

BỘ CHUYỂN ĐỔI TƯƠNG TỰ - SỐ SIGMA-DELTA: QUÁ TRÌNH RỜI RẠC HÓA VÀ TẠO HÌNH NHIỀU LƯỢNG TỬ

SIGMA-DELTA ADC: OVERSAMPLING AND QUANTIZATION NOISE SHAPING

TS. TRẦN SINH BIỂN

Khoa Điện - Điện tử TB, Trường ĐHHH

Tóm tắt:

Bài báo xem xét nguyên lý hoạt động và bản chất những quá trình chính biến đổi tín hiệu trong các bộ chuyển đổi tương tự số (CĐ TTS) thế hệ cuối mang tên gọi Sigma-Delta ADC (CĐ TTS Sigma-Delta).

Abstract:

The paper overviews the design concepts and the background of key signal conversion processes in last generation integrating ADCs named $\Sigma\Delta$ -ADCs.

1. Đặt vấn đề

Trên thế giới vào thập niên 1980 - 1990 trong lĩnh vực CĐ TTS chính xác cao xuất hiện sự thay đổi thế hệ. Trong thực tế CĐ TTS Sigma-Delta ($\Sigma\Delta$) [1, 2, 3] đã thay thế các bộ CĐ TTS tích phân với hai nhịp, ba nhịp và tích phân nhiều nhịp. Các nhà sản xuất hàng đầu trên thế như: Analog Devices Inc., Texas Instruments Inc., National Semiconductor Inc., TelCom Semiconductor Inc., Intersil Inc. ... đã đưa ra các bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ với nhiều chức năng khác nhau.

Trong nước hiện nay chưa có công trình nghiên cứu liên quan đến lý thuyết và phương pháp xây dựng bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$. Thiếu sự hiểu rõ về cấu trúc bên trong của chúng thì khó có thể nói về khả năng góp phần phát triển hướng quan trọng này, thậm trí ngay cả việc sử dụng thành thạo những sản phẩm mới trong việc thiết kế ứng dụng cụ thể. Vì vậy mục đích của bài báo là nghiên cứu cấu trúc, phân tích nguyên lý hoạt động và đưa ra các công thức mô tả quá trình chuyển đổi tín hiệu bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ nhằm góp phần cho các nghiên cứu và ứng dụng nó.

2. Giới thiệu chung về bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$

Bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ được ứng dụng rộng rãi bởi các đặc trưng trong kỹ thuật đo lường của chúng. Hiện nay độ phân giải lớn nhất của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ đạt được là 24 bit. Độ phân giải cao và có tích hợp bộ khuếch đại sơ bộ với hệ số khuếch đại lập trình được cho phép ứng dụng các bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ trong việc số hóa trực tiếp các tín hiệu điện áp nhỏ trong các hệ thống thông tin đo lường và điều khiển với các loại cảm biến khác nhau. Ví dụ như tín hiệu từ các bộ cảm biến kiểu cặp nhiệt điện, nhiệt điện trở, tenzor... Theo chỉ số về độ phân giải thì ngoài bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ ra không có bộ CĐ TTS nào có thể đạt được. Ngoài ra, bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ không đòi hỏi khát khe độ chính xác và ổn định của các phần tử tương tự sử dụng trong chúng nên cho phép sản xuất theo công nghệ vi mạch số. Sự phát triển của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ không chỉ theo hướng nâng cao độ chính xác mà còn theo hướng giảm thời gian chuyển đổi. Vì vậy các bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ dần dần thay thế những loại CĐ TTS khác từ những lĩnh vực ứng dụng mà cách đây không lâu thường sử dụng các bộ CĐ TTS loại tích phân. Trong [1] giới thiệu sự tương quan "độ chính xác - sự tác động nhanh" và lĩnh vực ứng dụng của các loại CĐ TTS khác nhau.

Cơ sở khái niệm về bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ được đề xuất tại phòng thí nghiệm Bell trong thập niên 50, khi xây dựng hệ thống số truyền dữ liệu với việc sử dụng phương pháp điều chế Delta. Vào cuối những năm 60 cấu trúc bộ điều chế $\Sigma\Delta$ đã được giới thiệu. Tuy nhiên do có sử dụng bộ lọc số bên trong chúng nên việc chế tạo thực tế bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ trong một vi mạch chỉ được thực hiện vào cuối thập niên 80, khi các bộ xử lý tín hiệu (DSP) và các vi mạch số trở nên phổ biến.

Cơ sở khái niệm thực hiện bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ bao gồm quá trình "siêu rời rạc hóa" (oversampling), "tạo hình nhiễu" (noise shaping) lượng tử, lọc số và giảm tần số lấy mẫu (decimation). Nhưng công đoạn này được sử dụng không chỉ trong việc xây dựng bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ mà còn trong bộ chuyển đổi số - tương tự $\Sigma\Delta$ (CĐ STT $\Sigma\Delta$). Hai loại này được gọi chung với tên gọi các bộ chuyển đổi dữ liệu $\Sigma\Delta$ ($\Sigma\Delta$ Data Converters). Bộ điều chế $\Sigma\Delta$ có tính chất đặc biệt: cho phép hoán đổi giữa độ phân giải theo biên độ và thời gian biến đổi một cách dễ dàng tùy theo yêu

cầu của bài toán đặt ra. Việc sử dụng bộ điều chế với tần số cao cho phép loại bỏ bớt ở lối vào của CĐ TTS bộ lọc có đặc tính biên độ - tần số dốc và không cần đến bộ lọc "khắc phục hiệu ứng xếp chồng phổ" (antialiasing filter). Còn việc ứng dụng giải điều chế với tần số cao cũng làm giảm yêu cầu đối với bộ lọc san phẳng ở lối ra của bộ CĐ STT. Bộ lọc số ở lối ra của bộ điều chế $\Sigma\Delta$ làm nhiệm vụ san phẳng tín hiệu lối ra, làm giảm nhiễu lượng tử và thành phần các sóng hài bậc cao, loại trừ nhiễu vào vùng dải tần số tín hiệu có ích trong quá trình lấy mẫu với tần số lấy mẫu (tần số Shannon-Nyquist).

3. Sơ đồ chức năng bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$

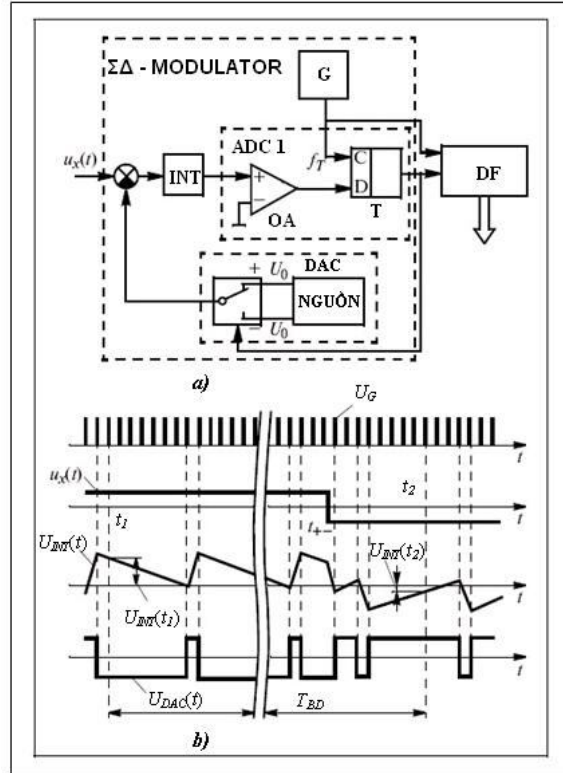
Sơ đồ cấu trúc bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ được thể hiện trên hình vẽ số 1. Trên hình vẽ sử dụng một số ký hiệu sau: G – máy phát xung với tần số f_T và biên độ U_G , T – trigơ, OA – khuếch đại thuật toán, INT – mạch tích phân, DF - bộ lọc số, NGUỒN – bộ tạo nguồn $\pm U_0$, ADC1 – bộ CĐ TTS có độ phân giải thấp (trên hình vẽ là bộ CĐ TTS 1 bit), DAC – bộ CĐ STT có độ phân giải thấp (trên hình vẽ là bộ CĐ STT 1 bit), $\Sigma\Delta$ -MODULATOR – bộ điều chế $\Sigma\Delta$.

Bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ hoạt động như sau: khi điện áp lối ra U_{INT} của mạch tích phân lớn hơn ngưỡng "0" sẽ dẫn đến việc đảo cực tính điện áp U_0 trong bộ DAC và được đồng bộ bởi xung nhịp từ máy phát xung G. Tín hiệu ra của bộ điều chế $\Sigma\Delta$ -MODULATOR được đưa vào bộ lọc số DF. Quá trình này được minh họa trong [2] là giảm tần số lấy mẫu (decimation) và được thực hiện bởi bộ lọc số DF. Tín hiệu điện áp vào $u_x(t)$ và sau khoảng thời gian $T_{TB} = t_2 - t_1$ thì kết quả quá trình biến đổi sẽ được tính. Nhiệm vụ của bộ lọc số DF là giảm đáng kể sai số phương pháp lượng tử sinh ra bởi hiệu điện áp lối ra của mạch tích phân ở thời điểm t_2 và t_1 : $\Delta U_{INT} = U_{INT}(t_2) - U_{INT}(t_1) \neq 0$.

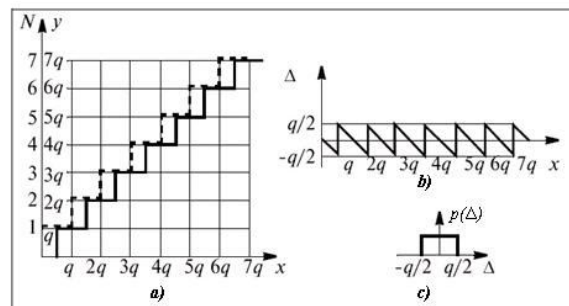
Như vậy bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ gồm 2 phần chính [3]: phần thứ nhất là bộ điều chế $\Sigma\Delta$ -MODULATOR hoạt động đồng bộ bởi xung nhịp từ máy phát xung G với tần số f_T tương đối lớn; phần thứ hai là bộ lọc số DF và tín hiệu ra của bộ DF cũng chính là tín hiệu ra của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$. Bộ lọc số DF có trong thành phần của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ làm phức tạp sơ đồ mạch, tuy nhiên với công nghệ vi mạch ngày nay thì việc thực hiện bộ lọc số DF không còn khó khăn (có thể lập trình trên vi xử lý hoặc trên chip PLA – ma trận logic lập trình).

4. Quá trình rời rạc hóa

Để hiểu rõ việc hình thành nhiễu lượng tử ta xem xét 3 trường hợp: bộ CĐ TTS thông thường với các giá trị tức thời; bộ CĐ TTS thông thường với "siêu rời rạc hóa" (oversampling) và CĐ TTS $\Sigma\Delta$.



Hình 1. Sơ đồ chức năng (hình 2a) và giản đồ thời gian làm việc (2b) của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$.



Hình 2. Sự phụ thuộc đại lượng ra của CĐ STT (hình 2a), sai số lượng tử của bộ CĐ TTS (hình 2b) và mật độ xác suất phân bố sai số lượng tử (hình 2c)

Bộ CD TTS với các giá trị tức thời: CD TTS đếm trực tiếp (flash), CD TTS xấp xỉ liên tiếp (CD TTS so sánh từng bit một), CD TTS tích phân theo hai sườn. Sự phụ thuộc đại lượng ra của CD STT được thể hiện trên hình 2a, trong đó x là tín hiệu vào, N là đại lượng ra.

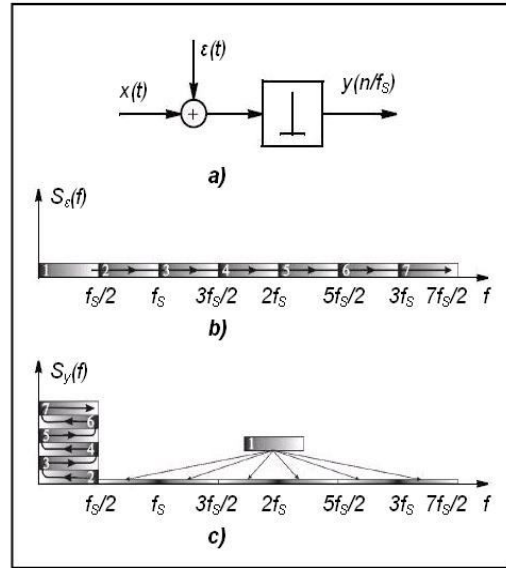
Để xác định sai số lượng tử [1, 4] giả sử code ra của bộ CD TTS đưa tới lối vào của bộ CD STT lý tưởng và được thể hiện trên hình 2a đường đặc trưng mỗi liên hệ giữa đại lượng lối vào của bộ CD TTS x và đại lượng lối ra của bộ CD STT y tỷ lệ với code N . Tất cả giá trị của đại lượng lối vào, ngoại trừ những giá trị trùng với các mức cho phép, biến đổi thành đại lượng lối ra với sai số lượng tử theo mức. Sai số này bằng hiệu $y - x$ (và theo sự thay đổi của đại lượng x) nằm trong khoảng $-q/2$ đến $q/2$, trong đó q – là bước lượng tử (đường nét đậm trên hình 2b). Trong trường hợp xấu nhất, sai số lượng tử lớn nhất có thể đạt tới giá trị q (đường nét chấm gạch trên hình 2b). Sai số này thông thường được gọi là nhiễu lượng tử (đối với bộ CD TTS $\Sigma\Delta$ thì luôn được gọi là nhiễu lượng tử). Trên hình 2c là mật độ xác suất phân bố sai số lượng tử, giả thiết là có hàm phân bố đều và phương sai được tính theo công thức:

$$D(\Delta) = M(\Delta^2) = \int_{-q/2}^{q/2} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta = \frac{1}{q} \int_{-q/2}^{q/2} \Delta^2 d\Delta = \frac{q^2}{12} \quad (1)$$

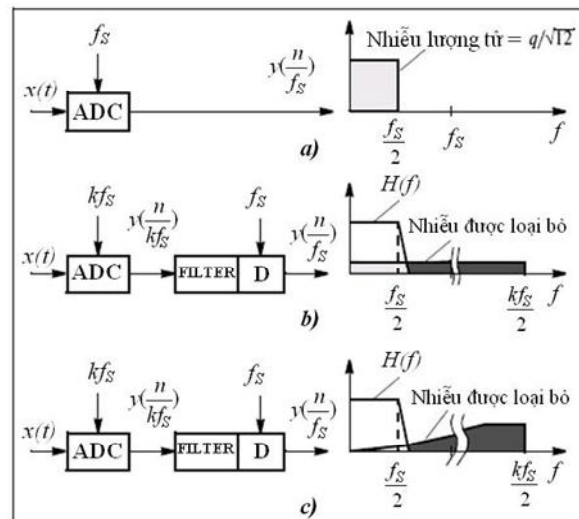
Phân bố biên độ nhiễu theo dải giá trị tín hiệu vào là đường đặc trưng quan trọng, tuy nhiên để làm rõ bản chất của quá trình “siêu rời rạc hóa” (oversampling), ta xem xét phân bố biên độ nhiễu theo dải tần số. Trên hình 3a là mô hình bộ CD TTS có quá trình rời rạc và lượng tử hóa giúp ta hiểu rõ về đặc tính phân bố nhiễu lượng tử theo tần số. Khối xung là mô hình bộ CD TTS không có nhiễu lượng tử. Ở lối vào có tín hiệu $x(t)$ và nhiễu $\varepsilon(t)$ với giả thiết là nhiễu trắng (có nghĩa là mật độ phổ công suất $S_{\varepsilon}(t)$ không đổi và trải dài trong khoảng từ 0 đến ∞). Trên hình 3b là mật độ phổ công suất nhiễu trắng $S_{\varepsilon}(t)$ trước quá trình “rời rạc hóa” trong khoảng từ 0 đến $7f_s/2$, trong đó f_s – tần số lấy mẫu (tần số rời rạc hóa). Theo lý thuyết về phân tích phổ, công suất nhiễu $S_{\varepsilon}(t)$ được tính:

$$P_{0-f_{gh}} = \int_0^{f_{gh}} S_{\varepsilon}(f) df, \quad (2)$$

trong đó f_{gh} – giới hạn giải tần số. Nếu như trong giải tần số từ 0 đến f_{gh} tập trung toàn bộ phổ $S_{\varepsilon}(t)$ thì công suất phổ tính theo công thức (1) và (2) là như nhau. Trên hình 3c chỉ rõ mật độ phổ nhiễu sau quá trình “rời rạc hóa” giảm đáng kể so với trước quá trình “rời rạc hóa” ở trong dải tần số từ 0 đến $f_s/2$. Theo lý thuyết, mật độ phổ nhiễu này sẽ tiến tới 0 vì giá trị phổ ban đầu là hữu hạn và sau quá trình “rời rạc hóa” sẽ trải dài từ $f_s/2$ đến ∞ . Như vậy có thể cho rằng công suất nhiễu lượng tử tập trung chủ yếu trong khoảng dải tần từ 0 đến $f_s/2$ (xem hình 4a - mật độ phổ nhiễu lượng tử bộ CD TTS đếm trực tiếp). Theo định lý lấy mẫu (Shannon-Nyquist) ta có thể chọn giới hạn tần số lấy mẫu f_{gh} lớn hơn hoặc bằng 2 lần giới hạn tần số tín hiệu f_{TH} và khi đó



Hình 3. Mô hình bộ CD TTS có quá trình rời rạc và lượng tử hóa (hình 3a), mật độ phổ công suất nhiễu trắng trước (hình 3b) và sau (hình 3c) quá trình rời rạc hóa



Hình 4. Mật độ phổ nhiễu lượng tử bộ CD TTS đếm trực tiếp (hình 4a); “siêu rời rạc hóa” và lọc số, không tạo hình nhiễu lượng tử (hình 4b); có tạo hình nhiễu lượng tử, “siêu rời rạc hóa” và lọc số (hình 4c).

toàn bộ công suất nhiễu lượng tử sẽ tập trung trong dải tần từ 0 đến f_{TH} .

Ở lối vào bộ CD TTS đưa tín hiệu $x(t) = X_m \sin 2\pi ft$, trong đó f – tần số và biên độ X_m bằng 1/2 dải chuyển đổi của bộ CD TTS. Công suất tín hiệu được tính theo công thức:

$$P_x = X_m^2 / 2 \quad (3)$$

Từ công thức (1) và công thức (3) ta tính được tỉ số tín hiệu / nhiễu SNR (Signal Noise Ratio):

$$\begin{aligned} SNR &= 10\lg(6X_m^2 / q^2) = \\ &= 10\lg(3 \cdot 2^{2N} / 2) = 6,02 \cdot N + 1,76 \text{ dB}, \end{aligned} \quad (4)$$

trong đó bước lượng tử $q = 2 \cdot X_m / 2^N$.

5. Tạo hình nhiễu lượng tử

Trên hình 4b là mật độ phổ nhiễu lượng tử bộ CD TTS với “siêu rời rạc hóa” và lọc số, không “tạo hình nhiễu” (noise shaping) lượng tử. Tần số rời rạc hóa gấp k lần và bằng kf_s , trong đó f_s – tần số lấy mẫu theo định lý lấy mẫu Shannon-Nyquist đã nhắc đến ở trên, k - hệ số “siêu rời rạc hóa”. Vì tổng công suất nhiễu không đổi, nên khi sử dụng bộ lọc thì công suất nhiễu trong dải tần số tín hiệu giảm đi k lần và tỉ số tín hiệu / nhiễu:

$$SNR = 6,02 \cdot N + 1,76 + 10\lg k \text{ dB}. \quad (5)$$

Như vậy khi tần số lấy mẫu tăng lên gấp 2 lần thì tỉ số tín hiệu / nhiễu tăng thêm 3,01 dB.

Trên hình 4c là bộ CD TTS $\Sigma\Delta$ bao gồm quá trình “siêu rời rạc hóa”, lọc số và “tạo hình nhiễu” (noise shaping). “Tạo hình nhiễu” lượng tử không chỉ cho phép đưa phần lớn công suất nhiễu lượng tử ra ngoài dải tần số có ích, mà còn làm giảm phần công suất nhiễu còn lại trong vùng tần số có ích. So sánh phổ nhiễu trên hình 4b và hình 4c nhận thấy kết quả của tạo hình nhiễu lượng tử phân bố công suất nhiễu thay đổi. Để giúp cho việc hiểu rõ hơn, ta xem xét mô hình phi tuyến bộ điều chế $\Sigma\Delta$ 1 bit bậc một (hình 5a). Bậc của bộ điều chế $\Sigma\Delta$ xác định bởi bậc của bộ lọc tương tự AF.

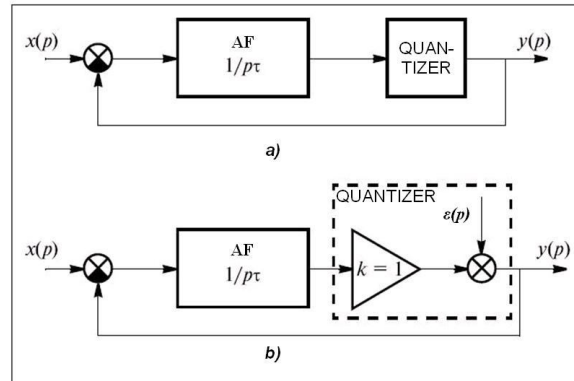
Trên hình 5a, bộ lọc AF là bộ tích phân lý tưởng với hàm truyền

$$S_{AF}(p) = \frac{1}{p\tau}, \text{ trong đó } \tau - \text{hằng số thời gian của bộ tích phân.}$$

Nếu thành phần nhiễu $\varepsilon(t)$ và tín hiệu lối ra $y(t)$ không tương quan với tín hiệu lối vào $x(t)$ thì có thể sử dụng mô hình tuyến tính trên hình 5b để phân tích và xác định đặc tính nhiễu lượng tử lối ra của bộ điều chế $\Sigma\Delta$. Trong một số công trình [5, 6] chỉ ra rằng mô hình tuyến tính cho kết quả khảo sát sự thay đổi của hệ thống và gần với mô hình thực nghiệm khi tăng bậc của bộ lọc AF và tăng số mức của bộ lượng tử (lớn hơn hoặc bằng 4 bit). Điều này giải thích bằng sự giảm liên hệ tĩnh của nhiễu lượng tử và tín hiệu vào khi tăng bậc của bộ điều chế và mức của bộ lượng tử. Mô hình trên hình 5b phù hợp với hệ thống thực nếu đảm bảo được sự không phụ thuộc tĩnh nhiễu lượng tử $\varepsilon(t)$ và tín hiệu $x(t)$ (không có sự ảnh hưởng lẫn nhau). Với mục đích giải thích (làm rõ) ý nghĩa của “tạo hình nhiễu” (noise shaping) lượng tử, ta cho rằng nhiễu có dạng nhiễu trắng.

Theo lý thuyết điều khiển tự động, trong trường hợp này ta có hàm truyền bởi tác động của tín hiệu $x(p)$:

$$S_x(p) = \frac{S_{AF}(p)}{1 + S_{AF}(p)} = \frac{1}{1 + p\tau} \quad (6)$$



Hình 5. Mô hình phi tuyến (hình 5a) và mô hình tuyến tính (hình 5b) bộ điều chế $\Sigma\Delta$ đơn giản nhất.

Và hàm truyền bởi tác động của nhiễu lượng tử $\varepsilon(t)$:

$$S_{\varepsilon}(p) = \frac{1}{1 + S_{AF}(p)} = \frac{p\tau}{1 + p\tau} \quad (7)$$

Thay $p = j\omega$ ta nhận được đặc tính biên độ-pha:

$$|S_x(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \quad (8)$$

$$|S_{\varepsilon}(j\omega)| = \frac{\omega\tau}{\sqrt{1 + \omega^2\tau^2}} \quad (9)$$

Từ công thức (8) nhận thấy khi ω tiến tới 0, hệ số truyền tín hiệu có ích tiến tới 1; từ công thức (9) nhận thấy khi ω tiến tới 0, hệ số truyền của nhiễu tiến tới 0. Khi tần số tăng, hệ số truyền tín hiệu có ích tiến tới 0 và hệ số truyền của nhiễu tiến tới 1.

Tóm lại, bộ điều chế $\Sigma\Delta$ là bộ lọc tần số thấp đối với tín hiệu có ích và là bộ lọc tần số cao đối với nhiễu. Nhờ quá trình "siêu rời rạc hóa" và bộ lọc tương tự AF trong bộ điều chế $\Sigma\Delta$, phần lớn công suất nhiễu bị đưa ra ngoài giới hạn giải tần số có ích. Đây chính là mấu chốt của quá trình "tạo hình nhiễu" lượng tử (được thể hiện trên hình 4c).

6. Kết luận

Từ các kết quả nghiên cứu ở trên ta có thể đưa ra một số kết luận sau:

Trên cơ sở nghiên cứu, phân tích sơ đồ chức năng bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ bài báo đã đi sâu nghiên cứu quá trình chuyển đổi tín hiệu trong khâu "rời rạc hóa" (sampling) và "siêu rời rạc hóa" (oversampling) và đưa ra công thức (5) biểu diễn sự phụ thuộc tỉ số tín hiệu / nhiễu SNR bởi hệ số "siêu rời rạc hóa" k .

Nhờ cấu trúc đặc biệt của bộ điều chế $\Sigma\Delta$ (trong thành phần có bộ lọc tương tự AF) mà nó có khả năng vừa là bộ lọc tần số thấp đối với tín hiệu có ích và đồng thời là bộ lọc tần số cao đối với nhiễu. Quá trình "tạo hình nhiễu" (noise shaping) lượng tử có khả năng đưa phần lớn công suất nhiễu lượng tử ra ngoài dải tần số có ích và đồng thời làm giảm phần công suất nhiễu còn lại trong vùng tần số có ích. Điều này được thể hiện trong công thức (8) và (9).

Trong cấu trúc của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ gồm 2 phần chính là bộ điều chế $\Sigma\Delta$ và bộ lọc số DF nên nó cho phép hoán đổi giữa độ phân giải theo biên độ và thời gian biến đổi một cách mềm dẻo, dễ dàng bằng cách thay đổi độ rộng cửa sổ của bộ lọc số thông qua lập trình tùy theo yêu cầu của bài toán cụ thể.

Với tính năng của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ đã được nghiên cứu ở trên, phạm vi ứng dụng của bộ CĐ TTS $\Sigma\Delta$ rất rộng rãi: trong các hệ thống đo lường và điều khiển trong công nghiệp, trong việc số hóa trực tiếp các tín hiệu điện áp nhỏ từ các loại cảm biến khác nhau, trong kỹ thuật âm thanh số, truyền hình số... với yêu cầu độ chính xác cao của các bộ CĐ TTS.

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

- [1]. Kester W., "Which ADC Architecture is Right for Your Application?", Analog Dialogue, 2005.
- [2]. Candy J. C., "Decimation for Sigma Delta Modulation", IEEE Trans. Commun., 1984.
- [3]. Ed. by St. R. Norsworthy, R. Schreier, G. C. Temes, "Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design and Simulation", IEEE Computer Society Press, 1996.
- [4]. Гитис Э. И., Пискулов Е.А., "Аналого-цифровые преобразователи: Учебное пособие для вузов", М.: Энергоиздат, 1981.
- [5]. Gray R. M., "Quantization Noise Spectra", IEEE Trans. on Information Theory, 1990.
- [6]. Candy J. C., Benjamin O. J., "The Structure of Quantization Noise from Sigma-Delta Modulation", IEEE Trans. Commun., 1981.

Người phân biện: TS. Lưu Kim Thành