

На правах рукописи

Либеровский Никита Юрьевич

**Разработка слепого алгоритма разделения
радиосигналов в системах когнитивного радио**

Специальность 2.2.13 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель	Чиров Денис Сергеевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиотехнические системы» МТУСИ
Официальные оппоненты	Зеленевский Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры войсковой части 33965. Иванкович Мария Владимировна – кандидат технических наук, заместитель директора Центра исследований перспективных технологий связи Федерального государственного унитарного предприятия «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева» (ФГУП НИИР).
Ведущая организация	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО ПГТУ).

Защита диссертации состоится «15» декабря 2022 года в 13:00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 55.2.002.01 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д. 8-а, МТУСИ, ауд. А-211.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ:
<http://www.srd-mtuci.ru/images/Dis-Liberovskiy/dis-Liberovskiy.pdf>

Афтореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.002.01,
доктор технических наук, доцент

М.В. Терешонок

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Активное развитие инфокоммуникационных систем в последние десятилетия привело к возникновению дефицита радиочастотного ресурса и, как следствие, усложнению электромагнитной обстановки. В результате работа любого радиоприемного устройства (РПУ) осложняется наличием разнообразных мешающих сигналов и помех. Особенно актуальным данный вопрос стал в условиях развития систем когнитивного радио, когда один и тот же частотный ресурс может быть использован как лицензированным (ЛП), так и нелицензированным пользователем (НЛП). В этом случае возможна ситуация, когда на входе РПУ возникает смесь сигналов ЛП и НЛП, причем сигнал НЛП будет считаться помехой сигналу ЛП.

Теоретической основой организации оптимального приема сигнала на фоне помех является статистическая радиотехника, развитию которой посвящены фундаментальные труды Левина Б.Р., Стратановича Р.Л., Тихонова В.И, Д. Миддлтона и другие. Однако для реализации большинства методов оптимального приема сигналов необходимо априорное знание о характеристиках принимаемого сигнала и помехи, что не всегда реализуемо на практике. Также, на смешивание полезного сигнала и помехи влияют параметры антенной системы, зависящие от многих факторов. Одним из перспективных способов решения таких задач являются методы слепого разделения сигналов (СРС), позволяющие оценить смешивающие коэффициенты и разделить полезный сигнал от помех, используя только входные смеси сигналов.

Методы слепого разделения сигналов (МСРС) активно применяются во многих областях. Наиболее естественное применение методы слепого разделения сигналов находят в задаче разделения акустических сигналов. Довольно часто возникает ситуация, когда приходится одновременно воспринимать несколько источников звука. Например, при студийной записи музыкальных произведений требуется повышенное разделение отдельных музыкальных инструментов для качественной студийной обработки. Также МСРС используются в задаче фильтрации помех при осуществлении телефонных разговоров или в процессе автоматического распознавания. Помимо аудио селекции МСРС применяются в медицине. В частности при обследовании головного мозга слепые методы позволяют повысить точность электромагнитных исследований. Связано это с тем, что сигналы, записанные на уровне скальпа представляют собой смеси различных источников.

Обширной областью применения СРС являются системы MIMO (Multiple input - multiple output). MIMO является одной из ключевых технологий в реализации стандартов 5G и 6G, позволяющих существенно увеличить спектральную эффективность передачи данных. За счет

большого количества передающих антенн базовая станция способна формировать несколько узконаправленных сигналов в сторону абонентов, а МСРС увеличивают помехоустойчивость приема сигналов от абонентов.

Степень разработанности темы исследования.

Первые исследования, посвященные теории СРС, появились в конце 80-х годов прошлого века. В конце 00-х годов публикационная активность по данной теме достигла максимума (444 публикации в 2010-м году), а в течение 10-х годов составляет примерно 250-300 статей в год. На рисунке 1 представлена диаграмма распределения публикации статей по теме СРС по годам. Ниже представлены основные работы по данной тематике. Основные наиболее цитируемые работы, посвященные базовым принципам СРС, опубликованы преимущественно в конце 90-х – начале 00-х гг.

Основным направлением развития МСРС систем связи является разработка статистических методов декорреляции и критериев независимости, основанных на оценке моментов или кумулянтов высших порядков входных сигналов. В самом простейшем случае используются значения кросскорреляционных статистик между сигналами с различным временным сдвигом, а задача алгоритма разделения сигналов сводится к одновременной диагонализации корреляционных матриц. Также за счет спектрального анализа ковариационной матрицы разработаны алгоритмы оценки количества независимых сигналов.

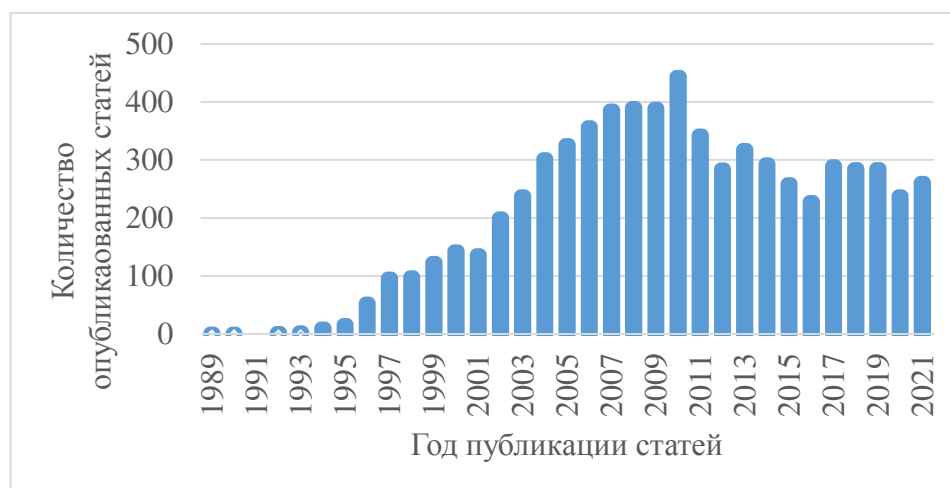


Рисунок 1 – График распределения публикации статей в изданиях IEEE по годам, связанные с темой СРС

Альтернативой статистическим методам одновременной декорреляции сдвиговых статистик второго порядка является группа методов независимого анализа компонент (Independent component analysis, ICA). ICA методы используют в качестве критериев независимости сигналов оптимизацию информационных величин, например минимизацию показателя взаимной информации или максимизация негэнтропии. Решение таких задач в

основном осуществляется посредством использования методов градиентного спуска. Подбор оптимальных параметров шага спуска позволяет найти решения, близкие к оптимальным.

Анализ существующих алгоритмов СРС показывает, что в настоящее время отсутствуют алгоритмы, позволяющие получить аналитическое решение задачи разделения сигналов с использованием статистик входных сигналов за априори известное количество арифметических операций. Наиболее близким к разработанному в диссертации алгоритму является метод разделения сдвиговых статистик второго порядка, так как в нем используется матрица ковариации. Однако при одновременной диагонализации нескольких матриц второго порядка используется итерационный метод градиентного спуска. Наличие в алгоритме итерационных методов сопряжено с необходимостью подбора оптимальных параметров либо максимального числа проводимых итераций при неизвестной в итоге точности разделения или наоборот, установки определенной точности сходимости алгоритма при неизвестном числе итераций. Поэтому **задача разработки новых алгоритмов** разделения радиосигналов, обеспечивающих получение решения за конечное число операций является актуальной.

В настоящей работе предложен новый алгоритм разделения двух комплексных радиосигналов.

Цель исследования – повышение помехоустойчивости передачи цифровых сигналов в системах когнитивного радио посредством использования алгоритма слепого разделения сигналов, основанного на декорреляции и приведении к нулю смешанного кумулянта четвертого порядка за конечное число арифметических операций.

Задача исследования – разработка алгоритма слепого разделения комплексных сигналов за конечное количество вычислений с использованием кумулянтов высших порядков, а также сравнение разработанного алгоритма с существующими.

Для достижения поставленной цели и решения научной задачи в работе были проведены следующие исследования:

1. Выбор математической модели смешивания исходных сигналов. Постановка предположений о исходных сигналах. Анализ существующих методов слепого разделения сигналов.
2. Разработка слепого алгоритма разделения двух комплексных сигналов с использованием кумулянтов четвертого порядка.
3. Сравнение разработанного алгоритма с существующими методами слепого разделения сигналов.

Объектом исследования являются действительные и комплексные цифровые сигналы.

Предметом исследования являются алгоритмы слепого разделения сигналов.

Методология и методы исследования. При проведении исследования использовались методы цифровой обработки сигналов, теории электрической связи, теории случайных процессов, теории вероятностей, статистической радиотехники, методы вычислительного эксперимента.

Научная новизна исследования.

1. Разработан алгоритм слепого разделения двух комплексных сигналов, использующий в качестве критерия независимости сигналов кумулянты четвертого порядка, отличающийся от известных тем, что он выполняется за априори известное количество арифметических операций и приводит смешанный кумулянт четвертого порядка выходных сигналов к нулю за счет получения аналитического решения частного случая полиномиального уравнения четвертого порядка.

2. Получено общее решение декорреляции двух комплексных сигналов за конечное число арифметических операций, основанное на системе уравнений второго порядка, приводящее дисперсии выходных сигналов к единице, а коэффициент ковариации к нулю, что обеспечивает помехоустойчивость систем когнитивного радио за счет разделения полезного сигнала и помехи.

Достоверность результатов и выводов обеспечивается корректностью применения математических методов и соответствием результатов, полученных путем аналитических расчетов и численного моделирования.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы состоит в разработке нового алгоритма слепого разделения сигналов на основе новых математических выражений для решения задачи декорреляции сигналов и решения задачи сведения кумулянтов четвертого порядка к нулю аналитическим методом. Практическая значимость работы состоит в повышении отношения сигнал/помеха (ОСП) на выходе приемника при детектировании и дальнейшей обработке цифровых сигналов без дополнительной априорной информации. Результаты диссертационной работе реализованы в грантах РФФИ 19-37-90010 «Разработка программного комплекса селекции сигналов, основанный на методе слепого разделения радиосигналов» и 19-29-06006 «Разработка фундаментальных основ методов обнаружения и идентификации беспилотных летательных аппаратов с использованием радиолокационных средств с всенаправленными антеннами и шумоподобным радиоизлучением», СЧ ОКР «Кварта» по ТЗ Госзаказчика и в учебном процессе МТУСИ в дисциплине «Радиотехнические системы».

Апробация работы.

Результаты, изложенные в диссертации, были обсуждены на следующих конференциях:

1. Технологии информационного общества (Москва, 2017-2020 гг.).

2. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (Казань, 2017).
3. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (Светлогорск, 2020).
4. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (Светлогорск, 2021).
5. Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (Архангельск, 2022).
6. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (Москва, 2019).
7. Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications (Москва, 2021).
8. Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (Санкт-Петербург, 2021).
9. Telecommunications Forum (Белград, 2021).

Публикации результатов.

По теме диссертации было опубликовано тринадцать работ. Из них три опубликованы в журнале из списка ВАК и восемь работ проиндексированы в SCOPUS.

Личный вклад автора.

Все выносимые на защиту научные результаты получены соискателем лично. Автор принимал непосредственное участие в планировании и проведении работы, обработке и обсуждении полученных результатов, подготовке публикаций.

Соответствие паспорту специальности.

Проведенное автором исследование входит в направление исследования «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости.» (п. 6 паспорта научной специальности).

Положения, выносимые на защиту.

1. Полученное аналитическое выражение приводит смешанный кумулянт четвертого порядка выходных сигналов к нулю за счет решения частного случая полиномиального уравнения четвертого порядка за конечное количество вычислений.
2. Алгоритм слепого разделения двух комплексных сигналов на основе новых математических выражений для решения задачи сведения смешанных кумулянтов четвертого порядка к нулю аналитическим методом обеспечивает относительный выигрыш в размере

выборки отсчетов для расчета статистик не менее 3 раз по сравнению с алгоритмом FastICA при детектировании ЧМ-2 сигналов в диапазоне частоты битовых ошибок от 0,0001 до 0,01.

3. Алгоритм слепого разделения двух комплексных сигналов на основе новых математических выражений для решения задачи сведения смешанных кумулянтов четвертого порядка к нулю аналитическим методом обеспечивает выигрыш ОСП не менее 12 дБ за конечное количество вычислений при детектировании ЧМ-2 сигналов в диапазоне частоты битовых ошибок от 0,0001 до 0,1.

Структура работы.

Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и двух приложений. Основная часть изложена на 69 страницах машинописного текста, содержит 13 рисунков и 1 таблицу; список литературы состоит из 131 наименований. Приложения изложены на 10 страницах машинописного текста.

Краткое содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, проведен анализ современного уровня разработанных научно-технических решений, определены цель, задачи и методы исследований. Конкретизируются научная новизна, личный вклад в работу, практическая значимость, сведения об апробации работы, публикациях автора, а также положения, выносимые на защиту.

В **первом разделе** рассматривается модель смешивания сигналов, формализуется задача слепого разделения сигналов, проводится анализ существующих методов определения коэффициентов размешивающей матрицы и слепого разделения сигналов.

МСПС оперируют моделью мгновенного смешивания сигналов (1), схожей с моделью сигнально-помеховой обстановки

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{A}\mathbf{S}(t) + \hat{\mathbf{N}}(t), \quad (1)$$

где $\mathbf{X} = \mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_N(t) \end{pmatrix}$ – вектор наблюдений;

$$\mathbf{S} = \mathbf{S}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{s}_1(t) \\ \dots \\ \mathbf{s}_M(t) \end{pmatrix}$$
 – вектор источников, подлежащий оценке;

\mathbf{A} – неизвестная смешивающая матрица размера $N \times M$;

$$\hat{\mathbf{N}}(t) = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{n}}_1(t) \\ \dots \\ \hat{\mathbf{n}}_N(t) \end{bmatrix} - \text{аддитивный белый гауссовый шум.}$$

В процессе работы МСРС не делают различий между полезным и помеховыми сигналами. Это означает, что МСРС параллельно могут оценивать сразу несколько сигналов.

МСРС решает задачу определения вектора источников \mathbf{S} используя только вектора наблюдений \mathbf{X} при ограничении на число сигналов $N \leq M$. В большинстве алгоритмов слепого разделения сигналов на сигналы $s_i(t)$ накладывают требование статистической независимости.

Решением задачи слепого разделения является размешивающая матрица \mathbf{W} , удовлетворяющая условию

$$\mathbf{W}\mathbf{A} = \mathbf{I}. \quad (2)$$

Если размешивающая матрица \mathbf{W} найдена, то вектор источников определяют следующим образом

$$\mathbf{S} = \mathbf{W}\mathbf{X}. \quad (3)$$

В общем случае МСРС включают в себя четыре шага, показанных на рисунке 2. Процедура центрирования данных важна для работоспособности МСРС, и состоит в обнулении постоянной составляющей вектора наблюдений.

Беление данных заключается в том, что вектор наблюдения $\mathbf{X} = \mathbf{X}(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}_N(t) \end{pmatrix}$

линейно преобразуется в вектор наблюдений $\mathbf{X}' = \mathbf{X}'(t) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}'_1(t) \\ \dots \\ \mathbf{x}'_N(t) \end{pmatrix}$.

Компоненты вектора \mathbf{x}' обладают следующими свойствами: $\mathbf{x}'_i(t)$ не коррелированы между собой и имеют единичную дисперсию. На шаге беления данных оценивают число сигналов и выполняют процедуру редукции (уменьшения) размерности. Для беления данных применяют метод анализа главных компонент.

Процедура контрастирования вектора \mathbf{x}' представляет собой поиск такого его линейного преобразования, при котором достигается экстремум *оценочной функции*. Контрастная функция отражает меру независимости получаемых компонент, поэтому методы МСРС являются комбинацией той или иной контрастной функции и метода её оптимизации. Очень часто

в методах слепого разделения сигналов на этапе контрастирования используют математический аппарат методов анализа независимых компонент (АНК).

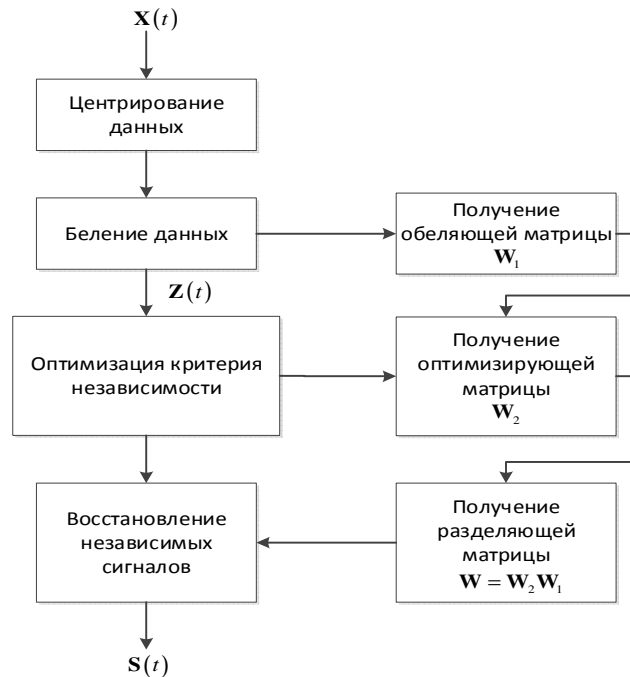


Рисунок 2 – Схема работы методов слепого разделения сигналов

В настоящее время разработано большое количество методов слепого различения сигналов. В общем случае можно разделить три большие группы, работающие в условиях априорной неопределенности параметров сигналов, характеристик и геометрии антенной решетки (АР): методы декорреляции, методы максимизации негауссовости и энтропийные методы.

Во **втором разделе** представлены основные используемые статистические величины, формулируется предложенный критерий разделения сигналов, решается задача одновременной декорреляции двух комплексных случайных сигналов и приведения их смешанного кумулянта четвертого порядка к нулю, представлен разработанный алгоритм слепого разделения сигналов.

В данной работе в качестве основы СРС было использовано приведение смешанных кумулянтов $\hat{\kappa}_{n_1 m_1 n_2 m_2}$ выходных случайных величин к нулю. Кумулянты выходных случайных величин непосредственно связаны с кумулянтной функцией $\Psi_{(\hat{z}_1, \hat{z}_2)}$ выходных случайных величин и могут быть выражены как ее частная производная:

$$\begin{aligned}
\hat{\kappa}_{n_1 m_1 n_2 m_2} &= \left(\frac{2}{j}\right)^{n_1+m_1+n_2+m_2} \frac{\partial^{n_1+m_1+n_2+m_2} \Psi_{(\hat{z}_1, \hat{z}_2)}(0, 0)}{\partial \hat{z}_1^{m_1} \partial \hat{z}_1^{*n_1} \partial \hat{z}_2^{m_2} \partial \hat{z}_2^{*n_2}}, \\
\Psi_{(\hat{z}_1, \hat{z}_2)}(\hat{z}_1, \hat{z}_2) &= \Psi_{(z_1, z_2)}(w_{11}^* \hat{z}_1 + w_{21}^* \hat{z}_2, w_{12}^* \hat{z}_1 + w_{22}^* \hat{z}_2), \\
\Psi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2) &\triangleq \text{Log} \left[\Phi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2) \right], \\
\Phi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2) &\triangleq E_{(z_1, z_2)} \left[\exp \left(j \left(\text{Re} \{ z_1^* Z_1 \} + \text{Re} \{ z_2^* Z_2 \} \right) \right) \right], \\
\hat{Z}_1 &= w_{11} Z_1 + w_{12} Z_2, \\
\hat{Z}_2 &= w_{21} Z_1 + w_{22} Z_2,
\end{aligned} \tag{4}$$

где Z_1 и Z_2 – входные случайные величины; \hat{Z}_1 и \hat{Z}_2 – выходные случайные величины; $\Psi_{(\hat{z}_1, \hat{z}_2)}(\hat{z}_1, \hat{z}_2)$ – кумулянтная функция выходных случайных величин; $\Psi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2)$ – кумулянтная функция входных случайных величин; $\Phi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2)$ – характеристическая функция входных случайных величин; w_{11} , w_{12} , w_{21} и w_{22} – элементы размещивающей матрицы, которые необходимо найти; j – мнимая единица; $\text{Re}\{z\}$ – действительная часть комплексного числа z ; $E_{(z_1, z_2)}[\dots]$ – операция усреднения.

Воспользовавшись вероятностным аппаратом для КСВ в качестве критерия разделения выходных сигналов были взяты комплексные аналоги кумулянтов для случая действительных сигналов:

$$\begin{cases} \hat{\kappa}_{1100} = 1 \\ \hat{\kappa}_{0011} = 1 \\ \hat{\kappa}_{1001} = 0 \\ \hat{\kappa}_{2002} = 0 \end{cases}, \tag{5}$$

где $\hat{\kappa}_{1100}$, $\hat{\kappa}_{0011}$, $\hat{\kappa}_{1001}$ и $\hat{\kappa}_{2002}$ – кумулянты выходных сигналов соответствующих порядков. Также при решении системы уравнений (5) будет предполагаться, что существует только единственное нетривиальное решение с учетом перестановок и фазового коэффициента.

Дополнительно дополнительно проименуем следующие величины:

$$\begin{aligned}
\kappa_{1100} = D_1, \kappa_{0011} = D_2, \hat{\kappa}_{1100} = \hat{D}_1, \hat{\kappa}_{0011} = \hat{D}_2, \\
\kappa_{1001} = R, \hat{\kappa}_{1001} = \hat{R}, r = \frac{R}{\sqrt{D_1 D_2}}, \hat{r} = \frac{\hat{R}}{\sqrt{\hat{D}_1 \hat{D}_2}},
\end{aligned} \tag{6}$$

где D_1 и D_2 – дисперсии входных случайных величин; \hat{D}_1 и \hat{D}_2 – дисперсии выходных случайных величин; R и \hat{R} – ковариации входных и выходных случайных величин

соответственно; r и \hat{r} – коэффициенты ковариаций входных и выходных случайных величин соответственно.

Воспользовавшись преобразованием $\Psi_{(\hat{z}_1, \hat{z}_2)}(\hat{z}_1, \hat{z}_2)$ в $\Psi_{(z_1, z_2)}(z_1, z_2)$, выражением кумулянтов через частные производные (4) и правилами дифференцирования сложных функций можно получить следующие выражения для \hat{D}_1 , \hat{D}_2 , \hat{R} через D_1 , D_2 , R соответственно:

$$\begin{cases} \hat{D}_1(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = w_{11}w_{11}^*D_1 + w_{11}w_{12}^*R + w_{12}w_{11}^*R^* + w_{12}w_{12}^*D_2 = 1 \\ \hat{D}_2(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = w_{21}w_{21}^*D_1 + w_{21}w_{22}^*R + w_{22}w_{21}^*R^* + w_{22}w_{22}^*D_2 = 1 \\ \hat{R}(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = w_{11}w_{21}^*D_1 + w_{11}w_{22}^*R + w_{12}w_{21}^*R^* + w_{12}w_{22}^*D_2 = 0 \\ \hat{\mathcal{K}}_{2002}(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = w_{11}^2w_{21}^{*2}\mathcal{K}_{2200} + 2w_{11}^2w_{21}^*w_{22}^*\mathcal{K}_{2101} + w_{11}^2w_{22}^{*2}\mathcal{K}_{2002} + \\ + 2w_{11}w_{12}w_{21}^{*2}\mathcal{K}_{1210} + 4w_{11}w_{12}w_{21}^*w_{22}^*\mathcal{K}_{1111} + 2w_{11}w_{12}w_{22}^{*2}\mathcal{K}_{1012} + \\ + w_{12}^2w_{21}^{*2}\mathcal{K}_{0220} + 2w_{12}^2w_{21}^*w_{22}^*\mathcal{K}_{0121} + w_{12}^2w_{22}^{*2}\mathcal{K}_{0022} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) можно разбить на несколько этапов:

1. Найти общее решение уравнений $\hat{D}_1(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = 1$ и $\hat{D}_2(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = 1$.
2. Уменьшить количество степеней свободы решения, полученного на этапе 1, решив уравнение $\hat{R}(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = 0$.
3. Подставить решение, полученное на этапе 2 в уравнение $\hat{\mathcal{K}}_{2002}(w_{11}, w_{12}, w_{21}, w_{22}) = 0$ и решить его.

Итоговый алгоритм разделения двух комплексных сигналов состоит из следующих этапов:

1. По входным отсчетам $Z_1(l)$ и $Z_2(l)$ вычислить оценки начальных моментов и кумулянтов:

$$\bar{\alpha}_{n_1 m_1 n_2 m_2} = \frac{1}{L} \sum_{l=0}^{L-1} Z_1^{n_1}(l) Z_1^{*m_1}(l) Z_2^{n_2}(l) Z_2^{*m_2}(l),$$

$$\bar{D}_1 = \bar{K}_{1100} = \bar{\alpha}_{1100} - \bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0100}$$

$$\bar{D}_2 = \bar{K}_{0011} = \bar{\alpha}_{0011} - \bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0001}$$

$$\bar{R} = \bar{K}_{1001} = \bar{\alpha}_{1001} - \bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0001}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{1111} = & -6\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1000} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{1100} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1010} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0110} \bar{\alpha}_{1000} - \\ & -\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1110} + 2\bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1001} + 2\bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0101} \bar{\alpha}_{1000} - \bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{1101} + 2\bar{\alpha}_{0011} \bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1000} - \\ & -\bar{\alpha}_{0011} \bar{\alpha}_{1100} - \bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1011} - \bar{\alpha}_{0101} \bar{\alpha}_{1010} - \bar{\alpha}_{0110} \bar{\alpha}_{1001} - \bar{\alpha}_{0111} \bar{\alpha}_{1000} + \bar{\alpha}_{1111} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{2200} = & -6\bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1000}^2 + 2\bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{2000} + 8\bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1100} - 2\bar{\alpha}_{0100} \bar{\alpha}_{2100} + \\ & + 2\bar{\alpha}_{0200} \bar{\alpha}_{1000}^2 - \bar{\alpha}_{0200} \bar{\alpha}_{2000} - 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1200} - 2\bar{\alpha}_{1100}^2 + \bar{\alpha}_{2200} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{0022} = & -6\bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{0010}^2 + 2\bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{0020} + 8\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0011} - 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0021} + \\ & + 2\bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{0010}^2 - \bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{0020} - 2\bar{\alpha}_{0010} \bar{\alpha}_{0012} - 2\bar{\alpha}_{0011}^2 + \bar{\alpha}_{0022} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{2002} = \bar{K}_{0220}^* = & -6\bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{1000}^2 + 2\bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{2000} + 8\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1001} - 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{2001} + \\ & + 2\bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{1000}^2 - \bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{2000} - 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1002} - 2\bar{\alpha}_{1001}^2 + \bar{\alpha}_{2002} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{2101} = \bar{K}_{1210}^* = & -6\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1000}^2 \bar{\alpha}_{0100} + 4\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1100} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{0100} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{2000} \bar{\alpha}_{0100} - \\ & -\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{2100} + 2\bar{\alpha}_{1000}^2 \bar{\alpha}_{0101} + 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{0100} - 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1101} - 2\bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{1100} - \bar{\alpha}_{2000} \bar{\alpha}_{0101} - \\ & -\bar{\alpha}_{2001} \bar{\alpha}_{0100} + \bar{\alpha}_{2101} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{K}_{1012} = \bar{K}_{0121}^* = & -6\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{0010} + 4\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{0011} + 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{0010} + 2\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{0010} - \\ & -\bar{\alpha}_{1000} \bar{\alpha}_{0012} + 2\bar{\alpha}_{0001}^2 \bar{\alpha}_{1010} + 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{0010} - 2\bar{\alpha}_{0001} \bar{\alpha}_{1011} - 2\bar{\alpha}_{1001} \bar{\alpha}_{0011} - \bar{\alpha}_{0002} \bar{\alpha}_{1010} - \\ & -\bar{\alpha}_{1002} \bar{\alpha}_{0010} + \bar{\alpha}_{1012} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\bar{r} = \frac{\bar{R}}{\sqrt{\bar{D}_1 \bar{D}_2}}$$

$$\bar{\gamma}_{n_1 m_1 n_2 m_2} = \frac{\bar{K}_{n_1 m_1 n_2 m_2}}{\sqrt{\bar{D}_1}^{n_1+m_1} \sqrt{\bar{D}_2}^{n_2+m_2}}.$$

2. Вычислить коэффициенты A и B :

$$A = (\bar{\gamma}_{0022} \bar{r}^2 - 2\bar{\gamma}_{1012} \bar{r} + \bar{\gamma}_{2002}) / (1 - \bar{r} \bar{r}^*),$$

$$B = \frac{\bar{\gamma}_{0022} \bar{r} - \bar{\gamma}_{1012} + (-\bar{\gamma}_{0022} \bar{r}^2 \bar{r}^* + 2\bar{\gamma}_{1012} \bar{r} \bar{r}^* - 2\bar{\gamma}_{1111} \bar{r} - \bar{\gamma}_{2002} \bar{r}^* + \bar{\gamma}_{2101} + \bar{r}^2 \bar{\gamma}_{0121}) / (1 - \bar{r} \bar{r}^*)}{\sqrt{1 - \bar{r} \bar{r}^*}}.$$

3. Вычислить значения $p = \frac{B}{A}$ и $q = \frac{pp^* + \sqrt{(pp^*)^2 + 4pp^*}}{2p^*}$.

4. Вычислить коэффициенты размешивающей матрицы w_{11} , w_{12} , w_{21} и w_{22} :

$$\begin{aligned}
w_{11} &= \frac{1}{\sqrt{D_1}} \frac{1}{\sqrt{1-\bar{r}r^*}} \sqrt{\frac{qq^*}{1+qq^*}} e^{j\varphi_1}, \\
w_{12} &= \frac{1}{\sqrt{D_2}} \left[-\frac{\bar{r}}{\sqrt{1-\bar{r}r^*}} \sqrt{\frac{qq^*}{1+qq^*}} + \sqrt{\frac{qq^*}{1+qq^*}} \frac{1}{q} \right] e^{j\varphi_1}, \\
w_{21} &= \frac{1}{\sqrt{D_1}} \frac{1}{\sqrt{1-\bar{r}r^*}} \sqrt{\frac{1}{1+qq^*}} e^{j\varphi_2}, \\
w_{22} &= \frac{1}{\sqrt{D_2}} \left[-\frac{\bar{r}}{\sqrt{1-\bar{r}r^*}} \sqrt{\frac{1}{1+qq^*}} - \frac{q^*}{\sqrt{1+qq^*}} \right] e^{j\varphi_2}.
\end{aligned} \tag{9}$$

Таким образом, разработан новый алгоритм разделения двух комплексных радиосигналов за конечное число арифметических операций.

В третьем разделе представлен критерий оценки эффективности разделения сигналов, приведены результаты: оценки границ вырожденного смешивания сигналов, оценки оптимального размера выборки расчета статистик, оценки минимального ОСВШ, позволяющего эффективно разделять сигналы, оценки выигрыша в ОСП при различных значениях ОСВШ.

Для оценки работы предложенного алгоритма СРС было проведено программное моделирование на базе следующей модели. В качестве полезного сигнала был сгенерирован 1000000 случайных бит $\{b_n\}_{n=0}^{999999}$, $b_n \in \{0,1\}$, преобразованный в ЧМ-2 сигнал:

$$\begin{aligned}
s_n(m) &= A \cos\left(\frac{2\pi}{M} m(k+b_n) + \varphi\right) \\
m &= 0 \dots M-1,
\end{aligned} \tag{10}$$

где A – амплитуда модулированного сигнала; M – число отсчетов на один бит; $k+b_n$ – число периодов модулированного сигнала на один бит, φ – фаза модулированного сигнала. В эксперименте были использованы следующие параметры: $A=1$, $M=4$, $k=1$, $\varphi=0$.

Поскольку алгоритм СРС не может извлечь информацию о приходящей фазе сигнала, то для демодуляции и декодирования модулированного сигнала используется алгоритм корреляционного некогерентного детектирования ЧМ-2 сигналов. Для цифровых сигналов решение о принятом бите по принятому сигналу $s(m)$ осуществляется посредством сравнения двух статистик z_0 и z_1 :

$$\begin{aligned}
z_0 &= \left(\sum_{m=0}^{M-1} \operatorname{Re}\{s(m)\} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{M} k\right) \right)^2 + \left(\sum_{m=0}^{M-1} \operatorname{Re}\{s(m)\} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{M} k\right) \right)^2 \\
z_1 &= \left(\sum_{m=0}^{M-1} \operatorname{Re}\{s(m)\} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{M} (k+1)\right) \right)^2 + \left(\sum_{m=0}^{M-1} \operatorname{Re}\{s(m)\} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{M} (k+1)\right) \right)^2.
\end{aligned} \tag{11}$$

Если $z_0 < z_1$, то принимается решение о принятии бита 0, иначе принимается решение о принятии бита 1.

В качестве помехи и собственных шумов в моделировании использовались независимые последовательности нормально распределенных и независимых комплексных случайных величин с математическим ожиданием, равным нулю, и дисперсией, равной единице.

Модель смешивание полезного сигнала, помехи и собственных шумов выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} x_1(n) &= a_{11}s(n) + a_{12}u(n) + a_{1N}N_1(n) \\ x_2(n) &= a_{21}s(n) + a_{22}u(n) + a_{2N}N_2(n), \end{aligned} \quad (12)$$

где $x_1(n)$ и $x_2(n)$ – наблюдаемые смешанные сигналы; $s(n)$ – полезный ЧМ-2 сигнал; $u(n)$ – помеха; $N_1(n)$ и $N_2(n)$ – собственные шумы наблюдаемых сигналов.

Смешивающие коэффициенты определены следующим образом:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1, a_{12} = 10^{\frac{-SIR_1}{20}} e^{j\alpha_1}, a_{13} = 10^{\frac{-SNR_1}{20}}, \\ a_{21} &= 1, a_{22} = 10^{\frac{-SIR_2}{20}} e^{j\alpha_2}, a_{23} = 10^{\frac{-SNR_2}{20}}, \end{aligned} \quad (13)$$

где SIR_1 – ОСП для первого наблюдаемого сигнала в дБ; α_1 – разность фаз между помехой и полезным сигналом для первого наблюдаемого сигнала; SNR_1 – ОСВШ для первого наблюдаемого сигнала в дБ; SIR_2 – ОСП для второго наблюдаемого сигнала в дБ; α_2 – разность фаз между помехой и полезным сигналом для второго наблюдаемого сигнала; SNR_2 – ОСВШ для второго наблюдаемого сигнала в дБ.

Результатом работы алгоритма СРС являются коэффициенты размешивающей матрицы w_{11} , w_{12} , w_{21} и w_{22} . При их применении к наблюдаемым сигналам $x_1(n)$ и $x_2(n)$ рассчитываются выходные сигналы $y_1(n)$ и $y_2(n)$:

$$\begin{aligned} y_1(n) &= w_{11}x_1(n) + w_{12}x_2(n) \\ y_2(n) &= w_{21}x_1(n) + w_{22}x_2(n). \end{aligned} \quad (14)$$

Оценка эффективности работы алгоритма СРС основана на сравнении количества ошибочно принятых бит информации полезного сигнала до и после работы алгоритма СРС. Для оценки приема полезного сигнала до СРС рассчитываются отношение ошибочно детектированных бит к их общему числу при использовании сигналов $x_1(n)$ и $x_2(n)$. После чего в качестве итогового значения критерия приема выбирается минимальное значение частоты битовых ошибок.

Критерий приема сигналов после СРС осуществляется аналогично, но для расчета частоты битовых ошибок используются сигналы $y_1(n)$ и $y_2(n)$.

Также предложенный алгоритм слепого разделения сигналов сравнивается с алгоритмом FastICA для комплексных сигналов. FastICA является одним из самых популярных алгоритмов слепого разделения сигналов, применяемым в различных областях цифровой обработки. Помимо классического алгоритма было разработано множество вариаций FastICA для решения более узких задач. Поэтому представляется уместным сравнение предложенного алгоритма именно с алгоритмом FastICA. FastICA в качестве критерия независимости использует максимизацию меры негауссовости выходных сигналов. Оптимизация критерия осуществляется посредством метода простой итерации.

В исследовании границ вырожденного смешивания сигналов проводится оценка допустимых значений SIR_2 при $SIR_1 = 0$ дБ. Значения SIR_2 варьируются в диапазоне от -1 до 1 дБ. Значения SNR_1 и SNR_2 равны 100 дБ, таким образом их влияние на результаты работы алгоритма СРС ничтожно. Результаты эксперимента представлены на рисунке 3. Из полученных данных можно сделать вывод, что для предложенного алгоритма СРС допустимое отношение мощностей полезного сигнала и помехи должно составлять более 1 дБ. При меньших отношениях наблюдается рост частоты битовых ошибок сигналов на выходе алгоритма СРС.

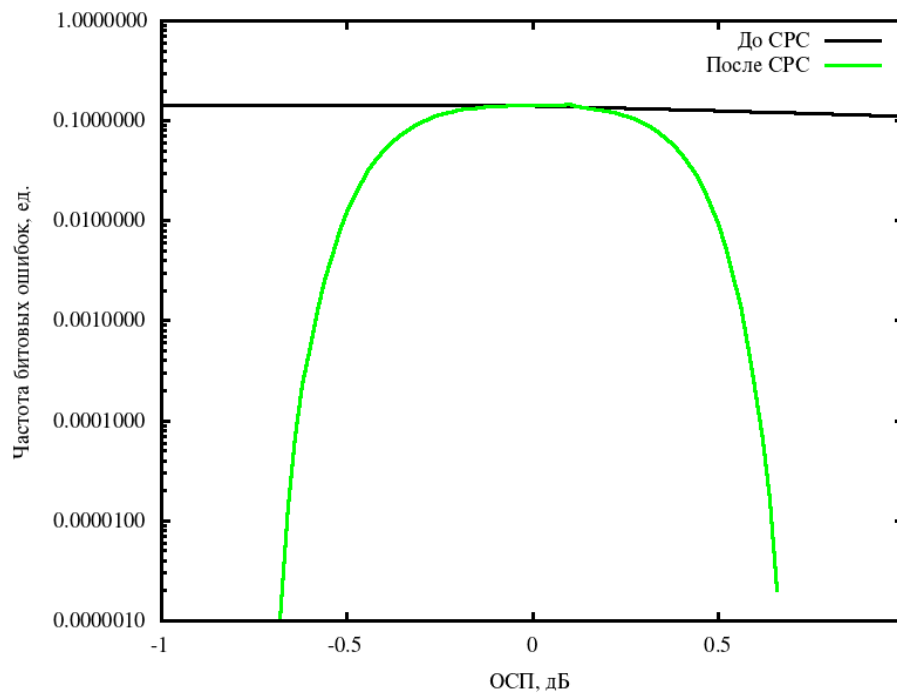


Рисунок 3 – График зависимости частоты битовых ошибок от ОСП для второго наблюдаемого сигнала при фиксированном ОСП для первого наблюдаемого сигнала

В исследовании оценки оптимального размера выборки расчета статистик оценивается нижняя граница размера выборки расчета статистик, не приводящей к резкому повышению частоты битовых ошибок вследствие большой дисперсии вычисляемых статистик. Значения SIR_1 , SIR_2 , SNR_1 и SNR_2 равны 0, 5, 100 и 100 дБ соответственно. На рисунке 4 представлена зависимость частоты битовых ошибок от размера используемой для расчета статистик выборки в диапазоне от 10 до 100000 отсчетов. По полученным данным можно сделать вывод, что достаточный размер выборки составляет 10 тысяч отсчетов. При меньших значениях размера выборки наблюдаются резкий случайный рост частоты битовых ошибок.

Также можно сделать вывод, что после алгоритма FastICA во всем наблюдаемом интервале размера выборки детектирование полезного сигнала осуществляется с большей частотой битовых ошибок, чем после предложенного алгоритма. Для оценки относительного выигрыша в размере выборки предложенного алгоритма от алгоритма FastICA был построен сравнительный график на рисунке 5. Из графика можно сделать вывод, что при варьировании частоты битовых ошибок от 0,00001 до 0,01 относительный выигрыш в размере выборки составляет не менее 3 раз.

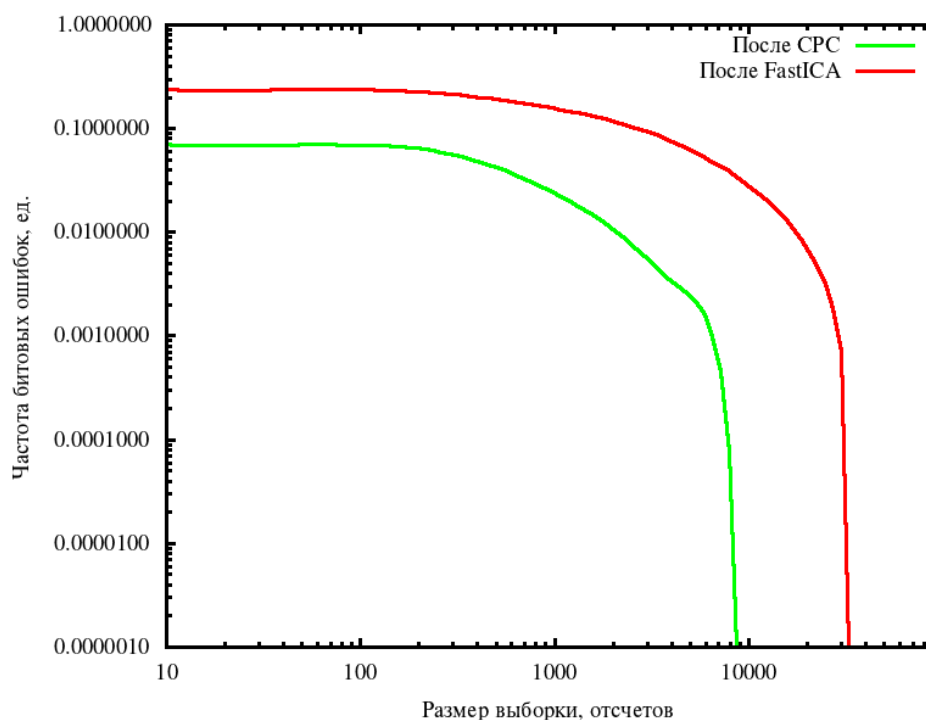


Рисунок 4 – График зависимости частоты битовых ошибок выходных сигналов после CPC от размера выборки, используемой при подсчете статистик

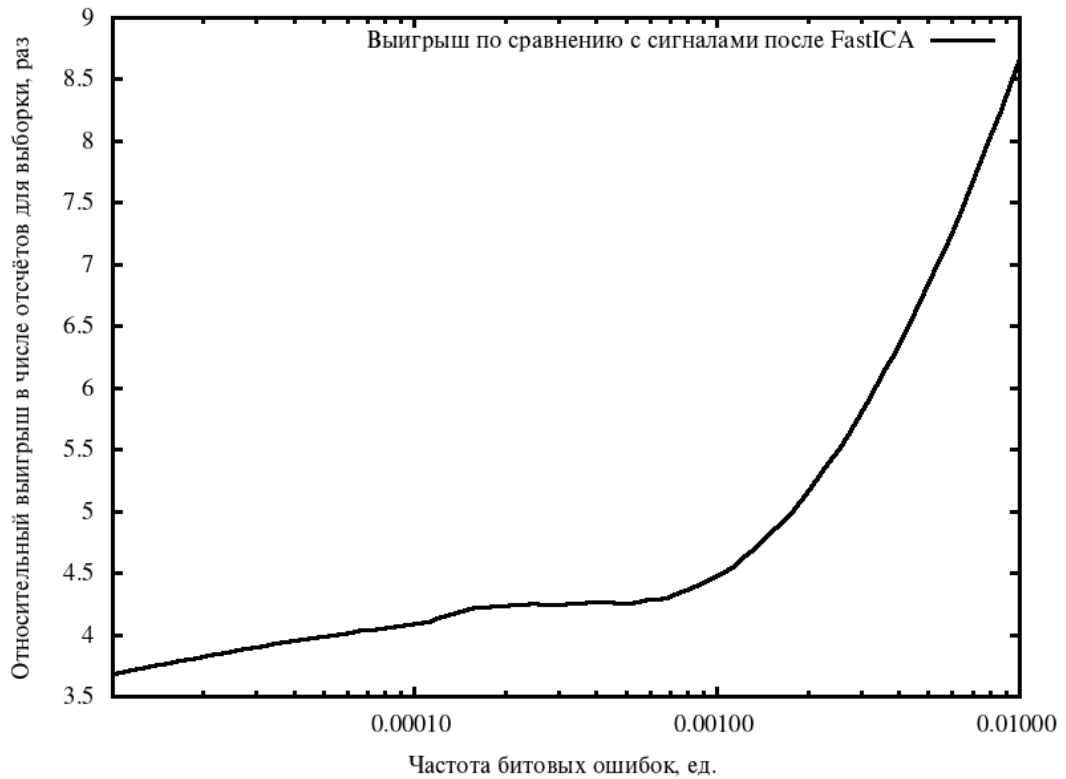


Рисунок 5 – График зависимости относительного выигрыша в размере выборки для расчета статистик между предложенным алгоритмом и алгоритмом FastICA от частоты битовых ошибок.

В исследовании работы алгоритма СРС в присутствии собственных шумов рассчитываются значения частоты битовых ошибок до и после СРС в зависимости от ОСВШ при фиксированных значениях ОСП. При проведении данного моделирования SIR_1 и SIR_2 равны 0 и 5 дБ соответственно, а SNR_1 и SNR_2 равны между собой и варьируются от -100 до 100 дБ. Размер выборки отсчетов для расчета статистик равен 1000000. На рисунке 6 представлен график зависимости частоты битовых ошибок до и после СРС при различных значениях ОСВШ. По результатам моделирования можно сделать вывод, что эффективное СРС возможно при ОСВШ выше 24 дБ, а при ОСВШ менее 16 дБ частота битовых ошибок после СРС не отличается от случая до СРС. Также можно отметить, что в сравнении с алгоритмом FastICA предложенный алгоритм не уступает в эффективности разделения сигналов на всем наблюдаемом интервале ОСВШ.

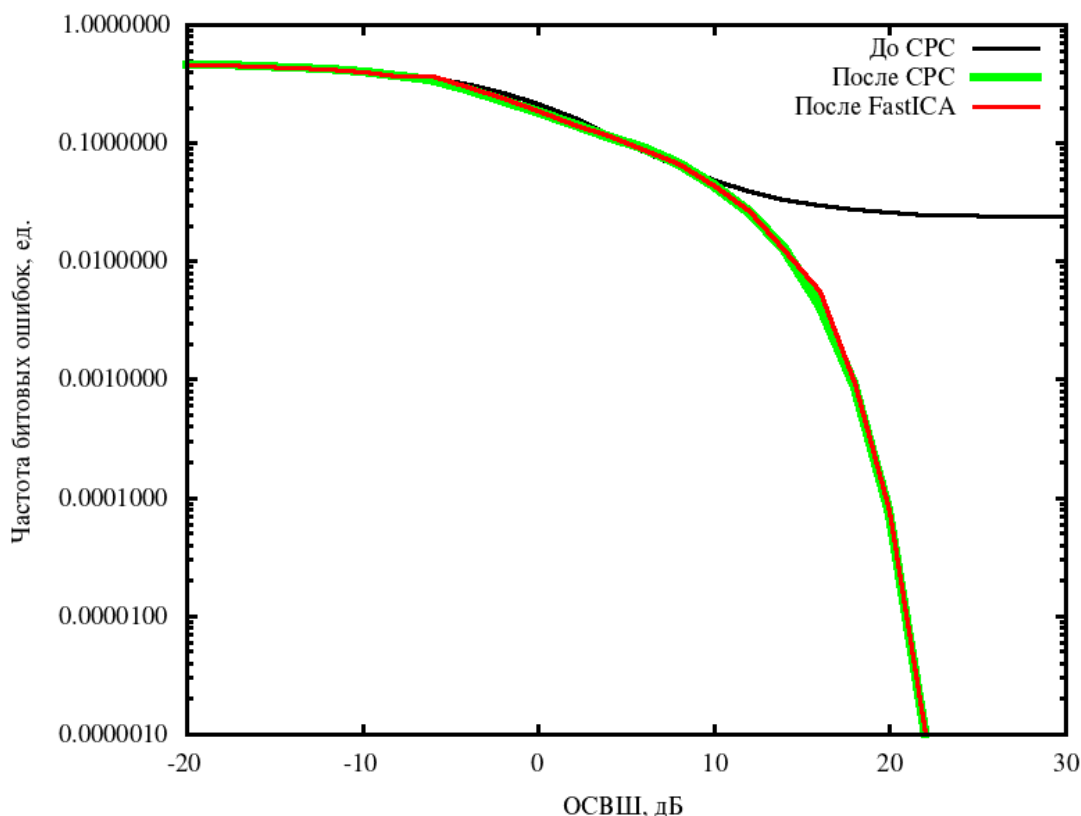


Рисунок 6 – График зависимости частоты битовых ошибок до и после СРС от отношения сигнал/шум при фиксированных значениях ОСП

В исследовании оценки выигрыша в ОСП при различных значениях ОСВШ для нескольких значений ОСВШ (от 20 до 40 дБ с шагом в 10 дБ) определялось значение частоты битовых ошибок при различных ОСП сигналах (от -100 до 20 дБ с шагом в 2 дБ), а затем по полученным данным рассчитывался выигрыш в ОСП при одинаковых значениях частоты битовых ошибок детектирования сигналов после предложенного алгоритма по сравнению с сигналами до СРС. На рисунках 7-8 представлены график зависимости частоты битовых ошибок детектирования полезного сигнала от ОСП при ОСВШ, равном 30 дБ, а также график зависимости выигрыша в ОСП предложенного алгоритма СРС от частоты битовых ошибок.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что при значении ОСВШ, большем 30 дБ, и частоты битовых ошибок, большей 0,0001, выигрыш в ОСП составляет не менее 12 дБ.

Также были предложены две программные реализации разработанного алгоритма СРС: последовательный и адаптированный для выполнения на устройствах с поддержкой параллельных вычислений.

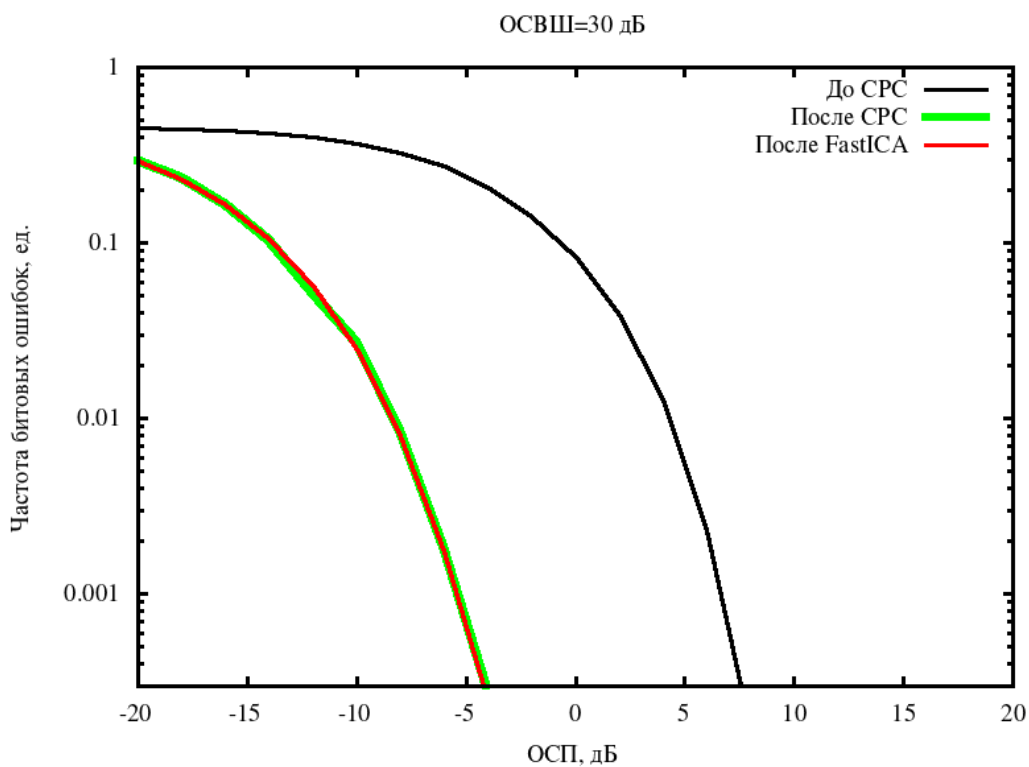


Рисунок 7 – График зависимости частоты битовых ошибок от ОСП для сигналов до СРС, после предложенного алгоритма СРС и алгоритма FastICA при ОСВШ, равном 30 дБ

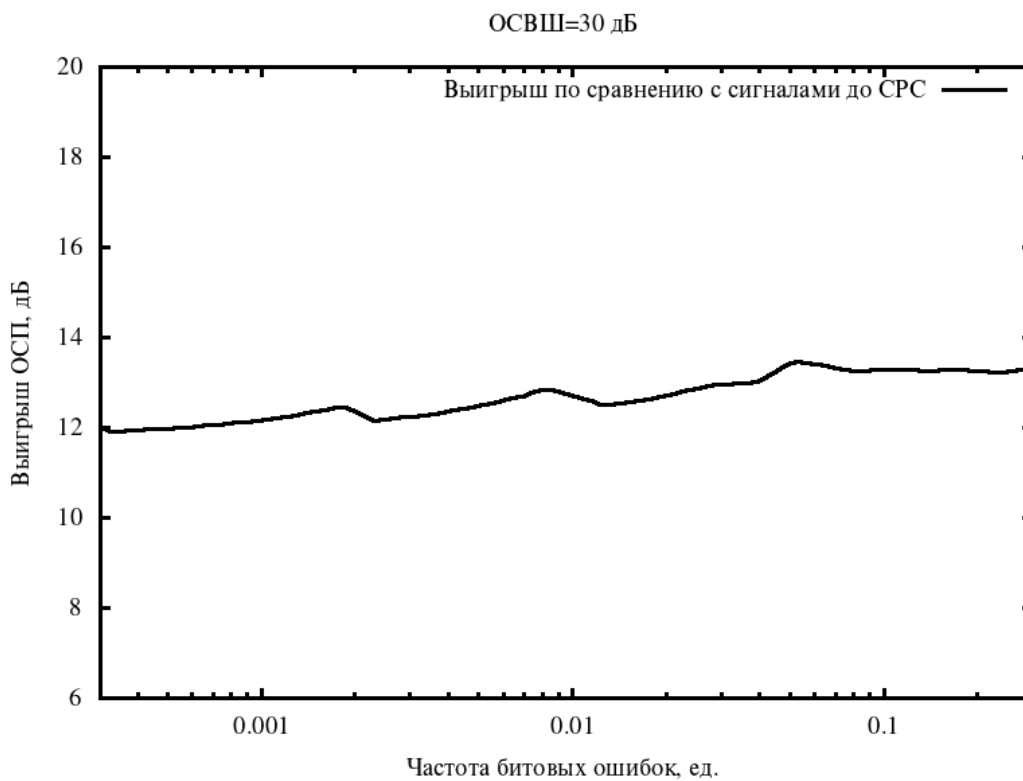


Рисунок 8 – График зависимости выигрыша ОСП при детектировании сигналов после предложенного алгоритма СРС по сравнению с сигналами до СРС при ОСВШ, равном 30 дБ

Заключение

В диссертационном исследовании получены следующие основные результаты:

1. Сформулирована постановка задачи слепого разделения сигналов. Представлена модель линейного смешивания сигналов в присутствии аддитивных шумов. Предполагается, что исходные сигналы являются стационарными случайными процессами и обладают свойством статистической независимости относительно друг друга. Показана неоднозначность восстановления исходных сигналов с точностью до их масштаба и перестановок. Показана общая схема работы методов слепого разделения сигналов, включающая в себя центрирование данных, беление данных, оптимизация критерия независимости сигналов, формирование разделяющей матрицы и восстановление сигналов.

2. Проведен анализ существующих методов разделения сигналов. Показаны основные методы статистического определения коэффициентов размешивающей матрицы, основанные на частичном использовании априорной информации о полезном сигнале или о направлении его прихода. Представлены алгоритмы разделения сигналов с предварительным расчетом пространственно-поляризационных параметров сигналов, зависящие от априорной информации о строении антенной решетки. Рассмотрены методы слепого разделения сигналов с использованием критерия декорреляции. Показано, что данные методы зависят от выбора временного сдвига между сигналами.

3. В разделе 2 был разработан алгоритм слепого разделения двух комплексных сигналов. Исследование статистических свойств КСВ основано на комплексных статистических функциях. Такое представление позволяет упростить анализ исследуемых сигналов и вид получаемых выражений. Критерий независимости выходных КСВ алгоритма слепого разделения сигналов был сформулирован в виде системы уравнений от весовых коэффициентов. Система уравнений состоит из двух уравнений приведения дисперсий выходных КСВ к единице, чтобы не получить тривиальное нулевое решение. Уравнения приведения ковариации и кумулянта четвертого порядка к нулю являются упрощенным аналогом критерия независимости сигналов. Решением уравнений второго порядка является множество весовых коэффициентов, выраженных через дисперсии и ковариацию входных сигналов, а также через 4 неизвестные переменные, определяющие фазу и амплитудное соотношение величин. Решение является полным и аналитическим. При подстановке решения задачи декорреляции в уравнение четвертого порядка было получено аналитическое решение задачи слепого разделения двух комплексных сигналов. Решение зависит от кумулянтов второго и четвертого порядков. Поскольку у КСВ с нормальным распределением все кумулянты высших порядков равны нулю, то ограничением предложенного алгоритма является невозможность разделения КСВ с нормальным распределением.

4. Произведено компьютерное моделирование разработанного алгоритма. Разработанный алгоритм был реализован на языке программирования C++. Было реализовано два алгоритма расчета начальных моментов: последовательный и адаптированный для выполнения на устройствах с поддержкой параллельных вычислений. Показано, что предложенный алгоритм позволяет эффективно разделить линейные комбинации независимых сигналов при разнице в ОСП во входных сигналах не менее 1дБ. Показано, что предложенный алгоритм осуществляет эффективное разделение сигналов при размере используемой выборки отсчетов для расчета статистик второго и четвертого порядков не менее 10000. По сравнению с алгоритмом FastICA предложенному алгоритму требуется в 3 раза меньшая выборка отсчетов для детектирования ЧМ-2 сигналов с меньшим уровнем частоты битовых ошибок при минимальном ОСП в 0 дБ и диапазоне частоты битовых ошибок от 0,0001 до 0,01. Показано, что предложенный алгоритм осуществляет эффективное разделение сигналов при ОСВШ входных сигналов не менее 24 дБ и минимальном ОСП в 0 дБ. Эффективность приема ЧМ-2 сигналов при значениях ОСВШ от -100 до 100 дБ не уступает алгоритму FastICA. Показано, что предложенный алгоритм обеспечивает выигрыш в ОСП при детектировании ЧМ-2 сигналов не менее 12 дБ при ОСВШ от 30 до 100 дБ и частоты битовых ошибок от 0,0001 до 0,1.

К перспективам дальнейшей разработки темы можно отнести расширение алгоритма на большее количество принимаемых сигналов и исследование других статистик в задаче слепого разделения сигналов.

Таким образом поставленная научная задача решена, а цель диссертационного исследования достигнута в полном объеме.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. **Либеровский, Н. Ю.** Математическое моделирование слепого разделения двух вещественных сигналов с использованием кумулянтов четвертого порядка / **Н. Ю. Либеровский**, В. С. Припутин, Д. С. Чиров // Вестник южно-уральского государственного университета. Серия «Математическое моделирование и программирование». – Май 2020. – Т. 13, № 2. – С. 43–53.

2. **Либеровский, Н. Ю.** Обзор исследований адаптивного формирования диаграммы направленности и цифровой обработки / **Н. Ю. Либеровский**, В. С. Припутин, Д. С. Чиров // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2021. – Т. 13, № 6. – С. 16–21.

3. **Либеровский, Н. Ю.** Применение методов слепого разделения сигналов для обнаружения радиосигналов с фазовой манипуляцией / **Н. Ю. Либеровский**, Д. С. Чиров, Н. Д. Петров // Труды Научно-исследовательского института радио. – 2021. – № 2. – С. 23–28.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science

4. **Liberovski, N. Y.** Comparison second order based blind signal separation with classical adaptive interference cancellation methods in the case of ill-conditioned statistics / S. S. Adjemov, A. A. Kuchumov, **N. Y. Liberovski**, V. S. Priputin // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – 2017. – P. 1–4.

5. **Liberovski, N. Y.** Blind Two Real Signals Separation Method Based on Third Order Cumulants / A. A. Kuchumov, **N. Y. Liberovski**, V. S. Priputin // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2019. – P. 1–4.

6. **Liberovski, N. Y.** Using the Blind Two Real Source Separation Algorithm in the Task of Detection a Useful Signal with an Additive white Gaussian Noise / A. A. Kuchumov, **N. Y. Liberovski**, V. S. Priputin // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2020. – P. 1–5.

7. **Liberovski, N. Y.** Blind Two Complex Signals Separation Method Based on Fourth Order Cumulants / **N. Y. Liberovski**, V. S. Priputin, I. A. Volkov // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2022. – P. 1–7.

8. **Liberovski, N. Y.** Evaluation of the Efficiency of Blind Signal Separation in the Problem of Detecting BPSK Signals / **N. Y. Liberovski**, D. S. Chirov, V. S. Priputin // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2021. – P. 1–4.

9. **Liberovski, N. Y.** General solution to the problem of decorrelation of a linear combination of two random complex variables / **N. Y. Liberovski**, V. S. Priputin, E. O. Lobova // 2021 29th Telecommunications Forum (TELFOR). – 2021. – P. 1–3.

10. **Liberovskiy, N. Y.** Incoherent DPSK and FSK Receiving Improvement Using Blind Source Separation Algorithm / **N. Y. Liberovskiy**, V. S. Priputin, D. S. Chirov // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2021. – P. 1–5.

11. **Liberovskiy, N. Y.** Using Blind Signal Separation in the Task of Detecting FSK Signals / **N. Y. Liberovskiy**, V. S. Priputin, D. S. Chirov // 2021 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). – 2021. – P. 1–4.

Публикации в других изданиях

12. **Либеровский, Н. Ю.** Использование регуляризации Тихонова при одновременной диагонализации сдвиговых статистик в методах слепого разделения сигналов / **Н. Ю. Либеровский**, В. С. Припутин // Технологии информационного общества. XI Международная отраслевая научно-техническая конференция: сборник трудов. 2017. Издательство: ООО "Издательский дом Медиа паблишер" (Москва). – С. 173–174.

13. **Либеровский, Н. Ю.** Исследование эффективности метода слепого разделения сигналов двух вещественных сигналов с использованием кумулянтов четвертого порядка при различных отношениях мощности сигнала и помехи / **Н. Ю. Либеровский**, В. С. Припутин, Д. С. Чиров // Технологии информационного общества. Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. 2020. Издательство: ООО "Издательский дом Медиа паблишер" (Москва). – 2020. – С. 170–172.

14. **Либеровский, Н. Ю.** Метод главных компонент и метод анализа независимых компонент в задаче слепой пространственно-поляризационной селекции сигналов / С. С. Аджемов, А. А. Кучумов, **Н. Ю. Либеровский**, В. С. Припутин // Технологии информационного общества. Материалы XII Международной отраслевой научно-технической конференции. 2018. Издательство: ООО "Издательский дом Медиа паблишер" (Москва). С. 165–167.