

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ СИГНАЛА НА ФОНЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Паршин А.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры РТУ Рязанского государственного радиотехнического университета им. В.Ф. Уткина, e-mail: parshin.a.yu@rsreu.ru

EFFECTIVENESS EVALUATION OF THE SIGNAL PROCESSING ALGORITHM AT THE BACKGROUND OF LOW-FREQUENCY NOISE BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Parshin A.Yu.

The widespread use of communication systems with low capacity leads to the development of methods for organizing communication channels using ultra-narrowband signals. A special feature of the signal processing is the significant influence of low-frequency noise. One of the most dangerous are the noises of active devices such as flicker noise and "popcorn" noise, which have a non-Gaussian properties. It is necessary to develop algorithms for processing ultra-narrow-band signals at the background of low-frequency noises, taking into account the non-Gaussian properties. This article is devoted to adaptive signal processing at the background of low-frequency noises of various nature. A mixture of thermal, flicker noise and "popcorn" noise is considered as an interference. It is required to analyze the effectiveness of adaptive algorithms for processing ultra-narrowband signals at the background of low-frequency noise. The features of the application of various low-frequency noise models are considered: Leeson model, Du Pre-van der Zyl model, a model based on a system of differential equations. The research uses a model based on a system of differential equations and describes a method for estimating the variance, kurtosis coefficient and effective width of the flicker noise spectrum from the observed mixture of low-frequency and thermal noise. The adaptation of the model parameters is performed both by modeling low-frequency noise in the form of a Gaussian value and using measured data from a flicker noise generator in the form of an operational amplifier. This approach makes it possible to adapt the signal processing algorithm when evaluating noise parameters in the absence of a useful signal. The application of the algorithm will reduce the influence of low-frequency noise of active devices operating both in transmitter and receiver.

Key words: low-frequency noise, flicker noise, «popcorn» noise, non-Gaussian model, optimal processing, signal-to-noise ratio.

Ключевые слова: низкочастотный шум, фликкер-шум, «попкорн»-шум, негауссовская модель, оптимальная обработка, отношение сигнал/шум.

Введение

Одним из направлений развития беспроводных сенсорных сетей и устройств Интернета вещей является применение сверхузкополосных сигналов. При условии малости необходимого объема передаваемой информации сигналы с малой шириной спектра являются эффективным методом обеспечения связи при частотном разделении каналов [1]. Процесс обработки сверхузкополосных сигналов связан с переносом спектра сигнала на околонулевую несущую частоту. При преобразовании значительное влияние на результат оказывают низкочастотные шумы. Источником шумов является как сам принимаемый сигнал, так и гетеродин, а также усилительный низкочастотный тракт. Принимаемый сигнал и колебание гетеродина содержат фазовые шумы, связанные с действием дробовых и фликкерных шумов генераторных транзисторов и усилительных цепей. Аналогичные шумы сопровождают усилительный процесс в низкочастотных усилительных схемах. Таким образом, в квадратурных каналах формируется низкочастотный процесс, состоящий из узкополосного сигнала и шумовой компоненты. При дальнейшей цифровой обработке предлагается проводить оценку параметров шумов с целью их фильтрации и компенсации.

В работе рассматривается влияние низкочастотных

Широкое применение систем связи с низкой пропускной способностью обуславливает развитие методов организации каналов связи с использованием сверхузкополосных сигналов. Особенностью обработки является значительное влияние низкочастотных шумов. К одним из наиболее опасных относятся шумы активных приборов – фликкер-шум и «попкорн»-шум, имеющие негауссовских механизм формирования. Необходима разработка алгоритмов обработки сверхузкополосных сигналов на фоне низкочастотных шумов с учетом негауссовских свойства шума. Статья посвящена адаптивной обработке сигналов, принимаемых на фоне действия низкочастотных шумов различной природы. В качестве помехового воздействия рассматривается смесь теплового, фликкер-шума и «попкорн»-шума. Требуется провести анализ эффективности адаптивных алгоритмов обработки сверхузкополосных сигналов на фоне низкочастотного шума. Рассмотрены особенности применения различных моделей низкочастотных шумов: модели Лисона, Дю Пре-ван дер Зила, модель на основе системы дифференциальных уравнений. При проведении исследований используется модель на основе системы дифференциальных уравнений. Описана методика оценки дисперсии, коэффициента эксцесса и эффективной ширины спектра фликкер-шума по наблюдаемой смеси низкочастотного и теплового шума. Адаптация параметров моделей выполняется как при моделировании низкочастотного шума в виде гауссовской величины, так и на основе измеренных данных с генератора фликкер-шума в виде операционного усилителя. Данный подход позволяет выполнять адаптацию алгоритма обработки сигнала при оценке параметров шума при условии отсутствия полезного сигнала. Применение алгоритма позволит снизить влияние низкочастотных шумов активных приборов, действующих как на стороне передатчика, так и в гетеродинах радиоприемных устройств.

шумов со спектральной плотностью мощности обратно пропорциональной частоте. К ним относят фликкер-шумы, «попкорн»-шумы и фазовые шумы высокочастотных сигналов генераторов. Для них при уменьшении частоты спектральная плотность мощности увеличивается по закону $S(f) \cong 1/f^\alpha$, где α – показатель степени, определяемый свойствами источника шума [2-4]. Шумовой процесс является случайным, следовательно, для его описания и формирования модели необходимо использовать аппарат математической статистики. Вид спектральной плотности мощности обратно пропорциональный частоте с дробным показателем степени указывает на негауссовость шумовых процессов и необходимость подбора соответствующей модели шума для разработки адаптивного алгоритма обработки сигналов. Действие низкочастотных шумов так же влияет на процесс обработки принимаемых сигналов на многоантенную систему и требует учета в разрабатываемых алгоритмах [5].

Известные модели низкочастотных шумов

Одним из методов построения моделей низкочастотных шумов является формирование такого процесса, который имеет форму спектральной плотности мощности близкую к $1/f^\alpha$. Известен ряд моделей [6-9], обладающих указанным свойством.

Модель Дю Пре-Ван дер Зила [6] предполагает формирование шумового процесса в спектральной области в виде наложения спектров лоренцианов, отличающихся значением времени релаксации τ_0 и частотой среза $f_c = 1/(2\pi\tau_0)$. В работе [7] спектры релаксационных процессов предлагается описать выражением

$$\overline{\delta P^2} | \tau_0 = \overline{\delta P_i^2} \frac{2}{\pi f} \int_a^b \tau_0 W_{\tau_0}(\tau_0) \frac{d(2\pi f \tau_0)}{(2\pi f \tau_0)^2}.$$

где $\overline{\delta P_i^2}$ – полная мощность случайного процесса с определенным временем релаксации, W_{τ_0} распределение времен релаксации. В качестве модели шума может использоваться последовательность импульсов, распределенная по закону Пуассона [8]. Последовательность имеет вид

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k F(1 - t_k, \tau_k),$$

где $F(t, \tau)$ элементарный импульс, k – номер импульса, x_k амплитуда импульса, τ_k длительность, K полное число импульсов за время существования процесса. Спектральная плотность мощности рассчитывается путем расчет Фурье-преобразования элементарного импульса с учетом угловых частот $\omega = 2\pi f$

$$F(\omega, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T (t, \tau) e^{-j\omega t} dt. \text{ Использование предела}$$

при $T \rightarrow \infty$ необходимо для оценки мощности импульсов с частотой повторения близкой к нулю.

Действие фазовых шумов приводит к изменению спектра несущей частоты генератора, а также спектральной плотности мощности из-за фазовых искажений сигнала синтезатора в зависимости от частоты фа-

зовых искажений. На низких частотах фазовых искажений несущей передатчика или опорного сигнала гетеродина спектральная плотность фазового шума описывается выражением $S_{\text{syn}} = S_e + 20 \lg N + S_{\text{det}}$, где S_e – нормированная спектральная плотность мощности фазового шума генератора; $N = f_{\text{VCO}}/f_e$ – коэффициент деления петли фазовой автоподстройки частоты; S_{det} – нормированная спектральная плотность мощности фазового шума генератора, определяемая шумами фазового детектора. Спектральная плотность мощности гетеродина $L(\Delta f)$ при отстройке частоты от несущей на величину δf определяется моделью Лисона [9] в логарифмическом выражении:

$$L(\delta f) (\text{дБм/Гц}) = P_s (\text{дБм}) - P_l (\text{дБм}) - 10 \lg \delta f (\text{Гц}) - q_{\text{MIN}} (\text{дБ}),$$

где P_s – мощность входного сигнала; P_l – мощность блокирующей помехи при отстройке по частоте от несущей на величину δf ; q_{MIN} – минимальное требуемое отношение сигнал-шум по мощности.

В работе [10] приводится описание низкочастотного процесса при помощи системы дифференциальных уравнений (СДУ). Рекуррентность СДУ является преимуществом при моделировании. Особенностью рассматриваемой СДУ является нелинейность зависимости коэффициента сноса от значения шума. Таким образом параметр сноса меняется в широком диапазоне значений, в результате формируется спектр, обратно пропорциональный частоте. Так как данная СДУ получается нелинейной, то формируемый ФШ имеет негауссовский закон распределения вероятностей. Выражение имеет вид:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -h(x(t)) + b\xi(t),$$

$t \in R = (-\infty, \infty)$ – время, $\xi(t)$ – белый гауссовский шум с единичной интенсивностью, $b = \text{const} > 0$. На коэффициент сноса накладываются условия, что $h(0) = 0$ и

$a = \frac{dh(0)}{dx} > 0$. Тогда в работе [10] предлагается рас-

смотреть выражение вида $h(x) = \frac{ax}{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 x^2}$, в котором

$\frac{c^2}{2a} < 1$ и $1 > \frac{3c^2}{2a} \rightarrow 1$, что определяет условие длительных корреляций и близость формируемого процесса к фликкер-шуму. При выполнении компьютерного моделирования удобно привести СДУ к дискретному виду с шагом времени Δt путем интегрирования методом Эйлера:

$$x(k) = x(k-1) - \frac{a_1 x(k-1)}{1 + a_2 x^2(k-1)} + a_3 w(k), \quad k = 1, \dots, K,$$

где $w(k)$ – независимый гауссовский процесс, a_1, a_2, a_3 – априорно неизвестные параметры модели. Ширина спектра формируемого процесса определяется пара-

Описанная в [10] модель фликкер-шума предполагает выбор коэффициентов с целью приближения формируемого процесса к реальным характеристикам фликкер-шума. Одним из путей выбора коэффициентов является непосредственное измерение характеристик по реализации фликкер-шумового процесса и дальнейший пересчет в коэффициенты модели. Для оценки сформирован фликкер-шумовой процесс, отсчеты которого методом аналого-цифрового преобразования получены для дальнейшей обработки. Так как процесс содержит как составляющую фликкер-шума, так и тепловой шум, то наблюдаемые отсчеты имеют вид $y_i = x_i + \xi_i$, где x_i – составляющая фликкер-шума, ξ_i – компонента теплового шума. Предлагается по реализации наблюдаемого процесса выполнить оценку дисперсии D_x , эффективной ширины спектра α_x и коэффициента процесса E_x .

Обработка данных с макета генератора фликкер-шума

С целью оценки эффективности алгоритма обработки в реальных условиях экспериментальным

путем получена последовательность отсчетов шумового процесса. Генератором шума является устройство на операционном усилителе (ОУ) средней точности КР140УД8В [11,12]. Принципиальная схема устройства представлена на рисунке 1. Вход ОУ не подключен к источнику сигнала, входным воздействием является постоянное напряжение питания. С целью ограничения спектра шума используется фильтр нижних частот. Коэффициент передачи схемы составляет 220 раз. Формирование последовательности выполняется при помощи платы ввода данных LCard L440.

Вид наблюдаемого процесса после преобразования в цифровую форму показан на рис. 2, где видно, что записанный процесс содержит компоненты, значительно отличающиеся по уровню от общего наблюдаемого шума. По характеру эти компоненты соответствуют описанному в [6, 7] «попкорн»-шуму. Анализ и оценка параметров шумового процесса, не содержащего указанных компонент, показал, что в этом случае процесс близок к гауссовскому. Таким образом можно считать, что негауссовские свойства наблюдаемого процесса в основном определяются скачками «попкорн»-шума.

Так как наблюдается составной процесс, то необходимо выполнить оценку параметров смеси фликкер-шума и «попкорн»-шума отдельно от сопровождающего ее теплового шума. Дисперсия наблюдаемого процесса оценивается путем непосредственного расчета по име-

ющимся отсчетам $\hat{D}_y = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k^2$. Можно представить,

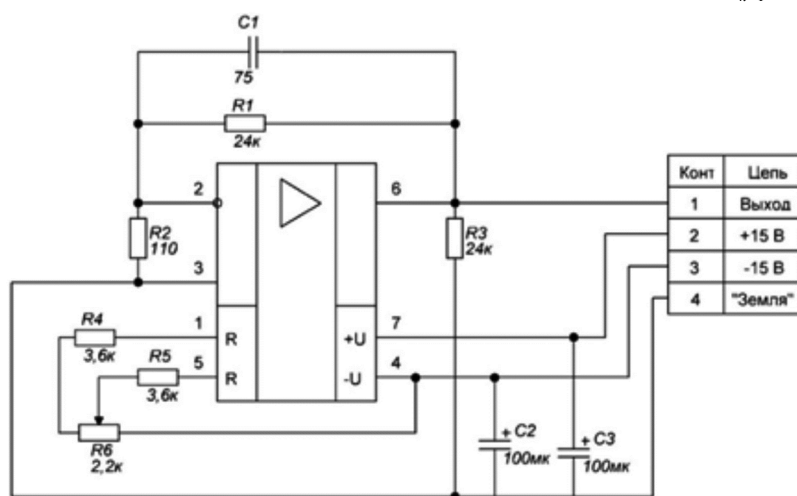


Рис. 1. Принципиальная схема генератора фликкер-шума

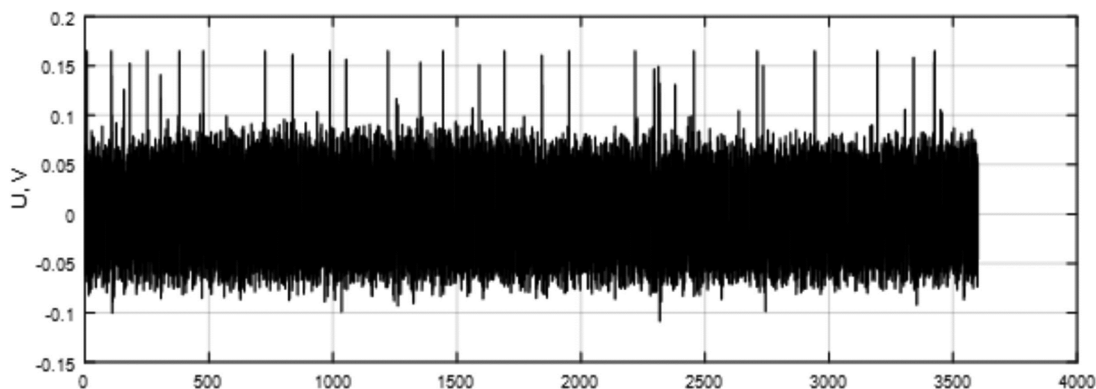


Рис. 2. Временная реализация низкочастотного шума

что дисперсия наблюдаемого процесса равна сумме дисперсий фликкер-шума и теплового шума $\hat{D}_y = \hat{D}_x + \hat{D}_\xi$. Предположим, что тепловой шум имеет значительно меньшую мощность по сравнению с фликкер-шумом, тогда можно допустить, что $\hat{D}_y \approx \hat{D}_x$. По результатам расчета дисперсии наблюдаемого процесса $\hat{D}_y = \hat{D}_x = 3,96 \cdot 10^{-4} \text{ В}^2$.

Так как тепловой шум моделируется гауссовским процессом, то коэффициент эксцесса $E_\xi = 0$. Фликкер-шум имеет гауссовскую природу формирования, однако, содержит составляющие, отличающиеся от гауссовских процессов. Таким образом можно допустить, что $\hat{E}_y \approx \hat{E}_x$. Выражение для расчета коэффициента эксцесса имеет вид

$$E = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(x_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \right)^4}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(x_n - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \right)^2 \right)^2} - 3.$$

Наблюдаемый процесс имеет коэффициент эксцесса $\hat{E}_y = \hat{E}_x = 1,514$.

Для расчета эффективной ширины спектра используется спектральное представление полученных отсчетов $\hat{\alpha}_y = \frac{1}{S_{\text{макс}}} \int_0^{f_s} S(f) df$. По графическому представлению определяется уровень 0,5 плотности мощности, которому соответствует значение $\hat{\alpha}_y = \hat{\alpha}_x = 125 \text{ Гц}$.

Полученные параметры пересчитываются в коэффициенты модели по выражениям $a_1 = \hat{\alpha}_x \Delta t$, $a_2 = \left(\frac{c}{b} \right)^2 = \frac{c_x}{2D_x}$, $a_3 = b\sqrt{\Delta t} = \sqrt{2D_x a_1}$, $D_x = \frac{b^2}{2a}$ – дисперсия гауссовского шума при $c = 0$, a, b, c – априорно неизвестные параметры модели. Коэффициент нелинейности a_2 измеряется в долях обратной дисперсии фликкер-шума, поэтому для удобства нормировки введем параметр $c_x = 2a_2 D_x$, характеризующий степень негауссовости ФШ.

Для повышения эффективности компенсации фликкер-шума предлагается выполнить оценку параметров шума с учетом свойств теплового шума. Оценка дисперсии теплового шума выполняется по спектральному представлению процесса в области высоких частот. Положим, что спектральная плотность мощности теплового шума равномерна на всей исследуемой области частот. Тогда оценка дисперсии равна интегрированному значению по полосе частот наблюдаемого процесса $\hat{D}_\xi = 1,22 \cdot 10^{-6} \text{ В}^2$. Следовательно, дисперсия фликкер-шума определяется разностью $\hat{D}_x = \hat{D}_y - \hat{D}_\xi = 3,96 \times 10^{-4} - 1,22 \cdot 10^{-6} = 3,95 \cdot 10^{-4} \text{ В}^2$.

При использовании модели на основе системы дифференциальных уравнений можно продемонстрировать зависимость коэффициента эксцесса формиру-

емого процесса от параметра модели c_x (рис. 3). Тогда путем оценивания коэффициента эксцесса полученного экспериментальным путем процесса можно оценить значение параметра c_x для модели в алгоритме обработки.

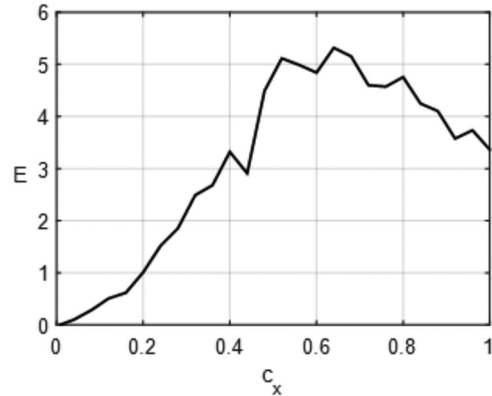


Рис. 3. Зависимость коэффициента эксцесса формируемого сигнала от параметра c_x

Для процесса, полученного с генератора низкочастотного шума, значение коэффициента эксцесса $\hat{E}_x = 1,514$. Следовательно значение параметра $c_x = 0,25$.

Алгоритм фильтрации негауссовского фликкер-шума. Анализ отношения сигнал-шум методом моделирования

При решении задачи компенсации низкочастотного шума предлагается использовать оценочно-корреляционно-компенсационный подход [13]. Необходимо выполнить фильтрацию помехи в виде низкочастотного шума на фоне теплового шума с последующей компенсацией помехи при помощи сформированного помехового процесса с учетом полученных оценок. Достаточной статистикой для многих задач обработки сигналов является логарифм отношения правдоподобия, полученный ОКМ методом:

$$z = \frac{2}{N_0} \int_0^T (y(t) - \hat{x}_0(t)) (s_0 + \hat{x}_1(t) - \hat{x}_0(t)) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T (s_0 + \hat{x}_1(t) - \hat{x}_0(t))^2 dt,$$

где $\hat{x}_0(t)$ – оценка фликкер-шума при отсутствии сигнала, $\hat{x}_1(t)$ – оценка фликкер-шума при наличии сигнала, s_0 – детерминированный сигнал.

Для оценки эффективности проводимой обработки сигнала выполняется расчет апостериорного отношения сигнал-шум по моментам достаточной статистики:

$$q = \frac{\bar{z}^2}{(\bar{z} - \bar{z})^2} \approx \frac{\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} z_n}{\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} z_n^2 - \left(\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} z_n \right)^2},$$

где N_s – число реализаций.

Проведем сравнение оптимального и квазиоптимальных алгоритмов обработки. Особенностью квазиоптимальных алгоритмов является снижение требова-

ний к вычислительной мощности устройства обработки при некотором снижении эффективности.

1) Оптимальная статистика

$$z = \frac{2}{N_0} \int_0^T (y(t) - \hat{x}_0(t))(s_0 + \hat{x}_1(t) - \hat{x}_0(t)) dt - \frac{1}{N_0} \int_0^T (s_0 + \hat{x}_1(t) - \hat{x}_0(t))^2 dt.$$

2) Нелинейная компенсация фликкер-шума и оптимальная корреляционная обработка

$$z = \frac{2}{N_0} \int_0^T (y(t) - \hat{x}_0(t))(s_0 + \hat{x}_1(t) - \hat{x}_0(t)) dt.$$

3) Нелинейная компенсация фликкер-шума и согласованная (линейная) корреляционная обработка

$$z = \frac{2}{N_0} \int_0^T (y(t) - \hat{x}_0(t)) s_0 dt.$$

4) Согласованная корреляционная обработка

$$z = \frac{2}{N_0} \int_0^T y(t) s_0 dt.$$

В работе [14] рассматривался алгоритм обработки сигнала на фоне фликкер-шума без учета влияния «попкорн»-шума. Ввиду в основном гауссовского характера формирования фликкер-шума основные полученные характеристики были близки к параметрам алгоритмов обработки гауссовских процессов. Данная работа использует при обработке низкочастотный процесс, содержащий смесь теплового, фликкер и «попкорн»-шума.

На рис. 4 показаны результаты обработки сигнала на фоне смоделированного низкочастотного процесса и теплового шума с различными значениями дисперсии

D_x и отношения помеха-шум p . Обозначения на графике: «ЕСС» – оценочно-корреляционно-компенсационный алгоритм, «comp+optim» – нелинейная компенсация фликкер-шума и оптимальная корреляционная обработка, «comp+match» – нелинейная компенсация фликкер-шума и согласованная (линейная) корреляционная обработка, «match» – согласованная корреляционная обработка.

По результатам моделирования отмечается преимущество оценочно-корреляционно-компенсационного алгоритма при малом числе отсчетов и большой дисперсии теплового шума. При этом алгоритм согласованной фильтрации показывает наихудший результат обработки.

На рис. 5 представлены результаты обработки сигнала на фоне низкочастотной помехи, сформированной по экспериментальным данным.

По результатам обработки доказана эффективность оценочно-корреляционно-компенсационного алгоритма при обработке сигнала на фоне низкочастотной помехи и теплового шума. При этом заметна зависимость качества обработки от погрешности оценки показателя модели c_x для низкочастотного процесса.

Заключение

Результаты моделирования алгоритмов обработки показывают общее преимущество оценочно-корреляционно-компенсационного алгоритма. Моделирование проводится для различных длительностей сигнала, что позволяет учесть влияние низкочастотной помехи на большем диапазоне частот. Таким образом, на больших длительностях рассматриваемого сигнала снижается ширина его спектра, что усиливает негативное влияние помехи. Проверка работоспособности алгоритма на экс-

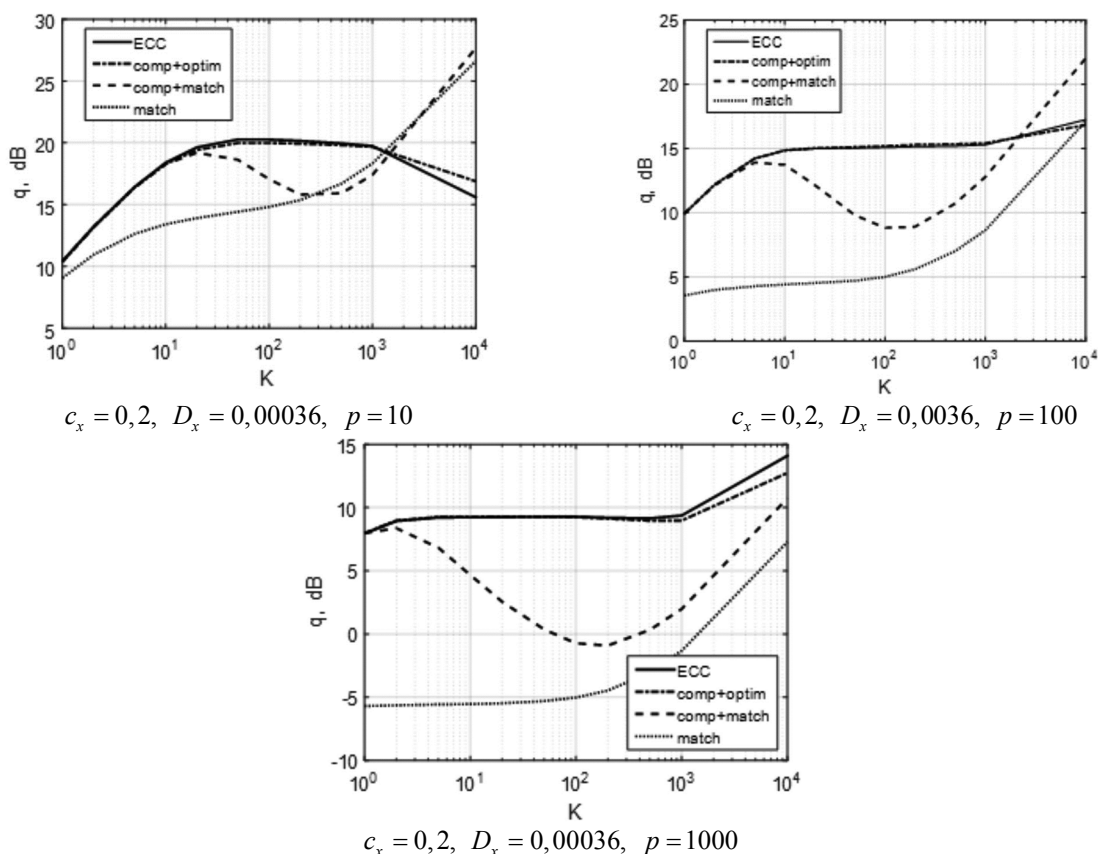


Рис. 4. Результаты обработки сигнала на фоне смоделированного низкочастотного процесса

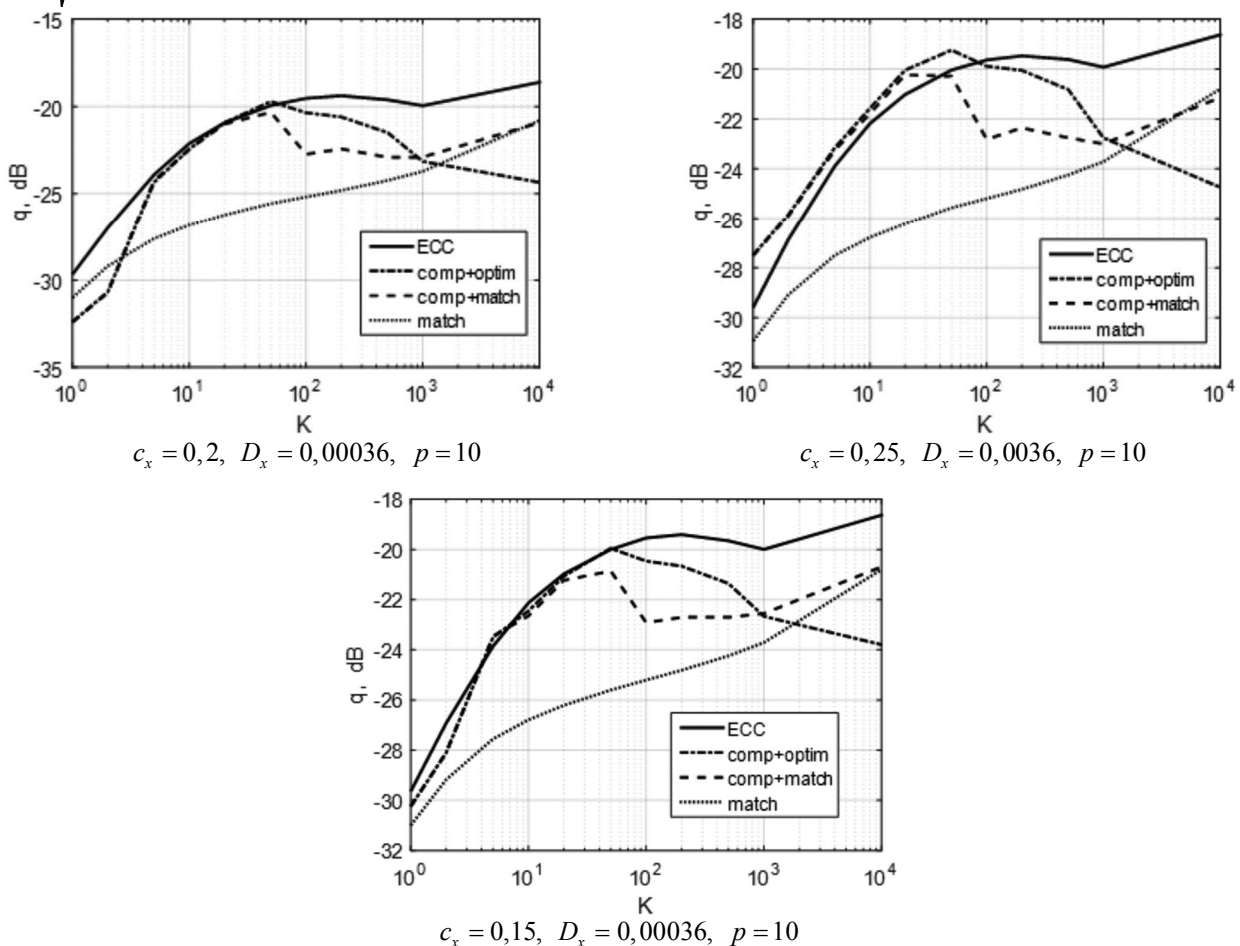


Рис. 5. Результаты обработки сигнала на фоне низкочастотного процесса, полученного экспериментальным путем

периментально полученных реализациях смеси фликкер шума и «попкорн»-шума подтвердила эффективность применения модели низкочастотных шумов на основе системы дифференциальных уравнений, а также алгоритма оценочно-корреляционно-компенсационной обработки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант РНФ 24-29-20249, <https://rscf.ru/en/project/24-29-20249/> в ООО «Лаборатория Сфера».

Литература

1. Mangalvedhe N., Ratasuk R., Ghosh A. NB-IoT Deployment Study for Low Power Wide Area Cellular IoT. IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication. 2016.
2. Kroell H., Korb M., Weber B., Willi S., Huang Q. Maximum-Likelihood Detection for Energy-Efficient Timing Acquisition in NB-IoT. IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops. 2017.
3. Culter C.D. A review of the theory and estimation of fractal dimension. Nonlinear time series and chaos, vol. 1, Dimension estimation and models. 1993. С. 1-107.
4. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: топология выборки. М.: Университетская книга. 2005. 848 с.
5. Паршин Ю.Н. Влияние пространственной корреляции на эффективность оптимизации пространственной структуры мно-

гоантенной системы при разнесенном приеме / Ю.Н. Паршин, А.В. Ксендзов. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Рязань: РГРТУ, 2006, вып. 19. с. 54-62.

6. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах: пер. с англ. М.: Мир, 1986. 399 с.

7. Ван дер Зил, А. Шум (источники, описание, измерение) / А. Ван дер Зил. М.: Сов. радио, 1973 (перевод с английского). 178 с.

8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга первая / Б.Р. Левин. М.: Сов. радио, 1969. 752 с.

9. Leeson. D.B. A simple model of feedback oscillator noise spectrum. Proceedings IEEE, vol. 54, pp. 329-330. 1966.

10. Mamontov Yu.V., Willander M. Long asymptotic correlation time for non-linear autonomous Ito's stochastic differential equation. Nonlinear Dynamics 12: pp. 399-411, 1997.

11. Паршин А.Ю. Экспериментальная оценка параметров негауссовского фликкер-шума. Вестник РГРТУ. 2020. № 73, с. 19-25.

12. Паршин А.Ю., Мазаев Г.П. Исследование негауссовских свойств низкочастотных шумов операционных усилителей. Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, Рязань: РГРТУ. 2022. № 82.

13. Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паршин Ю.Н. Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника. 2014. 632 с.

14. Паршин А.Ю. Экспериментальное исследование адаптивной обработки сигналов на фоне фликкер шума/ А.Ю. Паршин, Ю.Н. Паршин. Радиотехника. 2020. Т. 84. № 11(21). С. 72-81.