

Pre-kompensasi respons saluran transmisi pada jaringan akses multimedia ADSL 1,6 Mbps

Suhono H. Supangkat* dan Eru P**

*Laboratorium Sinyal dan Sistem Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung, 40132, Indonesia, E-mail : suhono@lss.ee.itb.ac.id

** Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10 Bandung, 40132

Masuk: Januari 1999; revisi masuk: Juni 1999; diterima: Juli 1999

Sari

Berkembangnya pola kehidupan masyarakat semakin meningkatkan kebutuhan akan layanan yang mudah dan cepat, seperti jaringan akses multimedia. Salah satu kelompok sistem xDSL yang merupakan teknologi jaringan akses alternatif adalah 16-QAM-ADSL. Masalah utama yang dihadapi dalam sistem xDSL adalah memperkecil pengaruh respons saluran transmisi, yang umumnya dapat menggunakan *equalizer*. Pre-kompensasi respons saluran transmisi dapat ditambahkan untuk membantu kerja *equalizer*. Pre-kompensasi adalah sebuah filter yang ditambahkan sebelum ADC untuk kompensasi awal respons saluran transmisi. Penggunaan pre-kompensasi dapat memperpendek panjang koefisien *equalizer* menjadi sekitar 20 tap, yang apabila tanpa pre-kompensasi memerlukan sampai 100 tap. 16-QAM-ADSL dapat mencapai kapasitas 1,6 Mbps (T1/DS1 pada 1,544 Mbps) pada saluran sejauh 18 kft. 26 AWG. Sistem *transceiver* 16-QAM-ADSL yang diteliti di sini dapat bekerja dengan baik setelah melakukan peatihan selama 0,25 detik. Kesalahan fasa sampling sekitar $7,2^\circ$ dan frekuensi sampling sekitar 10kHz.

Kata kunci: ADSL, equalization, jaringan akses, kompensasi, multimedia.

Abstract

Transmission channel of pre-compensation response in the ADSL 1.6 Mbps multimedia access network

The development of the living pattern of society has increased the needs of faster and easier services, such as multimedia access network. One of the xDSL family, as an alternative to the network access technology, is the 16-QAM ADSL. The main problem in xDSL is reducing the transmission channel response which usually can be accomplished by using an equalizer. Transmission channel of pre-compensation response can be added to assist the work of the equalizer. A pre-compensation is a filter which has been added before ADC to compensate the earlier response of the transmission channel. The utilization of the pre-compensation can reduce the length of the equalizer coefficients from 100 tap to 20 tap. The 16-QAM-ADSL can reach the capacity of 1.6 Mbps (T1/DS1 at 1.544 Mbps) in a 18 kft channel 26 AWG. The 16-QAM ADSL transceiver system which is explored in this study has worked well after 0.25 second training period. The sampling phase error is about 7.2° and the sampling frequency error is about 10 KHz.

Key words: access network, ADSL, compensation, equalization, multimedia.

1 Pendahuluan

Kebutuhan akan layanan multimedia mengharuskan pengembangan transportasi data digital dan kapasitas yang besar. Misalnya, untuk mengirimkan format video MPEG minimal diperlukan 1,5 Mbps[1]. Teknologi impian sampai saat ini adalah sistem komunikasi *fiber-optic*, yang memiliki kapasitas dalam orde giga bps. Namun, untuk itu harus dibangun infrastruktur baru dengan biaya investasi besar, meskipun sebenarnya sangat ekonomis jika dilihat dari sisi teknologinya. Selain itu, terkadang kebutuhan akan transportasi multimedia tidak memerlukan kapasitas sebesar itu

(misalnya saluran ke pelanggan hanya memerlukan sebuah atau beberapa saluran saja dengan kapasitas menengah).

Kemungkinan lain adalah memanfaatkan infrastruktur yang sudah ada, yaitu jaringan telepon yang menggunakan saluran sepasang kawat tembaga (*Public Service Telephone Network, PSTN*). Masalahnya, jaringan tersebut telah dirancang untuk keperluan penyaluran sinyal suara dengan *bandwidth* terbatas. Dengan perkembangan teknologi digital, jaringan PSTN dapat dioptimalkan untuk penggunaan transmisi data digital kecepatan tinggi. Teknologi ini sering disebut

xDSL[2]. Awalan huruf menyatakan ada beberapa variasi sistem DSL (*Digital Subscriber Line*). ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) merupakan salah satu variasi xDSL, yang memiliki kapasitas transmisi dari pelanggan ke *central office (upstream)* atau sebaliknya (*downstream*) tidak sama besar.

Di sinilah *equalizer* berperan besar melakukan kompensasi saluran transmisi agar dapat digunakan untuk transmisi sinyal xDSL. Rangkaian *equalizer* yang digunakan sangat kompleks, baik fungsi maupun rangkaiannya. Ada beberapa jenis teknik modulasi yang sudah dikembangkan yang dapat mengatasi masalah keterbatasan saluran transmisi, seperti DMT (*Discrete Multi Tone*)[3], yang dapat mengoptimalkan saluran transmisi berdasarkan tingkat SNR-nya. Dengan teknik ini, rangkaian *equalizer* dapat disederhanakan. Pada teknik modulasi lain, seperti QAM[4] atau CAP (*Carrierless Amplitudo/Phase*)[5], penggunaan *equalizer* masih mutlak diperlukan. Banyak teknik yang digunakan untuk menurunkan kompleksitas *equalizer*. Salah satu yang diteliti di sini adalah penggunaan pre-kompensasi saluran transmisi.

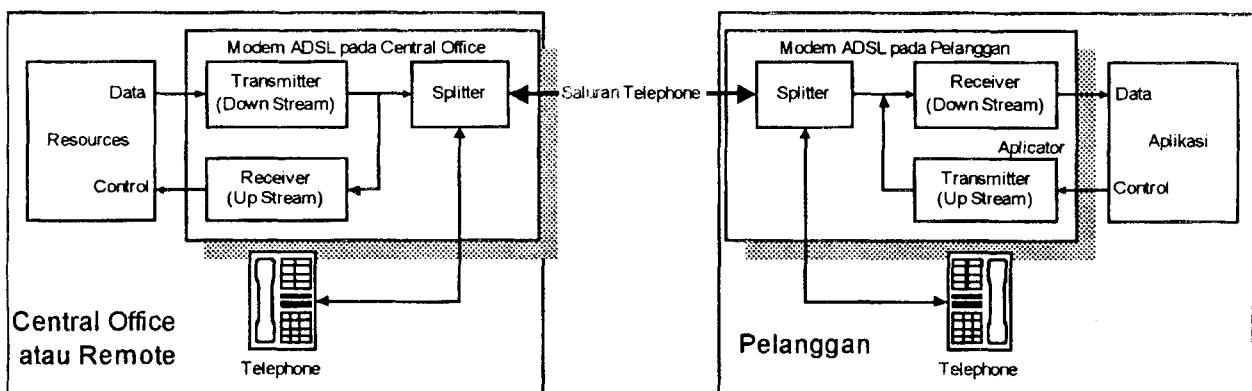
Penelitian dilakukan dengan terlebih dahulu mempelajari konsep dasar sistem komunikasi digital secara umum dan sistem ADSL secara khusus, dilanjutkan dengan mempelajari sistem ADSL yang sudah dikembangkan. Tahap berikutnya adalah mencoba membangun sistem ADSL berdasarkan komponen-komponen dasar yang bertujuan untuk lebih memahami konsep dasar perancangan sistem ADSL. Hasil perancangan disimulasikan dengan menggunakan *software matlab* dan diteliti lebih lanjut kemungkinan perbaikan pada komponen sistem ADSL tersebut. Salah satu bentuk perbaikan yang diteliti diuraikan di sini.

Penelitian ini sendiri lebih banyak difokuskan pada teknik ekualisasi dan pre-kompensasi untuk sistem QAM-ADSL 1,6 Mbps. Bagian kedua dari tulisan ini akan menampilkan secara umum *transceiver* 16-QAM-ADSL yang sedang diteliti dan menerangkan sedikit bagian-bagian *transceiver*. Bagian ketiga menampilkan usulan tentang teknik kompensasi awal dari respons saluran transmisi yang dapat membantu kerja *equalizer*. Bagian keempat memberikan contoh hasil simulasi *transceiver* 16-QAM-ADSL. Bagian kelima memberikan kesimpulan tentang hasil yang didapat selama melakukan penelitian.

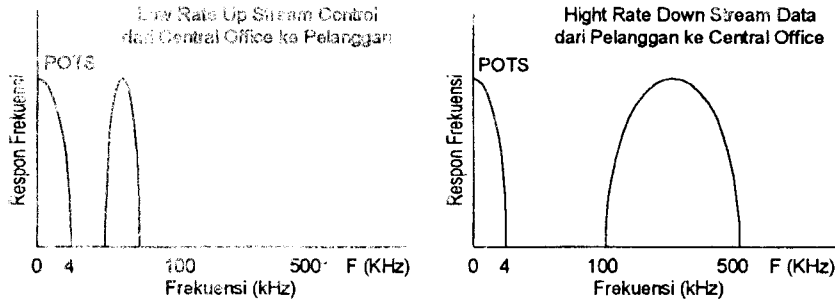
2 Transceiver ADSL

Gambar 1 adalah konfigurasi umum sistem ADSL. Ada dua macam *transceiver* yang digunakan pada sistem ADSL, yaitu pada *central office* dan pada pelanggan. Jalur telepon analog yang lama (*plain old telephone service, POTS*) tetap dapat digunakan dan bekerja bersama-sama dengan sistem ADSL yang dipisahkan dengan menggunakan *splitter*. Kedua macam *transceiver* ini digunakan karena adanya kebutuhan kapasitas transmisi yang berbeda pada sistem ADSL. Perbedaan ini dapat dilihat dari spektrum frekuensi sinyal transmisinya, seperti yang tampak pada Gambar 2.

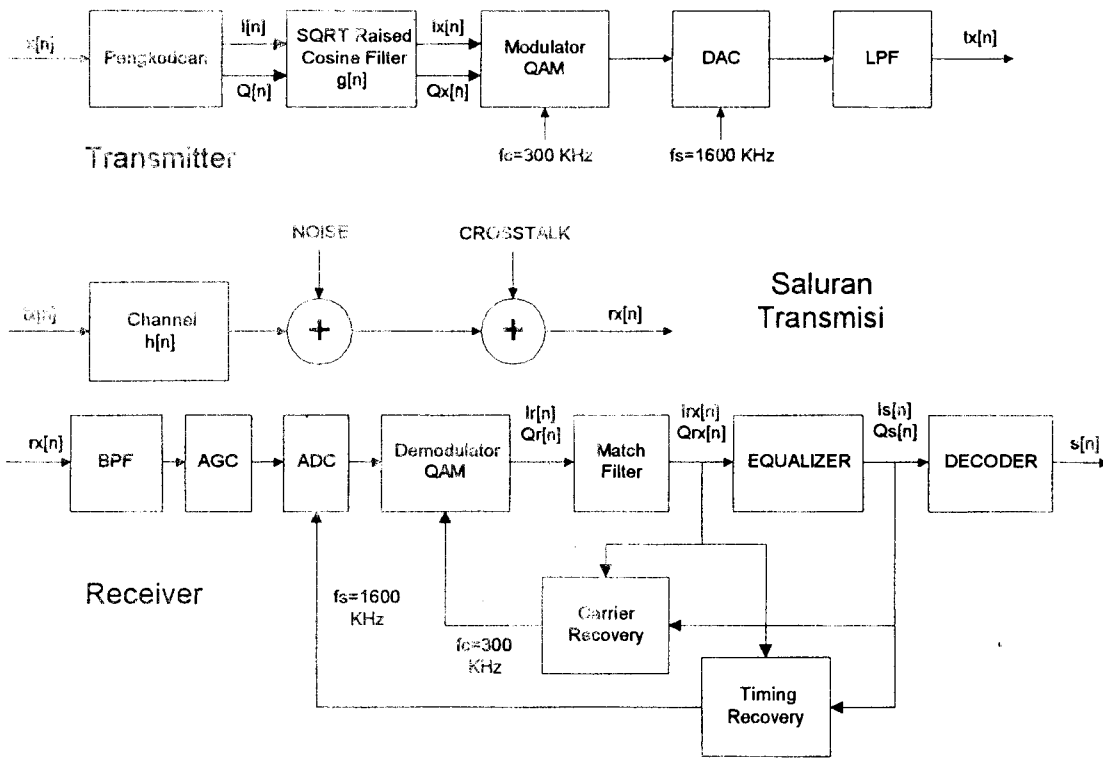
Penelitian mengerjakan *transceiver* untuk keperluan *downstream*, dengan kapasitas sebesar 1,6 Mbps pada saluran telepon 18 k ft (5,5 km) 26 AWG (4,5 mm). Kapasitas ini dapat melingkupi kecepatan T1/DS1, yaitu 1,544 Mbps. Gambar 3 adalah diagram blok *transceiver* ADSL untuk keperluan *downstream*.



Gambar 1 Konfigurasi umum penggunaan transceiver ADSL



Gambar 2 Daerah frekuensi kerja modem ADSL 1.6 Mbps[1]

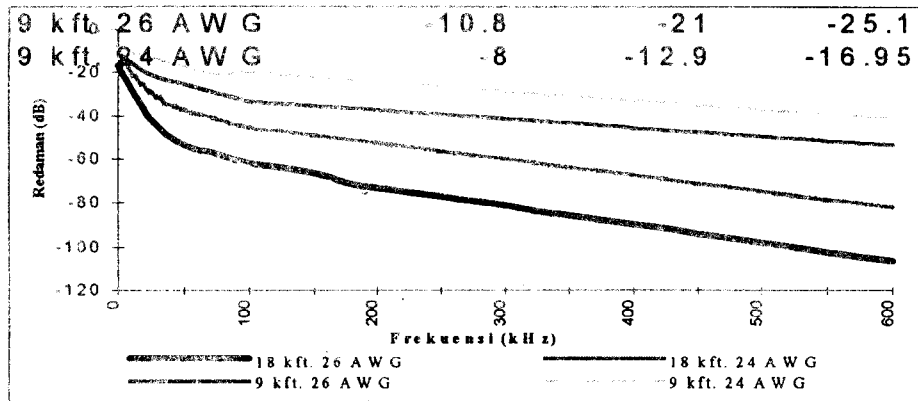


Gambar 3 Diagram blok Transceiver ADSL 1.6 Mbps

Pengkodean digunakan untuk mengubah bit masukan menjadi simbol tertentu. Dalam hal ini digunakan 16-QAM untuk mendapatkan kapasitas 1,6 Mbps pada bandwidth 400 kHz. Sinyal keluarannya dapat dianggap sebagai sinyal kompleks dan disebut simbol ADSL. Kecepatan simbol 400 k simbol/s, dan untuk membatasinya pada 200 kHz (bandwidth 200 kHz cukup mewakili data 400 kbps) digunakan square-root raised-cosine filter (SQRT-RC filter)[6]. Filter SQRT-RC dipilih untuk meniadakan ISI pada tahap ini. Keluaran filter SQRT-RC (Inter-symbol interference) ini disebut sinyal ADSL baseband dan diumpankan ke Modulator QAM dengan frekuensi carrier 300 kHz. Jika sinyal kompleks baseband dinyatakan dengan $A(t)$ dan sinyal carrier $e^{j\omega t}$, maka hasil modulasinya adalah

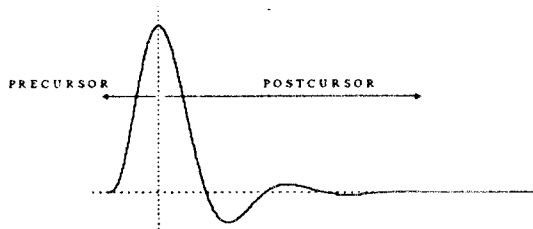
$tx(t) = \text{Re}\{A(t)e^{j\omega t}\}$ [6]. DAC mengubah sinyal digital menjadi sinyal analog pada sampling 1,6 MHz. Keluaran DAC dibatasi spektrum frekuensinya pada 500 kHz[1] dengan filter LPF. Sinyal ini disebut sinyal ADSL passband.

Saluran transmisi berupa sepasang kawat terpilin (twisted-pair) yang digunakan untuk saluran transmisi telepon analog (PSTN) dan memiliki karakteristik tertentu. Respons frekuensi saluran untuk beberapa jenis ukuran atau panjang kawat saluran dapat dilihat pada gambar 4. Untuk keperluan simulasi (18 kft, 26 AWG), karakteristiknya didekati dengan menggunakan filter LPF (butterworth) orde 4 pada frekuensi cut-off 2,5 kHz.



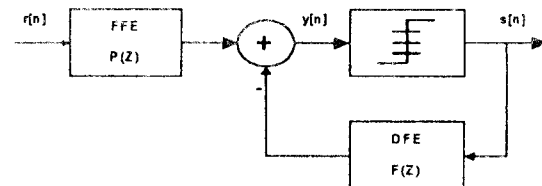
Gambar 4 Karakteristik saluran sepasang kawat telepon [4]

Filter BPF membatasi spektrum *noise* pada 500 kHz dan menghilangkan sinyal suara dari telepon analog (POTS) dan mungkin sinyal ISDN[1]. AGC mengatur kembali sinyal pada level sinyal yang dikehendaki. ADC mengubah sinyal ADSL (analog) menjadi sinyal digital pada setiap waktu sampling tertentu (1,6 MHz). Demodulator bersama-sama dengan filter SQRT-RC digunakan untuk mendapatkan kembali sinyal simbol yang diterima (sinyal ADSL *baseband*). Sinyal simbol yang keluar dari demodulator masih banyak mengandung ISI. Untuk mengatasi adanya ISI, diperlukan *equalizer* yang dapat mengembalikan simbol mendekati bentuk simbol aslinya. ISI (*Inter-Symbol Interference*) adalah perubahan bentuk sinyal simbol karena interferensi simbol-simbol di sebelumnya akibat respons impuls dari suatu sistem (misalnya filter atau saluran transmisi). Gambar 5 mengilustrasikan adanya ISI.



Gambar 5 Respons impuls menyebabkan ISI. Ada dua bagian, *precursor* dan *postcursor*

Secara teknis, *equalizer* ini berusaha menghilangkan pengaruh kecacatan yang disebabkan oleh respons impuls dari saluran. Di sini digunakan *Decision Feedback Equalizer* (DFE). Pada DFE terdapat dua filter, yaitu *Feed Forward Equalizer* (FFE) dan DFE itu sendiri. FFE berfungsi meniadakan *precursor* dan DFE meniadakan *postcursor*. Gambar 6 menunjukkan struktur dasar rangkaian *equalizer* DFE.



Gambar 6 Struktur dasar equalizer DFE

Equalizer dilengkapi dengan algoritma adaptasi yang digunakan untuk memperbarui atau mengubah nilai koefisien *equalizer* agar selalu dapat sesuai dengan karakteristik saluran. Algoritma yang digunakan di sini berdasarkan *least mean square* (LMS). Algoritma LMS secara umum menyatakan bahwa perubahan suatu parameter bergantung pada *negative gradien error* terhadap perubahan parameter tersebut.

$$\Delta K = -\lambda \nabla_K E \quad [6] \tag{1}$$

dengan Δ menyatakan perubahan nilai, K parameter yang akan diubah, λ konstanta perubahan, dan ∇_K operator gradien terhadap K . E didefinisikan sebagai nilai *error* kuadrat rata-rata (*Mean Square Error, MSE*),

$$E = MSE = |e|^2 \quad [6] \tag{2}$$

dengan

$$e(n) = s(n) - \left(\sum_{k=-N_p+1}^0 p_k r(n-k) - \sum_{k=1}^{N_f} f_k s(n-k) \right) \tag{3}$$

$P(Z)$ adalah koefisien filter FFE, dan $F(Z)$ adalah koefisien filter DFE.

$$P(Z) = \sum_{k=-N_p+1}^0 p_k Z^{-k} \quad \text{dan} \quad F(Z) = \sum_{k=1}^{N_f} f_k Z^{-k} \tag{4}$$

maka, setelah mengalami perubahan, koefisien DFE menjadi,

$$f_k(n) = f_x(n-1) - \beta_f e(n) s(n-k)^* \quad [4] \quad (5)$$

sedangkan koefisien filter FFE menjadi

$$p_k(n) = p_k(n-1) + \beta_p e(n) r(n-k)^* \quad [4] \quad (6)$$

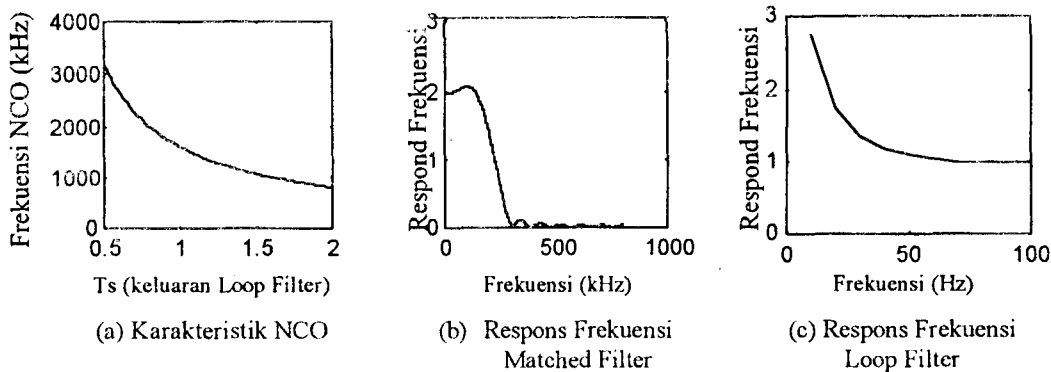
dengan p_k , f_k koefisien FFE dan DFE, β_p , β_f konstanta kecepatan adaptasi.

Gambar 8 adalah blok diagram dari *equalizer* dan *timing recovery* yang digunakan dalam penelitian. Gambar 7 menunjukkan karakteristik rangkaian NCO, *matched filter*, dan *loop filter* yang digunakan dalam rangkaian pada Gambar 8.

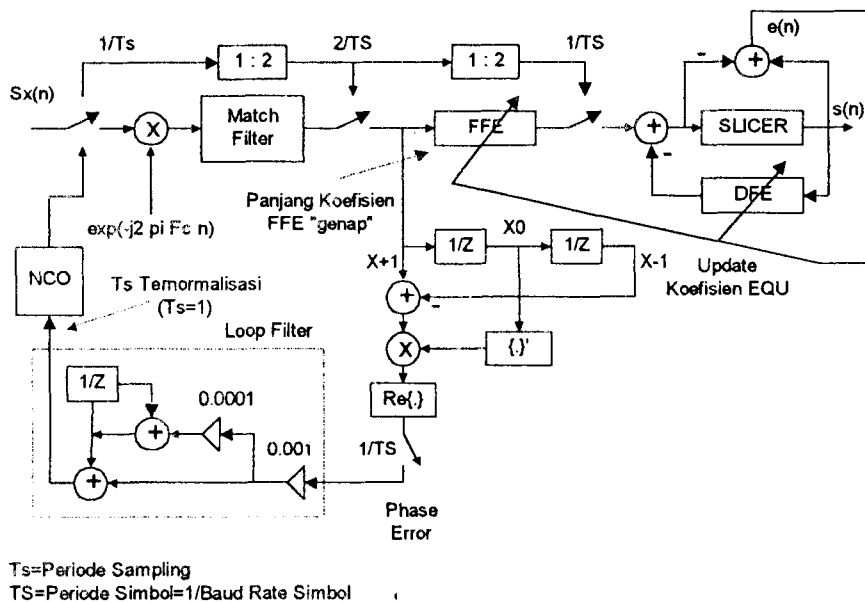
Carrier recovery membangkitkan sinyal *carrier* dengan frekuensi/fasa yang tepat. *Timing recovery* membangkitkan sampling dengan frekuensi/fasa yang tepat. Decoder menterjemahkan simbol keluaran *equalizer* menjadi bit keluaran.

3 Pre-kompensasi respons saluran transmisi

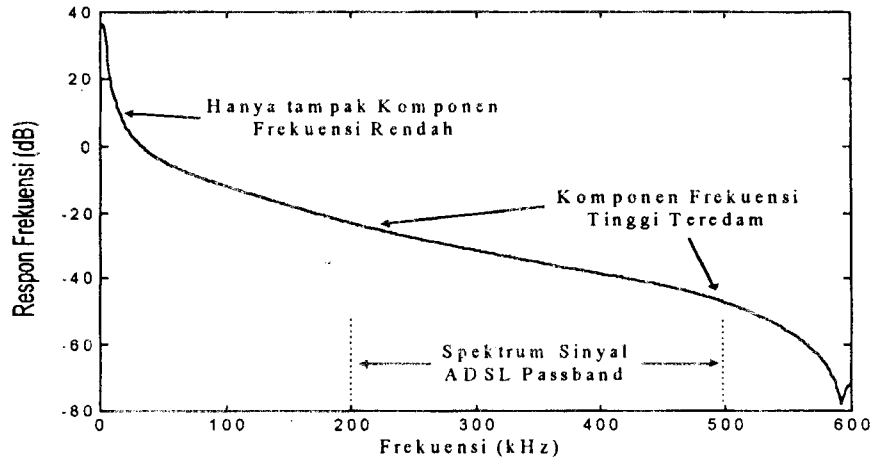
Berdasarkan penelitian, ternyata respons saluran transmisi tidak dapat atau sulit diatasi jika hanya mengandalkan *equalizer*. Selain itu, *equalizer* yang digunakan umumnya sangat kompleks. Sinyal ADSL *passband* yang dipancarkan melalui saluran transmisi (saluran telepon) sangat teredam, terutama komponen frekuensi tinggi. Dengan demikian, sinyal *passband* ADSL yang sampai ke penerima didominasi oleh sinyal frekuensi rendah, sedangkan sinyal frekuensi lebih tinggi hampir-hampir hilang. Gambar 9 adalah respons frekuensi pada tahap setelah AGC (hasil simulasi) yang menunjukkan hanya sinyal dengan frekuensi rendah saja yang tampak.



Gambar 7 Karakteristik NCO, *matched filter* dan *loop filter*

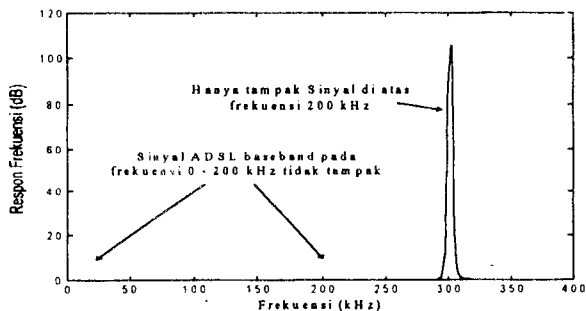


Gambar 8 Diagram blok *timing recovery* dan *equalizer*



Gambar 9 Respons frekuensi setelah AGC. Komponen frekuensi tinggi sangat teredam

Gambar 10 menunjukkan hasil demodulasi, dan sinyal keluaran (sinyal *baseband* ADSL) yang sulit dikenali (banyak mengandung frekuensi lebih besar dari 200 kHz), padahal sinyal *baseband* ADSL dibatasi sampai 200 kHz). Sinyal ini (hampir) tidak bisa dideteksi oleh *carrier/timing recovery*, sehingga *carrier/timing recovery* tidak dapat mengunci pada fasa yang tepat.



Gambar 10 Spektrum sinyal *baseband* ADSL. Keluarnya didominasi sinyal dengan frekuensi di atas frekuensi simbol yang dikehendaki (spektrum simbol sekitar 0-200 kHz)

Ada dua cara yang bisa dilakukan, yaitu meletakkan *equalizer* sebelum demodulasi atau memasang filter HPF yang digunakan untuk kompensasi awal (melakukan sedikit/banyak perbaikan) respons saluran. Pada penelitian ini digunakan kompensasi awal, dengan alasan sebagai berikut.

- Pertama, fungsi HPF bisa dijadikan satu dengan filter BPF yang sudah ada (selain digunakan untuk membatasi spektrum *noise* dan membuang sinyal POTS, filter BPF juga difungsikan sebagai pengkompensasi saluran transmisi).
- Kedua, struktur rangkaian penerima tidak mengalami perubahan.
- Ketiga, dengan memasang BPF sebelum ADC (filter BPF adalah filter analog), sinyal yang masuk ke

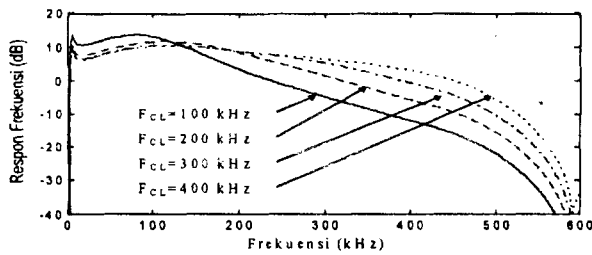
ADC sedikit-banyak sudah diperbaiki. Maksudnya, jika sinyal ADSL *passband* sangat teredam pada komponen frekuensi tinggi, maka sinyal ini tidak akan cukup besar untuk dimasukkan ke ADC (AGC mengatur penguatan sinyal berdasarkan nilai rata-rata, sehingga yang mendapatkan penguatan cukup hanya komponen frekuensi rendah). Karena itu, ADC tidak akan dapat mengkonversi sinyal ADSL ini dengan baik.

- Keempat, seperti diketahui, respons impuls dari saluran relatif panjang, bisa mencapai beberapa ribu sampling, sehingga *equalizer* yang digunakan harus memiliki jumlah koefisien (tap) yang panjang, yang mampu menjangkau hampir sepanjang respons impuls saluran (dibutuhkan setidaknya 100 tap). Dengan menggunakan filter BPF (HPF), respons impuls total dapat diperpendek menjadi sekitar 20 sampai 30.

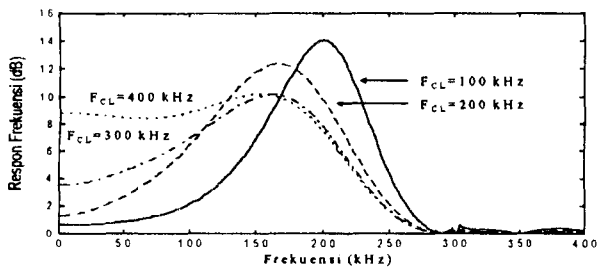
Jika kurang dari itu, harus diketahui respons frekuensi saluran transmisi agar dapat dibuat filter yang sesuai. Tetapi, ini tidak terlalu kritis, karena hanya perlu (sedikit/banyak) memperbaiki respons frekuensi, tanpa perlu menghilangkan seluruh gangguan ISI, sedangkan yang lain akan ditangani *equalizer*. Solusi ini mungkin bukan yang terbaik, namun cukup sederhana untuk mengatasi masalah.

Berikut ini dikemukakan contoh respons sinyal *passband* (setelah AGC) dan *baseband* (setelah demodulator dan filter SQRT-RC) terhadap beberapa filter BPF hasil simulasi selama penelitian. Digunakan BPF *butterworth* orde 3 dengan tiga macam frekuensi *cut-off* rendah (f_{CL}), 100, 200, 300 dan 400 kHz, dan frekuensi *cut-off* atas (f_{CH}) 500 kHz. Parameter tersebut hanya digunakan sebagai contoh untuk menunjukkan pengaruhnya. Dalam pembuatannya nanti dapat disesuaikan dengan kebutuhan.

Gambar 11 dan 12 menunjukkan pemilihan parameter filter mempengaruhi respons hasilnya. Dengan $f_{CL}=100$ atau 200 kHz, komponen frekuensi tinggi (100 sampai 200 kHz) sangat mendominasi (spektrum tidak merata). Ini akan sangat mempersulit mendapatkan kembali simbol-simbol yang diterima. BPF dengan f_{CL} 300 atau 400 kHz dapat diterima, dan komponen frekuensi rendah (sinyal *baseband*) mulai nampak membesar dan memiliki spektrum yang hampir merata. Spektrum ini akan memudahkan untuk mendapatkan kembali simbol-simbol yang diterima.



Gambar 11 Spektrum frekuensi *passband* setelah digunakan BPF orde 3

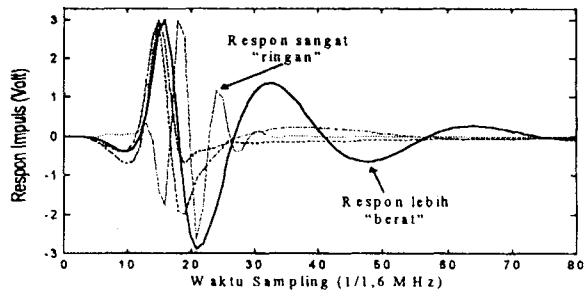


Gambar 12 Spektrum ADSL *baseband* setelah digunakan BPF orde 3

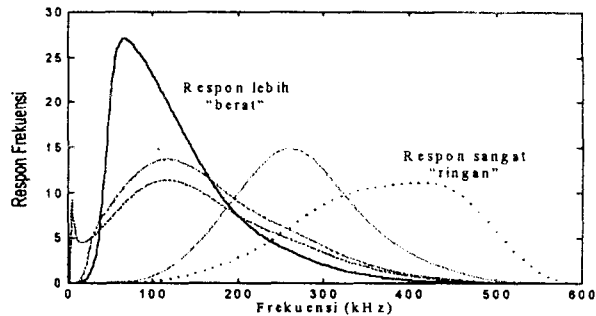
Contoh berikut ini digunakan untuk menguji apakah parameter pre-filter yang dipilih (BPF *butterworth* orde 3, $f_{cl}=300$ kHz dan $f_{ch}=500$ kHz) sesuai untuk beberapa karakteristik saluran transmisi. Pada pengujian digunakan beberapa parameter saluran, mulai dari yang lebih 'berat' dibandingkan dengan yang digunakan sebelumnya, sampai dengan yang lebih 'ringan'. Gambar 13 adalah respons impuls setelah keluar dari AGC. Dari gambar tersebut tampak bahwa panjang respons hanya sekitar beberapa puluh sampai seratusan sampling, sehingga hanya diperlukan *equalizer* dengan panjang koefisien sekitar 20 sampai 30 tap, meskipun dengan berbagai karakteristik saluran yang berbeda.

Gambar 14 dan 15 menunjukkan respons frekuensi setelah AGC dan demodulator. Dari hasil-hasil di atas, dengan memilih parameter BPF yang 'tepat', kita dapat mengatasi beberapa jenis karakteristik saluran transmisi yang berbeda. Penentuan ini memang tidak dapat dihindari mengingat nanti *transceiver* ADSL ini digunakan pada saluran transmisi dengan panjang yang

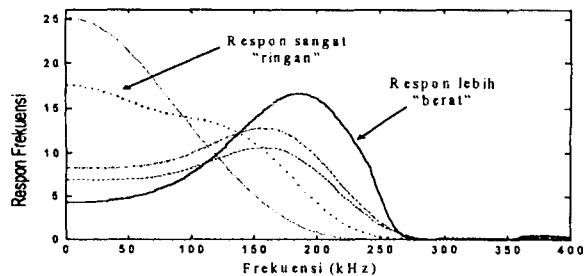
bervariasi, bisa dari beberapa ratus meter sampai beberapa (maksimal $\pm 5,5$) kilo meter[1].



Gambar 13 Respons impuls setelah AGC pada beberapa karakteristik saluran. Penggunaan BPF dapat memperpendek panjang respons impuls saluran transmisi.



Gambar 14 Respons frekuensi setelah AGC untuk beberapa karakteristik saluran. Karakteristik dengan respons yang lebih 'berat' belum mampu dikompensasi oleh BPF, sehingga dapat menggunakan BPF lain dengan karakteristik yang sesuai.



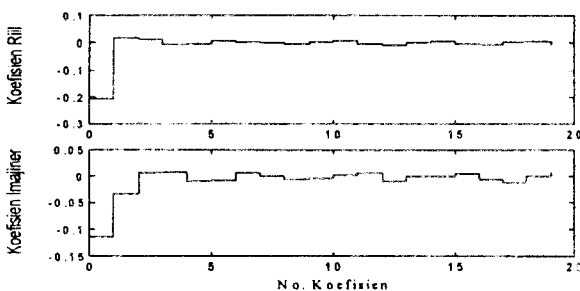
Gambar 15 Respons frekuensi keluaran dari demodulator pada beberapa karakteristik saluran. Ada satu karakteristik saluran yang belum dapat dikompensasi BPF.

4 Simulasi

Beberapa nilai parameter dari masing-masing bagian *transceiver* telah diuji coba, misalnya dengan mengubah-ubah frekuensi *carrier*, parameter *loop-filter*, dan lainnya. Hasil simulasi ditampilkan berikut dengan memilih parameter tertentu dengan spesifikasi sebagai berikut,

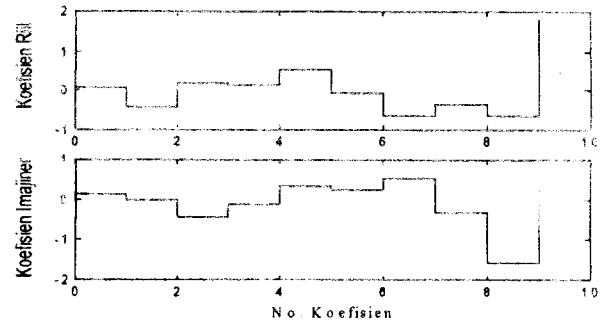
- Frekuensi Sampling 1,6 MHz
- Frekuensi Carrier 300 kHz
- Konstelasi 16-QAM (4-QAM untuk pelatihan pertama dilanjutkan dengan 16-QAM)
- Alphabet {00 01 10 11} \rightarrow {-3, -1, 1, 3}
- Filter Square-root Raised-cosine: Panjang 17 tap, $T=4$, $\alpha=0,377$
- Low Pass Filter (LPF): Filter RC orde 1 dengan f_c 500 kHz
- Simulasi saluran transmisi: Filter LPF polinomial Butterworth orde 4 dengan frekuensi *cut-off* 2,5 kHz
- Band Pass Filter (BPF): Polinomial Butterworth orde 3 dengan frekuensi *cut-off* bawah (f_{CL}) 300 kHz dan frekuensi *cut-off* atas (f_{CH}) 500 kHz
- Automatic Gain Control (AGC): Penguatan $\approx 4e8$, keluaran ± 3 volt puncak
- Matched-Filter: Sama dengan filter SQRT-RC
- Pre-Filter Detektor Fasa: Filter FIR panjang koefisien 9 tap, f_c 100 kHz
- Fractionally-Spaced Equalizer (FSE): Panjang 10 tap, $\beta=1e-4$
- Decision-Feedback Equalizer (DFE): Panjang 20 tap, $\beta=5e-5$

Setelah 300.000 sampling (0,1875 detik, *equalizer* dan *carrier/timing recovery* sudah beradaptasi dengan baik), akan didapatkan hasil seperti pada Gambar 16 dan 17. Jika *equalizer* dapat beradaptasi dengan baik, nilai koefisiennya akan mirip dengan respons impuls saluran transmisi yang dikompensasi.

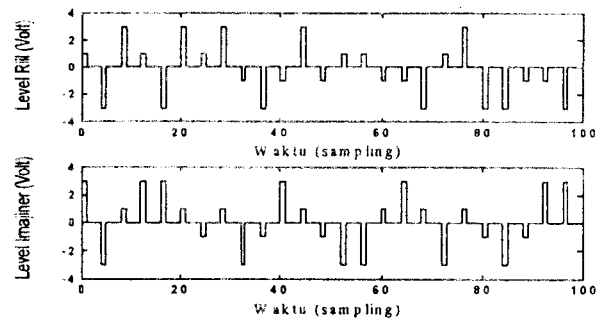


Gambar 16 Koefisien filter DFE (nilai real dan imajiner)

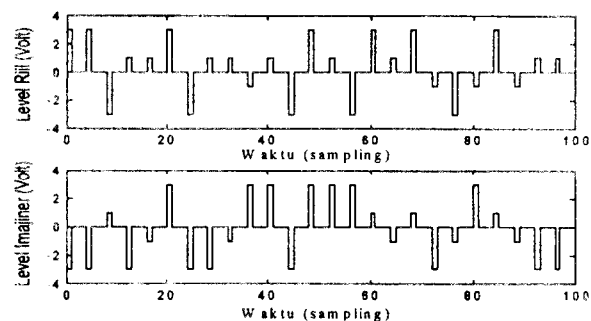
Berikut ini dikemukakan contoh simbol kompleks yang dikirimkan (Gambar 18) dan simbol kompleks yang diterima atau keluaran dari *equalizer* (Gambar 19).



Gambar 17 Koefisien filter FSE (nilai real dan imajiner)

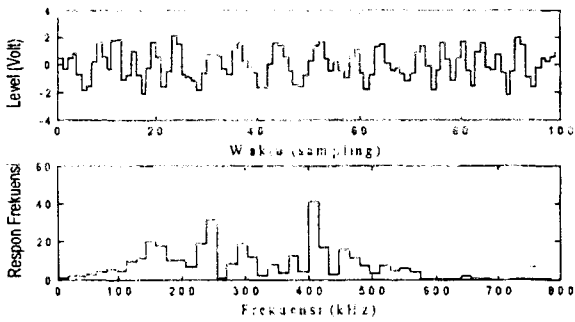


Gambar 18 Simbol digital yang dikirimkan (real dan imajiner)



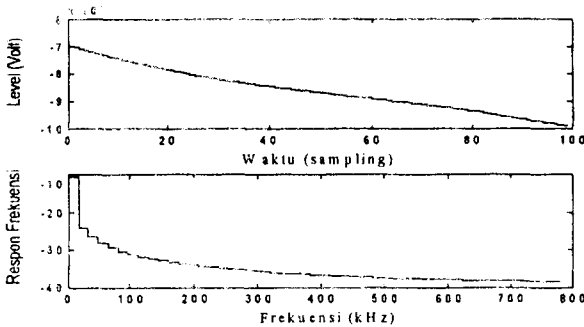
Gambar 19 Simbol keluaran *equalizer* (real dan imajiner)

Dari Gambar 18 dan 19 dapat dilihat terjadi pergeseran sejauh 40 sampling, yang disebabkan oleh penundaan pada filter SQRT-RC (8 sampling), filter LPF + saluran transmisi + filter BPF (6 sampling), *matched-filter* (8 sampling), FSE (18 sampling). Gambar 20 adalah hasil modulasi dengan *carrier* 300 kHz. Spektrum frekuensinya berkisar 100–500 kHz.



Gambar 20 Sinyal ADSL *passband* (hasil modulasi) dan spektrumnya

Setelah sinyal ADSL *passband* diubah ke analog menggunakan DAC, difilter dengan LPF dan dikirimkan melalui saluran transmisi, sinyal dengan komponen frekuensi tinggi tidak tampak sama sekali (Gambar 21.a). Terlihat juga dari spektrum frekuensinya (Gambar 21.b) bahwa sinyal didominasi oleh komponen frekuensi di bawah 10 kHz. Sinyal ini sama sekali tidak dapat digunakan lebih lanjut tanpa melalui proses kompensasi awal.

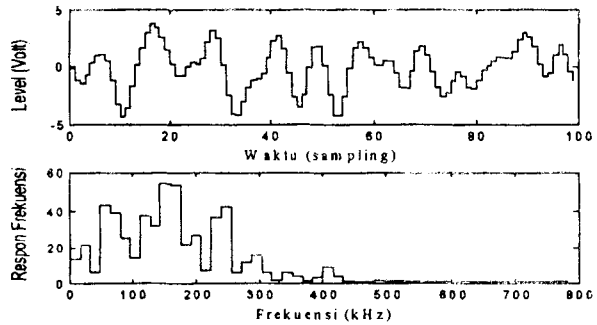


Gambar 21 Sinyal ADSL *passband* keluaran saluran transmisi dan spektrumnya

Dengan digunakannya BPF (sebagai kompensasi awal, filter *noise*, sinyal POTS dan ISDN) yang memiliki frekuensi *cut-off* tertentu, sinyal dengan komponen frekuensi yang lebih tinggi (sinyal ADSL *passband*) dapat ditampilkan lagi (Gambar 22).

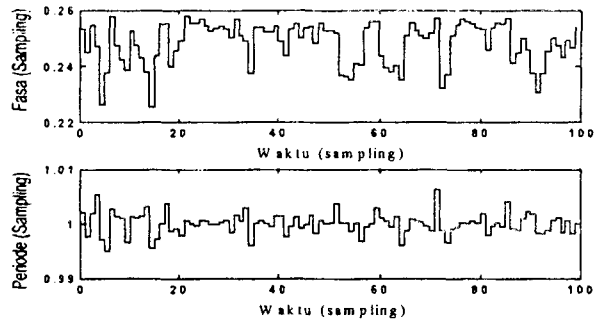
Dilihat dari spektrum frekuensinya, spektrum sinyal ADSL *passband* masih belum kembali seperti semula (Gambar 20, ini memang tidak diperlukan; yang penting, komponen frekuensi dari sinyal ADSL dapat ditampilkan semua). Perbaikan akhir akan dilakukan oleh *equalizer*. Setelah didemodulasi dan difilter, akan didapatkan sinyal ADSL *baseband* (masih banyak mengandung ISI). Sinyal ADSL *baseband* tersebut dimanfaatkan untuk mendapatkan informasi fasa bagi keperluan *carrier/timing recovery*. Setelah sinyal *baseband* disampling pada 2 kali kecepatan simbol, sinyal diumpukan ke FSE untuk menghilangkan atau memperkecil *precursor* ISI. Keluaran FSE disampling lagi pada periode simbol dan dimasukkan ke DFE.

Keluaran dari *equalizer* berupa simbol kompleks (Gambar 19) yang sama dengan simbol yang dikirimkan (Gambar 18) dengan pergeseran waktu tertentu



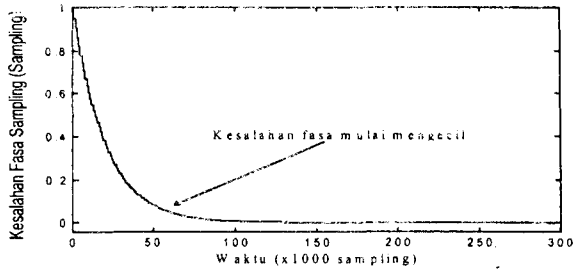
Gambar 22 Sinyal keluaran ADC (setelah BPF, AGC dan ADC) dan spektrumnya

Gambar 23 menunjukkan perubahan fasa dan periode sampling, dengan puncak-puncak perubahan fasa sekitar 0,04 periode sampling. Atau, jika perbedaan 1 sampling = 360° , maka perubahannya sekitar $14,4^\circ$. Jika dihitung sebagai perbedaan fasa sinyal *carrier*, perbedaannya sekitar $0,04 \times 360^\circ \times 300 \text{ kHz} / 1600 \text{ kHz} = 2,7^\circ$. Nilai ini relatif kecil dibandingkan dengan perbedaan fasa terkecil antarsymbol pada titik-titik konstelasi yang sekitar $18,4349^\circ$. Demikian juga dengan perubahan periodenya, hanya sekitar 0,01 sampling atau 1 % sampling atau $0,01 \times 300 \text{ kHz} / 1600 \text{ kHz} = 0,0019$ (0,19 %) periode sinyal *carrier*.



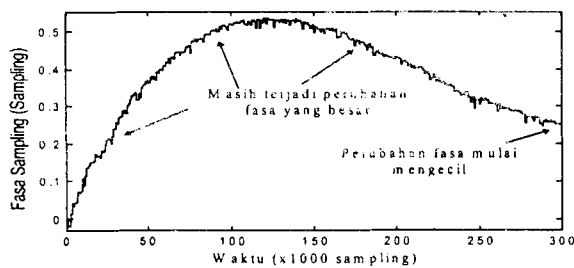
Gambar 23 Fasa dan periode sinyal sampling

Sebagai pelengkap, berikut ini akan ditampilkan grafik hasil perekaman beberapa nilai selama proses adaptasi atau pelatihan dari penerima ADSL. Gambar 24 merekam besarnya kesalahan fasa sampling rata-rata yang terjadi mulai dari awal; pada 50.000 sampling pertama masih terjadi kesalahan fasa yang cukup besar, sampai akhirnya mengecil dan mendekati nol.



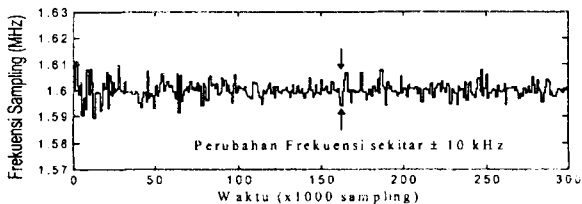
Gambar 24 Kesalahan fasa sinyal carrier

Gambar 25 menunjukkan perubahan fasa sinyal sampling. Setelah 300.000 sampling (0,1875 detik), fasa sampling mencapai titik sekitar 0,25 sampling (90°).



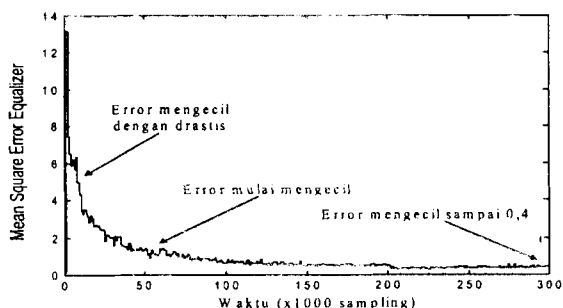
Gambar 25 Fasa sinyal sampling

Gambar 26 menunjukkan perubahan frekuensi sampling sejak awal, yang tidak terlalu mencolok (frekuensi sampling relatif stabil pada nilai 1,6 MHz). Perubahan frekuensinya sekitar ± 10 kHz.



Gambar 26 Frekuensi sinyal sampling

Gambar 27 mencatat perubahan rata-rata kuadrat kesalahan (*mean square error, MSE*) pada equalizer. Sampai sampling ke 50.000 error menurun dengan cepat sampai akhirnya pada sampling lebih besar dari 50.000 turun secara perlahan. Hasil akhirnya tercatat sekitar 0,4.



Gambar 27 Kesalahan adaptasi equalizer

5 Kesimpulan

- Sistem ADSL menggunakan saluran transmisi dari jaringan PSTN (semula digunakan untuk transmisi sinyal suara, spektrum 300–3400 Hz). QAM-ADSL 1,6 Mbps menggunakan daerah frekuensi 100–500 kHz. Karena itu, sinyal ADSL yang dikirimkan akan sangat teredam.
- Equalizer berperan penting dalam beberapa sistem modulasi untuk ADSL, guna meniadakan pengaruh karakteristik saluran. Dengan tambahan pre-kompensasi, kompleksitas equalizer dapat ditekan.
- Sebelum digunakan pre-kompensasi panjang, koefisien DFE dalam sistem ADSL dapat mencapai 100 tap, dan dengan menggunakan pre-kompensasi, panjang koefisien DFE dapat ditekan sampai sekitar 20 tap.
- Hasil akhir perancangan transceiver ADSL ini adalah:
 - Setelah 300.000 sampling (0,1875 detik), kesalahan fasa sampling menjadi sekitar $\pm 7,2^\circ$ atau fasa carrier menjadi sekitar $\pm 1,35^\circ$. Perubahan frekuensi sampling sekitar ± 10 kHz.
 - Equalizer mulai dapat beradaptasi dengan baik setelah 50.000–100.000 sampling (0,03125–0,0625 detik).
 - Transceiver dapat mulai mengirimkan data setelah pelatihan sekitar 0,25–0,5 detik.

6 Daftar pustaka

1. Hsing, T. R., *Video Communications and Services in the Copper Loop*, IEEE Communication Magazine, January 1993.
2. Hawley, G. T., *System Considerations for the Use of xDSL Technology for Data Access*, IEEE Communications Magazine, March 1997.
3. Tarbuck, D., *ADSL: Asynchronous Digital Subscriber Line Digital Communication for the future*, www.futurewest.ca, 1997.
4. Daneshrad, B. and H. Samueli, *A 1.6 Mbps Digital-QAM System for DSL Transmission*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13, no 9, December 1993.
5. Rosner, M., *Carrierless Amplitude/Phase Modulation*, BUGSWP~1.EDU\ EE535\HWK97\HWK3CD97\MROSNER\MROSNE~1.HTM, 1997.
6. Lee, E. A., *Digital Communications -Second Edition-*, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1994.

7. Cespro, P. M. and M. L. Honig, *Pole-Zero Decision Feedback Equalization with a Rapidly Converging Adaptive IIR Algorithm*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 9, no 6, August 1991.
8. DeFatta, D. J., Joseph G. Lucas dan Willian S. Hodgkiss, *Digital Signal Processing: A System Design Approach*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1988.