

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

DOI 10.24412/2221-2574-2023-1-33-40

УДК 621.396

## МОДИФИКАЦИЯ МЕТОДА КОДИРОВАНИЯ ПРИ БОРЬБЕ С МЕЖСИМВОЛЬНЫМИ ИСКАЖЕНИЯМИ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ С МОДУЛЯЦИЕЙ QPSK

**Полушин Петр Алексеевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский Государственный университет имени А.Г. и Н.Г. 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, 87.

**Аннотация:** В высокоскоростных системах передачи цифровых сигналов используют достаточно широкую полосу частот канала передачи. В связи с этим наблюдаются частотно-селективные замирания, выражающиеся в неравномерности коэффициента передачи канала в рабочей полосе. Это приводит к тому, что энергия сигналов рассеивается по времени, соседние символы накладываются друг на друга и интерферируют. Подобные межсимвольные искажения приводят к значительному ухудшению передачи сигналов вплоть до её срыва. Для борьбы с этим явлением предлагается модифицировать метод кодирования. Модификация заключается в том, что избыточность количества кодовых символов по сравнению с передаваемыми информационными символами предлагается использовать для устранения негативного влияния мешающих символов, накладывающихся на основной символ. Метод применяется в двухсторонних системах передачи, когда параметры канала передачи могут быть измерены во время тестовых сеансов и транслированы обратно на передающую сторону. Перед каждым информационным символом передаётся специальный корректирующий символ, параметры которого выбираются такими, чтобы, суммируясь с предыдущими символами, он нейтрализовывал их. Приведён пример реализации описываемого метода.

**Ключевые слова:** кодирование, межсимвольная интерференция, модуляция QPSK, помехоустойчивость, коррекция межсимвольных искажений

### Предпосылки

Кодирование цифровых сигналов в современных системах передачи широко используется для повышения помехоустойчивости передачи и исправлении возникающих ошибок [1–5]. Однако все они имеют особенность, которая заключается в предположении, что ошибки возникают из-за воздействия тепловых шумов, в основном возникающих во входных каскадах приёмников, имеющих адаптивный характер и гауссово распределение вероятности значений.

В то же время современные системы передачи цифровых сигналов зачастую используют достаточно широкую полосу передаваемых частот. Это приводит к появлению частотно-селективных замираний, когда в полосе передаваемого сигнала наблюдается значительная неравномерность коэффициента передачи [2, 3, 8]. Подобная неравномерность приводит к рассеянию энергии сигнала по времени и наложению соседних символов один на другой. В этом случае символы интерферируют,

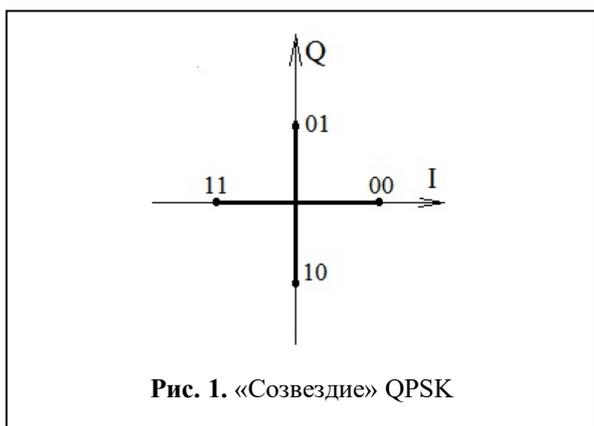


Рис. 1. «Созвездие» QPSK

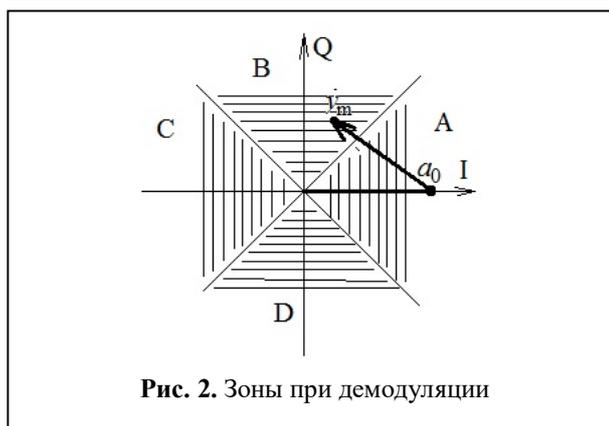


Рис. 2. Зоны при демодуляции

что также может привести к значительным ошибкам при их приеме.

Этот фактор приобретает все большее значение, так как наблюдается тенденция к увеличению объемов и скоростей передачи информации, а в результате — применению всё более широкой полосы частот тракта передачи. Межсимвольная интерференция (МСИ) имеет неаддитивный характер, при этом, в отличие от аддитивных помех, увеличение мощности излучаемого сигнала не приводит к уменьшению МСИ, т. к. они пропорциональны мощности сигнала. Известны различные методы борьбы с МСИ, однако они часто оказываются недостаточно эффективными [6, 7, 9].

Эффективность борьбы с МСИ можно существенно повысить, также используя кодирование, но в модифицированном варианте.

### Теоретические обоснования

Как известно [1–3], методы кодирования базируются на использовании избыточности количества передаваемых кодовых символов по сравнению с исходными передаваемыми информационными символами. «Лишние» символы связаны определёнными известными соотношениями с информационными символами, в связи с чем ошибки, возникающие при демодуляции из-за присутствия шума, частично или полностью могут быть убраны.

Если же кодирование и вводимую избыточность количества передаваемых символов рассматривать с позиций борьбы именно с МСИ, то возникает ряд новых возможностей. Они

уже обсуждались и исследовались в [10–15] и предлагались технические решения для их осуществления. Однако при этом рассматривался только метод модуляции BPSK (binary phase shift keying — двоичная фазовая модуляция).

В настоящее время в системах передачи применяются и другие виды модуляции, в частности, метод QPSK (quadrature phase shift keying — квадратурная фазовая модуляция). В этом случае описанные методы не могут быть применены. Для использования их необходимо изменить следующим образом.

При использовании метода QPSK вид «созвездия» передаваемых символов показан на рис. 1. Каждый символ соответствует передаче двух подряд идущих информационных логических символов. Приписывание пары логических символов конкретному передаваемому символу обычно производится с учётом кода Грея, как приведено на рис. 1. При детектировании принятого символа определяется, в какую зону комплексной плоскости попадает конец соответствующего вектора (на рис. 2 области A, B, C, D). В соответствии с этим принимается решение, какая пара логических символов была передана.

Описываемый метод предназначен для использования в двухсторонних системах передачи, когда на обеих сторонах интервала стоят одинаковые приёмно-передающие станции и передача информации производится в обе стороны на разных несущих частотах. Необходимые для работы параметры канала передачи

измеряются во время периодически следующих тестовых сеансов. Длительность тестового сеанса определяется максимальной временной задержкой между приходом первого и последнего интерферирующих символов. Периодичность тестовых сеансов зависит от скорости изменения параметров канала.

Во время тестового сеанса передатчик излучает один символ известного уровня с известной начальной фазой. Далее следует пауза. Приёмник фиксирует этот основной символ, и через интервалы времени, равные длительности символа, фиксирует по отдельности все мешающие символы, которые в будущем при передаче информации наложатся на основной символ. Таким образом, получаются необходимые параметры канала передачи. Они по служебному каналу связи транслируются обратно на передатчик.

Используя для обозначения передаваемых символов комплексную плоскость, принимаемый сигнал можно описать в виде комплексного ряда:

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

где  $z_i$  — передаваемые информационные символы (равные  $+1$ ;  $j$ ;  $-1$ ;  $-j$ , соответствующие передаче пар логических значений 00; 01; 11; и 10 соответственно);  $a_k$  и  $b_k$  — комплексные коэффициенты, определяющие взаимные уровни и фазовые сдвиги всех интерферирующих символов;  $m$  — количество интерферирующих символов значимого уровня. Будем считать индекс, равный нулю, соответствующим принимаемому основному символу, все остальные индексы будут соответствовать мешающим символам, накладывающимся на него.

В результате наложения мешающих символов суммарный вектор может попасть не в нужную зону, а, как показано на рис. 2, в соседнюю зону. В результате будет принято неправильное решение о том, какая из возможных пар логических символов передавалась, и возникнет ошибка.

Сущность модифицированного метода кодирования состоит в том, что избыточность дополнительно вводимых символов используется по-другому, чем в «классических» методах кодирования. При передаче по каналу перед каждым информационным символом помещается специально сформированный корректирующий символ. Его задача — вернуть суммарный конец вектора принимаемого сигнала в правильную зону комплексной плоскости. Все символы, предыдущие корректирующему символу, образуют общий мешающий сигнал  $\dot{y}_r$  — «хвост», который вызывает искажение передаваемого информационного сигнала,

$$\dot{y}_{ri} = \sum_{k=2}^m (a_k + jb_k)z_{i-k+1} = A_r + jB_r.$$

Корректирующий символ в сумме с предыдущими переданными символами приходит в приёмник. Поскольку параметры канала в передатчике известны, известна также вся предыдущая корректирующему символу последовательность излученных символов, то в передатчике вычисляется амплитуда и фаза этого общего мешающего сигнала — «хвоста». На основе этого амплитуда и фаза корректирующего символа регулируются таким образом, чтобы после прохождения канала и суммирования с «хвостом» он убирал его полностью, либо значительно снижал его уровень, а, следовательно, и негативное последствие МСИ.

Корректирующий символ до регулировки его ортогональных составляющих перед вставлением в формируемую последовательность является копией последующего информационного символа,  $x_1=x_0$ . Для удобства будем считать в рассматриваемом примере последующий информационный символ равным 1,  $x_0=1$ . Перед «вставлением» корректирующего символа перед информационным символом он домножается на некоторый комплексный коэффициент  $\dot{K}_c = K_I + jK_Q$ , т.е. становится равным  $\dot{K}_c$ . После прохождения канала передачи

корректирующий символ равен  $\dot{K}_c(a_c + jb_c)$ , где  $a_c = a_1$ ,  $b_c = b_1$ .

Для коррекции «хвоста» необходимо соблюдение условия  $\dot{K}_c(a_c + jb_c) = -\dot{y}_{ri}$

В результате, комплексные весовые коэффициенты для регулировки корректирующего символа должны определяться в соответствии с

$$\begin{aligned} \dot{K}_c &= -\frac{A_r + jB_r}{a_c + jb_c} = -\frac{(A_r + jB_r)(a_c - jb_c)}{(a_c + jb_c)(a_c - jb_c)} = \\ &= -\frac{(a_c A_r + b_c B_r) + j(a_c B_r - b_c A_r)}{a_c^2 + b_c^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, на передающей стороне первоначально единичному значению корректирующего символа должны присваиваться следующие весовые коэффициенты:

- составляющей I-коэффициент

$$\operatorname{Re}\{\dot{K}_c\} = -\frac{a_c A_r + b_c B_r}{a_c^2 + b_c^2}, \quad (1)$$

- составляющей Q-коэффициент

$$\operatorname{Im}\{\dot{K}_c\} = -\frac{a_c B_r - b_c A_r}{a_c^2 + b_c^2}. \quad (2)$$

После сложения подобного корректирующего символа с суммой мешающих символов они либо исчезают, либо их уровень значительно уменьшается, что увеличивает помехоустойчивость передачи информации.

### Реализация описываемого модифицированного метода

Модифицированный метод может быть реализован структурной схемой, приведённой на рис. 3.

Пусть рассматриваемая станция — это станция А, противоположная станция — это станция В. Во время тестовых сеансов в качестве тестового сигнала со станции А по основному каналу передачи излучается символ с нулевым начальным фазовым сдвигом, соответствующим передаче пары символов 00. После с передатчика (Прд) ничего не передается в течение нескольких длительностей символов. Их количество определяется числом мешаю-

щих символов, накладывающихся на основной символ.

На приёмной стороне на станции В по основному каналу приёма приёмником (Прм) принимается основной символ и ортогональные компоненты I и Q всех последующих символов. Символ, принимаемый за основным, определит необходимые составляющие  $a_c$  и  $b_c$  коэффициента передачи корректирующего символа. Принимаемые далее символы определяют коэффициенты передачи  $a_{2\div m}$  и  $b_{2\div m}$  мешающих символов. Во время тестовых сеансов выходы I и Q коммутатора К4 подключены ко входам блока памяти (БП), где до следующего тестового сеанса запоминаются измеренные параметры и передаются обратно на станцию А через служебный канал передатчика.

На станции А по служебному каналу приёма приёмника принимается информация об измеренных параметрах канала передачи от станции А до станции В. При этом блок выделения синфазного сигнала (БВСС) выделяет все полученные значения  $a_1$ – $a_m$ . Блок выделения ортогонального сигнала (БВОС) выделяет все полученные значения  $b_1$ – $b_m$ .

Значения  $a_1$  и  $b_1$  будут использоваться, как коэффициенты  $a_c$  и  $b_c$  корректирующего символа. Значения  $a_{2\div m}$  и  $b_{2\div m}$  будут использоваться для формирования коэффициентов  $A_r$  и  $B_r$ . Для этого значения подаются на блоки умножения П1 и П2 соответственно. На блоки умножения поступают напряжения с параллельных выходов сдвиговых регистров (СР1 и СР2) начиная со второй ячейки от входа, то есть значения ранее переданных сигналов  $z_{1-2\div z_{1-m}}$ , которые умножаются на соответствующие коэффициенты  $a_{2\div m}$  в многоканальном блоке умножения МБУ1 и на коэффициенты  $b_{2\div m}$  в многоканальном блоке умножения МБУ2. После этого сигналы со всех выходов МБУ1 суммируются в третьем сумматоре  $\Sigma 3$ , а со всех выходов МБУ2 сигналы суммируются в четвертом сумматоре  $\Sigma 4$ . Таким образом, формируются сигналы  $A_r$  и  $B_r$  соответственно.

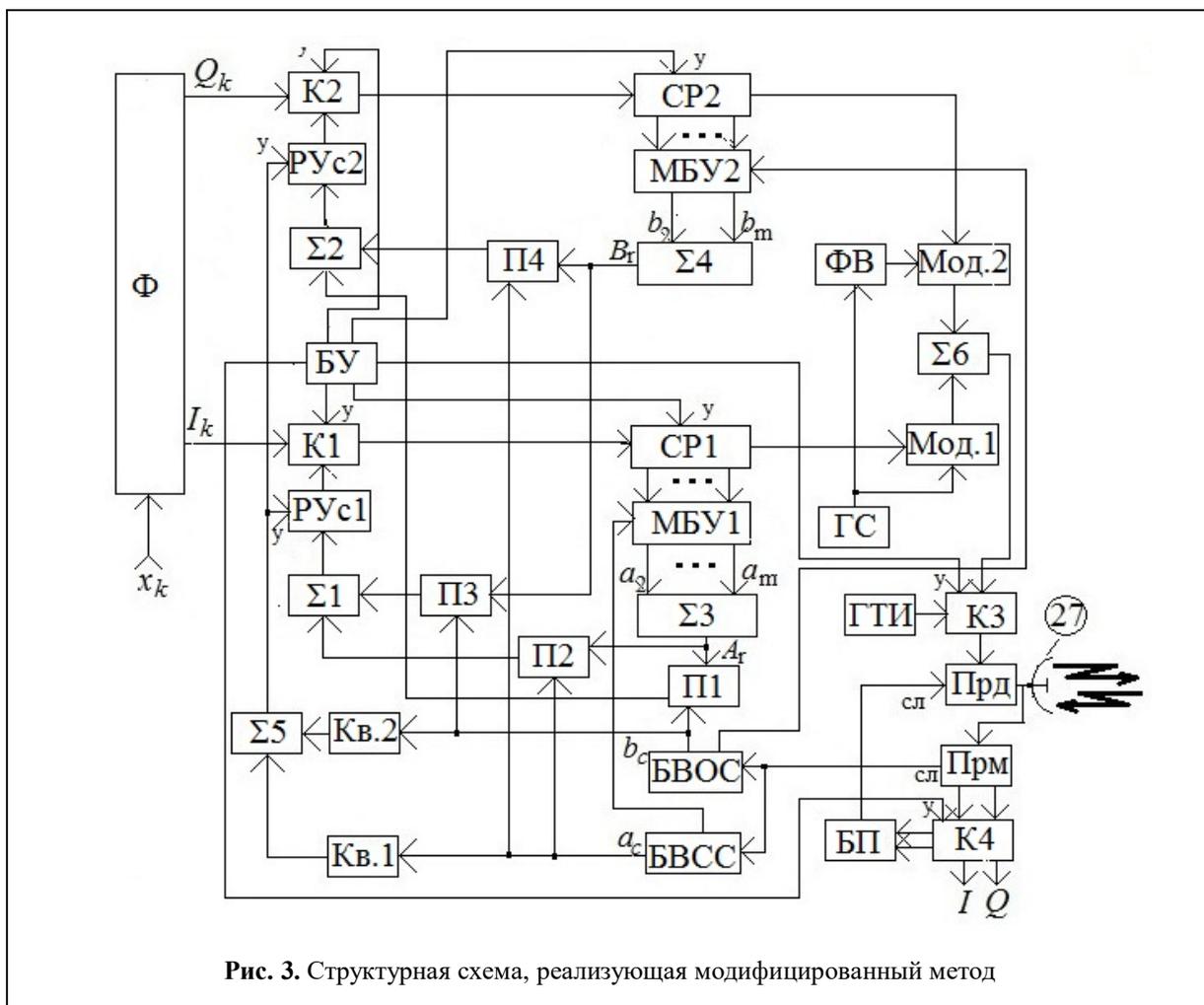


Рис. 3. Структурная схема, реализующая модифицированный метод

На перемножитель  $\Pi 1$  подаются сигналы  $b_c$  и  $A_r$ , перемножаются в нём, образуя на выходе произведение  $b_c A_r$ . На перемножитель  $\Pi 2$  подаются сигналы  $a_c$  и  $A_r$ , перемножаются в нём, образуя на выходе произведение  $a_c A_r$ . На перемножитель  $\Pi 3$  подаются сигналы  $b_c$  и  $B_r$ , перемножаются в нём, образуя на выходе произведение  $b_c B_r$ . На перемножитель  $\Pi 4$  подаются сигналы  $a_c$  и  $B_r$ , перемножаются в нём, образуя на выходе произведение  $a_c B_r$ . Сигналы с выходов перемножителей  $\Pi 2$  и  $\Pi 3$  складываются в первом сумматоре  $\Sigma 1$ , образуя сигнал, равный  $-(a_c A_r + b_c B_r)$ , Сигналы с выходов перемножителей  $\Pi 1$  и  $\Pi 4$  складываются во втором сумматоре  $\Sigma 2$ , образуя сигнал, равный  $-(a_c B_r - b_c A_r)$ .

Сигналы  $a_c$  и  $b_c$  с выходов блоков  $БВСС$  и  $БВОС$  подаются, соответственно, на квадраторы  $Кв.1$  и  $Кв.2$ . Там определяются их квадра-

ты, и эти сигналы суммируются в сумматоре  $\Sigma 5$ . Выходной сигнал этого сумматора подаётся на управляющие входы регулируемых усилителей  $Рус1$  и  $Рус2$ , где управляют их усилением. В результате коэффициент передачи этих регулируемых усилителей устанавливается обратно пропорциональным управляющему напряжению, т.е. обратно пропорционально величине  $a_c^2 + b_c^2$ .

Сформированные ортогональные компоненты корректирующего символа подаются входы коммутаторов  $К1$  и  $К2$ . На другие их входы подаются с формирователя  $\Phi$  ортогональные компоненты  $I$  и  $Q$  передаваемых информационных сигналов. Коммутаторы поочередно подключают к последовательному входу сдвиговых регистров  $СР1$  и  $СР2$  информационные символы и предшествующие им корректирующие символы, которые исправят нало-

жение мешающих сигналов на информационные символы.

Символы из последних ячеек обоих сдвиговых регистров одновременно подаются на модуляторы Мод.1 и Мод.2. На другие входы модуляторов поступает напряжение несущей частоты с генератора сигналов (ГС). На модулятор Мод.1 — непосредственно, на модулятор Мод.2 после прохождения через фазовращатель (ФВ), где к несущей добавляется фазовый сдвиг, равный  $90^\circ$ . Выходные сигналы обоих модуляторов складываются в сумматоре  $\Sigma_6$ , после чего поступают на один из входов коммутатора КЗ. На другой его вход поступают сигналы с генератора тестовых импульсов (ГТИ). Коммутатор подключает на свой выход сигналы с сумматора  $\Sigma_6$  во время передачи информационного сигнала, и тестовые сигналы во время тестовых сеансов.

С коммутатора КЗ сигналы поступают на основной канал передатчика, после чего с помощью приёмно-передающей антенны излучаются в канал передачи. К приёмно-передающей антенне подключен также вход приёмника.

Блок управления (БУ) управляет переключением коммутаторов с информационных символов на корректирующие и обратно, а также записью и сдвигом информации в сдвиговых

регистрах. Также управляет переключением коммутаторов при переключениях между тестовыми и информационными режимами.

#### Экспериментальная часть

Для проверки эффективности модификации метода кодирования был проведён ряд компьютерных экспериментов. Имитировалось прохождение сигнала с модуляцией QPSK через канал с межсимвольной интерференцией. При имитации процесса наложения мешающих символов на передаваемый символ использовались различные наборы комплексных параметров канала — вкладов мешающих символов в общий «хвост», суммирующийся с основным символом.

Поскольку в набор факторов, ухудшающих помехоустойчивость передачи сигналов, кроме МСИ входит также воздействие шумов входных цепей приёмника, то эффективность модифицированного метода кодирования проверялась при различных отношениях «сигнал/шум». Шум имитировался случайными отсчётами, складывающимися с основным символом и имеющими гауссово распределение значений.

На рис. 4 приведён характерный пример графиков, иллюстрирующий полученные результаты. По вертикальной оси отложена вероятность  $P$  битовой ошибки в различных условиях работы. По горизонтальной оси отложено отношение  $\rho$  «сигнал/шум». При этом в качестве уровня сигнала использовался уровень основного символа.

График 1 соответствует работе системы без воздействия МСИ. Графики 2 и 3 соответствуют работе при МСИ с использованием модифицированного метода кодирования. Параметры коэффициентов передачи канала выбирались следующими. Для графика 2:  $a_1 = 0,9$ ;  $a_2 = 0,1$ ;  $a_3 = 0,2$ ;  $b_1 = 0,6$ ;  $b_2 = 0,2$ ;  $b_3 = 0,2$ . Для графика 3:  $a_1 = 0,8$ ;

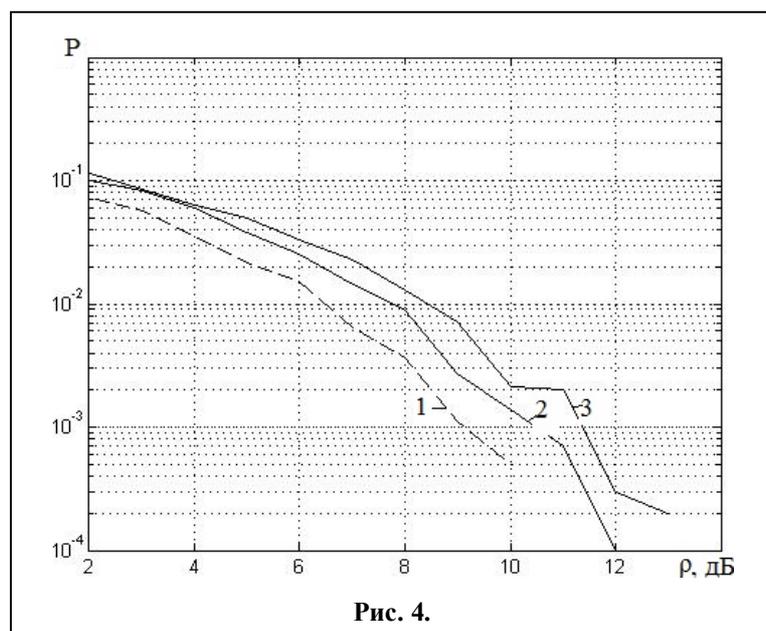


Рис. 4.

$a_2 = 0,4$ ;  $a_3 = 0,1$ ;  $a_4 = 0,1$ ;  $b_1 = 0,7$ ;  $b_2 = 0,2$ ;  $b_3 = 0,1$ ;  $b_4 = 0,2$ .

Наблюдающееся ухудшение вероятности битовой ошибки с уменьшением отношения «сигнал шум» связано с тем, что при этом возникают неточности при вычислении значений ортогональных коэффициентов для регулировки корректирующего символа. Поэтому иногда этот символ не может правильно нейтрализовать воздействие суммарного мешающего символа и корректировка нарушается.

### Выводы

Описанная модификация кодирования позволяет эффективно бороться с негативными последствиями межсимвольной интерференции цифровых сигналов, использующих модуляцию QPSK. Улучшение качественных показателей зависит от параметров канала передачи и от уровня шумов каскадов приёмника.

### Литература

1. Склар Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: пер. с англ. М.: Издательский дом «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. Никитин О.Р., Полушин П.А., Пятов В.А., Ромашов В.В. Улучшение энергетических показателей при передаче сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией // Проектирование и технология электронных средств. 2010. №1. С. 5–8.

7. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи. М.: Сов. радио. 1970. 392 с.

8. Галкин В.А. Цифровая мобильная радиосвязь. М.: Горячая линия-Телеком. 2007. 432 с.

9. Крухмалев И.И., Гордиенко В.Н., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. М.: Горячая линия-Телеком. 2008. 352 с.

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 №2693190 (на изобретение). 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 (31). С. 46–53.

14. Пат. РФ №200964 (на полезную модель). Корректор межсимвольных искажений // Полушин П.А., Белов А.Д., Никитин О. Р. Заявл. 17.12.2019, опубл. 20.11.2020. Бюл. №32.

15. Пат. РФ №204499 (на полезную модель). Устройство для повышения помехоустойчивости передачи цифровых сигналов в условиях межсимвольной интерференции // Полушин П.А., Лось Р.О., Раджабов У.М. Заявл. 11.03.2019, опубл. 28.05.2021. Бюл. №16.

Поступила 6 декабря 2023 г.

English

## CODING METHOD MODIFICATION IN COMBATTING INTERSYMBOL DISTORTIONS OF DIGITAL QPSK MODULATION SIGNALS

**Petr Alekseevich Polushin** — Grand Dr. in Engineering, Professor, 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** — Post-graduate Student 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”.

**Valerija Valentinovna Shalina** — Post-graduate Student 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”.

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

*Abstract:* Currently there is a steady increase in transmission speed of digital signals through various telecommunication channels. This requires using ever more spectral broadband. However, there occur distortions during band broadening relevant to nonuniformity of channel transmission ratio due to multipath signal propagation. This causes timed signal energy scattering. Subsequently, adjacent symbols overlap, which results in intersymbol interference and transmitted data distortions. Modified encoding method is proposed to use to combat this phenomenon in transmitting digital QPSK (quadrature phase shift keying) modulation signals. Any known coding method uses the redundant number of transmitted code symbols compared to the number of source information symbols. That said it is possible to reduce the number of bit errors that occur due to receiver’s noise effect. Redundant number of transmitted symbols is proposed to use to combat intersymbol interference in the named method. The method is applied in two-way transmission systems. The data is transmitted in them in two ways by the same stations. Test sessions are performed occasionally, during which parameters of the transmission channel are measured as well as of interfering symbols blending into the basic symbol. The measured parameters are transmitted back to the transmitting station. A special correction symbol is inserted before each transmitted information symbol to suppress intersymbol interference. The total value of interfering symbols that were transmitted before the basic symbol is calculated at the transmitting station. Accordingly, parameters of the correction symbol are adjusted in such a way that to blend it into preceding symbols to neutralize them. As a result, there is no intersymbol interference and the noise immunity of information transmission does not reduce. The diagram to implement the proposed method is given. The computer-aided research results of the method efficiency are described.

*Keywords:* coding, intersymbol interference, QPSK modulation, noise immunity.

### References

1. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical foundations and practical application. 2nd edition, corr.: trans. from English. Moscow: Williams, 2003. 1104 p.
2. *Prokis J.* Digital communication: trans. from English. Moscow: Radio i svyaz’, 2000. 800 p.
3. *Polushin P.A., Samoilov A.G.* Redundancy of signals in radio communications. Moscow: Radiotekhnika. 2007. 256 p.
4. *Feer K.* Wireless digital communication. Methods of modulation and spectrum expansion: trans. from English Moscow: Radio i svyaz’. 2000. 520 p.
5. Mobile communication systems. Study guide for universities. Edited by *V.P. Ipatov*. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom. 2003. 272 p.
6. *Nikitin O.R., Polushin P.A., Pyatov V.A., Romashov V.V.* Improvement of energy indicators in the transmission of signals with amplitude-phase modulation. Design and technology of electronic means. 2010. No. 1. Pp. 5–8.
7. *Viterbi E.D.* Principles of coherent communication. Moscow: Sov. radio. 1970. 392 p.
8. *Galkin V.A.* Digital mobile radio communication. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom. 2007. 432 p.
9. *Krukhmalev I.I., Gordienko V.N., Mochenov A.D.* Digital transmission systems. Moscow: Goryachaya liniya–Telecom. 2008. 352 p.
10. *Polushin P.A., Belov A.D., Los V.O.* The use of corrective symbols to combat intersymbol interference of digital signals. 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. RU Patent No. 2693190. Method of controlling intersymbol distortions of digital signals. *Polushin P.A., Nikitin O.R., Belov A.D.* Appl. 28.05.2018, publ. 24.06.2019.
13. *Radzhabov H.M., Radzhabov U.M., Polushin P.A., Nikitin O.R.* Decoding convolutional codes under conditions of character interleaving. Radioengineering and telecommunication systems, 2018, No. 3 (31). Pp. 46–53.
14. RU Patent No. 200964. Corrector of intersymbol distortions. *Polushin P.A., Belov A.D., Nikitin O. R.* Appl. 17.12.2019, publ. 20.11.2020. Byul. No. 32.
15. RU Patent No. 204499. A device for increasing the noise immunity of digital signal transmission in conditions of intersymbol interference. *Polushin P.A., Los R.O., Radjabov U.M.* Appl. 11.03.2019, publ. 28.05.2021. Byul. No. 16.