

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ «ФИЗИЧЕСКОЙ» И «ЛОГИЧЕСКОЙ» КОРРЕКЦИИ МЕЖСИМВОЛЬНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

**Полушин Петр Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых».

E-mail: [polushin.p@mail.ru](mailto:polushin.p@mail.ru)

**Архипов Никита Александрович**

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

**Шалина Валерия Валентиновна**

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых».

Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

**Аннотация:** Современные системы радиопередачи цифровых сигналов используют достаточно широкополосные тракты передачи, для которых характерно наличие частотно-селективных замираний, ведущих к межсимвольной интерференции (МСИ) принимаемых символов. Это приводит к заметному снижению помехоустойчивости связи вплоть до полного её срыва. Для борьбы с этим предлагается применять метод коррекции МСИ. Для этого перед каждым информационным символом излучается специально сформированный корректирующий символ. Его параметры регулируются таким образом, чтобы сумма с предыдущими «мешающими» символами была минимальной. Регулировка может осуществляться либо непосредственно амплитудно-фазовых параметров корректирующих символов («физическая» коррекция), либо с использованием особенностей метода QAM-модуляции. При QAM-модуляции для передачи информационных символов уже производится амплитудная регулировка несущей с использованием QAM-модулятора передатчика. Подавая соответствующие логические коды, можно достаточно точно сформировать требующиеся корректирующие символы («логическая» коррекция). Исследована сравнительная эффективность обоих методов. Приведён пример реализации описанного метода «логической» коррекции.

**Ключевые слова:** цифровые сигналы, широкополосные каналы, межсимвольные искажения, QAM-модуляция, метод коррекции.

### Постановка задачи

Использование высокоскоростных систем передачи цифровых сигналов требует использования достаточно широкополосных каналов, которые вносят специфические искажения в сигналы. Они являются следствием неравномерности частотной характеристики каналов, возникающей в основном из-за многолучевого характера распространения радиоволн. Этот эффект вызывает рассеяние энергии символов по времени и взаимное наложение соседних символов. Их интерференция приводит к межсимвольным искажениям (МСИ) и снижает помехоустойчивость передачи. Используются различные методы снижения негативного влияния МСИ,

которые имеют ряд недостатков [1–7].

Для этих же целей можно использовать метод корректирующих символов, описанный в [8, 10–14] для методов модуляции BPSK и QPSK. Распространение его принципа на случай применения модуляции QAM (квадратурной амплитудной манипуляции) позволяет изменить описанный метод коррекции, используя особенности этого вида модуляции [9, 15]). Изменённая модификация обладает несколько меньшей корректирующей способностью, однако существенно проще при технической реализации. Изучению сравнительной эффективности исходного метода коррекции и его модификации посвящена данная статья.

### Теоретическое обоснование

В исходном методе производится «физическая» коррекция МСИ. Она реализуется одинаково для методов модуляции QPSK и QAM. Метод применим в двухсторонних каналах передачи, когда параметры канала определяются во время специальных периодически следующих тестовых сеансов, и полученная информация транслируется по служебному каналу обратно на передающую сторону.

Аналогично «классическому» кодированию, формируется последовательность передаваемых символов с избыточным их количеством по сравнению с исходной информационной последовательностью. Новые символы — корректирующие. Каждый из них передается перед соответствующим информационным символом. Уровень корректирующего символа регулируется таким образом, чтобы, складываясь со всеми предыдущими символами, нейтрализовать их. Сумма всех предыдущих символов, образуя определённый «хвост», накладывается на информационный символ, вызывая за счёт МСИ его искажения.

Поскольку на передающей стороне известны все предыдущие переданные символы и известны весовые коэффициенты, с которыми они суммируются в «хвосте», то вычисляется уровень «хвоста». Исходя из этого, вычисляются необходимые амплитудно-фазовые значения корректирующего символа, который в канале тоже суммируется с предыдущими символами, чтобы после такого суммирования он их уменьшал, желательно до нуля. Таким образом, он «предохраняет» следующий за ним информационный символ от наложения предыдущих мешающих символов, и убирает МСИ.

Суммарный сигнал после демодулятора равен

$$\dot{y}_i = \sum_{k=0}^m (a_k + jb_k) z_{i-k+1}, \quad (1)$$

где  $m$  — количество интерферирующих мешающих символов значимого уровня;  $z_i$  — символ, переданный за  $(j - 1)$  тактов до основного

символа;  $(a_j + jb_j)$  — комплексный коэффициент МСИ, с которым участвует этот символ в сумме после демодулятора.

Пусть коэффициенты  $a_0$  и  $b_0$  относятся к основному символу, а остальные коэффициенты нормированы относительно их. Все коэффициенты  $a_j$  и  $b_j$  определяются во время тестовых сеансов. Сеансы организованы следующим образом. Во время тестового сеанса информационные символы не передаются, а передаются символы, равные по уровню информационному символу и равной ему длительности и постоянным известным на приёмной стороне фазовым сдвигом. После его передачи имеет место пауза передачи, длительностью не меньше, чем  $m$  длительностей символа.

Во время каждого тестового сеанса противоположная станция принимает переданный тестовый сигнал и измеряет его параметры. Измерения производятся на каждом последующем интервале времени длительностью символа  $T_C$ . Эти значения соответствуют искомым коэффициентам передачи  $a_j$  и  $b_j$ , которые транслируются обратно на передающую станцию.

Негативное воздействие МСИ убирается корректирующим символом, излучаемым перед каждым информационным символом. При передаче по каналу корректирующий символ приобретает коэффициент  $a_1 + jb_1$ . Параметры корректирующего символа  $a_C + jb_C = K_C$  в передатчике регулируются таким образом, чтобы с учетом этого коэффициента после суммирования с мешающими предыдущими символами остаток от суммирования стал минимальным.

Величина мешающего «хвоста» равна

$$\dot{y}_{ri} = \sum_{j=2}^m (a_j + jb_j) z_{i-j+1} = A_r + jB_r. \quad (2)$$

Будем считать, что до регулировки его параметров корректирующий символ был равен основному символу, который он должен «защищать». Тогда для того, чтобы убрать «хвост» должно выполняться условие  $(a_1 + jb_1)(a_C + jb_C) = -\dot{y}_{ri} = -(A_r + jB_r)$ , а па-

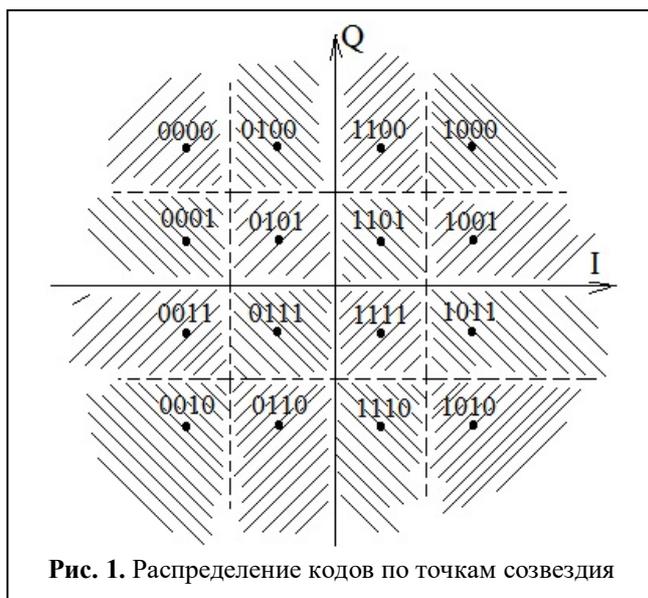


Рис. 1. Распределение кодов по точкам созвездия

параметры корректирующего символа должны регулироваться в соответствии с выражением

$$\dot{K}_C = -\frac{A_r + jB_r}{a_1 + jb_1}. \quad (3)$$

Такая регулировка проводится отдельно для каждого корректирующего символа. Это приводит к определённому усложнению схемы. Однако при использовании модуляции QAM подобного усложнения *можно избежать* и перейти от «физического» к более простому «логическому» формированию корректирующего символа. Дело в том, что набор возможных амплитудно-фазовых параметров формируемых при модуляции сигналов уже предоставляет выбор амплитудно-фазовых соотношений, примерно совпадающих с требуемыми для корректирующего символа. И его формирование уже *не требует* дополнительной амплитудно-фазовой регулировки, а для их получения используется тот же модулятор, что и для передачи информационных символов. Для этого на модулятор подается нужное сочетание определённых логических символов. Причём, чем большее количество точек в «созвездии», тем точнее получаемые амплитудно-фазовые соотношения символов совпадают с требуемыми по формуле (3).

Рассмотрим процесс формирования корректирующего символа подробнее (модуляция

QAM-16). Пусть точкам «созвездия» присвоены четырехбитовые сочетания логических символов, как на рис. 1. Рисунок разделен на зоны, прилегающие к точкам «созвездия». Тогда в передатчике для очередного формируемого корректирующего символа на основе информации о параметрах канала и знания значений предыдущих переданных символов, вычисляется по формуле (2) величина «хвоста», т.е. в какую из 16 зон он попадает или к какой точке «созвездия» конец этого вектора ближе всего.

После этого с помощью демодулятора определяется, какому четырехзначному числу будет с учетом домножения в канале на коэффициенты  $a_1 + jb_1$  соответствовать вектор корректирующего символа, в максимальной степени противоположный вектору «хвоста», чтобы он вычелся из него (то есть, в какую зону на рис. 1 попадает конец этого вектора). При этом возникает интересное соотношение. Каждому четырехзначному двоичному коду, относящемуся к вектору «хвоста», соответствует симметрично расположенный относительно начала координат другой четырехзначный двоичный код, относящийся к формированию корректирующего символа. Это взаимное соответствие определяется используемым распределением кодов по точкам созвездия, и для распределения, показанного на рис. 1, приведено в таблице.

Таким образом, формирование корректирующего символа сводится просто к выбору нужного четырехзначного кода в соответствии с таблицей и подаче его на модулятор.

### Реализация метода

Описанный метод для модуляции QAM-16 может быть реализован с помощью структурной схемы, приведённой на рис. 2. Она работает следующим образом. На накопитель (Н1) на входе схемы подаётся последовательность передаваемых логических символов  $x_i$ . В накопителе они объединяются в группы из последовательно расположенных четырёх символов и

хранятся в нём, пока формируется корректирующий символ.

Группа из других четырёх символов, из которых будет сформирован корректирующий символ, образуется в другом накопителе (Н2). Ко входу формирователя (Ф) поочерёдно подключаются выходы Н1 и Н2 с помощью коммутатора (Комм1). При этом, поскольку корректирующий символ передаётся перед соответствующим ему корректируемым символом, то группа с выхода Н2 подключается к формирователю перед группой с выхода Н1. В результате на вход Ф символы подключаются с частотой, в два раза большей, чем поступают информационные символы  $x_i$  на вход всей схемы.

Формирователь на основе поступающей группы осуществляет квадратурную амплитудную модуляцию и формирует соответствующие ей квадратурные составляющие I и Q в соответствие с выбранным распределением четырехсимвольных логических групп по точ-

Таблица. Соответствие кодов

Код «хвоста»	Код корректирующего символа
0000	1010
0100	1110
0001	1011
0101	1111
0011	1001
0111	1101
0010	1000
0110	1100
1010	0000
1110	0100
1011	0001
1111	0101
1001	0011
1101	0111
1000	0010
1100	0110

кам «созвездия», например, показанным на рис. 1.

Полученные значения компонент I и Q подаются на последовательные входы сдвиговых регистров (СР1 и СР2), содержащие каждый по

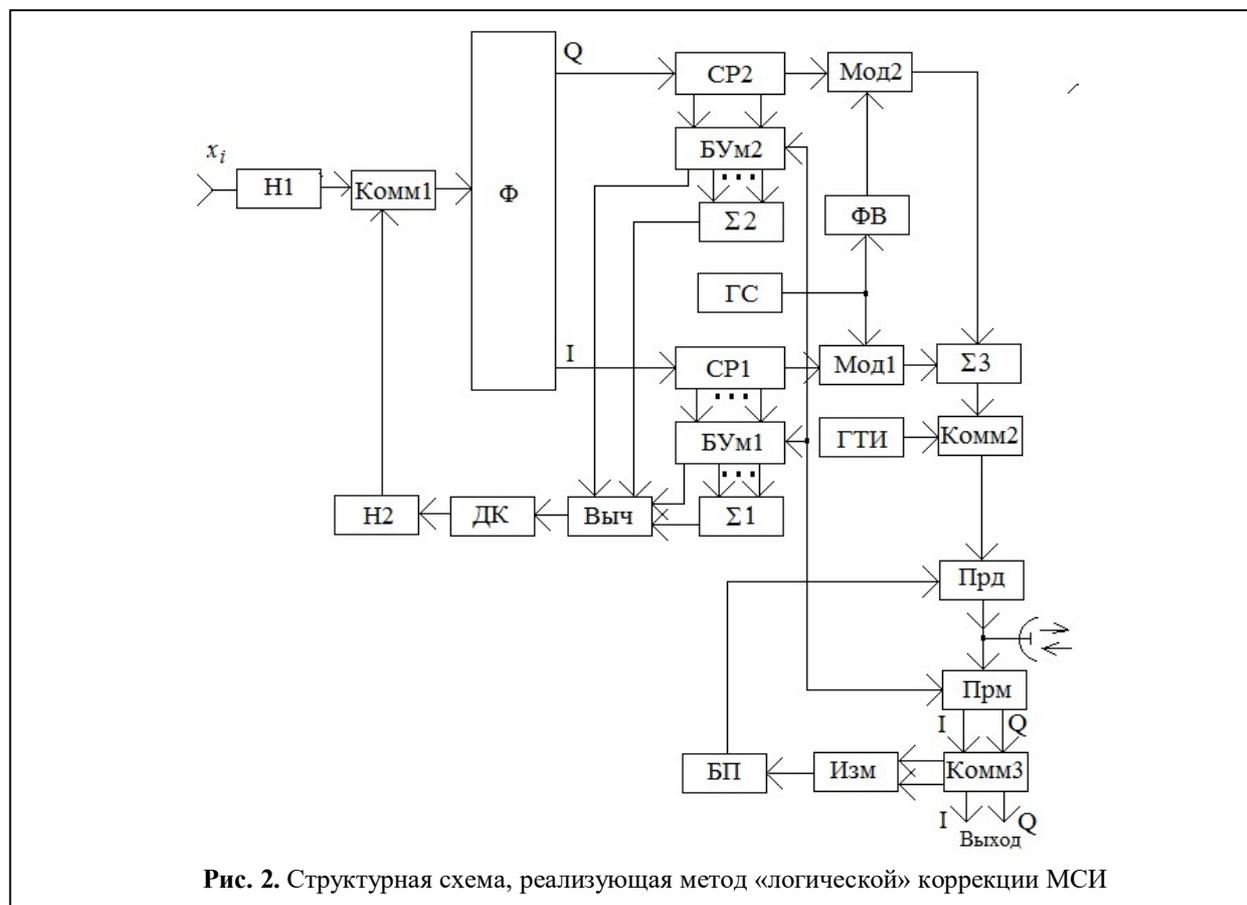


Рис. 2. Структурная схема, реализующая метод «логической» коррекции МСИ

$m$  ячеек. С появлением новых значений все ранее запомненные значения сдвигаются к выходам регистров. Из последних ячеек регистров значения поступают на амплитудные модуляторы (Мод1 и Мод2). В них производится модуляция высокочастотной несущей, подаваемой с генератора (ГС) непосредственно (на Мод1) или после фазовращателя (ФВ) на  $90^\circ$  (на Мод2). Далее оба эти сигнала складываются в сумматоре ( $\Sigma 3$ ) и образуют сигнал с QAM-модуляцией.

К основному входу передатчика (Прд) с помощью коммутатора (Комм2) подключается либо сумматор  $\Sigma 3$  во время передачи информации, либо генератор тестовых импульсов (ГТИ) во время тестовых сеансов. Приёмник (Прм) выделяет из принятых сигналов ортогональные составляющие I и Q, которые с помощью коммутатора (Комм3) подаются на выход схемы во время передачи информации, либо на измеритель (Изм) во время тестовых сеансов.

Измеритель определяет уровень этих ортогональных составляющих во время передачи тестового импульса и через интервалы времени  $T_C$  (длительность одного символа) на протяжении всего тестового сеанса. Фактически, таким образом, определяются требуемые значения  $a_0 \div a_m$  и  $b_0 \div b_m$ , которые до следующего тестового сеанса хранятся в блоке памяти (БП). Они через служебный канал передатчика транслируются на противоположную станцию.

Со служебного канала приёмника приходят результаты измерения параметров канала, получаемые аналогичным образом на противоположной станции. В блоках умножения (Бум1 и Бум2), вычислителя (Выч) и сумматорах ( $\Sigma 1$  и  $\Sigma 2$ ) вычисляется величина  $K_C$  в соответствии с формулой (3). После этого декодер (ДК) определяет, в какую часть комплексной плоскости (рис. 1) попадает этот вектор и к какой точке «созвездия» (четырёхзначному двоичному числу) он ближе всего. Число подаётся на Н2 и хранится там, пока не будет востребовано коммутатором Комм1.

### Экспериментальные исследования

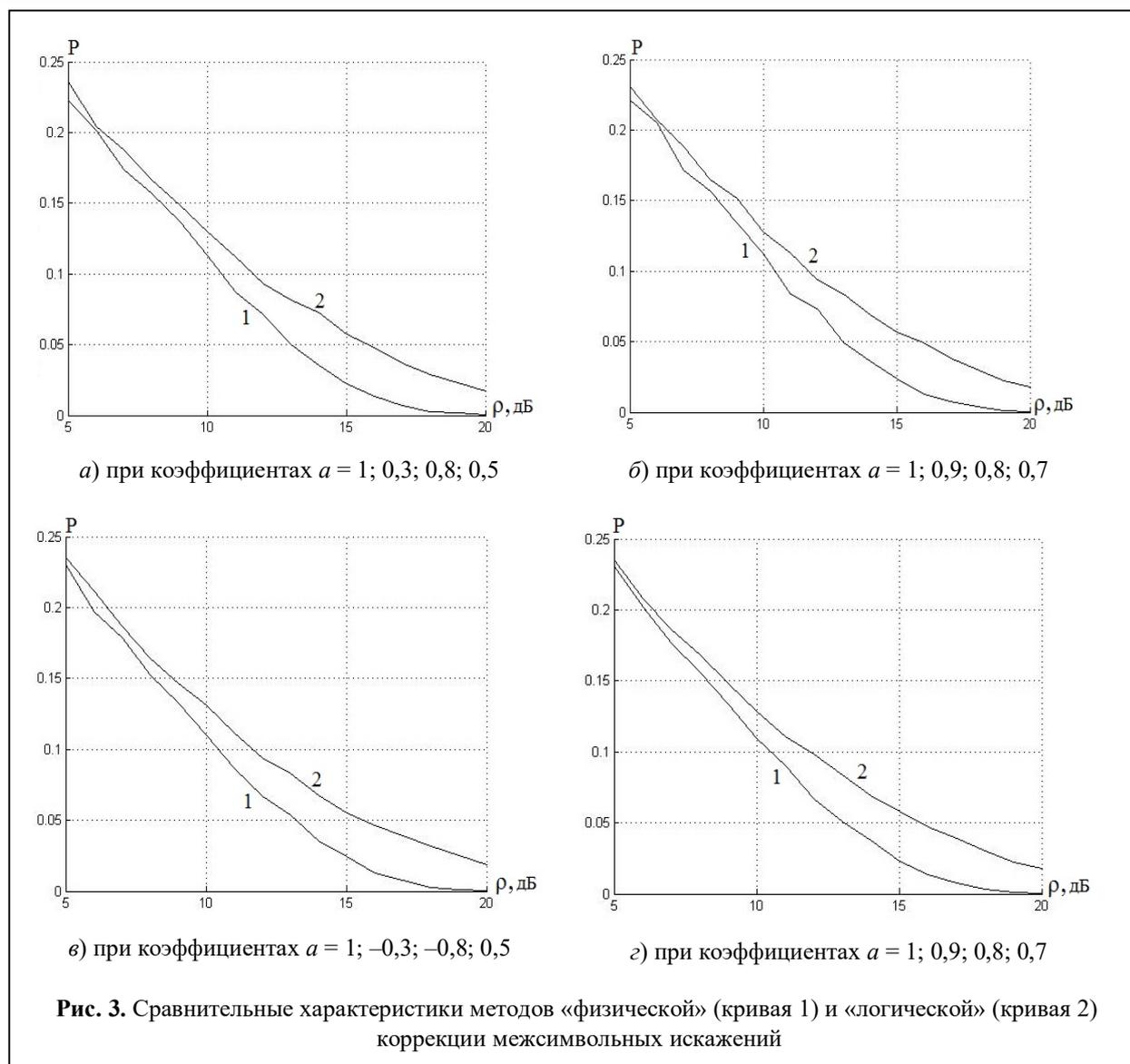
Сравнительные характеристики методов «физической» и «логической» коррекции межсимвольных искажений были исследованы с помощью компьютерного моделирования. Некоторые характерные результаты исследований приведены на рис. 3–6.

Графики соответствуют четырём символам заметного уровня ( $m = 4$ ). По вертикальной оси отложена вероятность  $P$  появления битовой ошибки. По горизонтальной оси отложено отношение уровня основного символа и среднеквадратического значения шума приемника. Цифрами обозначены графики: 1 — относящиеся к «физическому» методу коррекции; 2 — относящиеся к «логическому» методу коррекции.

Для сравнения параметры символов выбирались разного уровня, а также без изменения уровня им присваивались разные знаки и разный фазовый сдвиг. Таким образом, относительные коэффициенты для рис. 3, а) составляли:  $a = 1; 0,3; 0,8; 0,5$ . Для рис. 3, б) коэффициенты составляли:  $a = 1; 0,9; 0,8; 0,7$ . Для рис. 3, в) коэффициенты составляли:  $a = 1; -0,3; -0,8; 0,5$ . Для рис. 3, г) коэффициенты составляли:  $a = 1; j0,9; 0,8; -j0,7$ .

### Заключение

Для «логической» коррекции МСИ не требуется отдельно регулировать уровни корректирующих символов, поскольку они могут создаваться теми же блоками, которые используются для передачи информационных символов с помощью выбора необходимых логических сочетаний при модуляции. «Логическая» коррекция проигрывает по помехоустойчивости «физической» коррекции. Однако, для наихудших параметров модуляции (QAM-16, в «созвездии» 16 точек) проигрыш составляет 1–4 дБ. С увеличением числа точек в «созвездии» (QAM-64, QAM-256, и т.д.) корректирующий символ регулируется всё более точно, и помехоустойчивость при «логической» коррекции приближается к помехоустойчивости при «физической» коррекции. Знак и фазовый



сдвиг коэффициентов суммируемых символов не оказывают существенного влияния на сравнительную эффективность методов.

#### Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: пер. с англ. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
2. Прокис Дж. Цифровая связь: пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 800 с.
3. Полушин П.А., Самойлов А.Г. Избыточность сигналов в радиосвязи. М.: Радиотехника, 2007. 256 с.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра.: пер. с англ. М.: Радио и связь, 2000. 520 с.

5. Системы мобильной связи. Учебное пособие для вузов. Под ред. В.П. Ипатова. М.: Горячая линия-Телеком. 2003. 272 с.
6. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия-Телеком. 2007. 432 с.
7. Крухмалев И.И., Гордиенко В.Н., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. М.: Горячая линия-Телеком. 2008. 352 с.
8. Полушин П.А., Архипов Н.А., Шалина В.В. Модификация метода кодирования при борьбе с межсимвольными искажениями цифровых сигналов с модуляцией QPSK // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2023. №1. С. 33–40.
9. Полушин П.А., Архипов Н.А., Шалина В.В. Применение корректирующего кодирования для борьбы с межсимвольной интерференцией сигналов с QAM-модуляцией // Проектирование и технологии электронных средств. 2023. №1. С. 23–27.

10. Полушин П.А., Белов А.Д., Лось В.О. Использование корректирующих символов для борьбы с межсимвольной интерференцией цифровых сигналов // 13-я МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации (ПТСПИ-2019)», 3–5 июля 2019, Владимир, том 2. 2019. С. 180–184.

11. Полушин П.А., Белов А.Д. Методы «мягкой» и «жесткой» коррекции для борьбы с межсимвольными искажениями цифровых сигналов // Проектирование и технология электронных средств. 2020. №1. С. 33–37.

12. Пат. РФ № 2692429. Способ борьбы с межсимвольными искажениями цифровых сигналов // Полушин П.А., Никитин О.Р., Белов А.Д. Заявл. 28.05.2018, опубл. 24.06.2019.

13. Раджабов Х.М., Раджабов У.М., Полушин П.А., Никитин О.Р. Декодирование сверточных кодов в условиях перемежения символов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2018. №3. С. 46–53.

14. Пат. РФ №200964. Корректор межсимвольных искажений цифровых сигналов // Полушин П.А., Белов А.Д., Никитин О.Р. Заявл. 17.12.2019, опубл. 20.11.2020.

15. Пат. РФ №204499. Устройство для повышения помехоустойчивости передачи цифровых сигналов в условиях межсимвольной интерференции. // Полушин П.А., Лось Р.О., Раджабов У.М. Заявл. 11.03.2021, опубл. 28.05.2021.

Поступила 4 апреля 2023 г.

English

## EFFICIENCY OF "PHYSICAL" AND "LOGICAL" CORRECTION OF INTERSYMBOL DISTORTIONS IN DIGITAL SIGNALS

**Petr Alekseevich Polushin** — Grand Dr. in Engineering, Professor of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

E-mail: [polushin.p@mail.ru](mailto:polushin.p@mail.ru)

**Nikita Aleksandrovich Arkhipov** — Postgraduate Student, Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

**Valerija Valentinovna Shalina** — Postgraduate Student, Department of Radio Engineering and Radio Systems “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”.

Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

*Abstract:* Higher data traffic via any transmission channels currently results in using signals increasingly broader in spectrum and increasingly broader spectral bandwidth of transmission path. That said multipath propagation of radio waves is observed in many types of channels. Various beams come to the receiver along different paths and have varying levels and varying time delays. It results in signal power dissipation and adjacent symbols' overlapping. Symbols interfere with each other and this causes their distortion and data transmission downgrade. To combat this phenomenon it is proposed to use the redundancy of transmitted symbols' quantity compared to the quantity of initial information symbols. A special correction symbol is transmitted before each information symbol. It is readjusted so that to remove summation of all prior symbols or significantly reduce its level. The method is used in two-way transmission systems. Test sessions are conducted occasionally whereby the parameters of transmission channel and obstructive symbols that are added to the basic symbol are measured. The measured parameters are transmitted back to the sending station. Quite a sophisticated equipment is applied in the transmitter for tuning. This is how “physical” method of correction is implemented. Amplitude and phase of each correction symbol must be controlled. However, QAM (quadrature amplitude modulation) method enables to considerably simplify this procedure using “logical” correction method. Amplitude-phase control of transmitted signals is already performed in this method when transmitting information symbols. Therefore, it is quite enough to input such a binary code to the modulator instead of amplitude-phase control of the correction symbol, so that a symbol is formed at the modulator output and it is as similar as possible to the required type of correction symbol. The method loses to the “physical” correction method in terms of noise immunity, but discrepancies are slight in case of QAM-64, QAM-256 modulation. Implementation scheme for the proposed method is given. Computer-aided research results of the method efficiency are described.

*Keywords:* digital signals, broadband channels, intersymbol distortion, QAM modulation, correction method.

### References

1. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical foundations and practical application. 2nd ed., corr.: trans. from English Moscow: Williams, 2003. 1104 p.
2. *Prokis J.* Digital communication.: transl. from English Moscow: Radio i svaz', 2000. 800 p.
3. *Polushin P.A., Samoilov A.G.* Redundancy of signals in radio communications. Moscow: Raditekhnik, 2007.
4. *Feer K.* Wireless digital communication. Methods of modulation and spectrum expansion.: transl. from English. Moscow: Radio and communications. 2000. 520 p.
5. Mobile communication systems. Textbook for universities. Edited by V.P. Ipatov. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom. 2003. 272 p.
6. *Galkin V.A.* Digital mobile radio communication. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom. 2007. 432 p.
7. *Krukhmalev I.I., Gordienko V.N., Mochenov A.D.* Digital transmission systems. Moscow: Goryachaya liniya–Telekom. 2008. 352 p.
8. *Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V.* Modification of the coding method in the fight against intersymbol distortion of digital signals with QPSK modulation. Radioengineering and telecommunication systems. 2023. No. 1. Pp. 33–40.
9. *Polushin P.A., Arkhipov N.A., Shalina V.V.* Application of corrective coding to combat intersymbol interference of signals with QAM modulation. Design and technology of electronic means. 2023. No. 1. Pp. 23–27.
10. *Polushin P.A., Belov A.D., Los V.O.* The use of corrective symbols to combat intersymbol interference of digital signal. 13th ISTC "Promising technologies in information transmission media (PTSPI-2019)", July 3–5, 2019, Vladimir. Vol. 2. 2019. Pp. 180–184.
11. *Polushin P.A., Belov A.D.* Methods of "soft" and "hard" correction to combat intersymbol distortion of digital signals. Design and technology of electronic means. 2020. No. 1. Pp. 33–37.
12. Pat. RU No. 2692429. A way to combat intersymbol distortions of digital signals. *Polushin P.A., Nikitin O.R., Belov A.D.* Appl. 28.05.2018, publ. 24.06.2019.
13. *Rajabov H.M., Rajabov U.M., Polushin P.A., Nikitin O.R.* Decoding convolutional codes in the conditions of character interleaving. Radioengineering and telecommunication systems, 2018. No. 3. Pp. 46–53.
14. Pat. RU No. 200964. Corrector of intersymbol distortions of digital signals. *Polushin P.A., Belov A.D., Nikitin O.R.* Appl. 17.12.2019, publ. 20.11.2020.
15. Pat. RU No. 204499. A device for increasing the noise immunity of digital signal transmission in conditions of intersymbol interference. *Polushin P.A., Los' R.O., Rajabov U.M.* Appl. 11.03.2021, publ. 28.05.2021.