

О шумовых моделях цифровых фильтров с латеральными связями

В. П. Бакалов, Е. А. Субботин, Ю. С. Черных

В статье представлены шумовые модели рекурсивных цифровых фильтров (ЦФ) с латеральными обратными связями (ЛОС). Рассмотрены модели четырёх типовых схем ЦФ с ЛОС, учитывающие эффекты квантования в отдельных узлах цифрового фильтра и ошибки округления. Получены «шумовые» уравнения для дисперсии шума на выходе каждого канала в отдельности от аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и умножителей для каждой из схем ЦФ с ЛОС. Проведён сравнительный анализ шумовых моделей для каждой схемы реализации ЦФ с ЛОС.

Ключевые слова: цифровые фильтры, латеральные обратные связи, шумовые модели, «шумовые» уравнения, дисперсия шума.

1. Введение

Использование латеральных обратных связей (ЛОС) позволяет существенно повысить помехоустойчивость дискретных и цифровых фильтров [1–3]. Однако их использование существенно усложняет систему обработки дискретных сигналов и увеличивает уровень помех от ЛОС [2]. Кроме того, при цифровой обработке сигналов появляются дополнительные помехи, обусловленные эффектами квантования в цифровых фильтрах (ЦФ): шумы аналого-цифрового преобразователя (АЦП); погрешности, обусловленные квантованием коэффициентов фильтра; шумы квантования результатов арифметических операций вычислительного устройства (ВУ). При обработке цифрового сигнала в ВУ возникают дополнительные ошибки округления (усечения) [4–6], которые по своему характеру аналогичны шуму квантования.

Все эти шумы существенно влияют на помехоустойчивость систем цифровой обработки сигналов с ЛОС и требуют её количественной оценки. Несмотря на актуальность этой проблемы, она ещё не нашла необходимого освещения в литературе.

В данной статье рассмотрены четыре типовых схемы рекурсивных ЦФ с ЛОС [1], исследуются источники шумов квантования и округления в этих фильтрах, приводятся шумовые модели фильтров и уравнения дисперсии шума на выходе ЦФ с ЛОС, исследуется их помехоустойчивость.

2. Шумовая модель цифрового фильтра с ЛОС 1-го типа

Рассмотрим схему одноуровневого ЦФ с ЛОС 1-го типа (рис. 1). Причём будем считать, что ЦФ и ЛОС реализуются в виде рекурсивных цепей n -го порядка.

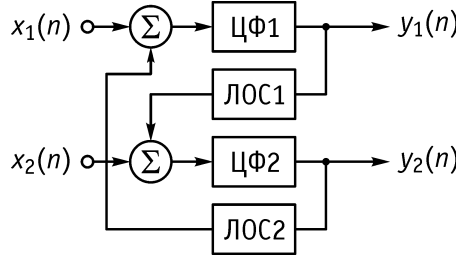


Рис. 1. Схема ЦФ с ЛОС 1-го типа

Передаточная функция ЦФ1 определяется уравнением:

$$H_1(z) = \sum_{n=0}^{N_1} a_{n1} z^{-n} / \left(1 - \sum_{l=1}^{L_1} b_{l1} z^{-l} \right), \quad (1)$$

где N_1, L_1 – количество умножителей прямой и обратной связи ЦФ1 соответственно.

Аналогично определяется передаточная функция ЦФ2:

$$H_2(z) = \sum_{n=0}^{N_2} a_{n2} z^{-n} / \left(1 - \sum_{l=1}^{L_2} b_{l2} z^{-l} \right), \quad (2)$$

где N_2, L_2 – количество умножителей прямой и обратной связи ЦФ2 соответственно.

Передаточная функция рекурсивного фильтра ЛОС1 определяется уравнением:

$$H_{\text{ЛОС1}}(z) = \sum_{n=0}^{N'_1} a'_{n1} z^{-n} / \left(1 - \sum_{l=1}^{L'_1} b'_{l1} z^{-l} \right), \quad (3)$$

где N'_1, L'_1 – количество умножителей прямой и обратной связи рекурсивного фильтра ЛОС1 соответственно.

Передаточная функция рекурсивного фильтра ЛОС2 определяется уравнением:

$$H_{\text{ЛОС2}}(z) = \sum_{n=0}^{N'_2} a'_{n2} z^{-n} / \left(1 - \sum_{l=1}^{L'_2} b'_{l2} z^{-l} \right), \quad (4)$$

где N'_2, L'_2 – количество умножителей прямой и обратной связи рекурсивного фильтра ЛОС2 соответственно; a_{n1}, a_{n2} – коэффициенты, характеризующие веса нерекурсивной части ЦФ1 и ЦФ2 соответственно; b_{l1}, b_{l2} – коэффициенты, характеризующие веса рекурсивной части ЦФ1 и ЦФ2 соответственно; a'_{n1}, a'_{n2} – коэффициенты, характеризующие веса нерекурсивной части ЛОС1 и ЛОС2 соответственно; b'_{l1}, b'_{l2} – коэффициенты, характеризующие веса рекурсивной части ЛОС1 и ЛОС2 соответственно.

Учтём, что источниками шумов ЦФ с ЛОС являются АЦП (e_0) и умножители ($e_1 \dots e_n$), причём будем считать, что шумы округления на выходе каждого из умножителей и на выходе аналого-цифровых преобразователей некоррелированы между собой и некоррелированы с входными последовательностями каждого канала [5, 6].

Для учёта шумов квантования в схему ЦФ с ЛОС (рис. 1) введём источники шума e_0 , число которых равно числу АЦП, и источники шума ($e_1 \dots e_n$), число которых равно числу умножителей. Причём источники шума $e_1 \dots e_n$ имеют одинаковую дисперсию и определяются уравнением [4]

$$e_k = e(kT) = \Delta^2/12,$$

а дисперсия шума на выходе ЦФ уравнением

$$\sigma = \frac{\Delta^2}{12} \sum_{k=1}^n h_k^2, \quad (5)$$

где Δ определяется числом используемых разрядов; h_k – импульсная характеристика.

С учётом вышеизложенного получим шумовую модель ЦФ с ЛОС 1-го типа, изображённого на рис. 2.

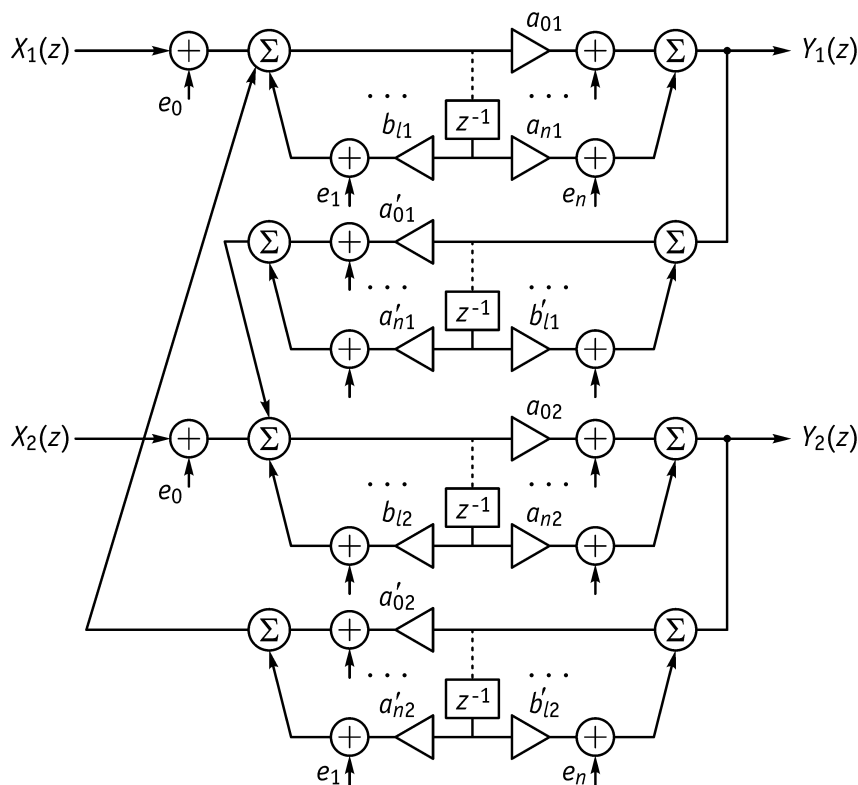


Рис. 2. Шумовая модель ЦФ с ЛОС 1-го типа

Рассмотрим пути прохождения шума от каждого источника в модели ЦФ с ЛОС 1-го типа (рис. 2).

В табл. 1 представлены пути прохождения «шума» от каждого источника.

Таблица 1. Пути прохождения «шума» в ЦФ с ЛОС 1-го типа

№ п/п	Пути прохождения	Условное обозначение	Источник шума	
			1 канал	2 канал
1	$H_1(z)$	$H_1(z)$	АЦП ₁ , b_{l1} , a'_{n2}	–
2	$H_2(z)$	$H_2(z)$	–	АЦП ₂ , b_{l2} , a'_{n1}
3	$H_1(z) \cdot H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_2(z)$	$H_3(z)$	АЦП ₁ , b_{l1}	a'_{n2}
4	$H_2(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_1(z)$	$H_4(z)$	a'_{n1}	АЦП ₂ , b_{l2}
5	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_2(z)$	$H_5(z)$	–	a_{n1} , b'_{l1}
6	$H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_1(z)$	$H_6(z)$	a_{n2} , b'_{l2}	–
7	$H(z) = 1$	1	a_{n1}	a_{n2}

На основании табл. 1 и формул (1) – (5) можно получить импульсные характеристики $h_1(n)$, $h_2(n)$, $h_3(n)$, $h_4(n)$, $h_5(n)$, $h_6(n)$, соответствующие передаточным функциям $H_1(z)$, $H_2(z)$, $H_3(z)$, $H_4(z)$, $H_5(z)$, $H_6(z)$ (табл. 1).

Дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от АЦП с учетом (5) будет равна:

1 канал

$$\sigma_{\text{АЦП1}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) \right]; \quad (6)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{АЦП2}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) \right], \quad (7)$$

где $b_{\text{АЦП1}}$, $b_{\text{АЦП2}}$ – длина разрядной сетки двоичного кода АЦП.

Дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от умножителей:

1 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[(L_1 + N'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + L_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) + N'_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) + (L'_2 + N_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_6^2(n) + N_1 \right]; \quad (8)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[(L_2 + N'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + L_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) + N'_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) + (L'_1 + N_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_5^2(n) + N_2 \right]. \quad (9)$$

Из формул (6) – (9) следует, что дисперсия шума на выходе ЦФ с ЛОС будет определяться суммой дисперсий отдельных составляющих, причём наибольший вклад в дисперсию шума на выходе вносят умножители.

3. Шумовая модель цифрового фильтра с ЛОС 2-го типа

Рассмотрим теперь ЦФ с ЛОС 2-го типа (рис. 3).

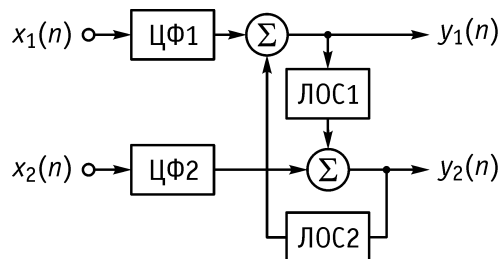


Рис. 3. Схема ЦФ с ЛОС 2-го типа

По аналогии со схемой ЦФ с ЛОС 1-го типа построим шумовую модель схемы 2-го типа (рис. 4).

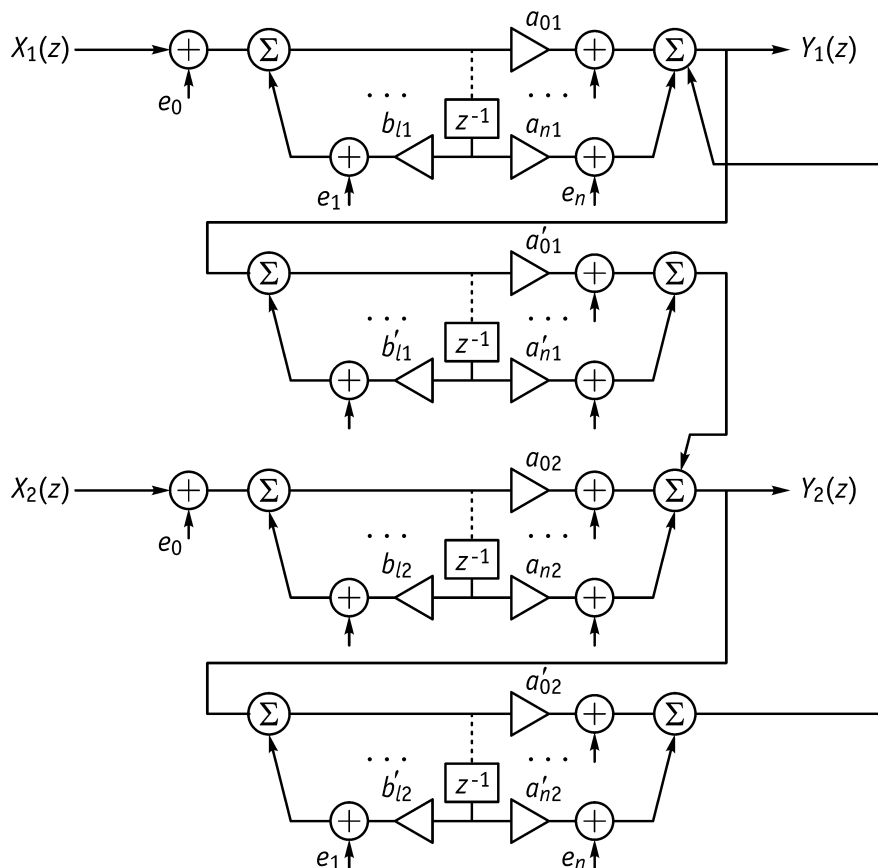


Рис. 4. Шумовая модель ЦФ с ЛОС 2-го типа

В табл. 2 представлены пути прохождения «шума» от каждого источника.

Таблица 2. Пути прохождения шума в ЦФ с ЛОС 2-го типа

№ п/п	Пути прохождения	Условное обозначение	Источник шума	
			1 канал	2 канал
1	$H_1(z)$	$H_1(z)$	АЦП ₁ , b_{l1}	–
2	$H_2(z)$	$H_2(z)$	–	АЦП ₂ , b_{l2}
3	$H_1(z) \cdot H_{\text{ЛОС1}}(z)$	$H_3(z)$	–	АЦП ₁ , b_{l1}
4	$H_2(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z)$	$H_4(z)$	АЦП ₂ , b_{l2}	–
5	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_1(z)$	$H_5(z)$	АЦП ₁ , b_{l1}	–
6	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_2(z)$	$H_6(z)$	–	АЦП ₂ , b_{l2}
7	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z)$	$H_7(z)$	a_{n1} , b'_{l1}	a_{n2} , b'_{l2}
8	$H(z) = 1$	1	a_{n1} , a'_{n2}	a_{n2} , a'_{n1}
9	$H_{\text{ЛОС1}}(z)$	$H_8(z)$	–	a_{n1} , b'_{l1} , a'_{n2}
10	$H_{\text{ЛОС2}}(z)$	$H_9(z)$	a_{n2} , b'_{l2} , a'_{n1}	–

При этом дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от АЦП будет равна:

1 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_5^2(n) \right] + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n); \quad (10)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_6^2(n) \right] + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n). \quad (11)$$

Дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от умножителей равна:

1 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[L_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + L_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) + L_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_5^2(n) + \right. \\ \left. + (N_1 + L'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_7^2(n) + (N_2 + L'_2 + N'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_9^2(n) + (N_1 + N'_2) \cdot 1 \right]; \quad (12)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[L_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + L_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) + L_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_6^2(n) + \right. \\ \left. + (N_2 + L'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_7^2(n) + (N_1 + L'_1 + N'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_8^2(n) + (N_2 + N'_1) \cdot 1 \right]. \quad (13)$$

Анализ уравнений (10) – (13) показывает, что дисперсия шума на выходе ЦФ существенно увеличивается по сравнению с 1-й схемой за счет дополнительного увеличения путей прохождения шума и суммарной дисперсии шума умножителей и увеличения дисперсии от шумов АЦП.

4. Шумовая модель цифрового фильтра с ЛОС 3-го типа

Рассмотрим ЦФ с ЛОС 3-го типа, изображенного на рис. 5.

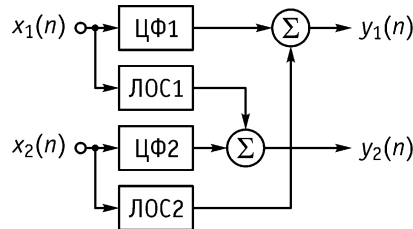


Рис. 5. Схема ЦФ с ЛОС 3-го типа

По аналогии с предыдущими моделями определим шумовую модель ЦФ этого типа (рис. 6).

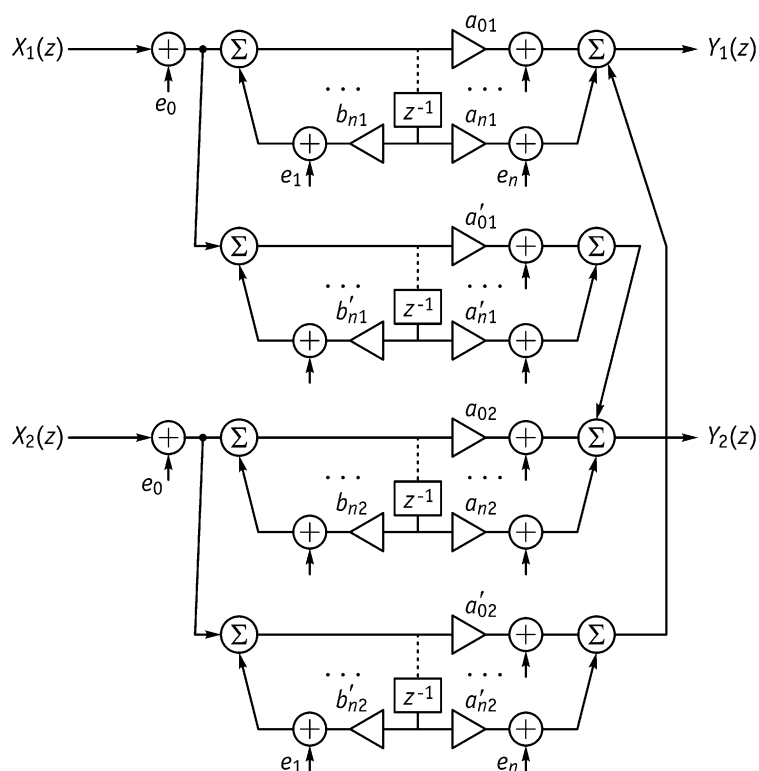


Рис. 6. Шумовая модель ЦФ с ЛОС 3-го типа

В табл. 3 приведены пути прохождения «шума» от каждого источника для данной модели.

Таблица 3. Пути прохождения шума в ЦФ с ЛОС 3-го типа

№ п/п	Пути прохождения	Условное обозначение	Источник шума	
			1 канал	2 канал
1	$H_1(z)$	$H_1(z)$	АЦП ₁ , b_{n1}	–
2	$H_2(z)$	$H_2(z)$	–	АЦП ₂ , b_{n2}
3	$H_{\text{ЛОС1}}(z)$	$H_3(z)$	–	АЦП ₁ , b_{n1} , b'_{n1}
4	$H_{\text{ЛОС2}}(z)$	$H_4(z)$	АЦП ₂ , b_{n2} , b'_{n2}	–
5	$H(z) = 1$	1	a_{n1} , a'_{n2}	a_{n2} , a'_{n1}

Дисперсии шума на выходе каждого канала от АЦП будут равны:

1 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n); \quad (14)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n). \quad (15)$$

Дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от умножителей определяется уравнением:

1 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[L_1 \sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + (L_2 + L'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) + (N_1 + N'_2) \cdot 1 \right]; \quad (16)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{умн}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{умн}}})^2}{12} \left[L_2 \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + (L_1 + L'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) + (N_2 + N'_1) \cdot 1 \right]. \quad (17)$$

Анализ уравнений (14) – (17) показывает, что шумы АЦП в схемах 1 и 3 при одинаковых разрядных сетках примерно одинаковы и меньше, чем во 2-й схеме, а шумы умножителей в 3-й схеме существенно меньше, чем в предыдущих схемах. Это происходит за счет уменьшения путей прохождения шума, что приводит к существенному уменьшению суммарной дисперсии шума на выходе ЦФ с ЛОС 3-го типа.

5. Шумовая модель цифрового фильтра с ЛОС 4-го типа

В заключение рассмотрим схему ЦФ с ЛОС 4-го типа (рис. 7).

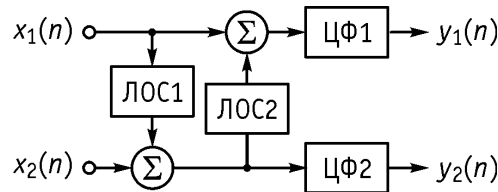


Рис. 7. Схема ЦФ с ЛОС 4-го типа

Шумовая модель данного фильтра изображена на рис. 8.

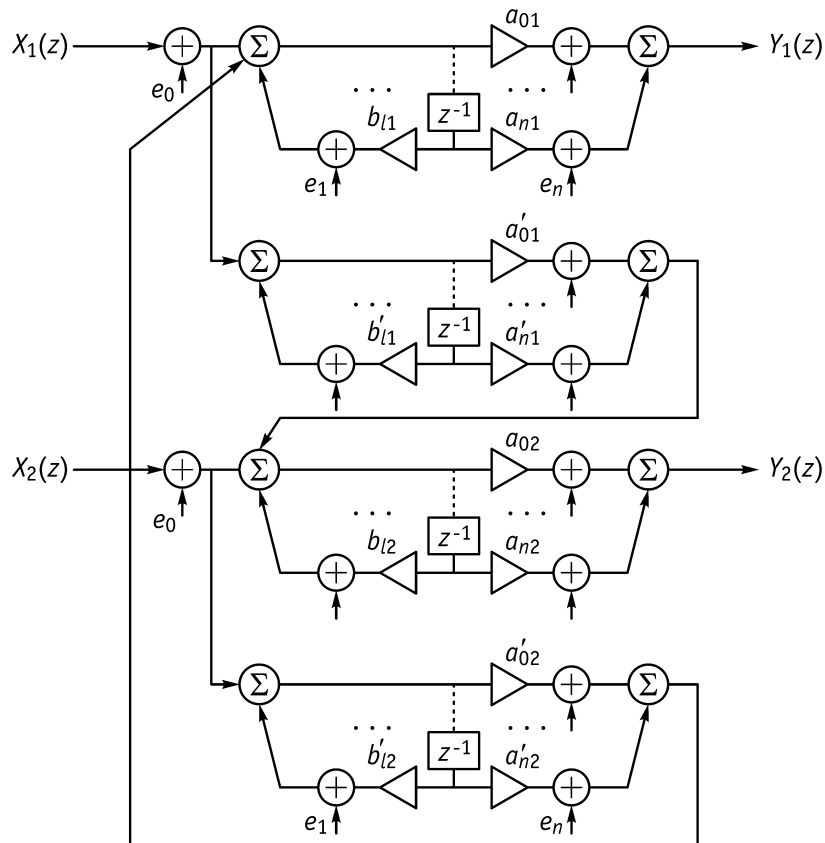


Рис. 8. Шумовая модель ЦФ с ЛОС 4-го типа

В табл. 4 сведены пути прохождения «шума» от каждого источника.

Таблица 4. Пути прохождения шума в ЦФ с ЛОС 4-го типа

№ п/п	Пути прохождения	Условное обозначение	Источник шума	
			1 канал	2 канал
1	$H_1(z)$	$H_1(z)$	$\text{АЦП}_1, b_{n1}, a'_{n2}$	–
2	$H_2(z)$	$H_2(z)$	–	$\text{АЦП}_2, b_{n2}, a'_{n1}$
3	$H_2(z) \cdot H_{\text{ЛОС1}}(z)$	$H_3(z)$	–	$\text{АЦП}_1, b_{n1}, a'_{n2}, b'_{n1}$
4	$H_1(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z)$	$H_4(z)$	$\text{АЦП}_2, b_{n2}, b'_{n2}, a'_{n1}$	–
5	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_1(z)$	$H_5(z)$	$\text{АЦП}_1, b_{n1}, b'_{n1}, a'_{n2}$	–
6	$H_{\text{ЛОС1}}(z) \cdot H_{\text{ЛОС2}}(z) \cdot H_2(z)$	$H_6(z)$	–	$\text{АЦП}_2, b_{n2}, b'_{n2}, a'_{n1}$
7	$H(z) = 1$	1	a_{n1}	a_{n2}

Дисперсия шума на выходе каждого канала от различных источников определяется уравнениями:

1 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_5^2(n) \right] + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n); \quad (18)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{АЦП2}}})^2}{12} \left[\sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + \sum_{n=0}^{\infty} h_6^2(n) \right] + \frac{(2^{-b_{\text{АЦП1}}})^2}{12} \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n). \quad (19)$$

Дисперсия шума на выходе каждого канала в отдельности от умножителей:

1 канал

$$\sigma_{\text{УМН}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{УМН}}})^2}{12} \left[(L_1 + N'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_1^2(n) + (L_2 + L'_2 + N'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_4^2(n) + \right. \\ \left. + (L_1 + L'_1 + N'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_5^2(n) + N_1 \cdot 1 \right]; \quad (20)$$

2 канал

$$\sigma_{\text{УМН}}^2 = \frac{(2^{-b_{\text{УМН}}})^2}{12} \left[(L_2 + N'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_2^2(n) + (L_1 + L'_1 + N'_2) \sum_{n=0}^{\infty} h_3^2(n) + \right. \\ \left. + (L_2 + L'_2 + N'_1) \sum_{n=0}^{\infty} h_6^2(n) + N_2 \cdot 1 \right]. \quad (21)$$

Анализ уравнений (18) – (21) показывает, что в данной схеме дисперсия шума АЦП при прочих равных условиях больше, чем дисперсия шума АЦП в схеме 1 и схеме 3, и одинакова с дисперсией шума АЦП в схеме 2. Дисперсия шума от умножителей в схеме 4 значительно

выше, чем в схемах первых трёх моделей, что приводит к существенному увеличению дисперсии на выходе ЦФ с ЛОС этого типа.

Анализируя рассмотренные шумовые модели, следует отметить, что в схеме 4-го типа шумы от источников a'_{n1} и a'_{n2} имеют циклические пути $H_{ЛОС1}(z) \cdot H_{ЛОС2}(z) \cdot H_2(z)$ и $H_{ЛОС1}(z) \cdot H_{ЛОС2}(z) \cdot H_1(z)$, то есть дисперсия шума в такой схеме будет расти. Из рассмотренных схем наиболее оптимальной с точки зрения минимума дисперсии шума на выходе является 3-я схема.

6. Заключение

Исследованы четыре шумовые модели для типовых одноуровневых рекурсивных ЦФ с ЛОС.

Рассмотрены пути прохождения «шумов» в ЦФ с ЛОС. Получены «шумовые уравнения» для фильтров разных типов, учитывающие эффекты квантования в АЦП и умножителях прямых каналов ЦФ и каналов ЛОС.

Проведён сравнительный анализ различных схем реализации ЦФ с ЛОС с точки зрения их шумовых характеристик. Показано, что дисперсия шума на выходе всех схем будет определяться суммой дисперсий АЦП и умножителей, причём наибольший вклад в уравнения выходного «шума» вносят умножители. При этом показано, что минимальная дисперсия шума в АЦП будет в схеме ЦФ с ЛОС 1-го и 3-го типа, а максимальная – в схеме ЦФ 4-го типа.

В схеме 4-го типа будет также максимальный уровень «шумов» от умножителей за счёт сложных циклических путей прохождения шумов.

Наиболее оптимальной с точки зрения минимизации шумов на выходе рекурсивного ЦФ с ЛОС является схема 3, имеющая минимальные пути прохождения шума по каналам ЦФ с ЛОС.

Литература

1. Бакалов В.П., Черных Ю.С. Использование принципа латеральных связей для обработки дискретных сигналов. // Вестник СибГУТИ – 2012, № 1, с. 43-50.
2. Бакалов В.П., Субботин Е.А. Исследование влияния шумов латеральных связей на помехоустойчивость систем обработки дискретных сигналов // Вестник СибГУТИ – 2014, № 2, с. 42-49.
3. Бакалов В.П., Субботин Е.А. Оптимизация многомерных информационно-измерительных систем – Новосибирск: Наука – 2009, 456 с.
4. Бакалов В.П., Дмитриков В.Р., Крук Б.И. Основы теории цепей / Под ред. проф. Бакалова В.П. – М.: Горячая линия – Телеком – 2013, 596 с.
5. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.П. и др. Цифровая обработка сигналов: Справочник – М.: Радио и связь – 1985, 312 с.
6. Рабинер У., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов – М.: Мир – 1978, 878 с.

Статья поступила в редакцию 13.04.2015

Бакалов Валерий Пантелеевич

д.т.н., профессор, зав. кафедрой ТЭЦ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», тел. 286-80-25,
e-mail: bvp@sibsutis.ru.

Субботин Евгений Андреевич

к.т.н., доцент, директор УРТИСИ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», тел. (343)-242-14-83.

Черных Юлия Сергеевна

ст. преподаватель кафедры ТЭЦ ФГОБУ ВПО «СибГУТИ», тел. 286-80-25.

About noise models of digital filters with lateral couplings

V.P. Bakalov, E.A. Subbotin, Y.S. Chernyh

In this article, the noise models of recursive digital filters (DF) with lateral feedbacks (LFBs) are presented. The models of four typical schemes DF with LFBs, taking into account the effects of quantization in the individual nodes of the digital filter and rounding errors are considered. "Noise equations" for the noise dispersion at the output of each channel from analog-to-digital converters (ADCs) and multipliers for each of the schemes DF with LFBs are obtained. A comparative analysis of noise models for each scheme implementation of DF with LFBs is conducted.

Keywords: digital filters, lateral feedbacks, noise models, noise equations, noise dispersion.