

УДК 621.394.147

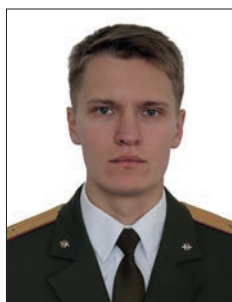
Анализ эффективности применения пространственно-временного кодирования в военных цифровых системах тропосферной связи

В статье представлены аналитические расчеты вероятности битовой ошибки в канале с релеевскими замираниями для военных цифровых систем тропосферной связи с различными вариантами пространственно-временного кодирования. По результатам расчетов сделаны выводы об эффективности применения пространственно-временного кодирования в современных военных цифровых системах тропосферной связи для обеспечения их помехоустойчивости.

Введение. В связи с активной модернизацией и разработкой современных военных цифровых систем тропосферной связи (ЦСТС) в Вооруженных Силах Республики Беларусь актуальным является исследование возможности и целесообразности применения современных методов повышения помехоустойчивости. Один из таких методов – использование пространственно-временного кодирования, в т. ч. пространственно-временного разнесения передающих и приемных антенн (технология MIMO, Multiple-Input-Multiple-Output) [1, 2, 3].

В настоящее время в военных ЦСТС активно применяется технология разнесенной передачи (MISO, Multiple-Input-Single-Output) и разнесенного приема (SIMO, Single-Input-Multiple-Output). Основным отличием технологии MIMO от методов разнесенной передачи MISO и разнесенного приема SIMO является наличие пространственного разнесения как на приемной, так и на передающей стороне [3].

Обзор и последующий анализ зарубежных источников по разработке и исследованию ЦСТС военного и гражданского назначения, систем широкополосного радиодоступа и стандартов наземного цифрового теле- и радиовещания показал, что на



О.В. ШИДО,
капитан, старший инженер
учебной лаборатории
кафедры связи



В.В. ПИСКУН,
кандидат технических наук,
доцент кафедры связи

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

данном этапе развития разработчики активно применяют в телекоммуникационных системах различного назначения новейшие достижения в области связи, направленные на повышение показателей помехоустойчивости и пропускной способности. К ним относят как современные типы цифровой модуляции (OFDM) и помехоустойчивого кодирования (каскадные коды, коды LDPC, многопороговое декодирование и полярные коды), так и технологии пространственно-временного кодирования (MIMO 2×2, MIMO 4×2, MIMO 4×4, MIMO 8×2, MIMO 8×4, MIMO 8×8), обеспечивающие более высокие скорости передачи информации при требуемой помехоустойчивости [4].

Целью данной статьи является исследование эффективности применения технологии MIMO в разрабатываемых и модернизируемых военных ЦСТС на основе расчета и анализа

показателей помехоустойчивости и энергетической эффективности.

Основная часть. Для оценки эффективности применения технологии MIMO в военных ЦСТС были получены зависимости вероятности битовой ошибки (BER) для используемых в тропосферной связи типов цифровой модуляции (QPSK) в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) и в канале с релеевскими замираниями.

Для расчета помехоустойчивости ЦСТС на основе модуляции QPSK в канале с АБГШ использовалось следующее аналитическое выражение [5]:

$$BER = \left(Q\sqrt{2h_b^2} \right), \quad (1)$$

где $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ – гауссовый

интеграл ошибок, h_b – отношение сигнал/шум.

Так как любая ЦСТС функционирует в канале с релеевскими замираниями, был выполнен расчет помехоустойчивости цифровой модуляции QPSK в данном канале по следующему аналитическому выражению [6]:

$$BER = \frac{1}{2} \left(\frac{h_b^2}{1 + h_b^2} \right). \quad (2)$$

Следует отметить, что выражение (2) справедливо при модуляции типа QPSK и частоте доплеровского сдвига $F_d = 0$.

Расчеты BER по выражениям (1) и (2) представлены на рис. 1.

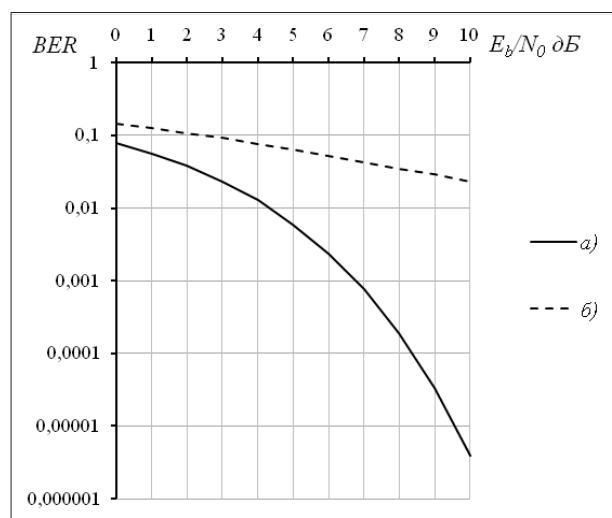


Рисунок 1 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для модуляции QPSK а) в канале с АБГШ; б) в канале с релеевскими замираниями

Как видно из рис. 1, применение QPSK-модуляции в канале с релеевскими замираниями

малоэффективно по показателям помехоустойчивости и энергетической эффективности.

Для решения задачи повышения помехоустойчивости в канале с релеевскими замираниями в военных ЦСТС применяют методы разнесенного приема SIMO и разнесенной передачи MISO (рис. 2) [7, 8].

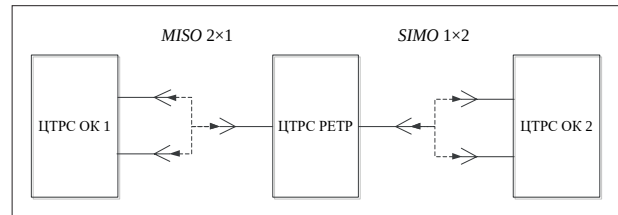


Рисунок 2 – Упрощенная схема построения двухинтервальной ЦСТС

Помехоустойчивость при когерентном приеме с выхода n статистически неоднородных независимых релеевских каналов определяется формулой [8]:

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k^{n-1}}{\prod_{p=1, p \neq k}^n (\lambda_k - \lambda_p)} \sqrt{\frac{\lambda_k}{1 + \lambda_k}} \right], \quad (3)$$

где λ_k – собственные числа от произведения матриц коэффициентов передачи канала K и матрицы отношения сигнал/шум Q .

Собственные числа определяются из решения следующего характеристического уравнения матрицы KQ :

$$|KQ - \lambda I| = 0, \quad (4)$$

где I – единичная матрица порядка n (n – количество антенн).

Пусть заданы коэффициенты корреляции: r_{RX} – коэффициент корреляции между соседними приемными антеннами; r_{TX} – коэффициент корреляции между передающими антеннами; r_{STBC} – коэффициент корреляции между двумя векторами сигналов, разнесенных (кодированных) с помощью произвольного STBC-кода [8]. Поскольку любой STBC-код размера 2×2 является ортогональным, то для двух любых сигналов $r_{STBC} = 0$. Тогда произведение матриц коэффициентов передачи канала K и матрицы отношения сигнал/шум Q для случая MISO 2×1 и SIMO 1×2 равно

$$KQ = \frac{h_b^2}{2} \begin{bmatrix} 1 & r_{RX} \\ r_{RX} & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Собственные числа матрицы (5) согласно (4) равны:

$$\lambda_1 = \frac{h_b^2}{2}(1+r_{RX}) \quad \lambda_2 = \frac{h_b^2}{2}(1-r_{RX}). \quad (6)$$

Подставляя собственные числа (6) в выражение (3), получаем BER для случая использования одной антенны на передаче и двух антенн на приеме:

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1+r_{RX}}{2r_{RX}} \sqrt{\frac{(1+r_{RX})h_b^2}{(1+r_{RX})h_b^2+2}} + \frac{1-r_{RX}}{2r_{RX}} \sqrt{\frac{(1-r_{RX})h_b^2}{(1-r_{RX})h_b^2+2}} \right]. \quad (7)$$

Результаты расчета BER для системы SIMO 1×2 с различными значениями коэффициента корреляции на приемной стороне r_{RX} по выражению (7) представлены на рис. 3.

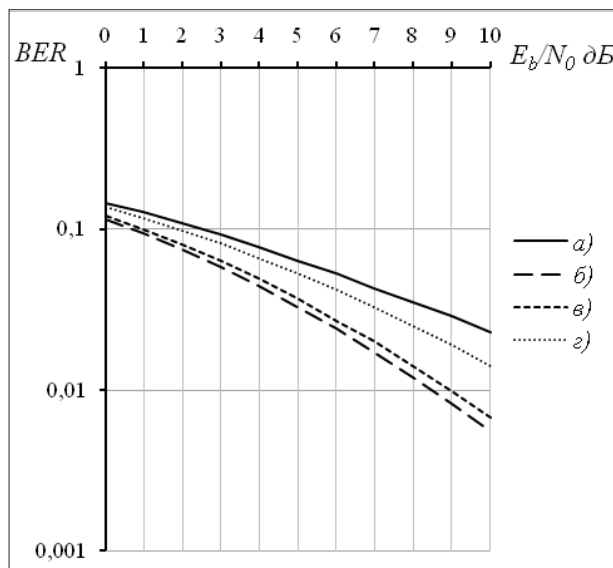


Рисунок 3 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для QPSK
а) в канале с релеевскими замираниями; б) совместно с технологией SIMO 1×2 ($r_{RX} = 0$); в) совместно с технологией SIMO 1×2 ($r_{RX} = 0,5$); г) совместно с технологией SIMO 1×2 ($r_{RX} = 1$)

При расчете помехоустойчивости систем MISO мощность сигнала делится в равной пропорции между всеми передающими антеннами. При этом помехоустойчивость системы ухудшается, поскольку отношение полной энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума h_{bi}^2 для каждого канала равно

$$h_{bi}^2 = \frac{h_b^2}{N} \quad (8)$$

где N – количество передающих антенн. Тогда выражение (7) с учетом (8) для случая MISO 2×1:

$$BER = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{1+r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1+r_{TX})h_b^2}{(1+r_{TX})h_b^2+4}} + \frac{1-r_{TX}}{2r_{TX}} \sqrt{\frac{(1-r_{TX})h_b^2}{(1-r_{TX})h_b^2+4}} \right]. \quad (9)$$

Расчет зависимости BER от отношения сигнал/шум для системы MISO 2×1 с различными значениями коэффициента корреляции на передающей стороне r_{TX} по выражению (9) представлен на рис. 4.

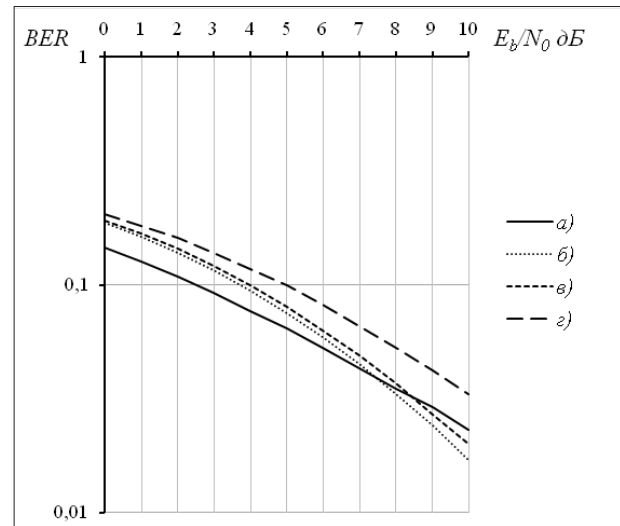


Рисунок 4 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для QPSK
а) в канале с релеевскими замираниями; б) совместно с технологией MISO 2×1 ($r_{TX} = 0$); в) совместно с технологией MISO 2×1 ($r_{TX} = 0,5$); г) совместно с технологией MISO 2×1 ($r_{TX} = 1$)

В системах MIMO (рис. 5) на помехоустойчивость приема и пропускную способность канала связи влияет не только пространственный коэффициент корреляции на передающей стороне – r_{TX} или приемной стороне – r_{RX} , но и поляризационный коэффициент корреляции r_{PLR} .

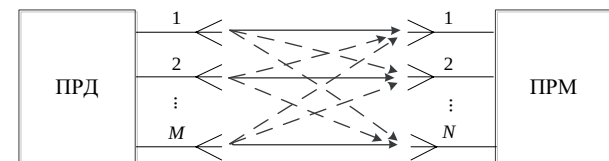


Рисунок 5 – Структурная схема технологии MIMO

Согласно [8] формула для множественного коэффициента корреляции с учетом r_{RX} , r_{TX} и r_{PLR} на передающей и, соответственно, приемной стороне:

$$r_{Tg} = \sqrt{\frac{r_{TX}^2 + r_{PLR}^2 - 2r_{TX}^2 r_{PLR}^2}{1 - r_{TX}^2 r_{PLR}^2}}, \quad r_{Rg} = \sqrt{\frac{r_{RX}^2 + r_{PLR}^2 - 2r_{RX}^2 r_{PLR}^2}{1 - r_{RX}^2 r_{PLR}^2}}. \quad (10)$$

Матрица корреляции для случая ММО 2×2 имеет вид [6]:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_g & r_g & r_g^2 \\ r_g & 1 & r_g^2 & r_g \\ r_g & r_g^2 & 1 & r_g \\ r_g^2 & r_g & r_g & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где r_g – множественный коэффициент корреляции с учетом r_{Tg} и r_{Rg} , который равен:

$$r_g = \sqrt{\frac{r_{Tg}^2 + r_{Rg}^2 - 2r_{Tg}^2 r_{Rg}^2}{1 - r_{Tg}^2 r_{Rg}^2}}. \quad (12)$$

Произведение матриц коэффициентов передачи канала K и матрицы отношения сигнал/шум Q для случая ММО 2×2 равно:

$$KQ = \frac{h_b^2}{4} \begin{bmatrix} 1 & r_g & r_g & r_g^2 \\ r_g & 1 & r_g^2 & r_g \\ r_g & r_g^2 & 1 & r_g \\ r_g^2 & r_g & r_g & 1 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Собственные числа матрицы KQ для случая ММО 2×2, согласно (4), равны:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \frac{h_b^2}{4}(1 - r_g^2); \lambda_2 = \frac{h_b^2}{4}(1 + r_g^2); \lambda_3 = \\ &= \frac{h_b^2}{4}(r_g^2 - 2r_g + 1); \lambda_4 = \frac{h_b^2}{4}(r_g^2 + 2r_g + 1). \end{aligned} \quad (14)$$

Подставив (14) в (3), получим аналитическое выражение для расчета вероятности битовой ошибки для случая ММО 2×2:

$$\begin{aligned} BER &= \frac{(r_g - 1)^3 \sqrt{\frac{h_b^2 (r_g - 1)^2}{h_b^2 + h_b^2 r_g^2 - 2h_b^2 r_g}}}{16r_g^2} - \\ &- \frac{(r_g - 1)^3 \sqrt{\frac{h_b^2 (r_g + 1)^2}{h_b^2 + h_b^2 r_g^2 + 2h_b^2 r_g + 4}}}{16r_g^2} - \\ &- \frac{(r_g^2 - 1) \sqrt{\frac{-h_b^2 (r_g - 1)^2}{h_b^2 - h_b^2 r_g^2 + 4}}}{8r_g^2} + \frac{1}{2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Результаты расчета BER от отношения сигнал/шум для системы ММО 2×2 с различными значениями множественного коэффициента корреляции по выражению (15) представлены на рис. 6. Для анализа эффективности применения технологии ММО 2×2 в военных ЦСТС был построен общий график с расчетами по формулам (2), (7), (9) и (15) с одинаковыми коэффициентами корреляции (рис. 7).

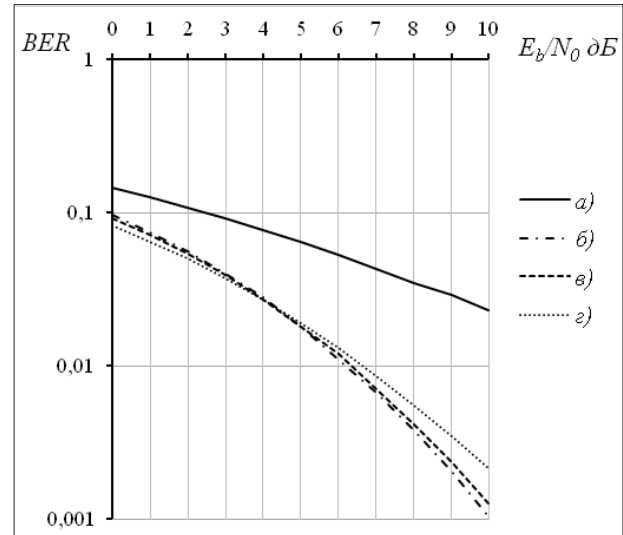


Рисунок 6 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для QPSK а) в канале с релейскими замираниями; б) совместно с технологией ММО 2×2 ($r_g = 0$); в) совместно с технологией ММО 2×2 ($r_g = 0,5$); г) совместно с технологией ММО 2×2 ($r_g = 1$)

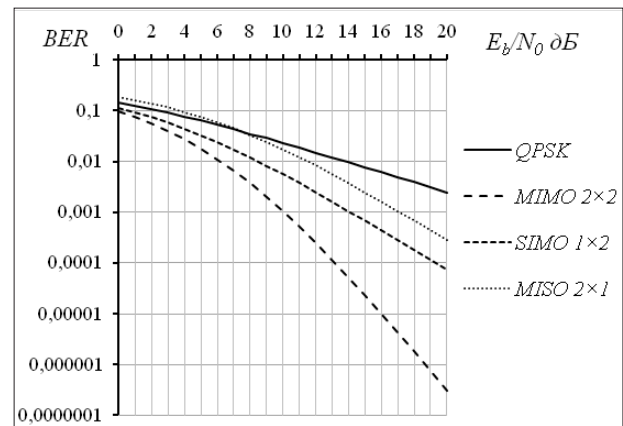


Рисунок 7 – Зависимость BER от отношения сигнал/шум для QPSK с различными вариантами пространственно-временного кодирования в канале с релейскими замираниями

Анализ расчетов (рис. 7) показал, что применение пространственно-временного кодирования в военных ЦСТС по сравнению с одноантенной передачей (SISO, Single-Input-Single-Output) имеет на уровне 5 дБ выигрыш в помехоустойчивости примерно в 3,5 раза, а по сравнению с передачей по технологии SIMO 1×2 и MISO 2×1 – приблизительно в 2 и 4 раза соответственно. Что

касается показателя энергетической эффективности, то применение технологии МІМО 2×2 позволяет сэкономить энергетический ресурс по уровню $BER = 10^{-3}$ на 14, 7 и 4 дБ по сравнению с технологией SISO, MISO 2×1 и SIMO 1×2 соответственно. Также, исходя из анализа расчетов (рис. 3, 4 и 6), видно, что технология МІМО наиболее устойчива к изменению множественного коэффициента корреляции, а следовательно, и к изменению коэффициентов корреляции на приемной и передающей стороне в отдельности. Однако, несмотря на значительные показатели в помехоустойчивости

и энергетической эффективности по сравнению с другими методами разнесения, существует проблема реализации технологии МІМО 2×2 в военных ЦСТС в режиме ретрансляции сигнала, связанная с экономическими затратами, т. к. в данном случае необходимо иметь 4 антенные системы.

Дальнейшим направлением исследования являются оценка и анализ эффективности применения пространственно-временного кодирования совместно с современными (перспективными) типами помехоустойчивых кодов в составе комбинированной сигнально-кодовой конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пискун, В.В., Шидо, О.В. Анализ эффективности помехоустойчивого кодирования в современных военных цифровых системах радиосвязи / В.В. Пискун, О.В. Шидо // Веснік сувязі. – 2018. – № 6. – с. 52–55.
2. Пискун, В.В., Шидо, О.В. Современные сигнально-кодовые конструкции военных цифровых систем радиосвязи // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XVIII науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, 16 мая–17 мая 2018 года, Минск, Респ. Беларусь / редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск / Белорусская государственная академия связи, 2018. – с. 11–14.
3. Бакулин, М.Г., Варукина, Л.А., Крейнделін, В.Б. Технология МІМО: принципы и алгоритмы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2014. – 244с.
4. Шидо, О.В. Анализ эффективности сигнально-кодовых конструкций цифровых систем радиосвязи: дис. ... м-ра тех. наук: 1-95 80 04 / О.В. Шидо – Минск, 2016. – 178 с.
5. Богатырев, Е.В. Разработка и исследование модемов помехозащищенных станций спутниковой и тропосферной связи: дис. ... к-та тех. наук: 05.12.04 / Е.В. Богатырев – Красноярск, 2018. – 178 с.
6. Шевляков, Д.А. Алгоритмы повышения достоверности передачи данных в многолучевых каналах на основе многопороговых декодеров: дис. ... к-та тех. наук: 05.12.04/ Д.А. Шевляков – Рязань, 2015. – 106 с.
7. Машанов, А.П. Исследование влияния обработки сигналов на помехоустойчивость сотовой системы связи // Студенческая наука XXI века : материалы VII Междунар. Студенч. науч. – практ. Конф. (Чебоксары, 15 нояб. 2015 г.) / редкол.: О.Н. Широков [и др.] – Чебоксары: ЦНС «Интерактив плюс», 2015. – С. 239–243.
8. Янцен, А.С., Носов, В.И. Оценка помехоустойчивости и пропускной способности технологии МІМО с учетом корреляции сигналов в антеннах // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 2. – с. 63–77.

This article presents analytical calculations of the probability of bit error in the channel with Rayleigh fading for military digital tropospheric communication systems with various variants of space-time coding. According to the results of calculations, conclusions were drawn about the effectiveness of the use of space-time coding in modern military digital tropospheric communication systems to ensure their noise immunity.

Получено 26.09.2019.