

Труды МАИ. 2023. № 129

Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья

УДК: 621.396.4

DOI: [10.34759/trd-2023-129-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-17)

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ МЕТОДОВ СЛЕПОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В РАДИОСИСТЕМАХ

Павел Станиславович Тяпкин[✉]

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

tjapkin@yandex.ru[✉]

Аннотация. В работе приведены результаты по разработке аппаратно-программного комплекса для отработки методов слепой обработки сигналов в задаче уменьшения влияния помех в системах передачи и извлечения информации. Разработанный аппаратно-программный комплекс включает в себя два формирователя сигнала, многоканальный приемник и персональный компьютер. Приёмник основан на использовании концепции программно-определяемого радио (SDR — Software Defined Radio) и состоит из восьми аналого-цифровых преобразователей, программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и каскада PCI-Express для передачи данных в ПК для последующей обработки и демодуляции. В работе приведено описание и функциональное назначение каскадов приема и обработки

сигналов, а также приведены результаты верификации аппаратно-программного комплекса. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического применения методов слепой обработки сигналов для компенсации помех в радиосистемах передачи информации. При верификации аппаратно-программного комплекса была определена предельная битовая скорость передачи данных в режиме непрерывного потока бит при обработке смесей сигнала ФМн-2 с импульсными помехами различной формы. Данная скорость передачи составила 905 бит/с. Для увеличения предельной скорости возможно применение более мощного ПК, или перенос демодулятора и алгоритмов слепой обработки сигналов на ПЛИС.

Ключевые слова: слепая обработка сигналов, программно-аппаратный комплекс, программно-определяемое радио, ПЛИС, программируемая логическая интегральная схема, повышение помехоустойчивости радио

Для цитирования: Тяпкин П.С. Аппаратно-программный комплекс для отработки методов слепой обработки сигналов в радиосистемах // Труды МАИ. 2023. № 129.

DOI: [10.34759/trd-2023-129-17](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-17)

Original article

HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR APPROVEMENT METHODS OF BLIND SIGNAL PROCESSING IN RADIO SYSTEMS

Pavel S. Tyapkin✉

Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹tjapkinp@yandex.ru✉

Abstract. This paper presents the results of the development of a hardware-software complex for testing blind signal processing methods in problem of increasing noise immunity in communication systems. The developed hardware and software complex includes two mixing circuits, a multichannel receiver and a personal computer. Digital receiver is based on the combination of software-defined radio systems (SDR) and consists of eight analog-to-digital converters, a field-programmable gate array (FPGA) circuit and a PCI-Express bus for transmitting data to a PC for processing and demodulation. The description and functional setting of the purpose of receiving and processing signals are involved in the work, as well as the results of verification of the hardware-software complex. The results of verification of practical methods for the use of blind signal processing capabilities for interference in radio information transmission systems are obtained. When checking, the maximum data transfer rate in the continuous bit stream mode was determined when processing a mixture of BPSK signals with pulse noise of various shapes. This transmission rate exceeds 905 bps. To increase the maximum speed, it is possible to use a more powerful PC, transfer the demodulator and blind signal processing algorithms to the FPGA.

Keywords: blind signal processing, blind source separation, software-defined radio, FPGA, digital receiver, digital design, radio channel noise immunity improvement, impulse noise

For citation: Tyapkin P.S. Hardware-software complex for improvement methods of blind signal processing in radio systems. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-17)

[17](#)

Введение

Цифровая обработка сигналов играет ключевую роль в науке и технике, при разработке систем связи, безопасности, наблюдения, распознавания лиц и т.д. Одновременно с расширением сфер применения цифровой обработки сигналов, постоянно повышаются требования по надежности разрабатываемой аппаратуры, и, тем самым повышаются требования при её стандартизации и сертификации.

Одним из ключевых требований к разрабатываемым устройствам связи является обеспечение требуемого уровня устойчивости к различного рода помехам. Уменьшение влияния помех в цифровых системах связи является важной научно-исследовательской задачей, в рамках которой с 1970-х годов были предложены различные решения. В качестве подобных решений можно перечислить адаптивные фильтры и компенсаторы помех, основанные на различных математических методах. [1], [2]

Одним из современных подходов к обработке сигналов в задачах идентификации и разделения настоящее время являются слепые методы. Под методами слепой обработки сигналов понимают алгоритмы, методы и технологии, применяемые для обработки M принятых смесей, полученных в результате прохождения N сигналов через канал связи и принятые на разнесенные в пространстве антенны. На приемной стороне могут быть априорно неизвестны характеристики канала связи и вид излученных сигналов. [3], [4] Под принятой смесью понимается несколько принятых в результате разнесенного приема сигналов, к которым при распространении через канал связи были добавлены шумы и помехи.

Методы слепой обработки сигналов уже нашли применение при выделении полезных сигналов из принятых смесей в таких сферах как обработка речевых данных и музыки [5], в геофизике (при уменьшении влияния помех из сигналов сейсмической активности) [6] и медицине (при обработке сигналов электрокардиограммы, электроэнцефалограммы с целью уменьшения влияния помех, возникающих при работе мышц и органов) [7]. Несмотря на обширность сфер применения методов слепой обработки сигналов, в настоящее время недостаточно глубоко проработаны вопросы эффективности применения методов слепой обработки сигналов в области радиотехники и связи. Это же относится к результатам практического применения алгоритмов слепой обработки, например, в задачах борьбы с помехами. В данной работе приведены результаты по разработке аппаратно-программного комплекса для отработки методов слепой обработки сигналов в задаче уменьшения влияния помех в системах связи.

Методы слепой обработки сигналов

В общем виде задачу слепой обработки сигналов можно описать следующим образом. Имеется многоканальная линейная система (см. рис.1) типа MIMO (MIMO – multiple-input / multiple-output), состоящая из N независимых между собой источников информации и M получателей информации, причем $M \geq N$, т.к. несколько получателей могут получать информацию от одного источника [3] [8].

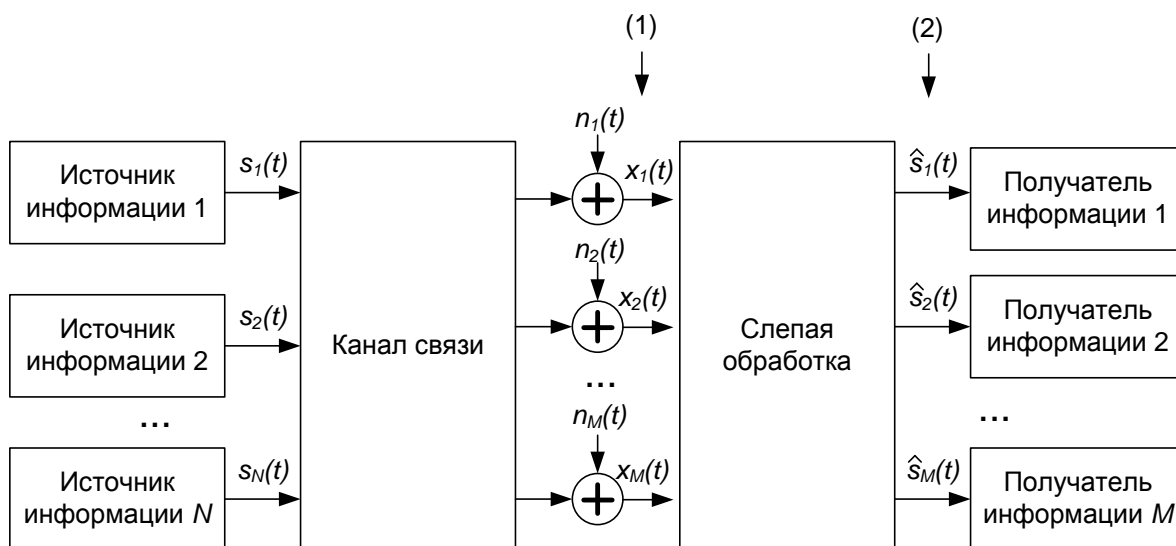


Рисунок 1 — Блок-схема многоканальной системы передачи информации с разделением данных методом слепой обработки.

Сигналы из источников информации в результате прохождения через канал связи с добавлением шума складываются между собой с разными весовыми коэффициентами и поступают в виде смесей на вход блока слепой обработки сигналов. Предполагается, что характеристики канала связи априорно неизвестны. Так, i -й сигнал $x_i(t)$, полученный в результате прохождения сигнала $s_i(t)$ через канал связи с добавлением шумов, представлен следующим образом:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^N A_j(t) \cdot s_j(t) + n_i(t) \quad (1)$$

где $A_j(t)$ — j -й весовой коэффициент, полученный в результате прохождения сигнала от j -го источника информации до приемной антенны с учетом пройденного расстояния и переотражений.

Задачей блока слепой обработки сигналов является выделение исходных сигналов из принятых смесей при неизвестных характеристиках канала связи (неизвестных весовых коэффициентах) и неизвестных исходных сигналах.

Далее приведено математическое описание методики слепого разделения сигналов в матричном виде:

Матрица S состоит из выборки в N исходных сигналов $[s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]$ по k отсчетов каждый:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1k} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & s_{Nk} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Матрица смесей X состоит из выборки в M смесей $[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]$ по k отсчетов каждая:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M1} & x_{M2} & \dots & x_{Mk} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Матрица смесей X получена из исходной матрицы S следующим образом:

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{S} + \mathbf{N}, \quad (4)$$

где:

\mathbf{W} — неизвестная смешивающая матрица, имеющая линейно независимые строки и столбцы, которая состоит из весовых коэффициентов:

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1N} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{k1} & w_{k2} & \dots & w_{kN} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где w_{ij} можно получить из s_{ij} с применением формулы (1): [3]

\mathbf{N} — матрица аддитивных шумов размерностью $k \times N$.

Задачей слепой обработки сигналов является оценка матрицы \mathbf{W}^{-1} такой, чтобы:

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}^{-1} \cdot \mathbf{X} \quad (6)$$

Матрица \mathbf{W}^{-1} обозначается как матрица разделения.

Алгоритм слепой обработки сигналов можно описать как итерационную нейронную сеть [9] (или прямую, без итераций), которая в совокупности с адаптивным алгоритмом обучения данной нейронной сети позволяет оценить исходные сигналы, определить смешивающую матрицу \mathbf{W} или матрицу разделения \mathbf{W}^{-1} .

Математические модели нейронных сетей, критерии оптимизации алгоритма обучения и матричные способы оценки в алгоритмах слепой обработки сигналов различаются в зависимости от конкретного алгоритма, требований к нему и областей применения [10].

Так, большинство алгоритмов слепой обработки сигналов при оценке исходных сигналов и смешивающей матрицы W основываются на математических статистиках высших порядков.

Существуют некоторые ограничения [3] [8] применения методов слепой обработки сигналов, такие как:

1. Исходные сигналы должны быть статистически независимыми между собой.
2. Законы распределения исходных сигналов в смесях должны быть негауссовскими. В отдельных алгоритмах разрешается, чтобы максимум один исходный сигнал в принятых смесях мог иметь нормальный закон распределения.
3. Число принятых смесей должно быть не меньше числа исходных сигналов в каждой из принятых смесей.

Вышеприведенные критерии не препятствуют применению методов слепой обработки сигналов в области радиоэлектроники для задачи уменьшения влияния помех в канале связи. Было проведено имитационное моделирование [16], где в канале связи с сигналом ФМн-2 и импульсной соканальной помехой с гармоническим заполнением был применен алгоритм слепой обработки SOBI (Second Order Blind Identification, алгоритм основанный на совместной диагонализации корреляционных матриц [11]) с целью ослабления влияния импульсной помехи.

В результате моделирования было получено, что алгоритм SOBI в некоторых случаях позволяет достичь значительного энергетического выигрыша: например, при отношении помеха-сигнал 15 дБ, скважности 0.005 и битовом отношении сигнал-шум

равным 12 дБ выигрыш по вероятности битовой ошибки составил более $2 \cdot 10^3$ раз. Была поставлена задача по апробации методов слепой обработки при приеме реального сигнала в смеси с импульсными помехами различных видов, подтвердив тем самым результаты имитационного моделирования. Для решения поставленных задач был разработан аппаратно-программный комплекс с применением методов слепой обработки сигналов.

Программно-аппаратный комплекс

Блок-схема программно-аппаратного комплекса приведена на рисунке 2:

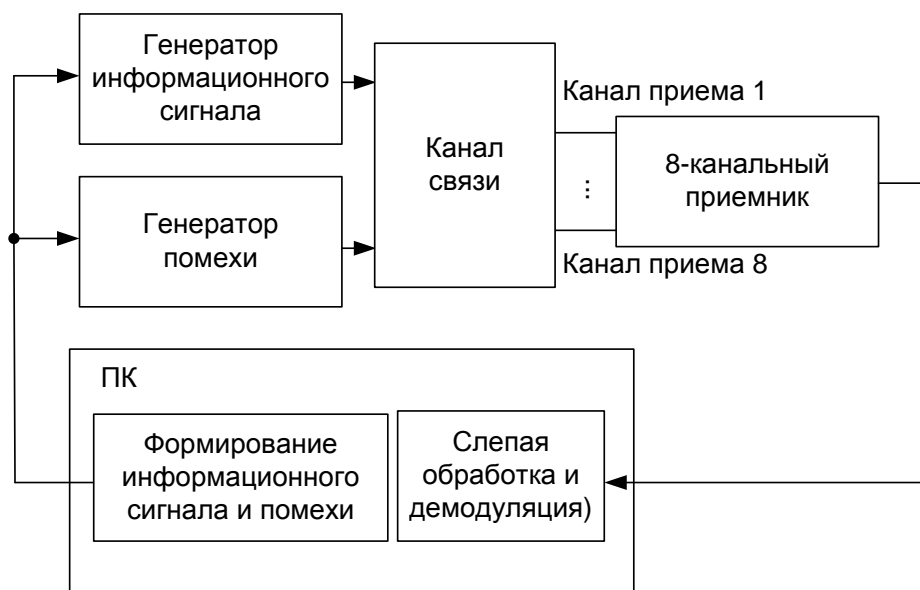


Рисунок 2 — Упрощённая блок-схема аппаратно-программного комплекса.

Разработанный аппаратно-программный комплекс включает в себя генератор сигнала, генератор помехи, 8-канальный приемник и ПК. Генераторы сигналов не зависят друг от друга и не тактируются от общего задающего генератора. Первый

генератор формирует информационный сигнал с требуемым методом модуляции. Второй генератор формируют помеху. Характеристики формируемых сигналов выбираются таким образом, чтобы оба сигнала попали в полосу пропускания приемных фильтров, уровни сигналов попадали в динамический диапазон АЦП. Излучаемая мощность формируемых сигналов задается такой, чтобы обеспечить требуемое среднечастотное отношение помеха-сигнал на входе приемника.

Приёмник основан на использовании концепции программно-определяемого радио (SDR — Software Defined Radio) [12] [13] и состоит из восьми аналого-цифровых преобразователей, программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) и каскада PCI-Express для передачи данных в ПК для последующей обработки и демодуляции. На рисунке 3 изображена отладочная плата, на базе которой был разработан приемник.

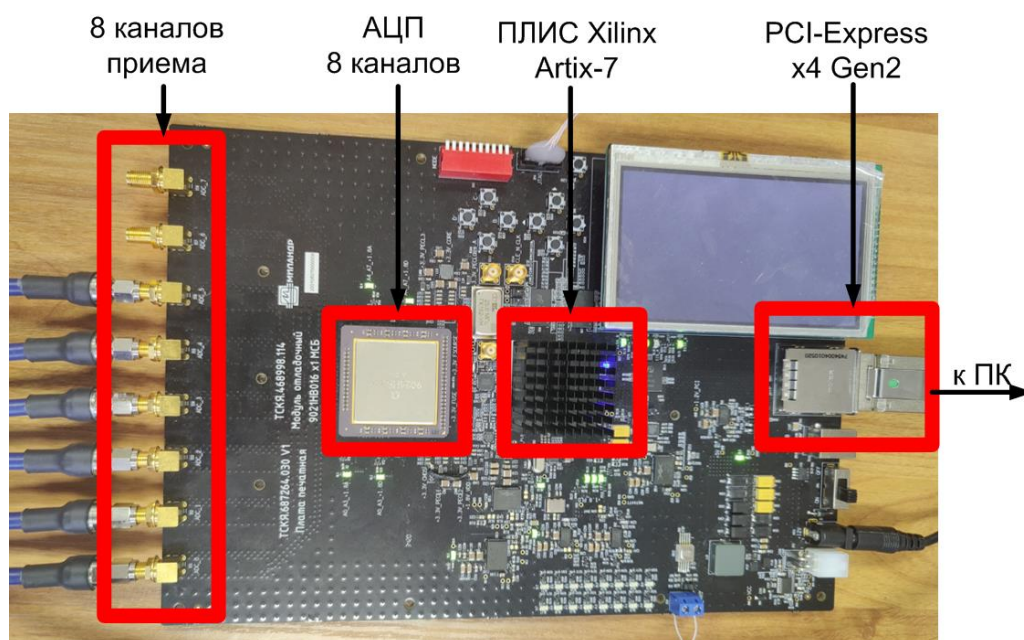


Рисунок 3 — Отладочная плата с АЦП, ПЛИС и каскадом PCI-Express.

Для ПЛИС, размещенной на данной отладочной плате, был разработан проект 8-канального приемника. Упрощенная блок-схема проекта приведена на рисунке 4:

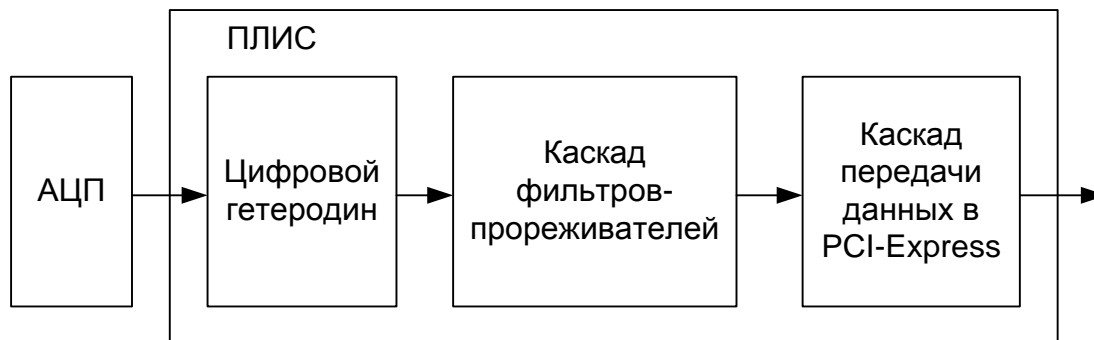


Рисунок 4 — Упрощенная блок-схема каскадов, расположенных на отладочной плате.

Сигнал с выхода АЦП поступает в ПЛИС. Для апробации методов слепой обработки сигналов использовались сигналы со скоростями до 1000 бит/с. Поэтому требовалось понизить частоту дискретизации сигнала с выхода АЦП путем прореживания принятых сигналов с предварительной фильтрацией для избавления от эффекта наложения спектров. Для последующей обработки сигнал передается на ПК через высокоскоростной порт PCI-Express.

Каскады обработки сигнала на ПК приведены на рисунке 5:

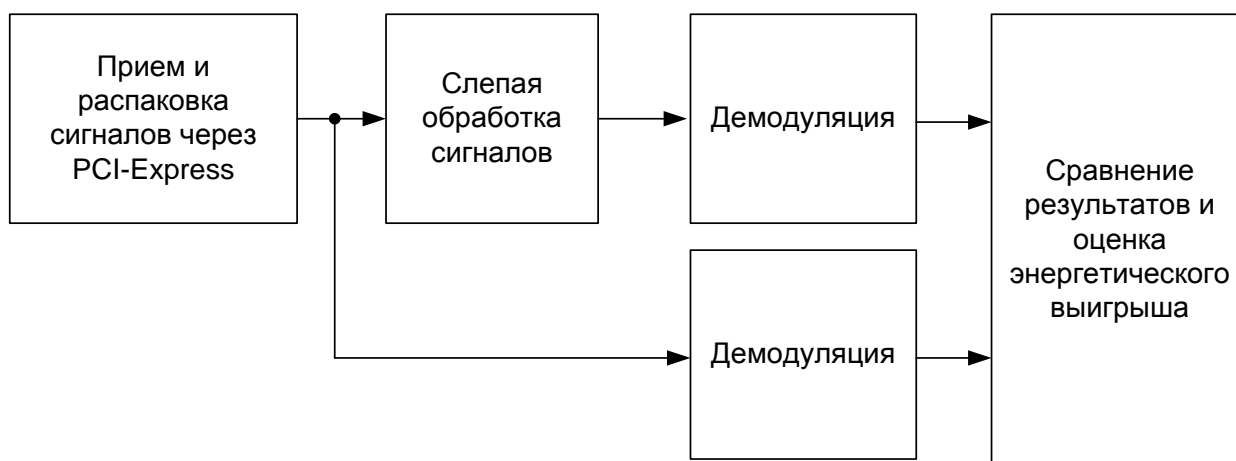


Рисунок 5 — Блок-схема каскадов обработки принятых сигналов на ПК.

На ПК осуществляется прием и распаковка пакета, его предварительная обработка и слепая обработка с применением алгоритма слепой обработки сигналов. SOBI (Second-Order Blind Identification). Данный алгоритм ранее показал хорошие результаты при малом времени, затрачиваемом на обработку [10]. Сигналы, полученные в результате слепой обработки, сравниваются с исходными сигналами, проводится определение информационного сигнала и его демодуляция с последующей оценкой энергетического выигрыша от применения алгоритма слепой обработки.

Верификация аппаратно-программного комплекса

Проверка работоспособности аппаратно-программного комплекса осуществлялась на реальных сигналах. В качестве информационного сигнала выбран сигнал ФМн-2, длительностью 520 мс. Информационная скорость передачи составляла 400 бит/с.

Для излучения источником помех были подготовлены помеховые сигналы следующих форм:

- Импульсная помеха с заполнением сигналом ЛЧМ (линейной частотной модуляции).
- Импульсная широкополосная помеха.
- Импульсная помеха, представляющая собой сигнал ФМн-2.

Для более качественного сравнения полученных результатов, были установлены одинаковые скважности всех импульсных помех, а также периоды их повторения.

Мощности излучаемых генераторами сигналов были заданы таким образом, чтобы на приемной стороне средняя мощность импульсной помехи в десятки раз превышала среднюю мощность информационного сигнала. После обработки принятых сигналов проводится сравнение демодулированных сигналов без прохождения через алгоритмы слепой обработки с сигналами, которые были демодулированы после прохождения через алгоритм SOBI. Далее приведены спектральные плотности мощности и эюры сигналов, полученных в результате работы тестового стенда.

Первым вариантом тестовых сигналов для верификации являлись сигнал ФМн-2 и импульсная помеха, представляющая собой сигнал ЛЧМ.

На рисунке 6 приведены нормированные спектральные плотности мощности (СПМ) сигнала ФМн-2 (оранжевая кривая) и сигнала ЛЧМ (синяя кривая)

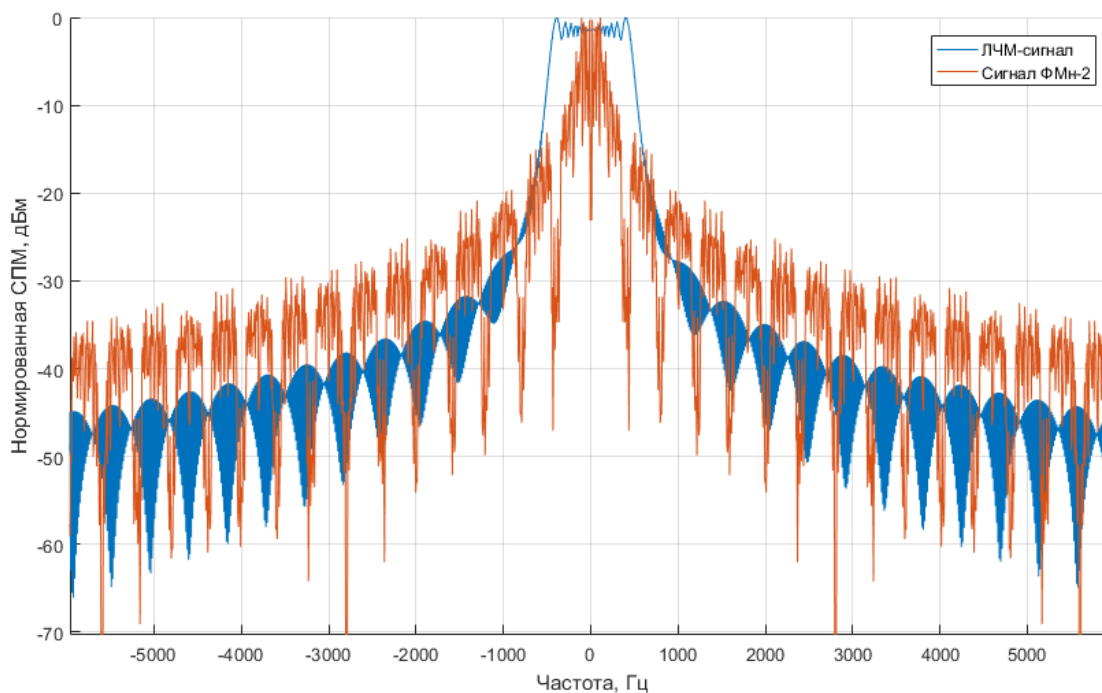


Рисунок 6 — Графики нормированных СПМ сигнала ФМн-2 и импульсной помехи.

На рисунке 7 и 8 приведены эюры сигналов, полученные в результате верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМн-2 и импульсной помехой с заполнением гармоническим сигналом с линейно частотной модуляцией.

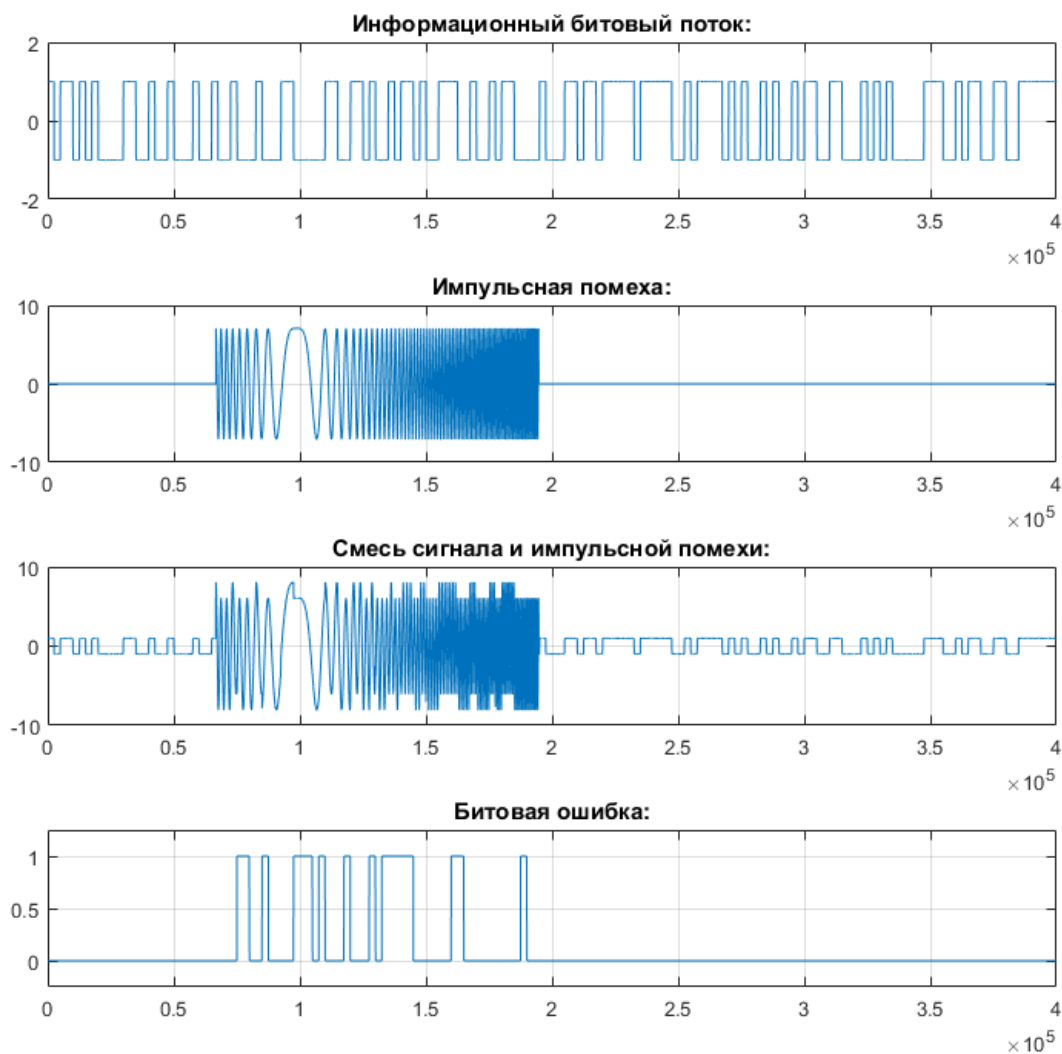


Рисунок 7 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМн-2 и импульсной помехой с заполнением гармоническим сигналом с линейно-частотной модуляцией без слепой обработки принятых сигналов.

При сравнении демодулированных принятых сигналов без предварительной слепой обработки с исходными, наблюдаются битовые ошибки, связанные с наличием импульсной помехи.

При демодуляции того же самого сигнала на рисунке 7, но прошедшего через алгоритм слепой обработки SOBI, были получены следующие результаты:

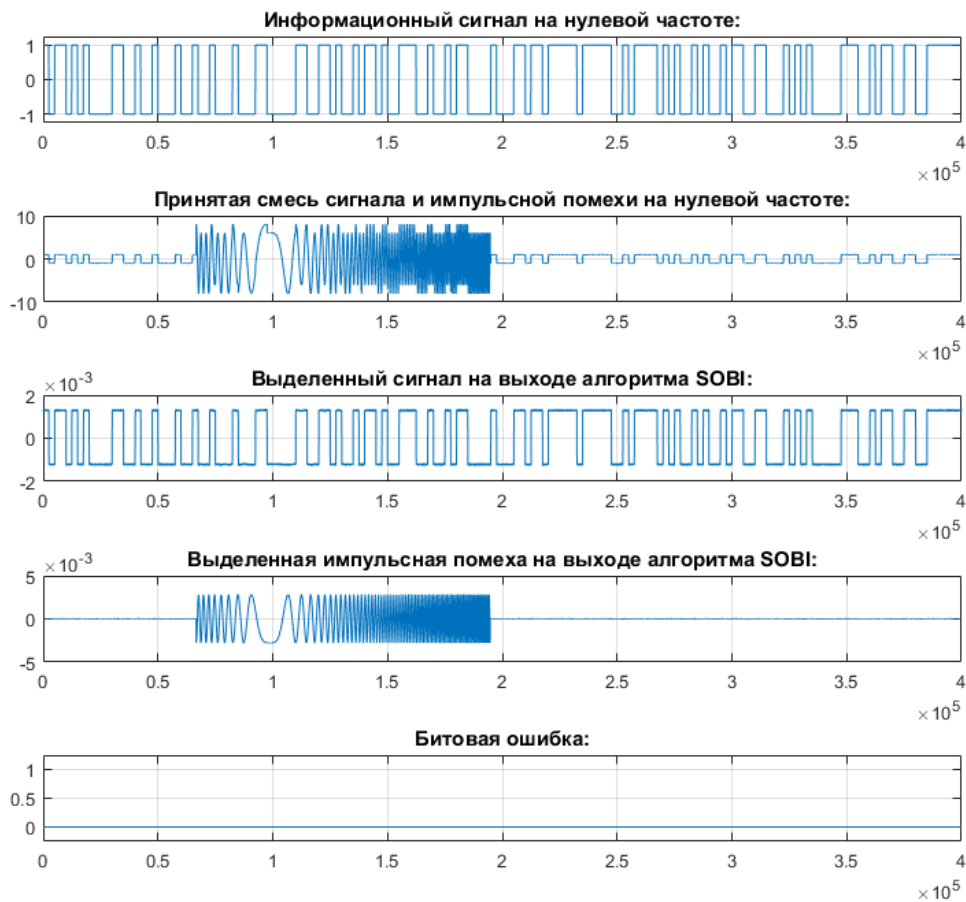


Рисунок 8 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМн-2 и импульсной помехой с заполнением гармоническим сигналом с линейно-частотной модуляцией с применением алгоритма SOBI для разделения импульсной помехи.

Как видно из рисунка, после прохождения входных смесей через алгоритм SOBI были получены разделенные сигнал ФМн-2 и импульсная помеха. При демодуляции выделенного сигнала ФМн-2 битовые ошибки отсутствуют.

Аналогичные результаты были получены при демодуляции сигналов ФМн-2 в смеси с широкополосной импульсной помехой, а также с импульсной помехой, которая представляет собой сигнал ФМн-2, передающей случайный поток бит с большей скоростью передачи (1000 бит/с).

Широкополосный сигнал был сформирован в результате фильтрации случайной последовательности с нормальным законом распределения фильтром нижних частот с полосой пропускания 7 кГц и полосой подавления 11 кГц.

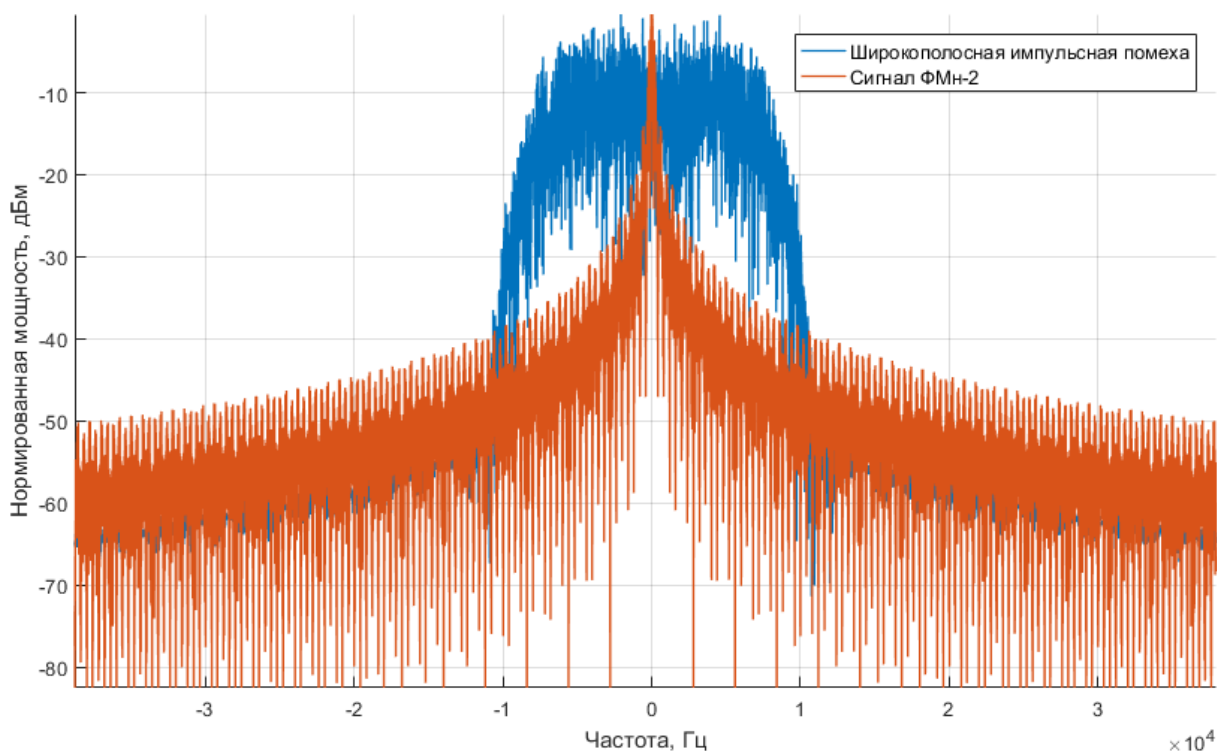


Рисунок 9 — Нормированные СПМ сигнала и импульсной помехи.

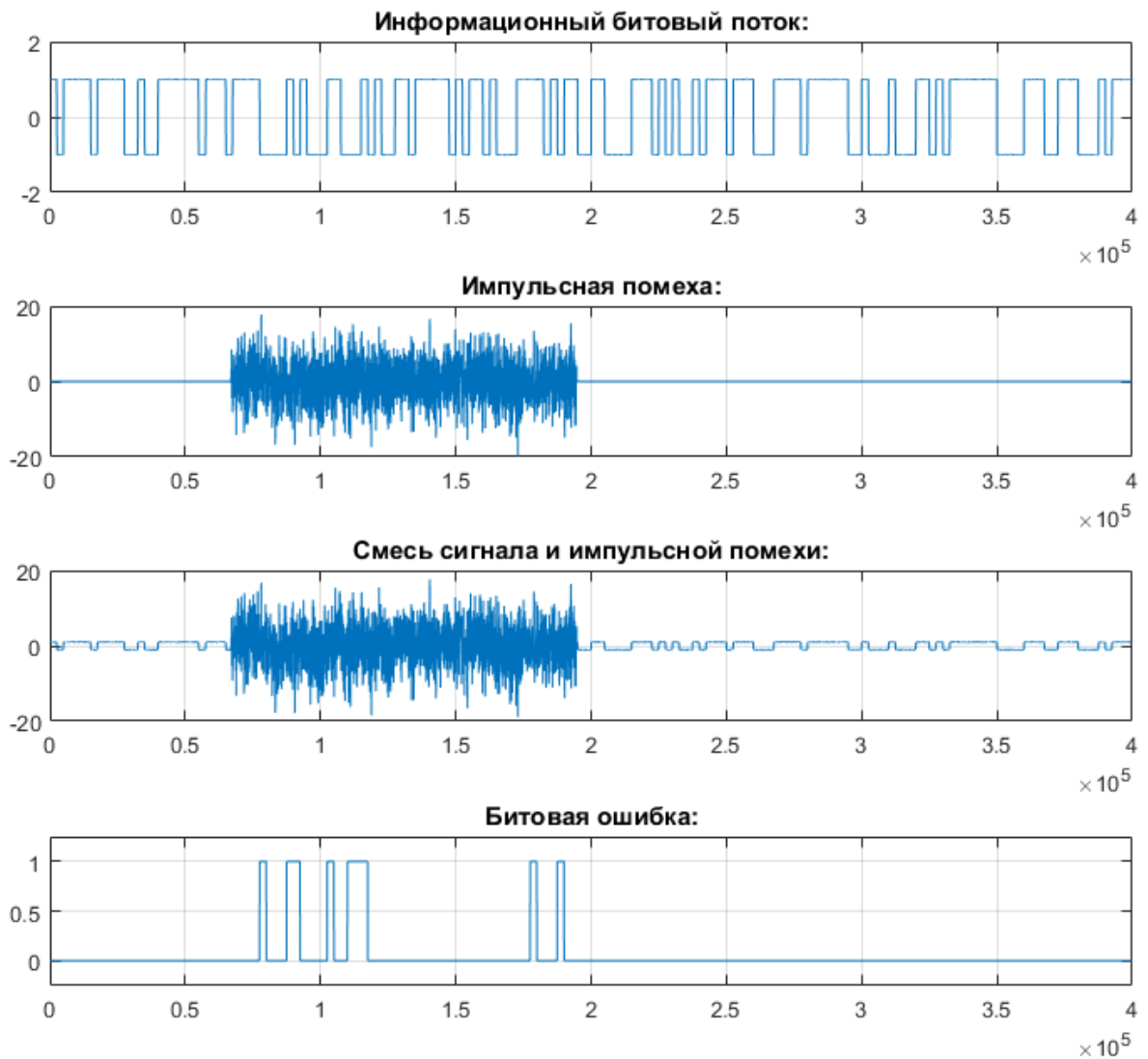


Рисунок 10 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМН-2 и широкополосной импульсной помехой без слепой обработки принятых сигналов.

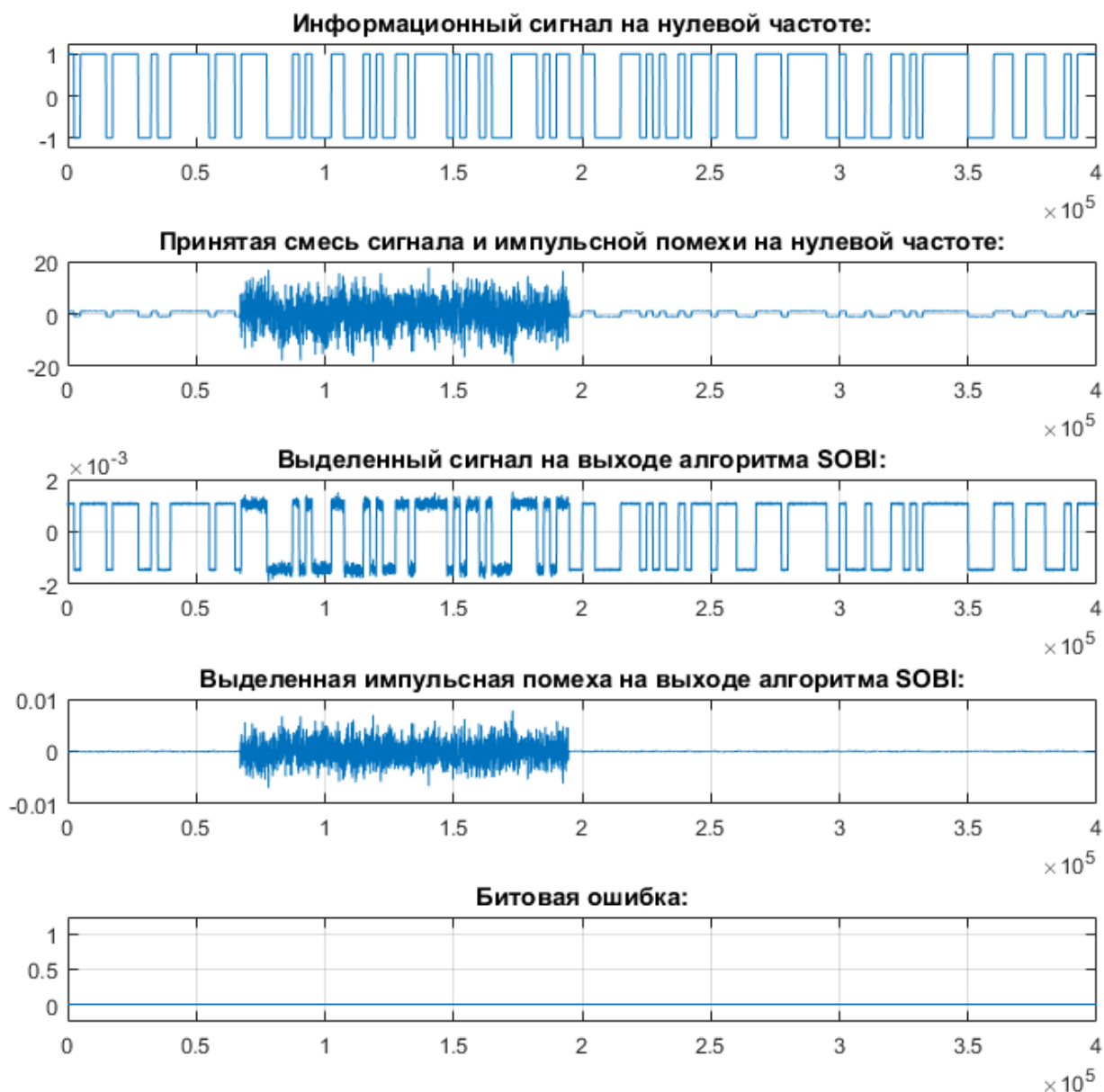


Рисунок 11 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМН-2 и шумовой импульсной помехой со слепой обработки.

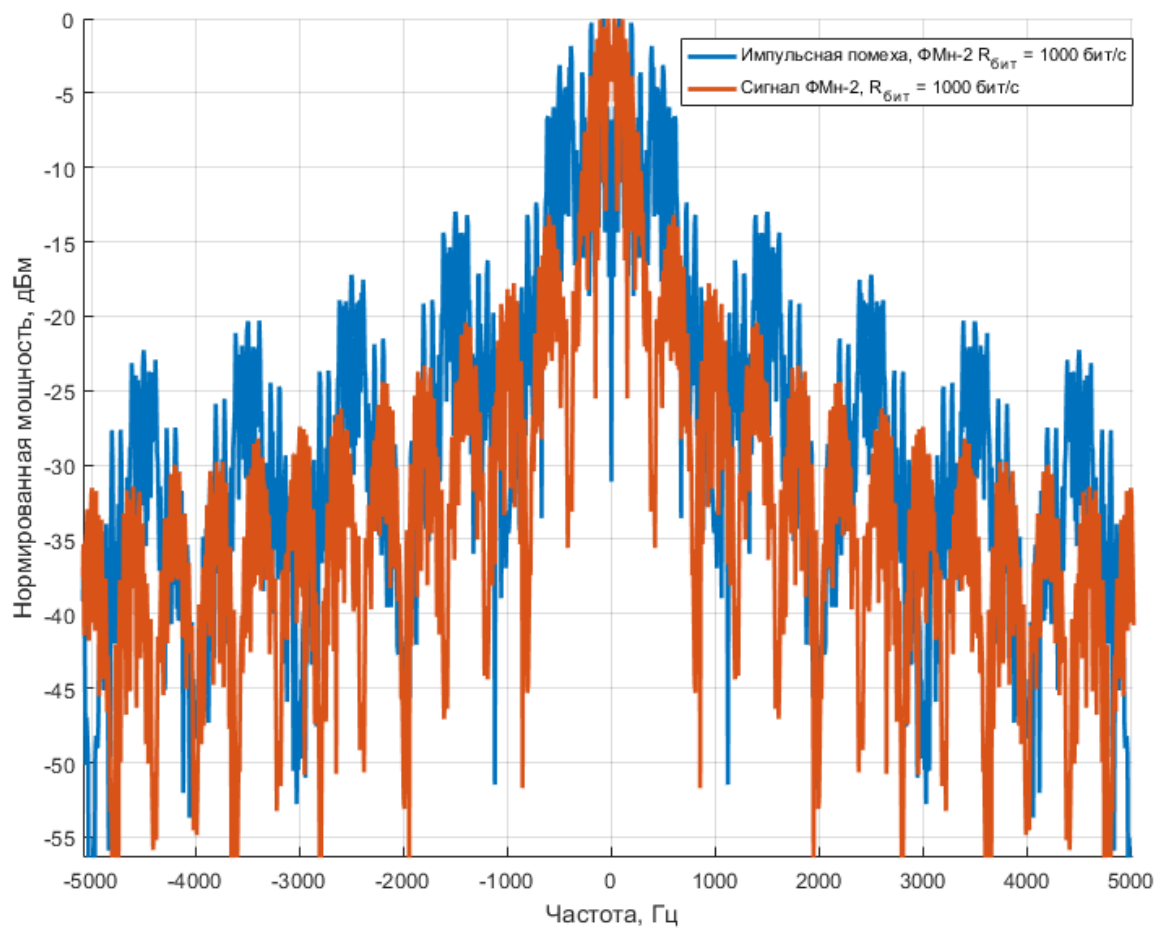


Рисунок 12 — Графики нормированных СПМ сигнала и импульсной помехи.

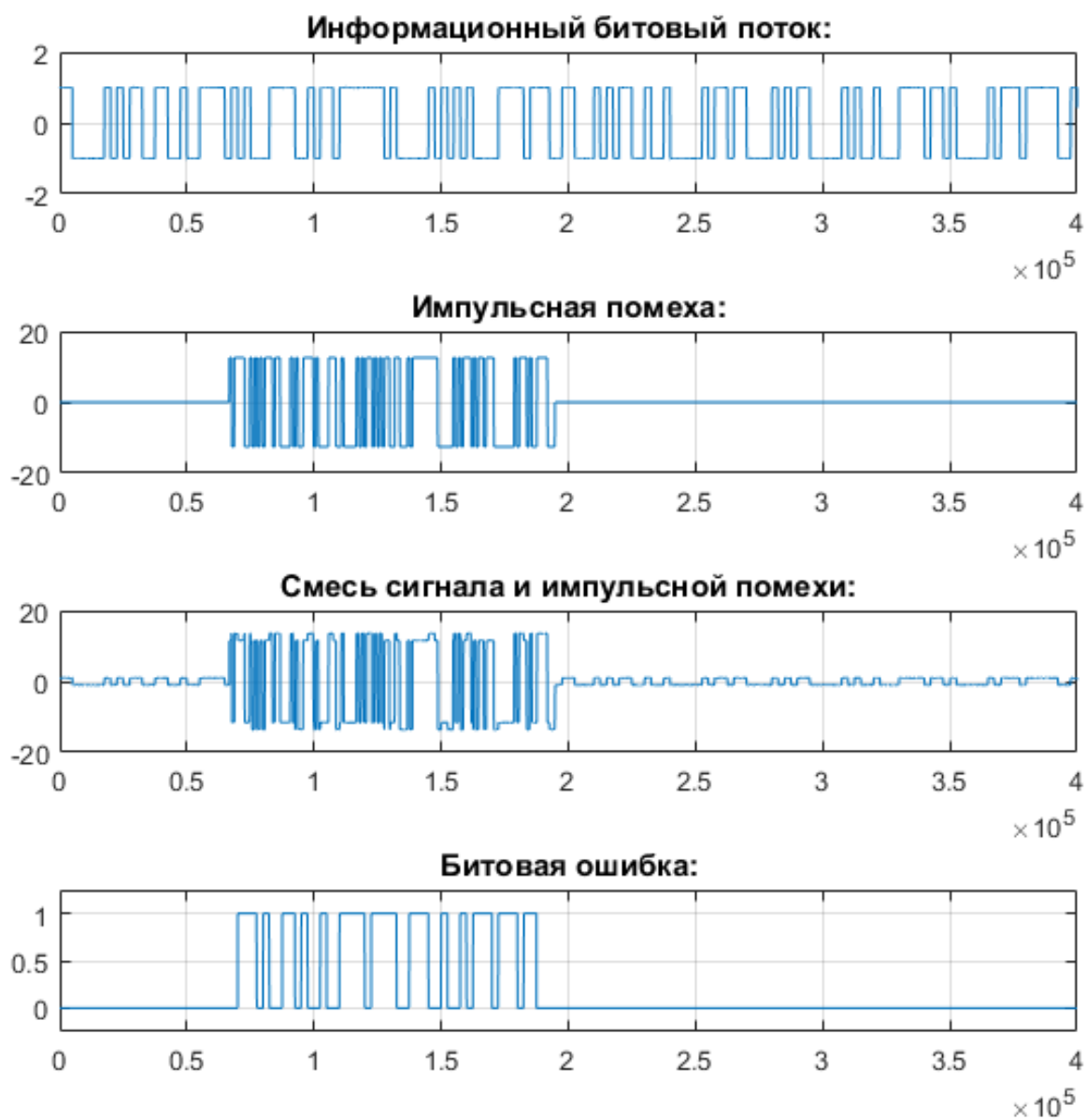


Рисунок 13 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМн-2 и шумовой импульсной помехой без слепой обработки принятых сигналов.

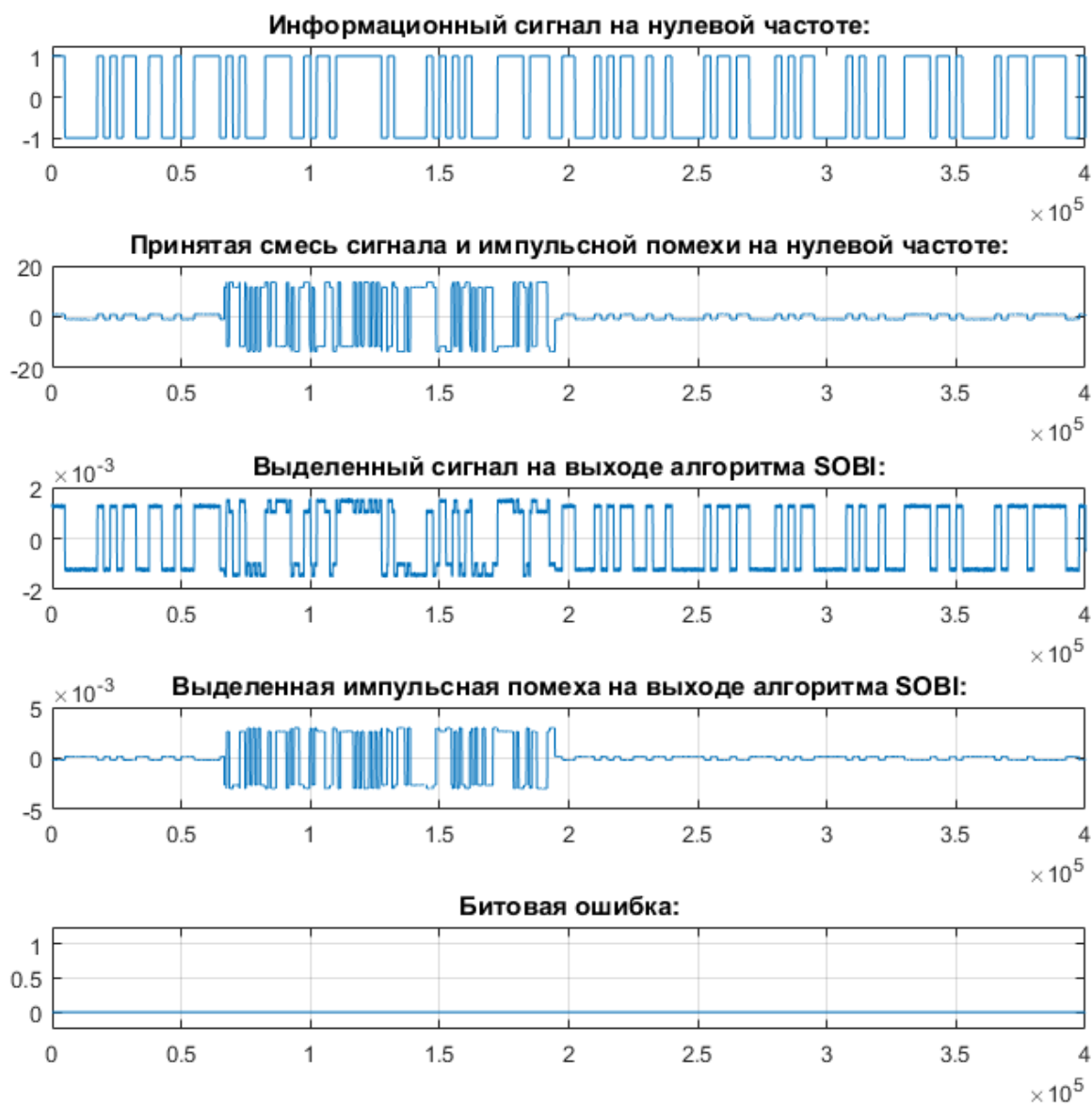


Рисунок 14 — Эпюры сигналов, полученные при верификации аппаратно-программного комплекса сигналом ФМн-2 и структурноподобной импульсной помехой без слепой обработки принятых сигналов.

Результаты получены при приеме сигнала ФМн-2 со скоростью в 400 бит/с и периодом повторения 10 секунд. Возникает необходимость в оценке максимальной битовой скорости передачи информации при непрерывной передаче бит (в реальном времени) при обработке непрерывного потока бит.

Применение слепых методов в цифровых приемниках при обработке непрерывного потока бит в реальном времени

Обработка сигналов в реальном времени рассчитывается для максимальной скорости передачи данных, которая зависит от максимальной задержки сигнала при его обработке в цифровом приемнике.

По причине того, что вся цифровая обработка сигнала на ПЛИС происходит мгновенно, ограничением максимальной скорости передачи на ПЛИС является максимальная полоса пропускания, равная 125 Мсэмплов/с. Подобная полоса пропускания является избыточной для данной работы и к тому же потребует больших вычислительных ресурсов при обработке большого числа отсчетов на один информационный бит. В результате передискретизации, частота дискретизации сигнала на выходе составляет 1 МГц.

На рисунке 15 приведена блок-схема каскадов цифрового приемника сигналов на ПЛИС с применением методов слепой обработки сигналов. Под каждым каскадом приведены рассчитанные максимальные задержки при обработке сигнала.

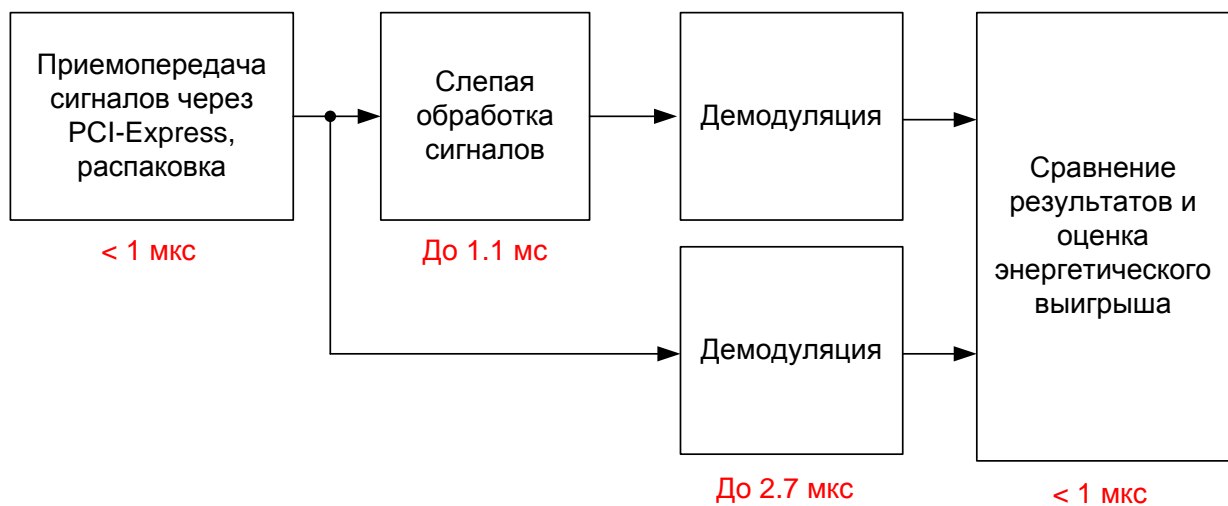


Рисунок 15 — Блок-схема каскадов цифрового приемника (часть отладочной платы) с отображением времени, затрачиваемого на обработку сигнала

Наибольшая задержка наблюдается при прохождении сигнала через каскад слепой обработки сигнала с алгоритмом SOBI. Поскольку алгоритмы слепой обработки являются итеративными, максимальное время, затрачиваемое на обработку, зависит от максимального количества итераций, за которое осуществляется оценка исходных сигналов от смесей. В текущей реализации с применением алгоритма SOBI данное время составило 1.1 мс.

Максимальное время обработки сигналов ΔT составляет 1.1047 мс, что соответствует предельной битовой скорости передачи равной 905 бит/с.

Важно отметить, что полученные результаты соответствуют приему и обработке сигнала, который представляет собой непрерывный поток бит. Данные результаты были получены в зависимости от выбранного алгоритма слепой обработки сигналов SOBI и от текущих характеристик ПК, на котором производилась

обработка. Возможно уменьшение времени, затрачиваемого на обработку за счет оптимизации алгоритмов слепой обработки (или выбора более «быстрого» алгоритма) и демодуляции путем применения многопоточной обработки сигналов с применением ресурсов процессора и видеокарты. Так, если для слепой обработки алгоритмом SOBI предоставить сразу два потока, то можно добиться прироста по скорости до 2 раз. Наибольшего прироста по скорости обработки можно добиться при выполнении полной или частичной слепой обработки сигналов на ресурсах ПЛИС.

Заключение

Для задачи практической верификации имитационной модели канала связи методов слепой обработки сигналов в задаче компенсации помех в системах связи, был разработан аппаратно-программный комплекс.

По результатам имитационного моделирования был предложен и разработан аппаратно-программный комплекс для исследования методов слепой обработки сигналов при компенсации помех в радиосистемах связи. Данный аппаратно-программный комплекс состоит из цифрового приемника на базе технологии программно-определяемого радио. Данные с приемных антенн поступают на 8-канальный АЦП, передаются на ПЛИС, где происходит фильтрация и понижение частоты дискретизации, затем данные передаются на ПК, где производится слепая обработка сигналов. Полученные результаты свидетельствуют о возможности практического применения методов слепой обработки сигналов для компенсации помех в радиосистемах передачи информации.

Методы слепой обработки сигналов могут стать мощным средством для повышения помехоустойчивости систем связи благодаря уменьшению влияния помех на сигналы в системах, где значительно влияние помех на сигнал. При обработке сигнала, который представляет собой непрерывный поток бит, предельная битовая скорость передачи в конкретном случае для модуляции ФМн-2 составила 905 бит/с.

Список источников

1. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. – М.: Техносфера, 2013. - 528 с.
2. Bernard W. Adaptive signal processing, New Jersey, Prentice-Hall, 1985, 472 p.
3. Cichocki A., Amari S. Adaptive Blind Signal and Image Processing, John Wiley & Sons, Ltd, 2002, 586 p.
4. Pierre Comon, Christian Jutten. Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and applications, Academic Press, 2010, 831 p.
5. Cano Estefania. et al. Musical Source Separation: An Introduction // IEEE Signal Processing Magazine, 2019, no. 36, pp. 31-40. DOI:[10.1109/MSP.2018.2874719](https://doi.org/10.1109/MSP.2018.2874719)
6. Liu K.H., Dragoset W.H. Blind-source separation of seismic signals based on information maximization // Geophysics, 2013, vol. 4, no. 78. DOI:[10.1190/GEO2012-0136.1](https://doi.org/10.1190/GEO2012-0136.1)
7. Fitzgibbon S. P. et al. Removal of EEG Noise and Artifact Using Blind Source Separation // Journal of Clinical Neurophysiology, 2007. pp. 232-243. DOI:[10.1097/WNP.0b013e3180556926](https://doi.org/10.1097/WNP.0b013e3180556926)
8. Xizhi S. Blind Signal Processing. Theory and Practice, Shanghai: Springer, 2011, 368 p.

9. Хайкин С. Нейронные сети. - М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. - 1104 с.
10. Tyurkin 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, March 2021. DOI:[10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105](https://doi.org/10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105)
11. Belouchrani Adel. et al. A Blind Source Separation Technique Using Second-Order Statistics // IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, no. 45, pp. 434-444. DOI:[10.1109/78.554307](https://doi.org/10.1109/78.554307)
12. Тяпкин П.С. Проектирование перепрограммируемого SDR-приемника на ПЛИС с использованием методов МОП и автоматической генерации кода // Гагаринские чтения -2018 (Москва-Ахтубинск-Байконур, 17-20 апреля 2018): тезисы докладов. - М.: Изд-во МАИ, 2018. С. 222-223.
13. Ulversoy T. Software Defined Radio: Challenges and Opportunities // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, no. 12, pp. 531-550. DOI:[10.1109/SURV.2010.032910.00019](https://doi.org/10.1109/SURV.2010.032910.00019)
14. Манохин А.Е. Методы слепого подавления помех при обработке полезных сигналов. - Екатеринбург: Изд-во УРФУ, 2021. - 204 с.
15. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. – М.: Советское Радио, 1966. - 680 с.
16. 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. URL:<https://trudymai.ru/published.php?ID=171397>. DOI: [10.34759/trd-2023-128-13](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-13)

17. Ganesh R. Naik. Independent Component Analysis for Audio and Biosignal Applications, INTECH, Croatia, 2012, 356 p.
18. James V. Stone. Independent Component Analysis. A Tutorial Introduction. A Bradford Book. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 2004. 213 p.
19. Звонарев В.В., Карабельников И.А., Попов А.С. Методика расчета влияния сканирующей по частоте помехи на достоверность приема сигнала с QPSK модуляцией // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=167068>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-13
20. Маклашов В.А. Пиганов М.Н. Математическая модель функционирования станции активных помех // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118081>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-07

References

1. Dzhigan V.I. *Adaptivnaya fil'tratsiya signalov: teoriya i algoritmy* (Adaptive signal filtering: theory and algorithms), Moscow, Tekhnosfera, 2013, 528 p.
2. Bernard W. *Adaptive signal processing*, New Jersey, Prentice-Hall, 1985, 472 p.
3. Cichocki A., Amari S. *Adaptive Blind Signal and Image Processing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2002, 586 p.
4. Pierre Comon, Christian Jutten. *Handbook of Blind Source Separation: Independent Component Analysis and applications*, Academic Press, 2010, 831 p.
5. Cano Estefania. et al. Musical Source Separation: An Introduction, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2019, no. 36, pp. 31-40. DOI:10.1109/MSP.2018.2874719

6. Liu K.H., Dragoset W.H. Blind-source separation of seismic signals based on information maximization, *Geophysics*, 2013, vol. 4, no. 78. DOI:10.1190/GEO2012-0136.1
7. Fitzgibbon S. P. et al. Removal of EEG Noise and Artifact Using Blind Source Separation, *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2007. pp. 232-243. DOI:10.1097/WNP.0b013e3180556926
8. Xizhi S. *Blind Signal Processing. Theory and Practice*, Shanghai: Springer, 2011, 368 p.
9. Haykin Simon. *Neural Networks. A comprehensive foundation*. Prentice Hall PTR, 2004.
10. 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*, March 2021. DOI:10.1109/IEEECONF51389.2021.9416105
11. Belouchrani Adel. et al. A Blind Source Separation Technique Using Second-Order Statistics, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, no. 45, pp. 434-444. DOI: 10.1109/78.554307
12. Tyapkin P.S. *Gagarinskie chteniya -2018: tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo MAI, 2018, pp. 222-223.
13. Ulversoy T. Software Defined Radio: Challenges and Opportunities, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2010, no. 12, pp. 531-550. DOI:10.1109/SURV.2010.032910.00019
14. Manokhin A.E. *Metody slepogo podavleniya pomekh pri obrabotke poleznykh signalov* (Methods of blind interference suppression in processing useful signals). Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2021, 204 p.

15. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika* (Statistical radio engineering), Moscow, Sovetskoe Radio, 1966, 680 p.
16. Tyapkin P.S. Vazhenin N.A. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=171397>. DOI: 10.34759/trd-2023-128-13
17. Ganesh R. Naik. *Independent Component Analysis for Audio and Biosignal Applications*, INTECH, Croatia, 2012, 356 p.
18. James V. Stone. *Independent Component Analysis. A Tutorial Introduction*. A Bradford Book. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts. 2004. 213 p.
19. Zvonarev V.V., Karabel'nikov I.A., Popov A.S. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167068>. DOI: 10.34759/trd-2022-124-13
20. Maklashov V.A. Piganov M.N. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118081>. DOI: 10.34759/trd-2020-113-07

Статья поступила в редакцию 14.02.2023

Одобрена после рецензирования 02.03.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 14.02.2023; approved after reviewing on 02.03.2023; accepted for publication on 27.04.2023