

Научная статья

УДК: 621.391.8

DOI: [10.34759/trd-2023-128-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-13)

## **ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНЫХ КВАЗИГАРМОНИЧЕСКИХ ПОМЕХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛЕПЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

**Павел Станиславович Тяпкин<sup>1✉</sup>, Николай Афанасьевич Важенин<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

<sup>1</sup>[tjapkinp@yandex.ru](mailto:tjapkinp@yandex.ru)✉

*Аннотация.* В данной работе было проведено исследование возможностей слепых методов обработки сигналов в системах связи при компенсации импульсных помех. Слепые методы основаны на статистиках высоких порядков и работают в условиях многоканального приема. В настоящее время данное направление активно исследуется и внедряется.


Была разработана имитационная модель цифровой радиосистемы передачи информации, целью которой являлось исследование применения алгоритмов слепого разделения сигналов в задачах компенсации импульсных помех, а также анализ влияния гауссовых шумов на качество слепого разделения. В результате

имитационного моделирования было выявлено, что применение методов слепой обработки сигналов при борьбе с импульсными квазигармоническими помехами позволяет добиться энергетического выигрыша в зависимости значений скважности импульсной помехи, нормированной отстройки частоты помехи относительно ширины полосы, битового отношения сигнал-шум и отношения помеха-сигнал. Например, при демодуляции сигнала ФМн-2 в смеси с импульсной квазигармонической помехой, скважностью 0.005 и отношением помеха-сигнал равным 15 дБ, применение алгоритма слепого разделения сигналов SOBI (Second-order blind identification) позволяет добиться энергетического выигрыша относительно демодуляции смеси без слепого разделения при значениях битового отношения сигнал-шум равное 8.1 дБ и выше. Так, например, при этих же параметрах моделирования, при битовом отношении сигнал-шум 13 дБ достигается выигрыш по вероятности битовой ошибки более чем в  $2 \cdot 10^3$  раз.

**Ключевые слова:** слепая обработка сигналов, имитационное моделирование, повышение помехоустойчивости радиоканала, импульсная помеха

**Для цитирования:** Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Повышение помехоустойчивости систем связи в условиях импульсных квазигармонических помех с использованием слепых методов обработки сигналов // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-13)

# INCREASING THE NOISE IMMUNITY OF COMMUNICATION SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF PULSED QUASI-HARMONIC INTERFERENCE USING BLIND SIGNAL PROCESSING METHODS

Pavel S. Tyapkin<sup>1</sup>, Nikolay A. Vazhenin<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

<sup>1</sup>[tjapkinp@yandex.ru](mailto:tjapkinp@yandex.ru)

**Abstract.** In this paper, to compensate impulse noise, we consider the use of blind signal separation methods. Blind methods are based on high-order statistics and operate under multichannel reception conditions. Currently, this direction is being actively researched and implemented in medicine and image processing. A simulation model of a digital radio information transmission system was developed. The purpose of simulation modeling was to study blind signal separation algorithms to compensate for impulse noise, as well as to analyze the effect of Gaussian noise on the quality of blind separation. Blind source separation algorithms have some limitations, such as: number of received sources must be more than number of signals, which must be statistically independent between themselves. As a result of simulation modeling, it was revealed that the use of blind signal processing methods in the fight against pulsed quasi-harmonic interference makes it possible to achieve an energy gain depending on the duty cycle of the pulsed interference, the normalized interference frequency detuning relative to the bandwidth, the bit signal-to-noise ratio and the interference-signal ratio. For example, when demodulating a BPSK signal in a mixture with pulsed quasi-harmonic noise, a duty cycle of 0.005 and an

interference-to-signal ratio of 15 dB, the use of the SOBI (Second-order blind identification) blind source separation algorithm makes it possible to achieve an energy gain with respect to mixture demodulation without blind separation at bit signal-to-noise ratio of 8.1 dB or more. So, for example, with the same simulation parameters, with a bit signal-to-noise ratio of 13 dB, a gain in bit error probability is achieved by more than  $2 \cdot 10^3$  times.

**Keywords:** blind signal processing, simulation modeling, improvement of radio channel noise immunity, impulse noise

**For citation:** Tyapkin P.S., Vazhenin N.A. Improving the noise immunity of communication systems in the transmission of information under conditions of pulsed quasi-harmonic interference using blind signal processing methods. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-13)

## Введение

Повышение устойчивости систем связи к воздействию на них различного рода случайных или преднамеренных помех остается актуальной задачей. В данной работе для уменьшения влияния подобных помех рассматривается применение методов слепого разделения сигналов. Слепые методы обработки сигналов основаны на применении статистик высоких порядков [1]. В настоящее время методы слепой обработки сигналов уже применяются в медицине для получения более точных результатов электрокардиограмм и энцефалограмм [2]. Также ведутся

исследования по применению слепых методов в радиосистемах передачи информации, радиолокации, в технологиях распознавания речи и изображений.

Целью данной работы является исследование применимости алгоритмов слепой обработки сигналов в системах связи при обработке сигналов в смесях с квазигармоническими помехами и тепловыми шумами приемника.

### **Слепая обработка сигналов**

Слепая обработка сигналов (blind signal processing, BSP) является сравнительно новым направлением цифровой обработки сигналов, где при обработке сигнала могут быть неизвестны его некоторые характеристики, например, конкретный вид сигнала, характеристики канала связи, через который был передан данный сигнал [1], [5]. Первые методы и алгоритмы слепой обработки сигналов появились в 1990-х годах. Термин «Слепая обработка сигналов» впервые упоминался в работе Jutten С. и Héroult J. [3], где была поставлена задача разделения нескольких сигналов, формируемых центральной нервной системой. Ими же был предложен простой адаптивный алгоритм с обратной связью для решения данной задачи.

Большой вклад в развитие направления слепой обработки сигналов внесли Adel Belouchrani [4][5] и Pierre Comon [6][7][8], A. Chichocki и S. Amari [9] [10], L.Duarte [11], A. Hyvarinen и E. Oja [12] [13], K. Abed-Meraim [14], J. F. Cardoso и A. Souloumiac [15], Shi Xizhi [16]. Из отечественных авторов стоит отметить работы Горячкина О.В. [17], Манохина А.Е [18].

Слепую обработку сигналов можно разделить по способу применения на слепое разделение сигналов (blind signal separation, BSS) и слепое выделение сигналов (blind signal extraction, BSE). Задачей слепого разделения сигналов является разделение  $N$  сигналов из  $M$  принятых смесей, в то время как алгоритмы слепого выделения сигналов позволяют «извлечь» один сигнал из  $M$  принятых смесей.

Алгоритмы слепого разделения сигналов можно классифицировать по способу реализации на 4 группы [1]:

1. Алгоритмы, базирующиеся на применении функции потерь для оценки независимости и негауссовости сигналов в принятых смесях. Применение таких алгоритмов предполагает, что сигналы в смесях статистически независимы между собой. Данные алгоритмы для решения задачи слепого разделения сигналов применяют статистики высоких порядков. Данные алгоритмы не подходят в случае, когда среди разделяемых сигналов в смесях присутствует более одного выделяемого сигнала с гауссовским законом распределения. Метод, объединяющий подобные алгоритмы, называется анализом независимых компонент.

2. Алгоритмы, использующие статистики второго порядка. Данные алгоритмы могут применяться для разделения сигналов при наличии гауссовских шумов в принятых смесях. Ограничениями применения данных алгоритмов является присутствие в смесях нескольких статистически зависимых между собой сигналов.

3. Алгоритмы, использующие статистики второго порядка для нестационарных сигналов. Данные алгоритмы применяют для разделения

нестационарных сигналов, которые изменяются во времени. Данные алгоритмы могут разделять «цветные» (присутствующие не во всем диапазоне частот), сигналы с одинаковым спектром, но не могут применяться для разделения сигналов с одинаковыми свойствами нестационарности.

4. Алгоритмы, использующие пространственное временное, частотное, частотно-временное разделение сигналов.

Иногда совмещают несколько способов реализации с целью получения более универсального алгоритма разделения сигналов с разными статистическими свойствами в случае наличия шумов и помех в канале.

### **Анализ независимых компонент**

Метод анализа независимых компонент (ICA, Independent Component Analysis) является наиболее часто применяемым методом для решения задачи слепого разделения нескольких источников из принятых смесей. Данный метод, как правило, основан на использовании статистик второго и четвертого порядков [16][19].

Рассмотрим случай разделения  $m$  принятых смесей из  $n$  сигналов без шумов в канале. В этом случае  $j$ -я смесь на входе блока слепой обработки сигналов:

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^n \omega_{ji} x_i(t) \quad i=1,2,\dots,n; \quad j=1,2,\dots,m \quad (1)$$

где:

$y_j(t)$  —  $j$ -я смесь на входе блока слепой обработки сигналов.

$x_i(t)$  —  $i$ -й информационный сигнал.

$\omega_{ji}$  — весовой коэффициент.

В матричном виде:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W} \cdot \mathbf{X} \quad (2)$$

Сущность метода анализа независимых компонент заключается в определении  $\mathbf{W}^{-1}$  такого, что:

$$\mathbf{Y} \cdot \mathbf{W}^{-1} = \mathbf{X} \quad (3)$$

Таким образом, все существующие алгоритмы ИСА направлены на определение  $\mathbf{W}^{-1}$  и различаются в подходе к её определению. Все ИСА-алгоритмы являются итеративными, с последовательным приближением.

При разделении сигналов методом анализа независимых компонент существуют следующие ограничения [9]:

- Количество сигналов  $N$  в принятых смесях должно быть не больше количества принятых смесей  $M$ .
- В принятых смесях должно быть не более одного выделяемого сигнала с нормальным законом распределения.



- Выделяемые сигналы в смесях должны быть статистически независимыми между собой. Два сигнала являются статистически независимыми между собой, если их формирующие их генераторы не зависят друг от друга.

Для исследования применимости алгоритмов слепой обработки сигналов в радиосистемах передачи информации была разработана имитационная модель.

### **Имитационная модель канала связи**

Имитационная модель написана на языке Octave [20][21][22]. Задача имитационной модели — оценить возможности применения слепых методов разделения сигналов из принятых смесей с квазигармонической импульсной помехой в зависимости от величин отношения помеха-сигнал и отношения сигнал-шум. Отношение помеха-сигнал (ОПС) задается как отношение пиковой мощности помехи к пиковой мощности сигнала, измеренных на длительности периода  $T_n$  импульсной помехи.

$$P_{SI} = \frac{P_{interf}}{P_{signal}} \quad (4)$$

Упрощенная блок-схема имитационной модели приведена на рисунке 1.

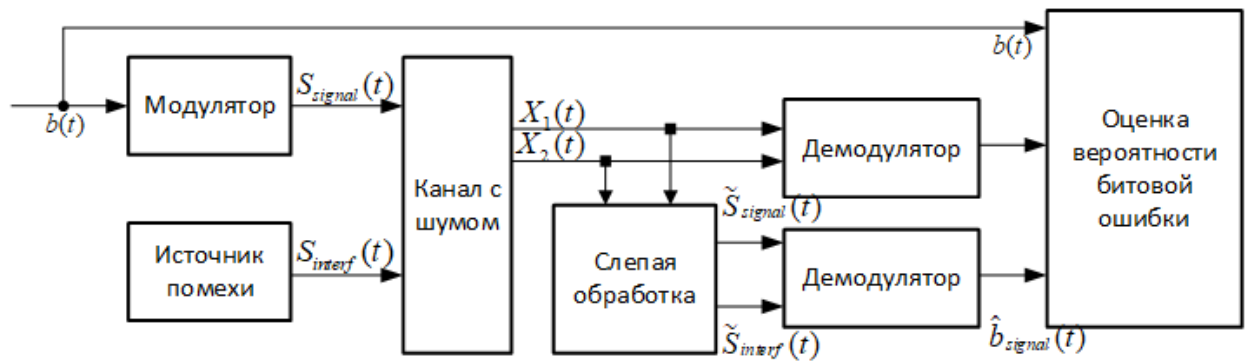


Рисунок 1 — Упрощенная блок-схема имитационной модели.

Пояснения к рисунку 1:

Сигнал  $b(t)$  представляет собой псевдослучайный битовый поток.

Блок «Модулятор» — модулятор ФМн- $N$ . В данной работе  $N = 2$ .

Блок «Источник помехи» формирует импульсный квазигармонический сигнал.

Мощности сигнала и помехи определяются отношением помеха-сигнал. Скважность импульсной помехи не изменяется за время имитационного моделирования.

Блок «Канал с шумом» предназначен для имитации принятых смесей путем сложения входного сигнала и помехи. К полученным смесям добавляется аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). Пример полученной смеси сигнала с импульсной помехой приведен на рисунке 2. Импульсная помеха на рисунке отображена не в полном масштабе по оси ординат: в противном случае возникнут трудности с отображением информационного сигнала.



Рисунок 2 — Смесь сигнала с импульсной помехой.

Сигналы  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ , полученные после прохождения через канал связи, математически можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} X_1(t) &= A_{11} \cdot S_{signal}(t) + A_{12} \cdot S_{interf}(t) + n_1(t) \\ X_2(t) &= A_{21} \cdot S_{signal}(t) + A_{22} \cdot S_{interf}(t) + n_2(t) \end{aligned} \quad (5)$$

где:

$X_1(t)$  и  $X_2(t)$  — сигналы, полученные на выходе канала связи. Представляют собой смесь сигнала, помехи и АБГШ.

$S_{signal}(t)$  — информационный сигнал.

$S_{interf}(t)$  — импульсная квазигармоническая помеха.

$A_{xx}$  — коэффициенты ослабления сигнала и помехи.

Блок «Слепая обработка» представляет собой алгоритм слепой обработки, на вход которого поступают две смеси  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ . В качестве алгоритма слепой обработки выбран SOBI (Second Order Blind Identification [16]).

Блоки «Демодулятор» предназначены для демодуляции сигналов. Первый блок подключен напрямую к выходу канала связи и, таким образом, демодулирует сигналы  $X_1(t)$  и  $X_2(t)$ .

На рисунке 3 приведены эпюры сигналов, полученные в результате демодуляции принятой смеси без применения алгоритмов слепого разделения

сигнала. Сверху-вниз: информационный сигнал  $b(t)$ ; сигнал ФМн-2 в смеси с импульсной помехой на радиочастоте (на входе канала связи); сигнал ФМн-2 в смеси с импульсной помехой на входе демодулятора; демодулированное информационное сообщение; битовая ошибка, полученная как модуль разности переданного информационного сообщения и принятого.

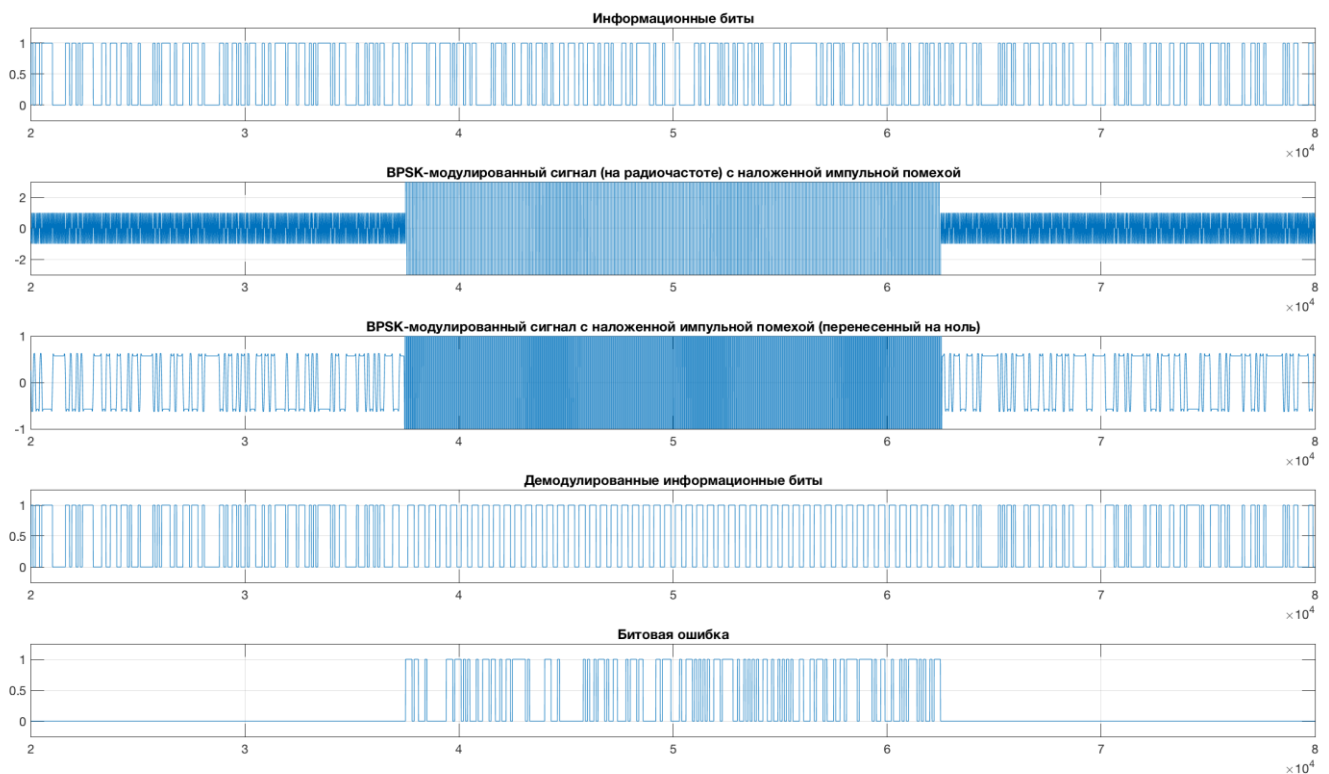


Рисунок 3 — Эпюры сигналов на различных этапах имитационного моделирования для случая демодуляции сигнала ФМн-2 в смеси с импульсной помехой.

Из рисунка видно, что при демодуляции, из-за влияния импульсной помехи на сигнал, на всей длительности импульсной помехи возникают битовые ошибки.

Второй блок демодулятора подключен к выходу блока слепой обработки сигналов, где образуются выделенные компоненты сигнала  $S_{signal}(t)$  и помехи  $S_{interf}(t)$ . Выделенный сигнал демодулируется, а помеха предварительно детектируется и отбрасывается.

На рисунке 4 приведены эпюры, полученные в результате имитационного моделирования применения алгоритмов слепой обработки сигналов. Сверху-вниз: информационный сигнал  $b(t)$ ; сигнал ФМн-2 в смеси с импульсной помехой на нулевой частоте (перед слепой обработкой); информационный сигнал, выделенный из смеси; выделенная импульсная помеха; демодулированное информационное сообщение; битовая ошибка, полученная как модуль разности переданного и принятого информационного сообщения.

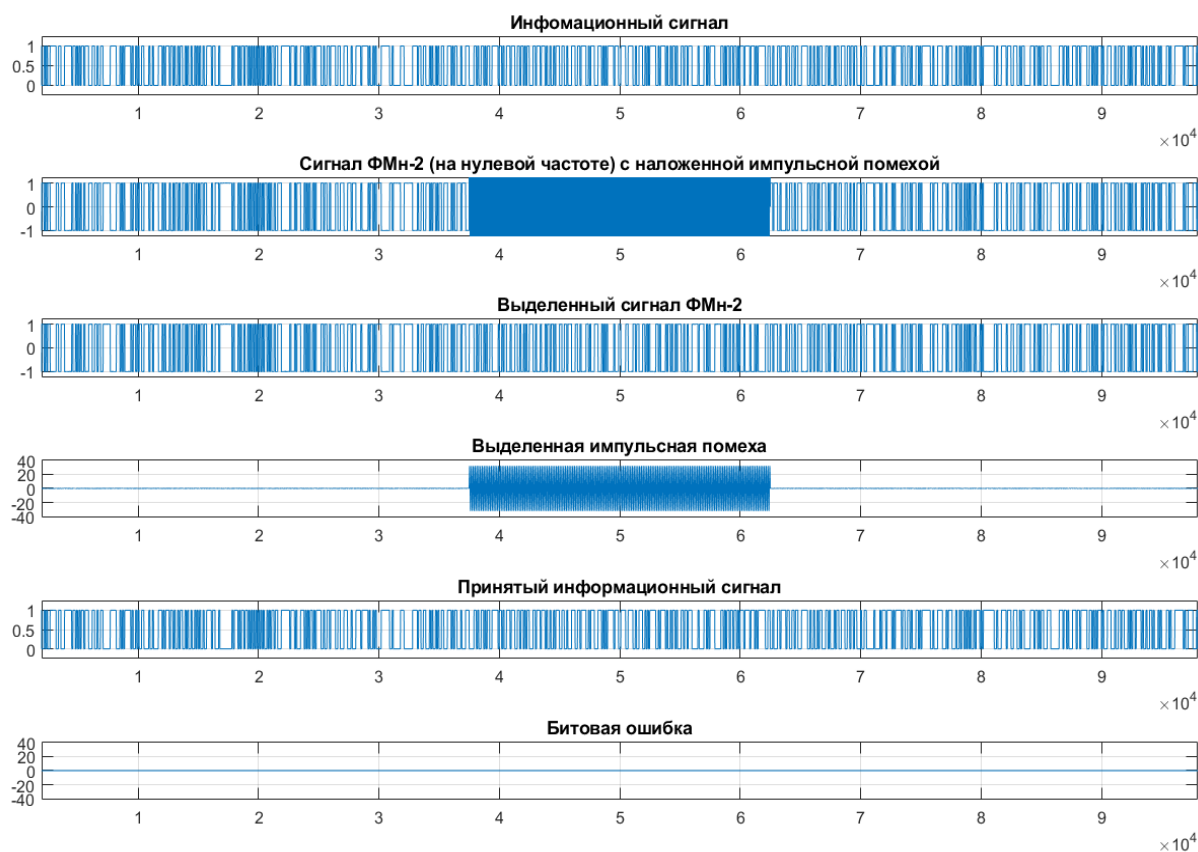


Рисунок 4 — Эпюры сигналов на различных этапах имитационного моделирования для случая демодуляции с импульсной помехой.

На выходе демодуляторов полученные битовые последовательности бит поступают на блок оценки вероятности битовой ошибки, где производится их сравнение с исходным потоком бит  $b(t)$ .

Как видно из рисунка, битовая ошибка в результате демодуляции для выбранных параметров сигнала и помехи после применения слепой обработки сигнала для выбранной длительности реализации равна нулю. Это свидетельствует о корректном разделении информационного сигнала из смеси с импульсной помехой и шумами.

По результатам моделирования были построены график зависимости вероятности битовой ошибки от битового отношения сигнал-шум в зависимости от заданного в модели отношения помеха-сигнал для двух случаев:

- Сигнал в смеси с шумом и импульсной помехой.
- Сигнал с шумом, выделенный из смеси с импульсной помехой с применением алгоритмов слепой обработки.

### **Результаты имитационного моделирования**

На рисунке 5 приведена серия графиков зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал-шум, которые были получены в результате имитационного моделирования. Отношение помеха-сигнал равнялось 15 дБ. Синяя кривая отражает полученные результаты, полученные при демодуляции сигнала в смеси с шумами и импульсной помехой. Красная кривая представляет собой результат демодуляции сигнала после слепой обработки принятых смесей.

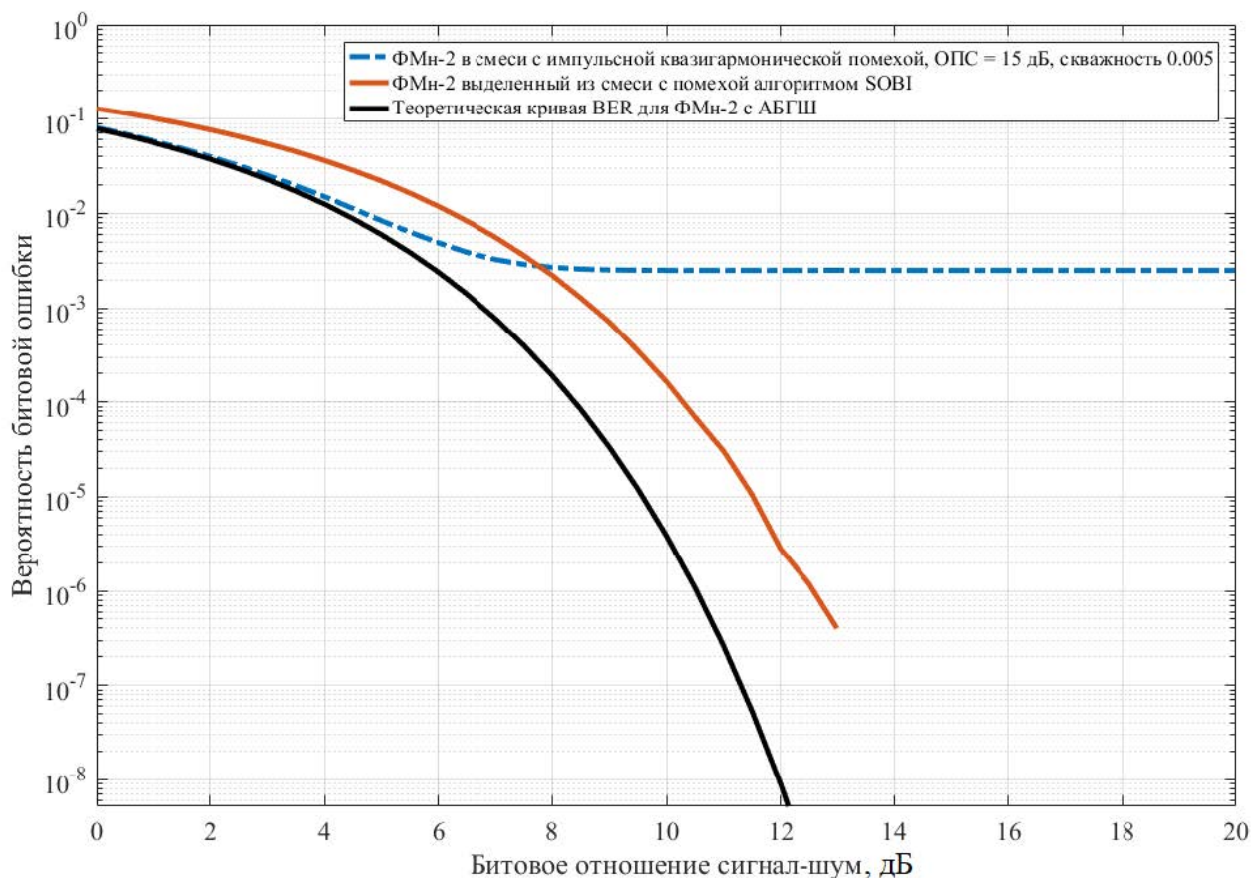


Рисунок 5 — Графики зависимости вероятности битовой ошибки от величины энергетического отношения сигнал-шум для двух случаев демодуляции сигнала ФМн-2.

Из рисунка 5 видно, что при демодуляции смеси с импульсной помехой без слепого разделения, при увеличении битового отношения сигнал-шум вероятность битовой ошибки перестает уменьшаться из-за наличия импульсной помехи. При величинах битового отношения сигнал-шум от 8 дБ и более, вероятность битовой ошибки для заданной скважности помехи остается равной примерно  $2.5 \cdot 10^{-3}$ . При сравнении кривой BER, полученной для случая использования слепого выделения сигнала из смеси с импульсной помехой, с кривой BER без слепого разделения до



отношения сигнал-шум порядка 8 дБ наблюдается энергетический проигрыш, равный примерно 1.7 дБ. Затем, при увеличении отношения сигнал шум выше 8 дБ, наблюдается резкий энергетический выигрыш от применения методов слепого разделения сигналов. Преимущества применения методов слепой обработки сигналов при борьбе с импульсными квазигармоническими помехами можно показать на графике энергетического выигрыша по вероятности битовой ошибки. График выигрыша по вероятности битовой ошибки при применении методов слепой обработки сигналов приведен на рисунке 6.

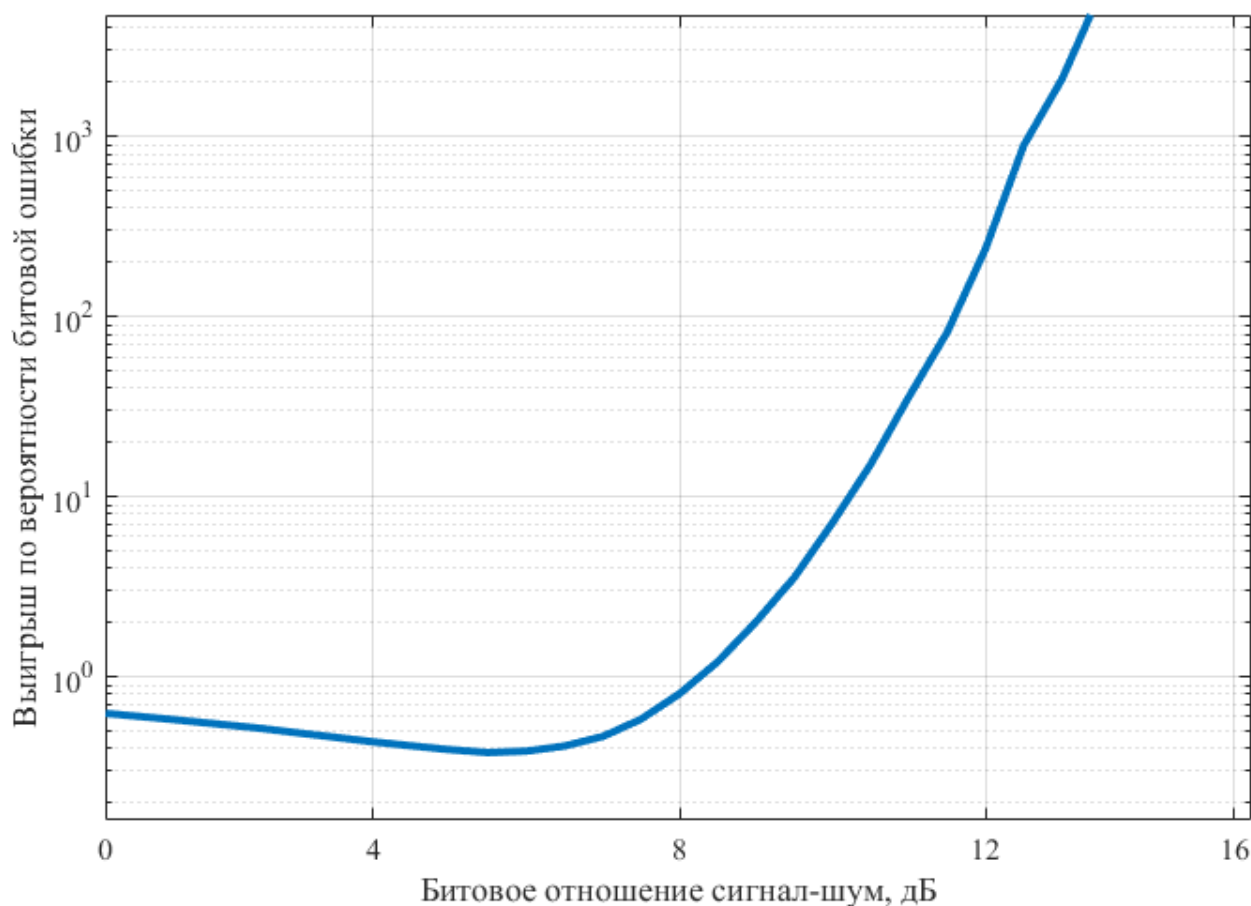


Рисунок 6 — График выигрыша по вероятности битовой ошибки от применения алгоритмов слепой обработки сигналов.

Из рисунка видно, что на примере использования алгоритма SOBI применение методов слепой обработки сигналов в радиосистемах передачи информации с целью уменьшения влияния импульсных помех позволяет получить выигрыш по вероятности битовой ошибки более чем в тысячу раз, особенно при больших величинах битового отношения сигнал-шум. Например, при битовом отношении сигнал-шум равном 13 дБ благодаря применению методов слепой обработки сигналов был достигнут энергетический выигрыш по вероятности битовой ошибке равный 2085.

### **Заключение**

Для исследования применимости слепых методов при обработке сигналов в радиосистемах передачи информации, а также для анализа влияния гауссовых шумов на качество слепого разделения была разработана имитационная модель канала связи с разнесенным приемом и слепым разделением принятых сигналов. Данная модель использовалась для анализа характеристик помехоустойчивости каналов связи с ФМн-2 в условиях совместного воздействия АБГШ и импульсной гармонической помехи.

Анализ результатов имитационного моделирования показал, что использование методов слепой обработки сигналов позволяет повысить помехоустойчивость к воздействию импульсных квазигармонических помех при битовых отношениях сигнал-шум от 8 и более дБ. Так, например, при разделении сигнала из смесей с импульсной квазигармонической помехой, длительность которой составляет 5 информационных бит, скважность, равная 0.005, отношение

помеха-сигнал равное 15 дБ, был получен энергетический выигрыш по вероятности битовой ошибки начиная от битового отношения сигнал-шум равный 8.1 дБ. При меньших значениях отношения сигнал-шум наблюдается энергетический проигрыш, равный приблизительно 1.7 дБ. При значениях сигнал-шум выше 8.1 дБ, выигрыш по вероятности битовой ошибки может составлять нескольких тысяч раз.

### **Список источников**

1. Yu Xianchuan, Dan Hu, and Jindong Xu. Blind source separation: theory and applications, John Wiley & Sons, 2013, 386 p.
2. Ramli Dzati Athiar, Yeoh Hong Shiong and Norsalina Hassan. Blind source separation (BSS) of mixed maternal and fetal electrocardiogram (ECG) signal: A comparative study // Procedia Computer Science, 2020, vol. 176, pp. 582-591. DOI:[10.1016/j.procs.2020.08.060](https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.08.060)
3. Jutten C., Hérault J. Une solution neuromimétique au problème de séparation de sources // Traitement du signal, 1988, no. 6 (5), pp. 389-403.
4. Belouchrani A., Amin M.G. Blind source separation based on time-frequency signal representations // IEEE transactions on signal processing, 1998, no. 11 (46), pp. 2888-2897.
5. Belouchrani A. et al. A blind source separation technique using second-order statistics // IEEE Transactions on signal processing, 1997, no. 2 (45), pp. 434-444.
6. Comon P. Independent component analysis, a new concept? // Signal processing, 1994, no. 3 (36), pp. 287-314.
7. Comon P. Independent Component Analysis, Elsevier, 1992, 11 p.

8. Comon P., Jutten C. (ed.). Handbook of Blind Source Separation: Independent component analysis and applications, Academic press, 2010.
9. Cichocki A., Amari S.I. Adaptive Blind Signal and Image Processing, England, John Wiley & Sons, 2000, 587 p.
10. Amari S., Cichocki A. Complex Blind Source Extraction From Noisy Mixtures Using Second-Order Statistics // IEEE Transactions on Circuits and Systems, July 2010, pp. 1404-1414.
11. Duarte L.T., Suyama R., Rivet B. Blind Compensation of Nonlinear Distortions: Application to Source Separation of Post-Nonlinear Mixtures // IEEE Transactions on Signal Processing. 2012, pp. 5832-5844. DOI:[10.1109/TSP.2012.2208953](https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2208953)
12. Hyvärinen A., Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis // Neural Computation, 1997, no. 9, pp. 1483-1492. DOI:[10.1162/neco.1997.9.7.1483](https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.7.1483)
13. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. Independent Component Analysis, John Wiley, 2001, 505 p.
14. Belouchrani A., Moulines E., Abed-Meraim K. Second order blind separation of temporally correlated sources // Proceeding of the International Conference on Digital Signal Processing, 1993.
15. Cardoso J.F., Soulomiac A. Blind beamforming for non-Gaussian signals // IEE Proceedings-F, 1993, no. 6 (140), pp. 362-370. DOI:[10.1049/ip-f-2.1993.0054](https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1993.0054)
16. Shi X. Blind Signal Processing, Shanghai, Shanghai JiaoTong University Press, 2011, 368 p.

17. Горячкин О.В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в радиотехнике и связи. – М.: Радио и связь, 2004. - 230 с.
18. Манохин А.Е. Методы слепого подавления помех при обработке полезных сигналов. – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2021. – 204 с.
19. Tyapkin P.S., Vazhenin N.A. Applying Blind Signal Processing Methods in Data-Transmission Systems // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the field of on Board Communications, IEEE, 2021. DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105)
20. Бродский М.С., Звонарев В.В., Хуббиев Р.В., Шерстюк А.В. Компьютерная модель радиоканала системы спутниковой связи и ретрансляции данных при многопозиционной передаче сигнала // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170340>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-10](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-10)
21. Серкин Ф.Б., Важенин Н.А. Вейцель А.В. Анализ характеристик прототипа локальной системы местоопределения // Труды МАИ. 2022. № 86. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=67824>
22. Гусев С.Н. Миклин Д.В. Мороз А.В. Сахно И.В. Шерстюк А.В. Полунатурное моделирование цифрового канала передачи данных в ультразвуковом диапазоне длин волн // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118128>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-08](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-08)

## References

1. Yu Xianchuan, Dan Hu, and Jindong Xu. *Blind source separation: theory and applications*, John Wiley & Sons, 2013, 386 p.

2. Ramli Dzati Athiar, Yeoh Hong Shiong and Norsalina Hassan. Blind source separation (BSS) of mixed maternal and fetal electrocardiogram (ECG) signal: A comparative study, *Procedia Computer Science*, 2020, vol. 176, pp. 582-591. DOI:10.1016/j.procs.2020.08.060
3. Jutten C., Héroult J. Une solution neuromimétique au problème de séparation de sources, *Traitement du signal*, 1988, no. 6 (5), pp. 389-403.
4. Belouchrani A., Amin M.G. Blind source separation based on time-frequency signal representations, *IEEE transactions on signal processing*, 1998, no. 11 (46), pp. 2888-2897.
5. Belouchrani A. et al. A blind source separation technique using second-order statistics, *IEEE Transactions on signal processing*, 1997, no. 2 (45), pp. 434-444.
6. Comon P. Independent component analysis, a new concept? *Signal processing*, 1994, no. 3 (36), pp. 287-314.
7. Comon P. *Independent Component Analysis*, Elsevier, 1992, 11 p.
8. Comon P., Jutten C. (ed.). *Handbook of Blind Source Separation: Independent component analysis and applications*, Academic press, 2010.
9. Cichocki A., Amari S.I. *Adaptive Blind Signal and Image Processing*, England, John Wiley & Sons, 2000, 587 p.
10. Amari S., Cichocki A. Complex Blind Source Extraction From Noisy Mixtures Using Second-Order Statistics, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, July 2010, pp. 1404-1414.
11. Duarte L.T., Suyama R., Rivet B. Blind Compensation of Nonlinear Distortions: Application to Source Separation of Post-Nonlinear Mixtures, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, pp. 5832-5844. DOI:10.1109/TSP.2012.2208953

12. Hyvärinen A., Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis, *Neural Computation*, 1997, no. 9, pp. 1483-1492. DOI:10.1162/neco.1997.9.7.1483
13. Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E. *Independent Component Analysis*, John Wiley, 2001, 505 p.
14. Belouchrani A., Moulines E., Abed-Meraim K. Second order blind separation of temporally correlated sources, *Proceeding of the International Conference on Digital Signal Processing*, 1993.
15. Cardoso J.F., Soulomiac A. Blind beamforming for non-Gaussian signals, *IEE Proceedings-F*, 1993, no. 6 (140), pp. 362-370. DOI:10.1049/ip-f-2.1993.0054
16. Shi X. *Blind Signal Processing*, Shanghai, Shanghai JiaoTong University Press, 2011, 368 p.
17. Goryachkin O.V. *Metody slepoi obrabotki signalov i ikh prilozheniya v radiotekhnike i svyazi* (Blind Signal Processing Methods and Their Applications in Radio Engineering and Communications), Moscow, Radio i svyaz', 2004, 230 p.
18. Manokhin A.E. *Metody slepogo podavleniya pomekh pri obrabotke poleznyh signalov* (Methods of blind interference suppression in processing useful signals), Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2021, 204 p.
19. Tyapkin P.S., Vazhenin N.A. Applying Blind Signal Processing Methods in Data-Transmission Systems, *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the field of on Board Communications*, IEEE, 2021. DOI:10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105

20. Brodskii M.S., Zvonarev V.V., Khubbiev R.V., Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170340>. DOI: 10.34759/trd-2022-127-10
21. Serkin F.B., Vazhenin N.A. Veitsel' A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 86. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=67824>
22. Gusev S.N. Miklin D.V. Moroz A.V. Sakhno I.V. Sherstyuk A.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118128>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-08

Статья поступила в редакцию 14.12.2022

Одобрена после рецензирования 26.12.2022

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 14.12.2022; approved after reviewing on 26.12.2022; accepted for publication on 27.02.2023