

# Обработка сигналов, информации и изображений

DOI 10.66032/2221-2574-2026-1-1-38-46

УДК 621.396:681.88

## УСТОЙЧИВОСТЬ КОДЕКА РИДА — СОЛОМОНА С ПЕРЕМЕЖИТЕЛЕМ К ОШИБКАМ В КАНАЛЕ СВЯЗИ

**Орлов Алексей Валерьевич**

генеральный директор АО «Научно-исследовательский институт «Субмикрон»<sup>1</sup>.

**Ракитин Алексей Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Муромского института<sup>2</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»; начальник отдела АО «НИИ «Субмикрон»<sup>1</sup>.

**Костров Виктор Васильевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехники Муромского института<sup>2</sup> (филиала) ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»; ведущий инженер-программист АО «НИИ «Субмикрон»<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Адрес: 124460, Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград, Георгиевский просп., д. 5, с. 2.

<sup>2</sup>Адрес: 602264, Российская Федерация, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

E-mail для связи: [submicron@se.zgrad.ru](mailto:submicron@se.zgrad.ru)

*Аннотация:* В работе представлены результаты исследования комбинации метода блочного кодирования Рида — Соломона с матричным перемежением, которое использовано для борьбы с сериями ошибок, возникающих из-за многолучевого распространения в канале связи. Показано, что эффективность использования процедуры «перемежения-деперемежения» проявляется при непрерывном потоке ошибок, когда неправильно классифицированные символы следуют подряд более 2-х раз. Тогда матричный перемежитель разносит ошибки по временной оси, тем самым обеспечивая возможность правильного декодирования. Предложенная дополнительная бит-реверсная перестановка столбцов позволяет выровнять зависимость вероятности ошибок от места их возникновения в сообщении и уменьшить её значение на 20...30%.

*Ключевые слова:* гидроакустическая система (ГАС), код Рида — Соломона, многолучевое распространение, перемежитель, сложный фазомодулированный сигнал, ошибки канала связи.

### Введение

В гидроакустических управляющих и телеметрических системах дальнего действия [1] для передачи информации и команд управления широко используются фазокодоманипулированные сигналы [2, 3], что позволяет существенно повысить помехоустойчивость. Вместе с тем гидроакустический канал связи отличается нестационарностью, многолучевым распространением акустических волн, низкой пространственной когерентностью, изменением скорости распространения волн вдоль трассы, наличием различных локальных неоднородностей и других фак-

торов, которые приводят к деградации качества приёма переданной информации и команд управления. Частичное снижение влияния этих факторов достигается за счёт применения помехоустойчивого кодирования [4, 5], обеспечивающего обнаружение рассредоточенных по сообщению ошибок, а в отдельных случаях — их исправление.

Чтобы реализовать такие возможности по обнаружению и исправлению ошибок, в сигнал вводится избыточность, вообще говоря, снижающая скорость передачи информации. Когда информация представляет собой цифровой поток

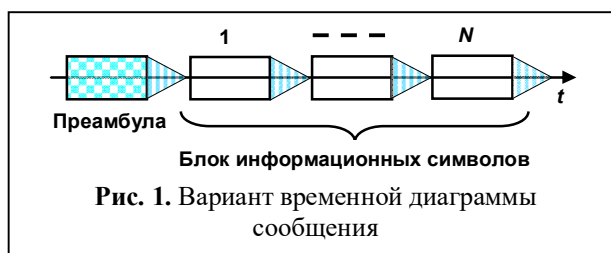
большой длительности, то наиболее эффективными признаны свёрточные коды с алгоритмом Витерби при декодировании [4]. В рассматриваемом случае команды управления могут рассматриваться как короткие информационные пакеты, поэтому применяется блочное кодирование, представителем которого является код Рида — Соломона (РС) [5].

Многолучевое распространение и возникающее замирание сигналов приводит к группированию ошибок, при наличии которых эффективность кодов по исправлению ошибок, возникающих в канале связи, снижается. В этих случаях достаточно простым средством является перемежение цифровых символов при передаче и деперемежение — при приёме [6]. В отличие от кодирования операция перемежения символов не вносит избыточность в сигнал и не приводит к снижению скорости передачи данных. Перемежение позволяет разнести во времени потенциальные ошибки, и тем самым создать для применяемого кодирования благоприятные условия по выявлению и устранению ошибок. Вопросы помехоустойчивости приёма при декодировании свёрточных кодов в условиях перемежения рассматривались в [7].

Целью данной работы является исследование на примере кода Рида — Соломона с перемежителем влияния ошибок, возникающих в канале связи с замираниями, на качество приёма блоков информационных сигналов. В качестве примера для передачи информации здесь используется ансамбль фазокодированных (ФКМ) сигналов, модулированных псевдослучайными последовательностями Голда [8, 9].

### Информационная модель системы

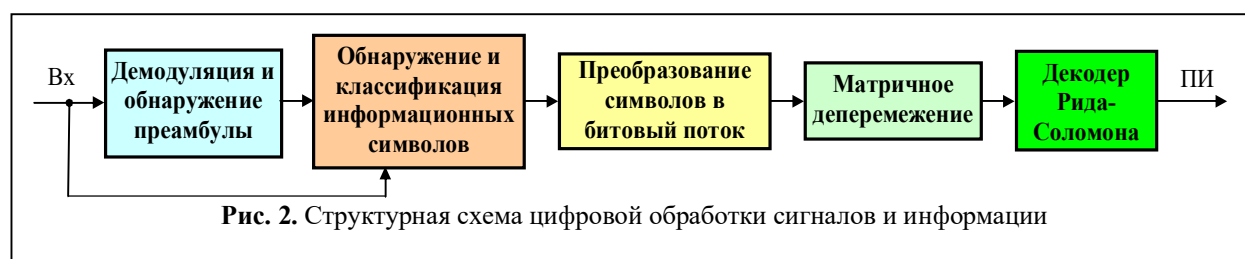
Исходное двоичное сообщение кодируется, поступает на матричный перемежитель, а затем из



полученного битового потока формируется блок информационных символов. После модуляции получается сообщение, временная диаграмма которого приведена на рис. 1. Начало информационной посылки (рис. 1) определяет преамбула (синхросимвол) в виде псевдослучайной M-последовательности (ПСП). За преамбулой следуют  $N$  информационных символов (ПСП кодов Голда), между которыми имеются промежутки времени (защитные интервалы) для снижения межсимвольной интерференции из-за многолучевого распространения сигналов по каналу связи. Длительность защитных интервалов выбирается меньше максимального времени задержки в луче, чтобы остатки сигнала предыдущего символа не накладывались на последующий символ.

В системе для примера используется блочное систематическое кодирование Рида — Соломона РС(15,7), в котором на выходе кодирующего устройства всегда будут содержаться информационные символы, поступающие на кодирующее устройство, в неизменном виде. Для передачи РС кодер готовит 15 символов, из которых 7 символов являются информационными, а остальные 8 символов — проверочными (избыточными). Приёмная часть системы работает в обратном порядке (рис. 2) и выдаёт получателю информации ПИ декодированное сообщение.

Особый интерес представляют свойства сигналов, используемых для синхронизации, кодирования и передачи данных. Типичный вид модуля автокорреляционной функции (АКФ) ПСП



преамбулы с базой 511 (демодулированного фазоманипулированного сигнала) при отсутствии шумов представлен на рис. 3. Полученный уровень боковых лепестков сжатого сигнала согласуется с известными данными для М-последовательностей. Средний относительный уровень боковых лепестков (УБЛ) составляет  $1/\sqrt{N}$  (для базы 511 УБЛ составляет  $-27$  дБ) с разбросом в диапазоне  $(0,7...1,25)/\sqrt{N}$ , т.е. в диапазоне  $-3,1...+1,9$  дБ от среднего значения теоретического уровня.

На рис. 4 приведён фрагмент реализации процесса на входе приёмника при наличии белого гауссовского шума при отношении сигнал-шум  $q_{sn}$  минус 3 дБ. Ясно, что при увеличении уровня шума сигнал все больше маскируется шумом и наблюдать его становится сложнее. Однако более сильное влияние на сигналы оказывает многолучевое распространение гидроакустических волн. На рис. 5 и рис. 6 представлены фрагменты взаимно корреляционной функции (ВКФ) преамбулы и информационных символов, прошедших реальный гидроакустический канал, с соответствующими им сигналами ПСП. Сравнение рис. 5 с рис. 3 показывает отсутствие в ВКФ симметрии, нет также явно выраженного максимума. В полученной реализации присутствует много локальных максимумов, характеризующих отдельные каналы распространения, а боковые лепестки в отличие от рис. 3 выделить невозможно. В сигнале наблюдаются глубокие провалы, характерные для замирания (интерференции) сигналов.

Аналогичные искажения наблюдаются также при сжатии информационных символов Голда (рис. 6). Приведённые осциллограммы показывают, что при малых отношениях сигнал-шум и наличии многолучевого распространения затруднён корректный приём сигналов: из-за неопределённости временного положения преамбулы нарушается процесс синхронизации, различение символов Голда производится с ошибками, наблюдается межсимвольная интерференция.

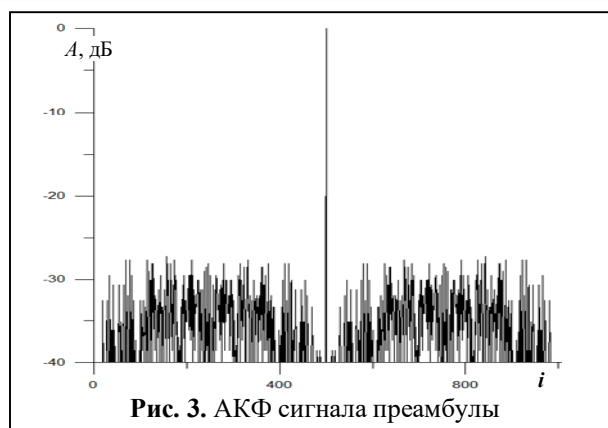


Рис. 3. АКФ сигнала преамбулы

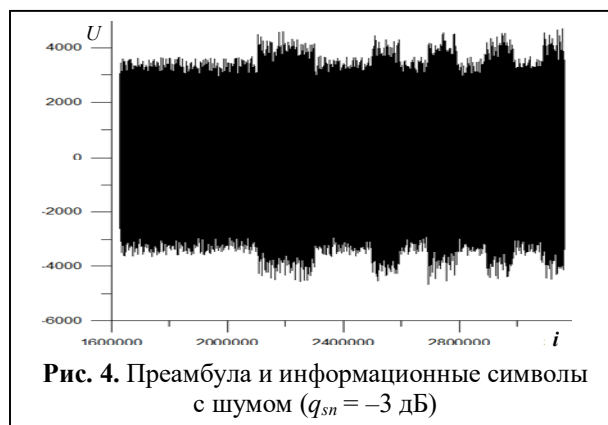


Рис. 4. Преамбула и информационные символы с шумом ( $q_{sn} = -3$  дБ)

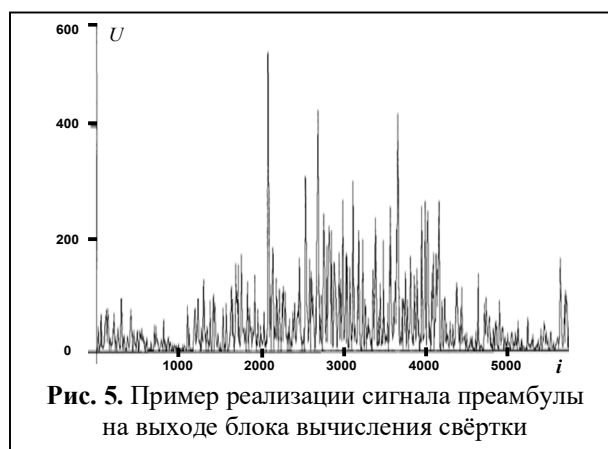
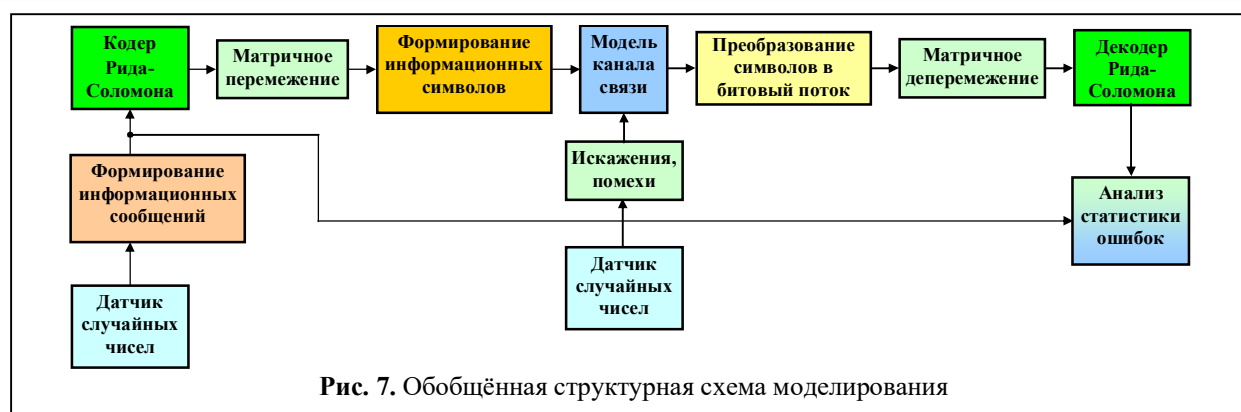


Рис. 5. Пример реализации сигнала преамбулы на выходе блока вычисления свёртки



Рис. 6. Процесс свёртки двух информационных символов



### Результаты тестовых испытаний устойчивости кодера РС к ошибкам в канале связи

В общем случае для проведения статистических испытаний многократно моделируется информационное сообщение, которое далее кодируется, проходит матричный перемежитель, искажается на случайных позициях (имитация ошибок канала связи), поступает на деперемежитель и декодируется. По результатам декодирования и сравнения с исходными данными можно оценить вероятностные характеристики кодера и его способности по восстановлению полезной информации. Обобщённая структурная схема организации статистического эксперимента представлена на рис. 7.

На первом этапе исследований проверялась устойчивость кодера (без перемежения) к битовым ошибкам: определялась способность декодера восстанавливать исходное сообщение, т.е. исправлять возникающие в процессе передачи и приёма ошибки в символах. При определении устойчивости кодера использовалась следующая методика. Исходное сообщение генерировалось случайным образом в виде последовательности из 7-и символов и подавалось на кодирующее устройство РС, на выходе которого формировалась последовательность из 15-и бит (символов). Результаты декодирования подтвердили стабильную и корректную работу кодера.

В случае определения характеристик устойчивости кодера к ошибкам в модель канала связи вводятся искусственные ошибки, позиции которых имеют равномерное вдоль сообщения распределение от 0 до 14. Ошибка моделируется

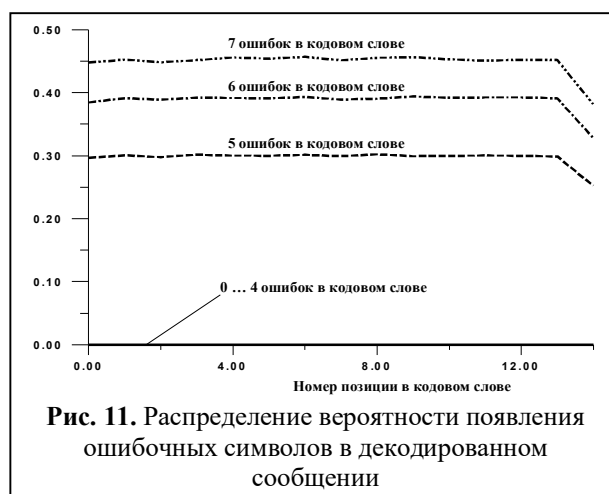
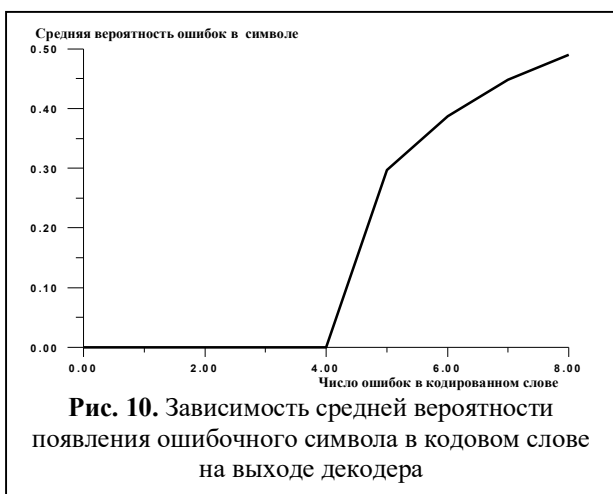
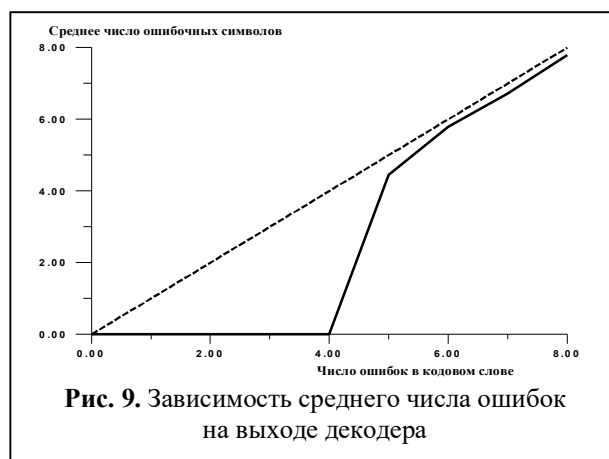
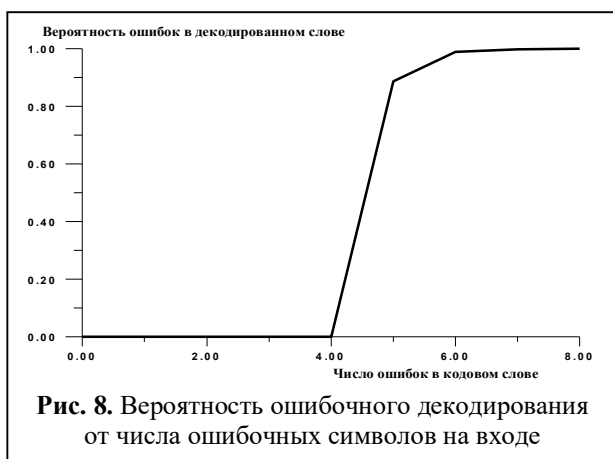
путём инверсии бита на данных случайных позициях. В программе моделирования предусматривается возможность для предотвращения повторяющихся позиций и значений символов.

Для характеристики результатов статистического эксперимента использовались: вероятность появления ошибочных декодированных сообщений; вероятность появления ошибочных символов в декодированных сообщениях; среднее число ошибочных символов и их позиции в информационном сообщении.

На рис. 8 представлена зависимость вероятности ошибок в кодовом слове из 15 символов после декодирования. График показывает, что 4 битовые ошибки, возникающие в канале связи, декодирующее устройство РС(15,7) способно обнаружить и исправить. Как только число ошибок будет больше четырёх, вероятность ошибки в слове резко возрастает почти до уровня 0,9. При 7...8 ошибочных символах вероятность ошибки приёма превышает 0,999.

На рис. 9 приведена зависимость среднего числа ошибочных символов на выходе декодирующего устройства от числа ошибок в канале передачи данных. Пунктиром представлена линейная зависимость  $y = x$ . Графики показывают, что среднее число ошибочных символов на выходе декодера несколько меньше числа введённых ошибок, однако по мере увеличения их числа оба значения сближаются.

На рис. 10 представлена зависимость средней вероятности появления ошибочного символа в декодированном слове от числа ошибок на входе декодера. График показывает, что при числе ошибок более 4-х, когда безошибочное декоди-



рование прекращается, вероятность становится равной 0,3. По мере увеличения числа ошибок на входе вероятность ошибки в символе приближается к 0,5. Это означает, что символ с равной вероятностью может быть воспринят как правильным, так и ошибочным.

На рис. 11 представлена зависимость распределения средней вероятности появления ошибочного символа в зависимости от его позиции в кодированном слове. Графики показывают, что при равномерном распределении позиций ошибок в кодированном слове в декодированном слове средняя вероятность ошибок также распределяется равномерно.

По вероятности правильного декодирования код РС(15,7) имеет заметные преимущества перед свёрточным кодом. В рассматриваемой конфигурации обработки при наличии от 1 до 4 ошибок он обеспечивает 100 % приём. Свёрточный кодек при наличии одной символьной ошибки обеспечивает правильный приём лишь в 94% случаев;

при наличии двух ошибок — в 43%.

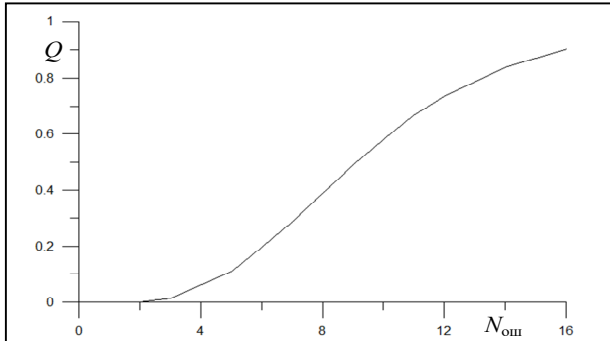
Для передачи сообщений объёмом более 8 бит использовался ансамбль кодов Голда, в котором номера символов имели битовое представление.

Исходная последовательность символов Голда формируется однократно или многократно (для получения усреднённых характеристик) с



**Таблица 1.** Зависимость вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов от числа ошибочно принятых символов Голда (без перемежения)

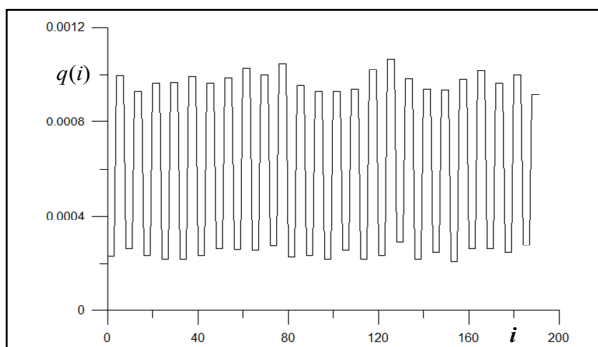
$N_{\text{ош}}$	2	3	5	7	8
$Q$	0,0	0,0145	0,109	0,288	0,389
$N_{\text{ош}}$	9	11	12	14	16
$Q$	0,49	0,668	0,735	0,839	0,903



**Рис. 13.** Зависимость вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов от числа ошибочно принятых символов Голда  $N_{\text{ош}}$  (перемежение отсутствует)

помощью датчика случайных чисел. Ошибки канала связи моделировались путём изменения номера символа Голда на случайных позициях. Количество таких ошибочно принятых символов Голда  $N_{\text{ош}}$ . На выходе цифрового приёмника анализируется последовательность информационных бит. В качестве статистических характеристик использовались: распределение вероятности битовых ошибок по сообщению  $q(i)$  и вероятность  $Q$  появления хотя бы одной ошибки в последовательности информационных бит.

Рассмотрим сначала случай приёма без пере-

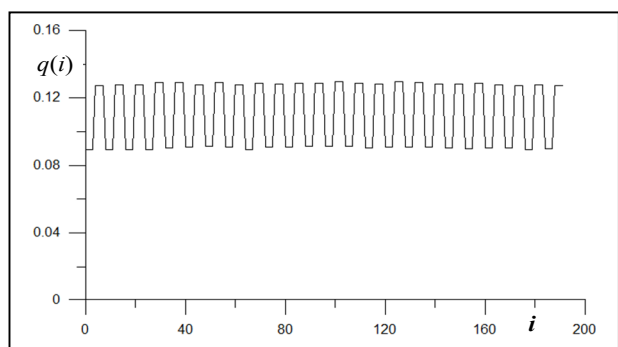


**Рис. 14.** Распределение вероятности битовой ошибки  $q(i)$  при наличии 3 ошибок в символах Голда

межения символов. На рис. 12 показан пример распределения вероятности битовой ошибки  $q(i)$  по сообщению для  $N_{\text{ош}} = 16$  ошибок в последовательностях Голда. Отметим, что вероятность битовой ошибки при отсутствии перемежения имеет равномерное распределение по сообщению, что характерно для кодека РС. Результаты проведенных экспериментов по оценке вероятности  $Q$  неправильного приёма сведены в таблицу 1 и представлены на рис. 13. Статистический эксперимент показал, что безошибочный приём информации возможен только при  $N_{\text{ош}} < 3$ .

### Статистические характеристики обработки «перемежитель-кодек»

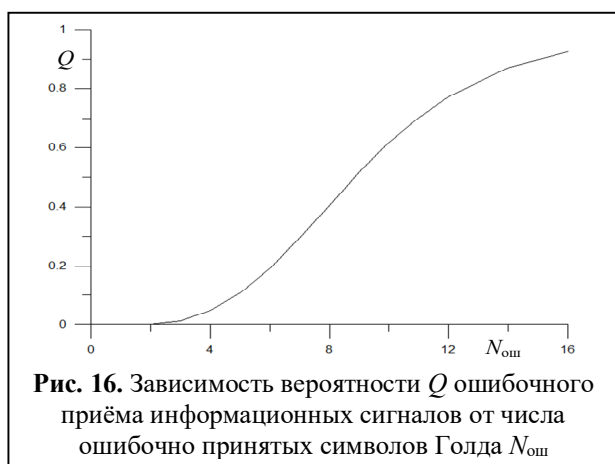
В качестве процедуры «перемежение-деперемежение» была использована простая перестановка строк и столбцов (транспонирование матрицы). На рис. 14, рис. 15 представлены распределения вероятности возникновения битовых ошибок  $q(i)$  в сообщении при различном числе ошибок в последовательности символов Голда ( $N_{\text{ош}} = 3$  и 16 соответственно). В поведении графиков проявляются следующие характерные особенности. Зависимости носят колебательный скачкообразный характер, причём вероятности ошибочного приёма одинаковы для групп смежных символов по 4 бит, а в соседних полубайтах величина вероятности ошибки изменяется в 1,3...5 раз. Это объясняется тем, что декодер Рида — Соломона целиком исправляет пакеты



**Рис. 15.** Распределение вероятности битовой ошибки  $q(i)$  при наличии 16 ошибок в символах Голда

**Таблица 2.** Зависимость вероятности ошибочного приёма информационных сигналов  $Q$  от числа ошибочно принятых символов Голда

$N_{\text{ош}}$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	16
$Q$	0,0	0,013	0,048	0,108	0,192	0,295	0,407	0,516	0,617	0,703	0,772	0,87	0,926



**Рис. 16.** Зависимость вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов от числа ошибочно принятых символов Голда  $N_{\text{ош}}$

ошибок длительностью полубайт, а в эффекте скачкообразного изменения вероятности ошибочного приёма проявляется детерминизм процедуры деперемежения. Данные эксперименты показали, что увеличение числа ошибок в символах Голда почти в 5 раз привело к увеличению вероятности битовой ошибки в 200 раз, при этом средний уровень вероятности ошибки остаётся таким же, каким был до перемежения.

В таблицу 2 сведены экспериментально полученные значения вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационного сигнала в зависимости от числа  $N_{\text{ош}}$  ошибочных символов Голда. Приведённые данные показывают, что небольшое количество ошибок в символах Голда (включая  $N_{\text{ош}} = 2$ ) может быть исправлено сквозным устройством обработки, однако начиная с  $N_{\text{ош}} = 3$  вероятность ошибочного приёма начинает возрастать. Графически данная зависимость представлена на рис. 16.

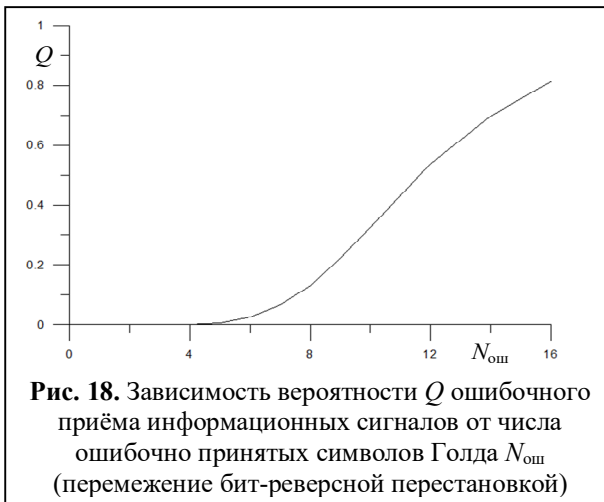


**Рис. 17.** Распределение вероятности битовой ошибки  $q(i)$  при наличии 16 ошибок в символах Голда (перемежение бит-реверсной перестановкой)

Сравнительный анализ этих результатов с данными таблицы 1 и рис. 12 показывает, что до значения  $N_{\text{ош}} = 6$  вероятность ошибочного приёма на 5...10 % меньше, чем при отсутствии перемежения. Однако при дальнейшем увеличении числа ошибок в символах Голда вероятность  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов увеличивается на 2...3%. Высокая эффективность использования деперемежения проявляется при непрерывном потоке ошибок, когда неправильно классифицированные символы следуют подряд. Тогда деперемежитель разносит ошибки по временной оси, тем самым обеспечивая возможность правильного декодирования.

### Влияние вида деперемежения на характеристики приёма

Учитывая, что наличие перемежения не приводит к нарушению безошибочного приёма при  $N_{\text{ош max}} = 2$ , можно сделать вывод о неэффективности применяемого простого перемежения, поскольку существенного улучшения качества приёма при его использовании не достигается. Использование другого алгоритма перемежения позволяет улучшить характеристики сквозного тракта. В рассматриваемом случае применялось модифицированное матричное перемежение — дополнительная бит-реверсная перестановка столбцов. Пример распределения вероятности битовой ошибки  $q(i)$  по сообщению при наличии 16 ошибок в символах Голда приведён на рис. 17. Сравнение данного графика с графиком рис.



**Рис. 18.** Зависимость вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов от числа ошибочно принятых символов Голда  $N_{\text{ош}}$  (перемежение бит-реверсной перестановкой)

**Таблица 3.** Зависимость вероятности  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов от числа ошибочно принятых символов Голда (перемежение бит-реверсной перестановкой)

$N_{\text{ош}}$	4	5	6	7	8	9	10	12	14	16
$Q$	0,0	0,0058	0,026	0,067	0,133	0,222	0,324	0,537	0,697	0,813

15 показывает, что применение дополнительной перестановки существенно выравнивает зависимость вероятности битовой ошибки по сообщению, а максимальный уровень  $q(i)$  снижается. Это приводит к общему снижению вероятности  $Q$  ошибочного приёма сообщений.

Результаты проведённых экспериментов по оценке вероятности  $Q$  неправильного приёма сведены в таблицу 3. Результаты показывают, что за счёт дополнительного перемежения удаётся увеличить число допускаемых ошибок при классификации символов Голда до 4-х, т.е. в 2 раза больше, чем во всех предыдущих случаях.

Анализ этих результатов показывает, что при числе ошибочно принятых символов Голда, равном  $N_{\text{ош}} = 5$  и вплоть до значения  $N_{\text{ош}} = 10$  включительно, вероятность ошибочного приёма в 2...2,5 раза меньше, чем в соответствующих предыдущих случаях. При дальнейшем росте числа ошибок различие в зависимостях начинает уменьшаться. Так при значении  $N_{\text{ош}} = 16$  перемежение перестановкой обеспечивает только на 10% меньшую вероятность  $Q$  ошибочного приёма информационных сигналов по сравнению со случаем использования простого перемежения.

### Заключение

В системах передачи информации с высоким уровнем помех эффективным является применение помехоустойчивого кодирования, при котором за счёт обнаружения и исправления ошибок удаётся восстановить исходное сообщение. Например, рассмотренный кодек РС(15,7) способен исправить до 4-х ошибочно принятых битов. Однако в гидроакустических каналах, особенно в условиях мелкого моря или шельфа многолучевое распространение акустических волн приводит к замираниям и появлению серий ошибок. На такие помехи кодеки, как правило, не рассчитаны, поэтому наблюдается существенно снижение помехоустойчивости. Простое мат-

ричное перемежение перестановкой строк и столбцов позволяет разнести последовательно идущие ошибки по всему сообщению и тем самым уменьшить число ошибок из-за воздействия замираний канала.

При работе со сложными сигналами (символами) в виде кодов Голда простое перемежение позволило безошибочно принимать сообщения в условиях ошибочного приёма 2-х символов. Для повышения помехоустойчивости предложена дополнительная бит-реверсная перестановка, которая привела к увеличению максимально допустимых символьных ошибок до  $N_{\text{ош макс}} = 4$  и улучшению безошибочного приёма при многолучевом распространении сигналов.

Таким образом, предложенный вариант перемежения повышает эффективность работы сквозного тракта, заметно улучшает качество приёма при сериях ошибок, возникающих в канале связи. Одновременно снижаются требования к качеству классификации символов или к уровню помех в канале связи.

### Литература

1. Тарасюк Ю.Ф. Гидроакустическое телеуправление. Л.: Судостроение, 1985. 200 с.
2. Бурдинский И.Н., Матвиенко Ю.В., Миронов А.С., Рылов Р.Н. О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами // Подводные исследования и робототехника. 2008. №1(5). С. 39–46.
3. Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // Акустический журнал. 2010. Т. 56. №2. С. 245–255.
4. Золотарев В.В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: Справочник. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 126 с.
5. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. М.: Техносфера, 2005. 320 с.
6. Быков В.В. Использование символьного перемежения для формирования кодов, исправляющих длинные пакеты ошибок в потоке MPEG-2 // Intermati-2015. Материалы Междунар. научно-техн. конф. Ч. 5. МИРЭА, 2015. С. 178–181.
7. 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.

8. Кузнецов В.С., Шевченко И.В. и др. Генерация ансамблей кодов Голда для систем прямого расширения спектра // Труды МАИ. Выпуск № 96. 18 с.

Поступила 25 октября 2025 г.

9. Зубарев В.Ю., Пономаренко Б.В., и др. Построение минимаксных ансамблей аperiodических кодов Голда // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23. №2. С. 26–37

English

## RESILIENCE OF THE REED–SOLOMON INTERLEAVED CODEC TO CHANNEL ERRORS

**Alexey Valerievich Orlov** — General Director, JSC "Research Institute "Submicron", JSC "Research Institute "Submicron"<sup>1</sup>.

**Alexey Valerievich Rakitin** — PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute<sup>2</sup> (branch) of the "Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs"; the Head of Department, JSC "Research Institute "Submicron"<sup>1</sup>.

**Viktor Vasilyevich Kostrov** — Grand Dr. in Engineering, Professor, Department of Radio Engineering, Murom Institute<sup>2</sup> (branch) of the "Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs"; Lead Software Engineer, JSC "Research Institute "Submicron"<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Address: 124460, Russian Federation, Moscow, Zelenograd, Georgievsky ave., 5, b. 2.

<sup>2</sup>Address: 602264, Russian Federation, Vladimir region, Murom, Orlovskaya str., 23.

E-mail: [submicron@se.zgrad.ru](mailto:submicron@se.zgrad.ru)

*Abstract:* For long-range systems, an important area of development is to increase noise immunity. In sonar control and telemetry systems operating at low signal-to-noise ratios and significantly multipath propagation of signals, signal fading often occurs, which leads to large errors in the transmitted information. Reducing the probability of errors occurring in the communication channel is carried out in several ways: using noise-tolerant coding to reduce errors dispersed over the message, using interleaving to solve fading problems and an ensemble of complex signals with phase-code manipulation. This article presents the results of a study of the combination of interleaving with one of the block coding methods, the Reed–Solomon code, which is used to encode information and control signals of limited duration. Unlike encoding, the character interleaving operation does not introduce redundancy into the signal and does not lead to a decrease in the data transfer rate. It is shown that the effectiveness of using interleaving is manifested in a continuous stream of errors, when incorrectly classified characters follow more than 2 times in a row. Then the interleaver spreads the errors along the time axis, thereby ensuring the possibility of correct decoding. An additional bit-reverse rearrangement of the columns makes it possible to even out the dependence of the error probability on the place of their occurrence in the message and reduce its value by 20-30%.

*Keywords:* hydroacoustic system, Reed-Solomon code, multipath propagation, interleaver, complex phase-modulated signal, communication channel errors.

### References

1. Tarasyuk Yu.F. Hydroacoustic Remote Control. Leningrad: Sudostroenie, 1985. 200 p.
2. Burdinsky I.N., Matvienko Yu.V., et al On the Application of Complex Signals in Hydroacoustic Navigation and Control Systems of Underwater Robots. Underwater Research and Robotics. 2008. No. 1(5). Pp. 39–46.
3. Kuryanov B.F., Penkin M.M. Digital Acoustic Communication in Shallow Water for Oceanographic Applications. Acoustic Journal. 2010. Vol. 56. No. 2. Pp. 245–255.
4. Zolotarev V.V., Ovechkin G.V. Error Correcting Coding. Methods and Algorithms: Handbook. Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom, 2004. 126 p.
5. Morelos-Zaragoza R. The Art of Error Correcting Coding. J.Wiley & Sons, Ltd, 2006. 278 p.
6. Bykov V.V. Using Symbolic Interleaving to Generate Codes Correcting Long Error Bursts in an MPEQ-2 Stream. Internati-2015. Proc. of the Int. Scientific and Technical Conf. Part 5. MIREA, 2015. Pp. 178–181.
7. Radzhabov H.M., Radzhabov U.M., et al. Convolutional code decoding amid symbol interlacing. Radioengineering and telecommunication systems. 2018. No. 3. Pp. 46–53.
8. Kuznetsov V.S., Shevchenko I.V., Volkov A.S., Solodkov A.V. Generation of Gold code ensembles for direct spread spectrum systems. Proceedings of MAI. Iss. 96. 18 p.
9. Zubarev V.Yu., Ponomarenko B.V., Shanin E.G., Vostretsov A.G. Formation of Minimax Ensembles of Aperiodic Gold Codes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020. Vol. 23. No. 2. Pp. 26–37.