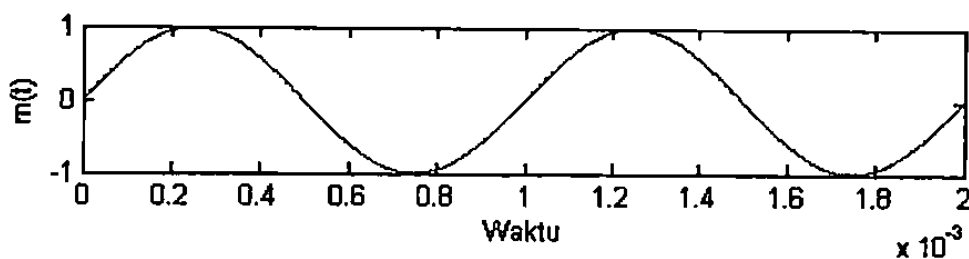
$$f_i(t) = f_c + k_f A_m (2\pi f_m t) = f_m + \Delta f \cos(2\pi f_m t) \quad (2.6)$$

dengan $f_i(t)$ = frekuensi sesaat FM, Δf = simpangan frekuensi

Jika sinyal *baseband* sinusoidal dengan amplitudo A_m , dan frekuensi f_m , maka sinyal FM dapat dinyatakan sebagai:

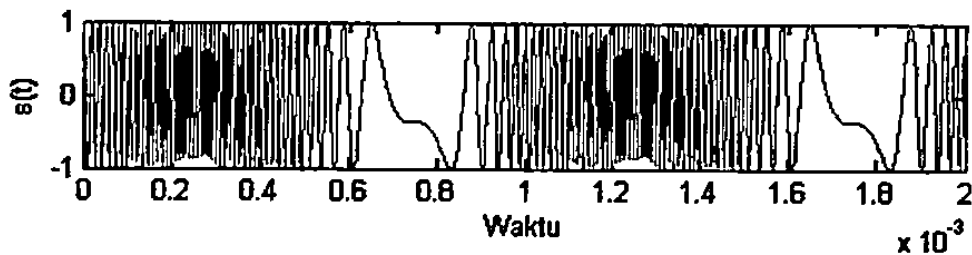
$$s_{FM}(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + \frac{k_f A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t) \right] \quad (2.7)$$

Modulasi sinyal FM dapat diilustrasikan sebagai berikut, jika sinyal *baseband* yang ingin ditransmisikan sama dengan sinyal yang ingin ditransmisikan pada gambar 2.1 (a), dengan sinyal *carrier* yang sama, gambar 2.1 (b), maka sinyal FM yang dihasilkan adalah :



(a)





(c)

Gambar 2.2 Modulasi FM; (a) Sinyal *baseband*; (b) Sinyal *carrier*;

(c) Sinyal pesan

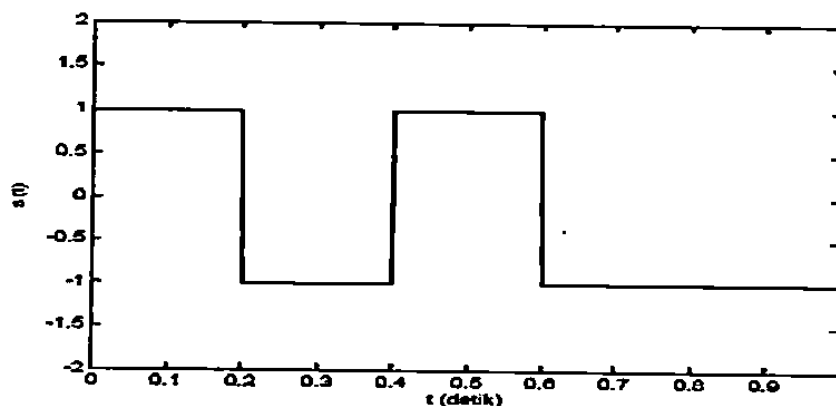
2.2.4 Modulasi Dijital

Sistem komunikasi bergerak modern saat ini lebih banyak menggunakan teknik modulasi digital. Kemajuan dalam *Very Large Scale Integration* (VLSI) dan *Digital Signal Processing* (DSP) telah membuat modulasi digital lebih efektif daripada sistem transmisi analog. Modulasi digital menawarkan lebih banyak keuntungan dibandingkan dengan modulasi analog. Beberapa diantaranya adalah: lebih tahan terhadap derau (*noise*) dan gangguan kanal, kemudahan yang lebih dalam penggabungan (*multiplexing*) berbagai bentuk informasi (contoh : suara, data, video), dan juga keamanan yang lebih baik. Selain itu modulasi digital juga dapat dilengkapi dengan sistem pendeteksi/perbaikan kesalahan pentransmisian, dan mendukung pengkondisian sinyal kompleks dan teknik pemrosesan seperti pengkodean sumber, enkripsi, dan equalisasi untuk meningkatkan kinerja seluruh *link* komunikasi. Saat ini, *Digital Signal Processor* telah membuat terobosan dengan mengimplementasikan modulator dan demodulator secara *software*.

Pada sistem komunikasi digital nirkabel, informasi yang dikirimkan

umumnya berbentuk data digital yang dapat dipertahankan dalam waktu waktu

simbol atau pulsa. Tiap simbol merepresentasikan n bit informasi, dimana $n = \log_2 m$ bit/symbol. Aturan bentuk simbol-simbol yang merepresentasikan data tertentu disebut juga koding. Sebagai contoh, jika kita memiliki deretan data 10100 dan menggunakan system koding NRZ-L, maka sinyal *baseband*-nya akan berbentuk:



Gambar 2.3 Gambar sinyal dengan koding NRZ-L 10100

Ada berbagai jenis teknik modulasi digital yang digunakan untuk mengirimkan data. Namun, yang sering digunakan adalah *Phase Shift Keying* (PSK), *Frequency Shift Keying* (FSK), dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Setiap modulasi memiliki karakteristik masing-masing dan keuntungan masing-masing sehingga ada beberapa faktor yang mempengaruhi pilihan dari teknik modulasi yang akan digunakan. Idealnya, teknik modulasi yang diinginkan dapat bekerja dengan baik pada penerimaan *Signal to Noise Ratio* (SNR) yang rendah, berkinerja baik pada *multipath* dan kondisi *fading*, menggunakan *bandwidth* yang minimum, dan juga dengan biaya yang efektif untuk diimplementasikan. Namun teknik modulasi yang ada saat ini tidak ada yang memenuhi semua kriteria tersebut. Beberapa teknik modulasi teknik digital

kinerja BER, sedangkan ada yang lain lebih efisien dalam *bandwidth*. Jadi untuk aplikasi penggunaan teknik modulasi, perhitungan dilakukan untuk menentukan teknik modulasi mana yang paling cocok untuk digunakan.

Kinerja dari sebuah teknik modulasi seringkali diukur dari efisiensi daya (*power efficiency*) dan efisiensi *bandwidth* (*bandwidth efficiency*). *Power efficiency* mendeskripsikan kemampuan teknik modulasi untuk mempertahankan kepresisian pesan digital pada daya rendah. Pada sistem komunikasi digital, untuk meningkatkan ketahanan terhadap derau, dilakukan dengan menaikkan daya. Bagaimanapun, besar daya sinyal harus disesuaikan untuk mempertahankan kepresisian pesan digital (besar *bit error probability* yang dapat ditoleransi) pada daya yang rendah. Sedangkan *bandwidth efficiency* mendeskripsikan kemampuan sebuah teknik modulasi untuk mengakomodasi data dalam *bandwidth* yang terbatas. Memang secara umum, menaikkan *data rate* akan mengakibatkan berkurangnya lebar pulsa dari simbol digital, yang akan menaikkan *bandwidth* sinyal. Sehingga, dapat dikatakan ada hubungan yang tak terpisahkan antara *data rate* dan *bandwidth* yang akan dipakai. Namun, beberapa teknik modulasi memiliki kinerja yang lebih baik dalam efisiensi *bandwidth*-nya.

2.2.4.1 Modulasi *Phase Shift Keying* (PSK)

Modulasi ini menggunakan fasa yang berbeda dari sinyal *carrier* untuk merepresentasikan simbol yang diinginkan. Untuk sinyal digital, data berisi deretan sinyal pulsa 1 dan 0 saja. Jadi untuk mengirimkan sinyal digital kita harus memiliki minimal 2 jenis simbol untuk membedakannya. Simbol yang satu untuk merepresentasikan pulsa 1 dan simbol yang lain untuk merepresentasikan pulsa 0.

Tetapi dapat juga digunakan lebih banyak simbol untuk merepresentasikan deretan sinyal yang lebih banyak. Contohnya : untuk 2 bit akan menghasilkan 4 jenis data yaitu 00, 01, 10, dan 11, dibutuhkan 4 jenis simbol yang akan merepresentasikan masing-masing deretan data. Sehingga pada intinya untuk n bit dalam satu simbol, kita membutuhkan 2^n jenis simbol untuk merepresentasikan masing-masing deretan bit. Metode modulasi *Phase Shift Keying* untuk 1 bit dalam 1 simbol disebut *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) dan untuk 2 bit disebut *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK).

Binary Phase Shift Keying (BPSK)

Pada BPSK, fasa dari sinyal *carrier* beramplitudo konstan berubah antara dua nilai menurut dua sinyal m_1 dan m_2 yang mungkin untuk membedakan simbol 1 dan 0. Modulasi ini biasanya menggunakan beda fasa sebesar 180 derajat. Sehingga jika sinyal sinusoidal *carrier* memiliki amplitudo A_c , Energi per bit $E_b = \frac{1}{2} A_c^2 T_b$, dan periode bit T_b , maka persamaan sinyal BPSK yang akan ditransmisi untuk simbol 1 dan 0 adalah:

$$s_{BPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{simbol 1})$$

atau (2.8)

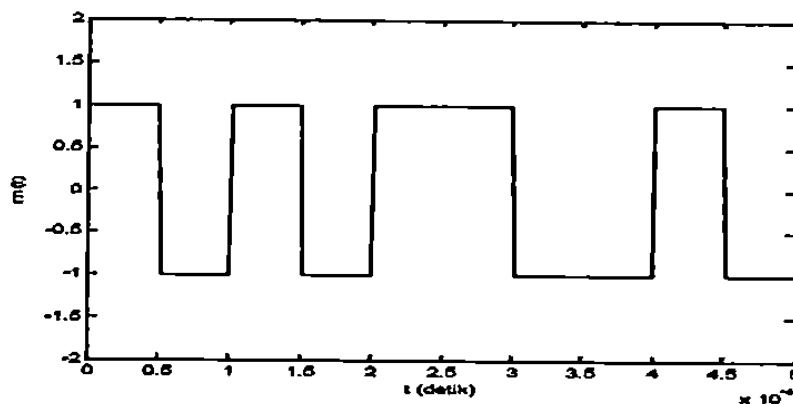
$$s_{BPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi + \theta_c) \quad (2.9)$$

$$= -\sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{simbol 0})$$

Seringkali lebih mudah merepresentasikan m_1 dan m_2 sebagai data biner sinyal $m(t)$, sehingga sinyal pesan dapat direpresentasikan menjadi:

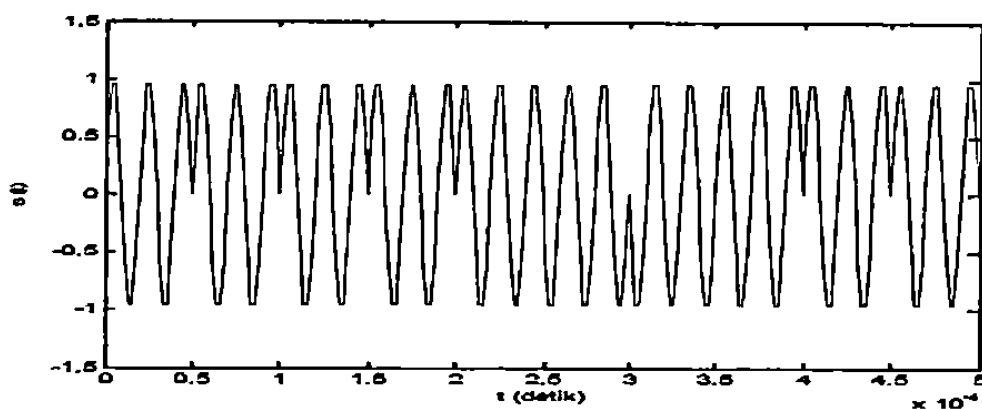
$$s_{BPSK}(t) = m(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \theta_c) \quad (2.10)$$

Sehingga, untuk deretan data 1010110010, sinyal masukan sebelum modulasi berbentuk seperti di bawah ini:



Gambar 2.4 Sinyal data 1010110010 dengan koding NRZ-L

Setelah dimodulasi dengan menggunakan modulasi BPSK sinyalnya akan berbentuk:



Gambar 2.5 Sinyal BPSK dengan data 1010110010

Jika dilihat sinyal BPSK di atas, maka setiap terjadi perubahan sinyal dari 1 menjadi 0 dan 0 menjadi 1, fasa dari sinyal sinusoidal juga berubah. Fasa dari sinyal berubah sebesar 180 derajat setiap terjadi perubahan data.

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Modulasi ini menggunakan beda fasa sebesar 90 derajat untuk setiap 4 jenis simbol yang ada untuk 2 bit per simbol. Dengan demikian QPSK memiliki efisiensi *bandwidth* dua kali lipat dari BPSK. Sinyal QPSK untuk setiap simbol dapat didefinisikan sebagai:

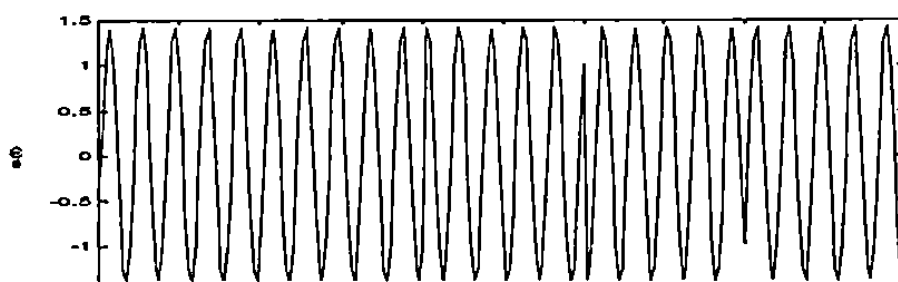
$$s_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[2\pi f_c t + (i-1) \frac{\pi}{2} \right]$$

$$0 \leq t \leq T_s \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (2.11)$$

dimana T_s adalah periode simbol, yaitu sama dengan dua kali periode bit, dan i mewakili 2 bit deretan data dalam 1 simbol. Dengan menggunakan identitas trigonometri, persamaan di atas dapat dituliskan untuk $0 \leq t \leq T_s$ sebagai:

$$s_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \cos(2\pi f_c t) - \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \sin \left[(i-1) \frac{\pi}{2} \right] \sin(2\pi f_c t) \quad (2.12)$$

Sehingga untuk 10 bit yang dikirim pada gambar 2.4., sinyal QPSK akan berbentuk seperti di bawah ini:



Gambar 2.6 Sinyal QPSK dengan data 1010110010

Jika diperhatikan, maka di dalam sinyal di atas ada 4 jenis fasa yang berbeda dalam sinyal sinusoidal yang ada. Setiap fasa merepresentasikan 2 bit data yang dikirim dalam 1 buah simbol.

2.2.4.2 Modulasi *Frequency Shift Keying* (FSK)

Modulasi ini menggunakan frekuensi yang berbeda dari sinyal *carrier* untuk merepresentasikan simbol yang diinginkan. Jadi untuk modulasi ini digunakan dua buah sinyal *carrier* yang beramplitudo sama tetapi dengan frekuensi berbeda.

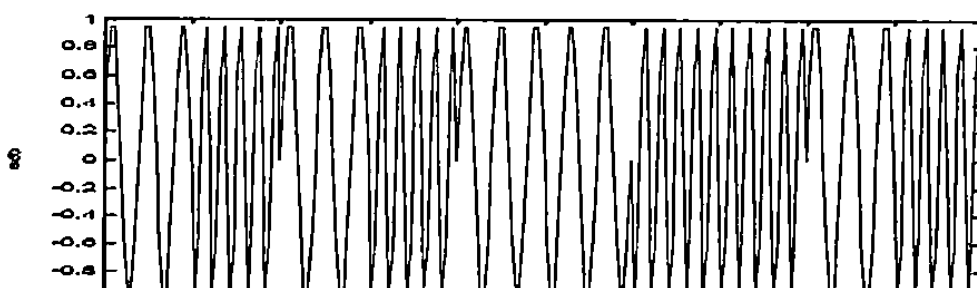
Binary Frequency Shift Keying (BFSK)

Pada BFSK, frekuensi dari sinyal *carrier* beramplitudo konstan berubah antara dua nilai yang bergantung pada kondisi pesan (disebut pola tinggi dan rendah), untuk membedakan simbol 1 dan 0. Pada umumnya sinyal FSK dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$s_{FSK}(t) = v_H(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c + 2\pi \Delta f)t \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{simbol 1}) \quad (2.13)$$

$$s_{FSK}(t) = v_L(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c - 2\pi \Delta f)t \quad 0 \leq t \leq T_b \quad (\text{simbol 0}) \quad (2.14)$$

Sehingga dengan sinyal data 10 bit sama dengan gambar 2.10, jika dimodulasikan dengan modulasi BFSK, akan dihasilkan sinyal BFSK sebagai berikut:



Gambar 2.7 Gambar sinyal BFSK dengan data 1010110010

Jika kita lihat pada sinyal BFSK di atas, maka pada masing-masing data 1 dan 0 memiliki frekuensi sinyal sinusoidal *carrier* yang berbeda.

Minimum Shift Keying (MSK)

Minimum Shift Keying (MSK) adalah jenis khusus dari *Continuous Phase-Frequency Shift Keying (CPFSK)* dimana simpangan frekuensi puncaknya sama dengan $\frac{1}{4}$ *bit rate*. Dengan kata lain, MSK adalah *continuous phase FSK* dengan indeks modulasi 0,5. Indeks modulasi sinyal FSK sama dengan indeks modulasi sinyal FM, yaitu $k_{FSK} = (2\Delta F)/R_b$, dengan ΔF = adalah simpangan frekuensi puncak RF dan R_b = *bit rate*. Indeks modulasi 0,5 mengacu pada jarak minimum frekuensi dua sinyal FSK agar *orthogonal* koheren, dan nama *minimum shift keying* menandakan pemisahan frekuensi minimum (yaitu *bandwidth*) yang memungkinkan deteksi *orthogonal*.

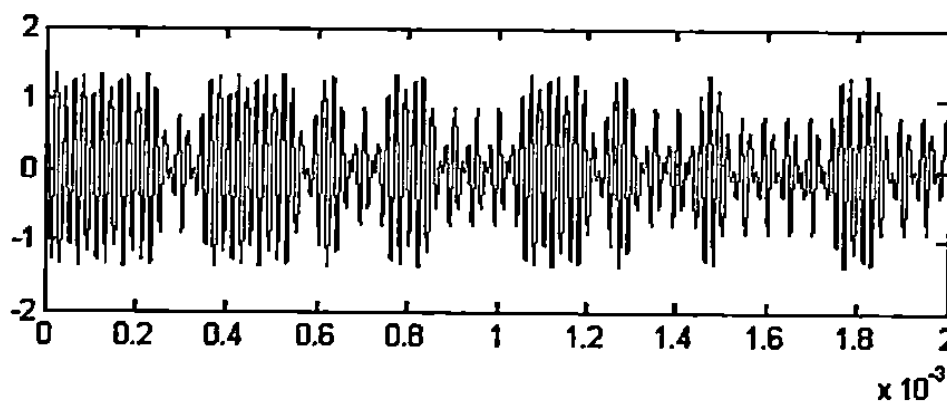
MSK seringkali disebut juga *fast FSK*, karena pemisahan frekuensi yang digunakan hanya setengah dari yang digunakan oleh FSK non koheren konvensional. MSK adalah skema modulasi spektral efisien dan sangat menarik untuk digunakan pada sistem komunikasi radio bergerak. MSK mempunyai karakteristik *constant envelope*, *spectral efficiency*, kinerja BER bagus, dan kemampuan untuk menyesuaikan/sinkronisasi.

Perlu diketahui juga bahwa terdapat beragam MSK yang ditulis pada literatur. Sebagai contoh, MSK yang hanya menggunakan sinyal sinusoidal bagian

dan bagian negatif sinyal sinusoidal sebagai bentuk dasar pulsa. Bagaimanapun, variasi MSK merupakan *continuous phase* FSK yang mempergunakan teknik berbeda untuk mendapatkan *spectral efficiency*. Bentuk gelombang MSK dapat dituliskan menggunakan identitas trigonometri sebagai berikut:

$$s_{MSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos \left[2\pi f_c t - m_I(t)m_Q(t) \frac{\pi}{2T_b} + \phi_k \right] \quad (2.15)$$

dengan ϕ_k 0 atau π tergantung $m_I(t)$ bernilai 1 atau -1. Dari persamaan di atas dapat disimpulkan bahwa MSK memiliki *envelope* konstan. Kontinuitas fasa pada waktu transisi bit dipastikan dengan memilih frekuensi *carrier* menjadi integral dikalikan seperempat *bit rate*, $1/4 T$. MSK adalah sinyal FSK dengan frekuensi sinyal $f_c + 1/4 T$ dan $f_c - 1/4 T$. Contoh modulasi MSK dapat dilihat di bawah ini:



Gambar 2.8 Sinyal modulasi MSK dengan data 40 bit

2.2.4.3 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Modulasi ini merupakan generalisasi dari *M-ary Pulse Amplitude Modulation* (PAM) berdimensi dua, dimana rumusnya melibatkan dua fungsi basis yang orthogonal, yaitu fungsi sinus dan kosinus. QAM dapat juga dikatakan kombinasi antara *Amplitude Shift Keying* (ASK) dan *QPSK*.

membedakan simbol yang ada digunakan fasa dan amplitudo yang berbeda.

Bentuk umum persamaan sinyal QAM dapat didefinisikan sebagai:

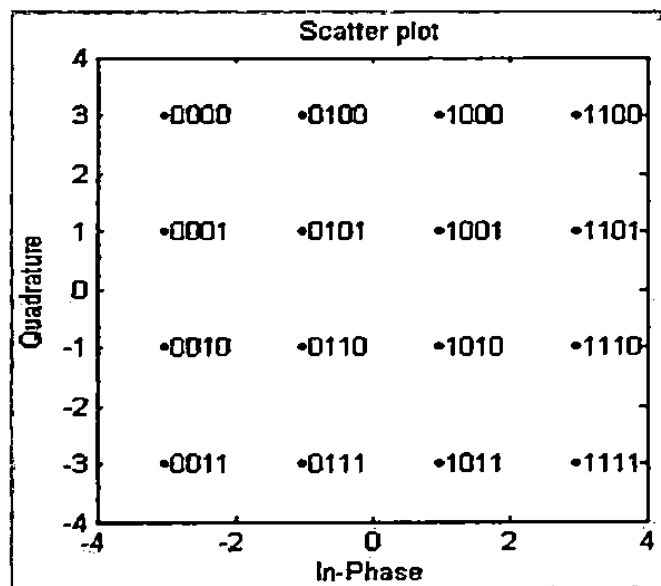
$$s_i(t) = \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} a_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T_s}} b_i \sin(2\pi f_c t) \quad (2.16)$$

$$0 \leq t \leq T_s, \quad i = 1, 2, \dots, M$$

dimana E_{\min} adalah energi dari sinyal saat amplitudo terendah, a_i dan b_i pasangan bilangan bulat bebas yang dipilih sesuai dengan lokasi titik sinyal yang ditunjuk.

Perlu diketahui bahwa QAM tidak mempunyai energi yang konstan tiap simbol, dan juga tidak mempunyai jarak konstan antar kemungkinan kondisi simbol.

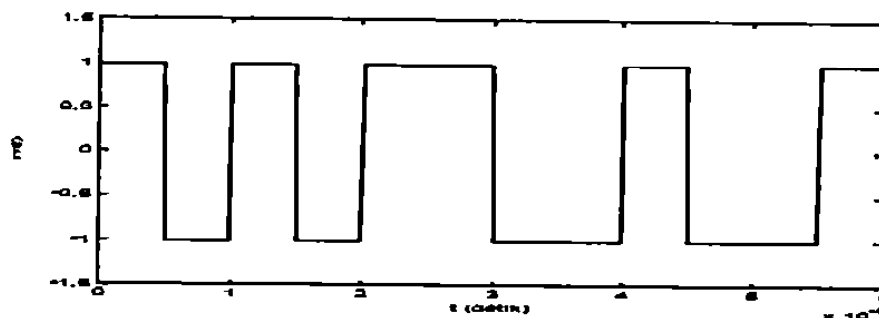
Untuk modulasi QAM – 16 yang digunakan dalam penelitian ini, 1 simbol mewakili 4 bit data, sehingga ada 16 simbol yang berbeda untuk merepresentasikan kemungkinan 4 bit data yang muncul. Letak ke 16 titik konstelasi dari QAM – 16 yang mewakili tiap simbol dapat digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.9 Konstelasi QAM - 16

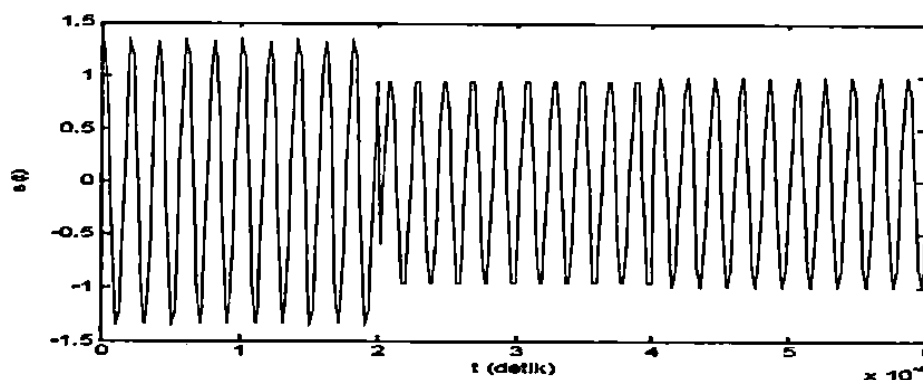
Pada gambar di atas, untuk setiap kemungkinan 4 bit data dapat dilihat 3 amplitudo sinyal yang berbeda dan 4 besar fasa dari simbol yang mewakilinya.

Dapat diilustrasikan dengan deretan data 12 bit berturut-turut 101011001001 sinyal *baseband* dengan koding NRZ-L, menghasilkan sinyal sebagai berikut:



Gambar 2.10 Sinyal data 101011001001 dengan koding NRZ-L

Jika sinyal *baseband* di atas dimodulasikan dengan modulasi QAM, maka akan dihasilkan sinyal sebagai berikut:

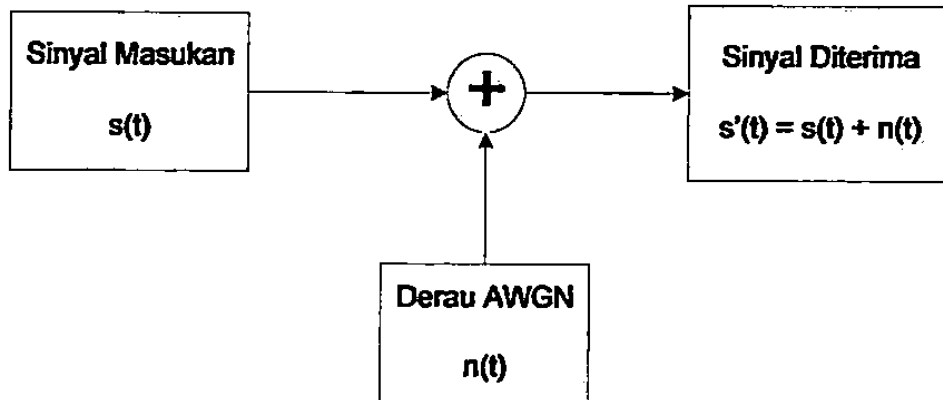


Gambar 2.11 Gambar sinyal QAM dengan data 101011001001

2.2.5 Derau dalam Kanal Transmisi

Kualitas sistem komunikasi wireless sangat dipengaruhi oleh lingkungan perambatan sinyal. Perambatan gelombang elektromagnetik akan mengalami redaman, *fading*, dan derau (*noise*) ketika melintasi medium transmisi udara

Derau adalah istilah yang sering digunakan untuk mendefinisikan sinyal yang tidak diinginkan, dan belum dapat dikendalikan dengan sempurna, yang cenderung mengganggu transmisi dan pemrosesan sinyal dalam sistem komunikasi. Derau yang digunakan untuk mensimulasikan kanal dalam penelitian ini adalah derau AWGN (Additive White Gaussian Noise). Model kanal derau AWGN digambarkan sebagai berikut:



Gambar 2.12 Gambar Model kanal AWGN

Sinyal $s(t)$ melalui kanal transmisi akan dijumlahkan dengan derau $n(t)$. Derau $n(t)$ merupakan derau putih Gaussian, yaitu derau dengan kerapatan spektral daya:

$$\Phi(f) = \frac{N_o}{2} \left(\frac{W}{Hz} \right), \text{ dengan } \Phi(f) = \text{kerapatan spektral daya, } N_o = \text{rapat spektral daya}$$

derau, dan fungsi densitas probabilitas yang terdistribusi secara Gaussian.

2.2.6 Teori Klasifikasi

Cara pengklasifikasian modulasi secara umum dapat dibagi menjadi dua

Pendekatan *decision theoretic* berlaku jika jumlah kandidat tipe modulasi terbatas dan berdasarkan tes hipotesis komposit. Jadi kompleksitas subsistem klasifikasi tipe modulasi dengan menggunakan *decision theoretic* bergantung pada jumlah parameter yang tidak diketahui dari sinyal yang diterima, dan kinerja subsistem ditentukan dari probabilitas subsistem melakukan klasifikasi dengan tepat. Salah satu contoh *decision theoretic* adalah *decision tree*, yaitu setiap fitur kunci yang diajukan digunakan untuk membagi setiap kelompok tipe modulasi menjadi dua kelompok.

2. *Pattern Recognition*

Pada pendekatan *pattern recognition*, system pengklasifikasian dapat dibagi menjadi dua subsistem yaitu subsistem *feature extraction* (pengekstrakan fitur) yang bertugas mengekstrak informasi yang berguna dari sinyal yang diterima dan subsistem *pattern recognizer* (pengenalan pola) yang bertugas mengindikasikan tipe sinyal modulasi yang digunakan oleh sinyal masukan. Contoh pendekatan *pattern recognition* adalah sistem klasifikasi tipe sinyal modulasi menggunakan *Neural Networks*.

2.2.7 Transformasi Wavelet

Dari sudut pandang sejarah, analisis wavelet merupakan metode baru, meskipun apabila kita melihat kembali ke abad 19, Joseph Fourier meletakkan dasar matematis dengan mengemukakan teori analisis frekuensi yang sangat penting dan sangat berpengaruh. Perhatian peneliti berangsur-angsur beralih dari analisis berbasis frekuensi ke analisis berbasis skala ketika terlihat jelas bahwa

pendekatan pengukuran fluktuasi rata-rata pada skala yang berbeda kurang peka terhadap derau. Penyebutan “wavelet” pertama kali pada tahun 1909 pada tesis Alfred Haar. Konsep wavelet secara teoritis seperti bentuk sekarang pertama kali diusulkan oleh Jean Morlet dan tim di Marseille Theoretical Physics Center di bawah kendali Alex Grossmann di Perancis.

Metode analisis wavelet dikembangkan terutama oleh Y. Meyer beserta koleganya dan tersebar luas. Sedangkan, algoritma wavelet pertama kali dikembangkan merupakan hasil kerja dari Stephane Mallat pada 1988. Sejak saat itu, penelitian wavelet meluas berlingkup internasional. Penelitian seperti ini sangat aktif di Amerika Serikat, dimana dipelopori oleh ilmuwan Ingrid Daubechies, Ronald Coifman, dan Victor Wickerhauser.

2.2.6.1 *Continuous Wavelet Transform (CWT)*

Continuous Wavelet Transform (CWT) adalah transformasi wavelet kontinu yang mendekomposisi sinyal $x(t)$ menggunakan fungsi basis yaitu dilasi dan translasi, melalui konvolusi. CWT digunakan untuk menganalisis sinyal *non stationary*, dengan sifat statistiknya berubah sepanjang waktu. Wavelet mampu melakukan analisis lokal dengan *window* sekecil mungkin terhadap suatu sinyal (resolusi). CWT didefinisikan sebagai jumlah waktu keseluruhan sinyal dikali dengan fungsi wavelet melalui proses *scale* dan *shift*. Faktor *scale* (skala) menyimpan informasi tentang frekuensi dan *shift* (posisi) menyimpan informasi tentang waktu.

$$CWT(x, a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \frac{dt}{a}$$

Fungsi transformasi wavelet didefinisikan:

$$\psi^{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2.18)$$

dimana: $\psi = \text{mother wavelet}$, $a = \text{skala}$, $b = \text{translasi}$

dan tanda $*$ menunjukkan fungsi kompleks konjugat. Dilasi skala, a , berbanding terbalik dengan frekuensi, merepresentasikan sifat periodik atau harmonik sinyal. Koefisien wavelet hasil transformasi $CWT(a,b)$ merepresentasikan kemiripan antara dilasi dan posisi mother wavelet dan sinyal pada waktu b dan skala (frekuensi) a . Normalisasi oleh akar skala menunjukkan integral energi yang dihasilkan oleh wavelet independen terhadap dilasi.

2.2.6.2 Wavelet Morlet

Fleksibilitas yang besar dalam transformasi menghasilkan keragaman *mother wavelets*, dimana memberikan representasi *scalogram* (pemetaan distribusi energi) yang berbeda untuk setiap sinyal yang diberikan. (Huang et al. 1998). Hal ini bergantung pada pemilihan *mother wavelets* yang menjadi penelitian oleh ahli-ahli. Namun, banyak juga yang berpendapat bahwa *mother wavelets* seharusnya dipilih berdasarkan jenis dan bentuk sinyal yang diinginkan atau fitur tertentu yang ingin diambil/diekstrak, menjadikan fleksibilitas sebagai aset. Wang (2001) menunjukkan pentingnya pemilihan *mother wavelets* yang mirip dengan beranekaragam keadaan transien pada sistem mekanik dan menggunakan kemampuan ini untuk memperbesar fitur sinyal spesifik. Meskipun ada beragam *mother wavelets* tersedia untuk analisis, hanya kelas tertentu saja yang paling cocok untuk tujuan penelitian ini. Wavelet Morlet, sebuah analitik

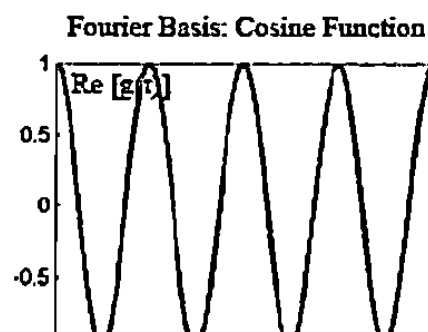
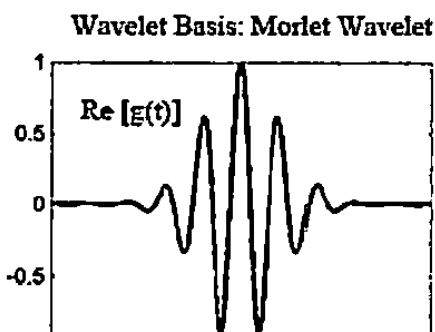
wavelet, hanyalah modulasi frekuensi yang nyata dan simetris dari fungsi *window* (jendela), yaitu *Gaussian window*. Wavelet Morlet dapat ditunjukkan sebagai *Gaussian Windowed-Fourier Transform*:

$$g(t) = e^{-|t|^2/2} e^{j2\pi f_o t} = e^{-|t|^2/2} (\cos(2\pi f_o t) + j \sin(2\pi f_o t)) \quad (2.19)$$

atau

$$\psi(t) = e^{-|t|^2/2} e^{j\omega_p t} \text{ dan transformasi Fourier-nya } \hat{\psi}(\omega) = e^{-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2}}$$

dengan $\omega_p = 2\pi f_o$, dimana fungsi basis sinus dan kosinus berosilasi pada frekuensi sentral f_o . Karena alasan inilah Wavelet Morlet sering disebut dengan Wavelet Gabor. Dilasi dari *mother wavelets* yang terletak sementara memungkinkan “frekuensi efektif” pasangan sinus dan kosinus untuk berubah menjadi harmonik dan sepadan dengan komponen dalam sinyal. Hal ini adalah analogi dasar dari Transformasi Fourier yang sangat sesuai dengan analisis harmonik pada domain waktu-frekuensi. Wavelet ini secara memuaskan memenuhi kondisi *mother wavelets* untuk nilai f_o yang cukup besar, misalnya lebih besar dari $\frac{5}{2\pi}$ atau 0,8. (Carmona et al., 1998).



$$= e^{-t^2/2} (\cos(\omega_o t) + i \sin(\omega_o t)) = (\cos(\omega_o t) + i \sin(\omega_o t))$$

Gambar 2.13 Perbandingan fungsi basis untuk Transformasi Wavelet Morlet dan Transformasi Fourier

Wavelet Morlet terletak ekuivalen pada domain frekuensi. Pada kasus Wavelet Morlet, terdapat hubungan unik antara parameter dilasi transformasi, skala a , dan frekuensi Fourier f dimana wavelet difokuskan.

Keuntungan memilih Wavelet Morlet adalah karena mempunyai persamaan analitik pada domain waktu dan frekuensi, meskipun persamaannya mendukung sampai dengan tidak terbatas tetapi amplitudonya jauh lebih kecil dari sinyal aslinya, terutama untuk $\omega_o > 5$, kondisi $\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0$ terpenuhi.

2.2.6.3 Mengatur Frekuensi Sentral: Resolusi Frekuensi

Scalogram dapat diperoleh dari Transformasi Wavelet dengan memetakan kuadrat modulus transformasi. Representasi ini analogi dengan *spectrogram* yang memberi gambaran kandungan energi sinyal berpasangan pada waktu dan frekuensi yang berbeda, diberikan:

$$SG(a, t) = W|a, t|^2 \text{ atau } SG(f, t) = \left| W \frac{f_o}{f}, t \right|^2 \quad (2.20)$$

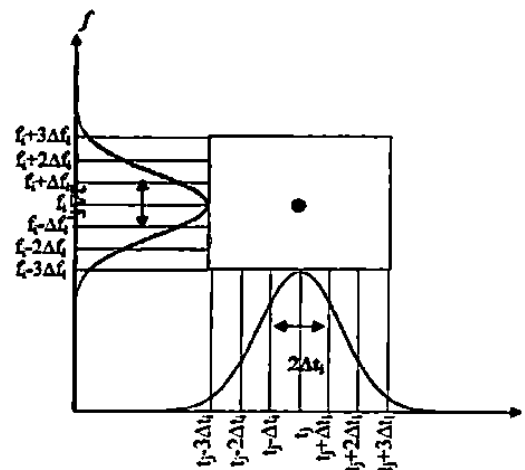
pada *scalogram* energi terdistribusi secara multiresolusi. Pada kasus Wavelet Morlet, ada hubungan unik antara parameter transformasi yaitu dilasi, skala a , dan frekuensi Fourier f dimana wavelet difokuskan. Dengan hubungannya adalah:

$a = \frac{f_0}{f}$, dari kedua persamaan itu, resolusi Wavelet Morlet pada frekuensi tertentu diberikan:

$$\Delta f_i = \frac{f_i}{2\pi\sqrt{2}f_0} \quad (2.21)$$

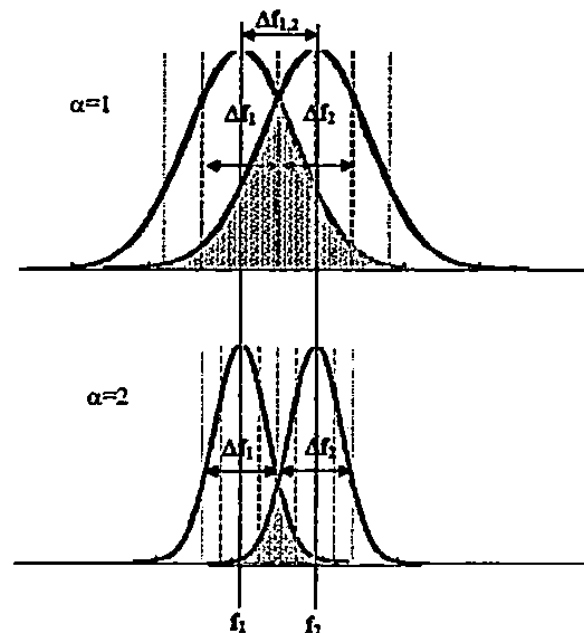
Resolusi frekuensi akan meningkat untuk periode sinyal yang lebih panjang, dan juga menunjukkan kemampuan resolusi dapat diatur sehingga sesuai untuk keperluan analisis melalui pemilihan frekuensi sentral Wavelet Morlet yang cermat. Hal ini akan menjadi pelik dan bisa menyebabkan distorsi sinyal apabila tradeoffs antara waktu dan resolusi frekuensi tidak seimbang.

Frekuensi sentral dapat juga bervariasi pada sederetan angka-angka dengan menganggap f_0 sebagai variabel ketiga pada Transformasi Wavelet, esensinya adalah menciptakan tampilan empat dimensi dari koefisien wavelet yang berubah terhadap waktu, skala, dan frekuensi sentral, sesuai dengan yang diusulkan oleh Wang (2001). Namun, analisis secara teliti tidak diperlukan jika nilai parameter yang diinginkan dapat ditentukan menggunakan tinjauan sederhana terhadap urutan waktu. Oleh karena itu, secara umum mengingat keperluan untuk memisahkan komponen frekuensi f_1 dan f_2 yang berdekatan, dimana frekuensi sentral minimum untuk analisis dapat ditentukan oleh:



Gambar 2.14 Frekuensi efektif dan resolusi waktu Wavelet Morlet dan kesesuaian dengan Heisenberg box

$f_{1,2}$ dapat diambil f_1 , f_2 , atau nilai rata-ratanya, karena bisa dianggap diabaikan (tidak begitu berpengaruh) perbedaannya oleh nilai $\Delta f_{1,2}$, yaitu pemisahan antara dua komponen frekuensi. α adalah parameter yang menandakan seberapa besar *overlap* analisis *Gaussian window* pada frekuensi yang berdekatan diperbolehkan.



Gambar 2.15 Gambar implikasi pemilihan parameter untuk pemisahan

2.2.8 Fasa Sesaat, Amplitudo Sesaat dan Frekuensi Sesaat

Analisis sinyal kompleks dapat digunakan untuk memperkirakan parameter-parameter sesaat seperti *instantaneous phase* (fasa sesaat), *signal envelope* (amplitudo sesaat), dan *instantaneous frequency* (frekuensi sesaat). Sinyal $s(t)$ dapat direpresentasikan dengan amplitudo $a(t)$ dan fasa $\theta(t)$ sebagai berikut:

$$s(t) = a(t) \cos \theta(t) \quad (2.23)$$

dan penulisan *quadrature* (wilayah imajiner) adalah:

$$s^*(t) = a(t) \sin \theta(t) \quad (2.24)$$

dan penulisan kompleks analitik $z(t)$ menjadi:

$$z(t) = s(t) + is^*(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (2.25)$$

apabila persamaan wilayah *quadrature* sudah didapatkan, maka amplitude sesaat $a(t)$ dan fasa sesaat $\theta(t)$ nya adalah:

$$a(t) = [s(t)^2 + s^*(t)^2]^{1/2} \quad (2.26)$$

rumusan $a(t)$ menggunakan Transformasi Wavelet Kontinu:

$$a(t) = |CWT(a, b)| \quad (2.27)$$

$$\text{dan } \theta(t) = \tan^{-1} \left[\frac{s^*(t)}{s(t)} \right] \quad (2.28)$$

$$\text{rumusan CWT: } \theta(t) = \arg(CWT(a, b)) \quad (2.29)$$

frekuensi sesaat $f(t)$ adalah turunan waktu dari fasa sesaat:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{s(t) \frac{ds^*(t)}{dt} - s^*(t) \frac{ds(t)}{dt}}{s(t)^2 + s^*(t)^2} \quad (2.30)$$

dengan CWT:

$$f_N = \frac{f_o}{CWT(a,b)}, \text{ dengan } f_o \text{ adalah frekuensi sentral wavelet} \quad (2.31)$$

2.2.9 Ekstraksi Fitur-Fitur Kunci yang akan Digunakan dalam Klasifikasi Tipe Sinyal Modulasi

Sinyal diterima merupakan input yang besar untuk *Neural Networks* yang notabene hanya menggunakan beberapa/sebagian sinyal masukan. Untuk mengurangi jumlah informasi yang harus direpresentasikan ke *Neural Networks*, dilakukan proses ekstraksi fitur kunci yang menghitung sejumlah fitur-fitur menonjol dari data masukan. Fitur kunci yang bagus harus mempunyai ketahanan yang baik terhadap *signal-to-noise ratios* (SNR), frekuensi transmisi, dan keanehan lain dari transmisi individual, disamping harus tetap sensitif terhadap perbedaan pada skema modulasi. Selanjutnya, fitur-fitur kunci harus *complement* (melengkapi satu sama lain) sehingga kombinasi fitur kunci lebih berguna untuk tujuan pengklasifikasian daripada hanya menggunakan satu fitur kunci. Enam fitur kunci dipilih berdasarkan makalah [3]. Tiap fitur kunci ini dipilih karena berhasil digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya, atau karena analisis matematika menunjukkan bahwa fitur tersebut memenuhi kriteria fitur bagus yang tersebut di atas. Fitur-fitur yang digunakan ditunjukkan sebagai berikut:

Fitur kunci yang pertama α didefinisikan sebagai berikut:

dimana $a_{cn}(i)$ adalah nilai amplitudo sesaat ternormalisasi pada waktu sesaat

$t = i / f_s$ ($i = 1, 2, \dots, N_s$), didefinisikan $a_{cn}(i) = a_n(i) - 1$, dimana $a_n(i) = \frac{a(i)}{m}$ dan

m_a merupakan nilai rata-rata amplitudo sesaat dalam satu *frame*, ditunjukkan

dalam persamaan: $m_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a(i)$. Normalisasi amplitudo sesaat diperlukan

untuk mengkompensasi keadaan kanal. γ_{max} merepresentasikan nilai maksimum kerapatan spektral daya amplitudo sesaat ternormalisasi sinyal diterima. Apabila persamaan γ_{max} direpresentasikan menggunakan Transformasi Wavelet Kontinu maka persamaannya akan menjadi:

$$\gamma_{max} = \frac{\max |FFT|CWT(a, b)^2|}{N} \quad (2.33)$$

Fitur kunci kedua σ_{ap} didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{a_n(i) > a_t} \Phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{a_n(i) > a_t} |\Phi_{NL}(i)| \right)^2} \quad (2.34)$$

dimana $\Phi_{NL}(i)$ adalah nilai komponen non linear fasa sesaat pada waktu sesaat

$t = i / f_s$, C adalah jumlah sampel pada $\{\Phi_{NL}(i)\}$ dimana $a_n(i) > a_t$ dan a_t adalah

threshold untuk $\{a(i)\}$ bawah dimana perkiraan fasa sesaat sangat sensitif

terhadap derau. σ_{ap} merupakan simpangan baku (*standard deviation*) nilai absolut

komponen non linear fasa sesaat ternormalisasi, yang diukur pada sinyal diterima.

Apabila persamaan σ_{ap} direpresentasikan menggunakan Transformasi Wavelet

Kontinu maka persamaannya akan menjadi:

$$\sigma_{ap} = \sqrt{\frac{E[|angle(CWTT(a, b))|^2]}{\{E[|angle(CWTT(a, b))|\}]^2}} \quad (2.35)$$

Fitur kunci ketiga σ_{dp} didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > t_a} \Phi_{NL}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{C} \sum_{A_n(i) > t_a} \Phi_{NL}(i) \right)^2} \quad (2.36)$$

σ_{dp} merupakan simpangan baku nilai langsung komponen non linear fasa sesaat ternormalisasi, yang diukur pada sinyal diterima. Apabila persamaan σ_{dp} direpresentasikan menggunakan Transformasi Wavelet Kontinu persamaannya akan menjadi:

$$\sigma_{dp} = \sqrt{E[\text{angle}(CWT(a,b))^2] - \{E[\text{angle}(CWT(a,b))]\}^2} \quad (2.37)$$

Fitur kunci keempat σ_a didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N a_{cn}^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |a_{cn}(i)| \right)^2} \quad (2.38)$$

σ_a merupakan simpangan baku amplitudo sesaat ternormalisasi. Apabila persamaan σ_a direpresentasikan menggunakan Transformasi Wavelet Kontinu maka persamaannya akan menjadi:

$$\sigma_a = \sqrt{E[|CWT(a,b)|^2] - \{E[|CWT(a,b)|]\}^2} \quad (2.39)$$

Fitur kunci kelima σ_{fn} didefinisikan sebagai berikut:

$$\sigma_{fn} = \sqrt{\frac{1}{C} \left(\sum_{A_n(i) > t_a} f_N^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N} \sum_{A_n(i) > t_a} |f_N(i)| \right)^2} \quad (2.40)$$

dimana $f_N = \frac{f_m(i)}{r_s}$, $f_m(i) \approx f(i) - m_f$, dan $m_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f(i)$ dan r_s adalah

(pada modulasi *binary symbol rate* sebanding dengan *bit rate*). Pada Transformasi Wavelet Kontinu, f_N dapat didefinisikan sebagai:

$$f_N = \frac{1}{2\pi} \text{diff}(\text{angle}(CWT(a,b))) \quad (2.41)$$

dengan f_o adalah frekuensi sentral Wavelet. σ_{f_n} merupakan simpangan baku nilai absolut frekuensi sesaat ternormalisasi, yang diukur pada interval bagian sinyal.

Fitur kunci keenam μ^f_{42} didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu^f_{42} = \frac{E\{f_N^4(i)\}}{\{E\{f_N^2(i)\}\}^2} \quad (2.42)$$

μ^f_{42} merupakan kurtosis frekuensi sesaat ternormalisasi.

2.2.10 Neural Networks

Neural Networks atau yang sering disebut dengan jaringan syaraf tiruan merupakan sistem pemroses informasi yang memiliki karakteristik mirip dengan jaringan syaraf biologi. *Neural Networks* adalah representasi buatan dari otak manusia yang selalu mencoba untuk mensimulasikan proses pembelajaran pada otak manusia tersebut. Istilah buatan ini digunakan karena *Neural Networks* diimplementasikan menggunakan program komputer yang mampu menyelesaikan sejumlah proses perhitungan selama proses pembelajaran.

Neural Networks dibentuk sebagai generalisasi model matematika dari jaringan syaraf biologi dengan asumsi bahwa:

1. Pemrosesan informasi terjadi pada banyak elemen sederhana (neuron)

3. Penghubung antar neuron memiliki bobot yang akan memperkuat atau memperlemah sinyal
4. Untuk menentukan keluaran, setiap neuron menggunakan fungsi aktivasi yang dikenakan pada jumlah masukan yang diterima. Besarnya keluaran ini selanjutnya dibandingkan dengan suatu batas ambang atau *threshold*.

Neural Networks ditentukan oleh tiga hal, yaitu:

1. Pola hubungan antar neuron (disebut arsitektur jaringan)
2. Metode untuk menentukan bobot penghubung (disebut metode *training* / belajar / algoritma)
3. Fungsi aktivasi

Beberapa aplikasi dasar *Neural Networks* yaitu:

1. Pengenalan pola dan klasifikasi

Neural Networks dapat dipakai untuk mengenali pola (seperti huruf, angka, suara, tanda tangan) yang sudah sedikit berubah

2. Pemrosesan sinyal

Neural Networks (model ADALINE) dapat digunakan untuk menekan derau dalam saluran telepon

3. Peramalan

Neural Networks dapat dipakai untuk meramalkan apa yang akan terjadi di masa yang akan datang berdasarkan pola kejadian di masa lampau

Beberapa fungsi aktivasi yang sering dipakai:

1. Fungsi *Threshold/hard limit* (ambang)

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{jika } x \geq a \\ 0 & \text{jika } x < a \end{cases} \quad (2.43)$$

Fungsi *symmetric hard limit* (bipolar) merupakan varian dari fungsi *hard limit*, hanya saja keluaran yang dihasilkan berupa 1 atau -1.

2. Fungsi *sigmoid*

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.44)$$

Fungsi *sigmoid* sering dipakai karena nilai fungsinya yang terletak diantara 0 dan 1 dan dapat diturunkan dengan mudah.

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x)) \quad (2.45)$$

3. Fungsi identitas (*purelin*)

$$f(x) = x \quad (2.46)$$

Fungsi identitas sering dipakai jika keluaran jaringan yang diinginkan berupa bilangan *real* sembarang (bukan hanya pada jangkauan $[0,1]$ atau $[-1,1]$).

Pada *Neural Networks* dikenal istilah bias dan *threshold*. Bias merupakan masukan yang nilainya sama dengan 1. Bias berfungsi mengubah nilai *threshold* menjadi sama dengan 0.

Hingga kini terdapat lebih dari 20 model *Neural Networks*. Masing-masing model menggunakan arsitektur, fungsi aktivasi dan perhitungan yang berbeda-beda dalam prosesnya. Berdasarkan strategi pelatihan, model jaringan dibagi menjadi dua, yaitu:

1. Pelatihan dengan supervisi

Contoh: model Hebb, perceptron, Adaline, Boltzman, Hopfield

2. Pelatihan tanpa supervisi

Contoh: model kompetisi, Kohonen, *Learning Vector Quantization* (LVQ), Necognitron, dan lain-lain.

Berdasarkan arsitekturnya, *Neural Networks* dibagi menjadi tiga, yaitu:

1. Jaringan *layer* (lapisan) tunggal

Contoh: Adaline, Hopfield, perceptron, LVQ, dan lain-lain.

2. Jaringan *layer* jamak

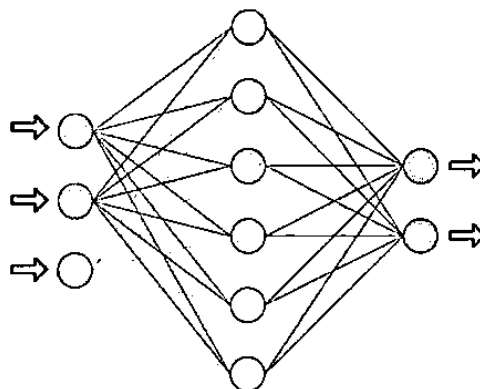
Contoh: *Backpropagation*, Necognitron, dan lain-lain.

3. Recurrent

Contoh: Boltzman, Hopfield, dan lain-lain.

2.2.11 *Backpropagation*

Salah satu algoritma *Neural Networks* yang dapat dipakai untuk mengenali pola dan klasifikasi adalah *Backpropagation*. *Backpropagation* memiliki *layer* jamak yaitu dengan menambahkan *layer* tersembunyi diantara *layer* masukan dan *layer* keluaran. Hal ini dilakukan karena jaringan dengan *layer* tunggal tidak dapat mengenali pola.



Gambar 2.16 Gambar algoritma backpropagation sederhana

Fungsi aktivasi yang dipakai dalam *Backpropagation* adalah:

- Fungsi *sigmoid*

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2.47)$$

dengan $f'(x) = f(x)[1 - f(x)]$

- Fungsi *sigmoid bipolar* (tansig):

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{1 - e^{-2x}}{1 + e^{-2x}} \quad (2.48)$$

dengan $f'(x) = [1 + f(x)][1 - f(x)]$

- Fungsi identitas (*purelin*)

$$f(x) = x \quad (2.49)$$

dengan $f'(x) = 1$

Pada *backpropagation* meliputi tiga fase pelatihan, yaitu:

- Fase I: Propagasi maju

Pada fase ini sinyal masukan dipropagasikan ke *layer* tersembunyi menggunakan fungsi aktivasi yang telah ditentukan. Keluaran dari setiap unit *layer* tersembunyi selanjutnya dipropagasikan maju lagi ke *layer* tersembunyi di atasnya menggunakan fungsi aktivasi yang telah ditentukan hingga menghasilkan keluaran jaringan. Selisih antara keluaran jaringan dengan target yang harus dicapai adalah kesalahan yang terjadi. Jika kesalahan yang terjadi lebih kecil dari batas toleransi yang ditentukan, maka iterasi dihentikan. Jika tidak, maka bobot setiap node dalam jaringan akan diubah

- Fase II: Propagasi mundur

Berdasarkan kesalahan yang didapat maka dihitung faktor δ keluaran yang dipakai untuk mendistribusikan kesalahan di unit keluaran ke semua unit tersembunyi yang berhubungan langsung dengan unit keluaran. δ keluaran juga dipakai untuk mengubah bobot garis yang berhubungan langsung dengan unit keluaran.

Dengan cara yang sama dihitung faktor δ tersembunyi sebagai dasar perubahan bobot semua garis yang berasal dari unit tersembunyi di bawahnya. Demikian seterusnya hingga semua faktor δ di unit tersembunyi yang berhubungan langsung dengan unit masukan dihitung.

- Fase III: Perubahan bobot

Setelah semua faktor δ dihitung, bobot semua garis diubah secara bersamaan.

Perubahan bobot suatu garis didasarkan atas faktor δ neuron di layer atasnya.

Ketiga fase ini terus diulang-ulang hingga kesalahan yang diperoleh lebih kecil dari batas toleransi kesalahan yang telah ditentukan.

Cara mengoptimalkan arsitektur backpropagation:

- Pemilihan bobot dan bias awal yang tepat
- Penambahan momentum
- Mengubah-ubah laju pemahaman

2.3 Spesifikasi Garis-garis Besar Produk yang Direncanakan

2.3.1 Gambaran umum

Sistem yang akan didesain adalah sistem pengklasifikasian tipe modulasi sinyal menggunakan metode Transformasi Wavelet dan *Neural Networks*. Sistem ini terdiri dari tiga bagian, yaitu: pembangkitan sinyal masukan, pemrosesan sinyal melalui pengekstrakan fitur-fitur kunci, dan pengklasifikasian menggunakan metode *Neural Networks*. Skenarionya akan seperti ini: dibangkitkan sinyal masukan yang telah ditentukan tipe modulasinya terlebih dahulu. Kemudian sinyal masukan ini akan diekstrak fitur-fitur kuncinya menggunakan Transformasi Wavelet untuk diambil nilai statistiknya yaitu simpangan baku dari fasa, amplitudo, dan frekuensi sesaat. Fitur-fitur yang diperoleh kemudian dimasukkan ke dalam *Neural Networks* yang telah didefinisikan sebelumnya untuk menghasilkan keluaran hasil klasifikasi berupa tipe modulasi sinyal masukan tersebut. Diteliti apakah tipe modulasi keluaran sama dengan tipe modulasi sinyal masukan.

2.3.2 Spesifikasi Fungsional

Sistem pengklasifikasian tipe modulasi yang didesain mempunyai spesifikasi fungsional sebagai berikut:

1. Pembangkitan sinyal komunikasi sebagai masukan, yang dibangkitkan adalah sinyal modulasi AM, FM, BPSK, QPSK, BFSK, MSK, dan QAM.
2. Mengekstrak fitur-fitur kunci sinyal masukan menggunakan Transformasi Wavelet Morlet untuk didefinisikan nilai statistiknya berupa simpangan baku

dari fasa, amplitudo, dan frekuensi sesaat, kerapatan spektral daya maksimum amplitudo sesaat, dan kurtosis frekuensi sesaat.

3. Mengklasifikasikan tipe modulasi sinyal masukan berdasarkan fitur-fitur kunci menggunakan *Neural Networks*.

2.3.3 Spesifikasi Teknis

Sistem pengklasifikasian tipe yang didesain mempunyai spesifikasi teknis:

1. Pengekstrakan fitur-fitur kunci dilakukan bersamaan untuk setiap sinyal masukan.
2. *Neural Networks* yang dibangun berarsitektur *feedforward* terdiri dari satu jaringan dengan algoritma *backpropagation* dan terdiri dari dua *layer* tersembunyi.
3. Data masukan dari *Neural Networks* adalah fitur-fitur kunci yang berupa bilangan *real* sedangkan keluarannya berupa *Boolean* untuk penentuan hasil