

УДК 537.86:621.396.96

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НЕГАУССОВСКОГО ФЛИККЕР-ШУМА

А. Ю. Паршин, к.т.н., доцент кафедры РТУ РГРТУ, Рязань, Россия;
orcid.org/0000-0003-0110-3645, e-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

Приводится экспериментальное исследование возможности приема и обработки сверхмаломощных сигналов в системах передачи информации Интернета вещей. Особенностью рассматриваемых систем является малая скорость передачи информации, что приводит к эффективному использованию сигналов с малой шириной спектра. При обработке узкополосные сигналы переносятся по частоте в область сильного воздействия низкочастотного фликкер-шума. Целью работы является решение задачи оценки и компенсации влияния фликкер-шума при помощи теоретического моделирования шума для создания алгоритма компенсации, а также оценки параметров шума по экспериментально полученным реализациям. По реализациям фликкер-шума выполняется оценка негауссовского характера путем вычисления коэффициента эксцесса.

Ключевые слова: фликкер-шум, негауссовская модель, эксперимент, оптимальная обработка, отношение сигнал-шум.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-19-25

Введение

Применение сверхузкополосных сигналов с шириной спектра несколько сотен герц в системах передачи данных Интернета вещей позволяет повысить энергоэффективность приемо-передающих устройств при условии низкой скорости обмена информацией [1]. Кроме того, обеспечивается частотное разделение каналов связи между большим числом одновременно взаимодействующих устройств. Однако при демодуляции сверхузкополосный сигнал попадает в низкочастотную область спектра, где значительное влияние оказывает фликкер-шум. Спектральная плотность мощности низкочастотного шума возрастает при уменьшении частоты, при этом рост демонстрирует квазиасимптотическое поведение, называемое «инфракрасной катастрофой». Таким образом, актуальной является задача эффективной фильтрации низкочастотного шума при одновременном воздействии тепловых шумов.

В работе [2] приведено исследование самоподобных свойств низкочастотных процессов. Закон, описывающий поведение спектральной плотности мощности при частотах близких к нулевой, имеет вид $S(f) \approx \text{const} \times 1/f^\beta$. Для обработки сигналов, имеющих свойство дробной меры, распространены методы обработки на основе вероятностных моделей и теории оптимальных статистических решений. Кроме того, в работе [2] приведен статистический подход к описанию свойств фрактальных объектов и сигналов. Таким образом, при обработке сигналов на фоне самоподобных процессов возможно применение методов статистической радиотехники.

Рассмотренная в [2] модель фрактального броуновского движения для описания фликкер-шума (ФШ) является процессом с гауссовским распределением вероятностей. В то же время исследование ФШ в работах [4-6] показывает наличие выраженных негауссовских характеристик шума. Дальнейшее изучение различных алгоритмов обработки сигналов в работах [7-9] привело к использованию алгоритмов нелинейной обработки, обеспечивающих эффективный прием и демодуляцию сверхузкополосных и сверхмаломощных сигналов. Тем не менее, априорная неопределенность относительно параметров ФШ снижает эффективность обработки, что приводит к необходимости использования метода адаптации.

Целью данной **работы** является описание алгоритма адаптивной фильтрации ФШ на фоне теплового шума с обучением и без него, а также анализ эффективности адаптивной подстройки параметров с использованием экспериментально полученных реализаций ФШ.

Модель негауссовского фликкер-шума и уравнение фильтрации

Для описания модели ФШ негауссовского вида широко используются стохастические дифференциальные уравнения. В работах [4-6] показано преимущество данного подхода, которое заключается в рекуррентном характере моделей и возможности эффективного физического обоснования. При записи уравнений используется тот факт, что спектр ФШ вида $1/f^\beta$ может быть получен путем моделирования шума с помощью СДУ, в котором коэффициент сноса нелинейно зависит от значения шума. Так как данное СДУ получается нелинейным, то формируемый ФШ имеет негауссовский закон распределения вероятностей.

В работе [6] рассматривается моделирование ФШ как решение СДУ, в котором коэффициент сноса нелинейно зависит от значения шума:

$$\frac{dx(t)}{dt} = -h(x(t)) + bn(t), \quad (1)$$

где $t \in R = (-\infty, \infty)$ – время, $n(t)$ – белый гауссовский шум с интенсивностью 1, $b = \text{const} > 0$.

Коэффициент сноса $h(x)$ есть нечетная функция, для которой выполняются условия: $h(0) = 0$,

$a = \frac{dh(0)}{dx} > 0$, существует положительная действительная величина L такая, что $|h(x)| \leq L|x|$

для всех значений x . В работе [6] рассматривается коэффициент сноса вида

$$h(x) = \frac{ax}{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 x^2}, \quad (2)$$

для которого получены условия существования инвариантной во времени плотности распределения вероятностей $\frac{c^2}{2a} < 1$. Определены также условия, при которых стационарные решения СДУ существуют и имеют более длительные корреляции, чем при линейной функции $h(x)$

$$1 > \frac{3c^2}{2a} \rightarrow 1.$$

Для реализации оценочно-корреляционно-компенсационного (ОКК) алгоритма обработки сигнала на фоне помехи и шума [3] необходимо произвести фильтрацию этой помехи на фоне белого шума со спектральной плотностью мощности N_0 по критерию минимума среднего квадрата ошибки:

$$y(t) = x(t) + \sqrt{\frac{N_0}{2}} \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – белый гауссовский шум с единичной интенсивностью.

Так как модель ФШ задана в виде СДУ (1), (2), то для получения алгоритма фильтрации используем теорию фильтрации марковских процессов [3, 10]. Уравнения для фильтрационной оценки и апостериорной дисперсии при использовании модели (1), (2) имеют вид [10]:

$$\frac{d\hat{x}(t)}{dt} = -\frac{a\hat{x}(t)}{1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 \hat{x}^2(t)} + V(t) \frac{2}{N_0} [y(t) - \hat{x}(t)], \quad (3)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = -2a \left[\frac{1 - \left(\frac{c}{b}\right)^2 \hat{x}^2(t)}{\left(1 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 \hat{x}^2(t)\right)^2} \right] V(t) - \frac{2}{N_0} V^2(t) + b^2. \quad (4)$$

Экспериментальная оценка параметров фликкер-шума

Параметры модели на основе СДУ можно эффективно оценить методом эксперимента, который выполняется путем получения реализации фликкер-шума с генератора на операционном усилителе (ОУ) средней точности КР140УД8В. Принципиальная схема генератора фликкер-шума представлена на рисунке 1. На вход ОУ не подается сигнал, подключается только питание на соответствующие контакты. Для установки нулевого напряжения – балансировки – на выходе ОУ используется потенциометр, подключенный к выводам 1 и 5. В цепи обратной связи включен фильтр нижних частот с частотой среза 88 кГц. Частота среза выбирается с целью ограничения низкочастотной области спектра, где сосредоточена спектральная плотность мощности фликкер-шума. Коэффициент передачи схемы составляет 220 раз. Структурная схема стенда для проведения эксперимента показана на рисунке 2.

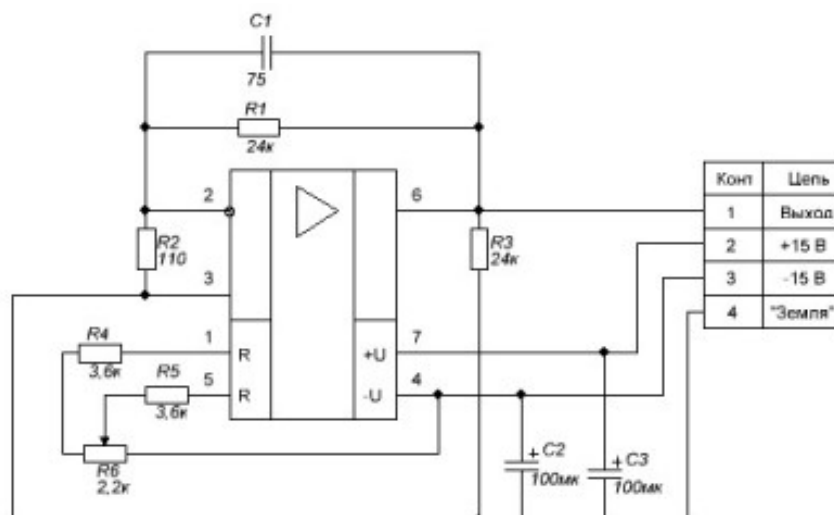


Рисунок 1 – Принципиальная схема генератора фликкер-шума

Figure 1 – Schematic circuit of flicker noise generator

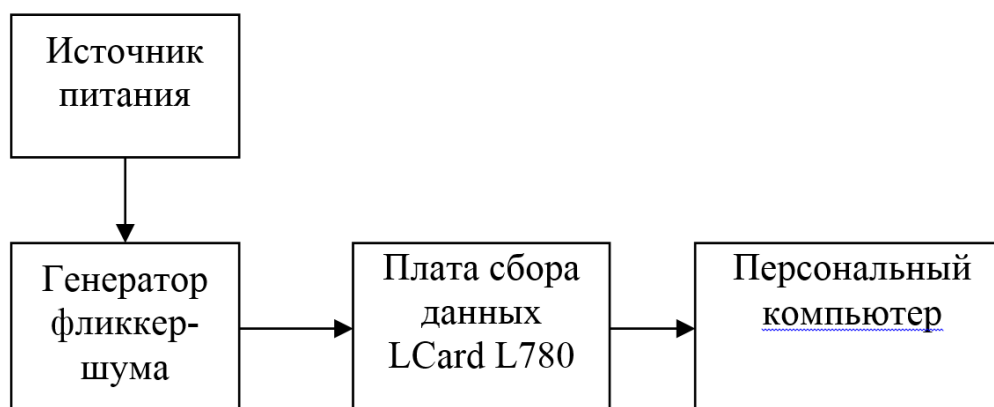


Рисунок 2 – Структурная схема экспериментального стенда

Figure 2 – Schematic structure of test bench

Получена выборка из $K = 10^8$ отсчетов собственного низкочастотного шума операционного усилителя с частотой дискретизации $f_{\text{АЦП}} = 200$ кГц. Для повышения чистоты полученной выборки выделен отрезок из $K_1 = 6 \times 10^7$ отсчетов. Усредненная амплитуда фликкер-шума составляет около 50 мВ.

По данным выборки рассчитан коэффициент эксцесса двумя методами. Первый метод заключается в расчете по временной реализации, второй использует в качестве исходных данных гистограмму отсчетов. Расчет по временной реализации выполняется в соответствии с формулой:

$$E \approx \frac{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(x_k - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k \right)^4}{\left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(x_k - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k \right)^2 \right]^2} - 3 \approx 0,34. \quad (5)$$

Расчеты по временной реализации и гистограмме показали идентичность результатов, что подтверждает достоверность результата. Спектральный анализ экспериментальной реализации фликкер-шума подтверждает обратную зависимость мощности процесса от частоты (рисунок 3).

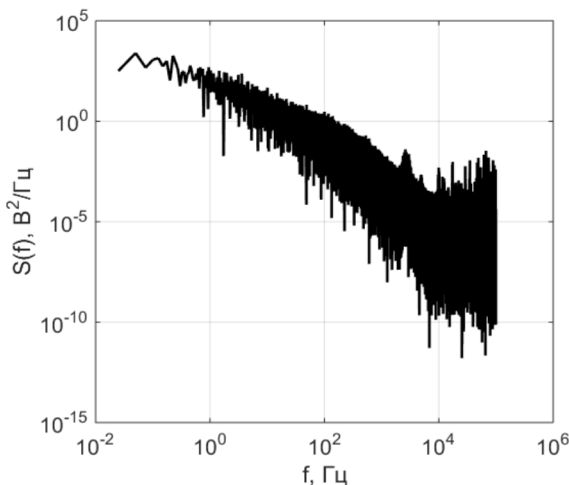


Рисунок 3 – Спектральная плотность мощности реализации фликкер-шума
Figure 3 – Spectral power density of flicker noise sample

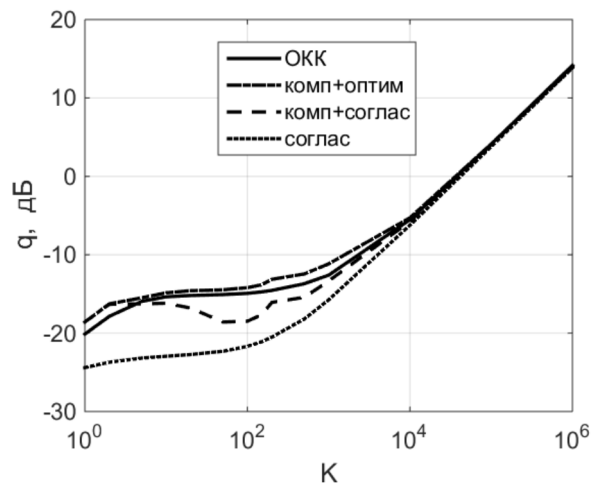


Рисунок 4 – Зависимость отношения сигнал-шум от числа отсчетов
Figure 4 – Signal-to-noise ratio on samples amount dependencies

Применение результатов экспериментального исследования

Решение задачи фильтрации фликкер-шума на фоне тепловых шумов требует использования оцененных параметров порождающего процесса для фликкер-шума в качестве статистики. Оптимальный алгоритм не реализуется ввиду априорной неопределенности относительно этих параметров. Оценка выполняется с применением адаптивного байесовского подхода. Для выполнения фильтрации необходимо знать 4 параметра системы дифференциальных уравнений – спектральную плотность мощности теплового шума N_0 , а также коэффициенты a , b и c .

Спектральная плотность мощности теплового шума N_0 измеряется перед применением алгоритма фильтрации, затем используется в СДУ. Остальные три параметра модели a , b и c необходимо рассчитать исходя из параметров процесса. Рассчитан коэффициент эксцесса по формуле (5), дисперсия негауссовского ФШ:

$$D_x \approx \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left(x_k - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K x_k \right)^2,$$

и параметр β – тангенс угла наклона графика спектральной плотности мощности. Затем выполняется пересчет в параметры модели по методике, описанной в [9]. Оцененные значения параметров подставляются в уравнение вместо точных значений. По наклону графика спектра, построенного в двойном логарифмическом масштабе, определен коэффициент $\beta = 1,05$.

Коэффициент эксцесса $E = 0,34$, полученный по реализации ФШ, пересчитывается по методике работы [9] в параметр $c_x = 0,06$ негауссовской модели ФШ. Рассчитанные по методике работы [9] при данном параметре зависимости отношения сигнал-шум с использованием различных алгоритмов обработки: оптимальный оценочно-корреляционно-компенсационный (ОКК), нелинейная компенсация ФШ и оптимальная корреляционная обработка (комп+оптим), нелинейная компенсация ФШ и согласованная (линейная) корреляционная обработка (комп+соглас), согласованная корреляционная обработка (соглас), приведены на рисунке 4.

Заключение

По результатам экспериментального исследования показано, что полученная реализация обладает ненулевым коэффициентом эксцесса, что доказывает корректность негауссовского подхода к оценке параметров фликкер-шума. Увеличение длительности сигнала K , с одной стороны, повышает энергию сигнала, а с другой стороны переносит спектр сигнала в область спектра ФШ. Первый фактор увеличивает отношение сигнал-шум, а второй, наоборот, приводит к уменьшению отношения сигнал-шум. Проведенный по методике [9] расчет отношения сигнал-шум для алгоритмов обработки сигнала на фоне ФШ показал, что для линейного, согласованного алгоритма уменьшение ширины спектра сигнала смещает спектр в область низких частот, где ФШ более интенсивный, что в значительной степени снижает эффект от увеличения энергии сигнала. В результате при увеличении длительности сигнала эффективность линейной обработки снижается. При негауссовском ФШ с коэффициентом эксцесса $E \approx 0,34$ применение нелинейной компенсации шума существенно, более чем на 20 дБ, повышает отношение сигнал-шум. Таким образом, для параметра нелинейности, соответствующего ФШ операционного усилителя, применение алгоритма с нелинейной компенсацией ФШ приводит к пропорциональному увеличению отношения сигнал-шум при увеличении длительности сигнала при большом объеме выборки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (FSSN-2020-0003).

Библиографический список

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. **Crownover R. M.** Introduction to Fractals and Chaos - Jones and Bartlett. 1995.
3. **Сосулин Ю. Г., Костров В. В., Паршин Ю. Н.** Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М.: Радиотехника. 2014. 632 с.
4. **Kaukalys B., Ruseckas J.** Stochastic nonlinear differential equation generating 1/f noise // Physical Review E 70, 020101(R). 2004.
5. **Kaukalys B., Alaburda M., Ruseckas J.** Modeling non-Gaussian 1/f noise by the stochastic differential equations // Noise and fluctuations: 19th International Conference on Noise and Fluctuations - ICNF 2007, AIP Conf. Proc. 922. 2007. P. 439-442.
6. **Mamontov Y. V., Willander M.** Long Asymptotic Correlation Time for Non-Linear Autonomous Ito's Stochastic Differential Equation // Nonlinear Dynamics 12: P.399-411, 1997. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

7. **Parshin A., Parshin Yu.** Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application // 2019 8nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO) Budva, Montenegro, June 10th-14th 2019, pp. 32-35.

8. **Parshin A., Parshin Yu.** Optimal signal processing algorithm at the background of non-Gaussian flicker noise // ITM Web of Conferences, V. 30, 04016 (2019) 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), Sevastopol, Russia, September 8-14, 2019, <https://doi.org/10.1051/itmconf/201930/04016>. Pp. 1-7. Published online: 27 November 2019.

9. **Паршин А. Ю., Паршин Ю. Н.** Анализ эффективности обработки узкополосного сигнала в присутствии негауссовского фликкер-шума // Радиотехника, 2019, т. 83, № 18, с. 161-167.

10. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. Пер. с англ. М.: Связь, 1976. 496 с.

11. **Сосулин Ю. Г., Паршин Ю. Н.** Нелинейное оценивание стохастических сигналов с адаптацией параметров алгоритмов // Радиотехника и электроника. 1986. Т. 31, № 5. С. 904-910.

12. **Сосулин Ю. Г., Паршин Ю. Н., Гусев С. И.** Адаптация параметров алгоритмов фильтрации случайных процессов методом максимального правдоподобия // Радиотехника. 1999. № 10. С.67-75.

UDC 537.86:621.396.96

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF NON-GAUSSIAN FLICKER-NOISE PARAMETERS

A. Yu. Parshin, Ph.D. (Tech.), assistant professor RSREU, Ryazan, Russia;
orcid.org/0000-0003-0110-3645, e-mail: parshin.a.y@rsreu.ru

*The article deals with the experimental study of the possibility to receive and process ultra-low-power signals in information transfer systems of the Internet of things. A feature of the systems under consideration is low information transfer rate, which leads to efficient usage of signals with small bandwidth. During processing, narrow-band signals are transferred in frequency to the region of strong exposure to low-frequency flicker noise. **The aim of the paper** is to solve the problem of estimating and compendating the effects of flicker noise by means of theoretical modeling of noise to create a compensation algorithm, as well as the estimation of noise parameters based on experimentally obtained implementations. For flicker noise implementations, non-Gaussian character is estimated by calculating the excess factor.*

Key words: flicker noise, non-Gaussian model, experiment, optimal processing, signal-to-noise ratio.

DOI: 10.21667/1995-4565-2020-73-19-25

References

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. **Crownover R. M.** *Introduction to Fractals and Chaos - Jones and Bartlett*. 1995.

3. **Sosulin Yu. G., Kostrov V. V., Parshin Yu. N.** *Ocenochno-korreljacionnaja obrabotka signalov i kompensacija pomeh*. M.: Radiotekhnika. 2014. 632 p. (in Russian)

4. **Kaukalys B., Ruseckas J.** Stochastic nonlinear differential equation generating 1/f noise. *Physical Review E* 70, 020101(R). 2004.

5. **Kaukalys B., Alaburda M., Ruseckas J.** Modeling non-Gaussian 1/f noise by the stochastic differential equations. *Noise and fluctuations: 19th International Conference on Noise and Fluctuations - ICNF 2007, AIP Conf. Proc.* 922. 2007, pp. 439-442.

6. **Mamontov Y. V., Willander M.** Long Asymptotic Correlation Time for Non-Linear Autonomous Ito's Stochastic Differential Equation. *Nonlinear Dynamics* 12: pp.399-411, 1997. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.

7. **Parshin A., Parshin Yu.** Investigation of Efficient Receiving of Ultra Low Power Signal for IoT Application. *2019 8nd Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)* Budva, Montenegro, June 10th-14th 2019, pp. 32-35.

8. **Parshin A., Parshin Yu.** Optimal signal processing algorithm at the background of non-Gaussian flicker noise. *ITM Web of Conferences*, V. 30, 04016 (2019) 29th International Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2019), Sevastopol, Russia, September 8-14, 2019, <https://doi.org/10.1051/itmconf/20193004016>. Pp. 1-7. Published online: 27 November 2019.
9. **Parshin A. Yu., Parshin Yu. N.** Analiz jeffektivnosti obrabotki uzkopolosnogo signala v prisutstvii negaussovskogo flikker-shuma. *Radiotekhnika*. 2019, vol. 83, no. 18, pp. 161-167. (in Russian).
10. **Sejdzh E., Mels Dzh.** *Teorija ocenivaniya i ee primenenie v svyazi i upravlenii*. Per. s angl. Moscow: Svjaz', 1976. 496 p. (in Russian).
11. **Sosulin Yu. G., Parshin Yu. N.** Nelinejnoe ocenivanie stohasticheskikh signalov s adaptaciej parametrov algoritmov. *Radiotekhnika i jelektronika*. 1986, vol. 31, no. 5, pp. 904-910. (in Russian).
12. **Sosulin Yu. G., Parshin Yu. N., Gusev S. I.** Adaptacija parametrov algoritmov fil'tracii sluchajnyh processov metodom maksimal'nogo pravdopodobija. *Radiotekhnika*. 1999, no. 10, pp.67-75. (in Russian).