

МОДЕЛЬ РАДИОЛИНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ НУЖД ДОЛЖНОСТНЫХ ЛИЦ СИТУАЦИОННЫХ ЦЕНТРОВ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Быданов Егор Владимирович

Адъютант, ФГКВООУ ВО «Военная академия связи
имени маршала Советского Союза С. М. Буденного»
Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-
Петербург
egorius.90@mail.ru

MODEL OF RADIO LINES USING SPACE-TIME PROCESSING OF BROADBAND SIGNALS FOR THE NEEDS OF OFFICERS OF SITUATION CENTERS OF THE INTEGRATED SECURITY SYSTEM

Ye. Bydanov

Summary. The novelty of the research lies in the fact that for the first time a model of radio lines was developed using spatio-temporal processing of broadband signals to provide communication sessions for the needs of officials of situational centers of an integrated security system, the dependence of the number of receiving and transmitting paths of the communication system on the signal-to-noise ratio was obtained. Result: the presented solution to the model of radio lines using spatio-temporal processing of broadband signals is fully suitable for the needs of officials of situational centers of an integrated security system for transmitting data and providing a transport layer of protocols of modern communication services in those places where laying fiber-optic communication lines is difficult or impossible. The results obtained by comparing the noise immunity of MIMO and SIMO systems for non-uniform and time-variable channels have shown the significant superiority of the developed radio link model using spatial-temporal processing of wideband signals. Using the mathematical modeling program MatLab, such a model was built and a comparative study of noise immunity with other well-known radio lines was carried out.

Keywords: radio communication, noise immunity, model of radio lines, broadband channel, communication system, directional diagram, multiple input, multiple output.

Аннотация. Новизна исследования заключается в том, что впервые разработана модель радиолиний с использованием пространственно-временной обработки широкополосных сигналов для предоставления сеансов связи для нужд должностных лиц ситуационных центров комплексной системы безопасности, получена зависимость числа приёмных и передающих трактов системы связи от величины соотношения сигнал/шум. Результат: представленное решение модели радиолиний с использованием пространственно-временной обработки широкополосных сигналов полностью подходит для нужд должностных лиц ситуационных центров комплексной системы безопасности для передачи данных и предоставления транспортного уровня протоколов современных сервисов связи в тех местах, где прокладка оптоволоконных линий связи затруднена или невозможна. Результаты, полученные путем сравнения помехоустойчивости систем MIMO и SIMO, для неоднородных и непостоянных во времени каналов, показали значительное превосходство разработанной модели радиолинии с использованием пространственно-временной обработкой широкополосных сигналов. С помощью программы математического моделирования MatLab такая модель была построена и проведено сравнительное исследование помехоустойчивости с другими известными радиолиниями.

Ключевые слова: радиосвязь, помехоустойчивость, модель радиолиний, широкополосный канал, система связи, диаграмма направленности, множественный вход, множественный выход.

¹ Выражаю благодарность моему научному руководителю Мешалкину Валентину Андреевичу, кандидату технических наук, доценту, старшему научному сотруднику научно-исследовательского центра Военной академии связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного.

Введение

Сегодня от всех силовых структур требуется постоянная готовность к выполнению мер обеспечения безопасности государства. При этом большая часть задач возлагается на ситуационные центры различных ведомств. Для функционирования ситуационных центров требуется оборудование, построенное на основе современных технологий связи, способное передавать большие объемы информации с высоким качеством, в связи с чем предъявляются более высокие требования к каналам связи по пропускной способности и помехоустойчивости [3]. Отметим, что не все технологии и оборудование пригодны для использования, т.к. при выборе технических средств необходимо выполнить ряд требований по защите информации от утечек по каналам побочных электромагнитных излучений и наводок (ПЭМИН) [2], а также по защите должностного лица от электромагнитных излучений [1, 4].

Сегодня ситуационные центры оснащены оборудованием связи, работа которого основана на применении технологии SISO (Single Input Single Output) с одной антенной на передаче и приеме. Учеными ведущих стран мира велись исследования по разработке беспроводных систем, способных к высокой скорости передачи информации и возможности предоставления современных сервисов связи. Широко исследуются такие технологии, как MISO (Multiple Input Single Output) и SIMO (Soft Input Multiple Output). В работе [7, 9] описана передача информации по разнесенным в пространстве каналам системы MIMO (Multiple Input Multiple Output). В литературе [6, 8] широко исследована Шенноновская пропускная способность, однако нигде не представлено сравнение результатов помехоустойчивости системы связи MIMO с различным числом приемных и передающих трактов с радиоприемными другими технологий. Таким образом, возникает необходимость в разработке радиоприемной, с помощью которой должностные лица смогли бы использовать современные сервисы связи для решения повседневных задач, тем более в тех местах, где не имеется возможность прокладки проводных и оптоволоконных линии связи, при этом скорость передачи информации и помехоустойчивость (коэффициент битовой ошибки составляет 10^9) немного уступали бы им [5]. Цель работы — создание модели радиоприемной с использованием пространственно-временной обработки широкополосных сигналов, при помощи которой возможно устанавливать сеансы связи между должностными лицами ситуационных центров комплексной системы безопасности с поддержкой современных сервисов связи. Расчеты экспериментальных исследований на основе компьютерного моделирования проводятся для оценки помехоустойчивости созданной модели в сравнении с известными радиоприемными ситуационных

центров, функционирование которых основано на базе технологии SISO.

Постановка задачи

Пусть спектральная плотность шумов в пределах полосы пропускания на частоте n радиоприемных трактов сохраняет постоянное значение. Пусть есть v выборки сигнала $S_1(k) \dots S_v(k)$, принятые в n независимых каналах приёма (полученные от m передающих трактов), содержащие по K комплексных отсчетов на частоте дискретизации F_s :

$$S_1(k) = s_1(k) + q_1(k), \tag{1}$$

$$S_2(k) = s_2(k) + q_2(k) = \alpha_2 \cdot s_1(k + D_{1,2}) + q_2(k), \tag{2}$$

$$S_v(k) = s_v(k) + q_v(k) = \alpha_v \cdot s_1(k + D_{1,v}) + q_v(k), \tag{3}$$

где $s_1(k)$ — комплексная огибающая сигнала моделируемой радиоприемной системы, принятого первым трактом приёма; $s_2(k)$ — комплексная огибающая сигнала моделируемой радиоприемной системы, принятого вторым трактом приёма с коэффициентом затухания α_2 ; $s_v(k)$ — комплексная огибающая сигнала моделируемой радиоприемной системы, принятого v -трактом приёма с коэффициентом затухания α_v ; $q_1(k), q_2(k)$ — аддитивные гауссовские центрированные шумы в первом, втором и v -тракте соответственно; $D_{1,2}, D_{1,v}$ — задержка сигнала $s_1(k)$ относительно $s_2(k)$ и сигнала $s_1(k)$ относительно $s_v(k)$ выраженная в отсчетах сигнала. Отметим, что сигнал может быть некоррелированный с шумами $q_1(k), q_2(k) \dots q_v(k)$.

Входными данными модели радиоприемной являются:

- ◆ m — число передающих трактов системы связи построенной на основе технологии MIMO;
- ◆ n — число приемных трактов системы построенной на основе технологии MIMO;
- ◆ M — номер, соответствующий виду модуляции сигнала ортогональных подканалов, которые передаются параллельно;
- ◆ $P_{\min} \dots P_{\max}$ — диапазон соотношения E_b/N_0 , выраженное в децибелах для моделирования сигнала;
- ◆ $T_{\text{сиг}}$ — длительность генерируемого сигнала $s(k)$ для расчёта коэффициента битовой ошибки;
- ◆ $R_{\text{инф}}$ — информационный поток размером $L_{\text{инф}}$ бит, который подается на модулятор, в зависимости заданного вида модуляции M формируется сигнал $s(k)$;
- ◆ $R_{\text{сиг}}$ — на приемной стороне именно по этому сигналу осуществляется корреляция сигнала для различных временных и частотных сдвигов, до тех пор пока не появится пик в огибающей взаимной корреляционной функции (ВКФ) [10, 11].

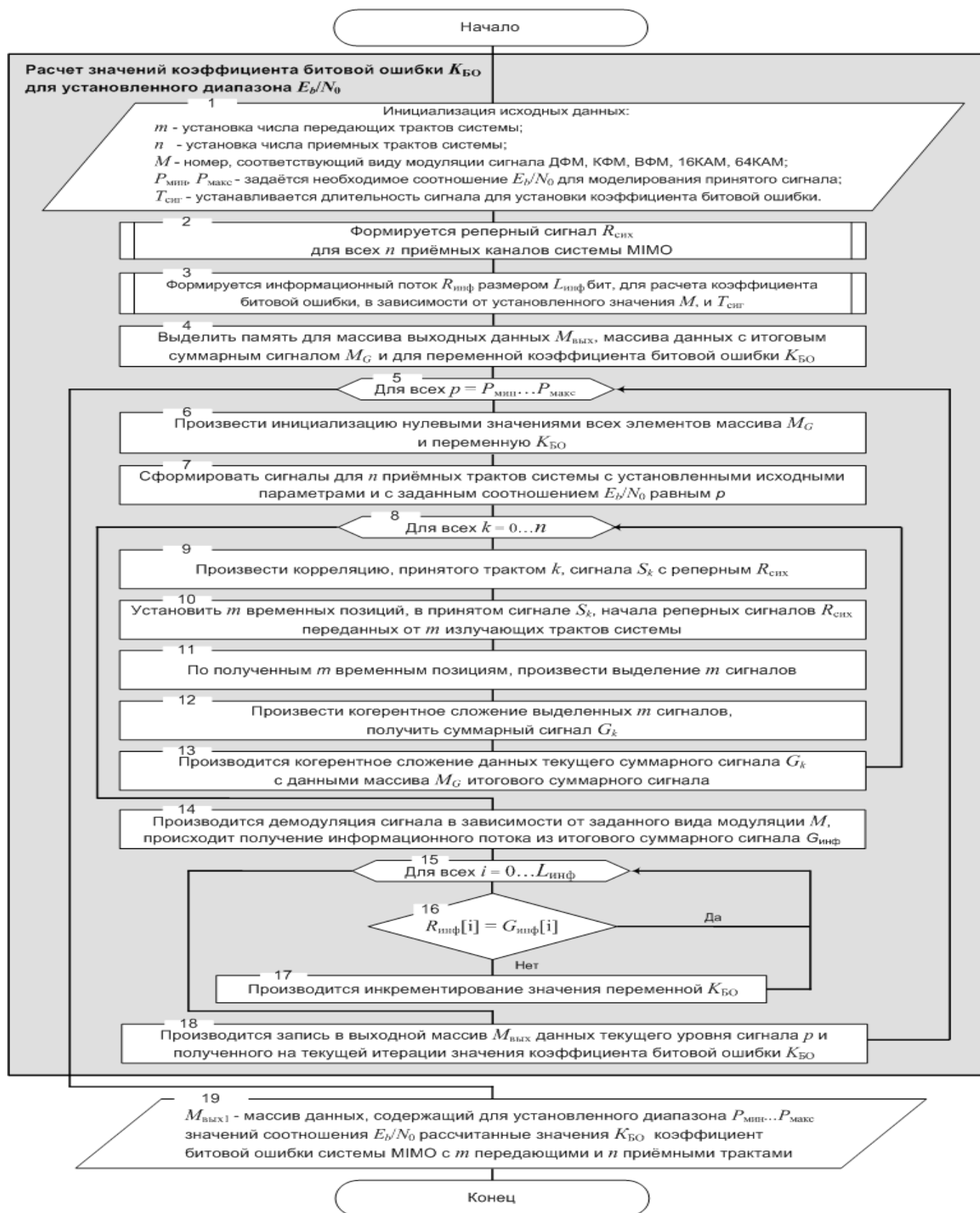


Рис. 1. Схема алгоритма расчета помехоустойчивости для системы МИМО с n приемными и передающими трактами

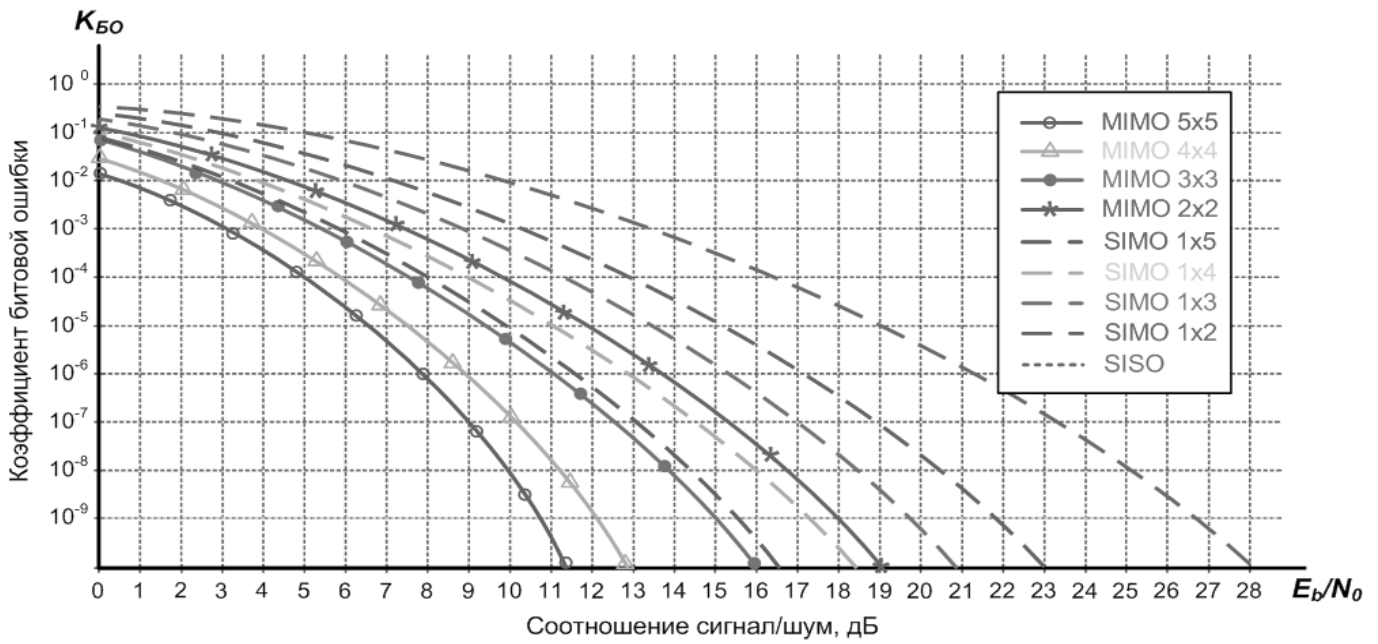


Рис. 2. Зависимость значений коэффициента битовой ошибки КБО от величины E_b/N_0 для систем MIMO, SIMO, SISO, модуляция ДФМ

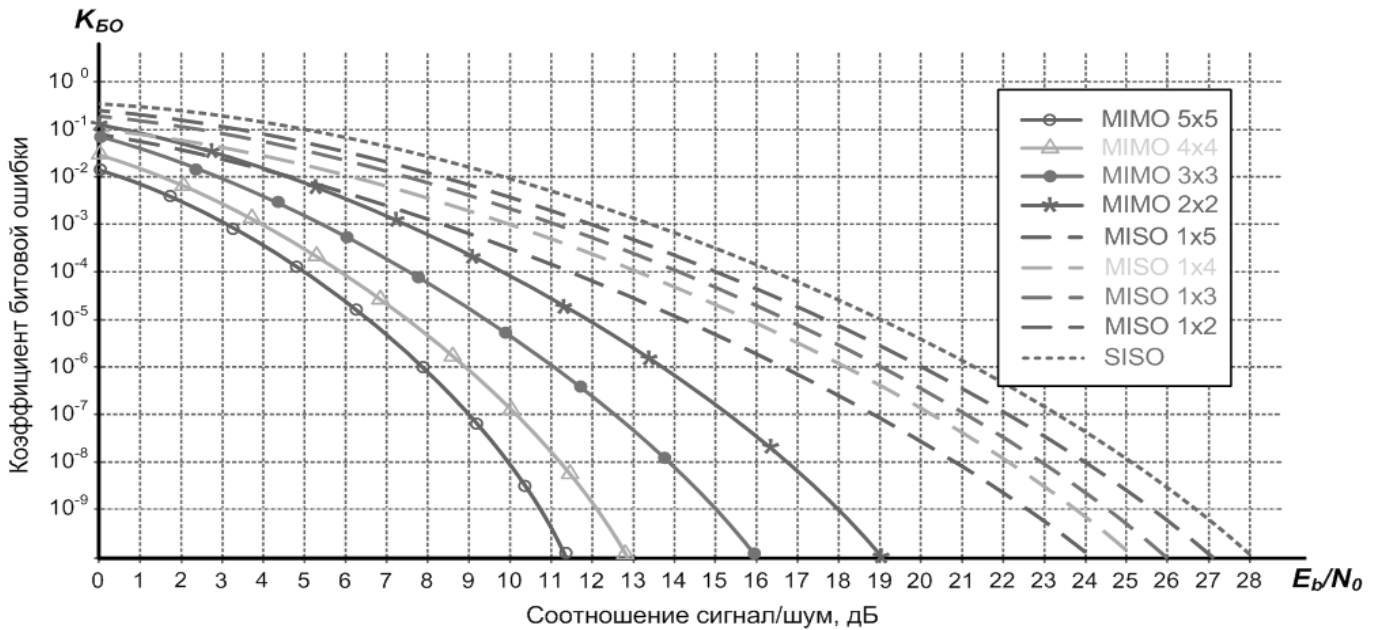


Рис. 3. Зависимость значений коэффициента битовой ошибки КБО от величины E_b/N_0 для систем MIMO, MISO, SISO, модуляция ДФМ

Решение. Схема алгоритма сравнения помехоустойчивости систем MIMO и SIMO представлена на рис. 1. Рассмотрим его основные блоки. Сначала инициализируются исходные данные, необходимые для формирования массива выходных данных дискретной модели, блок 1 на рис. 1. В блоке 2 на рис. 1 происходит формирование

реперного сигнала $R_{сиг}$. В блоке 3 на рис. 1 формируется информационный поток $R_{инф}$ объемом $L_{инф}$ бит в зависимости от установленного значения M и $T_{сиг}$. Данный информационный поток и будет передаваться по каналам связи системы. В блоке 4 на рис. 1 происходит выделение памяти для массива выходных данных $M_{вых}$

массива данных с итоговым суммарным сигналом M_G и для переменной коэффициента битовой ошибки K_{BO} . При помощи цикла 5 на рис. 1 осуществляется перебор, инкрементированием на единицу, диапазона $P_{мин} \dots P_{макс}$ заданных уровней сигнала. В блоке 6 на рис. 1. происходит инициализация нулевым значением переменной K_{BO} и всех элементов массива M_G . В блоке 7 на рис. 1 происходит формирование n сигналов для n приёмных трактов системы с установленными исходными параметрами и с заданным соотношением E_b/N_0 равным p . При помощи цикла 8 на рис. 1 осуществляется выполнение одинаковых действий для всех n приёмных трактов системы: в блоке 9 на рис. 1 выполняется корреляция, принятого трактом k , сигнала S_k с реперным $R_{сиг}$ для определения m временных позиций в принятом сигнале S_k , блок 10 на рис. 1 (таким образом, определяются начала m переданных сигналов $R_{инф}$ системы); в блоке 11 на рис. 1 происходит выделение всех найденных m сигналов; в блоке 12 на рис. 1 производится когерентное сложение всех выделенных сигналов m между собой, в результате сложения получается суммарный сигнал тракта k , который может быть, в свою очередь, когерентно сложен с сигналами других $n-1$ трактов и итоговый сигнал в блоке 13 на рис. 1 сохраняется в массиве данных M_G . В блоке 14 на рис. 1 производится демодуляция итогового сигнала из массива данных M_G , в зависимости от заданного вида модуляции M , полученный битовый поток информационных данных будем обозначать $G_{инф}$. При помощи цикла 15 на рис. 1 производится обход всех информационных бит потока $G_{инф}$ и в блоке 16 на рис. 1 происходит сравнение их с заданным потоком $R_{инф}$. В случае если информационные биты в одинаковых позициях i не равны, то в блоке 17 на рис. 1 производится инкрементирование коэффициента битовой ошибки K_{BO} . Таким образом, по завершению выполнения цикла 15 на рис. 1 и действий внутри него в блоке 18 на рис. 1 устанавливается, в выходной массив данных $M_{вых1}$ конечное значение коэффициента битовой ошибки K_{BO} системы MIMO с m передающими и n приёмными трактами. По завершению всех итераций цикла 8 на рис. 1 в блоке 19 на рис. 1 данные массива $M_{вых}$ готовы для последующего анализа.

На рис. 2–3 представлены графики, на которых наглядно отображены рассчитанные значения массива данных $M_{вых1}$ по представленному выше алгоритму коэффициента битовой ошибки K_{BO} . По представленным графикам появляется возможность наглядно оценить помехоустойчивость систем MIMO, SIMO, SISO, MISO.

На рис. 2 видно, что при K_{BO} , равному 10^{-5} , выигрыш между MIMO 5x5 и SIMO 1x5 составляет 4 дБ; выигрыш между MIMO 4x4 и SIMO 1x4 составляет 3 дБ, выигрыш между MIMO 3x3 и SIMO 1x3 равен 4 дБ, выигрыш между MIMO 2x2 и SIMO 1x2 равен 6 дБ.

На рис. 3 видно, что при K_{BO} , равному 10^{-5} выигрыш между MIMO 5x5 и MISO 1x5 составляет 8 дБ; выигрыш между MIMO 4x4 и MISO 1x4 составляет 8 дБ, выигрыш между MIMO 3x3 и MISO 1x3 равен 7 дБ, выигрыш между MIMO 2x2 и MISO 1x2 равен 6 дБ.

Как показывает анализ представленных графиков на рис. 2–3, с увеличением числа приёмных трактов помехоустойчивость передачи данных увеличивается. Для того, чтобы определить число приёмных трактов, при котором соотношение E_b/N_0 будет минимальным для значения коэффициента битовой ошибки K_{BO} , соответствующего оптоволоконной линии связи 10^{-9} . Произведем расчеты по алгоритму, представленному на рис. 4 и по полученным данным построим график исследуемой зависимости для последующего анализа.

Рассмотрим основные блоки алгоритма, представленного на рис. 4. Сначала инициализируются исходные данные (блок 1 на рис. 4). В блоке 2 на рис. 4 происходит формирование реперного сигнала $R_{сиг}$ на приемной стороне именно по этому сигналу осуществляется корреляция сигнала для различных временных и частотных сдвигов до тех пор, пока не появится пик в огибающей взаимной корреляционной функции (ВКФ).

В блоке 3 на рис. 4 формируется информационный поток $R_{инф}$ размеров $L_{инф}$ бит в зависимости от установленного значения M и $T_{сиг}$. Данный информационный поток и будет передаваться по каналам связи системы. В блоке 4 на рис. 4 происходит выделение памяти для массива выходных данных $M_{вых2}$ и массива данных с итоговым суммарным сигналом M_G и для переменной коэффициента битовой ошибки K_{BO} . При помощи цикла 5 на рис. 4 осуществляется перебор инкрементированием на единицу диапазона $1 \dots N$ заданного числа передающих и приёмных трактов системы. Для каждого $n \in [1; N]$ устанавливается значение соотношения E_b/N_0 , при котором коэффициент битовой ошибки K_{BO} будет равен 10^{-9} . При помощи цикла 6 на рис. 4 осуществляется перебор инкрементированием на единицу диапазона $P_{мин} \dots P_{макс}$ заданных уровней сигнала. В блоке 7 на рис. 4 происходит инициализация нулевым значением переменной K_{BO} и всех элементов массива M_G . В блоке 8 на рис. 4 происходит формирование n сигналов для n приёмных трактов системы с установленными исходными параметрами и с заданным соотношением E_b/N_0 равным p . При помощи цикла 9 на рис. 4 осуществляется выполнение одинаковых действий для всех n приёмных трактов системы. При помощи цикла 9 на рис. 4 осуществляется выполнение одинаковых действий для всех n приёмных трактов системы. Таким образом, определяются начала n переданных сигналов $R_{инф}$ системы.

В блоке 12 на рис. 4 происходит выделение всех найденных n сигналов; в блоке 13 на рис. 4 производится ко-

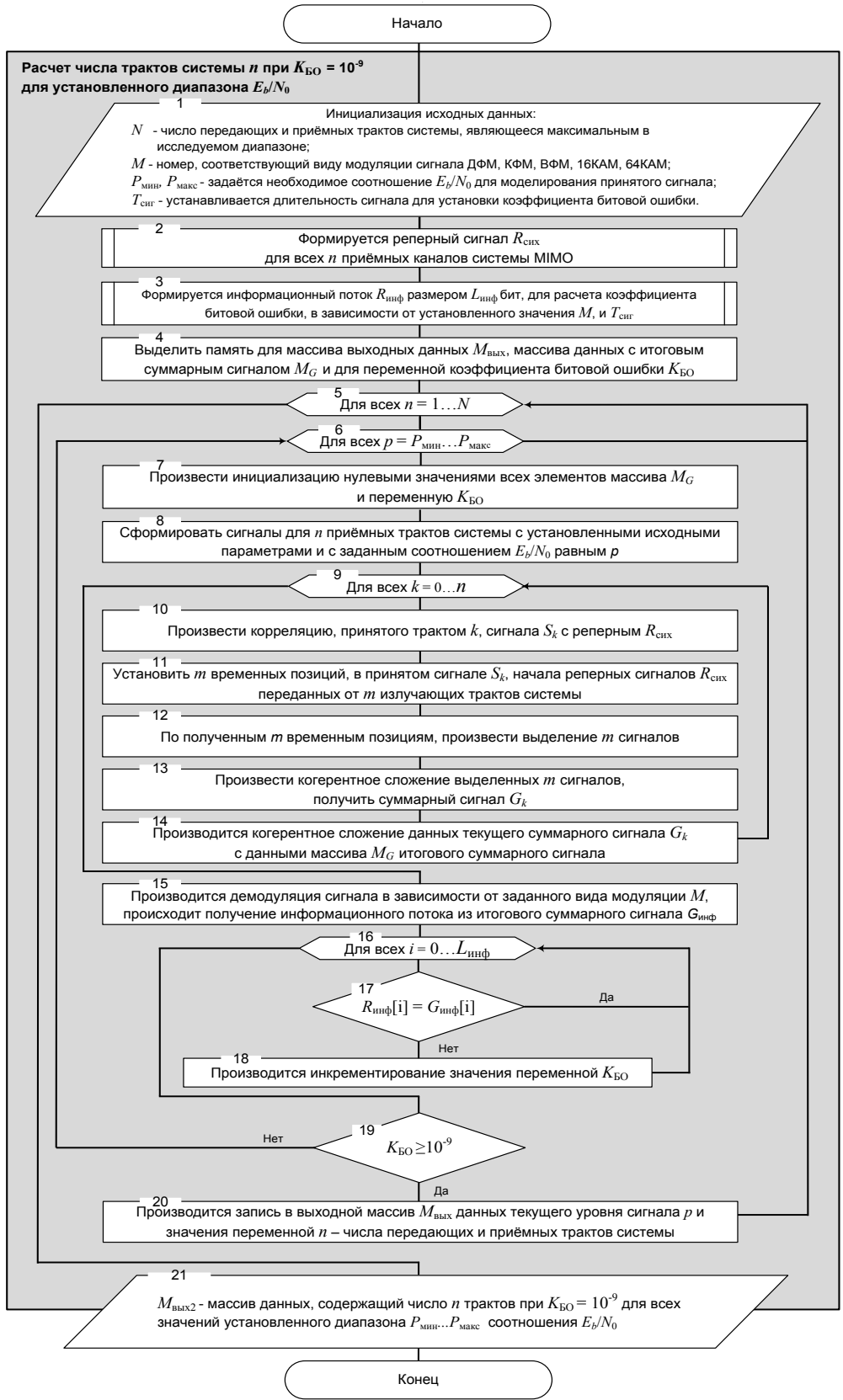


Рис. 4. Схема алгоритма расчета приемных трактов n для системы MIMO, при котором соотношение E_b/N_0 будет минимальным для значения коэффициента битовой ошибки $K_{Б0}$, соответствующего оптоволоконной линии связи 10^{-9}

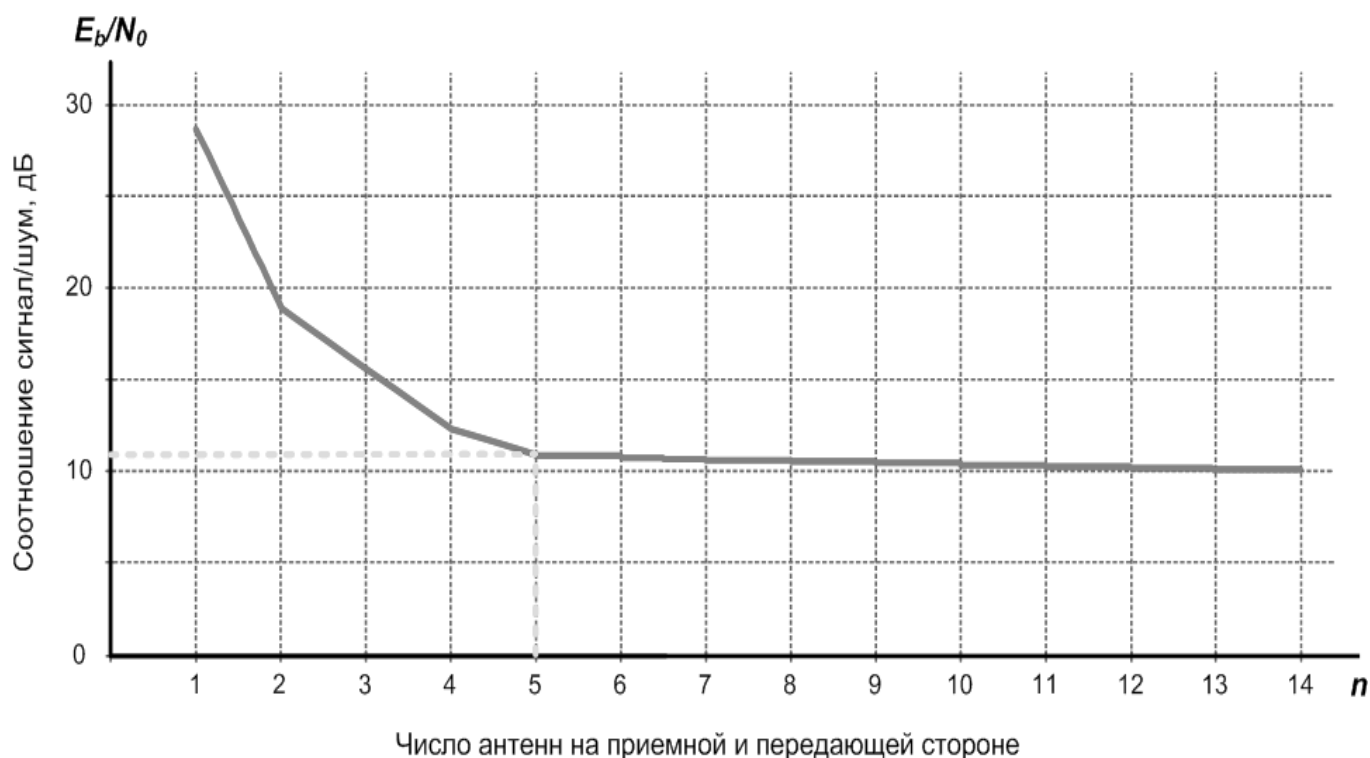


Рис. 5. Зависимость числа приёмных и передающих трактов от величины E_b/N_0 для систем ММО, модуляция ДФМ

герентное сложение всех выделенных сигналов m между собой, в результате сложения получается суммарный сигнал тракта k , который может быть, в свою очередь, когерентно сложен с сигналами других $n-1$ трактов и итоговый сигнал в блоке 14 на рис. 4 сохраняется в массиве данных M_G . В блоке 15 на рис. 4 производится демодуляция итогового сигнала из массива данных M_G , в зависимости от заданного вида модуляции M , полученный битовый поток информационных данных будем обозначать $G_{инф}$. При помощи цикла 16 на рис. 4 производится обход всех информационных бит потока $G_{инф}$ и в блоке 17 на рис. 4 происходит сравнение их с заданным потоком $R_{инф}$. Если информационные биты в одинаковых позициях i не равны, то в блоке 18 на рис. 4 производится инкрементирование коэффициента битовой ошибки $K_{БО}$. Таким образом, по завершению выполнения цикла 16 на рис. 4 и действий внутри него в блоке 19 на рис. 4 переменная коэффициента битовой ошибки $K_{БО}$ готова для сравнения с априорно установленным значением 10^{-9} . В случае, если значение переменной $K_{БО}$ больше или равно 10^{-9} , то цель достигнута и данное значение, и значение переменной n записывается в выходной массив данных $M_{вых2}$, блок 20 на рис. 4. В блоке 20 на рис. 4 данные выходного массива $M_{вых2}$, полученные в ходе расчетов, готовы для дальнейшего анализа. По данным выходного массива $M_{вых2}$ на рис. 5 построен

график, который наглядно отображает исследуемую зависимость.

Как видно из представленной иллюстрации рис. 5, с увеличением числа передающих и приёмных трактов n системы ММО, для коэффициента битовой ошибки $K_{БО}$ равной 10^{-9} значение соотношения E_b/N_0 уменьшается. По рисунку видно, что при значениях переменной приёмных и передающих трактов, равных более пяти, соотношение E_b/N_0 уменьшается незначительно.

Заключение. Анализ выходных данных рис. 5, полученных по алгоритму рис. 4 и при помощи разработанной модели радиолинии, показал, что для нужд должностных лиц ситуационных центров комплексной системы безопасности, в частности, для мест, где не проложены ещё оптоволоконные линии связи и для тех мест, где это сделать не представляется возможным в силу известных причин, но требуется использовать современные сервисы связи, автором предлагается использовать разработанную линию радиосвязи с использованием технологии ММО. Проведенный расчет показал, что наиболее лучшей помехоустойчивостью обладает система ММО 5x5, поскольку коэффициент битовой ошибки равный 10^{-9} был получен для сигнала с соотношением E_b/N_0 , равным 10 дБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Викторов В. А. Модель электромагнитных полей, формируемых автоматизированным рабочим местом объекта информатизации // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 1–32.
2. Мешалкин В. А. Решение задач электродинамики с помощью вычислительного эксперимента // Журнал научных и прикладных исследований. 2016. Т. 2. № 11 С. 80–82.
3. Ревин С. М. Системно-конфигурационный метод проектирования ситуационных центров в системе комплексной безопасности. — М: Проспект, 2010. — 147 с.
4. Хореев А. А. Технические каналы утечки акустической (речевой) информации // Специальная техника. 2009. № 5. С. 12–26.
5. Цуканов В. Н. Волоконная оптическая техника. — М: Инфра-Инженерия, 2015. — 243 с.
6. Brown T., Elisabeth C., Persefoni K. Practical Guide to the Mimo Radio Channel with Matlab Examples. — London: John Wiley & Sons Ltd, 2012. — 263 p.
7. Shiu D., Foschini G. J., Gans M. J., Kahn J. M. Fading Correlation and Its Effect on the Capacity of Multielement Antenna System // IEEE Transaction On Communications. 2016. Vol. 48. № 2. P. 502–513.
8. Tsoulos G. MIMO System Technology for Wireless Communications. — New York: CRC Press, 2006. — 395 p.
9. Zelst A., Hammerschmidt J. S. A single coefficient spatial correlation models for multiple-input multiple output (MIMO) radio channels // Proceeding of the URSI XXVII th General Assembly. (2–5 Aug. 2002). Maastricht, Netherlands, 2002. P. 949–952.

© Быданов Егор Владимирович 1 (egorius.90@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Будённого