

УДК 621.391.82.016.35

ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДИСКРЕТНОГО КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ГРУППИРОВАНИЕМ ОШИБОК

Г. Н. Мальцев,

доктор техн. наук, профессор

В. В. Джумков,

адъюнкт

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

Предложена обобщенная модель радиоканала передачи информации с группированием ошибок, включающая четыре состояния и являющаяся обобщением известной модели Эллиота — Гильберта. Модель учитывает переходные состояния между «хорошим» и «плохим» состояниями дискретного канала передачи информации. Проведен сравнительный анализ вероятностей ошибок заданной кратности при описании каналов передачи информации с группированием ошибок с использованием различных моделей.

Ключевые слова — группирование ошибок, модель канала передачи информации, достоверность передачи сообщений, влияние помех.

Введение

Современные радиотехнические системы передачи информации позволяют осуществлять информационный обмен на больших расстояниях и в широком диапазоне скоростей передачи [1, 2]. В зависимости от условий связи в радиоканалах передачи информации под влиянием различных видов помех при передаче сообщений возникают ошибки, причем в ряде случаев они группируются в так называемые пакеты ошибок. Для выбора параметров канальных протоколов передачи информации, обеспечивающих требуемую помехоустойчивость в ожидаемых условиях связи, на этапе проектирования систем используются различные модели радиоканалов передачи информации [3–5]. В настоящей статье приводится описание модели дискретного канала передачи информации с группированием ошибок, являющейся обобщением известной модели Эллиота — Гильберта.

Описание дискретного канала передачи информации с группированием ошибок исходной моделью Эллиота — Гильберта

В большинстве радиотехнических систем передачи дискретных сообщений используется посимвольный прием. При анализе таких систем передачи информации наибольшее распространение получает биномиальная модель дискретно-

го канала передачи информации, в соответствии с которой вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 рассчитывается для заданного отношения сигнал/шум (ОСШ) в предположении одиночных ошибок, независимо возникающих в условиях белого гауссова шума [4, 6]. Эта величина p_0 является исходной при определении вероятности ошибочного приема сообщений с учетом используемых канальных протоколов передачи информации.

Однако биномиальная модель дискретного канала передачи информации в ряде случаев неадекватно описывает условия связи и не дает возможности обоснованного выбора параметров канальных протоколов передачи информации при группировании ошибок. Причинами группирования (возникновения пакетов) ошибок могут быть флуктуации уровня принимаемого сигнала (мультипликативная помеха) вследствие многолучевого распространения, воздействие аддитивных помех — импульсных (хаотической или периодической), прицельных по частоте и непрерывных с перестройкой рабочей частоты, и другие факторы. В результате ОСШ (сигнал/помеха) на входе приемного устройства q может существенно отличаться в различные моменты времени. Соответственно, для различных интервалов времени с отличающимися условиями приема сигналов будут различаться вероятность ошибочного приема информационного символа p_0 , свя-

зависит с ОСШ q монотонной зависимостью, и кратность ошибок, приходящихся на сообщение.

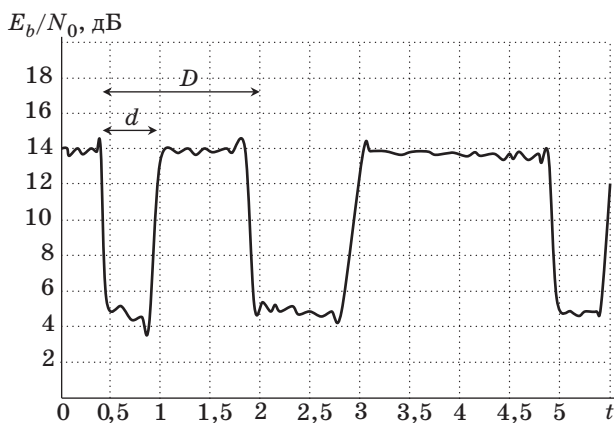
Характерное изменение ОСШ во времени $q(t)$, приводящее к группированию ошибок, показано на рис. 1. Возникновение пакетов ошибок, образуемых следующими друг за другом искаженными символами, наиболее вероятно на интервалах времени с малым ОСШ. Интервал времени d , приходящийся на пакет ошибок, называется длиной пакета, а интервал времени D между пакетами ошибок — периодом следования пакетов. Величины d и D принято определять в размерности числа символов. В общем случае, как это показано на рис. 1, они являются случайными. С увеличением длины пакета d и числа ошибок в отдельных сообщениях, на которые приходится группирующиеся искаженные символы, помехоустойчивое кодирование не обеспечивает повышение достоверности передачи сообщений, рассчитанное из предположения равновероятного возникновения одиночных ошибок на всем анализируемом временном интервале.

Пусть сообщения передаются по радиоканалу передачи информации блочным помехоустойчивым (n, k) -кодом (n — общее количество символов, k — количество информационных символов в кодовой комбинации), исправляющим μ ошибок. Для случаев одиночных ошибок ($d = 1$) и пакетов ошибок длиной, не превышающей кратности исправляемых ошибок ($1 < d \leq \mu$), вероятность ошибочного приема сообщения рассчитывается по формуле

$$P_{ош} = \sum_{i=\mu+1}^n C_n^i p_0^i (1-p_0)^{n-i}. \quad (1)$$

При этом величины n , k и μ связаны между собой известным граничным условием Хэмминга [4, 6]

$$n - k \geq \log_2 \left(1 + \sum_{i=1}^{\mu} C_n^i \right). \quad (2)$$

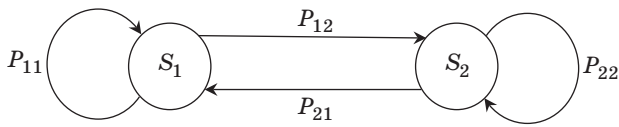


■ Рис. 1. Типичная зависимость ОСШ от времени, приводящая к группированию ошибок

При $d \leq \mu$ вероятность ошибочного приема сообщения, определяемая по формуле (1), составляет в первом приближении $P_{ош} \approx C_n^{\mu+1} p_0^{\mu+1}$ и имеет порядок величины p_0 в степени $\mu + 1$. В то же время при $d > \mu$ вероятность ошибочного приема сообщения начинает зависеть от соотношения между числом символов в сообщении n , средней длиной пакета ошибок \bar{d} и средним периодом следования пакетов ошибок \bar{D} и в определенных условиях может практически не зависеть от величины p_0 . В частности, при $\mu < d \leq n$ и при условии, что в сообщениях, на которые не попадают пакеты ошибок, число ошибок не превышает μ , вероятность ошибочного приема сообщения можно оценить величиной $P_{ош} \approx n/\bar{D}$, имеющей порядок величины, обратной \bar{D} . В реальных условиях при возникновении пакетов ошибок, как правило, выполняется $C_n^{\mu+1} p_0^{\mu+1} < n/\bar{D}$ и при фиксированном (n, k) -коде группирование ошибок приводит к заметному увеличению величины $P_{ош}$ по сравнению со случаем, когда то же самое число ошибок равномерно распределено по всем передаваемым сообщениям.

Выражение для расчета вероятности ошибочного приема сообщения (1) соответствует простейшей модели дискретного канала передачи информации без памяти. Для анализа процесса передачи информации по радиоканалам с группированием ошибок в общем случае необходимо использовать более сложные модели дискретных каналов передачи информации с памятью. Анализ известных подходов к описанию процессов передачи информации при группировании ошибок [5, 7] показал, что наиболее конструктивной из используемых в настоящее время является модель Эллиота — Гильберта. Она предполагает введение двух состояний — «хорошего» и «плохого», в которых может находиться радиоканал передачи информации. Длительности пребывания радиоканала в указанных состояниях зависят от условий связи, вида используемых сигналов, характера и длительности воздействия на радиоканал различных помех.

В «хорошем» состоянии в радиоканале либо вообще не происходит ошибок, либо имеют место одиночные ошибки, описываемые биномиальной моделью дискретного канала. На временном интервале нахождения радиоканала в «хорошем» состоянии возникновение ошибок равновероятно в любой момент времени, но группирование ошибок не происходит. В «плохом» состоянии радиоканала доминирующее влияние на процесс передачи информации оказывают группирующиеся ошибки. На временном интервале нахождения радиоканала в «плохом» состоянии одиночные ошибки маловероятны, ошибки возникают группами (пакетами), длина и период следования ко-



■ **Рис. 2.** Граф состояний исходной модели Эллиота — Гильберта

торых в общем случае являются случайными величинами.

Модели Эллиота — Гильберта соответствует простая марковская цепь (рис. 2), включающая два состояния. Состояние S_1 является «хорошим», состояние S_2 — «плохим». Относительное время нахождения радиоканала в каждом из состояний D_k , $k = 1, 2$, определяемое в размерности числа символов, называется средней длиной состояния и может быть сопоставлено с величинами d и $(D - d)$. Каждое состояние канала характеризуется своей вероятностью ошибочного приема информационного символа, при этом в ряде случаев полагается, что ошибки происходят только в «плохом» состоянии [3, 5].

Смена состояний дискретного канала передачи информации характеризуется переходными вероятностями, которые составляют матрицу переходных вероятностей

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где P_{kl} — вероятность перехода из состояния k в состояние l , $k, l = 1, 2$. В рассматриваемой модели Эллиота — Гильберта эти вероятности переходов определяются средними длинами состояний, из которых осуществляется переход: $P_{kl} = 1/D_k$. Предельные вероятности нахождения дискретного канала передачи информации в различных состояниях P_k , $k = 1, 2$, рассчитываются по средним длинам состояний D_k в соответствии с выражением $P_k = \frac{D_k}{D_1 + D_2}$.

При принятых допущениях о характере изменения свойств радиоканала передачи информации модель Эллиота — Гильберта позволяет получить оценки показателей достоверности передачи сообщений при использовании различных протоколов передачи информации канального уровня, включающих помехоустойчивое кодирование, перемежение, перестройку рабочей частоты и автоматический запрос повторной передачи [5]. Вместе с тем в ряде случаев для описания влияния на процесс передачи информации по радиоканалам с группированием ошибок некоторых видов помех двух состояний рассмотренной модели Эллиота — Гильберта оказывается недостаточно. Анализ известных подходов к описанию эффекта группирования ошибок показал,

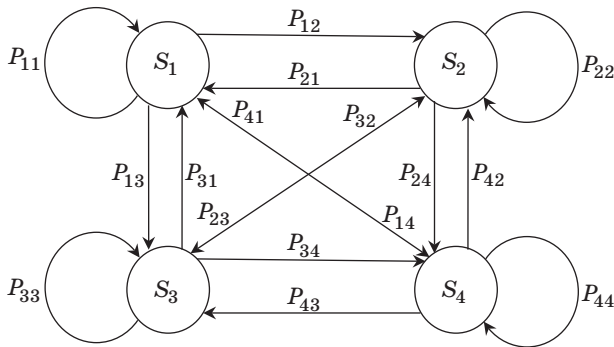
что для описания функции распределения вероятности ошибочного приема информационных символов передаваемых сообщений в общем случае необходимо использовать модель, которой соответствует марковская цепь, включающая четыре состояния.

Так, при воздействии импульсных помех на приемник с автоматической регулировкой усиления на интервалах времени перегрузки и «мертвого» времени на выходе ограничителя напряжения возникают так называемые сторонние шумы [8]. Как следствие, ОСШ на этих интервалах времени снижается и, несмотря на прекращение воздействия импульсной помехи, увеличивается вероятность ошибочного приема передаваемых информационных символов. Длительность состояний перегрузки и «мертвого» времени зависит от используемой элементной базы приемника и величины напряжения регулирования. А на интервалах, когда приемник вышел из перегруженного состояния, и на интервалах между импульсными помехами значение ОСШ близко к ОСШ в условиях отсутствия помех. Таким образом, для описания такого воздействия целесообразно использовать цепь Маркова из четырех состояний, из которых два состояния являются «хорошими» и два — «плохими».

Другим примером радиоканала с группированием ошибок, для описания которого необходимо использовать модель дискретного канала, описываемую марковской цепью с четырьмя состояниями, является радиоканал с перестройкой рабочей частоты, в котором на приемник воздействует прицельная по частоте помеха с шириной спектра, равной ширине спектра полезного сигнала. В этом случае дополнительно вводимые второе «хорошее» и второе «плохое» состояния описывают процессы работы приемника сигналов с перестройкой частоты со схемой частотной автоподстройки на основе следящего измерителя в моменты времени, когда частота сигнала оказывается близка к частоте помехи [9].

Описание дискретного канала передачи информации с группированием ошибок обобщенной моделью Эллиота — Гильберта

Для аналитического описания процессов передачи информации по радиоканалам с группированием ошибок предлагается использовать обобщенную модель Эллиота — Гильберта. Соответствующая ей марковская цепь, включающая четыре состояния, показана на рис. 3. Из четырех два состояния, S_1 и S_3 , являются «хорошими» и два состояния, S_2 и S_4 , — «плохими». Дополнительно введенные в предлагаемую модель по сравнению с исходной моделью Эллиота —



■ Рис. 3. Граф состояний обобщенной модели Эллиота — Гильберта

Гильберта второе «хорошее» состояние \$S_3\$ и второе «плохое» состояние \$S_4\$, по сути, являются промежуточными состояниями при переходах из состояния \$S_1\$ в состояние \$S_2\$ и обратно. Для каждого состояния аналогично исходной модели Эллиота — Гильберта вводятся средние длины состояний \$D_k, k = 1, 2, 3, 4\$, определяемые в размерности числа символов.

Смена состояний дискретного канала передачи информации характеризуется переходными вероятностями, которые составляют матрицу переходных вероятностей

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где \$P_{kl}\$ — вероятность перехода из состояния \$k\$ в состояние \$l, k, l = 1, 2, 3, 4\$. Вероятности переходов между состояниями в рассматриваемой обобщенной модели Эллиота — Гильберта в общем случае определяются соотношением между средними длинами всех состояний в соответствии с выражением

$$P_{kl} = \frac{D_l}{D_k(D_l + D_g + D_h)}, \quad (5)$$

где \$D_k\$ — средняя дина состояния, из которого осуществляется переход; \$D_l\$ — средняя дина состояния, в которое осуществляется переход; \$D_g\$ и \$D_h\$ — средние длины остальных двух состояний. В частных случаях в графе состояний (см. рис. 3) некоторые переходы между состояниями и соответствующие им ребра могут отсутствовать. Для этих переходов вероятности \$P_{kl}\$ полагаются равными нулю.

Каждое состояние канала характеризуется вероятностью ошибочного приема информационного символа и средней длиной состояния. Предельные вероятности нахождения дискретного канала передачи информации в различных состояни-

ях \$P_k, k = 1, 2, 3, 4\$, рассчитываются по средним длинам состояний \$D_k\$ в соответствии с выражением $P_k = \frac{D_k}{D_1 + D_2 + D_3 + D_4}$.

Для каждого состояния радиоканала передачи информации вероятность ошибочного приема информационного символа \$p_{0k}, k = 1, 2, 3, 4\$, определяется действующими в этом состоянии уровнями принимаемого сигнала и шумов (помех). При этом в общем случае при совместном воздействии шумов (помех) от нескольких источников необходимо рассматривать ОСШ (сигнал/помеха) по каждому источнику и использовать их для расчета вероятностей ошибочного информационного символа \$p_{0k}\$ с учетом статистических свойств соответствующих шумов (помех) [10, 11].

Пусть прием сигналов в анализируемом состоянии радиоканала передачи информации осуществляется в условиях совместного действия белого гауссова шума и помехи, которая может иметь различные статистические свойства. Условия приема сигналов в этом случае характеризуются отношениями сигнал/шум \$q_0\$ и сигнал/помеха \$q_1\$, которые определяются для интервала накопления принимаемого сигнала в течение длительности информационного символа. В случае если помеха является шумовой, величины \$q_0\$ и \$q_1\$ могут быть объединены в суммарном ОСШ $q = \frac{q_0 q_1}{q_0 + q_1}$ и соответствующая вероятность оши-

бочного приема информационного символа рассчитывается по формуле

$$p_{0k} = \frac{1}{2} \left[1 - \hat{O}_0(\sqrt{2q}) \right]. \quad (6)$$

В случае если помеха не является шумовой, соответствующая вероятность ошибочного приема информационного символа более сложным образом зависит от величин \$q_0\$ и \$q_1\$, а также от коэффициента корреляции сигнала и помехи \$r\$ и рассчитывается по формуле

$$p_{0k} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \hat{O}_0 \left[\sqrt{2q_0} \left(1 + \frac{r}{\sqrt{q_1}} \right) \right] - \dots \right. \\ \left. \dots - \frac{1}{2} \hat{O}_0 \left[\sqrt{2q_0} \left(1 - \frac{r}{\sqrt{q_1}} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) соответствуют посимвольному приему символов, передаваемых с помощью противоположных сигналов; $\hat{O}_0(x) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$ —

табулированная функция Крампа. Вероятности \$p_{0k}, k = 1, 2, 3, 4\$, рассчитываются для различных состояний радиоканала передачи информации по

формулам вида (6) и (7) с учетом условий приема сигналов в каждом состоянии.

Результирующая вероятность ошибочного приема информационного сообщения при передаче информации по радиоканалу, описываемому рассматриваемой обобщенной моделью Эллиота — Гильберта, зависит от вероятностей ошибочного приема информационного символа в каждом из состояний p_{0k} и от вероятностей этих состояний P_k и определяется выражением

$$P_{1\varnothing} = \sum_{m=\mu+1}^n P_{1\varnothing}(m, n). \quad (8)$$

Здесь $P_{\text{ош}}(m, n)$ — вероятность m -кратной ошибки в сообщении длиной n , зависящая от величин P_k и p_{0k} , $k = 1, 2, 3, 4$.

Вероятности $P_{\text{ош}}(m, n)$ находятся с помощью рассматриваемых моделей дискретных каналов передачи информации с группированием ошибок. Покажем, как уточнение описания процесса группирования ошибок обобщенной моделью Эллиота — Гильберта влияет на вероятности $P_{\text{ош}}(m, n)$ в сравнении с описанием более простой исходной моделью Эллиота — Гильберта.

Для исходной модели Эллиота — Гильберта возникновение ошибок в состояниях S_1 и S_2 характеризуется вероятностями ошибочного приема информационного символа p_{01} и p_{02} . Пусть из n символов сообщения i_1 символов передавались в состоянии S_1 и i_2 символов — в состоянии S_2 . С учетом того, что $i_1 + i_2 = n$, распределение вероятностей нахождения канала при передаче сообщения в состояниях S_1 и S_2 характеризуется вероятностью $B(i_1, n)$ того, что из n символов сообщения i_1 символов были переданы в состоянии S_1 . В свою очередь, m ошибок при приеме сообщения в общем случае могут быть распределены по обоим состояниям: k_1 ошибок — в состоянии S_1 и k_2 ошибок — в состоянии S_2 , при этом $k_1 + k_2 = m$. Тогда анализируемая вероятность $P_{\text{ош}}(m, n)$ определяется выражением

$$P_{1\varnothing}(m, n) = \sum_{k_1=0}^m \sum_{i_1=k_1}^{n-m+k_1} B(i_1, n) C_{i_1}^{k_1} p_{01}^{k_1} (1-p_{01})^{i_1-k_1} \times \dots \times C_{n-i_1}^{m-k_1} p_{02}^{m-k_1} (1-p_{02})^{n-i_1-m+k_1}. \quad (9)$$

Суммирование в выражении (9) осуществляется по числу ошибок k_1 в состоянии S_1 и по числу символов i_1 , переданных в состоянии S_1 . Учет величин k_2 и i_2 , соответствующих второму состоянию S_2 , при этом производится за счет использования вероятностей $B(i_1, n)$ и задания показателей степеней и пределов суммирования, учитывающих соотношения $k_2 = m - k_1$ и $i_2 = n - i_1$.

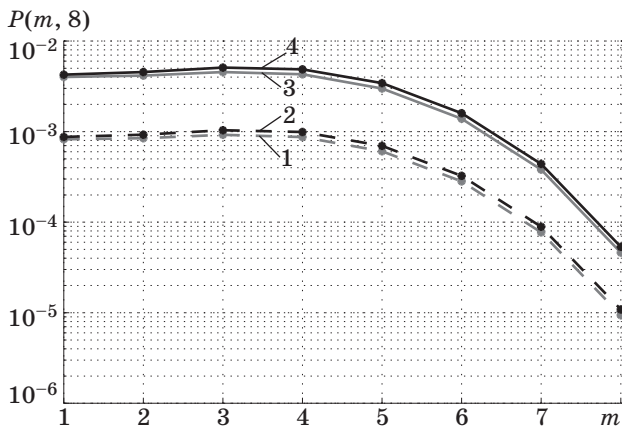
Для обобщенной модели Эллиота — Гильберта возникновение ошибок в состояниях S_1, S_2, S_3, S_4 характеризуется вероятностями ошибочного приема информационного символа p_{0k} , $k = 1, 2, 3, 4$. Пусть из n символов сообщения i_1 символов передавались в состоянии S_1 , i_2 символов — в состоянии S_2 , i_3 символов — в состоянии S_3 , i_4 символов — в состоянии S_4 . С учетом того, что $i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = n$, распределение вероятностей нахождения канала при передаче сообщения в состояниях S_1, \dots, S_4 характеризуется вероятностью $B(i_1, i_2, i_3, n)$ того, что из n символов сообщения i_k символов были переданы в состоянии S_k , $k = 1 \dots 4$. В свою очередь, m ошибок при приеме сообщения в общем случае могут быть распределены по всем четырем состояниям: k_1, \dots, k_4 , где индексы $1 \dots 4$ соответствуют номеру состояния, при этом $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = m$. Тогда анализируемая вероятность $P_{\text{ош}}(m, n)$ определяется выражением

$$P_{1\varnothing}(m, n) = \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^{m-k_1} \sum_{k_3=0}^{m-k_1-k_2} \sum_{i_1=k_1}^{m-k_1-k_2-k_3} \dots \times \sum_{i_2=k_2}^{(n-i_1-m+k_1+k_2)} \sum_{i_3=k_3}^{(n-i_1-i_2-k_4(k_1, k_2, k_3, m))} B(i_1, i_2, i_3, n) \times \dots \times C_{i_1}^{k_1} p_{01}^{k_1} (1-p_{01})^{i_1-k_1} C_{i_2}^{k_2} p_{02}^{k_2} (1-p_{02})^{i_2-k_2} \times \dots \times C_{i_3}^{k_3} p_{03}^{k_3} (1-p_{03})^{i_3-k_3} C_{n-i_1-i_2-i_3}^{m-k_1-k_2-k_3} p_{04}^{m-k_1-k_2-k_3} \times \dots \times (1-p_{04})^{n-i_1-i_2-i_3-m+k_1+k_2+k_3}. \quad (10)$$

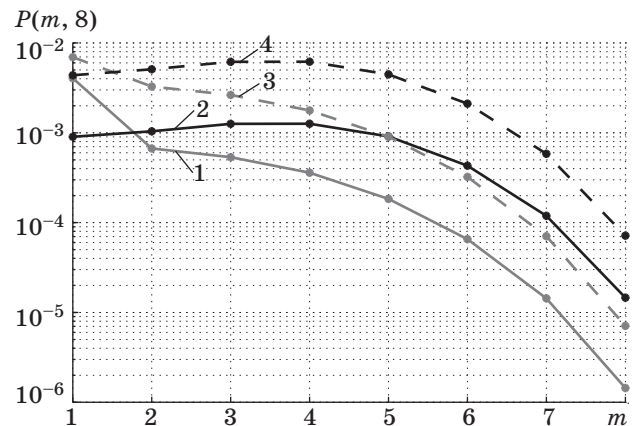
Суммирование в выражении (10) выполняется по числу ошибок k_1, k_2, k_3 в состояниях S_1, S_2, S_3 и по числу символов i_1, i_2, i_3 , переданных в этих состояниях. Учет величин k_4 и i_4 , соответствующих оставшемуся состоянию S_4 , при этом осуществляется за счет использования вероятностей $B(i_1, i_2, i_3, n)$ и задания показателей степеней и пределов суммирования, учитывающих соотношения $k_4 = m - k_1 - k_2 - k_3$ и $i_4 = n - i_1 - i_2 - i_3$.

Сравнительный анализ вероятностных характеристик каналов передачи информации с группированием ошибок при использовании различных моделей

Для сравнения различных моделей дискретного канала передачи информации с группированием ошибок были проведены расчеты вероятности $P_{\text{ош}}(m, n)$ для исходной модели Эллиота — Гильберта с двумя состояниями канала и обобщенной модели Эллиота — Гильберта с четырьмя состояниями канала. На рис. 4 и 5 приведены расчетные зависимости $P_{\text{ош}}(m, n)$ от m при $n = 8$. Расчеты проводились в соответствии с выражениями (9) и (10) при задании исходных данных, соответствующих равенству средних длин «хоро-



■ **Рис. 4.** Зависимости $P(m, 8)$, рассчитанные для случая, когда длительности переходных состояний S_3 и S_4 значительно меньше суммарной длительности «хороших» состояний S_1 и S_3 : 1 — обобщенная модель: $D_1 = 5000$, $D_2 = 18$, $D_3 = 1$, $D_4 = 1$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$, $p_{03} = 10^{-5}$, $p_{04} = 10^{-1}$; 2 — исходная модель: $D_1 = 5001$, $D_2 = 19$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$; 3 — обобщенная модель: $D_1 = 1000$, $D_2 = 18$, $D_3 = 1$, $D_4 = 1$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$, $p_{03} = 10^{-5}$, $p_{04} = 10^{-1}$; 4 — исходная модель: $D_1 = 1001$, $D_2 = 19$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$



■ **Рис. 5.** Зависимости $P(m, 8)$, рассчитанные для случая, когда длительности переходных состояний S_3 и S_4 соизмеримы с суммарной длительностью «хороших» состояний S_1 и S_3 : 1 — обобщенная модель: $D_1 = 5000$, $D_2 = 15$, $D_3 = 5$, $D_4 = 5$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$, $p_{03} = 10^{-5}$, $p_{04} = 10^{-1}$; 2 — исходная модель: $D_1 = 5005$, $D_2 = 20$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$; 3 — обобщенная модель: $D_1 = 1000$, $D_2 = 15$, $D_3 = 5$, $D_4 = 5$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$, $p_{03} = 10^{-5}$, $p_{04} = 10^{-1}$; 4 — исходная модель: $D_1 = 1005$, $D_2 = 20$, $p_{01} = 10^{-6}$, $p_{02} = 0,5$

шего» состояния D_1 и «плохого» состояния D_2 исходной модели сумме средних длин «хороших» состояний $D_1 + D_3$ и сумме средних длин «плохих» состояний $D_2 + D_4$ обобщенной модели соответственно.

Из рисунков видно, что при увеличении длительностей промежуточных «хороших» и «плохих» состояний дискретного канала передачи информации расхождение результатов расчета вероятностей ошибок различной кратности с использованием сравниваемых моделей может быть значительным (см. рис. 5). Такие погрешности могут приводить к завышенным или заниженным оценкам показателей помехоустойчивости передачи информации по радиоканалам с группирующимися ошибками. При этом результаты, полученные с использованием обобщенной модели Эллиота — Гильберта, представляются более точными, поскольку более полно описывают процессы передачи информации по радиоканалам с группирующимися ошибками. При уменьшении длительностей промежуточных состояний дискретного канала передачи информации результаты расчета вероятностей ошибок различной кратности с использованием сравниваемых моделей сближаются (см. рис. 4).

Следует отметить, что в частных случаях предложенная в настоящей работе для описания дискретного канала передачи информации с группированием ошибок обобщенная модель Эллиота —

Гильберта сводится как к рассмотренной в качестве исходной модели Эллиота — Гильберта с двумя состояниями, так и к некоторым другим известным моделям с тремя и четырьмя состояниями [3, 7]. К числу таких моделей относятся, в частности, модели Смита — Боуэна — Джойса и Петровича. Первая из указанных моделей имеет три состояния, одно из которых «плохое» с вероятностью ошибочного приема информационного символа, близкой к 0,5, а два других — «хорошие», в них ошибки возможны, но имеют меньшие, не обязательно одинаковые вероятности. Вторая из указанных моделей (Петровича), как и предложенная обобщенная модель Эллиота — Гильберта, состоит из двух «хороших» и двух «плохих» состояний, причем из каждого состояния возможен переход только в одно «хорошее» и одно «плохое» состояние.

Заключение

Таким образом, в настоящей работе предложена обобщенная модель радиоканала передачи информации с группированием ошибок, позволяющая обобщить и уточнить ряд известных более простых моделей. Граф состояний и описывающая его матрица переходных вероятностей позволяют рассчитать для заданных условий показатели качества передачи информации по радиоканалам с группированием ошибок и осуществить

выбор параметров канальных протоколов передачи информации. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании

и анализе характеристик радиотехнических систем передачи информации, функционирующих в сложной помеховой обстановке.

Литература

1. **Тепляков И. М.** Основы построения телекоммуникационных систем и сетей. — М.: Радио и связь, 2004. — 328 с.
2. **Васин В. А.** и др. Радиосистемы передачи информации. — М.: Горячая линия—Телеком, 2005. — 472 с.
3. **Финк Л. М.** Теория передачи дискретных сообщений. — М.: Сов. радио, 1970. — 726 с.
4. **Коржик В. И., Финк Л. М.** Помехоустойчивое кодирование дискретных сообщений в каналах со случайной структурой. — М.: Связь, 1975. — 271 с.
5. **Мелентьев О. Г.** Теоретические аспекты передачи данных по каналам с группирующимися ошибками. — М.: Горячая линия—Телеком, 2007. — 232 с.
6. **Вернер М.** Основы кодирования: пер с нем. — М.: Техносфера, 2008. — 288 с.
7. **Блох Э. Л., Попов О. В., Турин В. Я.** Модели источников ошибок в каналах передачи цифровой информации — М.: Связь, 1971. — 312 с.
8. **Буга Н. Н., Фалько А. И., Чистяков Н. И.** Радиоприемные устройства. — М.: Радио и связь, 1986. — 320 с.
9. **Борисов В. И.** Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. — М.: Радио и связь, 2000. — 384 с.
10. **Зюко А. Г., Кловский Д. Л., Назаров М. В., Финк Л. М.** Теория передачи сигналов — М.: Радио и связь, 1986. — 304 с.
11. **Деев В. В.** Методы модуляции и кодирования в современных системах связи. — СПб.: Наука, 2007. — 267 с.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных НЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.