BÀI GIẢNG
XỬ LÝ SỐ TÍN HIỆU

Biên soạn: PGS.TS LÊ TIẾN THƯỜNG

Tp.HCM, 02-2005

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa.

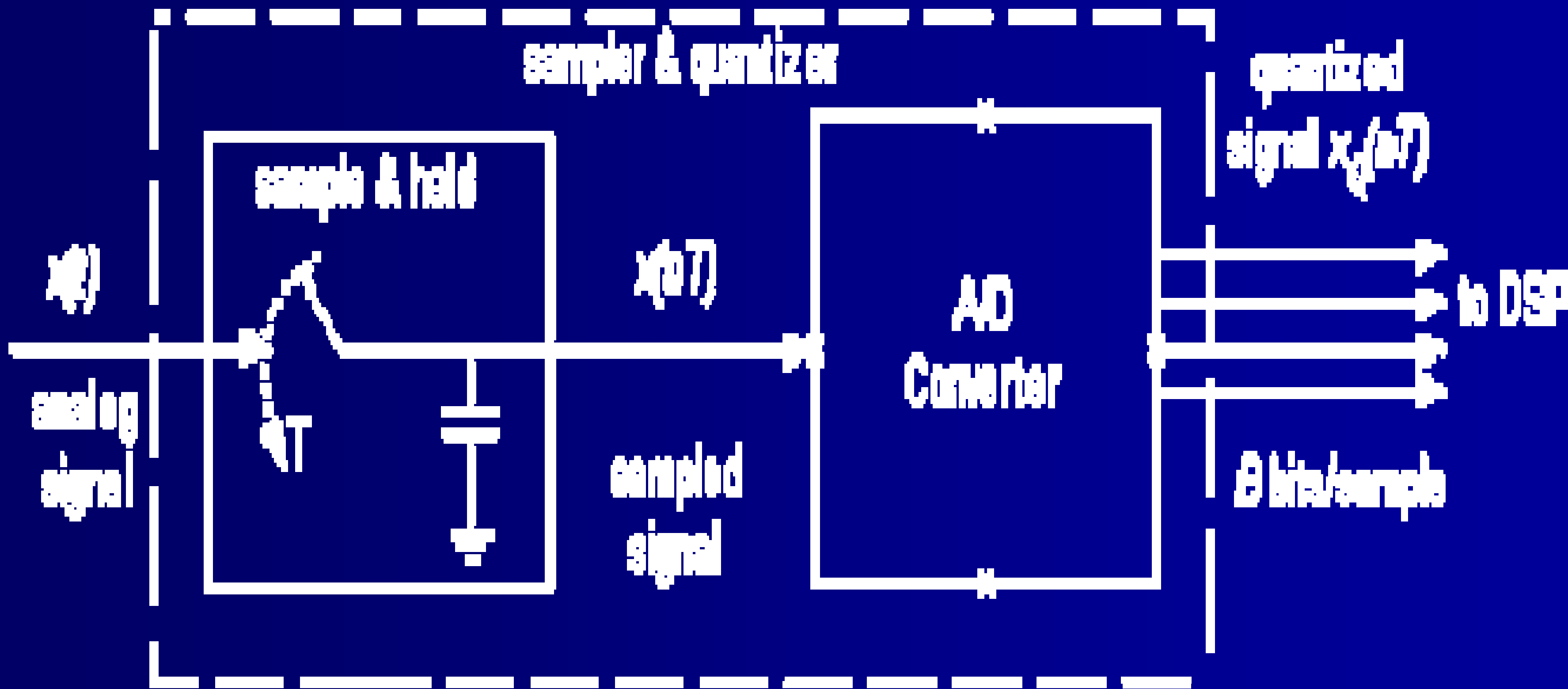
2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu (Noise Shaping).

2.3. Bộ chuyển đổi D/A.

2.4. Bộ chuyển đổi A/D.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa



H.2.1.1 Sự chuyển đổi tương tự sang số.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

Mẫu lượng tử hóa $x_Q(nT)$ biểu diễn bởi B bits mang một trong 2^B giá trị.

Độ rộng lượng tử hay độ phân giải lượng tử:

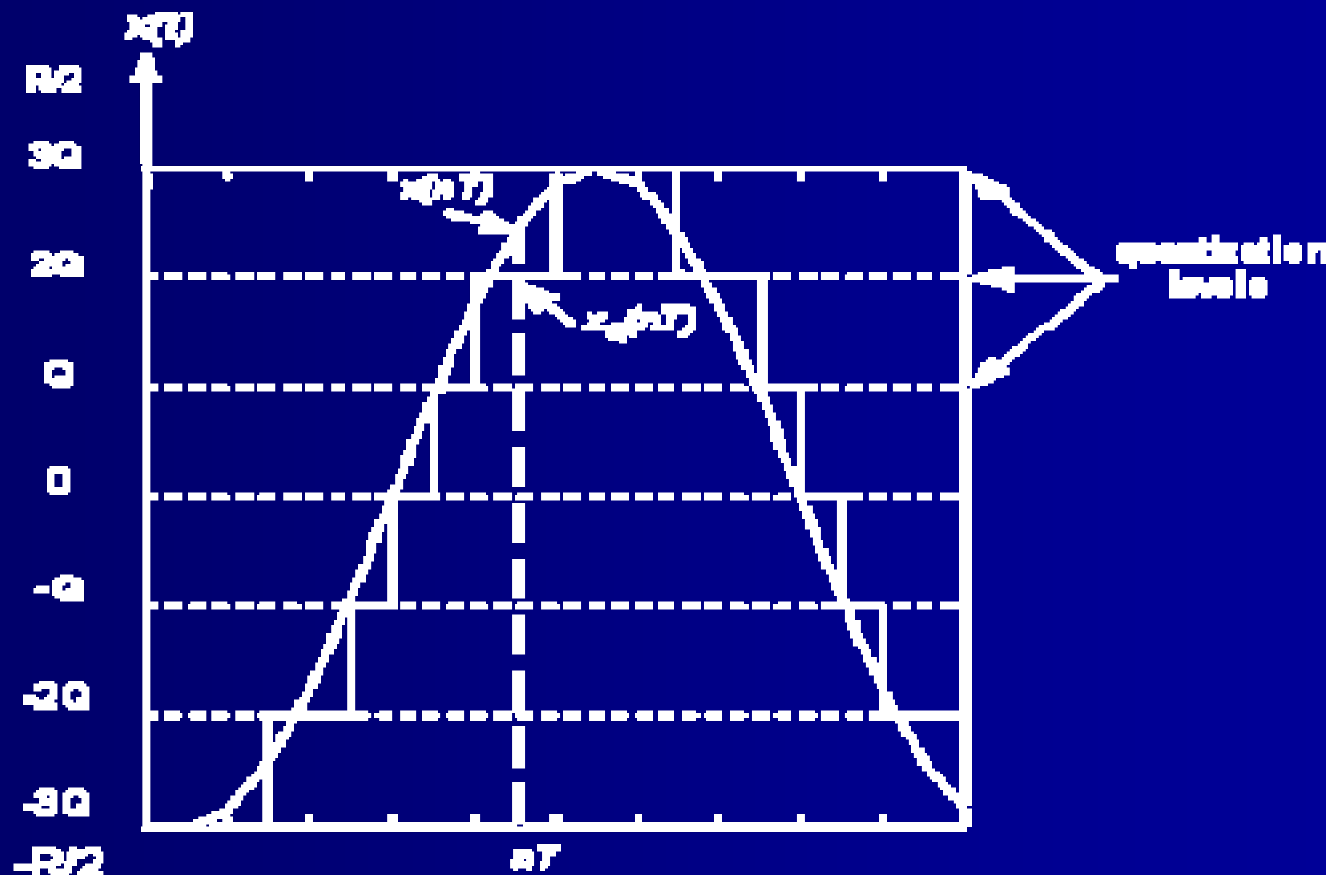
$$Q = \frac{R}{2^B} \qquad (2.1.1)$$

hay

$$\frac{R}{Q} = 2^B \qquad (2.1.1)$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa



H.2.1.2 Lượng tử hóa tín hiệu

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

Giá trị điển hình của R trong thực tế khoảng từ các giá trị lượng tử cho phép nằm trong tầm đối xứng:

$$-\frac{R}{2} \le x_Q(nT) < \frac{R}{2}$$

Sai số lượng tử: $e(nT) = x_Q(nT) - x(nT)$ **(2.1.3)**

Tổng quát, sai số khi lượng tử hóa một giá trị *x* thuộc tầm [*-R*/2, *R*/2] là: $e = x_Q - x$

trong đó, x_Q là giá trị lượng tử, sai số *e* nằm trong [1]:

$$-\frac{Q}{2} \le e \le \frac{Q}{2} \quad (2.1.4)$$

Để tìm giá trị đặc trưng của sai số trung bình, xét trung bình và trung bình bình phương các giá trị e:

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

$$\bar{e} = \frac{1}{Q}\int_{-Q/2}^{Q/2} e\,de = 0 \quad \text{và} \quad \overline{e^2} = \frac{1}{Q}\int_{-Q/2}^{Q/2} e^2\,de = \frac{Q^2}{12} \qquad (2.1.5)$$

Sai số hiệu dụng e_{rms} (Root Mean Square):

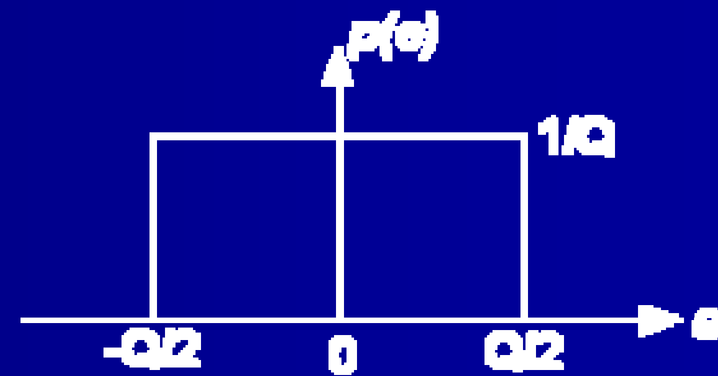
$$e_{rms} = \sqrt{\overline{e^2}} = \frac{Q}{\sqrt{12}} \qquad (2.1.6)$$

Phương trình (2.1.5) có thể đưa đến một lý giải có tính xác suất do giả sử rằng sai số lượng tử *e* là biến ngẫu nhiên có phân bố đều trong tầm (2.1.4), vì vậy có mật độ xác suất:

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

$$p(e) = \begin{cases} \dfrac{1}{Q} & , -\dfrac{Q}{2} \le e \le \dfrac{Q}{2} \\ 0 & , \text{khác} \end{cases}$$



Sự chuẩn hóa 1/*Q* là cần thiết để đảm bảo: $\int_{-Q/2}^{Q/2} p(e)de = 1$

Từ đó phương trình (2.1.5) biểu diễn độ kỳ vọng xác suất:

$$E[e] = \int_{-Q/2}^{Q/2} ep(e)de \quad \text{và} \quad E[e^2] = \int_{-Q/2}^{Q/2} e^2 p(e)de$$

Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal-to-noise ratio):

$$20\log_{10}(R/Q) = 20\log_{10}(2^B) = 20B\log_{10}(2)$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

hoặc $SNR = 20\log_{10}\left(\frac{R}{Q}\right) = 6B$ **[dB]**

Hơn nữa, giả sử $e(n)$ không tương quan với $x(n)$. Công suất trung bình hay phương sai của $e(n)$ đã được tính ở trên: **(2.1.9)**

$$\sigma_e^2 = E\left[e^2(n)\right] = \frac{Q^2}{12}$$

Giả sử $e(n)$ là nhiễu trắng nghĩa là $e(n)$ có hàm tự tương quan là hàm delta

$$R_{ee}(k) = E[e(n+k)e(n)] = \sigma_e^2\delta(k) \qquad (2.1.10)$$

với mọi giá trị trễ k. Tương tự, sự không tương quan với $x(n)$ có nghĩa là tương quan chéo bằng 0:

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.1. Quá trình lượng tử hóa

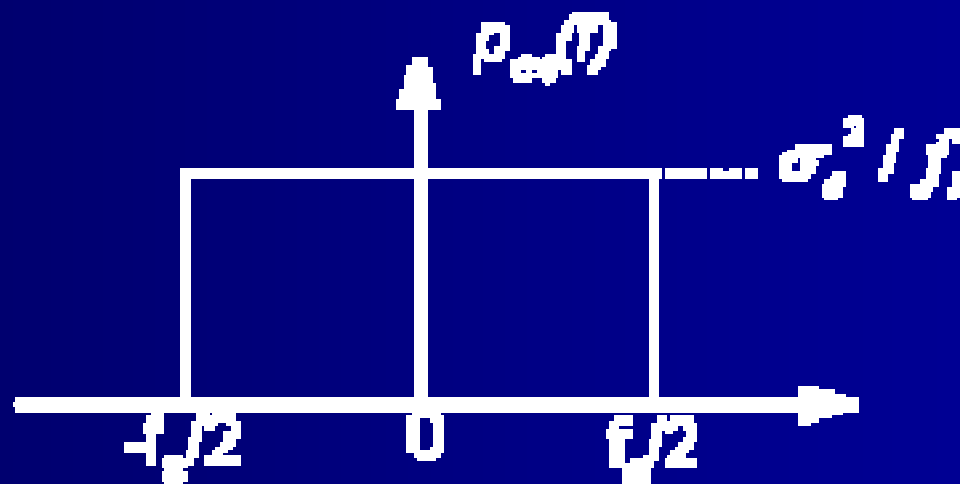
$$R_{ex}(k) = E[e(n+k)\,x(n)] = 0 \qquad (2.1.11)$$

với mọi k. Mô hình xác suất này sẽ được minh họa dưới đây cùng với một ví dụ mô phỏng và kiểm chứng các phương trình (2.1.9) ÷ (2.1.11), cũng như phân bố đều của hàm mật độ $p(e)$.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

Trong miền tần số, giả thuyết *e*(*n*) là chuỗi nhiễu trắng nghĩa là phổ tần số có dạng phẳng. Chính xác hơn, công suất trung bình tổng cộng của *e*(*n*) phân bố đều trong khoảng Nyquist [$-f_s/2$, $f_s/2$] như minh họa trong H.2.2.1.



H.2.2.1. Phổ công suất nhiễu trắng do lượng tử.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

Do đó, công suất trên khoảng tần số đơn vị, hay mật độ phổ công suất của $e(n)$ là [2]:

$$S_{ee}(f) = \frac{\sigma_e^2}{f_s} \quad \text{với} \quad -\frac{f_s}{2} \le f \le \frac{f_s}{2} \qquad (2.2.1)$$

và đại lượng này có tính chu kỳ bên ngoài khoảng tần số đơn vị, với chu kỳ $1/f_s$. Công suất nhiễu trong một khoảng Nyquist bé $[f_a, f_b]$ có $\Delta f = f_b - f_a$ là:

$$S_{ee}(f)\Delta f = \frac{\sigma_e^2}{f_s} = \sigma_e^2 \frac{f_b - f_a}{f_s}$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

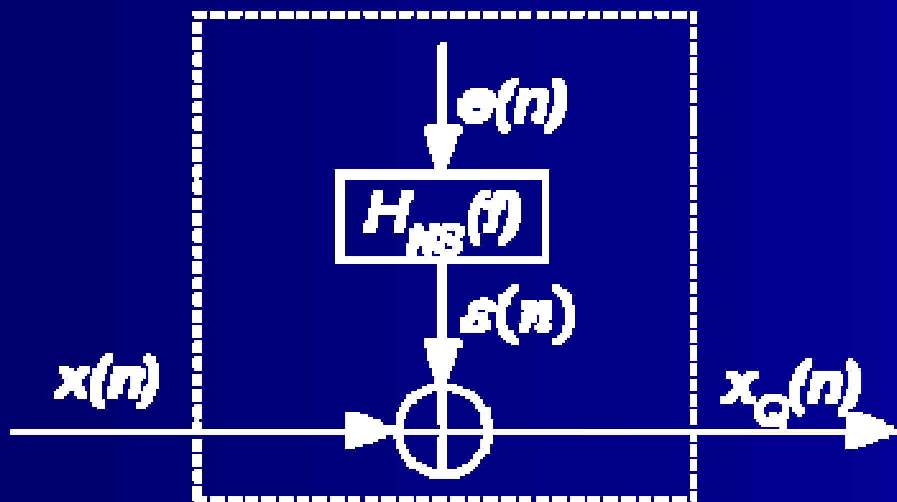
Công suất tổng cộng trên toàn bộ khoảng $\Delta f = f_s$ là:

$$\frac{\sigma_e^2}{f_s} f_s = \sigma_e^2$$

Bộ lượng tử định dạng nhiễu tái định dạng phổ nhiễu lượng tử thành dạng tuận lợi hơn. Điều này thực hiện bằng cách lọc chuỗi nhiễu $e(n)$ với một bộ lọc định dạng nhiễu $H_{NS}(f)$. Mô hình nhiễu tương đương cho tiến trình lượng tử hóa được minh họa trong H.2.2.2. Phương trình lượng tử hóa tương ứng thay cho phương trình (2.1.8) là: $x_Q(n) = x(n) + \varepsilon(n)$ **(2.2.2)**

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu



H.2.2.2. Mô hình bộ lượng tử hóa định dạng nhiễu.

trong đó, $\varepsilon(n)$ biểu diễn nhiễu đã lọc. Chuỗi $\varepsilon(n)$ không còn là nhiễu trắng. Mật độ phổ công suất không phẳng, nhưng có được dạng của bộ lọc $H_{NS}(f)$:

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

$$S_{\varepsilon\varepsilon}(f) = |H_{NS}(f)|^2 S_{ee}(f) = \frac{\sigma_e^2}{f_s}|H_{NS}(f)|^2 \quad (2.2.3)$$

Công suất nhiễu trong một khoảng nhỏ [f_a, f_b] cho trước được tính bằng tích phân $S_{\varepsilon\varepsilon}(f)$ trên khoảng này:

Công suất trong [f_a, f_b] = $\int_{f_a}^{f_b} S_{\varepsilon\varepsilon}(f)df = \frac{\sigma_e^2}{f_s}\int_{f_a}^{f_b}|H_{NS}(f)|^2 df$ **(2.2.4)**

Xét hai trường hợp sau: tốc độ lấy mẫu f_s và có B bit trong mỗi mẫu, và một tốc độ cao hơn f_s' với B bit trong một mẫu. Số lượng: $L = \frac{f_s'}{f_s}$ **. được gọi là tỷ lệ lấy mẫu dư, và thường là số nguyên. Có thể chứng tỏ rằng B' có thể bé hơn B nhưng chất lượng vẫn được duy trì. Giả sử tầm toàn thang R là giống nhau ở hai bộ lượng tử hóa, độ rộng lượng tử là: $Q = R2^{-B}$, $Q' = R2^{-B'}$**

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

Công suất nhiễu lượng tử: $\sigma_e^2 = \frac{Q^2}{12}, \ \sigma'^2_e = \frac{Q'^2}{12}$

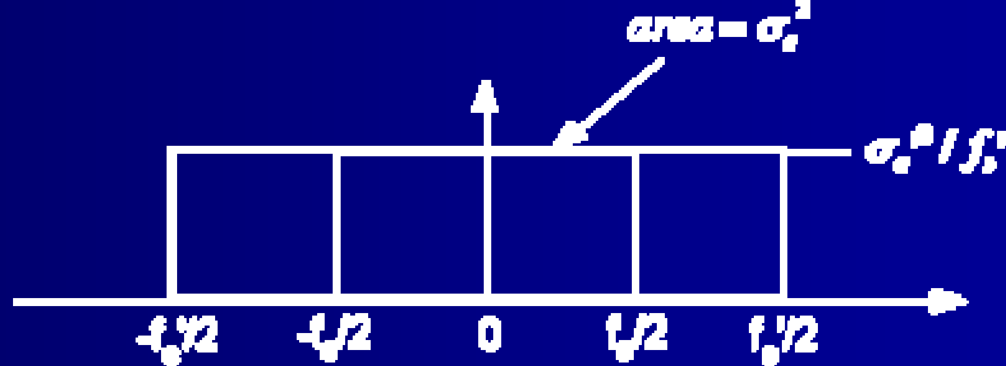
Để duy trì chất lượng trong hai trường hợp, mật độ phổ công suất phải như nhau, nghĩa là, theo phương trình (2.2.1):

$\frac{\sigma_e^2}{f_s} = \frac{\sigma'^2_e}{f_s'}$ **có thể được viết lại** $\sigma_e^2 = f_s \frac{\sigma'^2_e}{f_s'} = \frac{\sigma'^2_e}{L}$ **(2.2.5)**

Do đó, công suất lượng tử tổng cộng σ_e^2 bé hơn $\sigma_{e'}^2$ một lượng L, khiến cho B lớn hơn B'. Ý nghĩa của kết quả này được minh họa trong H.2.2.3. Nếu quá trình lấy mẫu thực hiện ở tốc độ f_s' cao hơn thì công suất tổng cộng $\sigma_{e'}2$ của nhiễu lượng tử trải đều trên khoảng Nyquist f_s'.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu



H.2.2.3 Công suất nhiễu lượng tử lấy mẫu dư, không qua định dạng nhiễu.

Vùng đánh dấu trên H.2.2.3 thể hiện tỷ lệ của công suất σ_e'2 nằm trong khoảng tần số *fs* nhỏ hơn. Giải phương trình (2.2.5) tìm *L* và viết theo vi sai *ΔB = B-B'*, tìm được: $L = \dfrac{\sigma'^2_e}{\sigma^2_e} = 2^{2(B-B')} = 2^{2\Delta B}$ **hay *ΔB* = 0.5 log2 *L* (2.2.6)**

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

Công suất nhiễu lượng tử tổng cộng nằm trong khoảng Nyquist nguyên thủy f_s là phần đánh dấu trong hình. Kết quả có thể được tìm lại bằng cách tích phân phương trình (2.2.4) trên khoảng [$-f_s/2$, $f_s/2$]:

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e'^2}{f_s'} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} |H_{NS}(f)|^2 \, df \qquad (2.2.7)$$

Để ý rằng nếu không có định dạng nhiễu, kết quả giảm về phương trình (2.2.5), nghĩa là $H_{NS}(f) = 1$. Mục 12.7 sẽ cho thấy một bộ lọc định dạng nhiễu bậc p tiêu biểu với tốc độ lấy mẫu cao f_s' có đáp ứng biên độ:

$$|H_{NS}(f)|^2 = \left|2\sin\left(\frac{\pi f}{f_s'}\right)\right|^{2p} \text{ với } -\frac{f_s'}{2} \le f \le \frac{f_s'}{2} \qquad (2.2.8)$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

Với những tần số f thấp, có thể xấp xỉ sin$x \approx x$ để có:

$$|H_{NS}(f)|^2 = \left(\frac{2\pi f}{f_s'}\right)^{2p} \quad \text{với} \quad |f| << f_s'/2 \tag{2.2.9}$$

Giả sử một tỷ lệ lấy mẫu dư L lớn, $f_s << f_s$', do đó có thể dùng xấp xỉ (2.2.9) trong toán tử bị tích của phương trình (2.2.7):

$$\sigma_e^2 = \frac{\sigma_e'^2}{f_s'}\int_{-f_s/2}^{f_s/2}\left(\frac{2\pi f}{f_s'}\right)^{2p} df = \sigma_e'^2\frac{\pi^{2p}}{2p+1}\left(\frac{f_s}{f_s'}\right)^{2p+1} = \sigma_e'^2\frac{\pi^{2p}}{2p+1}\left(\frac{f_s}{f_s'}\right)^{2p+1} = \sigma_e'^2\frac{\pi^{2p}}{2p+1}\left(\frac{1}{L^{2p+1}}\right)$$

Sử dụng $\sigma_e^2/\sigma_e'^2 = 2^{-2(B-B')} = 2^{-2\Delta B}$ thu được:

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.2. Lấy mẫu dư và định dạng nhiễu

$$2^{-2\Delta B} = \frac{\pi^{2p}}{2p+1}\left(\frac{1}{L^{2p+1}}\right)$$ **giải tìm ΔB:**

$$\Delta B = (p+0.5)\log_2 L - 0.5\log_2\left(\frac{\pi^{2p}}{2p+1}\right)$$

Như vậy cứ mỗi lần tăng gấp đôi *L* thì tiết kiệm được (*p*+ 0.5) bits.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

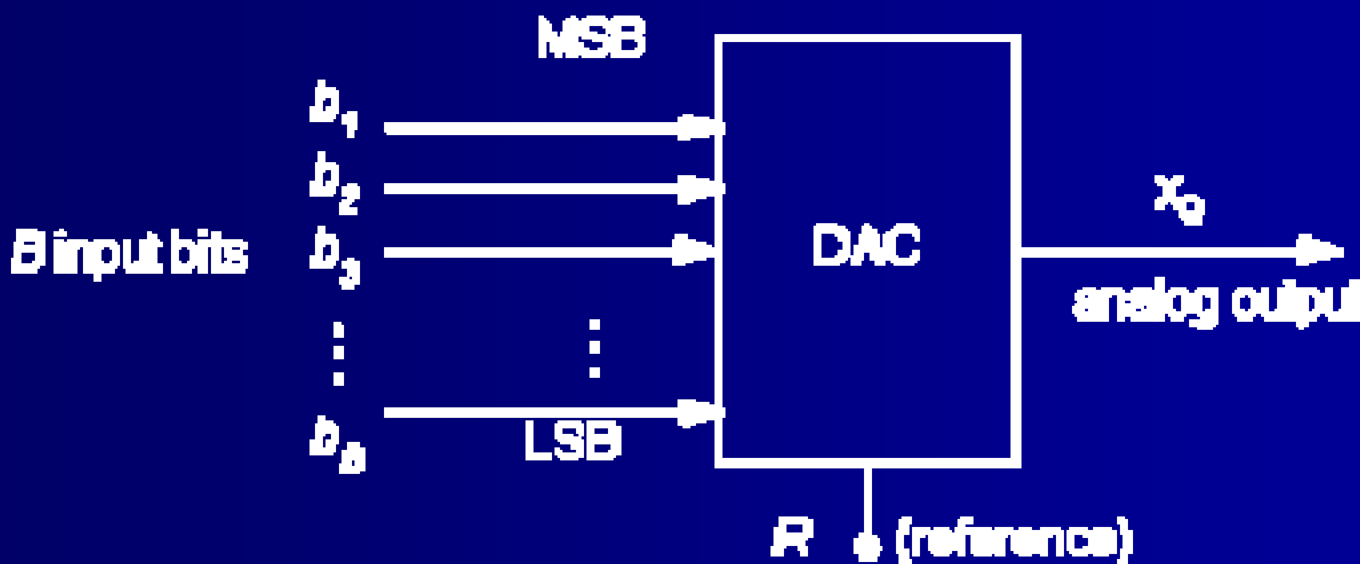
2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Xét bộ DAC *B* bit có tầm toàn thang *R* như H.2.3.1. Cho trước *B* bit 0 và 1 ở ngõ vào, b = [b_1, b_2,..., b_B], bộ chuyển đổi cho ngõ ra có trị x_Q, là một trong 2^B mức lượng tử trong tầm *R*. Nếu bộ chuyển đổi là đơn cực, ngõ ra x^Q thuộc tầm [0, *R*]. Nếu là lưỡng cực thì thuộc tầm [-*R*/2, *R*/2].

Ba loại bộ chuyển đổi thông dụng là: (a) nhị phân đơn cực thông thường (unipolar natural binary), (b) nhị phân offset lưỡng cực (bipolar offset binary), và (c) lưỡng cực lấy bù 2 (bipolar 2's complement).

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A



H.2.3.1 Bộ chuyển đổi D/A B bit.

Bộ chuyển đổi nhị phân đơn cực dạng thường đơn giản nhất. Ngõ ra x_Q được tính theo B bit như sau:

$$x_Q = R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \ldots + b_B 2^{-B}) \qquad (2.3.1)$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Giá trị lớn nhất ứng với trường hợp mọi bit đều là 1,

b = [1, 1, ..., 1], khi đó ngõ ra tương tự là:

$x_Q = R(2^{-1} + 2^{-2} + ... + 2^{-B}) = R(1 - 2^{-B}) = R - Q$

trong đó chuỗi cấp số nhân

$(2^{-1} + 2^{-2} + ... + 2^{-B}) = 2^{-1}(1 + 2^{-2} + 2^{-2} + ... + 2^{-(B-1)})$

$= 2^{-1}(1 - 2^{-B})/(1 - 2^{-1}) = 1 - 2^{-B}$

Phương trình (2.3.1) có thể viết lại theo độ rộng lượng tử Q như sau: $x_Q = R2^{-B}(b_1 2^{B-1} + b_2 2^{B-2} + ... + b_{B-1}2^1 + b_B)$

hoặc, $x_Q = Qm$ **(2.3.2)**

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

trong đó m là số nguyên có biểu diễn nhị phân (b_1, b_2,..., b_B), nghĩa là: $m = b_1 2^{B-1} + b_2 2^{B-2} + ... + b_{B-1} 2^1 + b_B$

Với số nguyên m trải 2B giá trị liên tiếp m = 0, 1, 2, ..., 2B-1, ngõ ra tương tự xQ chạy suốt các mức lượng tử liên tiếp của bộ lượng tử hóa.

Bộ chuyển đổi nhị phân offset lưỡng cực thu được bằng cách dịch phương trình (2.3.1) xuống nửa thang, R/2, thu được:

$$x_Q = R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + ... + b_B 2^{-B} - 0.5) \qquad (2.3.3)$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Mức cao nhất và thấp nhất được tính bằng cách dịch giá trị nhị phân thông thường tương ứng một lượng *R*/2:

$$x_Q = 0 - \frac{R}{2} = -\frac{R}{2} \quad \textbf{và} \quad x_Q = (R-Q) - \frac{R}{2} = \frac{R}{2} - Q$$

Giá trị tương tự x_Q có thể biểu diễn theo *Q* như trong phương trình (2.3.2). Trong trường hợp này:

$$x_Q = Qm' \qquad \textbf{(2.3.4)}$$

trong đó *m'* là số nguyên *m* dịch đi nửa thang cực đại, nghĩa là:

$$m' = m - \frac{1}{2}2^B = m - 2^{B-1}$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Thông số này chiếm các giá trị 2*B*: m' = -2^{B-1},... , -2, -1, 0, 1, 2,..., 2^{B-1} -1

Một tính chất bất thường của mã nhị phân offset là mức x_Q = 0 được biểu diễn bằng mẫu bit b = [1, 0, ..., 0]. Hạn chế này được bù lại bằng mã bù hai, cũng là mã được dùng phổ biến nhất. Dạng mã này thu được từ mã nhị phân offset và lấy bù bit có trọng số cao nhất, nghĩa là thay *b*1 bằng $\overline{b_1} = 1 - b_1$:

$$x_Q = R(\overline{b_1}2^{-1} + b_2 2^{-2} + \ldots + b_B 2^{-B} - 0.5) \qquad \textbf{(2.3.5)}$$

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Bảng 2.3.1 tóm tắt ba loại bộ chuyển đổi cùng các qui tắc mã hóa đầu vào và ra tương ứng. Bảng 2.3.2 so sánh ba nguyên tắc mã hóa trong trường hợp $B = 4$ và $R = 10$ V. Khoảng cách giữa các mức là $Q = R/2B = 10/24 = 0.625$ V.

Mã $[b_1, b_2, b_3, b_4]$ trong cột đầu tiên áp dụng cho cả trường hợp mã hóa nhị phân thông thường và offset, nhưng biểu diễn các giá trị tương tự lượng tử hóa khác nhau.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Loại chuyển đổi	Quan hệ vào/ra
Nhị phân thông thường	$x_Q=R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \ldots + b_B 2^{-B})$
Nhị phân offset	$x_Q=R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \ldots + b_B 2^{-B} - 0{,}5)$
Lấy bù 2	$x_Q=R(b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + \ldots + b_B 2^{-B} - 0{,}5)$

Bảng 2.3.1. Các loại bộ chuyển đổi.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

$B_1b_2b_3b_4$	Nhị phân thông thường		Nhị phân offset		Bù 2
	m	$x_Q = Qm$	m'	$x_Q = Qm'$	$b_1b_2b_3b_4$
--	16	10.000	8	5.000	--
1111	15	9.375	7	4.375	0111
1110	14	8.750	6	3.750	0110
1101	13	8.125	5	3.125	0101
1100	12	7.500	4	2.500	0100

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

1011	11	6.875	3	1.875	0011
1010	10	6.250	2	1.250	0010
1001	9	5.625	1	0.625	0001
1000	8	5.000	0	0.000	0000
0111	7	4.375	-1	-0.625	1111
0110	6	3.750	-2	-1.250	1110
0101	5	3.125	-3	-1.875	1101
0100	4	2.500	-4	-2.500	1100
0011	3	1.875	-5	-3.125	1011

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

0010	2	1.250	-6	-3.750	1010
0001	1	0.625	-7	-4.375	1001
0000	0	0.000	-8	-5.000	1000

Bảng 2.3.2. Mã chuyển đổi cho B = 4 bit, R = 10 V.

Với trường hợp nhị phân thông thường, các giá trị x_Q dương, chia đều khoảng [0, 10] V, với giá trị lớn nhất $R - Q = 10 - 0.625 = 9.375$. Đối với nhị phân offset, các mức giá trị được offset nửa thang, $R/2 = 5$V, và chia đều khoảng [-5, 5] V, với giá trị cực đại $R - Q = 5 - 0.625 = 4.375$ B

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Để ý rằng các ngưỡng trên của thang, *R* = 10 và *R*/2 = 5 trình bày trong bảng chỉ nhằm tham khảo, không thể hiện cho một mức lượng tử.

Cột cuối cùng biểu thị mã bù hai. Mã này có được từ cột thứ nhất, lấy bù MSB, b_1. Các giá trị lượng tử hóa x_Q biểu diễn bởi loại mã này cũng giống như mã nhị phân offset, nghĩa là được ghi trong cột thứ 5 của bảng.

Mã bù hai có thể hiểu là các mã nhị phân tuyến tính thông thường quấn quanh một vòng tròn, minh họa như H.2.3.2.

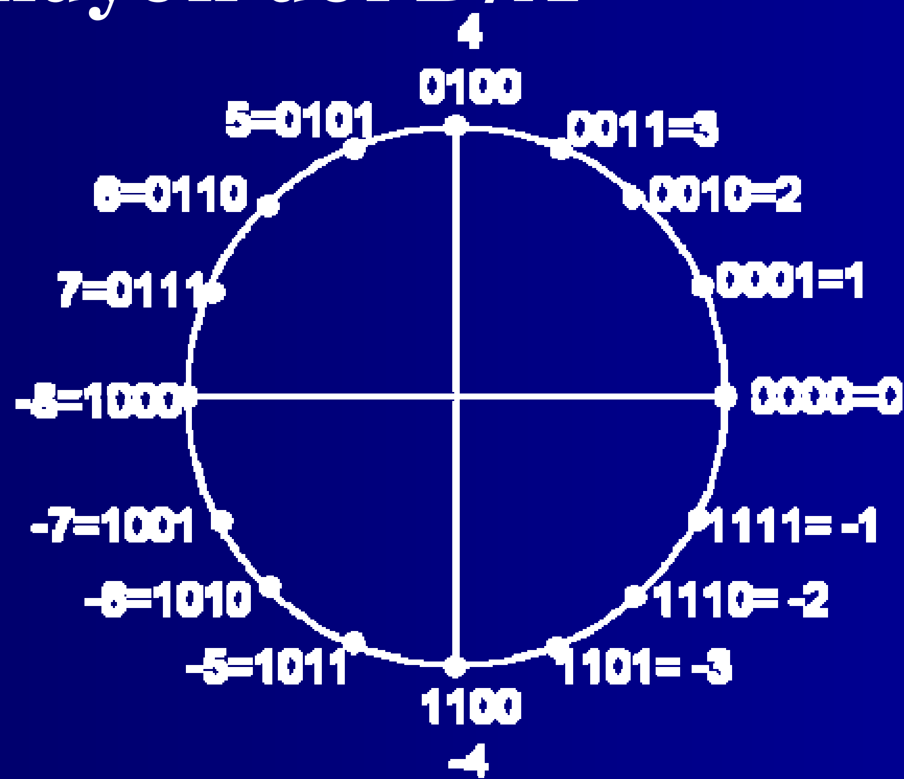
CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.3. Bộ chuyển đổi D/A

Hình vẽ này thể hiện các số nguyên *m* ở dạng nhị phân thông thường và giá trị âm của chúng ở nửa dưới hình tròn. Trị âm của bất kỳ số dương *m* nào trong nửa trên vòng tròn có thể tính theo nguyên tắc lấy bù mọi bit và cộng thêm 1 như thường lệ, nghĩa là $m_{2c} = \overline{m} + 1$ **.**

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

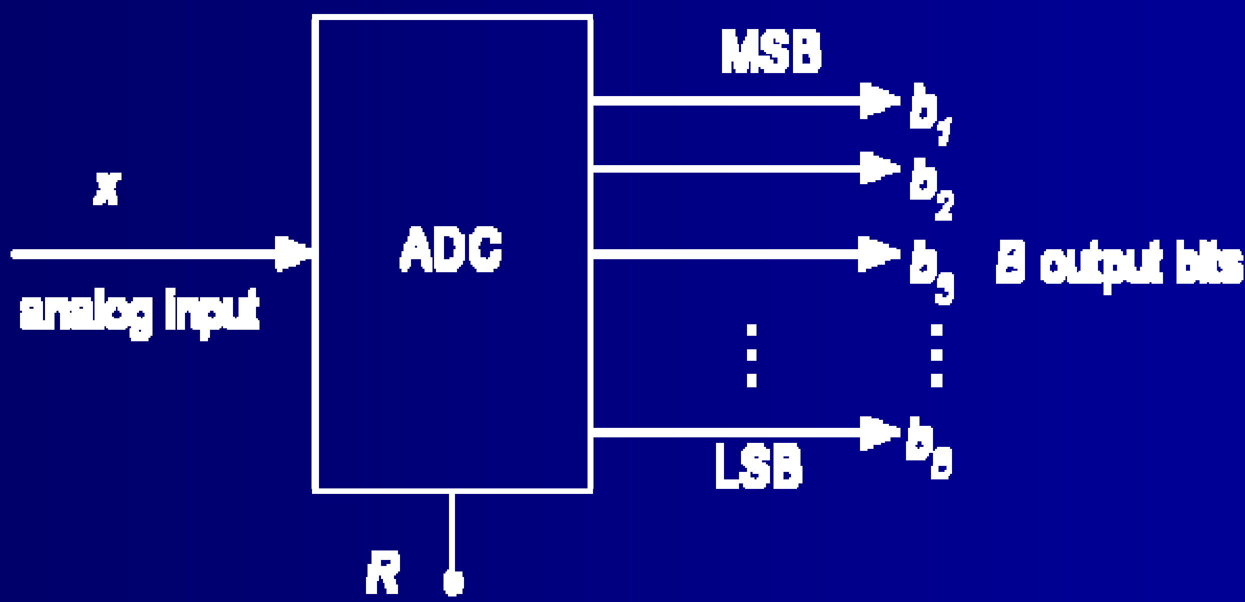
2.3. Bộ chuyển đổi D/A



H.2.3.2. Mã bù hai.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

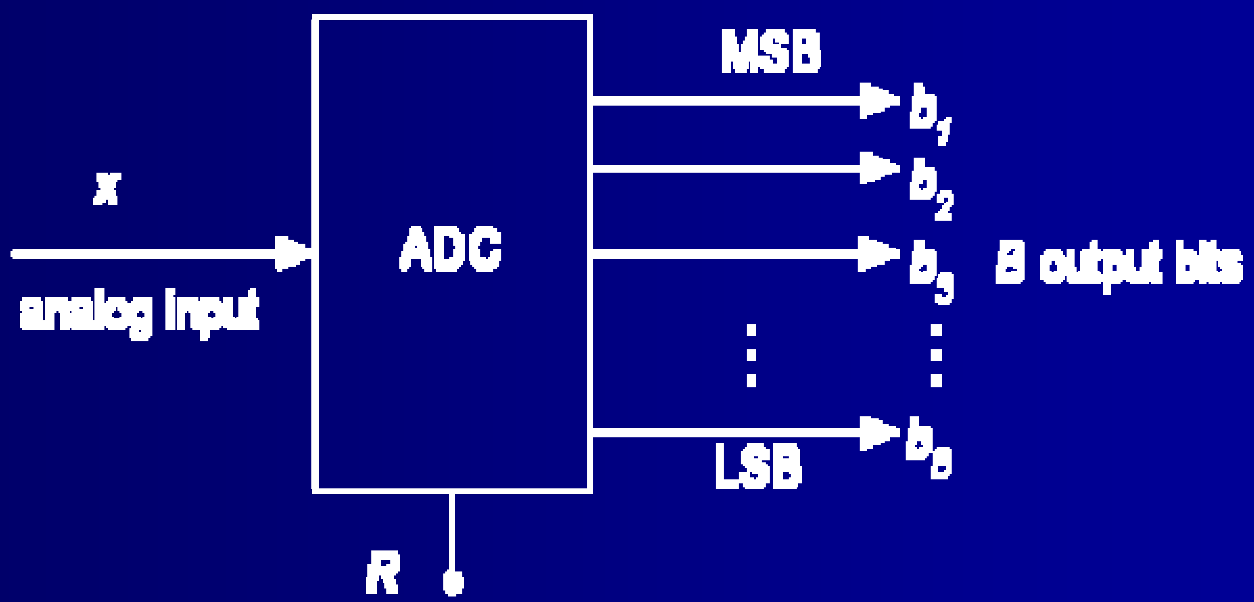
2.4. Bộ chuyển đổi A/D



H.2.4.1. Bộ chuyển đổi A/D *B* bit.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

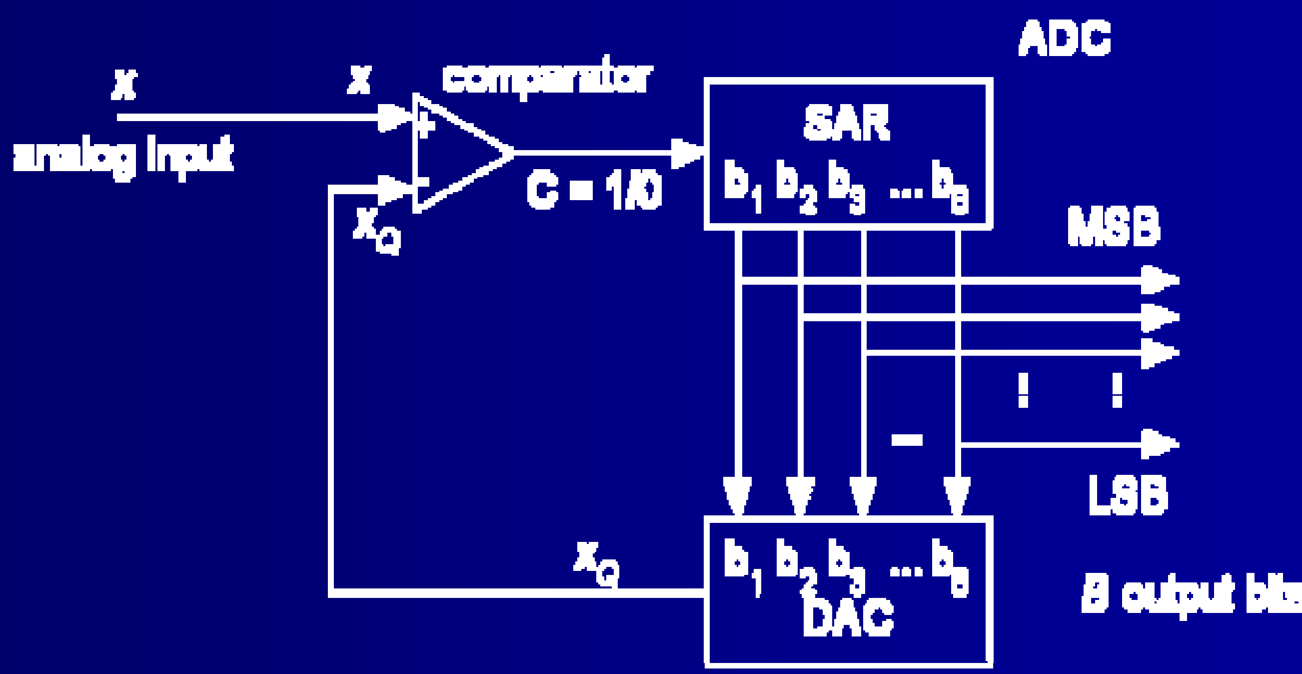
2.4. Bộ chuyển đổi A/D



H.2.4.1. Bộ chuyển đổi A/D *B* bit.

CHƯƠNG 2 : LƯỢNG TỬ HOÁ

2.4. Bộ chuyển đổi A/D



H.2.4.2. Bộ chuyển đổi A/D *B* bit.