

Труды МАИ. 2023. № 128
Trudy MAI, 2023, no. 128

Научная статья
УДК 621.391
DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)

РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ КАНАЛА С ГРУППИРУЮЩИМИСЯ ОШИБКАМИ

Алексей Станиславович Волков

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Зеленоград, Россия

leshvol@mail.ru

Аннотация. Разработана имитационная модель канала связи с группирующимися ошибками на основе модели Гилберта. Помимо группирующихся ошибок в канале связи, модель учитывает и аддитивный белый гауссовский шум, позволяющий наблюдать наличие случайных ошибок.

Рассмотрены свойства канала связи на основе модели Гилберта и влияние появления группирующихся ошибок на передаваемую последовательность дискретных сообщений. Разработан алгоритм генерации группирующихся ошибок согласно ключевым параметрам, входящим в вероятностную схему. Предложена модифицированная схема системы связи с возможностью дополнения кодовой последовательности нулями и матричного перемежения кодовых символов, за счёт которых достигается регулировка скорости недвоичного кода Рида-Соломона.

Выполнена оценка расхождения вероятности битовой ошибки (BER) от глубины матричного перемежителя при наличии группирующихся ошибок, а также при помощи статистического моделирования получены вероятности битовой ошибки.

Представлены оценки методов борьбы с группирующимися ошибками при наихудших сценариях выбранной вероятностной схемы.

Ключевые слова: дискретный канал, группирующиеся ошибки, модель Гилберта, вероятностная схема, перемежение, помехоустойчивое кодирование, вероятность битовой ошибки

Для цитирования: Волков А.С. Разработка имитационной модели канала с группирующимися ошибками // Труды МАИ. 2023. № 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)

Original article

THE DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL OF CHANNEL WITH BURST ERROR ARRAYS

Alexey S. Volkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Zelenograd, Russia
leshvol@mail.ru

Abstract. The article studied one of the most up-to-date problems in telecommunications associated with the burst-error channels. Thus, the model of a discrete channel in communication system under the burst-error arrays based on Gilbert model was developed.

The burst error affects critically the received signal reliability under conditions of Gaussian noise and in some cases fully distorts the received signal. The purpose of the article consists in considering the main properties of the Gilbert channel and their impact on the data sequence transmitted through wireless communication channel under conditions of the additive white Gaussian noise (AWGN).

The valuation function of the main variables in Gilbert channel is the probability scheme $N = \langle P, Q, E \rangle$, which includes the purposive parameters being described by this model: P is a probability of a “good” channel state, Q is a probability of a “bad” state, while E stands for the probability of error in the “bad” channel state. Thus, the article proposes the adaptive generation algorithm of burst-error arrays according to the said parameters of the probability scheme.

Simulation model of the communication system by the Gilbert model and AWGN was developed. An extra block, allowing the code word supplementing with zeroes was described for it. This backup block was introduced for the further studies with a view to additional energy gain.

One of the most important topics we touched upon is matrices interleaver and deinterleaver. In the end of the article, we adduce the simulation results with the advantage of about 3dB from this algorithm application. Besides, the burst-error correction procedure by the non-binary Reed-Solomon encoder/decoder with various schemes in the discrete communication channel is being considered.

Conclusion of the article gives the simulated method assessment with plots and comments on the bit errors probability dependence on the E_s/N_0 , its disalignment range, as well as analysis of the matrix interleaver depth. A system communication model including

the Gilbert channel in conjunction with the AWGN is proposed. This work allows assessing the effectiveness of solutions on the package error control under conditions of Gaussian noise.

Keywords: discrete channel, burst-errors channel, Gilbert model, probability scheme, interleaver, error-correction codes, bit-error rate

For citation: Volkov A.S. The development of simulation model of channel with burst error arrays. *Trudy MAI*, 2023, no. 128. DOI: [10.34759/trd-2023-128-12](https://doi.org/10.34759/trd-2023-128-12)

Введение

В семействе дискретных каналов связи, в зависимости от возникшей помехи, как правило, различают две категории выходных символов: искаженные и неискаженные. Первые представляют собой сумму информационной последовательности и последовательности ошибки, вторые – только информационную последовательность. Условимся различать два состояния дискретного канала «хорошее» и «плохое». В «хорошем» состоянии ошибок в канале не возникает, а в «плохом» – возникают. Последовательность $\{S_i\}$ двоичных символов посимвольно обозначим как $s = \{0,1\}$, вероятности их возникновения обозначим как $P(s = 0) = 1 - p_s$, $P(s = 1) = p_s$ [1].

Смена двух состояний может возникать на любой позиции передаваемой последовательности символов с учётом сохранения состояния на смежных позициях, следовательно, в последовательности $\{S_i\}$, будем различать серию из единичных и нулевых состояний. Серию символов $\{S_i\}$, искаженных ошибками, назовём группирующейся ошибкой последовательности $\{E_i\}$. В рамках одной

группирующей ошибки $\{S_i\}$ появление ошибочных единичных символов носит независимый характер и имеет условную вероятность e [2]. Индексы позиций в группирующихся ошибках и в промежутке между ними называют их длинами. Как правило, вероятность ошибки в состоянии канала «плохой» равна $p_s \leq 0,5$ [3].

Группирующиеся ошибки в дискретном канале

Одной из первых разработанной моделью, описывающей группирующиеся ошибки в дискретном канале, являлась биномиальная модель. Данная тривиальная модель описывалась лишь одним параметром, отвечающим за вероятность неверного приема единичного символа $p_{\text{ош}}$. Вероятность возникновения сочетания ошибок веса m подчиняется биномиальному закону распределения [4]:

$$P'(m, n) = p_{\text{ош}}^m (1 - p_{\text{ош}})^{n-m} \quad (1)$$

При помощи (1) аналогично определяется и вероятность искажения принятой последовательности n с количеством ошибок равным m [4,5]:

$$P(m, n) = C_n^m P'(m, n) = C_n^m p_{\text{ош}}^m (1 - p_{\text{ош}})^{n-m} \quad (2)$$

Так как группирующиеся ошибки с большой долей вероятности возникают в каналах с памятью, научным сообществом было разработано множество аппроксимированных математических моделей, позволяющих имитировать появление группирующихся ошибок в реальных каналах, при помощи дополнительных параметров, управляющих вероятностной схемой [5, 6].

На сегодняшний день для моделирования каналов с группирующимися ошибками используют известные математические модели, представленные в таблице 1:

Таблица 1

Модели, имитирующие пакетированные ошибки в канале

Простая цепь Маркова [1]	Очень грубая модель с одним состоянием канала
Модель Гилберта (МГ) [7-10]	Оптимальная модель с двумя состояниями канала
Модель Эллиота-Гилберта [11]	Допущение ошибок в обоих состояниях канала
Модель Маккуло [12]	Изменение состояния непосредственно вслед за ошибкой
Модель Смита-Боуэна-Джойса [13]	Три состояния канала
Модель Петровича [20]	Четыре состояния канала
Модель Фричмана и Фричмана-Свободы [15]	Много входных параметров. k состояний, где лишь одно «плохое»
Модель Беннета-Фройлиха [16]	Слишком высокая сложность вычисления вероятностей различных сочетаний ошибок в схеме.

Модель Эллиота-Гилберта является обобщением модели Гилберта. Она построена на основе цепей Маркова, однако отличается тем, что допускает возникновение ошибки в обоих состояниях. Так, возникает дополнительный, четвёртый, параметр, определяющий вероятность появления ошибки в хорошем состоянии.

Модель Макулло строится на предположении, что изменение текущего состояния возможно лишь непосредственно вслед за ошибкой [4]. Её недостатком является зависимость вероятности ошибки не только от состояния канала на данной позиции, но и на последующих позициях включительно.

В модели Смита-Боуэна-Джойса и модели Петровича канал имеет три и четыре состояния соответственно. Увеличение такого числа состояний делает их затратными по отношению к числу параметров, необходимых для вычисления.

Модель Фричмана-Свободы является частным случаем модели Фричмана, которая не имеет ограничений на число «хороших» и «плохих» состояний. Согласно модели Фричмана-Свободы в ней предполагается использование всего одного «плохого» состояния, однако переходы между состояниями невозможны.

Единственная модель, которая допускает перекрытие группирующихся ошибок – модель Беннета-Фройлиха. группирующиеся ошибки возникают независимо, каждая позиция входной последовательности может стать началом группирующейся ошибки с постоянной вероятностью, которая не зависит от позиций предыдущих группирующихся ошибок [4]. Данная модель сводится к модели Гилберта. Однако из-за высокой сложности расчёта вероятностей сочетаний ошибок в каждом состоянии данная модель практически непригодна.

Необходимо учитывать, что все подходы к описанию реальных каналов через математическую аппроксимированную модель дискретного канала с памятью несут в себе подбор входных параметров к вероятностной схеме. Такую абстракцию необходимо считать формальной, поскольку при построении таких моделей не

учитываются причины, вызывающие группирующиеся ошибки, лишь подбирается вероятностная схема.

Из [5, 17] известно, что сложность модели $O(mn)$, описываемая графом с двумя параметрами: m – число ребер графа, n – число вершин графа, нелинейно возрастает с ростом числа состояний в вероятностной модели:

Таблица 2

Сложность модели канала и системы

Число состояний дискретного канала	Сложность модели канала $O(mn)$	Сложность модели системы $O(mn)$
2	8	48
3	21	297
4	40	1024

Таким образом, из таблицы 2 можно сделать вывод, что переход от более сложных моделей с большим числом состояний к простым моделям сложность модели канала уменьшается в 2 и 4 раза, соответственно [5]. Это приемлемый показатель с точки зрения моделирования и затрат машинного времени в системе с адаптивными алгоритмами передачи данных по беспроводному каналу связи, а также точности, анализа и декодирования [18].

В данной статье будет более детально рассмотрена модель Гилберта, так как она использует марковские цепи с двумя возможными состояниями канала, позволяет генерировать группирующиеся ошибки и обладает низкой сложностью реализации по сравнению с другими моделями.

Модель Гилберта

Дискретный канал может находиться в одном из двух состояний: «хорошем» и «плохом». В «хорошем» состоянии ошибок в канале не наблюдается, а в «плохом» – возможно возникновение ошибки с фиксированной вероятностью $p_{\text{ош}}$. Смена состояний может быть описана цепью Маркова, показанной на рисунке 1 [14].

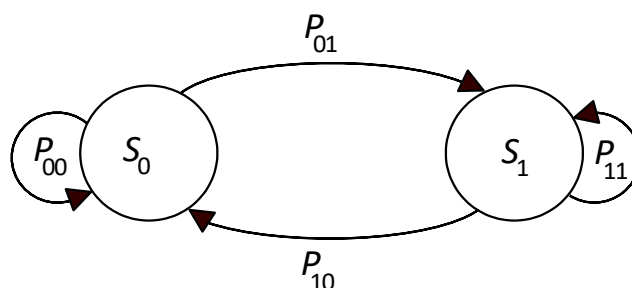


Рисунок 1 – Граф состояний модели Гилберта

На рисунке 1 S_0 – «плохое» состояние, S_1 – «хорошее», а вероятность P_{ij} есть вероятность перехода на следующем шаге из текущего состояния S_i в состояние S_j . Дискретным шагом системы является единичный элемент, который представляет собой один бит из кодового слова. Статистика ошибок $\{E_i\}$ и изменение состояний модели полностью определяется матрицей переходных вероятностей \mathbf{P} [19], которая является стохастической:

$$\mathbf{P} = \begin{vmatrix} P_{00} & P_{01} \\ P_{10} & P_{11} \end{vmatrix} \quad (3)$$

Важным свойством переходных вероятностей P_{01} и P_{10} является то, что для отображения группирования ошибок в единую группирующуюся ошибку,

вероятности изменения состояний должны быть значительно меньше вероятностей их сохранения (т.е. длительность интервала нахождения состояния выше чем время перехода):

$$P_{01} \ll P_{00}, P_{10} \ll P_{11} \quad (4)$$

Вероятность нахождения канала в «плохом» или «хорошем» состоянии P_0 и P_1 соответственно с учётом введенных переходных вероятностей может быть оценена как

$$P_1 = \frac{P_{01}}{P_{10} + P_{01}}, P_0 = \frac{P_{10}}{P_{10} + P_{01}}, \quad (5)$$

Усредненная вероятность возникновения ошибки в канале $\bar{p}_{\text{ош}}$ будет определяться как

$$\bar{p}_{\text{ош}} = p_{\text{ош}} P_0 \quad (6)$$

Группирующей ошибкой считается как минимум два идущих подряд ошибочных элемента. На практике часто сталкиваются с ситуацией, когда необходимо оценить количество неповреждённых элементов в группирующей ошибке длиной Δl . Для этого проанализируем вероятность длин серий безошибочных элементов в канале на основе модели Гилберта. Прежде условимся считать, что ошибка может возникать только в «плохом» состоянии и начинаться с единицы.

Тогда на следующем шаге «плохое» состояние может сохраниться с вероятностью P_{00} , при этом с вероятностью $P_{00}(1 - p_{\text{ош}})$ оно сменится на «хорошее» и будет ноль или же единица с вероятностью $P_{00}p_{\text{ош}}$

Следующий шаг будет аналогичен предыдущему, за исключением возможности перехода в «хорошее» состояние с вероятностью P_{01} . Обобщая вероятность появления нуля после единицы, можно представить в виде [20]:

$$P(0|1) = P_{01} + P_{00}(1 - p_{\text{ош}}) \quad (7)$$

Пусть после единицы возникает серия из z нулей. Вероятность этого запишем в виде $P(0^z|1)$. Рассмотрим три возможные ситуации с серией нулей после единицы:

- 1) Цикл серии 0^z в «плохом» состоянии (П)
- 2) Цикл серии 0^z в «плохом» состоянии с возможностью перехода в «хорошее» (ПХ)
- 3) Цикл серии 0^z в «плохом» состоянии затем в «хорошем» и обратно в «плохое» (ПХП)

Таким образом обобщая результаты для небольших z и ситуацию П, имеем:

$$P_{\text{П}}(0^z|1) \triangleq \sum_{i=1}^z [10^i] \triangleq \sum_{i=1}^z [P_{00}(1 - p_{\text{ош}})]^i \quad (8)$$

Для ситуации ПХ:

$$P_{\text{ПХ}}(0^z|1) \triangleq \sum_{i=1}^z [10^i] \triangleq \sum_{i=1}^z (P_{01}[P_{11}]^{i-1}) \quad (9)$$

Для ситуации ПХП:

$$P_{\text{ПХП}}(0^z|1) \triangleq \sum_{i=1}^z [10^i] \triangleq \sum_{i=1}^z \left((P_{00}(1 - p_{\text{ош}}))^{i-1} P_{01} P_{11}^{z-i} \right) \quad (10)$$

Обобщая полученные выражения для вероятности серий $\{0^k 1\}$ получим:

$$P(0^z 1|1) = \sum_{i=1}^z \left(\left((P_{11}(1 - p_{\text{ош}}))^i P_{00} p_{\text{ош}} + (P_{00}(1 - p_{\text{ош}}))^{i-1} P_{01} P_{11}^{z-i} \right) \right) \quad (11)$$

При $z = 0$ формула (10) вырождается в $P(1|1) = P_{00} p_{\text{ош}}$.

Условно «плохое» состояние дискретного канала на основе модели Гилберта может начинаться независимо как с единицы, так и с нуля. Следующий за единицей ноль может возникать в «плохом» состоянии с вероятностью $P_{00}(1 - p_{ош})$ или при переходе в «хорошее» состояние с вероятностью P_{01} . Тогда справедливо определить набор двух нулей после единицы [20]:

- При сохранении «плохого» состояния вероятность возникновения двух нулей равна $(P_{00}(1 - p_{ош}))^2$;
- На протяжении одного шага «плохое» состояние сохранялось и затем система перешла в «хорошее» $P_{00}(1 - p_{ош})P_{01}$;
- Система перешла в «хорошее» состояние ровно на один шаг, а затем вернулась в «плохое» $P_{01}P_{10}(1 - p_{ош})$;
- Произошёл переход системы в «хорошее» состояние на один шаг, с его сохранением на последующие с вероятностью $P_{01}P_{11}$;

Обращая внимание на то, что каждый последующий ноль может возникать как в «плохом», так и в «хорошем» состоянии, можно заметить, что число всех возможных альтернатив получения серии из z нулей после единицы равно 2^z . Тогда возможно провести суммирование 2^z вероятностей всех возможных альтернатив, которые представляют собой произведения k сомножителей. Запишем все эти множители в виде матрицы \mathbf{D} для серии (10^i) , где $i = 1$ [5,17,20]:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} P_{11} & (1 - p_{ош})P_{10} \\ P_{01} & (1 - p_{ош})P_{00} \end{pmatrix} \quad (12)$$

В (12) первая строка элементов подчиняется случаю возникновения одного нуля в «хорошем» состоянии, нижняя – в «плохом».

Для случая с двумя нулями после единицы (10^i), где $i = 2$, путём домножения первой строки матрицы на P_{01} и нижней на $P_{00}(1 - p_{\text{ош}})$:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} P_{11}^2 + P_{10}(1 - p_{\text{ош}})P_{01} & P_{11}P_{10}(1 - p_{\text{ош}}) + P_{10}(1 - p_{\text{ош}}) \\ P_{01}P_{11} + P_{00}(1 - p_{\text{ош}})P_{01} & P_{11}P_{10}(1 - p_{\text{ош}}) + (P_{00}(1 - p_{\text{ош}}))^2 \end{pmatrix} \quad (13)$$

Далее проводя аналогичные преобразование домножения верхней строки на P_{01} и нижней на $P_{00}(1 - p_{\text{ош}})$ мы получим вероятности для серии (10^3). Далее обобщая результаты для серии длины $z \geq 1$, имеем:

$$P(0^z|1) = P_{01} \sum_{D(1,:)} (\mathbf{D}^{z-1}) + P_{00}(1 - p_{\text{ош}}) \sum_{D(2,:)} (\mathbf{D}^{z-1}) \quad (14)$$

Алгоритм генерации группирующихся ошибок

В качестве модели для имитационного моделирования группирующихся ошибок в системе был разработан алгоритм генерации потока ошибок по модели Гилберта с выбором его параметров в соответствии с вероятностной схемой, рисунок 2.

Входными параметрами для данного алгоритма генератора будут служить:

- P_{11} – Вероятность сохранения «хорошего» состояния;
- P_{00} – Вероятность сохранения «плохого» состояния;
- $p_{\text{ош}}$ – Вероятность возникновения ошибки в «плохом» состоянии;
- $N_{\text{ИП}}$ – Входной массив двоичной последовательности данных;
- $N_{\text{ПО}}$ – Массив, формирующий группирующуюся ошибку согласно

$\langle P_{11}, P_{00}, p_{\text{ош}} \rangle$;

- $N_{\text{ВП}}$ – Выходной массив, содержащий в себе группирующиеся ошибки.

На начальном этапе следует цикл, ограничивающий длину массива $N_{ПО}$ в соответствии с массивом входных данных $N_{ИП}$. Далее следует несколько циклов, которые представляют генератор ошибок на основе состояния, в котором находится модель. Производится вставка серий нулей и единиц, соответствующая длине состояния P_{11} или P_{00} .

На последнем этапе формируется выходной массив $N_{ВП}$ при помощи логического оператора «или» $N_{ВП} = xor(N_{ИП}, N_{ПО})$.

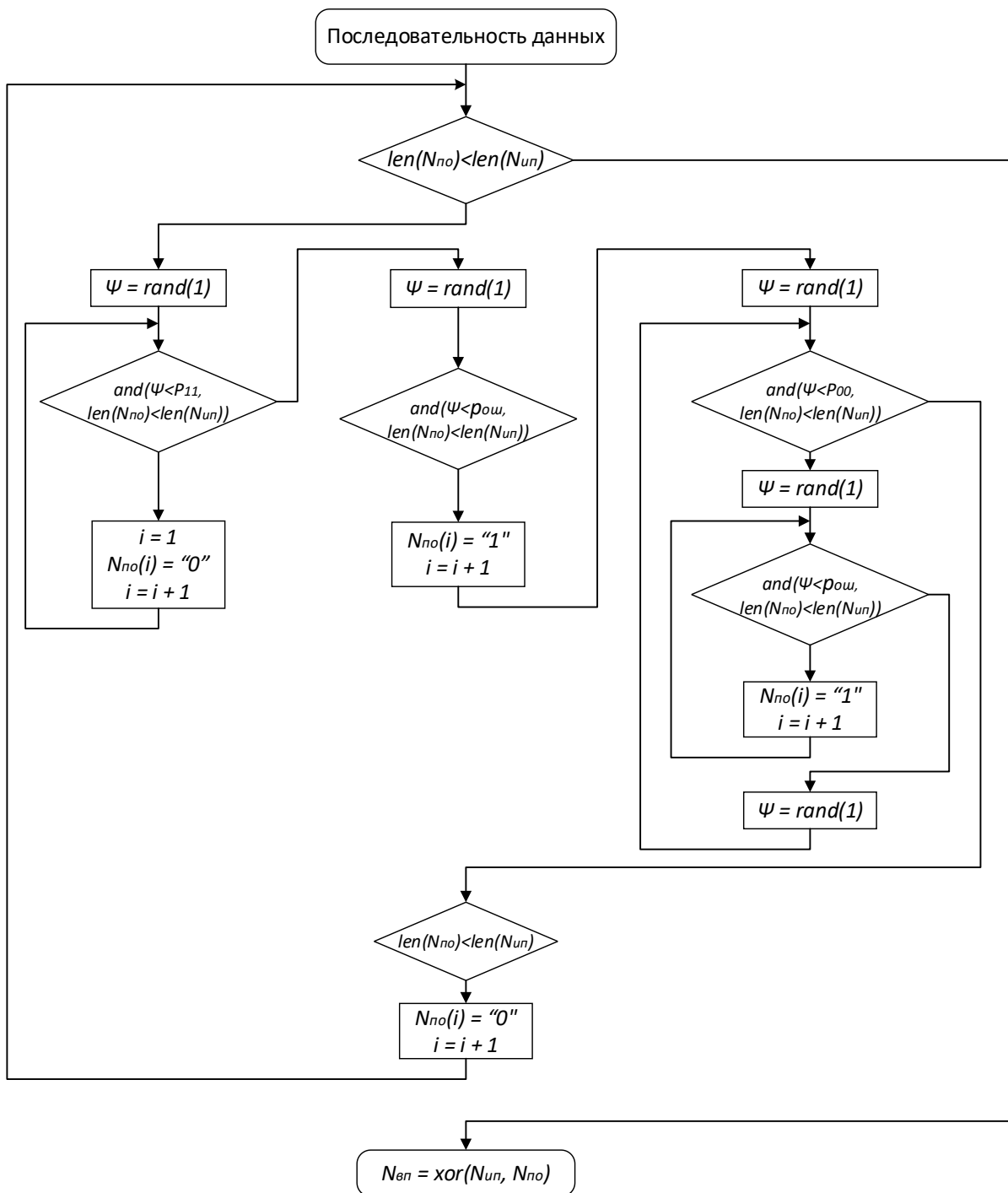


Рисунок 2 – Алгоритм формирования группирующихся ошибок на основе модели Гилберта

Использование блочных кодов, перемежение

В дискретных каналах с независимой ошибкой обычно достаточно применения корректирующих кодов. Для борьбы с группирующимися ошибками необходимо

применять каскадные кодовые конструкции, включающие перемежитель между смежными ступенями кода [21].

Как правило, при появлении группирующихся ошибок блочные и сверточные коды не всегда могут обеспечивать высокую достоверность приёма информации. Так существует несколько разработок специальных кодов, нацеленных на борьбу с длинными сериями группирующихся ошибок, например, коды Файера, Хагельбаргера и другие [21]. Однако, в связи с высокой вычислительной сложностью, которая растёт экспоненциально с ростом длины блока, их применение на практике ограничено.

Как известно, помехоустойчивые блочные коды, в частности, код Рида-Соломона (RS), обозначаемый как $RS(n, k, t)$, где n – количество кодовых символов в кодируемом блоке, k – число подлежащих кодированию информационных бит, t – минимальное кодовое расстояние. Данный код может исправить t искаженных символов [21]:

$$t = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor \quad (15)$$

В данной статье будет рассмотрен код Рида-Соломона с параметрами $RS(7, 3, 3)$ и $RS(63, 53, 6)$.

В системах беспроводной связи часто наблюдаются эффекты глубокого замирания сигналов, из-за их многолучевого распространения в канале связи. В данном случае эффективным является использование процедуры перемежения на передатчике и обратного перемежения на приёмнике. Данная процедура применяется

с целью рассредоточения группирующихся ошибок в одиночные или независимые [22-25].

Перемежение символов, подлежащих передаче, может быть реализовано блоковыми и сверточными процедурами. Существует множество подвидов блочных перемежителей: случайные, матричные, алгебраические, со спиральным сканированием и т.д. В данной статье будет рассмотрен и разработан матричный блочный перемежитель, работа которого будет описана дальше.

На рисунке 3 представлен результат работы перемежения символов в кодовом слове длиной 20. При блочном перемежении каждый элемент исходной последовательности подвергается разбиению на α блоков по n элементов, где α – глубина перемежения. Запись элементов в прямоугольную матрицу перемежения происходит построчно, а считывание по столбцам [26]. В результате соседние элементы исходной последовательности разносятся при передаче на α элементов, рисунок 3,а.

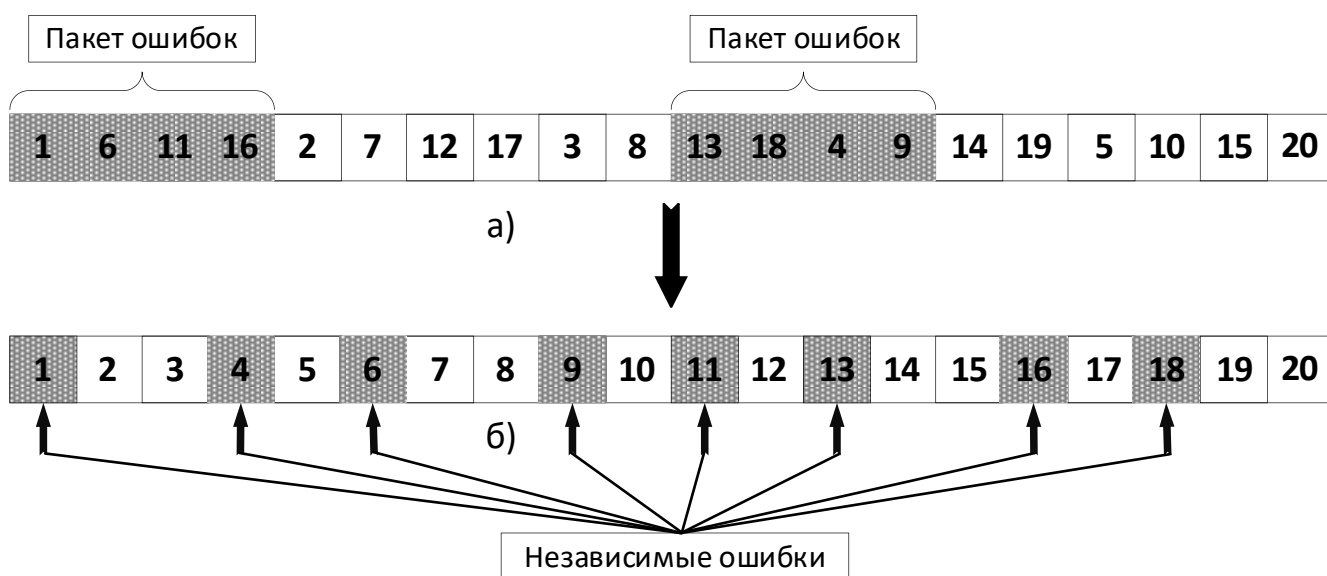


Рисунок 3 – Последовательности а) на передаче; б) на приёме

В данном примере после депережежения расстояние между поврежденными элементами минимально и равно 1.

Имитационная модель системы связи с АБГШ

Для проведения имитационного моделирования группирующихся ошибок в дискретном канале по модели Гилберта была предложена схема системы связи, представленная на рисунке 4. Рассмотрим одного пользователя. Передаваемая последовательность данных, представленная в виде массива b^1 , поступает в блок кодера код Рида-Соломона $RS(n, k, m)$.

Набор параметров, определяющих дискретный канал на основе модели Гилберта, представим следующим образом:

$$N = \langle P, Q, E \rangle, \quad (16)$$

где параметры P, Q, E соответствуют введенным ранее вероятностям P_{11}, P_{00} и $p_{\text{ош}}$ соответственно, при этом в данной работе зафиксировано значение $E = 0,5$.

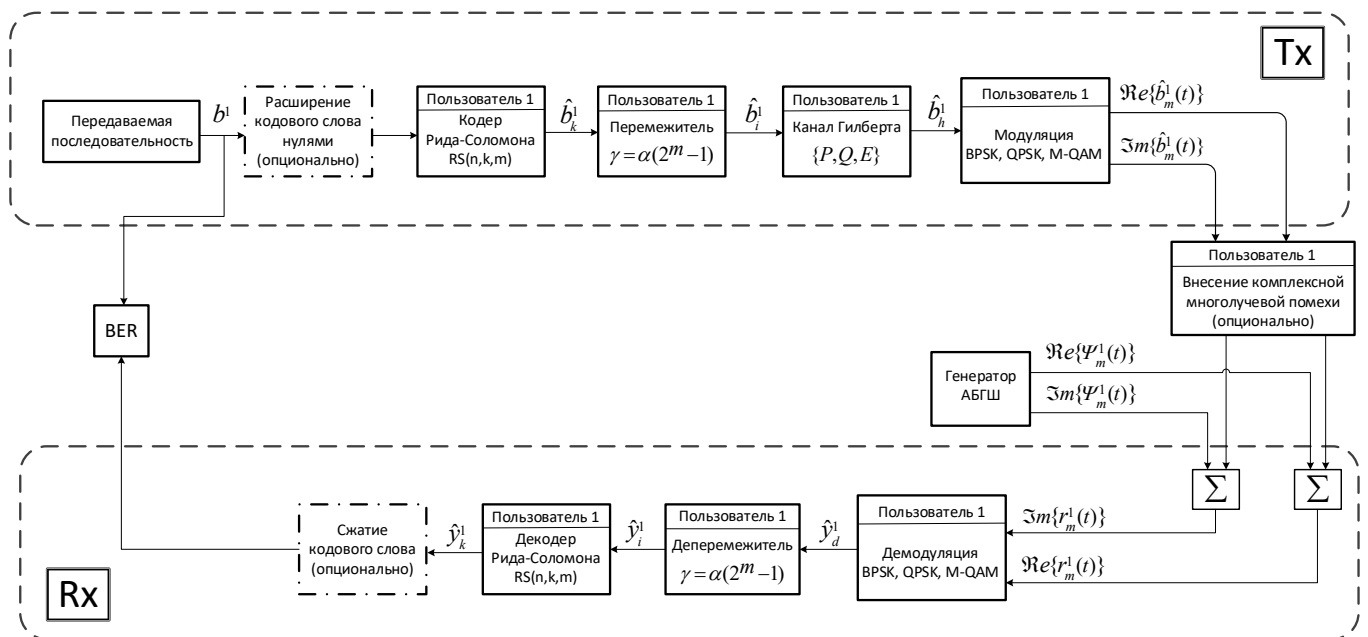


Рисунок 4 – Схема модели канала

Следующим шагом является перемежение, описанное выше. На вход перемежителя приходит закодированная последовательность \hat{b}_k^1 , которая уже несет в себе избыточность кода. На выходе получаем перемешанный массив \hat{b}_i^1 , который поступает в блок канала Гилберта с заданными параметрами. На выходе этого блока получаем искаженную последовательность \hat{b}_h^1 с группирующей ошибкой. Далее производится модуляция, прохождение сигнала через канал с опцией возможного добавления АБГШ и обратная процедура на приемнике.

Результатом данного имитационного моделирования будет являться определение зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения E_s/N_0 .

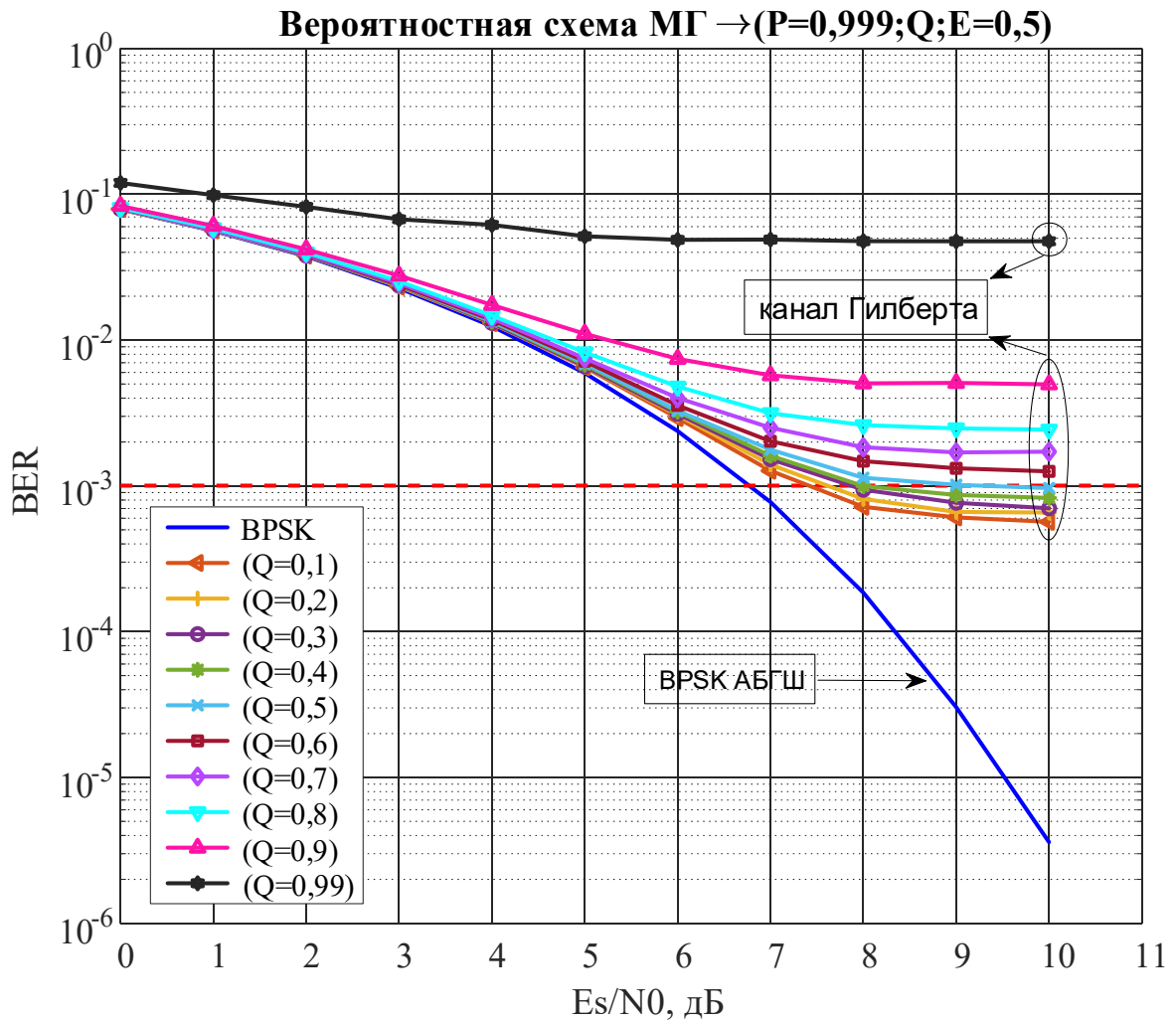


Рисунок 5 – Зависимость BER от E_s/N_0 для модуляции BPSK в условиях канала Гилберта для разных значений Q и наличия АБГШ

Влияние группирующихся ошибок на достоверность принятого сигнала можно наблюдать на рисунке 5. Из него можно сделать вывод, что при фиксированном значении параметра $P = 0,999$ и различных значения Q не наблюдается повышения достоверности с ростом отношения E_s/N_0 . Так, для вероятностей $Q = \{0,9; 0,99\}$, которые представляют наибольший интерес, значения BER не достигают уровня 10^{-3} при значении E_s/N_0 равном 10 дБ.

С целью повысить достоверность принятого сигнала и его энергетический выигрыш применим недвоичный помехоустойчивый код Рида-Соломона RS(7, 3, 3).

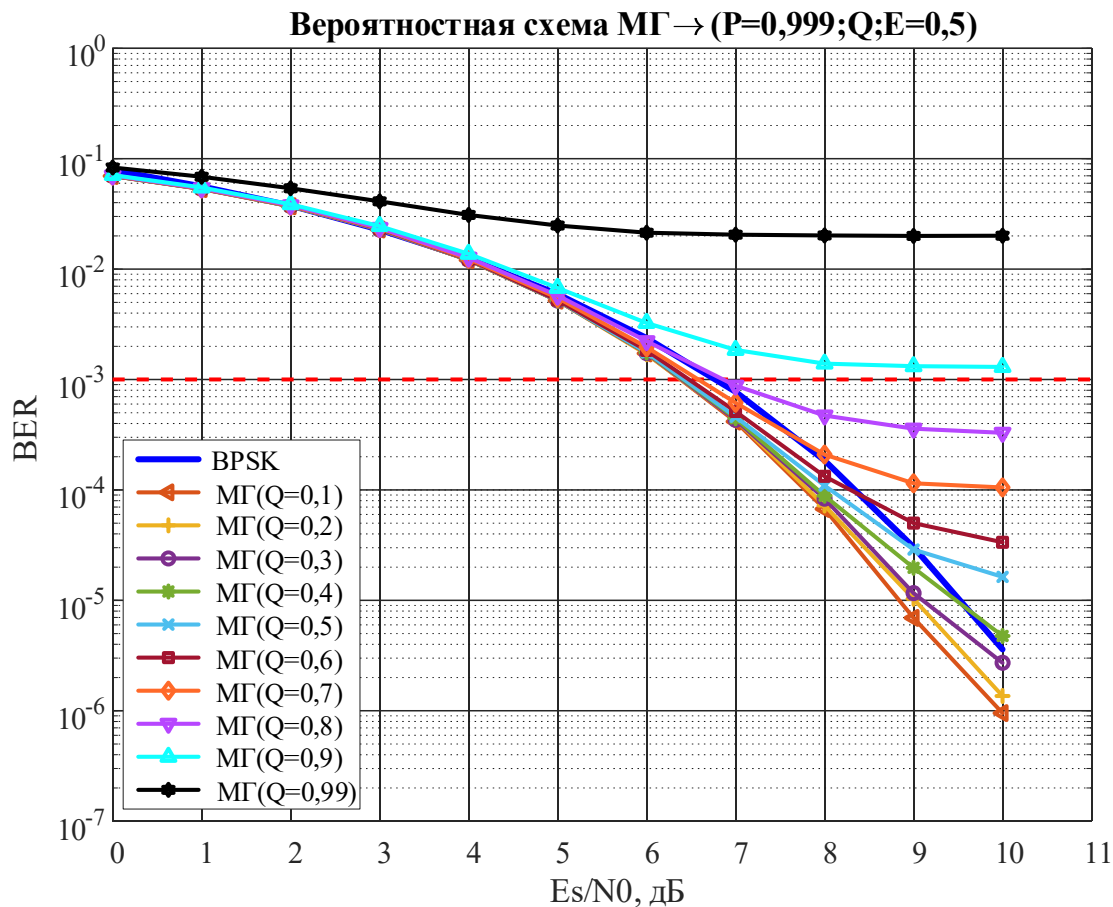


Рисунок 6 – Зависимость BER от E_s/N_0 для модуляции BPSK с кодом RS(7,3,3) и наличии АБГШ

Из рисунка 6 можно видеть, что блочный код RS(7,3,3), способный справлять до 2 кодовых символов, повысил достоверность принятого сигнала. Однако этого недостаточно, для вероятностей $Q = \{0,9; 0,99\}$ значения BER всё также имеют значения на уровне 10^{-3} . Целью являются понижения значения E_s/N_0 по уровню ниже, чем 10^{-5} . Для этого необходимо использовать код с параметрами RS(63, 53, 6).

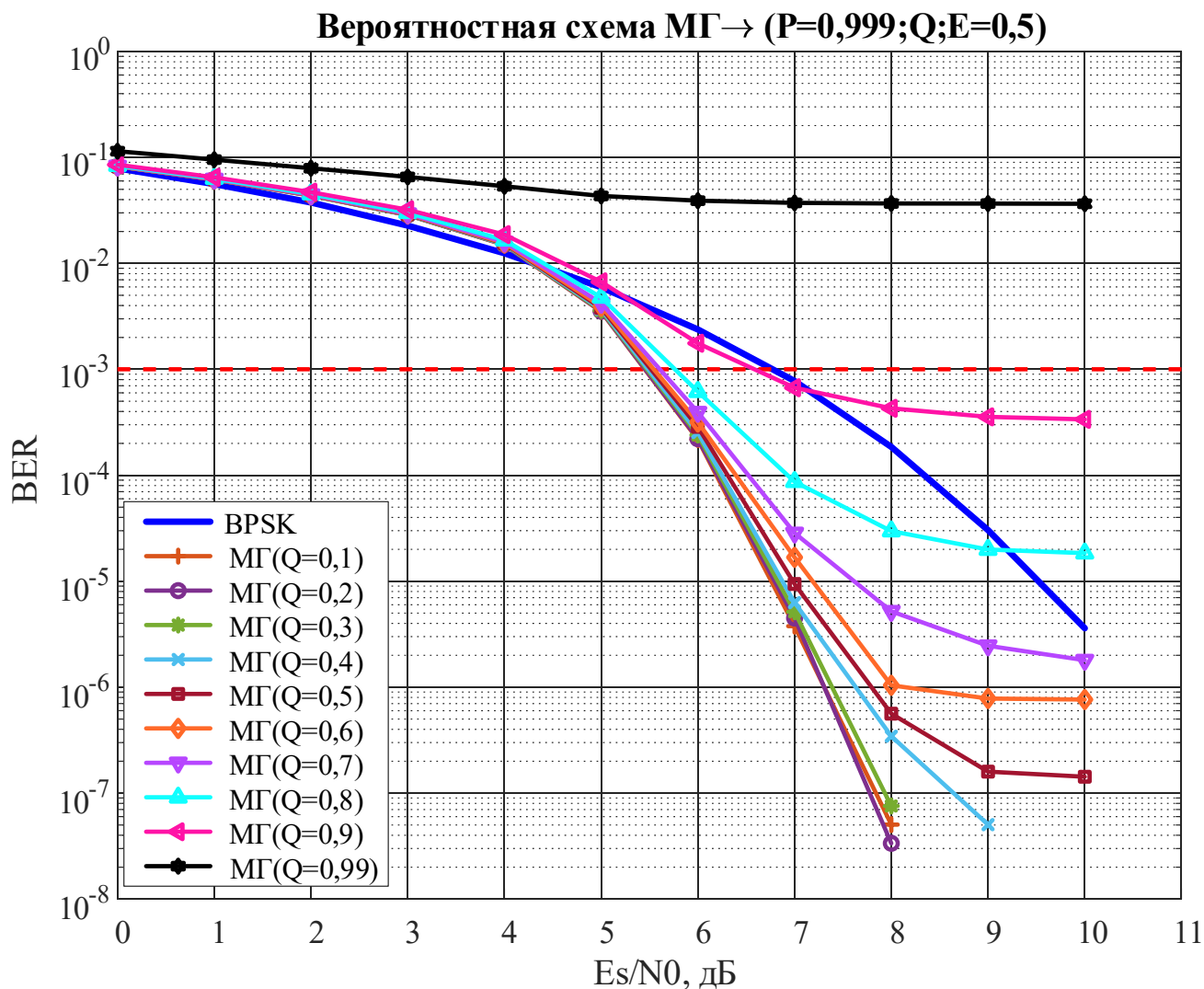


Рисунок 7 – Зависимость BER от E_s/N_0 для модуляции BPSK с кодом RS (63,53,6) и АБГШ

Применение помехоустойчивого кода Рида-Соломона длины 63 и его возможность исправлять до 5 искажённых символов RS(63,53,6) даёт существенный энергетический выигрыш кодирования до 5 дБ по уровню 10^{-5} в сравнении с RS(7,3,3).

Далее представлено распределение вероятности появления битовой ошибки в системе связи с полной вариацией параметров модели при фиксированном значении E_s/N_0 . Добавим блок перемежения в системе имитационного моделирования (рисунок

4) и рассмотрим, как меняется значение BER с увеличением глубины перемежения $\alpha \in \mathbb{N}$, который изменяется по формуле:

$$y = \alpha(2^m - 1) \quad (17)$$

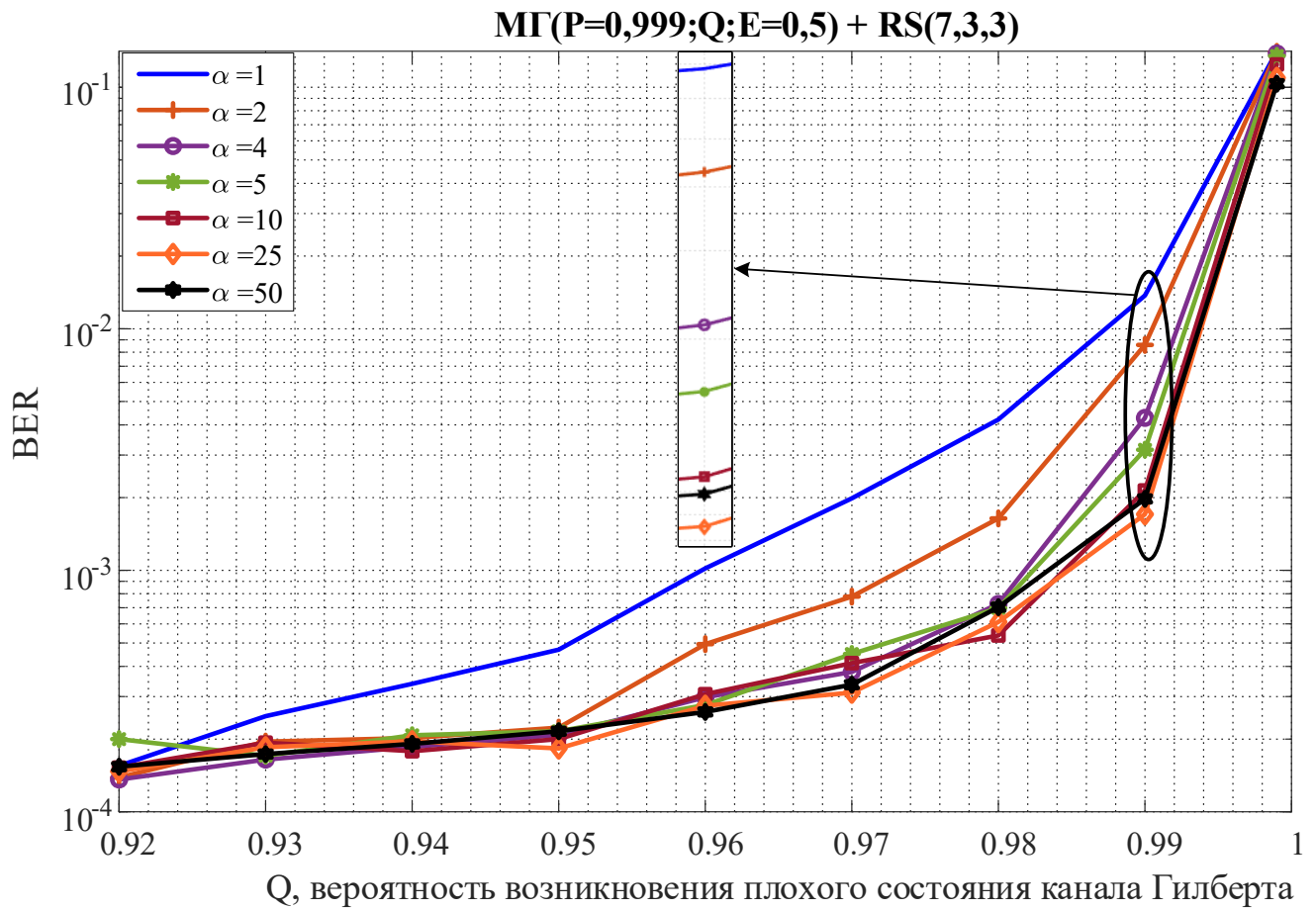


Рисунок 8 – Зависимость BER от вероятности возникновения «плохого» состояния канала Q, $E_s/N_0 = 8$ дБ, BPSK, RS (7,7,3)

На рисунке 8 в качестве примера использовался код RS(7,7,3) с переменной глубиной перемежения. Использование значения $\alpha > 50$ вызывает насыщение BER по уровню 10^{-3} .

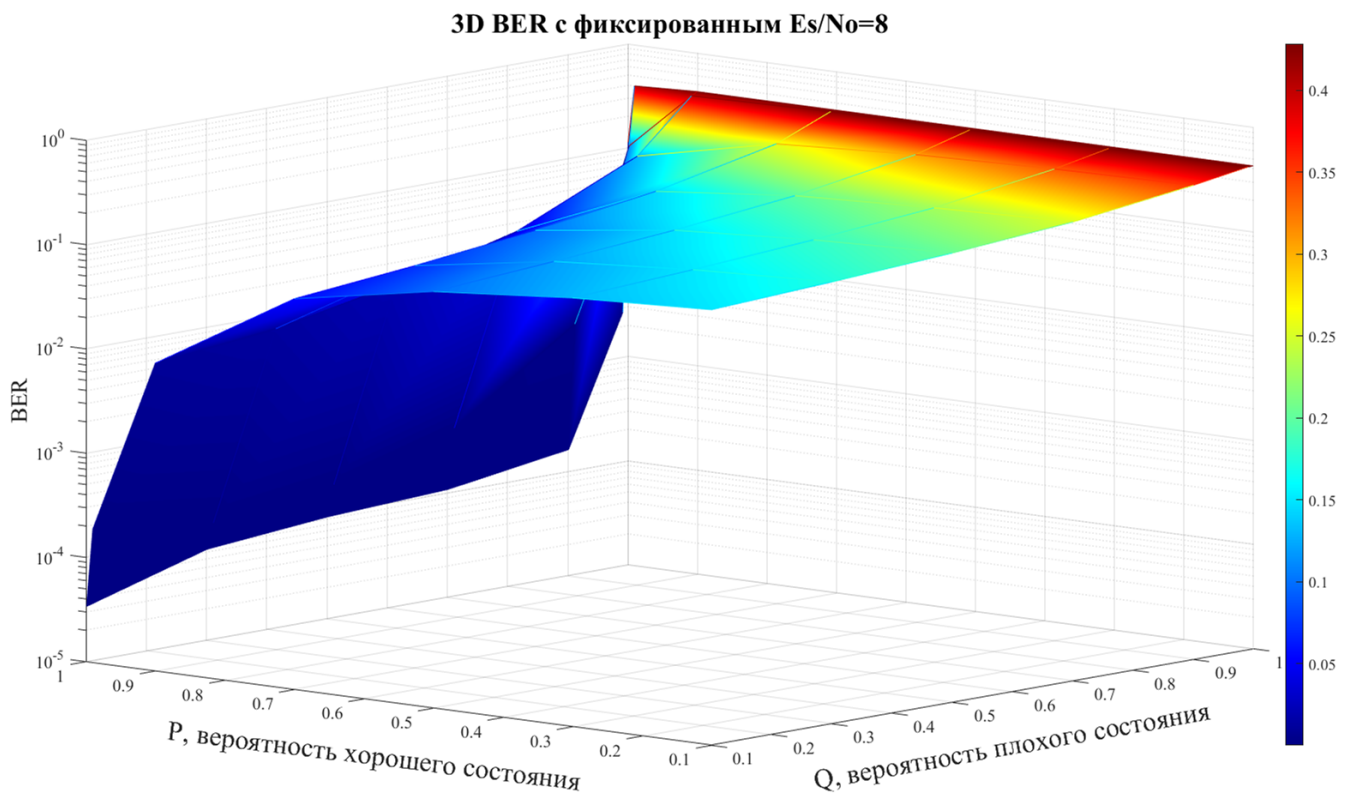


Рисунок 9 – 3D поверхность зависимости BER от P и Q , $E_s/N_0 = 8$ дБ, RS(7,3,3)

Для более наглядного понимания того, как связаны вероятность возникновения битовой ошибки и параметры вероятностной схемы модели Гилберта представлен рисунок 9 при фиксированном значении $E_s/N_0 = 8$ дБ.

Данная поверхность отражает влияние варьирования параметров модели Гилберта на значение BER. Так, можно заметить, что при низких значениях вероятности того, что сохранится «хорошее» состояние канала ($P = 0,1 \dots 0,6$) вероятность битовая ошибка распределена в диапазоне $0,04 \dots 0,2$ независимо от вероятности сохранения «плохого» состояния.

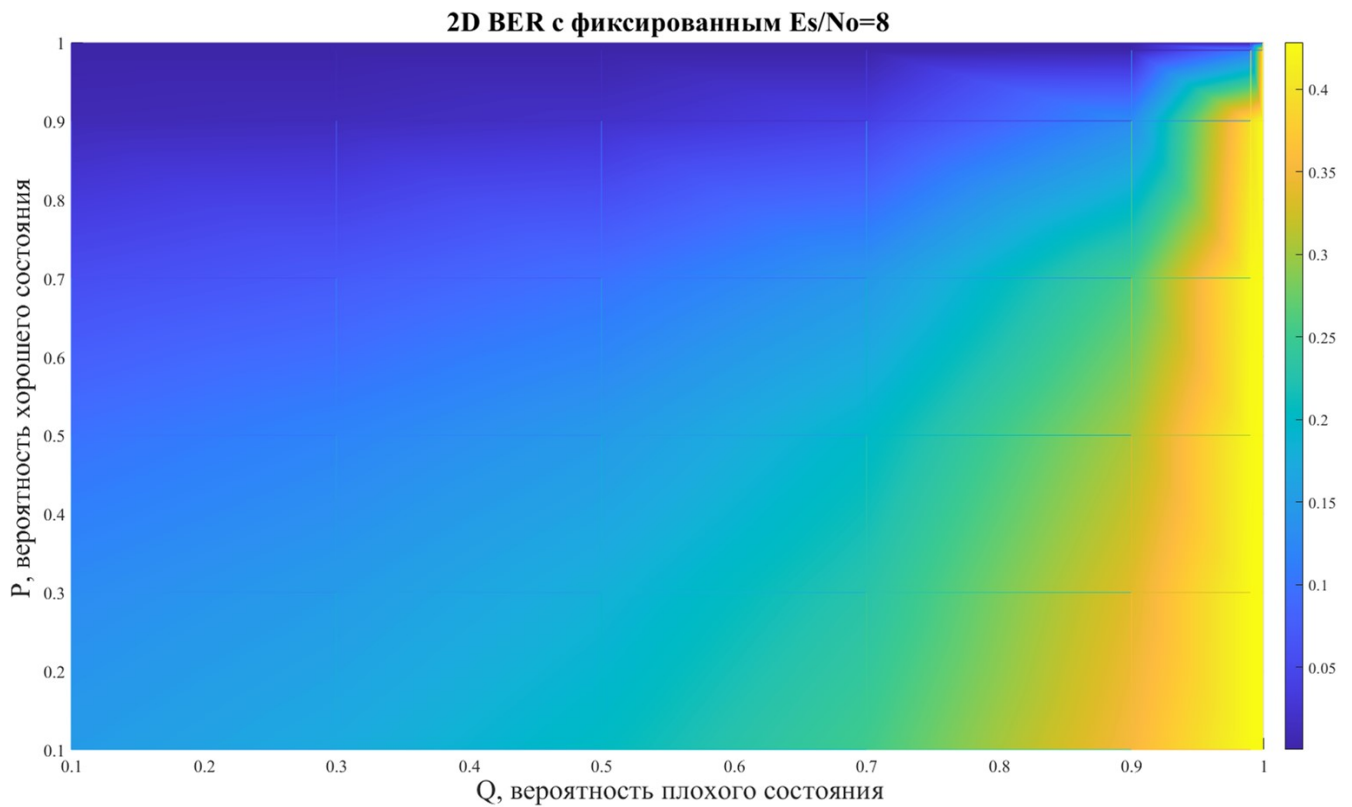


Рисунок 10 – 2D поверхность зависимости BER от P и Q, $E_s/N_0 = 8$ дБ, RS(7,3,3)

Рисунок 10 представляет собой вид сверху рисунка 9. На нём можно видеть распределение поверхности битовой ошибки при различных переходных вероятностях «хорошего» и «плохого» состояния при фиксированном уровне шума $E_s/N_0 = 8$ дБ. При высокой вероятности сохранения «плохого» состояния канала значения вероятности битовой ошибки остаются на уровне 10^{-3} при $P \geq 0,9$.

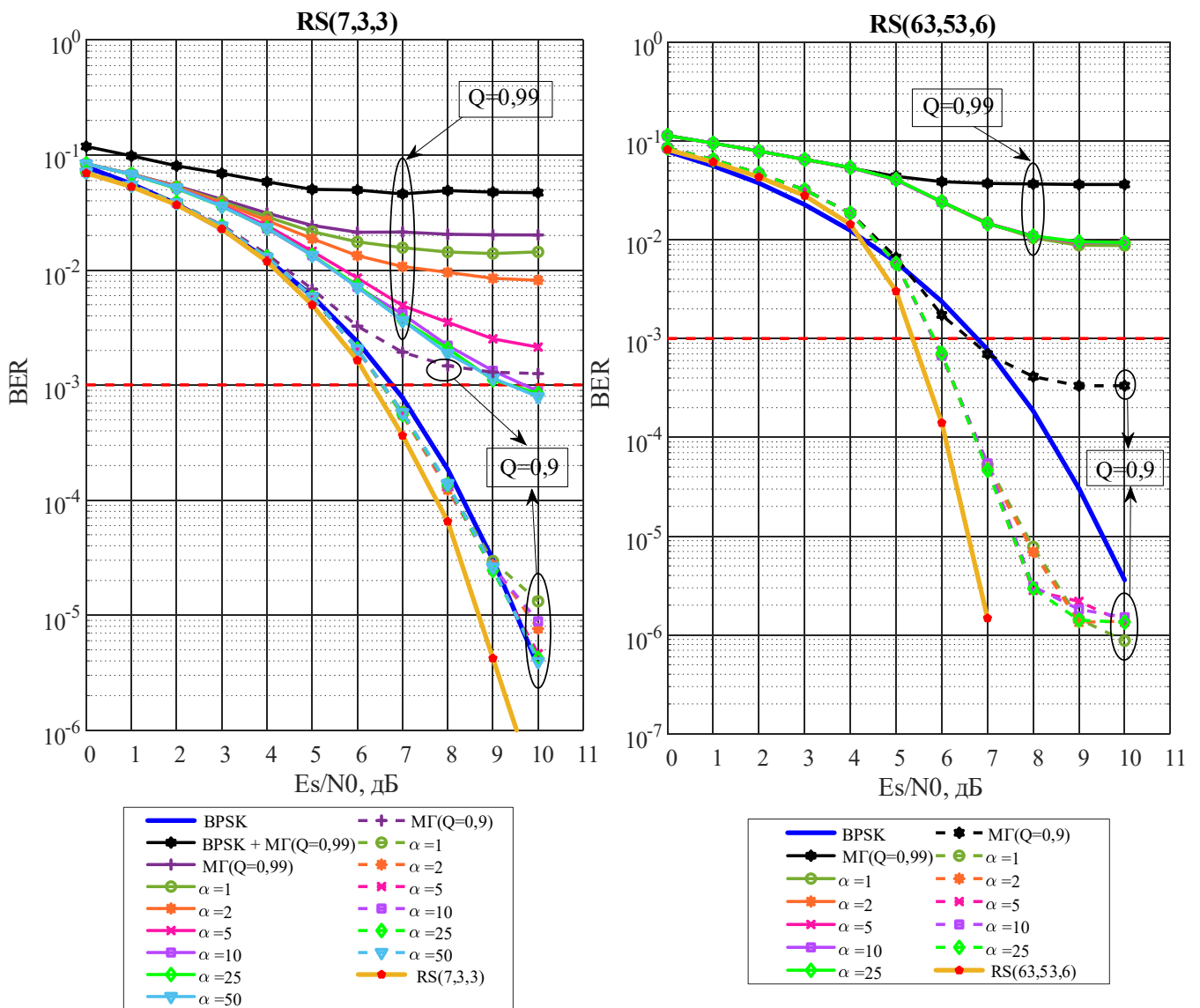


Рисунок 11 – Зависимость BER от E_s/N_0 для модуляции BPSK с кодом RS(7,3,3) и RS(63,53,6) при наличии перемежителя с глубиной α

Из анализа графиков на рисунке 11 видно, что использование перемежения совместно с кодом RS(7,3,3) и RS(63,53,6) дает энергетический выигрыш в условиях возникновения группирующихся ошибок. Использование глубины перемежения $\alpha \geq 50$ наблюдается эффект насыщения или достижение верхней границы значения вероятности битовой ошибки по отношению к E_s/N_0 .

В результате работы на основе статистического моделирования рассмотрены варианты борьбы с группирующимися ошибками в канале на основе модели Гилберта. Получены графики, показывающие влияние группирующейся ошибки на достоверность приёма дискретной последовательности как при помощи недвоичных блоковых кодов Рида-Соломона, так и с применением алгоритма блокового прямого и обратного перемежения кодовых символов. В результате моделирования было установлено, что энергетический выигрыш при использовании кода Рида-Соломона совместно с перемежением составит от 2 до 3 дБ при выборе набора параметров модели $N_1 = \langle 0,999; 0,9; 0,5 \rangle$. Также было выявлено, что в случае, когда набор параметров модели задан как $N_2 = \langle 0,999; 0,99; 0,5 \rangle$, использование различных кодовых схем совместно с большой глубиной перемежения позволяет достичь значения BER на уровне 10^{-3} , в то время как без их использования восстановить принятые данные не представляется возможным.

Список источников

1. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Советское радио, 1975. – 400 с.
2. Галлагер Р. Теория информации и надежная связь. - М.: Советское радио, 1974. – 720 с.
3. Павлов А.А., Романенко Ю.А., Царьков А.Н. и др. Оценка аппаратурной и временной избыточности при использовании аддитивного вектора ошибок для коррекции пакетных ошибок в цифровых системах передачи данных // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 7. С. 140-150. DOI 10.18127/j00338486-202107-18.

4. Блох Э.Л., Попов О.В., Турин В.Я. Модели источников ошибок в каналах передачи цифровой информации. – М.: Связь, 1971. – 312 с.
5. Таныгин М.О., Ахмад А.А.А., Власова А.О. Описание модели определения вероятности безошибочного принятия приемником пакетов сообщения // V Всероссийская научно-практическая конференция «Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения» (Курск, 15–16 апреля 2021): сборник статей. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. С. 358-362.
6. Шевченко В.А. Верхняя аддитивная граница вероятности ошибки в канале связи с памятью при использовании кодирования и псевдослучайного перемежения // Известия Института инженерной физики. 2019. № 2(52). С. 26-31.
7. Вересова А.М., Овчинников А.А. Об использовании согласованных метрик в каналах с памятью для кодов Гилберта // XXIII международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, 01–05 июня 2020): сборник статей. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. С. 176-182.
8. Овчинников А.А., Фоминых А.А. О некоторых распределениях иррегулярных низкоплотностных кодов в каналах с двумя состояниями // XXIV Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, 31 мая - 04 июня 2021): сборник статей. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2021. С. 132-138.

9. Джумков В.В., Мальцев Г.Н. Аддитивная граница вероятности ошибки на бит информации в дискретном канале передачи информации с помехоустойчивым кодированием и группированием ошибок // Информационно-управляющие системы, 2020. № 4. С. 78-86.
10. Крук Е.А., Овчинников А.А. Точная корректирующая способность кодов Гилберта при исправлении пакетов ошибок // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1 (80). С. 80-87.
11. Овчинников А.А., Вересова А.М. Сравнение вероятности ошибки декодирования кодов Рида-Соломона и низкоплотностных кодов в канале Гилберта - Эллиота // XXV Международная научная конференция «Волновая электроника и инфокоммуникационные системы» (Санкт-Петербург, 30 мая-03 июня 2022): сборник статей. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2022. С. 71-75.
12. McCullough, H. Richard, The binary regenerative channel // Bell System Technical Journal, 1968, vol. 47(8), pp. 1713-1735.
13. Шевцов А.В., Журбенко П.В. Модели ошибок в дискретных каналах связи // Вестник Морского государственного университета. 2016. № 75. С. 137-143.
14. Мальцев Г.Н., Джумков В.В. Обобщенная модель дискретного канала передачи информации с группированием ошибок // Информационно управляющие системы. 2013. № 1(62). С. 27-33.
15. C. Kim, J. -W. Kim, J. -S. No. New Design of Error Control Codes Resilient to Single Burst Error or Two Random Bit Errors Using Constacyclic Codes // IEEE Access, 2022, vol. 10, pp. 131101-131108, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3229427.

16. W. Bennett, F. Froehlich. Some results on the effectiveness of error-control procedures in digital data transmission // IRE Transactions on Communications Systems, 1961, no. 9, pp. 58-65.
17. Квашенников В.В., Бугаков И.А., Кузин А.В. Оценивание вероятностей приема помехоустойчивого кода в каналах с независимыми и группирующимися ошибками // Известия Института инженерной физики. 2020. № 4(58). С. 11-16.
18. Овчинников А.А., Вересова А.М. О метрическом описании каналов с памятью // Первая Всероссийская научная конференция «Обработка, передача и защита информации в компьютерных системах» (Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2020): сборник трудов. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. С. 193-196. DOI: 10.31799/978-5-8088-1452-3-2020-1-193-196.
19. Мелентьев О.Г., Шевнина И.Е. Соотношения параметров модели Гилберта и простой Марковской цепи // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. 2008. № 8. С. 243–246.
20. Мелентьев О.Г. Передача данных по каналам с группирующимися ошибками: монография. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2005. – 252 с.
21. Романенко Д.М., Кудлацкая М.Ф., Белькевич Р.И. Многомерная схема кодирования/декодирования для исправления многократных и группирующихся ошибок в каналах передачи данных // XXV Международная научно-техническая конференция «Современные средства связи» (Минск, 22-23 октября 2020): материалы

конференции. - Минск: Белорусская государственная академия связи, 2020. С. 211-213.

22. C.C. Trinca, C.D. De Albuquerque, R.P. Junior, J.C. Interlando, A.A. De Andrade and R. A. Watanabe. New Quantum Burst-Error Correcting Codes from Interleaving Technique, GLOBECOM 2022 // 2022 IEEE Global Communications Conference, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 5243-5248. DOI: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000761.

23. Богданов А.С., Шевцов В.А. Передача обслуживания по сигналам локальной радионавигационной сети // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=26041>

24. Богданов А.С., Шевцов В.А. Выбор способа синхронизации в имитационной модели адаптивных алгоритмов определения местоположения и управления // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63136>

25. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93398>

26. S. Jihwan, H.K. Lee. Burst Error Correction for Convolutional Code Concatenated with Hamming code with a block interleaver // 2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), Fukuoka, Japan, 2020, pp. 531-533. DOI: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065198.

References

1. Fink L.M. *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenii* (Theory of discrete message transmission), Moscow, Sovetskoe radio, 1975, 400 p.

2. Gallager R. *Teoriya informatsii i nadezhnaya svyaz'* (Theory of information and reliable communications), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 720 p.
3. Pavlov A.A., Romanenko Yu.A., Tsar'kov A.N. et al. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 7, pp. 140-150. DOI 10.18127/j00338486-202107-18.
4. Blokh E.L., Popov O.V., Turin V.Ya. *Modeli istochnikov oshibok v kanalakh peredachi tsifrovoi informatsii* (Error models for digital Information transmission channels), Moscow, Svyaz', 1971, 312 p.
5. Tanygin M.O., Akhmad A.A.A., Vlasova A.O. *V Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Infokommunikatsii i kosmicheskie tekhnologii: sostoyanie, problemy i puti resheniya»*: sbornik statei. Kursk, Yugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2021, pp. 358-362.
6. Shevchenko V.A. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki*, 2019, no. 2(52), pp. 26-31.
7. Veresova A.M., Ovchinnikov A.A. *XXIII mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»*: sbornik statei. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2020, pp. 176-182.
8. Ovchinnikov A.A., Fominykh A.A. *XXIV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»*: sbornik statei. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2021, pp. 132-138.
9. Dzhumkov V.V., Mal'tsev G.N. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2020, no. 4, pp. 78-86.

10. Kruk E.A., Ovchinnikov A.A. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2016, no. 1 (80), pp. 80-87.
11. Ovchinnikov A.A., Veresova A.M. *XXV Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya «Volnovaya elektronika i infokommunikatsionnye sistemy»*: sbornik statei. Saint-Peterburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2022, pp. 71-75.
12. McCullough, H. Richard, The binary regenerative channel, *Bell System Technical Journal*, 1968, vol. 47(8), pp. 1713-1735.
13. Shevtsov A.V., Zhurbenko P.V. *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2016, no. 75, pp. 137-143.
14. Mal'tsev G.N., Dzhumkov V.V. *Informatsionno upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 1(62), pp. 27-33.
15. C. Kim, J. -W. Kim, J. -S. No. New Design of Error Control Codes Resilient to Single Burst Error or Two Random Bit Errors Using Constacyclic Codes, *IEEE Access*, 2022, vol. 10, pp. 131101-131108, DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3229427.
16. W. Bennett, F. Froehlich. Some results on the effectiveness of error-control procedures in digital data transmission, *IRE Transactions on Communications Systems*, 1961, no. 9, pp. 58-65.
17. Kvashennikov V.V., Bugakov I.A., Kuzin A.V. *Izvestiya Instituta inzhenernoi fiziki*, 2020, no. 4(58), pp. 11-16.
18. Ovchinnikov A.A., Veresova A.M. *Pervaya Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya «Obrabotka, peredacha i zashchita informatsii v komp'yuternykh sistemakh»*: sbornik trudov. Saint-Petersburg, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet

aerokosmicheskogo priborostroeniya, 2020, pp. 193-196. DOI: 10.31799/978-5-8088-1452-3-2020-1-193-196.

19. Melent'ev O.G., Shevnina I.E. *Zhurnal nauchnykh publikatsii aspirantov i doktorantov*, 2008, no. 8, pp. 243–246.

20. Melent'ev O.G. *Peredacha dannykh po kanalam s gruppiruyushchimisya oshibkami: monografiya* (Data transmission over channels with burst errors), Novosibirsk, Sibirskii gosudarstvennyi universitet telekommunikatsii i informatiki, 2005, 252 p.

21. Romanenko D.M., Kudlatskaya M.F., Bel'kevich R.I. *XXV Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Sovremennye sredstva svyazi»: materialy konferentsii*. Minsk, Belorusskaya gosudarstvennaya akademiya svyazi, 2020, pp. 211-213.

22. C.C. Trinca, C.D. De Albuquerque, R.P. Junior, J.C. Interlando, A.A. De Andrade and R. A. Watanabe. New Quantum Burst-Error Correcting Codes from Interleaving Technique, *GLOBECOM 2022, 2022 IEEE Global Communications Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, 2022, pp. 5243-5248. DOI: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10000761.

23. Bogdanov A.S., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26041>

24. Bogdanov A.S., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63136>

25. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93398>

26. S. Jihwan, H.K. Lee. Burst Error Correction for Convolutional Code Concatenated with Hamming code with a block interleaver, *2020 International Conference on Artificial*

Intelligence in Information and Communication (ICAIC), Fukuoka, Japan, 2020, pp. 531-533. DOI: 10.1109/ICAIC48513.2020.9065198.

02.

Статья поступила в редакцию 15.01.2023

Одобрена после рецензирования 23.01.2023

Принята к публикации 27.02.2023

The article was submitted on 15.01.2023; approved after reviewing on 23.01.2023; accepted for publication on 27.02.2023