

На правах рукописи

Токарь Михаил Сергеевич

**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ СИСТЕМ СВЯЗИ  
С ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫМ КОДИРОВАНИЕМ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» на кафедре проектирования и производства электронно-вычислительных средств.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Рябов Игорь Владимирович**

Официальные оппоненты: **Файзуллин Рашид Робертович**,  
доктор технических наук, профессор,  
Казанский национальный исследовательский  
технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ,  
кафедра «Нанотехнологии в электронике»,  
заведующий кафедрой

**Горячкин Олег Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
Поволжский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики,  
проректор по научной работе,  
кафедра «Теоретические основы радиотехники и  
связи», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Рязанский государственный радиотехнический  
университет», г. Рязань

Защита состоится 14 июня 2023 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте [www.sut.ru](http://www.sut.ru).

Автореферат разослан 14 апреля 2023 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 55.2.004.01,  
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время существуют тенденции к экспоненциальному росту объемов передаваемой информации с помощью систем мобильной радиосвязи. В частности, из Ericsson Mobility Report (июнь 2022) следует, что в 1-м квартале 2022 года ежемесячное мобильное потребление данных достигло 93 экзабайт, что на 40% и 100% больше по сравнению с таким же периодом 2021 и 2020 гг. соответственно. Поэтому поиск новых подходов и методов обработки сигналов, которые позволят обеспечить возрастающие потребности по пропускной способности радиотехнических систем передачи информации (РСПИ), является актуальной задачей.

Одним из основных подходов к решению данной задачи является создание РСПИ с использованием технологии «система с множеством входов и выходов» (англ. Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)) в форме пространственно-временного блочного кодирования (ПВБК) и обеспечение её работы в более высокочастотных диапазонах (СВЧ, КВЧ), чем в настоящее время. Технология MIMO позволит одновременно задействовать несколько пространственных каналов между передающей и приемной сторонами, а увеличение рабочих частот — расширить используемую полосу, что в совокупности кратно увеличит пропускную способность. Также увеличение рабочих частот приведет к необходимости решения вопросов, связанных с возникновением замираний в канале связи, в том числе обусловленных уменьшением времени стационарности канала ввиду движения среды распространения и высокой скорости передвижения абонентов (до нескольких сотен км/ч).

Применение в таких условиях ПВБК на основе когерентного метода обработки, наиболее распространенного на данный момент, является нецелесообразным, поскольку приведет к значительному уменьшению времени передачи информационного сообщения по отношению к времени передачи сервисной информации, что снижает скорость передачи. Это происходит ввиду увеличения частоты отправки блоков пилот-сигналов для обеспечения оценки и слежения за импульсной характеристикой канала связи с необходимой точностью.

Исходя из этого, становится актуальным применение ПВБК на основе дифференциального метода (ДПВБК), поскольку тогда необходимость в оценке импульсной характеристики канала отсутствует, тем самым обеспечивается экономия ресурса системы передачи, увеличивается её частотная и энергетическая эффективность. Однако, несмотря на перспективность данного

направления, существующие схемы реализации имеют главный недостаток — экспоненциальный рост вычислительной сложности с увеличением размера объема канального алфавита и проигрыш по энергетической эффективности в сравнении с когерентным методом.

Также важным вопросом в работе РСПИ является обеспечение в демодуляторе синхронизации по фазе опорной несущей, символьной и кадровой синхронизации. Синхронизация опорной несущей и символьная синхронизация выполняются традиционными эффективными методами. Кадровая синхронизация обеспечивается применением пилот-сигналов, о негативной стороне задействования которых было отмечено. Также существуют методы обработки (т.н. «слепые»), позволяющие использовать свойство избыточности передаваемого сигнала (кадров) для обеспечения синхронизации, которые описаны только для ПВБК.

В результате становится очевидным актуальность разработки и исследования методов и алгоритмов приема и обработки, способных работать в условиях быстро меняющегося канала связи, обеспечивающих высокую частотную, энергетическую эффективность и низкую вычислительную сложность.

**Степень разработанности темы.** Вопросы анализа, исследования и разработки методов ПВБК, оценки состояния канала связи, «слепой» обработки сигналов и обеспечения синхронизации систем связи посвящено достаточное число работ отечественных и зарубежных ученых, среди которых следует выделить труды Горячкина О.В., Карташевского В.Г., Файзуллина Р.Р., Крейнделина В.Б., Паршина Ю.Н., Пестрякова А.В., Петровича Н.Т., Бакулина М.Г., Alamouti S., Hughes B.L., Marzetta T.L., Hochwald B.M., Sweldens W., Zhu Y., Jafarkhani H., Yuen C., Guan Y.L., Xu C., Rajashekar R., Ishikawa N., Sugiura S., Hanzo L. Несмотря на то, что большинство из работ посвящено исследованию когерентного приема при использовании ПВБК, в них отмечается перспективность применения методов дифференциального приема (ДПВБК), в тоже время имеющих недостатки, связанные с экспоненциальным ростом вычислительной сложности с увеличением размера канального алфавита и снижением энергетической эффективности в сравнении с когерентным приемом. Также представлено достаточно работ, исследующих оценку состояния канала связи и «слепую» обработку сигналов. Рассматривая синхронизацию РСПИ необходимо отметить, что алгоритмы кадровой синхронизации при использовании ДПВБК в литературе не приводятся, однако они востребованы и требуют развития.

**Объект исследования** — системы связи с пространственно-временным блоковым кодированием.

**Предмет исследования** — методы и алгоритмы дифференциального пространственно-временного блокового кодирования и кадровой синхронизации.

**Цель работы и задачи исследования.** *Целью* диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов дифференциального пространственно-временного блокового кодирования, обеспечивающих повышение частотной и энергетической эффективностей при снижении вычислительной сложности для РСПИ в условиях быстро изменяющихся параметров радиоканала.

Для достижения поставленной цели в данной диссертационной работе решаются следующие *задачи*:

1. Аналитический обзор принципов построения, методов и алгоритмов пространственно-временного блокового кодирования.

2. Разработка нового метода передачи ДПВБК, позволяющего обеспечить энергетический выигрыш и низкую вычислительную сложность, по сравнению с существующими методами ДПВБК.

3. Разработка нового алгоритма декодирования для ПВБК, в том числе дифференциального, с низкой вычислительной сложностью.

4. Разработка нового алгоритма «слепой» кадровой синхронизации для РСПИ с ДПВБК, позволяющего уменьшить время вхождения в синхронизм.

5. Исследование характеристик разработанных методов и алгоритмов.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

1. Разработан метод дифференциального пространственно-временного блокового кодирования, отличающийся от известных дифференциальных методов ПВБК тем, что позволяет увеличить энергетическую эффективность и снизить вычислительную сложность.

2. Разработан алгоритм матричного декодирования для систем связи с последовательной и параллельной (ПВБК) передачей информации, в отличие от известных алгоритмов имеет меньшую вычислительную сложность, при этом, не зависящую от объема канального алфавита.

3. Разработан алгоритм «слепой» кадровой синхронизации, отличающийся от известных алгоритмов кадровой синхронизации систем ПВБК тем, что обеспечивает снижение времени вхождения в синхронизм и вычислительной сложности.

### **Теоретическая и практическая значимость исследования.**

*Теоретическая значимость* работы состоит в разработке методов и алгоритмов, позволяющих обеспечить увеличение частотной и энергетической эффективности, сокращение времени, необходимого для обеспечения кадровой синхронизации, и снижение вычислительной сложности декодирования для систем радиосвязи пространственно-временного блочного кодирования, использующих радиоканал с быстро меняющимися параметрами.

*Практическая значимость* работы состоит в том, что предложенные методы и алгоритмы могут быть применены при создании перспективных стандартов систем радиосвязи, в том числе для передачи информации по каналам передачи служебной информации с низким отношением сигнал/шум и в условиях быстро меняющихся параметров канала связи ввиду высокой скорости перемещения мобильных станций; разработанный метод дифференциального кодирования является масштабируемым для различного сочетания количества передающих антенн и не требует высокого вычислительного ресурса при декодировании, что уменьшает энергопотребление приемника и его стоимость; разработанный алгоритм матричного декодирования может быть применен для РСПИ с последовательной и параллельной (ПВБК) передачей информации, обеспечивая низкую вычислительную сложность декодирования, которая не зависит от объема канального алфавита; разработанный алгоритм «слепой» кадровой синхронизации позволяет снизить время вхождения в синхронизм и не является отдельной структурной частью разработанного метода дифференциального кодирования, а основывается на нём, извлекая данные для работы алгоритма синхронизации.

Полученные результаты также могут быть использованы в учебном процессе высших учебных заведений, готовящих специалистов соответствующей специальности при чтении лекций и проведении практических и лабораторных занятий.

Результаты работы задействованы при выполнении опытно-конструкторской работы «Системы радиосвязи», проводимой государственным унитарным предприятием связи «Центр регулирования связи» в 2021 году г. Тирасполь, а также использованы в учебном процессе на кафедре квантовой радиофизики и систем связи физико-математического факультета Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко при подготовке обучающихся по направлению 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплинам «Построение современных сетей мобильной связи», «Системы и сети мобильной связи».

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных в диссертации задач использовались методы статистической радиотехники, теории цифровой связи, теории алгоритмов, теории вероятностей, математической статистики и теории матриц. Имитационное моделирование выполнялось в пакете программ MATLAB.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования, позволяющий обеспечить работу в условиях отсутствия оценки импульсной характеристики канала связи, энергетический выигрыш в среднем до 2 дБ и вычислительную сложность на один порядок меньше по сравнению с известными дифференциальными методами ПВБК, при этом являясь масштабируемым для различного сочетания количества передающих и приемных антенн:  $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $2 \times 4$ ,  $4 \times 1$  и  $4 \times 2$  (и т.д.).

2. Алгоритм матричного декодирования для систем связи с последовательной и параллельной (ПВБК) передачей информации, вычислительная сложность которого не зависит от объема канального алфавита.

3. Алгоритм «слепой» кадровой синхронизации, позволяющий: снизить время вхождения в синхронизм — 10-40 кадров, число которых зависит от состояния канала связи; получить энергетический выигрыш около 10 дБ и снижение вычислительной сложности в среднем на один порядок по сравнению с известными алгоритмами кадровой синхронизации систем ПВБК.

**Степень достоверности и апробация результатов.** *Достоверность* полученных автором в диссертационной работе научных и практических результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, согласованностью результатов с результатами имитационного моделирования, обсуждением результатов диссертационной работы на международных конференциях и семинарах, публикацией основных результатов диссертации в ведущих рецензируемых журналах.

*Апробация результатов исследования.* Основные результаты работы докладывались и обсуждались со специалистами на научно-технических конференциях: Международная конференция «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО» (г. Санкт-Петербург, 2015; г. Самара, 2016; г. Минск 2018), 8-th International Conference on Materials Science and Condensed Matter Physics MSCMP 2016 (г. Кишинёв, 2016), 74-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава, научных работников, аспирантов и студентов ОНАС им. А.С. Попова (г. Одесса, 2019).

**Публикации по теме диссертации.** По теме работы опубликовано 15 работ, из них: 4 публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России (3 в изданиях, соответствующих искомой специальности); 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ; 9 работ в других изданиях и материалах конференций.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций: п. 4 «Разработка эффективных путей развития и совершенствования структуры, архитектуры сетей и систем телекоммуникаций, включая входящие в них элементы»; п. 15 «Исследование и разработка новых сигналов, а также соответствующих модемов, кодеков, мультиплексоров и селекторов, обеспечивающих высокую надежность и качество обмена информацией в условиях воздействия внешних и внутренних помех»; п. 18 «Разработка научно-технических основ создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования».

**Личный вклад автора.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит 127 страниц текста, иллюстрируется 37 рисунками и 14 таблицами и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и четырех приложений. Список литературы состоит из 93 наименований. Приложения содержат 16 страниц, в том числе акты, подтверждающие внедрение и использование результатов диссертационного исследования.



## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и частные задачи работы, которые необходимо решить для её достижения, перечислены основные научные результаты диссертации, указаны их теоретическая и практическая ценность, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования.

В **первой** главе проведен аналитический обзор, посвященный рассмотрению принципов построения, методов и алгоритмов пространственно-временного блочного кодирования. В частности рассмотрены основные требования к радиосистемам передачи, разнесенный прием и его виды, типы радиоканалов и их особенности, методы построения и описания систем ММО, виды ПВБК, методы демодуляции сигналов ПВБК.

Согласно полученным результатам анализа было показано, что наиболее перспективной технологией, обеспечивающей рост энергетической и частотной эффективности РСПИ, является технология ММО, высокая эффективность которой достигается применением ПВБК. В главе представлены методы построения и математического описания систем ММО, позволяющие исследовать методы ПВБК. Эффективная обработка сигналов на передаче и на приеме требует знания и слежения за состоянием канальной матрицы (импульсной характеристики канала) с необходимой точностью, процессы определения которой могут существенно усложнять оборудование. В связи с этим, также подробно описываются условия, при которых канал не вносит частотно-селективных искажений и искажений, вызванных быстрым замиранием, а также иные возможные условия состояния канала связи.

Приводятся доводы, согласно которым применение в РСПИ ПВБК на основе когерентного метода при использовании более высоких частот (СВЧ, КВЧ) является нецелесообразным ввиду существенного снижения скорости передачи информационного сообщения и энергоэффективности системы связи в целом. Это обусловлено увеличением частоты отправки блоков пилот-сигналов для обеспечения оценки и слежения за импульсной характеристикой канала связи, время стационарности которого уменьшается из-за уменьшения используемой длины волны сигнала. При отказе от использования пилот-сигналов для оценки канала — сократится время передачи сервисной информации по отношению к времени передачи информационного сообщения, увеличится частотная и энергетическая эффективность РСПИ. Реализовать это

позволит, не смотря на недостатки, применение метода передачи ПВБК на основе дифференциального принципа (ДПВБК), не требующего для работы знание импульсной характеристики канала.

Кроме этого, анализируя методы демодуляции сигналов ПВБК, отмечается, что для перспективных РСПИ актуальным является не только достижение высоких показателей энергетической и частотной эффективности, но и оптимизация методов передачи и алгоритмов обработки сигналов с целью обеспечения низких показателей энергопотребления и стоимости оборудования, что достигается путем снижения их вычислительной сложности.

**Вторая** глава посвящена разработке нового метода передачи ДПВБК и алгоритма матричного декодирования.

Рассмотрим систему ММО ПВБК с  $M$  передающими и  $N$  приемными антеннами (рис. 1).

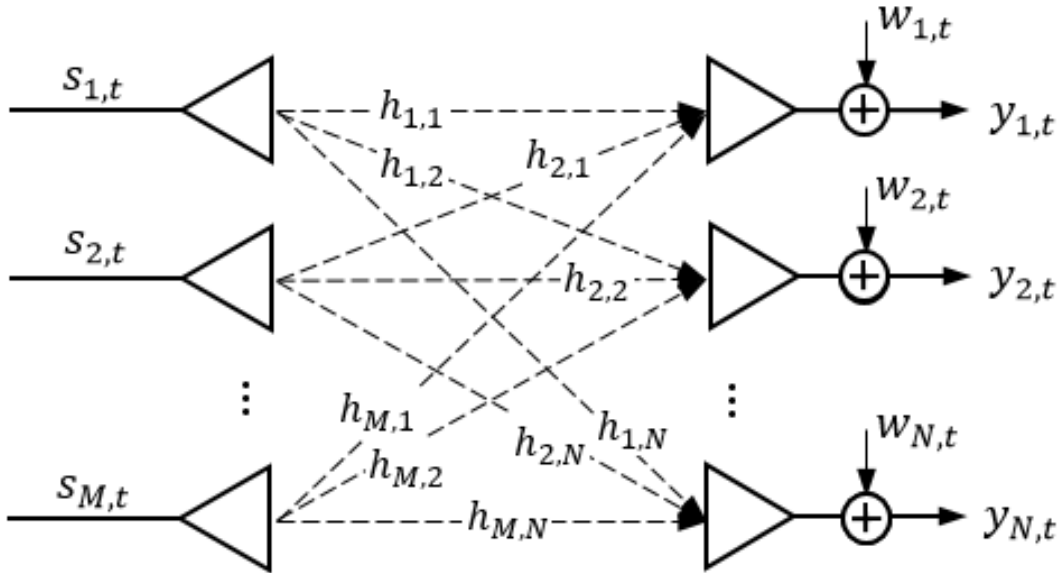


Рисунок 1 – Блок-схема системы ММО

Матричная форма записи для анализа системы ММО:

$$\mathbf{Y}_p = \mathbf{H}_p \mathbf{S}_p + \mathbf{W}_p, \quad (1)$$

где  $p$  – интервал (кадр) передачи;  $\mathbf{Y}_p$  – матрица принимаемых отсчетов размера  $N \times K_s$  ( $K_s$  – длина блока кода);  $\mathbf{H}_p$  – матрица канальных коэффициентов  $h_{m,n}$  размера  $N \times M$ ;  $\mathbf{S}_p$  – канальная матрица отсчетов  $s_{m,t}$  размера  $M \times K_s$  ( $\sum_{m=1}^M |s_{m,t}|^2 = 1$ ), а  $\mathbf{W}_p$  – матрица отсчетов АБГШ размера  $N \times K_s$ .

Передаваемая последовательность бит разбивается на группы по  $l$  бит  $\mathbf{c}_p = (c_1, c_2, \dots, c_{lM})_p$ , где  $l$  – кратность модуляции ( $l = \log_2 L$ ,  $L$  – порядок модуляции). Значения дифференциальных символов  $\mathbf{s}_p = (s_{M+1}, s_{M+2}, \dots, s_{2M})_p$  рассчитываются согласно правилу дифференциального кодирования:

$$\mathbf{s}_p = \mathbf{r}_p \mathbf{S}_{p-1}^T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{r}_p$  – вектор комплексных дифференциальных коэффициентов  $\mathbf{r}_p = (R_1, R_2, \dots, R_M)_p$  (из табл. 2);  $\mathbf{S}_{p-1}$  – канальная матрица, переданная в  $p-1$  интервал передачи;  $\mathbf{S}^T$  – транспонирование матрицы  $\mathbf{S}$ . Канальные матрицы должны удовлетворять условию (3). Передаваемая информация содержится в разности между последовательно отправляемыми канальными матрицами  $\mathbf{S}_p$ . Порядок разнесения на передаче будет равен числу передающих антенн  $M$ .

$$\mathbf{S} \cdot \mathbf{S}^H = \mathbf{I}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{S}^H$  – эрмитово сопряжение матрицы  $\mathbf{S}$ .

Структурная схема кодера ДПВБК приведена на рисунке 2.

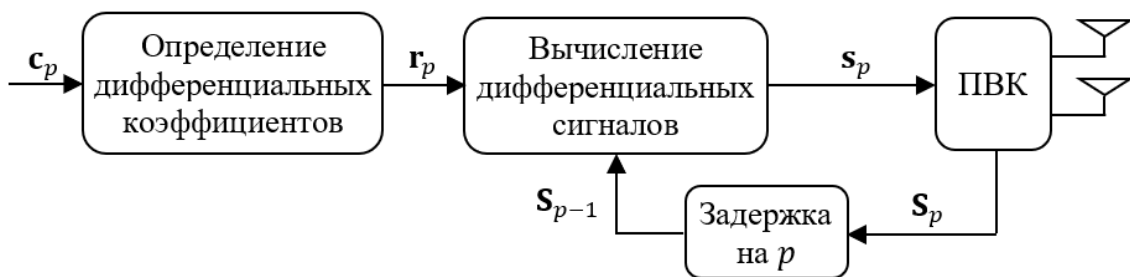


Рисунок 2 – Структурная схема кодера ДПВБК

Если матрица  $\mathbf{S}_{p-1} = \begin{pmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{pmatrix}$ , а  $\mathbf{S}_p = \begin{pmatrix} s_3 & -s_4^* \\ s_4 & s_3^* \end{pmatrix}$ , где  $(\cdot)^*$  – комплексное сопряжение, то порядок передачи отображен в таблице 1.

Таблица 1 – Передача символов ДПВБК

№	$t$	$t + 1$	$t + 2$	$t + 3$
Антенна 1	$s_1$	$-s_2^*$	$s_3$	$-s_4^*$
Антенна 2	$s_2$	$s_1^*$	$s_4$	$s_3^*$

Таблица состояний кодера составляется исходя из:  $L$ -PSK и  $M$ . При заполнении таблицы можно воспользоваться формулой  $\mathbf{r}_p = \mathbf{s}_p \mathbf{S}_{p-1}^*$ . Для случая  $M = 2$  и модуляции QPSK, таблица имеет вид:

Таблица 2 – Таблица состояний кодера

$v$	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$R_1$	$R_2$
1	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	1	$0,5-0,5i$	$0,5-0,5i$
3	0	0	1	0	$0,5+0,5i$	$-0,5-0,5i$
4	0	0	1	1	0	$-i$
5	0	1	0	0	$0,5-0,5i$	$-0,5+0,5i$
6	0	1	0	1	$-i$	0
7	0	1	1	0	0	-1
8	0	1	1	1	$-0,5-0,5i$	$-0,5-0,5i$
9	1	0	0	0	$0,5+0,5i$	$0,5+0,5i$
10	1	0	0	1	0	1
11	1	0	1	0	$i$	0
12	1	0	1	1	$-0,5+0,5i$	$0,5-0,5i$
13	1	1	0	0	0	$i$
14	1	1	0	1	$-0,5-0,5i$	$0,5+0,5i$
15	1	1	1	0	$-0,5+0,5i$	$-0,5+0,5i$
16	1	1	1	1	-1	0

Возможные значения дифференциальных коэффициентов  $R_1, R_2, \dots, R_i$  образуют созвездие  $\mathbf{R}$  (рис. 5), а их комбинации  $(R_1, R_2, \dots, R_M)_v$ , каждая из которых соответствует комбинации входных бит  $c_1, c_2, \dots, c_{Ml}$ , образуют множество  $\mathbf{R}_{all}$ . Количество комбинаций  $V = L^M$  (табл. 2). Следовательно, дифференциальные символы  $\mathbf{s}_p = (s_{M+1}, s_{M+2}, \dots, s_{2M})_p$  содержат информацию, передаваемую  $\mathbf{c}_p = (c_1, c_2, \dots, c_{Ml})_p$  битами.

Таким образом, существует взаимно однозначное соответствие между  $\mathbf{s}_{p-1}$ , комбинацией информационных бит  $\mathbf{c}_p$ , дифференциальными коэф.  $\mathbf{r}_p$  и  $\mathbf{s}_p$ .

При  $N = 1$ , принятые отчеты могут быть записаны ( $T_{ког} \gg T_s$ ), как:

$$\begin{pmatrix} y_t \\ y_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_t \\ w_{t+1} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_1 = \mathbf{S}_1^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_1,$$

$$\begin{pmatrix} y_{t+2} \\ y_{t+3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_3 & s_4 \\ -s_4^* & s_3^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_{t+2} \\ w_{t+3} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_2 = \mathbf{S}_2^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_2.$$

Восстановленные значения  $\hat{R}_1, \hat{R}_2$  определяются:

$$\begin{pmatrix} \hat{R}_1 \\ \hat{R}_2 \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} y_t^* & y_{t+1} \\ y_{t+1}^* & -y_t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_{t+2} \\ y_{t+3} \end{pmatrix}}{|y_t|^2 + |y_{t+1}|^2}.$$

Методом максимального правдоподобия (МП) определяется ближайший вектор  $(R_1, R_2, \dots, R_M)_v$  из множества  $\mathbf{R}_{all}$  (табл. 2), номер позиции состояния кодера  $v$  и, соответственно, переданную последовательность бит  $\hat{\mathbf{c}}_p$

$$(\hat{c}_1, \hat{c}_2, \dots, \hat{c}_{Ml})_v = \arg \min_{v \in \mathbf{R}_{all}} |(R_1, R_2, \dots, R_M)_v - (\hat{R}_1, \hat{R}_2, \dots, \hat{R}_M)|^2.$$

Структурная схема декодера ДПВБК показана на рисунок 3.



Рисунок 3 – Структурная схема декодера ДПВБК

В диссертации описаны случаи для ряда сочетаний количества передающих и приемных антенн  $M \times N$ :  $2 \times 1$ ,  $2 \times 2$ ,  $2 \times 4$ ,  $4 \times 1$  и  $4 \times 2$ .

Далее приводится алгоритм матричного декодирования, который применим в РСПИ с последовательной передачей (декодирование выполняется последовательно по каждому принятому символу) и параллельной передачей (ПВБК), в том числе, может быть встроен в декодер ДПВБК, заменяя собой декодирование методом МП или сферического декодирования (СД).

Алгоритм матричного декодирования основан на разбиении Вороного, применяемого для разбиения сигнального созвездия  $S$  модуляции. На приемной стороне восстанавливается каналный символ  $\hat{s}_i$  и решается задача поиска ближайшего соседа (символа созвездия модуляции) – задача CVP (closest vector problem). Для этого, с учетом возможных значений  $S$ , величины округления  $\hat{s}_i$  и заданного допуска можно получить матрицу, значения элементов которой соответствуют областям сигнального созвездия, в которые попадают округленные восстановленные значения  $\hat{s}_i$  (рис. 4.).

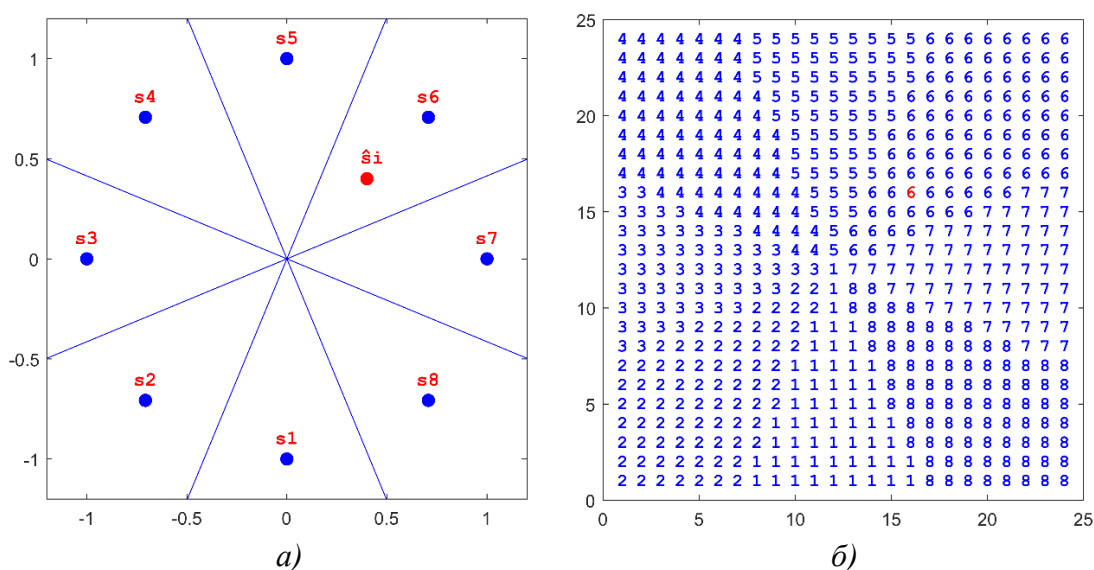


Рисунок 4 – Отображение восстановленного каналного символа  $\hat{s}_i$ :  
 а – созвездие модуляции PSK-8; б – матрица распределения PSK-8

Для случаев метода передачи ДПВБК  $M = 2$  при QPSK и PSK-8 (рис. 5).

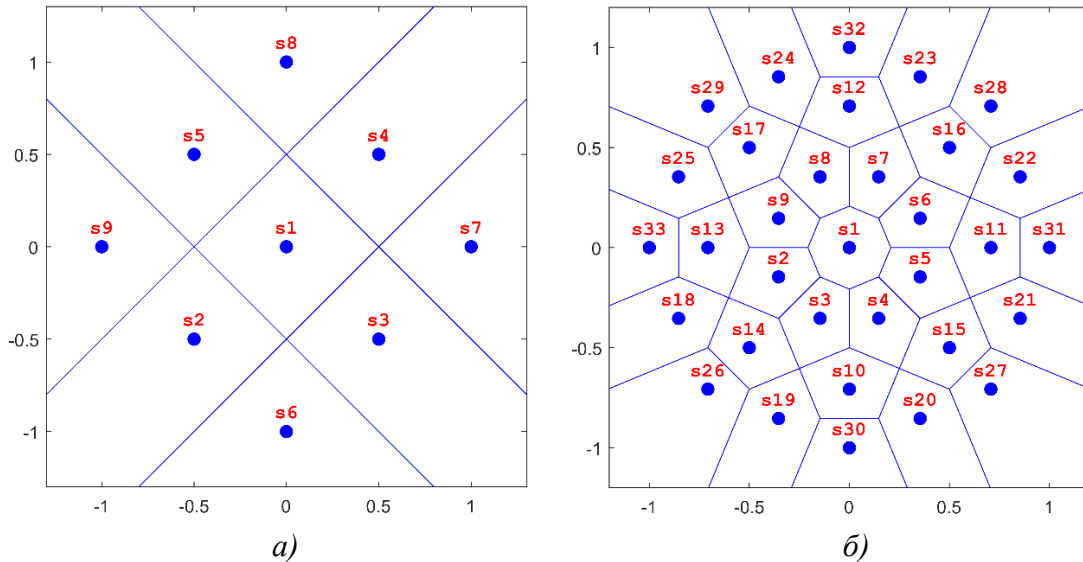


Рисунок 5 – Разбиения Вороного для созвездия ДПВБК  $M = 2$  при:  
 $a$  – QPSK;  $b$  – PSK-8

В **третьей** главе решается задача разработки алгоритма «слепой» кадровой синхронизации демодулятора сигналов ДПВБК.

Поскольку при ПВБК каждый канальный символ передается дважды –  $\mathbf{s}_k = \begin{pmatrix} s_i & -s_{i+1}^* \\ s_{i+1} & s_i^* \end{pmatrix}$ , то следует вывод, что демодулируемый сигнал имеет пространственно-временную избыточность, позволяющую реализовать кадрковую синхронизацию по рабочему сигналу.

В таблице 3 приведены четыре последовательных кадра, передаваемых по каналу связи. Здесь  $s_i$  – канальные символы  $L$ -PSK.

Таблица 3 – Передача символов ДПВБК

Момент времени	$t$	$t + 1$	$t + 2$	$t + 3$	$t + 4$	$t + 5$	$t + 6$	$t + 7$
Антенна № 1	$s_1$	$-s_2^*$	$s_3$	$-s_4^*$	$s_5$	$-s_6^*$	$s_7$	$-s_8^*$
Антенна № 2	$s_2$	$s_1^*$	$s_4$	$s_3^*$	$s_6$	$s_5^*$	$s_8$	$s_7^*$
№ кадра	кадр 1		кадр 2		кадр 3		кадр 4	

Для демодуляции канальных символов, переданных кадром 3, требуется кадр 2, который будет являться опорным для реализации декодирования. Так происходит при верной кадровой синхронизации. Проанализировав таблицу 3, можно указать два возможных случая, при которых кадрковая синхронизация установлена не верно. В первом случае имеем следующие значения опорной и

сигнальной матриц:  $\mathbf{s}_{2err\_l} = \begin{pmatrix} -s_2^* & s_3 \\ s_1^* & s_4 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{s}_{3err\_l} = \begin{pmatrix} -s_4^* & s_5 \\ s_3^* & s_6 \end{pmatrix}$ . Во втором случае:

$\mathbf{s}_{2err\_r} = \begin{pmatrix} -s_4^* & s_5 \\ s_3^* & s_6 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{s}_{3err\_r} = \begin{pmatrix} -s_6^* & s_7 \\ s_5^* & s_8 \end{pmatrix}$ . Система синхронизации разбивает

последовательность демодулируемых символов на кадры и строит три гипотезы: «рано», «верно» и «поздно».

В случае гипотезы «верно», при  $N = 2$ , отсчеты принятых сигналов (кадр 2 и кадр 3 табл. 3) могут быть записаны как:

$$\begin{pmatrix} y_1^{(t+2)} & y_2^{(t+2)} \\ y_1^{(t+3)} & y_2^{(t+3)} \end{pmatrix} = \mathbf{S}_2^T \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} w_1^{(t+2)} & w_2^{(t+2)} \\ w_1^{(t+3)} & w_2^{(t+3)} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_2 = \mathbf{S}_2^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_2,$$

$$\begin{pmatrix} y_1^{(t+4)} & y_2^{(t+4)} \\ y_1^{(t+5)} & y_2^{(t+5)} \end{pmatrix} = \mathbf{S}_3^T \mathbf{H} + \begin{pmatrix} w_1^{(t+4)} & w_2^{(t+4)} \\ w_1^{(t+5)} & w_2^{(t+5)} \end{pmatrix} \rightarrow \mathbf{Y}_3 = \mathbf{S}_3^T \mathbf{H} + \mathbf{W}_3,$$

где, например,  $y_1^{(t+2)}$  – отсчет, принятый в момент времени  $t + 2$  (верхний индекс) первой антенной (нижний индекс). Условие  $T_0 \gg T_s$  удовлетворяется.

В этом случае восстановленные значения дифференциальных коэффициентов  $\hat{R}_1, \hat{R}_2$ , переданных кадром 3, определяются как:

$$\begin{pmatrix} \hat{R}_1 \\ \hat{R}_2 \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} (y_1^{(t+2)})^* & y_1^{(t+3)} \\ (y_1^{(t+3)})^* & -y_1^{(t+2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1^{(t+4)} \\ (y_1^{(t+5)})^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} (y_2^{(t+2)})^* & y_2^{(t+3)} \\ (y_2^{(t+3)})^* & -y_2^{(t+2)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_2^{(t+4)} \\ (y_2^{(t+5)})^* \end{pmatrix}}{|y_1^{(t+2)}|^2 + |y_1^{(t+3)}|^2 + |y_2^{(t+2)}|^2 + |y_2^{(t+3)}|^2}.$$

После восстановления, путем оценки МП, определяется величина минимального расстояния между возможными значениями векторов  $(R_1, R_2)_j$  (из множества  $\mathbf{R}_{all}$ ) и вектором  $(\hat{R}_1, \hat{R}_2)$ :

$$b_{true}^{(3)} = \arg \min_{j \in \mathbf{R}_{all}} \left( |(R_1)_j - \hat{R}_1|^2 + |(R_2)_j - \hat{R}_2|^2 \right),$$

где верхний индекс  $b_{true}^{(3)}$  обозначает номер кадра, в отношении которого принимается решение. Таким же образом можно рассчитать значения минимальных расстояний  $b_{false1}^{(3)}$  и  $b_{false2}^{(3)}$  по двум остальным гипотезам.

Анализ матриц  $\mathbf{S}_{2err\_l}$  и  $\mathbf{S}_{3err\_l}$  показывает, что в каждую из них символы  $s_i$  входят по одному разу (например в  $\mathbf{S}_{2err\_l}$ :  $-s_2^*, s_1^*, s_3, s_4$ ), а также данные матрицы не являются комплексными ортогональными формами (условие (3)). Учитывая это, а также статистическую независимость и равновероятность передаваемых символов  $s_i$  следует вывод, что при демодуляции в оценках  $\hat{R}_1$  и  $\hat{R}_2$  нет когерентного накопления передаваемых символов и их можно рассматривать как отсчеты реализации некоторого случайного процесса.

Алгоритм кадровой синхронизации анализирует обозначенные гипотезы по минимальному значению суммы накопления:  $B_{false1} = \sum_{k=1}^K b_{false1}^{(k)}$ ,  $B_{true} = \sum_{k=1}^K b_{true}^{(k)}$ ,  $B_{false2} = \sum_{k=1}^K b_{false2}^{(k)}$  ( $K$  – количество кадров (блоков) наблюдения).

Данные величины фильтруются (производится накопление) и, на каждом такте, производится сравнение для выбора той или иной гипотезы.

В диссертации описаны случаи для ряда других сочетаний количества антенн  $M \times N$ . Алгоритм можно легко расширить для случаев  $M = 4$  и  $N = 8$  в соответствии с методом ДПВБК, а также для случаев запаздывания или опережения относительно начала кадра на время  $t \pm 2$  и более. Предложенный алгоритм не является отдельной структурной частью, основывается на методе ДПВБК и дополняет его, извлекая некоторые данные для дальнейшего расчета и обеспечения принятия решения о синхронизации.

**Четвертая** глава посвящена исследованию характеристик разработанных методов и алгоритмов, которое проводилось в среде MATLAB.

*Первыми*, изложены результаты моделирования разработанного алгоритма «слепой» кадровой синхронизации, которые представлены на рисунках 6-7 в виде зависимостей вероятности входа в синхронизм  $P_{in\_sinch}$  и вероятности выхода из синхронизма  $P_{er\_sinch}$  от отношения SNR.

Выполнен сравнительный анализ помехоустойчивости и вычислительной сложности разработанного алгоритма «слепой» кадровой синхронизации (табл. 4 и табл. 5).

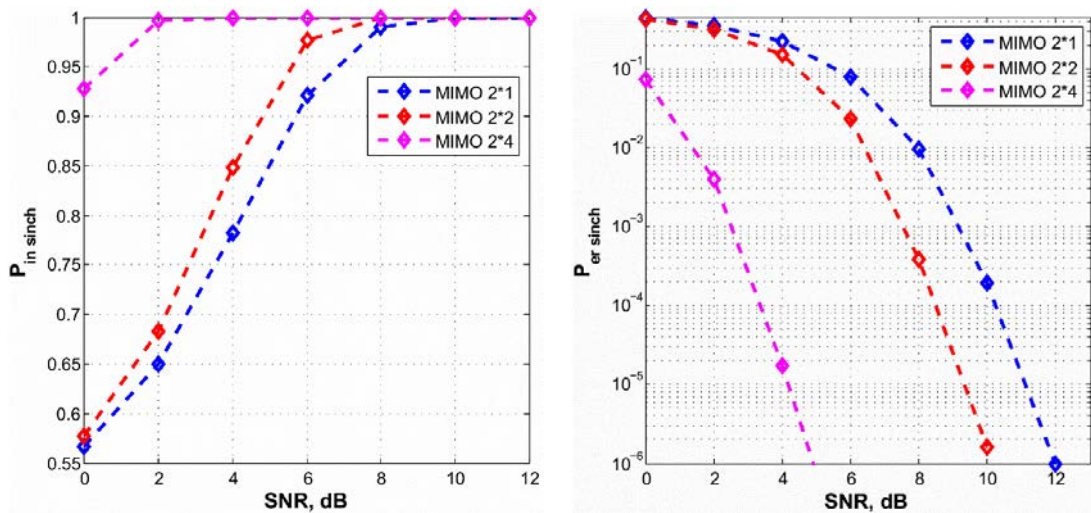


Рисунок 6 – Зависимости  $P_{in\_sinch}$  и  $P_{er\_sinch}$  от SNR для QPSK и  $K=40$



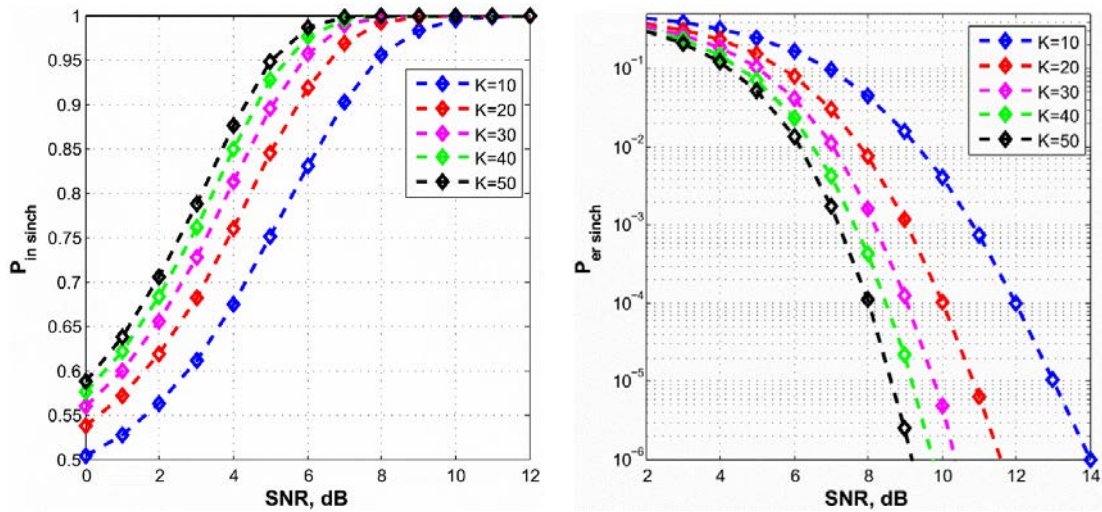


Рисунок 7 – Зависимости  $P_{in\_sinch}$  и  $P_{er\_sinch}$  от SNR при  $K=10; 20; 30; 40; 50$ , MIMO  $2 \times 2$  и QPSK

Таблица 4 – Сравнительный анализ помехоустойчивости

$P_{in\_sinch}$	0,68	0,824	0,923	0,94
Значения SNR (дБ) по существ. алгоритму КС	8	10	15	20
Значения SNR (дБ) по разработанному алгоритму КС	0,4	2,35	3,6	4
Разность (дБ)	7,6	7,65	11,4	16

Таблица 5 – Сравнительный анализ вычислительной сложности

	Существ. алгоритм синхронизации	Разработанный алгоритм КС при различной позиционности $L$ -PSK		
		$L=2$	$L=4$	$L=8$
Количество арифметических операций	17406	582	1590	5622

Результатами моделирования подтверждается способность алгоритма «слепой» кадровой синхронизации к установлению кадровой синхронизации при условии низкого отношения сигнал/шум в системе и отсутствия необходимости знания о состоянии канала связи.

Вторыми, изложены результаты моделирования разработанного метода передачи ДПВБК и алгоритма матричного декодирования.

Результаты моделирования представлены на рисунках 8-9 (для числа передающих антенн  $M=2$  и  $M=4$ ) для модуляций QPSK и 8-PSK при использовании ПВБК Alamouti (STBC), типичного (DSTBC) и разработанного методов передачи ДПВБК (DSTBC<sub>p</sub>).

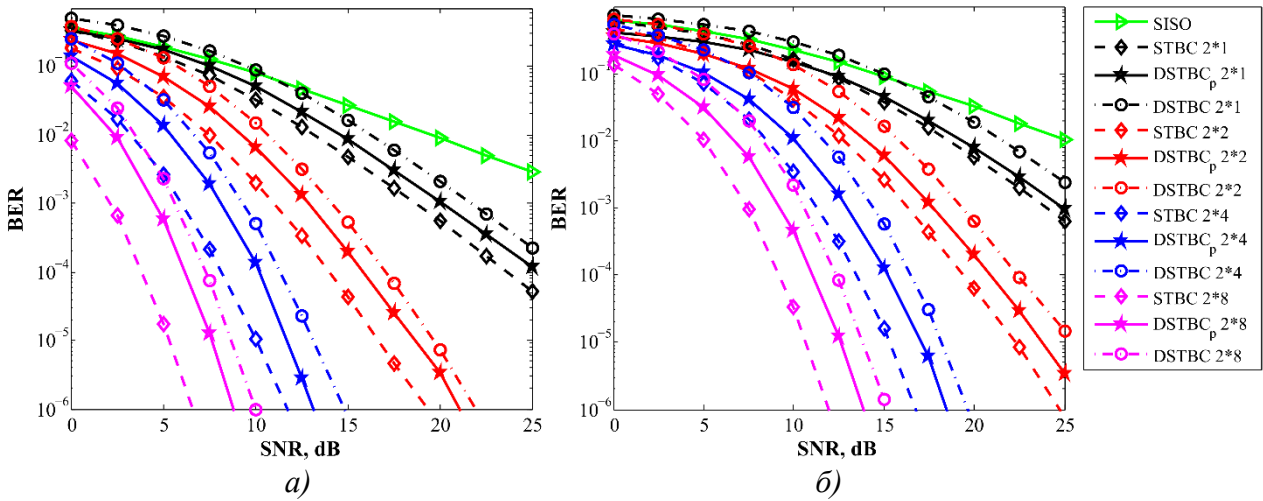


Рисунок 8 – Зависимости вероятности ошибки принятых бит (BER) от SNR в системе для  $M=2$  и случаев:  $a$  – при QPSK;  $b$  – при 8-PSK

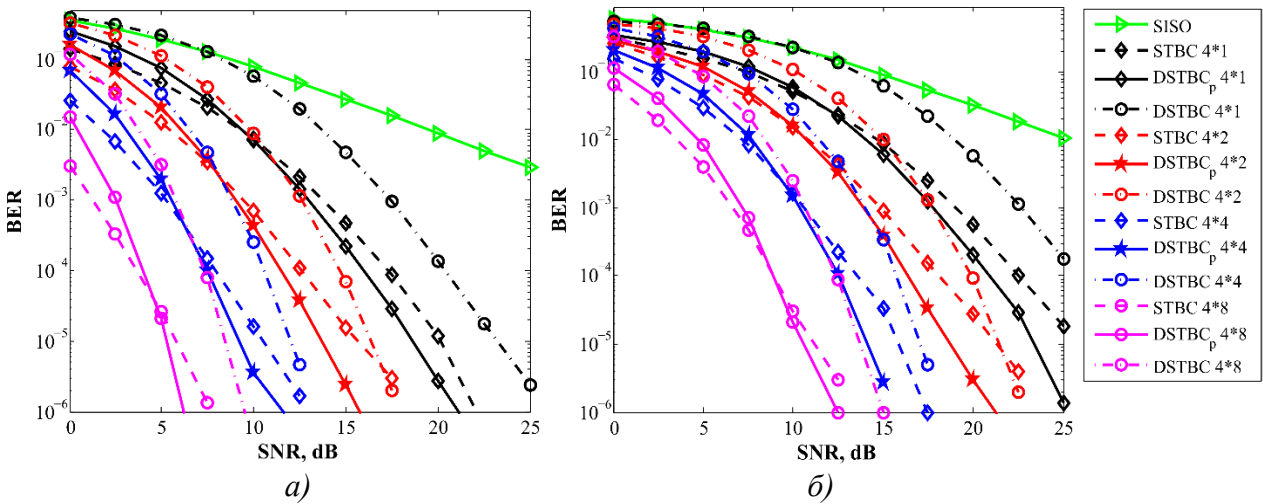


Рисунок 9 – Зависимости вероятности ошибки принятых бит (BER) от SNR в системе для  $M=4$  и случаев:  $a$  – при QPSK;  $b$  – при 8-PSK

На рисунке 10 показано во сколько раз ( $K$ ), при различных вариантах значений количества передающих  $M$  и приемных  $N$  антенн, а также позиционности модуляции  $L$ -PSK ( $L=2; 4; 8$ ), типичный метод передачи ДПВБК вычислительно сложнее, чем разработанный.

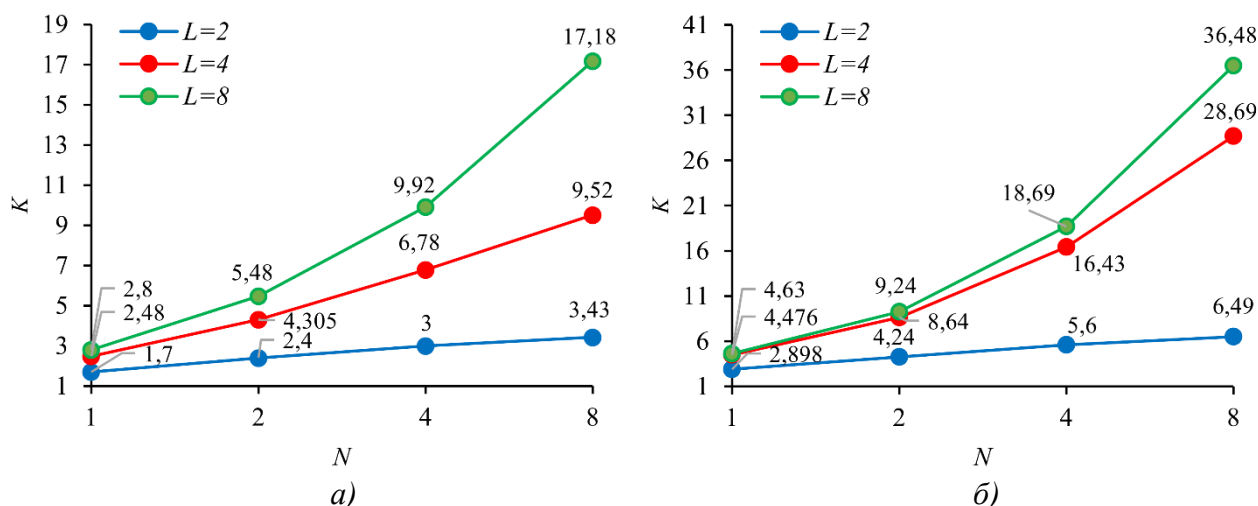


Рисунок 10 – Зависимости отношения  $K$  от числа  $N$  при:  $a$  –  $M=2$ ;  $b$  –  $M=4$

Далее приводятся полученные зависимости среднего времени обработки (average processing time – АРТ) для декодирования информации (рис. 11), переданной одной сигнальной матрицей, от SNR в системе  $M = 2$  при использовании типичного метода ДПВБК (DSTBC), разработанного метода ДПВБК (DSTBC<sub>p ml</sub>) с использованием алгоритма ML, а также с использованием матричного алгоритма декодирования (DSTBC<sub>p mat</sub>).

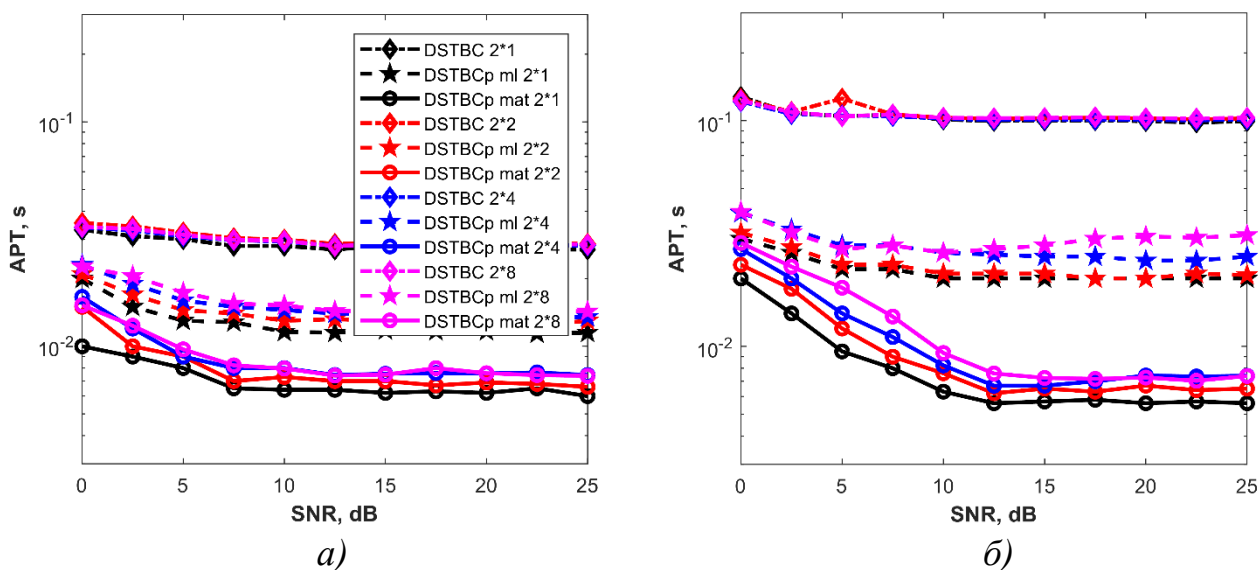


Рисунок 11 – Зависимости АРТ от SNR для  $M = 2$ , при:  
 $a$  – QPSK;  $b$  – PSK-8

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены результаты аналитического обзора принципов построения, методов и алгоритмов пространственно-временного блочного кодирования. Результаты показали, что применение дифференциального пространственно-временного блочного кодирования является актуальным в условиях уменьшения времени стационарности канала связи ввиду уменьшения используемой длины волны сигнала.

2. Разработан новый метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования, который обеспечивает энергетический выигрыш около 2 дБ и уменьшение вычислительной сложности на один порядок по сравнению с существующими методами дифференциального пространственно-временного блочного кодирования. Данный метод является масштабируемым для различного сочетания количества передающих и приемных антенн и не требует оценки импульсной характеристики канала связи.

3. Разработан новый алгоритм матричного декодирования, применимый для систем связи с последовательной и параллельной (ПВБК) передачей информации, вычислительная сложность которого не зависит от объема канального алфавита.

4. Разработан новый алгоритм «слепой» кадровой синхронизации, применимый для РСПИ ПВБК и позволяющий: снизить время вхождения в синхронизм, соответствующее длительности 10-40 кадров, число которых зависит от состояния канала связи; увеличить энергетический выигрыш на около 10 дБ и снизить вычислительную сложность в среднем на один порядок по сравнению с известными алгоритмами кадровой синхронизации систем ПВБК.

5. Получены результаты исследований и анализа разработанных в диссертации методов и алгоритмов, которые демонстрируют возможность их использования для построения перспективных стандартов систем радиосвязи, в том числе для передачи информации по каналам служебной информации с низким отношением сигнал/шум и в условиях быстро меняющихся параметров канала связи ввиду высокой скорости перемещения мобильных станций.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК**

1. Токарь, М.С. Алгоритм декодирования низкой сложности для систем передачи дифференциального пространственно-временного блочного кодирования / М.С. Токарь // Радиотехника. – 2021. – № 4. – С. 89-98.

2. Токарь, М.С. Слепая кадровая синхронизация в системе передачи с дифференциальным пространственно-временным блочным кодированием / М.С. Токарь, И.В. Рябов // Радиотехника. – 2021. – № 4. – С. 99-107.

3. Токарь, М.С. Дифференциальные пространственно-временные блочные коды для современных систем многоантенной радиосвязи / М.С. Токарь, А.Л. Макаревич // Электросвязь. – 2017. – № 4. – С. 39-45.

4. Токарь, М.С. Метод дифференциального пространственно-временного блочного кодирования для применения в системах подвижной радиосвязи с использованием технологии MIMO / М.С. Токарь, И.В. Рябов // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2021. – № 6.

### **Результаты интеллектуальной деятельности**

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660124 Российская Федерация. Программа дифференциального метода передачи сигналов для систем связи с пространственно-временным кодированием (кодер - декодер) / М.С. Токарь, И.В. Рябов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет». – № 2021619300; заявл. 15.07.2021 г.; опубл. 22.07.2021. – 1 с.

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021660125 Российская Федерация. Программа алгоритма “слепой” кадровой синхронизации декодера сигнала дифференциального пространственно-временного блочного кода / М.С. Токарь, И.В. Рябов; правообладатель ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет». – № 2021619304; заявл. 15.07.2021 г.; опубл. 22.07.2021. – 1 с.

### **Публикации в других изданиях и материалах конференций**

7. Tokar, M.S. Development of blind frame synchronization for transfer system with differential space-time block coding / M.S. Tokar // Technology audit and production reserves. – 2020. – Vol. 1, no 2(51), – P. 30–34.

8. Tokar, M.S. Development of a differential block coding method for application in mobile radio communication systems using MIMO systems / M.S. Tokar // Technology audit and production reserves. – 2019. – Vol. 4, no 2(48), – P. 28-33.

9. Токаръ, М.С. Дифференциальный метод блочного кодирования для применения в системах ММО / М.С. Токаръ // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. – 2018. – № 1. – С. 147-159.

10. Токаръ, М.С. Дифференциальные пространственно-временные блочные коды в современных системах многоантенной радиосвязи / М.С. Токаръ, А.Л. Макаревич // Цифрові технології. – 2016. – № 19. – С. 54-64.

11. Tokar, M.S. Differential space-time block codes in modern system of multi-antenna radiocommunication / M.S. Tokar, A.L. Makarevich // Digest of articles Materials Science and Condensed Matter Physics 2016 – Kishinev, 2016. – pp. 277.

12. Токаръ, М.С. Дифференциальные пространственно-временные блочные коды в современных системах многоантенной радиосвязи / М.С. Токаръ, А.Л. Макаревич // Сборник трудов Международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2016» – Самара, 2016. – С. 205-208.

13. Токаръ, М.С. Эффективные методы передачи информации для многоантенных радиосистем / М.С. Токаръ, А.Л. Макаревич // Вестник Приднестровского университета. – 2015. – № 3. – С. 59-68.

14. Токаръ, М.С. Анализ эффективных алгоритмов передачи информации для многоантенных радиосистем / М.С. Токаръ, А.Л. Макаревич // Материалы 5-й Международной конференции «Telecommunications, Electronics and Informatics» – Кишинев, 2015. – С. 50-55.

15. Токаръ, М.С. Анализ эффективных методов передачи информации для многоантенных радиосистем / М.С. Токаръ, А.Л. Макаревич // Сборник трудов Международной конференции «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях» «СИНХРОИНФО 2015» – Санкт-Петербург, 2015. – С. 188-190.