

УДК 621.396.67

DOI 10.66032/2221-2574-2021-1-1-46-54

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПЛАВНОЙ РЕГУЛИРОВКИ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ МНОГОУРОВНЕВЫХ ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

**Полушин Пётр 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

**Раджабов Улугбек Маликович**

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

**Лось Валерий Олегович**

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:* В настоящее время широко используются адаптивные методы управления работой систем передачи цифровых сигналов в соответствии с изменяющимися условиями работы. С целью повышения эффективности адаптивного управления передачей многоуровневых сигналов предлагается метод более точной регулировки скорости передачи, чем используемый в «классических» видах модуляции (QPSK, FM, QAM). Он позволяет реализовывать требуемую вероятность битовой ошибки при меньшем отношении «сигнал/шум». Метод основан на использовании многоуровневой модуляции при дробном количестве бит, переносимых каждым символом. Описаны правила построения требуемых методов модуляции с помощью совместного присвоения требуемых сочетаний бит точкам соответствующего созвездия для фазовой манипуляции и квадратурной амплитудной манипуляции. Приведены результаты исследования эффективности предложенных методов.

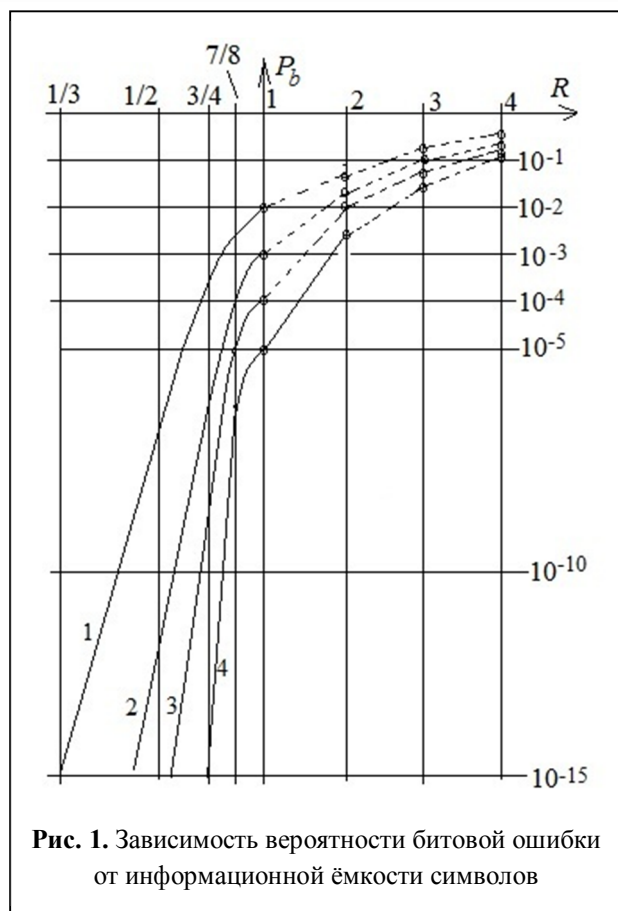
*Ключевые слова:* вероятность битовой ошибки, скорость передачи информации, методы многоуровневой модуляции, фазовая манипуляция, группа логических символов.

### Постановка задачи

В системах передачи сигналов, работающих в каналах с переменными параметрами, достаточно эффективно используются адаптивные методы, в частности — регулировка скорости передачи [1–5]. Вследствие различных процессов в канале передачи изменяется по времени коэффициент передачи, а, следовательно, и отношение «сигнал шум» в приёмнике и текущая вероятность ошибки. На интервалах времени, когда величина коэффициента передачи канала снижена, вероятность ошибки увеличивается и может не соответствовать нормам на качество передачи [1, 6–10]. Для компенсации этого приходится снижать скорость передачи, а замедление компенсировать её увеличением в моменты больших значений коэффициента передачи.

Таким образом, возникает потребность воз-

можно более точной регулировки скорости передачи, чтобы, с одной стороны, выполнить требования на качество передачи, а с другой стороны, не предусматривать излишний запас по ресурсу скорости [11–15]. Если предполагается постоянной величина рабочей полосы частот спектра сигнала, то регулировку скорости можно производить изменяя параметры кодирования или модуляции. Действительно, если принять за условную «нулевую» отметку горизонтальной оси скорость передачи  $R = 1$  двоичной фазовой манипуляции (BPSK), когда на один символ приходится один бит передаваемого информационного сообщения, то случаю  $R < 1$  будут соответствовать различные методы помехоустойчивого кодирования, когда используются избыточные символы для исправления возникающих ошибок, а случаю  $R > 1$  будут соответствовать различные методы мно-



гоурвневой модуляции, когда один символ может нести несколько бит передаваемой информации.

Сказанное иллюстрируется графиками на рис. 1, где в левой полуплоскости в качестве примера приведены зависимости вероятности ошибки при использовании блокового кода от средней кодовой скорости  $R$  (количество бит, приходящихся на один передаваемый символ), откладываемой по горизонтальной оси. Исходными точками приняты вероятности ошибки для BPSK ( $R = 1$ ) при разных вероятностях битовой ошибки  $P_b$ . Общее количество символов в блоке равно 64, скорость передачи информации регулировалась с помощью изменения соотношения проверочных и информационных символов в блоке. Так, при  $R = 1/2$  количество проверочных и информационных символов в блоке было одинаковым, при  $R = 3/4$  количество проверочных символов составляло 25% от общего числа символов, и т.п.

Графики получены при том же отношении «сигнал/шум»  $\rho$ , при котором при BPSK наблюдаются следующие вероятности ошибки: 1 —  $10^{-2}$  ( $\rho = 4,5$  дБ); 2 —  $10^{-3}$  ( $\rho = 6,8$  дБ); 3 —  $10^{-4}$  ( $\rho = 8,5$  дБ); 4 —  $10^{-5}$  ( $\rho = 9,2$  дБ). С уменьшением скорости передачи вероятность ошибки резко падает.

В правой полуплоскости показаны зависимости вероятности ошибки при тех же условиях работы, но при использовании многоурвневой модуляции. С ростом количества числа бит, содержащихся в каждом символе, и количества символов в созвездии, расстояние между ближайшими точками созвездия сокращается, что ведёт к увеличению вероятности битовой ошибки. Поскольку здесь скорость принимает только целые значения, расположенные достаточно редко, то соответствующие отсчёты обозначены кружками, а соединяющие их линии для удобства условно показаны пунктирами.

Рассматривая графики с точки зрения возможности регулировки скорости для одновременного соблюдения требований на вероятность битовой ошибки и уменьшения ненужного энергетического запаса, ведущего к снижению средней скорости передачи, нетрудно заметить, что возможности плавной регулировки скорости в левой полуплоскости и правой полуплоскости *не одинаковы*. Действительно, выбирая вид кодирования, матрицу перфорации и соотношение информационных и проверочных символов, нетрудно получить достаточно часто расположенные значения скорости передачи и осуществлять точную и эффективную адаптацию скорости к текущему состоянию канала [7–11]. В правой же полуплоскости возможности регулировки существенно хуже. При их использовании можно получить скорости, в  $2^k$ -раз большие, чем скорость передачи при BPSK, символы при этом содержат по  $k$  бит информации. Для точной адаптации к текущему состоянию канала подобная регулировка может оказаться слишком грубой.

Например, при значении отношения «сиг-

нал/шум», равном 9 дБ, и требованию на вероятность ошибки  $P_b = 10^{-3}$  метод 4-FM (QPSK,  $R = 2$ ) хотя и немного, но не обеспечивает требований и использован быть не может. Приходится применять метод BPSK, который даёт необоснованно завышение требования на вероятность ошибки, так как он обеспечивает такую вероятность ошибки при отношении «сигнал шум», уже на 2,5 дБ меньше, чем наблюдается при приёме.

В то же время, при определённой модификации методов многоуровневой модуляции можно достаточно просто обеспечить более плавную регулировку скорости и точность её адаптации.

#### Теоретическое обоснование метода

Как известно, при многоуровневой модуляции каждый символ содержит несколько бит информации [1, 2]. За счёт этого при сохранении *постоянной* скорости передачи информации можно уменьшить количество передаваемых символов и увеличить их энергию. Тем самым частично (а в методе OFDM полностью) компенсируется снижение помехоустойчивости из-за сближения точек созвездия.

Поскольку в описываемом методе главной целью является возможность регуляции скорости передачи, то длительность и энергия всех символов принимается постоянной и не зависящей от вида модуляции. Для достижения поставленной цели предлагается использовать методы модуляции, при которых символы могут переносить не только целое, но и *дробное* среднее количество бит. В общем случае метод базируется на следующем.

При «классических» многоуровневых методах модуляции каждый символ переносит  $k$  бит, где  $k$  — целое, для этого используются  $M=2^k$  точек в созвездии,  $k = \log_2(M) = R$ . Если же  $M$  не будет равно  $2^k$ , то каждый символ будет содержать в среднем дробное число бит.

Передача сигналов в этом случае должна организовываться по-другому. В «классических» методах многоуровневой модуляции каждый символ рассматривается по отдельно-

сти, и те несколько бит, что он переносит, никак не связаны с последующими битами. Теперь же следует рассматривать сразу несколько подряд идущих символов (пусть  $L$  символов). Несмотря на то, что число  $M$  — дробное, всегда можно найти такое значение  $L$ , чтобы произведение  $LM$  достаточно хорошо приближалось к некоторому целому числу  $k_0$ . Естественно, чтобы не было потерь бит, несущих передаваемую информацию, необходимо соблюдение условия, чтобы  $LM > k_0$ . Поскольку точное соблюдение равенства  $LM = k_0$  невозможно, то будет наблюдаться определённая избыточность, однако она станет тем меньше, чем ближе  $LM$  к  $k_0$ .

Таким образом, с помощью  $L$  символов из созвездия из  $M$  точек может быть в общем виде передан блок из  $k_0$  двоичных символов, т.е. бит. Передача сводится к последовательному получению из входной двоичной последовательности блоков по  $k_0$  бит и далее к переводу этого  $k_0$ -разрядного двоичного числа в  $L$ -разрядное  $M$ -ичное число (т.е., число в  $M$ -ичной системе исчисления). На основе  $M$ -ичных чисел производится модуляция. В приёмнике производятся обратные операции.

Может быть предложен метод, где возможная получающаяся небольшая избыточность несколько выше, однако его реализация существенно проще. Кроме этого, он не требует анализа больших блоков данных, а может быть реализован последовательным алгоритмом. Рассмотрим операции такого алгоритма на примере  $M = 5$ , т.е. 5-FM. Ближайшим методом с меньшим числом точек в созвездии является OFDM (4-FM), его созвездие приведено на рис. 2. Созвездие содержит четыре точки, каж-



Рис. 2. Созвездие при QPSK

дой точке присвоена одна из пар последовательных битов: 00; 01; 11; 10. Биты расположены в соответствии с правилом Грея, когда неправильный приём соседней точки приводит только к одной ошибке в двух битах.

В описываемом методе присвоение сочетаний битов производится по-другому (иллюстрируется рис. 3). Теперь точек в созвездии пять. Для удобства обозначим их буквами:  $a$ ;  $b$ ;  $c$ ;  $d$ ;  $e$ . При соблюдении одинаковой мощности символа для любой точки они расположены по кругу через  $360^\circ/5 = 72^\circ$ .

Присвоение сочетаний битов точкам созвездия производится так. Точке  $a$  присваивается пара битов 00; точке  $c$  присваивается сочетание 01; точке  $d$  присваивается сочетание 11; точке  $e$  присваивается сочетание 10. При необходимости передачи конкретной текущей пары битов из исходной информационной последовательности передаётся сигнал с соответствующей начальной фазой (соответствующая точка созвездия).

А точке  $b$  тоже присваивается сочетание 00. Таким образом, при передаче данного символа и точка  $a$ , и точка  $b$  переносят одинаковую комбинацию битов, равную 00. А вот присвоение битов точкам последующего символа производится по-разному в зависимости от того, какая была использована точка в текущем созвездии (иллюстрируется рис. 4). В передатчике последующие для передачи биты известны. Если в текущем символе были использованы точки  $c$ ,  $d$  или  $e$ , то присвоение сочетаний битов производится таким же образом, как и в текущем символе (т.е.,  $a$  и  $b$  — 00;  $c$  — 01;  $d$  — 11;  $e$  — 10).

Если же в данном символе использованы точки  $a$  или  $b$ , то в последующем символе каждой точке присваивается не по два, а по три передаваемых бита по следующему

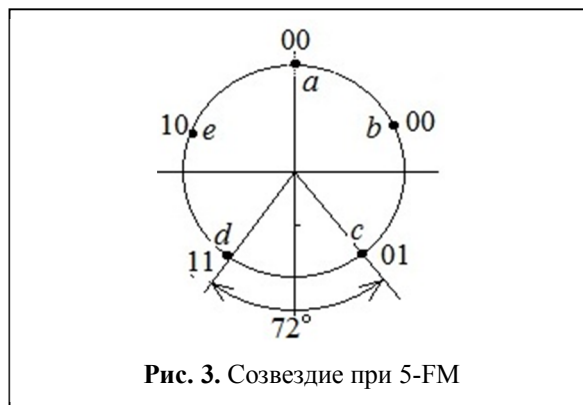


Рис. 3. Созвездие при 5-FM

принципу: в случае использования в данном символе точки  $a$  в последующем символе точкам присваиваются следующие группы бит: точкам  $a$  и  $b$  — группа 000; точке  $c$  — группа 010; точке  $d$  — группа 110; точке  $e$  — группа 100.

В случае использования в данном символе точки  $b$  в последующем символе точкам присваиваются другие группы бит: точкам

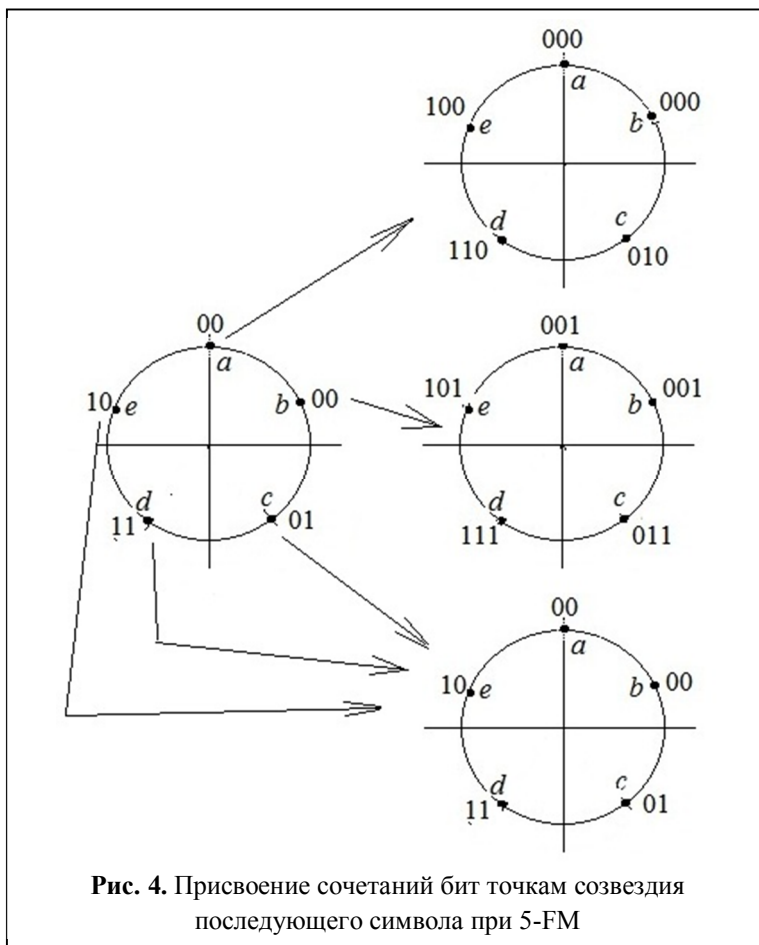


Рис. 4. Присвоение сочетаний бит точкам созвездия последующего символа при 5-FM

$a$  и  $b$  — группа 001; точке  $c$  — группа 011; точке  $d$  — группа 111; точке  $e$  — группа 101. Очевидно, что они отличаются тем, что к ним сзади добавляется не ноль, а единица. В соответствии с этим правилом присвоения и в зависимости от того, какое сочетание последующих битов расположено в передаваемой информационной последовательности, выбирается нужная точка созвездия и формируется передаваемый сигнал с нужной начальной фазой. Подобное правило применяется при формировании и передаче всех символов.

Поскольку появление логических нуля и единицы считается равновероятным, то вероятность появления сочетания 00 в исходной информационной последовательности равна 0,25. Таким образом, один символ в 75% случаев будет переносить по два бита, а в 25% случаев по три бита. Среднее количество бит, приходящееся на один символ, составит 2,25 бит. Кстати, для  $M=5$  значение  $\log_2(5) \approx 2,322$  бит, то есть метод реализует информационную ёмкость символов, близкую к предельной. В примере парой точек, переносимых в данном символе одинаковую информацию, выбраны точки  $a$  и  $b$ . В принципе для этих целей может быть выбрана любая пара соседних точек.

Аналогичный подход может быть применён при других значениях  $M$ . Пример при  $M=6$  для 6-FM приведён на рис. 5. Здесь уже двум парам соседних точек присваиваются одинаковые сочетания битов: точкам  $a$  и  $b$  присваивается 00; точкам  $c$  и  $d$  присваивается 01. В случае, если для данного символа информационные биты равны 00 или 01, то в последующем символе используются группы не из двух, а из трёх информационных бит передаваемой последовательности. Если в данном символе использованы точки  $a$  или  $c$ , то в последующем символе третьим добавляемым битом будет ноль. Если в данном символе использованы точки  $b$  или  $d$ , то в последующем символе третьим битом будет единица. Таким образом, в среднем в 50% символов будет содержаться по два бита, а в других 50% символов будет со-

держаться по три бита, и в среднем каждый символ будет переносить по 2,5 бита. Величина  $\log_2(6) \approx 2,585$ , т.е. реализуемая информационная ёмкость каждого символа также близка к предельной.

Аналогичные рассуждения для метода 7-FM с выбором трёх пар точек с попарно одинаковыми сочетаниями битов приводят к средней информационной ёмкости каждого символа, равной 2,75, при значении  $\log_2(7) \approx 2,808$ . Точно так же и для методов QAM можно реализовать любое количество точек в созвездии, попарно объединяя соседние точки. Информационная ёмкость будет так же приближаться к предельной. Например, для 10-QAM метод реализует среднюю информационную ёмкость, равную 3,25 бита на символ при предельно возможной 3,322.

Интересно рассмотреть модуляцию 3-FM (среднюю между BPSK и QPSK), иллюстрируемую рис. 6. Точки созвездия расположены по вершинам равностороннего треугольника. Они обозначены буквами  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Точке  $c$  присвоена единица, точкам  $a$  и  $b$  присвоен ноль. Если в данном символе используется точка  $a$ , то в последующем символе точкам присваиваются сочетания:  $a$  — 00,  $b$  — 00,  $c$  — 10. Если в данном символе используется точка  $b$ , то в последующем символе точкам присваиваются сочетания:  $a$  — 01,  $b$  — 01,  $c$  — 11. Если в данном символе используется точка  $c$ , то в последующем символе точкам  $a$  и  $b$  присваивается ноль, точке  $c$  — единица. Средняя информационная ёмкость составит 1,5 бита на символ при предельной ёмкости 1,585 бит на символ.

Как известно [1, 6, 7], при одинаковой скорости передачи методы BPSK и QPSK обладают одинаковой помехоустойчивостью, поскольку сближение точек созвездия при переходе от BPSK к QPSK компенсируется увеличением в два раза энергии каждого символа. Если же применить описываемый метод 3-FM не для регулировки скорости передачи, а оставить её постоянной, соответственно удлинив в полтора раза символ, то помехо-

устойчивость этого метода будет даже выше на 0,23 дБ, чем и у BPSK, и у QPSK.

#### Реализация описываемого метода

Пример реализации метода в виде укрупнённой структурной схемы приведён на рис. 7. От источника информационного сообщения (ИС) логические символы поступают на схему FIFO1 (first input – first output, «первый вошел — первый вышел»). Её использование необходимо, т.к. информационные символы, как правило, поступают в виде непрерывной последовательности и так записываются в этот блок. Считываются они неравномерно, например, при использовании 5-FM считываются либо по два бита, либо по три бита.

Группы логических символов, соответствующие двум подряд идущим символам, постоянно записываются и считываются из сдвигового регистра (СР). В зависимости от логических значений текущего и последующего символов модулятор (М) формирует несущую с нужным значением начальной фазы, и сигнал излучается к приёмнику. В нём происходит обратный процесс. Демодулятор (ДМ) на основе принятого сигнала вырабатывает двоичные числа и записывает их в блок FIFO2. Необходимость второго блока FIFO2, также, как и первого, обусловлена преобразованием неравномерного потока в равномерный для подачи потребителю (П).

#### Экспериментальные исследования

Для изучения свойств описываемого метода были проведены компьютерные исследования. Некоторые результаты исследований приведены на рис. 8. На рисунке представлены графики зависимости вероятности  $P_b$  битовой ошибки от отношения  $\rho$  «сигнал/шум», в качестве которого использовалось отношение мощности символа к дисперсии теплового шума приёмника (для модуляции QAM бралась максимальная мощность символов.).

Исследовались возможности регулировки скорости передачи информации при соблюдении постоянства мощности символов. Цифра-

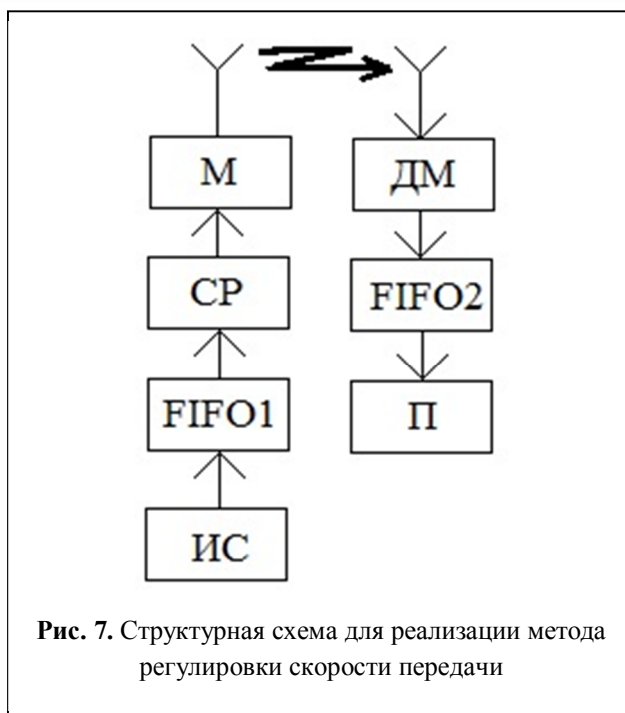


Рис. 7. Структурная схема для реализации метода регулировки скорости передачи

ми обозначены графики для видов модуляции: 1 — BPSK (2-FM); 2 — 3-FM; 3 — QPSK (4-FM); 4 — 5-FM; 5 — 6-FM; 6 — 7-FM; 7 — 8-FM; 8 — 10-QAM; 9 — 12-QAM; 10 — 16-QAM.

Исследования показали, что при необходимости обеспечения условия постоянства вероятности битовой ошибки, описываемый метод позволяет производить достаточно точную регулировку скорости передачи при изменении отношения «сигнал/шум» с шагом 1–1,5 дБ.

#### Заключение

Рассмотрена работа систем передачи многоуровневых цифровых сигналов при необходимости соблюдения норм на допустимую вероятность битовой ошибки. С целью экономии ресурса системы передачи исследована возможность более точной регулировки скорости передачи, чем обычно используемая при передаче многоуровневых сигналов, когда каждый передаваемый символ содержит целое число информационных бит.

Для этих целей предложено применять методы многоуровневой модуляции, когда каждый символ может переносить дробное число бит. Разработан путь построения таких мето-

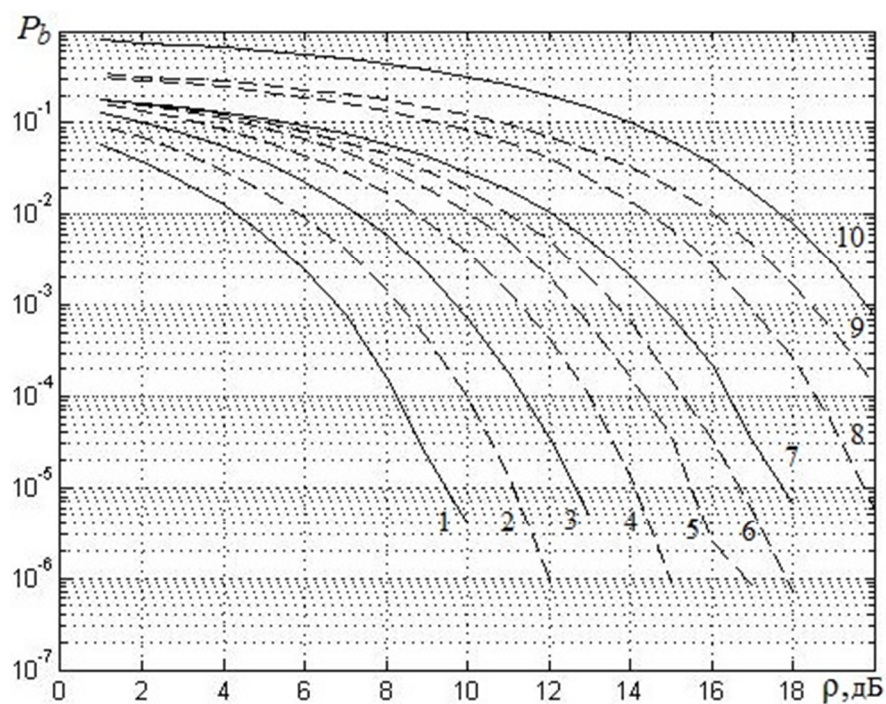


Рис. 8. Результаты исследований метода регулировки скорости передачи

дов и приведены результаты экспериментальных исследований. Исследования показали возможность производить более точную регулировку скорости передачи информации и экономить энергетические ресурсы систем передачи.

### 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. Полушин П.А., Самойлов С.А. Использование О-QAM и усеченной QAM при передаче цифровых сигналов. // Проектирование и технология электронных средств. 2008. №3. С. 2–7.
5. Полушин П.А., Джулани И., Беляков А.В. Параметрическая адаптация линии передачи биомедицинской информации. // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии ФРЭМЭ'2016. Владимир-Суздаль, 5–7 июля 2016, книга 1. С. 343–346.
6. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра.: пер. с англ.

М.: Радио и связь. 2000. 520 с.

7. Системы мобильной связи. Учебное пособие для вузов / Под ред. В.П. Ипатова. М.: Горячая линия–Телеком. 2003. 272 с.

8. Патент РФ №103432. Система передачи сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией / Полушин П.А., Пятов В.А., Ульянова Е.В., Матюха В.А., Беликов Е.В. Заявл. 15.11.2010; опубл. 10.04.2011., Бюл. №10.

9. 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.

10. Полушин П.А., Самойлов С.А., Соловьев А.В. Реализация приемника относительной КАМ с использованием кода Грея. // Материалы 8-й МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации». г. Владимир, 21–22 мая 2009, том 1. С. 165–170.

11. Nikitin O.R., Polushin P.F., Katkov D.V., Shubin A.A. Noise Immunity Increasing of Signals Transmitting with Using of Coded Sequences Diagnostics // 14-th International scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) 44894 proceedings APEIE-2018. Pp.77–81. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546287

12. Полушин П.А., Мартышевская Д.А. Методы борьбы с межсимвольной интерференцией. Palmarium Academic Publishing, Saarbrucken, Germany.

2016. 144 с.

13. *Полушин П.А., Синицин Д.В.* Повышение качества и надежности передачи сигналов по каналам связи и управления // *Технология текстильной промышленности*. 2014. №4 (352). С. 156–159.

14. *Полушин П.А., Матюха В.А., Синицин Д.В.* Возможности адаптивной перестройки структуры телекоммуникационных линий // *Физика и радио-*

*электроника в медицине и экологии*. Владимир, 27–29 июня 2012, книга II. С. 225–228.

15. *Полушин П.А., Белов А.Д.* Повышение помехоустойчивости передачи цифровых сигналов в биомедицинских системах // *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ-2020)*. Владимир–Суздаль, 1–3 июля 2020, книга 1. С. 341–344.

Поступила 12 января 2021 г.

English

## POSSIBILITY OF SMOOTH REGULATION OF MULTILEVEL DIGITAL SIGNALS TRANSMISSION RATE

**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

**Ulugbek Malikovich Radjabov** — 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”.

**Valerij Olegovich Los** — 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:* Many nowadays radiocommunication systems works in conditions of changing channel communication parameters. In order to satisfy communication reliability to communication quality norms it is necessary to vary system parameters to adapt them according the work condition variations. One of the main demands is bit probability preservation not less than demanded level. At the same time different work conditions go to received signal level variations. In that way without adaptation it needs to use big transmission power reserve or decrease sufficiently transmission rate. It reduces communication system efficiency. Adaptive methods with rate variation according to transmission coefficient variation with bit probability preservation are more effective. It may be done simply when noise immunity encoding methods are using and when every transmitted symbol contains less then one information bit by means of code rate variation. However, when multilevel modulation types are used, such as FM, QAM, symbol levels multitude is proportional to  $2^k$  where  $k$  is whole number. Every symbol contains whole number of information bits. Transmission rate regulation is rather rough and adaptation efficiency decreases. Modulation types when every transmitted symbol contains partial number of information bites are proposed to use in the article. In this case symbol level multitude is not proportional to  $2^k$ , for example modulation types 5-FM, 12-QAM, and so on. Transmission rate regulation becomes more exact and adaptation efficiency increases. Methods of such modulation types construction are proposed by means of inclusion of part information of next symbol in previous symbol. Ways of bit combination giving to symbol levels are defined by bit sequence. Results of efficiency researches of proposed methods are given. Researches show that using of these methods gives possibility to transmission rate regulation when SNR variates with 1-1,5 dB step.

*Keywords:* bit error probability, transmission rate of information, methods of multilevel modulation.

### References

1. *Sklyar B.* Digital communication. Theoretical foundations and practical application. Ed. 2nd, corrected; transl. from eng. Moscow: Publishing house "Williams", 2003. 1104 p.
2. *Prokis J.* Digital communication.: transl. from eng. Moscow: Radio i Svyaz', 2000, 800 p.
3. *Polushin P.A., Samoilov A.G.* Redundancy of signals in radio communications. 2007. 256 p.
4. *Polushin P.A., Samoilov S.A.* The use of O-QAM and truncated QAM in the transmission of digital signals. Design and technology of electronic devices. 2008. No. 3. Pp. 2–7.

5. *Polushin P.A., Dzhulani I., Belyakov A.V.* Parametric adaptation of the biomedical information transmission line. Physics and radioelectronics in medicine and ecology FRE ' 2016. Vladimir–Suzdal, July 5–7, 2016, book 1. Pp. 343–346.
6. *Feer K.* Wireless digital communication. Methods of modulation and spectrum expansion: transl. from eng. Moscow: Radio i Svyaz'. 2000. 520 p.
7. Mobile communication systems. Textbook for universities. Edited by *V.P. Ipatov*. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. 2003. 272 p.
8. RU Patent No. 103432. The transmission system signals with amplitude and phase modulation. *Polushin P.A., Pyatov V.A., Ul'yanova, E.V., Matyukha V.A., Belikov E.V.* Appl. 15.11.2010; publ. 10.04.2011. Bull. No. 10.
9. *Nikitin O.R., Polushin P.A., Pyatov V.A., Romashov V.V.* Improvement of energy performance when transmitting signals with amplitude and phase modulation. Design and technology of electronic means. 2010. No. 1. Pp. 5–8.
10. *Polushin P.A., Samoilov S.A., Solovyov A.V.* Implementation of the relative KAM receiver with the use of the Gray code. Proceedings of the 8th conference "Advanced technologies in the media". Vladimir, 21–22 May 2009. Volume 1. Pp. 165–170.
11. *Nikitin O.R., Polushin P.A., Katkov D.V., Shubin A.A.* Increasing the Noise Immunity of Transmitting Signals with the Using of Coded Sequences diagnostics. 14-th International Scientific-technical conference on actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) 44894 proceedings APEIE-2018. Pp. 77–81. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8546287
12. *Polushin P.A., Martyshevskaya D.A.* Methods of combating intersymbol interference. Palmarium Academic Publishing, Saarbrucken, Germany. 2016. 144 p.
13. *Polushin P.A., Sinitsin D.V.* Improving the quality and reliability of signal transmission through communication and control channels. Technology of the textile industry. 2014. No. 4 (352). Pp. 156–159.
14. *Polushin P.A., Matyukha V.A., Sinitsin D.V.* Possibilities of adaptive tuning of the structure of telecommunications lines. Physics and radioelectronics in medicine and ecology. Vladimir, 27–29 June 2012, book II. Pp. 225–228.
15. *Polushin P.A., Belov A.D.* Increasing the build-kostuchowski the transmission of digital signals in biomedical systems. Physics and Radioelectronics in Medicine and Ecology (FRE-2020). Vladimir–Suzdal, July 1–3, 2020, book 1. Pp. 341–344.