

УДК 621.391

# ГРАНИЦЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОМЕХ

Г. Н. Мальцев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

А. В. Харченко<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент, начальник кафедры

А. С. Гарагуля<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

**Цель:** обоснование возможностей повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации за счет декорреляции и компенсации нешумовых помех при цифровой обработке сигналов. **Методы:** анализ процесса приема и обработки сигналов при выделении информационных символов в условиях помех. **Результаты:** выполнено формализованное описание приема сигналов с декорреляцией и компенсацией нешумовых помех. Получены выражения, описывающие эквивалентные отношения сигнал/шум и сигнал/помеха для случая декорреляции смеси белого гауссова шума и нешумовой помехи с полным или частичным перераспределением энергии помехи в энергию белого гауссова шума при сохранении суммарной энергии действующих мешающих воздействий и для случая компенсации нешумовой помехи в процессе дискретных ортогональных преобразований с коэффициентом ослабления, превышающим коэффициент ослабления сигнальной составляющей. Приведены результаты расчетов вероятностей ошибочного приема информационного символа в зависимости от исходного отношения сигнал/помеха при различных отношениях сигнал/шум, коэффициентах корреляции помехи и сигнала и коэффициентах потерь, определяющие границы повышения помехоустойчивости приема информации при декорреляции и компенсации нешумовой помехи. **Практическая значимость:** обоснована эффективность применения цифровой обработки сигналов с декорреляцией и компенсацией нешумовых помех для повышения помехоустойчивости радиотехнических систем передачи информации, определены границы повышения помехоустойчивости.

**Ключевые слова** — передача информации, цифровая обработка сигналов, помехоустойчивость, нешумовые помехи, декорреляция и компенсация помех.

## Введение

В настоящее время применение методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) является одной из ведущих тенденций развития информационных и измерительных радиотехнических систем (РТС) и приобретает большое практическое значение [1–3]. Цифровые методы обработки сигналов обладают существенными достоинствами по сравнению с аналоговыми методами, при этом использование ЦОС связано как с внедрением современной элементной базы радиоэлектроники, так и с расширением функциональных возможностей РТС. Наряду с миниатюризацией функциональных узлов РТС и высокой точностью обработки сигналов, ЦОС открывает возможности реализации ряда операций и алгоритмов, принципиально нереализуемых с помощью аналоговых элементов, в том числе оптимальных, квазиоптимальных и адаптивных алгоритмов приема сложных сигналов и компенсации помех [4, 5].

Для РТС передачи информации различного назначения характерно функционирование в широком диапазоне условий радиосвязи при действии как шумовых, так и нешумовых помех различной природы [4, 6, 7]. При этом воздействие нешумовых помех приводит к тому, что оптимальные методы обработки принимаемых

сигналов, синтезированные для случая приема сигналов в условиях шумовых помех, перестают быть оптимальными. Используемые в этих условиях оптимальные и квазиоптимальные алгоритмы обработки сигналов существенно усложняются и требуют наличия априорной информации о структуре действующих помех, в частности, об их корреляционных свойствах [8, 9].

Возможности ЦОС позволяют проводить различные операции обработки сигналов не простым переносом схемных решений, принятых при аналоговой обработке, на цифровую элементную базу, а с переходом в различные дискретные ортогональные пространства преобразований [10, 11]. За счет этого можно выполнить декорреляцию нешумовых (не являющихся  $\delta$ -коррелированными) помех, действующих на входе приемного устройства, и при выборе соответствующего базиса преобразований осуществить их компенсацию с незначительной потерей сигнальных составляющих.

В настоящей работе анализируются возможности декорреляции и компенсации нешумовых помех при ЦОС и условия, при которых для фиксированного энергетического потенциала РТС передачи информации ЦОС с использованием дискретных ортогональных преобразований обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости по сравнению

с обычной обработкой принимаемых сигналов, реализуемой аналоговыми или цифровыми методами.

### Формализованное описание процесса приема сигналов с декорреляцией и компенсацией нешумовых помех

Проведем анализ возможностей декорреляции и компенсации нешумовых помех при ЦОС и достигаемого при этом выигрыша в помехоустойчивости РТС передачи информации при воздействии на приемное устройство процесса, представляющего собой аддитивную смесь сигнала  $U(t)$ , белого гауссова шума  $n(t)$  и нешумовой помехи  $y(t)$ :

$$x(t) = U(t) + n(t) + y(t). \quad (1)$$

Предполагается, что для выделения передаваемых информационных символов в приемном устройстве осуществляется корреляционная обработка входного процесса  $x(t)$ , определяемого выражением (1), являющаяся оптимальной при приеме сигналов в условиях белого гауссова шума [12].

Сигнальная составляющая  $U(t)$  принимает значения  $\{U_0(t), U_1(t)\}$ , соответствующие символам «0» и «1» двоичного симметричного кода. Энергия сигнала, приходящегося на информационный символ длительностью  $\Delta T$ , составляет

$$E_c = \int_0^{\Delta T} U_0^2(t) dt = \int_0^{\Delta T} U_1^2(t) dt, \quad \text{коэффициент}$$

корреляции сигналов  $U_0(t)$  и  $U_1(t)$  составляет

$$\rho = \frac{1}{E_c} \int_0^{\Delta T} U_1(t) U_1(t) dt. \quad \text{Шумовая } \delta\text{-коррелированная}$$

составляющая  $n(t)$  характеризуется спектральной плотностью мощности шума  $N_0$ . Нешумовая помеха  $y(t)$  на интервале длительности информаци-

$$\text{онного символа } \Delta T \text{ имеет энергию } E_{\Pi} = \int_0^{\Delta T} y^2(t) dt$$

и коэффициенты корреляции с сигнальными

$$\text{составляющими } r_0 = \frac{1}{\sqrt{E_c E_{\Pi}}} \int_0^{\Delta T} y(t) U_0(t) dt \text{ и}$$

$$r_1 = \frac{1}{\sqrt{E_c E_{\Pi}}} \int_0^{\Delta T} y(t) U_1(t) dt. \quad \text{Отношения сигнал/}$$

шум (по шумовой составляющей) и сигнал/помеха (по составляющей нешумовой помехи) составляют  $q_0 = E_c/N_0$  и  $q_1 = E_c/E_{\Pi}$  соответственно.

Корреляционный приемник вычисляет корреляционные интегралы вида  $Z_i = \int_0^{\Delta T} x(t) U_i(t) dt$ ,

где  $i = 0, 1$ . Решение о переданном информационном символе при симметричном коде принимается по наибольшему значению соответствующего

корреляционного интеграла  $Z_i$ . Будем полагать, что ЦОС обеспечивает такую точность вычисления корреляционных интегралов, при которой ошибками дискретизации при вычислениях можно пренебречь. При этом допускается, что за счет цифровой обработки входного процесса  $x(t)$  возможны [5, 6, 11]:

1) декорреляция нешумовой помехи  $y(t)$  с полным или частичным перераспределением ее энергии в энергию белого гауссова шума при сохранении суммарной энергии действующих помех  $y(t)$  и  $n(t)$ ;

2) компенсация нешумовой помехи  $y(t)$  в процессе дискретных ортогональных преобразований с коэффициентом ослабления, превышающим коэффициент ослабления сигнальной составляющей  $U(t)$ .

Первое из принятых допущений означает, что при исходных отношениях сигнал/шум ( $q_0$ ) и сигнал/помеха ( $q_1$ ) вычисляемый корреляционный интеграл соответствует входному процессу вида (1) с эквивалентными отношениями сигнал/шум  $q_{0э} = \frac{q_0 q_1}{\gamma q_0 + q_1}$  и сигнал/помеха  $q_{1э} = \frac{q_1}{1 - \gamma}$ ,

где  $\gamma$  — коэффициент декорреляции помехи, принимающий значения  $0 \leq \gamma \leq 1$ . Значение  $\gamma = 0$  соответствует отсутствию декорреляции помехи, при этом  $q_{0э} = q_0$ ,  $q_{1э} = q_1$ . Значение  $\gamma = 1$  соответствует полной декорреляции помехи, при этом  $q_{0э} = \frac{q_0 q_1}{q_0 + q_1}$ ,  $q_{1э} \rightarrow \infty$ .

Второе из принятых допущений означает, что при исходных отношениях  $q_0$  и  $q_1$  вычисляемый корреляционный интеграл соответствует входному процессу вида (1) с эквивалентными отношениями  $q_{0э} = \frac{b_1 q_0 q_1}{b_0 (\gamma q_0 + b_1 q_1)}$  и  $q_{1э} = \frac{q_1}{1 - \gamma}$ , где  $b_0$  —

коэффициент потерь для сигнальной составляющей;  $b_1$  — коэффициент потерь для декоррелированной части составляющей нешумовой помехи (оставшаяся часть составляющей нешумовой помехи не компенсируется), при этом  $b_0 \geq 1$ ,  $b_1 \geq 1$  и  $b_0 \leq b_1$ . В результате при полной декорреляции помехи ( $\gamma = 1$ ) за счет ее фильтрации величина  $q_{0э}$  дополнительно увеличивается в  $b_1/b_0$  раз при сохранении условия  $q_{1э} \rightarrow \infty$ .

Помехоустойчивость РТС передачи информации принято характеризовать вероятностью ошибочного приема информационного символа  $p_0$ , являющейся исходной при определении вероятности ошибочного приема передаваемых сообщений с учетом используемых методов кодирования [13, 14]. Проанализируем влияние коэффициента декорреляции  $\gamma$  и соотношения между коэффициентами потерь  $b_0$  и  $b_1$  на вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0$  в корреляционном приемнике для противоположных входных сигналов  $U_0(t)$  и  $U_1(t)$ , обладающих наиболь-

шей потенциальной помехоустойчивостью [12]. В этом случае  $\rho = -1$ ,  $r_0 = r$ ,  $r_1 = -r$  и при принятых допущениях относительно входного процесса (1) вероятность ошибочного приема информационного символа в корреляционном приемнике определяется выражением [14]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \Phi_0 \left[ \sqrt{2q_0} (1 + r/\sqrt{q_1}) \right] - \frac{1}{2} \Phi_0 \left[ \sqrt{2q_0} (1 - r/\sqrt{q_1}) \right] \right\}. \quad (2)$$

Входящая в выражение (2) функция  $\Phi_0(\cdot)$  есть табулированная функция Крампа  $\Phi_0(z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ . Аналогичные выражения могут быть получены для других типов входных сигналов, характеризующихся коэффициентами корреляции  $\rho$ ,  $r_0$  и  $r_1$ . При  $r = 0$  или  $q_1 \rightarrow \infty$  выражение (2) сводится к известному выражению для вероятности ошибочного приема информационного символа в корреляционном приемнике при приеме противоположных сигналов в условиях белого гауссова шума [12]

$$p_0 = \frac{1}{2} \left[ 1 - \Phi_0(\sqrt{2q_0}) \right]. \quad (3)$$

Если в приемном устройстве осуществляется ЦОС с декорреляцией и компенсацией нешумовых помех, то вместо исходных отношений сигнал/шум ( $q_0$ ) и сигнал/помеха ( $q_1$ ) в выражениях (2) и (3) используются соответствующие им эквивалентные  $q_{0э}$  и  $q_{1э}$ .

Выигрыш в помехоустойчивости при декорреляции и компенсации нешумовых помех имеется в том случае, когда вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0^I$ , определяемая для условий приема, характеризуемых заданными  $q_0$  и  $q_1$ , без учета декорреляции и компенсации нешумовой помехи, превышает вероятность ошибочного приема информационного символа  $p_0^{II}$ , определяемую для эквивалентных  $q_{0э}$  и  $q_{1э}$ , соответствующих исходным отношениям  $q_0$  и  $q_1$  и параметрам  $\gamma$ ,  $b_0$  и  $b_1$ , характеризующим ЦОС с декорреляцией и компенсацией нешумовой помехи.

### Исследование помехоустойчивости РТС передачи информации при приеме сигналов с декорреляцией и компенсацией нешумовых помех

Для принятых допущений о возможности декорреляции и компенсации нешумовых помех при ЦОС на основе ортогональных преобразований в соответствии с выражениями (2) и (3) были проведены расчеты вероятностей ошибочного приема информационного символа при различ-

ных значениях отношений  $q_1$  и  $q_0$  и параметров обработки  $\gamma$ ,  $b_0$  и  $b_1$ .

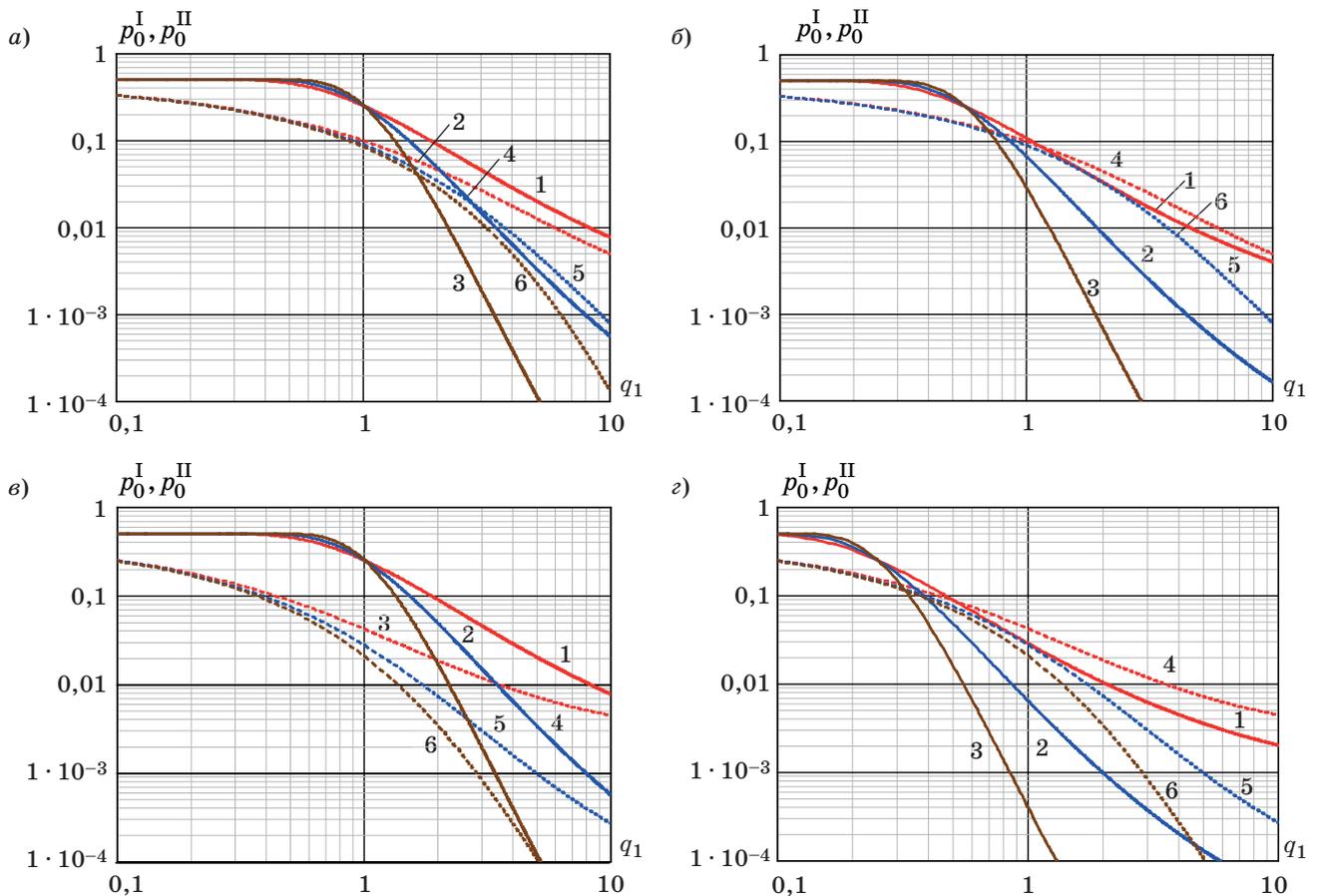
Результаты расчетов вероятностей ошибочного приема информационного символа  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$  в зависимости от исходного отношения сигнал/помеха  $q_1$  при различных отношениях сигнал/шум  $q_0$ , коэффициентах корреляции помехи и сигнала  $r$  и коэффициентах потерь  $b_0$  и  $b_1$  (для вероятности  $p_0^{II}$ ) представлены на рис. 1, а–г. Полагалось, что  $\gamma = 1$ . Это соответствует полной декорреляции помехи  $y(t)$ , поэтому сравнение полученных расчетных значений  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$  при фиксированных исходных отношениях  $q_0$  и  $q_1$  характеризует предельные возможности — границы — повышения помехоустойчивости приема информации за счет декорреляции и компенсации нешумовой помехи при ЦОС.

Как видно из приведенных зависимостей, выигрыш в помехоустойчивости может иметь место в широком диапазоне значений отношений  $q_0$  и  $q_1$  даже без учета компенсации нешумовых помех за счет их декорреляции (при  $b_0 = b_1 = 1$ ). Этот выигрыш уменьшается с уменьшением коэффициента корреляции помехи и сигнала  $r$ , коэффициента декорреляции  $\gamma$  и коэффициента корреляции сигналов  $\rho$ . С увеличением отношения  $b_1/b_0$  при компенсации помех выигрыш в помехоустойчивости увеличивается и область, в которой он имеет место, расширяется.

От  $q_0$  и  $q_1$  соотношение между вероятностями ошибки  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$  зависит достаточно сложным образом. В рассмотренном диапазоне значений  $q_0$  и  $q_1$  условие  $p_0^I > p_0^{II}$  всегда выполняется в некоторой области малых и больших значений  $q_1$ . Эти области расширяются с уменьшением  $q_0$ , с увеличением  $r$  и с увеличением отношения  $b_1/b_0$ , в некоторых случаях  $p_0^I > p_0^{II}$  выполняется во всем диапазоне значений  $q_1$ . В рассмотренном случае приема противоположных сигналов выигрыш в помехоустойчивости при декорреляции нешумовой помехи составляет до 2–3 дБ в отсутствие компенсации и до 6–7 дБ — с учетом компенсации.

Использованные значения коэффициентов потерь  $b_0$  и  $b_1$  соответствуют потере при компенсации 20 % энергии сигнала и 67 % энергии помехи. В случае приема ортогональных сигналов при  $\rho = 0$ ,  $r_0 = r$ ,  $r_1 = 0$  качественный характер зависимости вероятностей ошибочного приема информационного символа  $p_0^I$ ,  $p_0^{II}$  от  $q_1$  и  $q_0$ , коэффициента корреляции помехи и сигнала  $r$  и коэффициентов потерь  $b_0$  и  $b_1$  сохраняется. При этом вследствие более низкой потенциальной помехоустойчивости ортогональных сигналов выигрыш в помехоустойчивости при декорреляции и компенсации помехи уменьшается, и сокращаются диапазоны значений  $q_0$  и  $q_1$ , в которых выполняется  $p_0^I > p_0^{II}$ .

Оценку диапазонов значений исходных  $q_0$  и  $q_1$ , в которых возможен выигрыш в помехо-



■ **Рис. 1.** Вероятности ошибочного приема информационного символа  $p_0^I$  (сплошные кривые) и  $p_0^{II}$  (штриховые кривые) при следующих значениях: а —  $b_0 = b_1 = 1$  и  $r = 1$ ; б —  $b_0 = b_1 = 1$  и  $r = 0,5$ ; в —  $b_0 = 1,25$ ,  $b_1 = 3$  и  $r = 1$ ; г —  $b_0 = 1,25$ ,  $b_1 = 3$  и  $r = 0,5$ ; 1 и 4 —  $q_0 = 5$ ; 2 и 5 —  $q_0 = 10$ ; 3 и 6 —  $q_0 = 20$

устойчивости при декорреляции помех, можно выполнить аналитически при экспоненциальной аппроксимации выражений вида (2) и (3) для вероятностей ошибочного приема информационного символа  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$ . При  $\gamma = 1$  аппроксимирующие выражения для  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$  при приеме противоположных сигналов имеют следующий вид:

$$p_0^I = \frac{1}{4} \exp \left[ -q_0 \left( 1 + r/\sqrt{q_1} \right)^2 \right] + \frac{1}{4} \exp \left[ -q_0 \left( 1 - r/\sqrt{q_1} \right)^2 \right]; \quad (4)$$

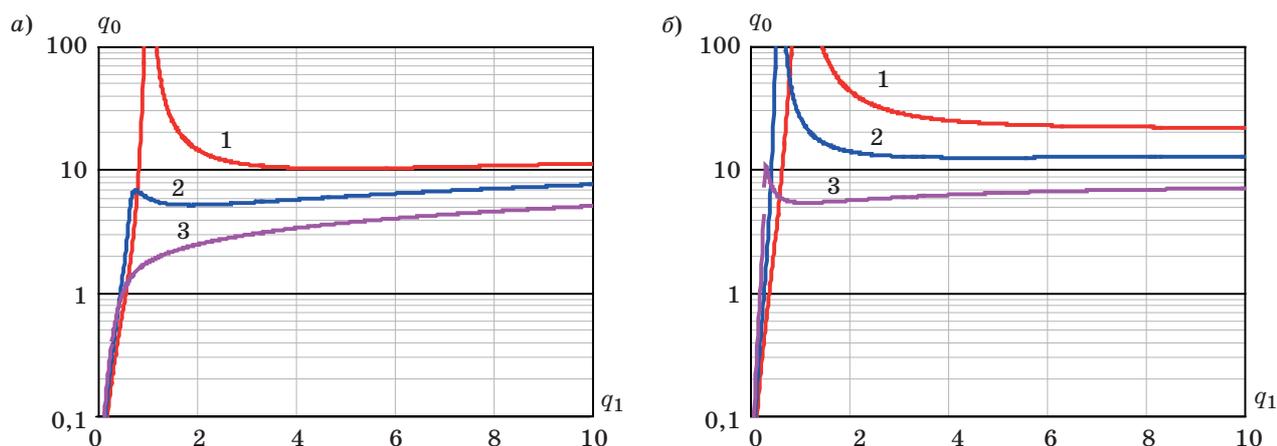
$$p_0^{II} = \frac{1}{2} \exp \left[ -\frac{b_1 q_0 q_1}{b_0 (q_0 + b_1 q_1)} \right]. \quad (5)$$

В предположении, что  $\exp \left[ -q_0 \left( 1 + r/\sqrt{q_1} \right)^2 \right] \ll \ll \exp \left[ -q_0 \left( 1 - r/\sqrt{q_1} \right)^2 \right]$ , можно пренебречь первым слагаемым в правой части выражения (4) для  $p_0^I$ , что гарантированно обеспечивает выполнение неравенства  $p_0^I > p_0^{II}$ . Тогда после преобразований выражений для  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$  получаем неравенство, соответствующее выполнению усло-

вия  $p_0^I > p_0^{II}$  (без учета абсолютных значений  $p_0^I$  и  $p_0^{II}$ ):

$$\frac{b_1 q_0 q_1}{b_0 (q_0 + b_1 q_1)} - q_0 \left( 1 - \frac{r}{\sqrt{q_1}} \right)^2 - \ln 2 > 0. \quad (6)$$

Результаты численного решения неравенства (6) в виде зависимости верхних граничных значений отношений сигнал/шум  $q_0$ , при которых неравенство  $p_0^I > p_0^{II}$  еще выполняется, от отношений сигнал/помеха  $q_1$  при различных значениях параметров  $r$ ,  $b_0$  и  $b_1$  приведены на рис. 2, а и б. Так же как и зависимости, приведенные на рис. 1, зависимости, приведенные на рис. 2, дают представление о границах повышения помехоустойчивости приема информации за счет декорреляции и компенсации нешумовой помехи. Области, соответствующие при сделанных предположениях выигрышу в помехоустойчивости при ЦОС на основе дискретных ортогональных преобразований с декорреляцией и компенсацией нешумовой помех по сравнению с обычной обработкой принимаемых сигналов, лежат ниже графиков зависимости отношения  $q_0$  от отношений  $q_1$ .



■ **Рис. 2.** Зависимость верхних граничных значений  $q_0$ , при которых выполняется  $p_0^I > p_0^II$ , от  $q_1$ : а — при  $b_0 = b_1 = 1$ ; б — при  $b_0 = b_1 = 1$ ; 1 —  $r = 1$ , 2 —  $r = 0,75$ , 3 —  $r = 0,5$

Как видно из приведенных зависимостей  $q_0$  от  $q_1$ , определяющих границы выполнения условия  $p_0^I > p_0^II$ , декорреляция нешумовых помех во всех случаях может быть эффективна при малых отношениях  $q_0$  (в большинстве случаев при  $q_0 < 10$ ) и в широком диапазоне значений отношения  $q_1$  (по крайней мере, при  $q_1 > 1$ ). Верхнее значение отношения  $q_0$ , при котором эффективна декорреляция нешумовых помех, уменьшается при уменьшении степени корреляции помехи и сигнала, характеризуемой коэффициентом корреляции  $r$ , и увеличивается при увеличении отношения  $b_1/b_0$  при дополнительной компенсации помех.

Отличие графиков зависимости  $q_0$  от  $q_1$ , определяющих области, в которых выполняется условие  $p_0^I > p_0^II$ , для случая ортогональных сигналов от приведенных графиков зависимости  $q_0$  от  $q_1$  для противоположных сигналов невелико. Полученные для одних и тех же значений параметров  $r$ ,  $b_0$  и  $b_1$  основные отличия имеют место в области  $0 < q_1 < 1$ , а при  $q_1 > 4$  соответствующие зависимости достаточно близки, поэтому полученные для противоположных сигналов оценки можно использовать для любых сигналов с коэффициентами корреляции  $-1 < \rho < 0$ .

## Заключение

Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных информационных и измерительных РТС. В настоящее время благодаря техническому прогрессу в области разработки и создания высокопроизводительной элементной базы ЦОС в РТС различного назначения могут быть реализованы сложные вычислительные алгоритмы дискретных преобразований принимаемых сигналов в различных базисах. Это позволяет эффективно использовать рассмотренные возможности ЦОС для повышения помехоустойчивости РТС передачи информации, функционирующих в условиях шумовых и нешумовых помех. При этом выигрыш в помехоустойчивости, составляющий в рассмотренных условиях до 6–7 дБ, достигается без увеличения энергетического потенциала. Это особенно важно в тех случаях, когда имеют место ограничения на увеличение эквивалентной изотропно излучаемой мощности и добротности терминальной аппаратуры РТС передачи информации, например, в системах информационного обмена с летательными и космическими аппаратами [15, 16].

## Литература

1. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2003. — 608 с.
2. Умняшкин С. В. Теоретические основы цифровой обработки и представления сигналов. — М.: ИД «Форум», 2008. — 304 с.
3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. — М.: Вильямс, 2007. — 1104 с.
4. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И. и др. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. — М.: Радио и связь, 1985. — 264 с.

5. Тузов Г. И., Урядников Ю. Ф., Прытков В. И. и др. Адресные системы управления и связи. Вопросы оптимизации. — М.: Радио и связь, 1993. — 384 с.
6. Васин В. А., Власов И. Б., Егоров Ю. М. и др. Информационные технологии в радиотехнических системах/ МГТУ им. Н. Э. Баумана. — М., 2004. — 768 с.
7. Борисов В. И., Зинчук В. М. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход. — М.: РадиоСофт, 2008. — 260 с.
8. Мальцев Г. Н., Травкин В. С. Оптимальный прием сложных фазоманипулированных сигналов в спутниковых радиоканалах в условиях внутрисистемных

структурных помех // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5. С. 36–42.

9. Харченко А. В., Гарагуля А. С. Анализ воздействия коррелированных помех на вероятность ошибки различения сигналов // Информация и космос. 2010. № 1. С. 56–58.
10. Харченко А. В., Назаров А. В. Первичная обработка телеметрических сигналов малых космических аппаратов средствами самоорганизующихся систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48. № 6. С. 15–20.
11. Харченко А. В. Применение ортогональных преобразований при цифровой обработке сигналов в спутниковых радиоканалах // Информационно-управляющие системы. 2006. № 5(24). С. 6–10.

12. Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В., Финк Л. М. Теория передачи сигналов. — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
13. Вернер М. Основы кодирования. — М.: Техносфера, 2008. — 288 с.
14. Деев В. В. Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. — СПб.: Наука, 2007. — 267 с.
15. Тяпичев Г. А. Спутники и цифровая радиосвязь. — М.: ТехБук, 2004. — 288 с.
16. Леонов М. С., Архангельский В. А. Оценка помехоустойчивости космических и авиационных систем передачи информации // Электромагнитные волны и электронные системы. 2005. № 11–12. С. 74–82.

UDC 621.391

### Limits of Radio Data Transmission Noise Immunity Improvement in Digital Signal Processing with Noise Compensation

Maltsev G. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy\_maltsev@mail.ru

Harchenko A. V.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, shoora1@ya.ru

Garagulya A. S.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Lecturer, garagulya.a@mail.ru

<sup>a</sup>A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197082, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Purpose:** Studying the ways to increase the noise immunity of radio information transmission systems by decorrelation and compensation of non-noise interference in digital signal processing. **Method:** Analyzing the process of receiving and processing signals when picking information symbols under interference. **Results:** A formalized description of signal reception was performed, with decorrelation and compensation of non-noise interference. Expressions were obtained which describe the equivalent signal/noise and signal/interference ratios for the case of decorrelation of mixture of white Gaussian noise and non-noise interference with full or partial redistribution of the interference energy to the energy of white Gaussian noise, while keeping the total energy of active stirring impacts; and for the case of the compensation of non-noise interference during discrete orthogonal transformations with an attenuation coefficient exceeding the attenuation of the signal component. The probabilities of erroneous reception of an information symbol were calculated, depending on the original signal/noise ratio, with different signal/interference ratios, with different correlation coefficients for the interference and signal, and with different loss factors, determining the boundaries of increasing the noise immunity for receiving information with decorrelation and compensation of non-noise interference. **Practical relevance:** The efficiency of using digital signal processing with decorrelation and compensation of non-noise interference for better immunity of radio data transmission systems was grounded, and the boundaries were determined for the noise immunity.

**Keywords** — Communication, Digital Signal Processing, Immunity, Non-Noise Interference, Decorrelation and Compensation of Interference.

#### References

1. Sergienko A. B. *Tsifrovaia obrabotka signalov* [Digital Signal Processing]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2003. 608 p. (In Russian).
2. Umnjashkin S. V. *Teoreticheskie osnovy tsifrovoi obrabotki i predstavleniia signalov* [Theoretical Foundations of Digital Processing and Submission to the Signals]. Moscow, Izdatel'skii dom Forum Publ., 2008. 304 p. (In Russian).
3. Skljjar B. *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital Communication. Theoretical Basis and Practical Application]. Moscow, Vil'jams Publ., 2003. 1104 p. (In Russian).
4. Tuzov G. I., Sivov V. A., Prytkov V. I., et al. *Pomekhozashchishchennost' radiosistem so slozhnymi signalami* [Immunity Radio Systems With Complex Signals]. Moscow, MG TU i svjaz' Publ., 1985. 264 p. (In Russian).
5. Tuzov G. I., Uriadnikov Iu. F., Prytkov V. I., et al. *Adresnye sistemy upravleniia i sviazi. Voprosy optimizatsii* [Addressable Control and Communication Systems. Questions Optimization]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1993. 384 p. (In Russian).
6. Vasin V. A., Vlasov I. B., Egorov Iu. M., et al. *Informatsionnye tekhnologii v radiotekhnicheskikh sistemakh* [Information Technology in Radio Systems]. Moscow, MG TU im. N. E. Bauman Publ., 2004. 768 p. (In Russian).
7. Borisov V. I., Zinchuk V. M. *Pomekhozashchishchennost' sistem radiosviasi. Veroiatnostno-vremennoi podkhod* [Noise Immunity Radio Systems. Probabilistic-Time Approach]. Moscow, RadioSoft Publ., 2008. 260 p. (In Russian).
8. Maltsev G. N., Travkin V. S. Optimal Reception PSK Complex Signals in Satellite Radio Channels in Terms of Intra-Structural Interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 5, pp. 36–42 (In Russian).
9. Harchenko A. V., Garagulya A. S. Analysis of the Impact of Correlated Noise on the Error Probability of Distinguishing Signals. *Informatsiia i kosmos*, 2010, no. 1, pp. 56–58 (In Russian).
10. Harchenko A. V., Nazarov A. V. Initial Processing of Telemetry Signals Small Spacecraft Means of Self-Organizing Systems. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2005, vol. 48, no. 6, pp. 15–20 (In Russian).
11. Harchenko A. V. Application of Orthogonal Transformations in a Digital Signal Processing in the Satellite Radio Channels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 5(24), pp. 6–10 (In Russian).
12. Ziuko A. G., Klovskaia D. D., Nazarov M. V., Fink L. M. *Teoriia peredachi signalov* [The Theory of Signaling]. Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1986. 304 p. (In Russian).
13. Verner M. *Osnovy kodirovaniia* [The Coding Basics]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
14. Deev V. V. *Metody modulatsii i kodirovaniia v sovremennykh sistemakh sviazi* [Modulation and Coding Techniques in Modern Communication Systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2007. 267 p. (In Russian).
15. Tiapichev G. A. *Sputniki i tsifrovaia radiosviaz'* [Satellites and Digital Radio]. Moscow, TehBuk Publ., 2004. 288 p. (In Russian).
16. Leonov M. S., Arkhangel'skii V. A. Rating Immunity Cosmic and Aircraft Information Transfer Systems. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2005, no. 11–12, pp. 74–82 (In Russian).