

УДК 621.394

Ю.П. Егоров, А.И. Пятаков

ОЦЕНКА МИНИМАЛЬНО ДОСТИЖИМОЙ ВЕРОЯТНОСТИ ПРИЕМА ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ВОЙСКАМИ

Егоров Юрий Петрович, доктор технических наук, профессор, окончил радиотехнический факультет Ленинградского высшего морского инженерного училища им. С.О. Макарова. Главный научный сотрудник ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области макропроектирования больших информационно-управляющих систем. Имеет публикации, монографии, изобретения в области проектирования систем управления. [e-mail: yure@mail.ru].

Пятаков Анатолий Иванович, кандидат технических наук, окончил военную академию связи им. С.М. Буденного, адъюнктуру (там же). Главный специалист ФНПЦ ОАО «НПО «Марс». Специализируется в области организации и построения систем передачи дискретных сообщений. Имеет публикации в области кодирования и повышения достоверности дискретной информации. [e-mail: uljanovsk-anatol@mail.ru].

Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию методов обработки сообщений, направленных на существенное снижение риска приема ложного сообщения в автоматизированных системах управления войсками (АСУВ).

На основании вероятностного графа состояний системы передачи информации сформулированы критерии формирования ложного сообщения на входе приемника информации. Проведена сравнительная оценка вероятности приема ложного сообщения как в однонаправленных системах передачи информации с зависимыми и независимыми ошибками, так и в системах с обратной связью. Показано, что существенное снижение вероятности приема ложного сообщения в каналах низкого качества возможно за счет снижения скорости передачи.

Предложен метод, позволяющий оценить минимально достижимую вероятность приема ложного сообщения в системах с заданными параметрами достоверности приема.

Ключевые слова: автоматизированные системы управления войсками, системы передачи информации, достоверность приема, ложное сообщение.

Abstract

The present article is devoted to investigation of message-processing techniques directed towards considerable decrease of risk of bogus-message reception in computer-aided troop-control systems.

The article gives defined criteria for generation of a bogus message at the input of an information receiver on basis of probabilistic graph of state of data-communication system, and a comparative evaluation of probability of reception of a bogus message both in unidirectional data-communication systems with dependent and independent errors and in feedback systems. The article also shows that an important decrease of probability of reception of a bogus message in channels of poor quality is caused by decrease of transfer rate.

It proposes a technique allowing evaluating a minimum achievable probability of the reception of a bogus message in the systems with given parameters of reception integrity.

Key words: computer-aided troop-control systems, data-communication systems, reception integrity, bogus message.

ВВЕДЕНИЕ

Современные АСУВ характеризуются, как правило, большой размерностью, функциональной сложностью и, как следствие, большим объемом передаваемой информации. Главной целью при разработке и создании АСУВ является приведение ее в соответствие требованиям, предъявляемым к качеству управления в современных условиях, в том числе и к достоверности принимаемых сообщений.

Выполнение требований по достоверности принимаемых сообщений заслуживает особого внимания в силу специфики их использования. Во-первых, ошибки в при-

маемом сообщении могут привести порой не просто к потере каких-либо сведений или необходимости повторения определенного цикла доведения сообщения, а к получению ложной информации, которая воспринимается как правильная и может исказить представление о реальной действительности, а в период военных действий вызвать невосполнимые потери. Во-вторых, прием сообщения представляет собой статистическую задачу и как бы ни были совершенны используемые при этом средства, вероятность приема ложного сообщения никогда не может быть равной нулю. В-третьих, каналы связи мобильной компоненты АСУВ, наиболее часто используемые в период военных конфликтов, имеют низкое качество приема сообщений.

Оценка вероятности приема ложного сообщения на этапе проектирования позволит, с одной стороны, принять технические решения, позволяющие выполнить требования по достоверности, а с другой стороны, избежать завышения требований к надежности и помехоустойчивости систем и трактов передачи, а следовательно, и их удорожания.

1 КРИТЕРИИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ

Пусть в АСУВ имеет место μ разрешенных сообщений:

$$S_0, S_1, \dots, S_\mu, \quad (1)$$

где $S_0 \equiv 0$ означает отсутствие сообщения. Каждое сообщение S_i в передатчике преобразуется в последовательность сигналов $\{S_i(t)\}$, называемую кодовой комбинацией.

При распространении по каналу связи передаваемый сигнал $S_i(t)$ подвергается воздействию помех и искажениям. В результате наблюдаемый сигнал $U_i(t)$, поступивший с выхода канала на вход приемника, может быть представлен в виде суммы:

$$U_i(t) = S_i(t) + \xi(t), \quad (2)$$

где $\xi(t)$ – случайный сигнал, не зависящий от сигнала $S_i(t)$ и называемый аддитивной или мультипликативной помехой.

В приемном устройстве решающая схема по совокупности принятых сигналов $U_i = \{U_i(t)\}$ принимает решение о том, какое сообщение $S_i = \{S_i(t)\}$ было передано.

Вследствие этого прием сообщений становится статистической задачей, причем в результате обработки приемником искаженного помехами сигнала могут с той или иной априорной вероятностью $P(S_i)$ иметь место следующие события, составляющие полную группу событий:

$$\sum_{i=1}^6 P(S_i) = 1: \quad (3)$$

1) приемником принято правильное решение, что передано сообщение S_i ($i \neq 0$) при условии, что в действительности было передано сообщение S_i ($i \neq 0$);

2) приемником принято неправильное решение, что передано сообщение S_j при условии, что в действительности было передано сообщение S_i ($j \neq 0, j \neq i$);

3) приемником принято неправильное решение, что никакого сообщения передано не было (т. е. принят нулевой сигнал $S_0(t)$) при условии, что в действительности было передано сообщение S_i ($i \neq 0$);

4) приемником принято решение, что полученное сообщение Z отличается от всей совокупности разрешенных сообщений $S_0, S_1, S_2, \dots, S_\mu$, т. е. $Z \notin \{S_i(t)\}$;

5) приемником принято неправильное решение, что передано сообщение S_i ($i \neq 0$) при условии, что в действительности никакого сообщения S_i ($i \neq 0$) передано не было;

6) приемником принято правильное решение, что никакого сообщения передано не было при условии, что в действительности никакого из сообщений S_i ($i \neq 0$) передано не было.

Будем называть первое событие распознаванием i -го сообщения, а его вероятность – вероятностью правильного приема P_{np} сообщения S_i ; второе событие назовем трансформацией i -го сообщения в j -е, а его вероятность – вероятностью приема ложного сообщения $P_{л}$; третье событие назовем пропуском i -го сообщения, а его вероятность – вероятностью выпадения сообщения $P_{вып}$; четвертое событие назовем обнаружением искажения в принятом сообщении, а его вероятность, при невозможности исправления, – вероятностью стирания $P_{ст}$; пятое событие назовем ложным формированием из помехи i -го сообщения, а его вероятность – вероятностью приема ложного сообщения $P_{л}$; шестое событие назовем состоянием «покоя», а его вероятность – вероятностью правильного приема P_{np} сообщения S_0 .

Для группирования событий по характеру проявления представим систему передачи информации вероятностным графом (рис. 1).

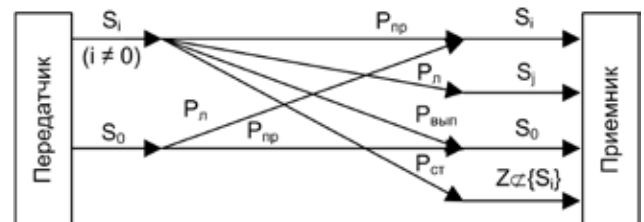


Рис. 1. Вероятностный граф состояний системы передачи

Из графа видно, что прием ложного сообщения возможен в двух случаях: при формировании сообщения из помехи и при трансформации одного разрешенного сообщения в другое.

Первое событие возможно в том случае, если из шумов в приемнике будет сформировано полностью разрешенное сообщение, включая адресную часть и признаки ретрансляции. Как правило, минимальная длина такого сообщения находится в пределах 70–100 байт. Число разрешенных сообщений невелико – несколько десятков. Используя комбинаторику, несложно подсчитать, что вероятность такого события лежит в пределах $10^{-69} - 10^{-99}$. При непрерывной передаче на скорости 1200 бит/с формирование сообщения из помехи возможно один раз в 9–11 лет, поэтому данное событие из дальнейшего рассмотрения исключаем.

Наиболее вероятным событием приема ложного сообщения является трансформация одного разрешенного сообщения в другое. Такое событие возможно в том случае, если при передаче по каналу связи количество искаженных двоичных символов в сообщении превысит исправляющую способность применяемого корректирующего кода. Таким образом, вероятность приема ложного сообщения зависит от типа используемого канала передачи информации и корректирующей способности используемого кода. Наиболее характерными представителями первых являются каналы передачи с независимыми и группирующимися в пакеты ошибками.

2 ВЕРОЯТНОСТЬ ПРИЕМА ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ СООБЩЕНИЯ ПО КАНАЛАМ С НЕЗАВИСИМЫМИ ОШИБКАМИ

Вероятность приема ложного сообщения напрямую связана с вероятностью p искажения двоичного символа в сообщении при его передаче по каналу связи. Вероятность отсутствия искажений – $(1 - p)$. Тогда для сообщения, содержащего n единичных элементов, вероятность правильного приема составит:

$$P_{np} = (1 - p)^n, \quad (4)$$

а вероятность ошибки:

$$P_{ou} = 1 - (1 - p)^n. \quad (5)$$

Эту формулу можно записать в следующем виде:

$$P_{ou} = C_n^1 p - C_n^2 p^2 + C_n^3 p^3 - \dots \pm C_n^i p^i, \quad (6)$$

где $C_n^i = \frac{n!}{i!(n-i)!}$ – число сочетаний положения

i -кратной ошибки в сообщении длиной n .

Таким образом, при независимых ошибках вероятность i -кратных ошибок в сообщении длиной n составит [1]:

$$P_{ou} = C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, 3$ и т. д. – кратность ошибок.

Для кодов, исправляющих ошибки кратности до t , вероятность исправления ошибки составит:

$$P_{исп} = \sum_{i=1}^t P_{ou}^i, \text{ или } P_{исп} = \sum_{i=1}^t C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}. \quad (8)$$

Исправление ошибки кратности t может сопровождаться следующими ситуациями:

1. Сообщение принято без ошибок с вероятностью P_{np}^i ;
2. Сообщение принято с ошибкой с вероятностью P_{ou}^i . Очевидно, что $P_{np} + P_{ou} = 1$;
3. Сообщение принято с ошибкой, которая исправляется данным кодом с вероятностью $P_{исп}^i$;
4. Сообщение принято с ошибкой, которая не исправляется данным кодом с вероятностью $P_{л}^i$.

Отсюда $P_{ou} = P_{исп} + P_{л}$. Используя выражения (5), (8), получаем:

$$P_{л} = 1 - (1 - p)^n - \sum_{i=1}^t C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}, \quad (9)$$

где $P_{л}$ – вероятность приема ложного сообщения;

p – вероятность искажения двоичного символа в сообщении;

n – длина сообщения;

Эта формула позволяет вычислять вероятность приема ложного сообщения при передаче информации в канале с независимыми ошибками с помощью кода, исправляющего t -кратные ошибки.

Для кодов, обнаруживающих ошибки, характерны следующие ситуации:

1. Сообщение принято без ошибок с вероятностью P_{np}^i ;
2. Сообщение принято с обнаруживаемой ошибкой, которая обнаруживается и стирается с вероятностью $P_{см}^i$;
3. Сообщение принято с необнаруживаемой ошибкой, искаженное сообщение не стирается данным кодом с вероятностью $P_{л}^i$. Отсюда $P_{ou} = P_{см} + P_{л}$.

Поскольку сообщения, в которых обнаружена ошибка, потребителю не выдаются, то вероятность приема ложного сообщения оценивается:

$$P_{л} = \sum_{i=d}^n W \cdot p^i (1 - p)^{n-i}, \quad (10)$$

где W – весовая характеристика кода, определяющая число вариантов необнаруживаемых ошибок;

d – минимальное кодовое расстояние корректирующего кода.

С учетом (10) в [2] получено:

$$P_{л} \leq \frac{1}{(1 - p)^t C_{n+t}^t} \times \left[1 - \sum_{i=0}^{2t} C_{n+t}^i p^i (1 - p)^{n+t-i} - \sum_{i=n+1}^{n+t} C_{n+t}^i p^i (1 - p)^{n+t-i} \right], \quad (11)$$

где $t = (d - 1) / 2$ – кратность исправляемой корректирующим кодом ошибки.

В [3, 4] приводится приближенная оценка вероятности приема ложного сообщения:

$$P_{л} \approx \frac{1}{2^r} \sum_{i=d}^n C_n^i p^i (1 - p)^{n-i}, \quad (12)$$

где r – число проверочных разрядов корректирующего кода.

3 ВЕРОЯТНОСТЬ ПРИЕМА ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЕГО ПО КАНАЛАМ С ПАКЕТНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ОШИБОК

На практике каналы связи характеризуются зависимостью вероятности искажения последующего символа от предыдущего, т. е. имеют память. Образование пакета ошибок в передаваемых сообщениях объясняется влиянием на прохождение сигналов сезонных и суточных изменений метеоусловий, быстрых и медленных замираний, импульсных помех от промышленных предприятий, взаимных помех и т. д. В таких условиях нахождение вероятности ошибок довольно затруднительно, поэтому, как правило, для расчетов используют приближенные выражения. В работах [2–4] приведены приближенные формулы для расчета, использующие всего два параметра: p – вероятность искажения двоичного символа и α – показатель группирования ошибок.

Для кодов, исправляющих ошибки,

$$P_{л} \approx \left(\frac{n}{t+1} \right)^{1-\alpha} \cdot p, \quad (13)$$

а для кодов, обнаруживающих ошибки,

$$P_{л} \approx \frac{1}{2^r} \left(\frac{n}{d} \right)^{1-\alpha} \cdot p. \quad (14)$$

Сравнительные характеристики вероятности приема ложного сообщения в зависимости от вероятности искажения двоичного символа приведены на рисунке 2.

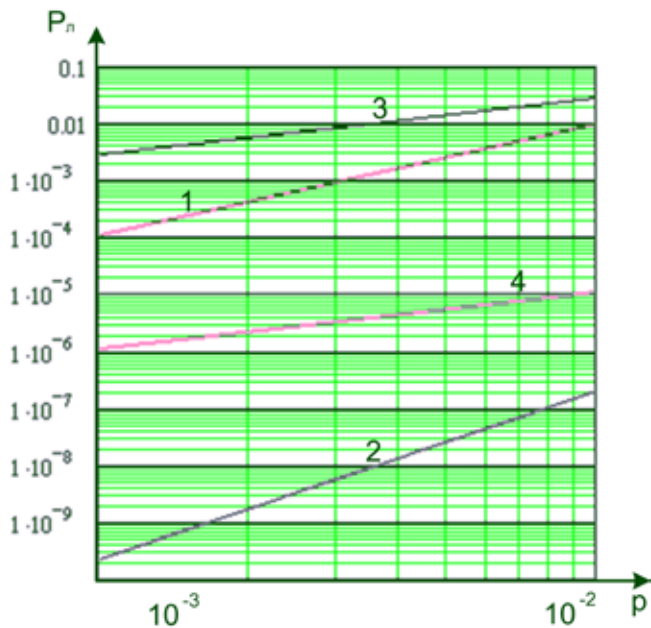


Рис. 2. Вероятность приема ложного сообщения в однонаправленных системах передачи

в каналах с независимыми ошибками:

в режиме исправления ошибок – кривая 1;

в режиме обнаружения ошибок – кривая 2;

в каналах с памятью:

в режиме исправления ошибок – кривая 3;

в режиме обнаружения ошибок – кривая 4

Из рисунка видно, что использование корректирующего кода в режиме обнаружения ошибок более эффективно, чем в режиме исправления.

4 ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПРИЕМА ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Использование корректирующего кода в режиме обнаружения ошибок предполагает стирание сообщений, в которых ошибка обнаружена, поэтому для исправления ошибок используют системные методы, основанные на запросе неполученной (стертой) информации. Оценим влияние обратной связи на вероятность приема ложного сообщения $P_{л_ос}$.

На вход приемника (см. рис. 1) поступают сообщения, принятые правильно, и сообщения с необнаруженными ошибками. Отсюда, вероятность $P_{л_ос}$ соответствует доле сообщений с необнаруженными ошибками среди сообщений, переданных по дискретному каналу и поступающих на вход приемника:

$$P_{л_ос} = \frac{P_l}{P_{np} + P_l} = \frac{P_l}{1 + P_{см}}, \quad (15)$$

где $P_{л_ос}$ – вероятность приема ложного сообщения в системах передачи с обратной связью;

P_l – вероятность приема ложного сообщения в системах передачи без обратной связи, рассчитываемая по формулам (9–14);

P_{np} – вероятность правильного приема сообщения;

$P_{см}$ – вероятность стирания сообщения, в котором обнаружена ошибка.

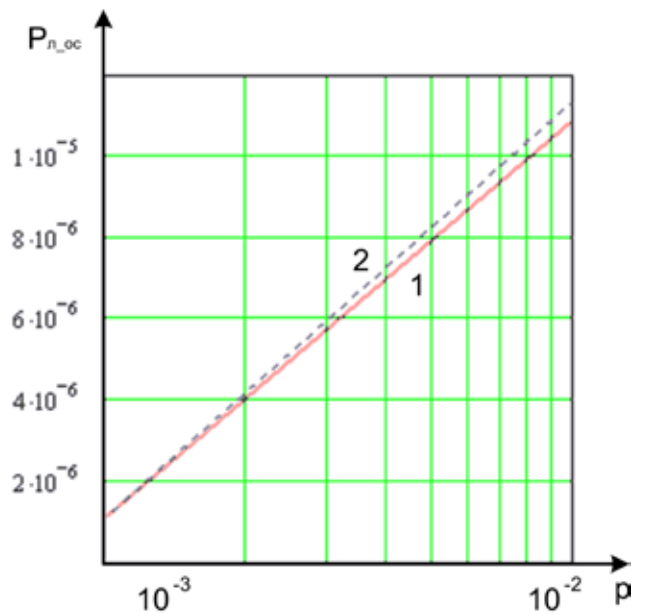


Рис. 3. Вероятность приема ложного сообщения при использовании корректирующего кода в режиме обнаружения ошибок:

– в однонаправленных системах передачи – кривая 1;

– в системах передачи с обратной связью – кривая 2

Вероятность стирания $P_{см}$ определяется как разность вероятности появления хотя бы одной ошибки в n -элементном сообщении и вероятности обнаружения ошибок. Для каналов с группированием ошибок вероятность стирания рассчитывается по следующей приближенной формуле [3, 4]:

$$P_{см} \approx n^{1-\alpha} p, \quad (16)$$

где α – показатель группирования ошибок.

Отсюда вероятность приема ложного сообщения равна:

$$P_{л_ос} \approx \frac{1}{2^r} \left(\frac{n}{d} \right)^{1-\alpha} \cdot \frac{p}{1 - n^{1-\alpha} \cdot p}. \quad (17)$$

На рисунке 3 приведены сравнительные характеристики вероятностей приема ложного сообщения в однонаправленной системе передачи – кривая 1 и в системе передачи с обратной связью – кривая 2. Из рисунка видно, выигрыш по снижению риска приема ложного сообщения незначителен и при улучшении качества канала связи практически отсутствует.

5 СНИЖЕНИЕ РИСКА ПРИЕМА ЛОЖНОГО СООБЩЕНИЯ ЗА СЧЕТ ЗАМЕДЛЕНИЯ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ

В общем случае достоверность приема сообщения есть функция отношения пропускной способности канала связи к технической скорости передачи:

$$p = f\left(\frac{C}{R}\right), \quad (18)$$

где C – пропускная способность канала с помехами;

R – техническая скорость передачи сообщения в канале связи.

Пропускная способность – это потенциально возможная скорость передачи информации по каналу с помехами, которая определяется формулой Шеннона [3]:

$$C = \Delta F \cdot \ln(1 - h^2), \quad (19)$$

где ΔF – ширина полосы частот пропускания канала;

$h^2 = P_c/P_{ш}$ – отношение мощности сигнала P_c к мощности $P_{ш}$ шума.

Если представить мощность шума $P_{ш}$ через его одностороннюю спектральную плотность мощности белого шума N_0 , распределенную в полосе частот пропускания канала ΔF , то можно записать [5]:

$$h^2 = \frac{P_c}{N_0 \cdot \Delta F} = \frac{P_c}{N_0 \cdot R}. \quad (20)$$

Функциональная связь (19) между вероятностью искажения двоичного символа и параметром h^2 определяется многими факторами. К основным из них принято относить способ ведения оптимального приема (когерентный и некогерентный), а также способ преобразования сигнала при передаче (вид манипуляции).

Выражения для расчета вероятности ошибки при различных видах модуляции и способах обработки сигнала на приеме приведены в таблице 1.

В таблице приняты следующие обозначения:

p – вероятность искажения двоичного символа;

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \text{– интеграл}$$

вероятности.

Используя выражения, приведенные в таблице 1, представим на рисунке 4 графики зависимости для различных видов манипуляции (ЧТ, АТ и ОФТ). Из рисунка 4 видно, что снижение скорости передачи сообщений оказывает существенное влияние на снижение значения вероятности искажения двоичного символа p .

Взяв за основу значения вероятности искажения двоичного символа p , рассчитаем вероятность приема ложного сообщения в однонаправленных системах передачи сообщений в режиме обнаружения ошибок согласно выражениям (13), (14). Результаты расчетов для режима частотной манипуляции (ЧТ) приведены на рисунке 5.

Из рисунков 4, 5 видно, что снижение скорости передачи в режиме ЧТ до 100 бит/с позволит снизить значение вероятности приема ложного сообщения при использовании корректирующего кода в режиме исправления ошибок до 10^{-14} , а в режиме обнаружения ошибок – до 10^{-18} .

Таблица 1

Выражения для вычисления вероятности искажения двоичного символа

Манипуляция	Вид обработки сигнала	
	некогерентный	когерентный
Амплитудная (АТ)	$p = \frac{1}{2} \cdot e^{-0,25h^2}$	$p = 1 - F(h^2 \sqrt{0,5})$
Частотная (ЧТ)	$p = \frac{1}{2} \cdot e^{-0,5h^2}$	$p = 1 - F(h^2)$
Фазовая (ФТ)	$p = \frac{1}{2} \cdot e^{-0,25h^2}$	$p = 1 - F(h^2 \sqrt{2})$
Относительная фазовая (ОФТ)	$p = \frac{1}{2} \cdot e^{-h^2}$	$p = 2 \cdot [1 - F(h^2 \sqrt{2})] \cdot F(h^2 \sqrt{2})$

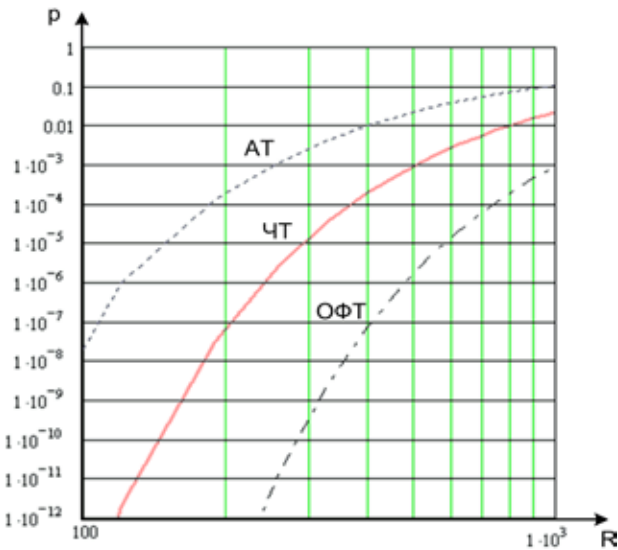


Рис. 4. Зависимость вероятности искажения двоичного символа от скорости передачи при когерентном приеме

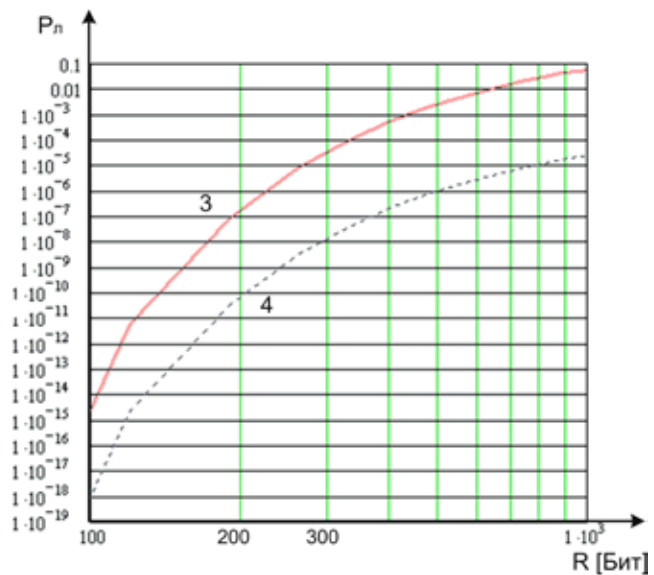


Рис. 5. Вероятность приема ложного сообщения в однонаправленных системах передачи, в каналах с памятью:

- в режиме исправления ошибок – кривая 3;
- в режиме обнаружения ошибок – кривая 4

6 Оценка вероятности приема ложного сообщения в системах с заданными параметрами достоверности передачи

При проектировании АСУВ в большинстве случаев приходится сталкиваться с ситуацией, когда задан параметр системы передачи – вероятность ошибочного приема кодовой комбинации (знака) $P_{ош}$ при условии, что будет использоваться канал связи с вероятностью искажения двоичного символа не хуже p_{min} .

Для данного варианта, в соответствии с приведенными ранее рассуждениями ложное сообщение будет принято всякий раз, как только принято сообщение с нераспознанной ошибкой, т. е. $P_l = P_{ош}$.

Снижение вероятности приема ложного сообщения за счет замедления скорости передачи в этом случае учитывается через коэффициент замедления, рассчитываемый как отношение вероятности искажения двоичного символа при пониженной скорости передачи к вероятности искажения двоичного символа на скорости, для которой определена вероятность ошибки:

$$K_{зам} = \frac{p(R_{зам})}{p(R_{ном})}, \quad (21)$$

где $p(R_{зам})$ – вероятности искажения двоичного символа при пониженной (замедленной) скорости передачи;

$p(R_{ном})$ – вероятности искажения двоичного символа при номинальной скорости передачи.

При снижении скорости передачи ложное сообщение будет принято с вероятностью:

$$P_l = P_{ош} \cdot K_{зам}, \quad (22)$$

где $P_{ош}$ – нормированное значение вероятности ошибочного приема кодовой комбинации в системе передачи.

Результаты расчета коэффициента замедления для каналов с группированием ошибок приведены на рисунке 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация проектируемых систем на ранних этапах разработки позволяет существенно снизить затраты на их изготовление, обеспечивая при этом требуемые значения характеристик. В этой связи предлагаемый подход к

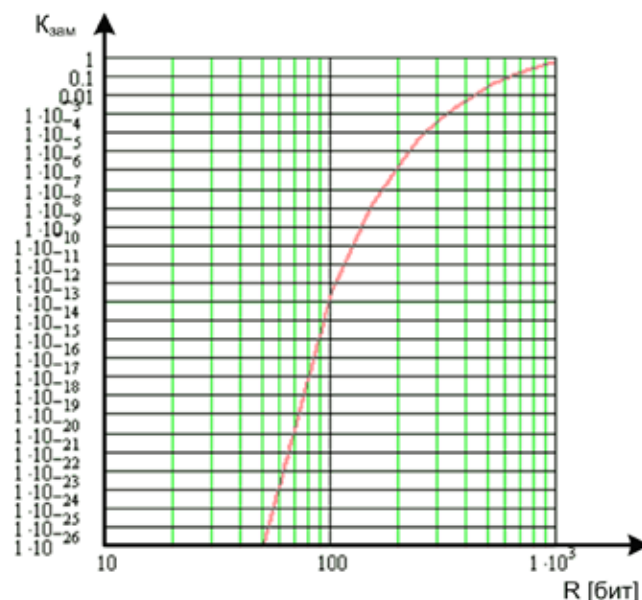


Рис. 6. Коэффициент замедления скорости передачи для каналов с группированием ошибок

оценке вероятности приема ложного сообщения, учитывающий как параметры каналов связи (систем передачи), так и характеристики корректирующих кодов, может быть использован при проектировании автоматизированных систем управления войсками с заданными параметрами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – М. : Издательский центр «Академия», 2003. – 576 с.
2. Кодирование информации (двоичные коды) / под ред. Н. Т. Березюк. – Харьков: Вища школа, 1978. – 252 с.
3. Передача дискретных сообщений / под ред. В. П. Шувалова. – М. : Радио и связь, 1991. – 483 с.
4. Теория и техника передачи данных и телеграфия / Л. П. Пуртов [и др.]. – Л. : ВАС, 1973. – 481 с.
5. Игнатов, В. В. Военные системы радиосвязи. Ч. I. / В. В. Игнатов [и др.]. – Л. : ВАС, 1989. – 386 с.