


“Saya/kami akui bahawa saya telah membaca karya ini pada pandangan saya/kami karya ini adalah memadai dari skop dan kualiti untuk tujuan penganugerahan Ijazah Sarjana Muda Kejuruteraan Elektronik ( Elektronik Industri )”

Tandatangan :   
Nama Penyelia : En. Muhammad Syahrir Bin Johal  
Tarikh : 1/4/2005

SIMULASI SALURAN PERHUBUNGAN PENERIMAAN DIGITAL BAGI  
ISYARAT FREKUENSI PERTENGAHAN (INTERMEDIATE FREQUENCY, IF)  
DALAM SALURAN TANPA HINGAR DAN BERHINGAR.

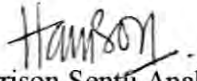
HARRISON SENTU ANAK KELON

Laporan projek ini dikemukakan sebagai memenuhi sebahagian daripada syarat  
penganugerahan ijazah Sarjana Muda kejuruteraan Elektronik (Elektronik industri)

Fakulti Kejuruteraan Elektronik Dan Kejuruteraan Komputer  
Kolej Universiti Teknikal Kebangsaan Malaysia (KUTKM)

MAC 2005

“ Saya akui laporan ini adalah hasil kerja saya sendiri kecuali ringkasan dan petikan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan sumbernya “.

Tandatangan :   
Nama penulis : Harrison Sentu Anak Kelon  
Tarikh : 1 APRIL 2005

Teristemewa buat ...  
Keluarga tersayang,  
Bapa, En. Kelon Anak Geri  
Mak, Pn. Tani Anak Melina  
Adik-adik,  
Stefanie Anak Kelon  
Hamilton Anak Kelon  
Hertman Clinton Anak Kelon  
Serta...  
Cik Dora Jau  
Cik Adeline Anak Engkamat (UTM Skudai)  
Terima kasih di atas dorongan, sokongan, bantuan dan pengorbanan kalian...

## PENGHARGAAN

Salam sejahtera, salam ceria dan salam perpaduan. Bersyukur kepada Tuhan kerana dengan berkat dan Izin-Nya, Projek Sarjana Muda telah berjaya disiapkan selaras dengan objektif yang telah ditetapkan.

Pertama sekali, dirakamkan setinggi-tinggi penghargaan dan jutaan terima kasih kepada penyelia projek, En. Muhammad Syahrir bin Johal, di atas segala perhatian, tunjuk ajar dan bimbingan yang tidak pernah kenal erti jemu sepanjang pembabitan saya dalam menyiapkan projek ini.

Tidak lupa juga buat keluarga saya, kenalan, rakan serta sahabat yang terlibat secara langsung atau tidak langsung membantu dalam mencari sumber projek, membentuk inspirasi dan galakan agar terus berusaha mengharungi segala cabaran.

Terima kasih juga atas doa-doa rakan sepelayanan kerana memberi dorongan serta kata nasihat sepanjang projek ini dilakukan.

Harrison Sentu Anak Kelon

Mac 2005

## ABSTRAK

Projek ini terdiri daripada program MATLAB yang dibina berdasarkan simulasi saluran perhubungan penerimaan digital bagi isyarat frekuensi pertengahan (IF) dalam saluran tanpa hingar dan berhingar. Objektif utama projek ini adalah untuk merekacipta dan membuat simulasi penerimaan digital bagi isyarat frekuensi pertengahan bagi sistem *Digital Audio Broadcasting* (DAB). Disamping itu, tujuan projek adalah untuk menganalisis prestasi penerimaan digital isyarat IF dalam saluran tanpa hingar dan berhingar. Projek ini terdiri daripada 5 peringkat utama iaitu simulasi terhadap sistem penerimaan, simulasi terhadap sistem hingar, pelaksanaan teknik pengekodan saluran, penjanaan semula pengekodan dan analisis isyarat keluaran. Projek ini termasuk simulasi penukaran isyarat analog ke isyarat digital (ADC) dan dari isyarat digital ke isyarat analog (DAC) dan simulasi terhadap sistem penapisan isyarat. Projek ini dibina untuk menganalisis keluaran bagi isyarat frekuensi pertengahan yang diterima sama dengan isyarat pemancaran.

## ABSTRACT

The project undertaken is a set of MATLAB programs designed according to the simulated digital receiver channel for intermediate frequency (IF) signal in noisy and noiseless channel. The main objective of the project is to create and to simulate digital receiver for intermediate frequency (IF) in DAB system. Besides that, the objective is also to analyse the performance of digital receiver IF signal in noisy channel and noiseless channel. The project proceeds in 5 major steps which includes the simulation of the receiver system, the simulation of the noise system, the implementation of coding technique, regeneration of coding technique and analysis of intermediate frequency signal output. The project, therefore, includes simulation of signal converters (DAC and ADC) and the simulation of the filtering process. The project is developed to compare and analyse the output and input IF.

## ISI KANDUNGAN

| <b>BAB</b> | <b>PERKARA</b>             | <b>HALAMAN</b> |
|------------|----------------------------|----------------|
|            | <b>PENGESAHAN PENYELIA</b> |                |
|            | <b>TAJUK PROJEK</b>        | i              |
|            | <b>PERAKUAN</b>            | ii             |
|            | <b>DEDIKASI</b>            | iii            |
|            | <b>PENGHARGAAN</b>         | iv             |
|            | <b>ABSTRAK</b>             | v              |
|            | <b>ABSTRACT</b>            | vi             |
|            | <b>ISI KANDUNGAN</b>       | vii - ix       |
|            | <b>SENARAI GAMBARAJAH</b>  | x              |
|            | <b>SENARAI GRAF</b>        | xi             |
|            | <b>SENARAI SINGKATAN</b>   | xii            |
|            | <b>SENARAI RUMUS</b>       | xiii           |
| <b>I</b>   | <b>Pengenalan.</b>         |                |
|            | <b>1.1 Latar Belakang</b>  | 1-2            |
|            | <b>1.2 Objektif</b>        | 2              |
|            | <b>1.3 Metodologi</b>      | 2-3            |
|            | <b>1.4 Skop</b>            | 3-4            |



|            |   |       |
|------------|---|-------|
| <b>II</b>  | <b>KAJIAN LITERATUR.</b>  |       |
| 2.1        | Isyarat Masukan, Isyarat Frekuensi Pertengahan (IF).                | 5-6   |
| 2.2        | Penapis.  | 6     |
| 2.3        | Hingar.   | 7-8   |
| 2.4        | Penukar.  | 8-9   |
|            | 2.4.1 Pengkuantuman dan Pendigitan.                                 | 10-11 |
|            | 2.4.2 Persampelan.  | 11-12 |
| <b>III</b> | <b>LITAR SIMULASI.</b>  |       |
| 3.1        | Penerangan litar sistem tanpa kehadiran isyarat<br>hingar.          | 13-15 |
|            | 3.1.1 Bahagian masukan.   | 15    |
|            | 3.1.2 Bahagian Penukar Analog ke Digital (ADC).                     | 15-16 |
|            | 3.1.3 Bahagian Penukar Digital ke Analog (DAC).                     | 16-17 |
| 3.2        | Penerangan litar sistem dengan kehadiran isyarat<br>hingar.         | 17-18 |
|            | 3.2.1 Bahagian hingar.  | 18    |
| <b>IV</b>  | <b>METODOLOGI PROJEK.</b>   |       |
| 4.1        | Kajian literatur.   | 19-20 |
| 4.2        | Belajar latarbelakang <i>Digital Audio<br/>Broadcasting (DAB)</i> . | 20    |
| 4.3        | Merekabentuk dan membuat simulasi litar.                            | 20-21 |
| <b>V</b>   | <b>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</b>                                   |       |
| 5.1        | Pengenalan.   | 22    |
| 5.2        | Analisa sistem tanpa kehadiran hingar.                              | 22    |
|            | 5.2.1 Analisa isyarat masukan pada penjana<br>isyarat.              | 23    |
|            | 5.2.2 Analisa isyarat keluaran pada blok<br>persampelan.            | 24    |
|            | 5.2.3 Analisa isyarat keluaran pada blok                            |       |

|              |   |              |
|--------------|---|--------------|
|              | <b>pengkuantuman dan pendigitan.</b>                                    | <b>25-26</b> |
| <b>5.2.4</b> | <b>Analisa isyarat keluaran pada komponen DAC.</b>                      | <b>26-27</b> |
| <b>5.2.5</b> | <b>Masalah yang timbul.</b>   | <b>27</b>    |
| <b>5.3</b>   | <b>Analisa sistem dengan kehadiran hingar.</b>                          | <b>27-28</b> |
| <b>5.3.1</b> | <b>Analisa isyarat hingar dan isyarat masukan.</b>                      | <b>28-29</b> |
| <b>5.3.2</b> | <b>Analisa isyarat keluaran dari pencampur.</b>                         | <b>29</b>    |
| <b>5.3.3</b> | <b>Analisa isyarat pada komponen persampelan.</b>                       | <b>30</b>    |
| <b>5.3.4</b> | <b>Analisa isyarat keluaran pada blok pengkuantuman dan pendigitan.</b> | <b>30-31</b> |
| <b>5.3.5</b> | <b>Analisa isyarat keluaran pada komponen DAC.</b>                      | <b>32</b>    |
| <b>VI</b>    | <b>RUMUSAN DAN CADANGAN.</b>  | <b>33-34</b> |
|              | <b>RUJUKAN</b>  | <b>35</b>    |

**SENARAI GAMBARAJAH**

| <b>NO.</b> | <b>TAJUK</b>  | <b>HALAMAN</b> |
|------------|---|----------------|
| 2.1        | <b>Penukar Analog ke digital.</b>   | 9              |
| 2.2        | <b>Penukar Digital ke Analog.</b>   | 9              |
| 2.3        | <b>Pengkuantuman <math>x</math> menggunakan <math>Q(x) = \text{lantai}(Lx)/L</math></b> | 10             |
| 3.1        | <b>Litar sistem tanpa kehadiran isyarat hingar.</b>                                     | 14             |
| 3.2        | <b>Litar isyarat masukan.</b>   | 15             |
| 3.3        | <b>Litar Penukar ADC.</b>   | 16             |
| 3.4        | <b>Litar Penukar DAC.</b>   | 17             |
| 3.5        | <b>Litar sistem dengan kehadiran isyarat hingar.</b>                                    | 18             |

**SENARAI GRAF**

| <b>NO.</b> | <b>TAJUK</b>  | <b>HALAMAN</b> |
|------------|---|----------------|
| 5.1        | Isyarat masukan IF.                                   | 23             |
| 5.2        | Isyarat keluaran pada blok persampelan.               | 24             |
| 5.3        | Isyarat keluaran pada blok pengkuantuman.             | 25             |
| 5.4        | Isyarat keluaran pada blok pendigitan.                | 25             |
| 5.5        | Isyarat keluaran dari DAC.                            | 26             |
| 5.6        | Isyarat yang dihasilkan oleh penjana hingar Gaussian. | 28             |
| 5.7        | Isyarat keluaran dari pencampur.                      | 29             |
| 5.8        | Isyarat yang telah disampel.                          | 30             |
| 5.9        | Isyarat keluaran dari komponen pengkuantuman.         | 31             |
| 5.10       | Isyarat keluaran dari komponen pendigitan.            | 31             |
| 5.11       | Isyarat keluaran dari komponen DAC.                   | 32             |

## SENARAI SINGKATAN

- ADC** - Analog Digital Converter
- DAC** - Digital Analog Converter
- IF** - Intermediate Frequency
- DAB** - Digital Audio Broadcasting
- FM** - Frequency Modulation

**SENARAI RUMUS**

| <b>RUMUS</b> | <b>TAJUK</b>                           | <b>HALAMAN</b> |
|--------------|--|----------------|
| 2.1          | Isyarat rawak.                         | 7              |
| 2.2          | Pengamiran isyarat.                    | 7              |
| 2.3          | Kebarangkalian nilai $x < x_0$ .       | 7              |
| 2.4          | Kebarangkalian isyarat hangar $n(t)$ . | 8              |
| 2.5          | Purata nilai rawak $x$ .               | 8              |
| 2.6          | Varian.                                | 8              |
| 2.7          | Asas pengkuantuman.                    | 10             |
| 2.8          | Pengkuantuman audio komputer.          | 10             |
| 2.9          | Nisbah isyarat kepada hingar.          | 11             |

# BAB I

## PENGENALAN

### 1.1 LATAR BELAKANG.

Keseluruhan projek ini adalah berdasarkan simulasi saluran perhubungan penerimaan digital bagi isyarat frekuensi pertengahan (IF) dalam saluran tanpa hingar dan berhingar. Frekuensi pertengahan merangkumi frekuensi diantara 0.3MHz hingga 3MHz di mana ia diaplikasikan dalam frekuensi radio dan juga radio bergerak.

Dalam sistem asas sesuatu sistem perhubungan, pemprosesan isyarat amat meluas digunakan. Di antara konsep atau asas pemprosesan isyarat ialah analisis Fourier, persampelan, pendigitan dan sebagainya.

Di dalam projek yang dibangunkan ini, pemprosesan isyarat melibatkan isyarat analog dan isyarat digital. Di samping itu juga, masukan isyarat hingar dilakukan bagi memberi ralat kepada sistem tersebut. Ia bertujuan untuk mengaplikasi keadaan persekitaran yang boleh mempengaruhi gelombang isyarat dan juga menguji kepersisan sistem yang dibangunkan. Penapis analog digunakan untuk menapis isyarat masukan dan menapis isyarat analog yang tidak diperlukan. Penapis digital digunakan untuk menapis isyarat digital yang telah ditukar dan menapis

isyarat yang tidak dikehendaki. Penapis digital memberikan kelebihan dari segi tahap prestasi dan dan kebolehlenturan.

Pelbagai langkah diambil bagi meningkatkan prestasi sesuatu sistem perhubungan. Dengan itu, teknik seperti pengekodan dan sebagainya diperkenalkan bertujuan untuk pengawalan ralat dan juga prestasi keluaran sistem. Untuk itu simulasi terhadap saluran perhubungan tersebut adalah perlu untuk menguji dan menaksir ralat yang berlaku dengan tujuan untuk meningkatkan prestasi sistem perhubungan.

## 1.2 OBJEKTIF.

Simulasi projek ini bertujuan untuk menganalisis prestasi keluaran saluran perhubungan dengan kesan kehadiran hingar dan tanpa hingar di dalam sistem DAB menggunakan MATLAB.

Objektif projek ini adalah untuk merekacipta dan membuat simulasi penerimaan digital bagi isyarat frekuensi pertengahan bagi sistem *Digital Audio Broadcasting* (DAB). Diharapkan model simulasi blok ini dapat membuat perbandingan prestasi antara sistem penapis yang sedia ada dan juga keluaran bunyi yang diterima adalah sama dengan gelombang yang dipancarkan.

## 1.3 METODOLOGI.

Pelaksanaan projek ini terbahagi kepada tiga bahagian. Bahagian pertama adalah meliputi pencarian sumber artikel dan bahan. Kajian literatur termasuklah



pencarian bahan daripada buku rujukan, kertas IEEE, majalah, jurnal dan halaman internet.

Bahagian kedua adalah proses membina struktur gambarajah blok. Subprogram direka untuk menjana isyarat masukan, membina sistem penapis bertujuan untuk menapis gelombang masukan dan merekabentuk sistem penukaran isyarat analog ke digital dan digital ke analog. Subprogram juga direka untuk menjana isyarat hingar yang memberi kesan kepada isyarat penghantaran.

Bahagian yang terakhir merangkumi keputusan yang terhasil daripada pengujian bagi setiap blok pengujian sistem perhubungan. Ini akan dilakukan berulang kali untuk mendapatkan prestasi sistem yang terbaik dengan kadar ralat yang paling rendah.

#### **1.4 SKOP**

Projek ini memfokus kepada merekabentuk sistem perhubungan isyarat IF dan pelaksanaannya yang merangkumi sistem perhubungan asas dan saluran hingar. Secara asasnya diketahui bahawa hingar yang hadir adalah penjana hingar Gaussian.

Kita beranggapan bahawa isyarat masukan adalah isyarat frekuensi pertengahan, IF. Terdapat beberapa bentuk isyarat analisa yang digunakan iaitu isyarat rupa sain, isyarat bit-bit binari, isyarat jenis mata gergaji dan isyarat rawak.

Terdapat dua blok asas yang dianalisis iaitu blok tanpa masukan isyarat hingar dan blok yang dimasukkan dengan isyarat hingar. Pada mulanya, ia akan menganalisis prestasi kadar ralat bagi penghantaran isyarat IF iaitu penghantaran tanpa hingar untuk dibandingkan dengan penghantaran isyarat dengan menambah isyarat hingar dalam blok.

Blok penapis akan digunakan untuk menapis keluar isyarat yang berfrekuensi tinggi dan tidak dikehendaki oleh sistem penapis sebelum dilalukan ke dalam dan ke luar sistem dan diubah suai dalam bentuk digital atau analog.

Penukaran isyarat analog ke digital(ADC) dan digital ke analog(DAC) akan digunakan bagi menukar isyarat yang bersesuaian dengan sistem penerima. Isyarat analog yang dipancarkan akan dilalukan ke struktur penapis dan ditukarkan kepada isyarat digital oleh ADC dalam sistem. Setelah itu, isyarat yang ditukar tadi akan ditapis oleh penapis digital sebelum ditukar semula kepada isyarat asal. Setelah proses penukaran selesai, isyarat tersebut akan disalurkan kepada pengguna sebagai isyarat audio.

Perisian MATLAB digunakan untuk menganalisis isyarat masukan dan isyarat keluaran suatu sistem sebelum direkapi binaan yang kompleks. Ia juga bertujuan untuk mengenalpasti sama ada keadaan sambutan frekuensi dan kebolehan proses data isyarat yang dihantar adalah sama dengan pengeluaran selepas pemprosesan isyarat.

## BAB II

### KAJIAN LITERATUR

Kajian literatur dibuat adalah bertujuan untuk mempelajari sebanyak mungkin keperluan dan operasi projek, tentang sistem simulasi perhubungan tersebut, komponen-komponen elektronik yang digunakan, masalah sistem projek dan cara penyelesaiannya.

#### 2.1 ISYARAT MASUKAN, IF

Tujuan sistem perhubungan adalah untuk menghubungkan sumber data maklumat kepada pelanggan melalui satu medium penghantaran, samada melalui kabel, satelit atau mel. Saluran satelit termasuklah perhubungan gelombang mikro, ruang udara bebas malah pita magnetik. Penghantaran data tidak dapat dielakkan dengan kehadiran kesan kehadiran hingar Gaussian.

Dalam projek ini, isyarat frekuensi pertengahan, IF digunakan bagi mengenalpasti dan menganalisa struktur asas bagi sistem DAB. Isyarat frekuensi pertengahan, IF merangkumi frekuensi diantara 0.3MHz hingga 3MHz di mana ia diaplikasikan dalam frekuensi radio dan juga radio bergerak.

Isyarat masukan terdiri daripada isyarat frekuensi pertengahan, IF yang dilalukan ke dalam sistem dan ditapis oleh penapis analog sebelum proses penukaran isyarat analog ke isyarat digital.

## 2.2 PENAPIS.

Terdapat 2 jenis penapis yang digunakan dalam simulasi ini iaitu penapis jenis analog dan penapis jenis digital. Tujuan penapis analog digunakan ialah untuk menapis dan membuang isyarat frekuensi pertengahan yang tidak dikehendaki sebelum dilalukan ke dalam sistem penukaran analog ke digital. Terdapat beberapa jenis penapis analog yang digunakan bagi membuat analisa keluaran isyarat iaitu *Butterworth*, *Chebyshev I*, *Chebyshev II* dan *Elliptic*.

Penapis digital digunakan setelah isyarat asal ditukar kepada isyarat digital. Ia bertujuan untuk menapis isyarat digital yang tidak dikehendaki sebelum dilalukan semula ke pengubahsuai digital ke analog. Terdapat beberapa jenis penapis digital yang digunakan bagi membuat analisa keluaran isyarat iaitu penapis lulus rendah, penapis lulus tinggi, penapis jalur lulus dan penapis lulus henti.

Untuk projek ini, penapis jenis *Butterworth* dan penapis jalur lulus saja digunakan bagi membuat analisa sambutan sistem ini.

## 2.3 HINGAR.

Hingar adalah satu sumber yang terhasil secara semulajadi di dalam persekitaran sistem perhubungan. Di dalam projek ini, hingar Gaussian diaplikasikan

ke dalam saluran penghantaran untuk memberikan gambaran sebenar bagi sesuatu sistem perhubungan. Taburan normal bagi pengagihan Gaussian ditunjukkan dalam Rajah 16. Contoh hingar yang dijanakan dalam sistem perhubungan ialah dedenyut yang terhasil dari medan elektrik akibat daripada proses pensuisan elektrik [1].

Secara teori, hingar merupakan isyarat rawak yang terhasil daripada gabungan isyarat yang tidak tetap di dalam sistem perhubungan. Taburan magnitud bagi isyarat hingar dapat dikenalpasti melalui fungsi ketumpatan kebarangkalian (PDF).  $P(x)$  sebagai nilai isyarat rawak bagi  $x$  mengambil nilai antara  $x_0$  dan  $(x_0 + dx)$ . Ia ditulis sebagai rumus 2.1.

$$P(x) = P \{x_0 < x < x_0 + dx\}$$

### Rumus 2.1 Isyarat rawak

Kebarangkalian nilai isyarat rawak yang diambil di antara nilai  $x_0$  dan  $x_0 + dx$  adalah pengamiran bagi  $p(x)$  dalam sela  $x_2 - x_1$ . (rumus 2.2)

$$P \{x_0 < x < x_0 + dx\} = \int_{x_1}^{x_2} p(x) dx$$

### Rumus 2.2 Pengamiran isyarat

Kebarangkalian fungsi taburan  $p(x)$  ditakrifkan sebagai kebarangkalian bagi nilai rawak  $x$  yang mana  $x$  adalah kurang dari  $x_0$ (rumus 2.3):

$$P \{x < x_0\} = \int_{-\infty}^{x_0} p(x) dx$$

### Rumus 2.3 Kebarangkalian nilai $x < x_0$

Persamaan di atas adalah untuk menilai kebarangkalian bagi isyarat hingar  $n(t)$  yang mempunyai nilai  $\pm v_1$ (rumus 2.4).

$$P \{ +vI < x < -vI \} = \int_{x = -vI}^{x = +vI} p(x) dx$$

**Rumus 2.4: Kebarangkalian isyarat hingar  $n(t)$**

Dua perkara penting adalah purata dan sisihan piawai. Purata bagi nilai pembolehubah rawak  $x$  adalah

$$\eta = \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx$$

**Rumus 2.5: Purata nilai rawak  $x$**

Varian diukur menggunakan rumus

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \eta)^2 p(x) dx$$

**Rumus 2.6: Varian**

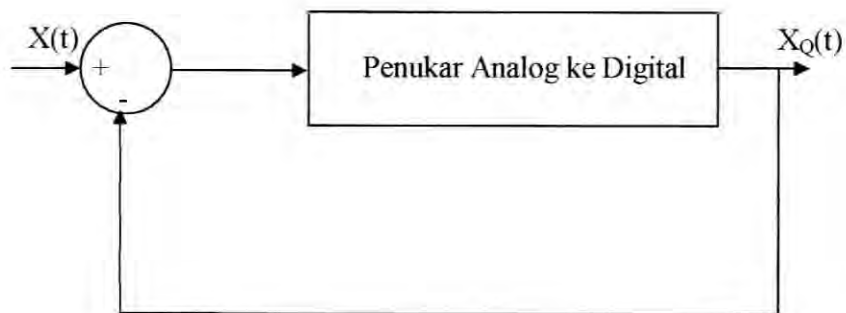
yang mana sisihan piawai adalah  $\sigma$ .

## 2.4 PENUKAR (*CONVERTER*)

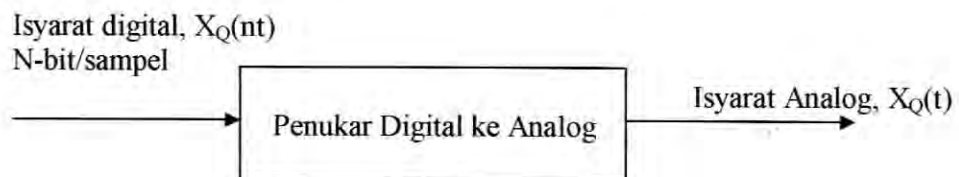
Penukar atau *Converter* berfungsi untuk menukarkan isyarat masukan kepada isyarat yang boleh diterima oleh sistem perhubungan. Di dalam projek ini, terdapat 2 jenis penukar yang digunakan iaitu Penukar Analog ke Digital(ADC) dan Penukar Digital ke Analog(DAC).

Bagi komponen Penukar Analog ke Digital(ADC), ia menukarkan isyarat masukan, contohnya isyarat rupasain kepada isyarat digit yang bersesuaian pada sistem tersebut. Di sini, beberapa teknik perhubungan seperti, persampelan, pengkuantuman dan pendigitan dilakukan (gambarajah 2.1).

Bagi Penukar Digital ke Analog(DAC), isyarat keluaran dari ADC ditapis semula oleh penapis digital dan dilalukan ke dalam penukar DAC untuk mendapatkan semula isyarat rupasain asal (gambarajah 2.2).

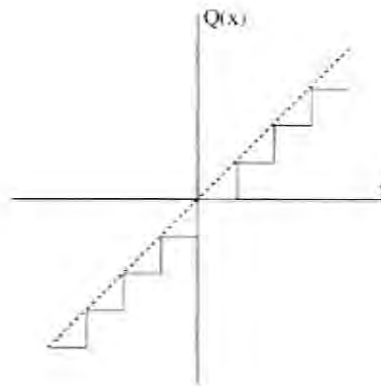


**Gambarajah 2.1: Penukar Analog ke Digital (ADC).**



**Gambarajah 2.2: Penukar Digital ke Analog (DAC).**

### 2.4.1 PENGKUANTUMAN DAN PENDIGITAN.



**Gambarajah 2.3: Pengkuantuman  $x$  menggunakan  $Q(x) = \text{Lantai}(Lx)/L$ .**

Di dalam pemrosesan isyarat digit, pengkuantuman adalah satu proses isyarat yang berterusan dengan satu set simbol diskret atau nilai integer, dimana, ia menukarkan isyarat analog kepada isyarat digit melalui proses penukaran analog ke digital. Pada asasnya, operator pengkuantuman boleh diwakilkan sebagai:

$$Q(x) = \text{round}(f(x))$$

**Rumus 2.7**

Dimana,  $x$  adalah nilai nombor nyata,  $Q(x)$  adalah integer dan  $f(x)$  ialah fungsi nilai nyata rambang yang mengawal “*quantization law*”[2].

Dalam audio komputer, skalar liner adalah biasa. Jika  $x$  ialah nilai nyata diantara 1 dan 1, operator pengkuantuman boleh diwakilkan sebagai:

$$Q(x) = \frac{\text{round}(2^{M-1}x)}{2^{M-1}}$$

**Rumus 2.8**