УДК 621.372.061

ОБРОБКА СИГНАЛІВ ДОМЕН-АКУСТИЧНИМ ПРОЦЕСОРОМ У АВТОКОРЕЛЯЦІЙНОМУ РЕЖИМІ

Белас О.М., д.т.н., с.н.с., Іванько О.О.
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Специфікою обробки сигналів домен-акустачним процесором (ДАП) є те, що алгоритм обробки формується шляхом зміни структури внутрішнього розподілу намагніченості феритового осердя при взаємодії в ньому двох програмувальних сигналів [1]. Це означає, що якість сформованої структури і, відповідно, якість обробки сигналів в ідеальному випадку визначаються якістю цих двох сигналів. Якщо сигнал запису може бути сформований малошумним потужним генератором, то в автокореляційному режимі опорний сигнал формується із сигналу, який підлягає обробці і, відповідно, має шумову складову. Розглянемо цей випадок, вважаючи, що ДАП реалізує функцію узгодженого фільтра. В значенні показника якості будемо використовувати стандартний для фільтрів показник – відношення максимального значення корисного сигналу до значення квадратного кореня з дисперсії шуму. Надалі будемо використовувати вислів «відношення сигнал / шум» і позначати його С/Ш. Оцінку будемо проводити для ідеального випадку, тобто не будемо враховувати вгасання сигналу при поширені акустичної хвилі та внутрішні шуми в ДАП.

Спочатку визначимося з особливостями формування амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтра на базі ДАП в зазначеному режимі. Тобто будемо вважати, що АЧХ формується з сигналу, який потім буде оброблятися. Конкретно формування АЧХ відбувається при повному надходженні першого імпульса корисного сигналу в тіло ДАП шляхом подачі сигналу запису в момент часу t0. Враховуючи, що при формуванні АЧХ окрім корисного сигналу s(t) в тілі ДАП присутній шум η(t), результуюча імпульсна характеристика буде відрізнятися від ідеальної і матиме вигляд, аналітичний вираз для якого знаходимо за формулою:

$$h(t)=\begin{cases} s(t_0-t)+\eta(t_0-t), & t\in\left[0,t_0\right]; \\ 0, & t\notin\left[0,t_0\right]. \end{cases} \qquad (1)$$

Будемо вважати, що корисний сигнал s(t) є періодичним з періодом T і енергією в імпульсі, яка дорівнює E, а завада може бути подана у вигляді стаціонарного випадкового процесу η(t) з нульовим середнім і кореляційною функцією, яка визначається за формулою:

$$K_\eta(\tau) = K_\eta(t_2 - t_1) = \frac{N_0}{2}\delta(t_2 - t_1). \tag{2}$$

де δ(t) – дельта-функція Дірака, N_0 – спектральна щільність завади.

Таким чином, другий та наступні імпульси обробляються процесором згідно зі сформованою АЧХ. У загальному випадку сигнал на виході фільтра може бути записаний через інтеграл Дюамеля:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{t} U(\tau) \times h(\tau - t)\, d\tau \quad . \tag{3}$$

Розглянемо динаміку обробки другого імпульсу. Для цього вхідний сигнал $U(t)$ визначимо так:

$$U(t) = s(t - T) + \eta(t). \tag{4}$$

Враховуючи формулу для імпульсної характеристики (1), запишемо сигнал на виході фільтра:

$$y(t) = \int_{T}^{t} (s(\tau - T) + \eta(\tau))(s(\tau + t_0 - t) + \eta(\tau + t_0 - t))\, dt. \tag{5}$$

Оскільки пікове значення сигналу при узгодженій обробці сигналу визначається постійною часу фільтра t_0, то максимальне значення видного сигналу буде в момент часу $T + t_0$.Оцінимо це значення як

$$y(T + t_0) = \int_{T}^{T+t_0} (s(\tau - T)\cdot s(\tau - T) + \eta(\tau)\cdot\eta(\tau - T) + \eta(\tau)\cdot s(\tau - T) + s(\tau - T)\cdot\eta(\tau - T))\, dt \tag{6}$$

Після заміни змінних $z = \tau - T$ сигнал на виході може бути поданий як:

$$y(T + t_0) = A_1(T + t_0) + A_2(T + t_0) + A_3(T + t_0) + A_4(T + t_0), \tag{7}$$

де

$$A_1(T + t_0) = \int_0^{t_0} s(z)s(z)\, dz; \quad A_2(T + t_0) = \int_0^{t_0} \eta(z)\eta(z + T)\, dz;$$

$$A_3(T + t_0) = \int_0^{t_0} s(z)\eta(z + T)\, dz; \quad A_4(T + t_0) = \int_0^{t_0} s(z)\eta(z)\, dz. \tag{8}$$

Визначимо корисний сигнал як математичне сподівання (7):

$$C = M\left[\, y(T + t_0)\, \right] = M[A_1] + M[A_2] + M[A_3] + M[A_4], \tag{9}$$

де $M[A_i]$ – математичне сподівання $A_i\,(T + t_0)$,

$$M[A_1] = M\left[\int_0^{t_0} s(z)s(z)\, dz\right] = \int_0^{t_0} M\left[s(z)s(z)\right] dz = E;$$

$$M[A_2] = M\left[\int_0^{t_0} \eta(z)\eta(z + T)\, dz\right] = \int_0^{t_0} M\left[\eta(z)\,\eta(z + t)\right] dz = \int_0^{t_0} K_\eta(T)\, dz = 0;$$

$$M\left[A_3\right]=M\left[\int_0^{t_0} s(z)\eta(z+T)\,dz\right]=\int_0^{t_0} s(z)M\left[\eta(z+T)\right]dz=0;$$

$$M\left[A_4\right]=M\left[\int_0^{t_0} s(z)\eta(z+T)\,dz\right]=\int_0^{t_0} s(z)M\left[\eta(z+T)\right]dz=0.$$

Тобто значення корисного сигналу дорівнює E. Оцінимо значення дисперсії завади в момент часу $T + t_0$. В загальному випадку дисперсія визначається за формулою:

$$D\left[\gamma(T+t_0)\right]=D\left[A_1\right]+D\left[A_2\right]+D\left[A_3\right]+D\left[A_4\right]+$$
$$+2K_{12}+2K_{13}+2K_{14}+2K_{23}+2K_{24}+2K_{34}, \tag{10}$$

де $D\,[A_i]$ – дисперсія $A_i(T + t_0)$, K_{ij} – взаємно кореляційні моменти.

Знайдемо складові (10): $D\,[A_i] = 0$, як для детермінованого сигналу.

Для другої складової згідно з визначенням дисперсії запишемо:

$$D\left[A_2\right]=M\left[\left(\int_0^{t_0}\eta(z)\eta(z+T)\,dz\right)^2\right]-\left(M\left[\int_0^{t_0}\eta(z)\eta(z+T)\,dz\right]\right)^2=$$

$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} M\left[\eta(z_1)\eta(z_1+T)\eta(z_2+\text{Ò})\right]dz_1\,dz_2-\left(\int_0^{t_0} M\left[\eta(z)\eta(z+T)\right]dz\right)^2=$$

$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} K_\alpha(z_1,z_2)\,dz_1\,dz_2-\int_0^{t_0}K_\eta(T)\,dz, \tag{11}$$

де $$K_\alpha(z_1,z_2)=M\left[\eta(z_1)\eta(z_2)\eta(z_1+T)\eta(z_2+T)\right]. \tag{12}$$

Беручи до уваги, що значення кореляційної функції шуму за умовами відрізняється від нуля, тільки в точці нуль друга складова в (11) дорівнює нулю. А також, якщо випадкові величини – складові моменту 4-го порядку, мають нормальне розподілення і середнє значення, яке дорівнює 0, то момент 4-го порядку можна визначити через моменти 2-го порядку [2], тобто

$$K_\alpha(z_1,z_2)=K'_{12}K'_{34}+K'_{13}K'_{24}+K'_{14}K'_{23}, \tag{13}$$

де

$$K'_{12}=M\left[\eta(z_1)\eta(z_2)\right]=K_\eta(z_1-z_2);$$
$$K'_{13}=M\left[\eta(z_1)\eta(z_1+T)\right]=K_\eta(T)=0;$$
$$K'_{14}=M\left[\eta(z_1)\eta(z_2+T)\right]=K_\eta(z_2-z_1+T);$$
$$K'_{23}=M\left[\eta(z_2)\eta(z_1+T)\right]=K_\eta(z_1-z_2+T);$$
$$K'_{24}=M\left[\eta(z_2)\eta(z_2+T)\right]=K_\eta(T)=0;$$
$$K'_{34}=M\left[\eta(z_1)\eta(z_2+T)\right]=K_\eta(z_2-z_1). \tag{14}$$

На основі (14) отримаємо

$$K_\alpha(z_1,z_2)=K_\eta(z_2-z_1)K_\eta(z_1-z_2)+K_\eta(z_2-z_1+T)\cdot K_\eta(z_1-z_2+T). \tag{15}$$

Враховуючи (15), перепишемо рівняння (11):

$$D[A_2]=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} K_\eta(z_2-z_1)K_\eta(z_1-z_2)dz_1\,dz_2-$$
$$-\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} K_\eta^2(z_2-z_1+T)\cdot K_\eta^2(z_1-z_2+T)dz_1\,dz_2=\left(\frac{N_0}{2}\right)^2. \tag{16}$$

В формулі (16) другий інтеграл дорівнює нулю, так як множення підінтегральних функцій в області інтегрування дорівнює нулю.

$$D[A_3]=M\left[\left(\int_0^{t_0} s(z)\eta(z+T)dz\right)^2\right]-\left(M\left[\int_0^{t_0} s(z)\eta(z+T)dz\right]\right)^2=$$
$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)M\left[\eta(z_1+T)\eta(z_2+T)\right]dz_1\,dz_2-\left(\int_0^{t_0} s(z)M\left[\eta(z+T)\right]dz\right)^2=$$
$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)K_\eta(z_1-z_2)dz_1\,dz_2=\frac{N_0}{2}\int_0^{t_0} s(z)s(z)dz=(N_0\,E)/2. \tag{17}$$

Так як випадковий процес був прийнятий стаціонарним на всьому проміжку спостереження, значення D[A4] буде дорівнювати D[A3].

Визначимо значення кореляційних моментів:

$$K_{12}=M\left[\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)\eta(z_1)\eta(z_2T)dz_1\,dz_2\right]=$$
$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)M\left[\eta(z_1)\eta(z_2+T)\right]dz_1dz_2=$$
$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)K_\eta(z_2-z_1+T)dz_1dz_2=0, \tag{18}$$

$$K_{13}=M\left[\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)s(z_1)\eta(z_1+T)dz_1dz_2\right]=$$
$$=\int_0^{t_0}\int_0^{t_0} s(z_1)s(z_2)s(z_1)M\left[\eta(z_1+T)\right]dz_1dz_2=0. \tag{19}$$

Аналогічно моменти K_{14}, K_{23}, K_{24}, K_{34} дорівнюють нулю. Підставляючи значення дисперсій в формулу (10), отримуємо:

$$Ш=\sqrt{D\left[y(T+t_0)\right]}=\sqrt{\frac{N_0\,E}{2}\cdot\left(2+\frac{N}{2E}\right)}. \tag{20}$$

Кінцева формула для відношення С/Ш на виході фільтра на ДАП:

$$C/Ш = E/\sqrt{\frac{N_0 E}{2}\left(2+\frac{N_0}{2E}\right)} = \sqrt{2E/N_0}\sqrt{1/\left(2+\frac{N_0}{2E}\right)}. \qquad (21)$$

Перший співмножник у формулі для показника якості відповідає відомій формулі з класичної теорії оптимальної обробки сигналів. Другий – враховує специфіку обробки сигналів саме в ДАП і визначає втрати, що пов'язані з наявністю на етапі формування АЧХ шуму.

Література

1. Бондаренко В.С. Исследование домен-акустического эха в поликристаллических ферритах / Бондаренко В.С., Криночкин В.В., Мануилов М.В., Соболев Б.В. // Письма в ЖТФ. – 1987. – Т. 13. – Вып. 10. – С. 598.
2. Тузов Г.И. Статистическая теория приема сложных сигналов. – М.: Сов. радио, 1977. – 400 с.

Белас О.М., Іванько О.О. ***Обробка сигналів домен-акустичним процесором у авто кореляційному режимі.*** *Аналізується відношення сигнал/шум, яке може бути досягнуте під час оброблення сигналів домен-акустичним процесором. Показано, що якість обробки сигналів вказаним методом в ідеальному випадку визначається якістю цих первинних сигналів, при цьому за умови, що сигнал запису формується малошумним потужним генератором, то в автокореляційному режимі опорний сигнал формується із сигналу, який підлягає обробці.*

Ключові слова: *домен акустичний процесор, оброблення сигналів, відношення сигнал/шум.*

Белас О.М., Иванько О.О. ***Обработка сигналов домен-акустическим процессором в автокорреляционном режиме****. Анализируется отношение сигнал/шум, которое может быть достигнуто при обработки сигналов домен-акустическим процессором. Показано, что качество обработки сигналов указанным методом в идеальном случае определяется качеством этих первичных сигналов. При условии, что сигнал записи формируется малошумным мощным генератором, в автокорреляционном режиме опорный сигнал формируется из сигнала, который подлежит обработке.*

Ключевые слова: *домен акустический процессор, обработка сигналов, отношение сигнал/шум.*

Belas, O.M., Ivanko O.O. ***Signal processing domain-acoustic processor in the autocorrelation mode****. It is analyzed the signal / noise ratio, which can be achieved by the signal processing domain-acoustic processor. It is shown that the quality of signal processing by this method ideally determined by the quality of the primary signals. Provided that the recorded signal is formed by a powerful generator of low-noise, the autocorrelation mode, the reference signal generated from the signal, which is to be processed.*

Keywords: *domain acoustic processor, signal processing, signal / noise ratio.*