

# ЗАЩИТА ОТ ОШИБОК В СЕТЯХ АТМ

*Богданов В.Н., Вихлянцев П.С., Симонов М.В.,  
дочернее государственное унитарное  
предприятие  
"Научно-технический центр "Атлас-  
Северо-Запад"*

## Введение

Идея создания широкополосных цифровых сетей интегрального обслуживания на технологии ATM возникла как принципиально новая парадигма построения сетей связи. Вместо стандартных и многочисленных сетей телефонной, телеграфной, факсимильной связи и сетей передачи данных (каждая из которых рассчитана только на обеспечение одного вида связи тем или иным способом переноса информации) предполагается построить единую цифровую сеть на базе широкого использования волоконно-оптических линий связи и единого метода транспортирования по сети всех видов информации с помощью технологии асинхронного режима переноса пакетов фиксированной длины (ячеек) [1].

Благодаря технологии, ATM становится однородным и решает для всех видов информации общую задачу - быстрой коммутации ячеек и асинхронного временного разделения ресурсов, при котором множество виртуальных соединений с различными скоростями асинхронно мультиплексируется в едином физическом канале связи - цифровом тракте.

Однако ничего не дается даром. Основная возникающая в сетях ATM проблема - это проблема удовлетворения требований различных служб к семантической и временной прозрачности сети и их адаптация к единому методу переноса. В данной статье рассматривается семантическая прозрачность сети, показатели, ее характеризующие, и методы защиты от ошибок в сетях ATM.

## 1. Семантическая прозрачность сети и ее показатели

Под семантической прозрачностью понимается способность сети обеспечивать доставку информации от источника до адресата с приемлемым для данной службы уровнем ошибок.

Ни одна система передачи не является идеальной. В реальных каналах действуют искажения сигналов, замирания, шумы, различные помехи, которые в дискретном канале проявляются в виде ошибок.

Одним из наиболее часто используемых показателей, характеризующих качество цифровых систем передачи, является коэффициент двоичных ошибок (BER - Bit Error Rate), который представляет собой отношение оши-

бочно принятых бит к общему количеству переданных бит. При передаче за достаточно большой (репрезентативный) интервал времени коэффициент двоичных ошибок сходится к вероятности ошибочного приема двоичного символа (вероятности ошибки на бит):

$$P_{BER} = \lim_{N_{\Sigma} \rightarrow \infty} \frac{N_{BER}}{N_{\Sigma}}$$

где  $N_{BER}$  - количество ошибочно принятых двоичных символов;  $N_{\Sigma}$  - общее количество переданных бит.

В сетях с пакетной передачей используется вероятность приема пакета с ошибками или вероятность искажения пакета ( $P_{PER}$  - Packet Error Rate):

$$P_{PER} = \lim_{N_{\Sigma пак} \rightarrow \infty} \frac{N_{PER}}{N_{\Sigma пак}}$$

где  $N_{PER}$  - количество пакетов, принятых с ошибками;

$N_{\Sigma пак}$  - общее количество переданных пакетов.

Ошибки в общем случае могут привести к разным последствиям. В некоторых случаях пакеты могут потеряться, а в других - поступать не по назначению.

Потеря пакетов происходит

из-за ошибок при маршрутизации или вследствие перегрузок. Вероятность потери пакета (*PLR* - Packet Loss Rate) есть отношение количества утраченных пакетов к общему количеству переданных за достаточно большой промежуток времени:

$$P_{PLR} = \lim_{N_{\Sigma пак} \rightarrow \infty} \frac{N_{\Sigma потер} }{N_{\Sigma пак}}$$

где  $N_{\Sigma PLR}$  - количество потерянных пакетов;  $N_{\Sigma пак}$  - общее количество переданных пакетов.

Иногда пакеты могут поступать адресату, которому они не предназначены. Будем называть такие случаи доставкой пакета не по адресу. Вероятность доставки пакета не по адресу (*PIR* - Packet Insertion Rate) есть отношение количества пакетов, доставленных не по адресу, к общему количеству принятых пакетов за достаточно большой интервал времени наблюдения:

$$P_{PIR} = \lim_{N_{\Sigma пак} \rightarrow \infty} \frac{N_{\Sigma не по адресу} }{N_{\Sigma пак}}$$

где  $N_{PIR}$  - количество пакетов, доставленных не по адресу;  $N_{\Sigma пак}$  - общее количество принятых пакетов.

Природа этих ошибок во многом определяется техническими устройствами, в которых они возникают. В передающих устройствах осуществляется формирование битовой последовательности. Поэтому цифровые тракты связи лучше всего характеризовать вероятностью ошибочного приема  $P_{BER}$ .

В устройствах коммутации (мультиплексирования) могут возникать ошибки как в приеме двоичных единиц, так и в приеме пакетов, приводящие к их потере или засылке не по адресу.

Ошибки в трактах передачи возникают по различным причинам. Некоторые из них определяются самими системами передач, другие же зависят от внешних причин.

Ошибки, зависящие от систем передачи, определяются в основном физической средой (коаксиальная линия, волоконно-оптическая линия и взаимосвязанные с ними системы передачи) и рядом других факторов (видом кодирования, скремблирования и т.д.).

На рис. 1 приведено распределение ошибок в оптической системе, изготовленной AT&T в лабораторных условиях, а на рис. 2 - в условиях эксплуатации. Из рисунков следует, что в лабораторных условиях большинство возникающих ошибок являются одиночными (99,64%), возникновение двух и более ошибок не превышает 0,36%. В условиях эксплуатации большинство ошибок также являются одиночными, но в процентном отношении они составляют

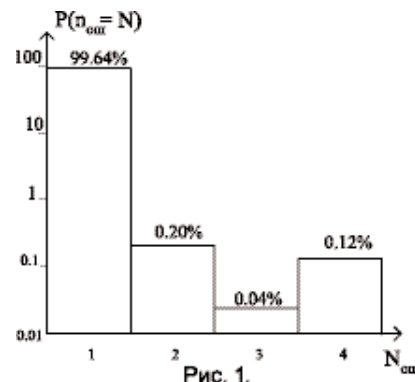


Рис. 1.

только 65%, зато в 10% случаев количество ошибок равно 100 и более. Таким образом, в трактах передачи имеется два типа ошибок: одиночные ошибки, которые являются, как правило, следствием несовершенства систем передачи; пачки ошибок, возникающие при эксплуатации систем передачи в реальных условиях.

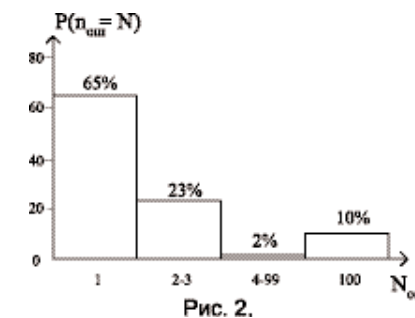


Рис. 2.

только 65%, зато в 10% случаев количество ошибок равно 100 и более. Таким образом, в трактах передачи имеется два типа ошибок: одиночные ошибки, которые являются, как правило, следствием несовершенства систем передачи; пачки ошибок, возникающие при эксплуатации систем передачи в реальных условиях.

## 2. Методы защиты от ошибок в сетях АТМ

Если качество обслуживания абонентов не соответствует требуемому уровню для данной службы, то существует возможность улучшить это качество путем использования соответствующих сквозных протоколов на транспортном уровне.

Пусть, например, требуется практически безошибочная передача финансовой информации. Улучшение качества сквозной передачи может быть достигнуто либо с помощью определенного способа обнаружения и исправления ошибок (*FEC* - Forward Error Correction), либо посредством повторной передачи в случае обнаружения ошибок с использованием протоколов автоматического повтора передачи (*ARQ* - Automatic Repeat Request).

Для обнаружения и исправления ошибок применяются различные способы кодирования, основанные на введении избыточности на битовом уровне. Используются коды Хэмминга, Голея, БЧХ и др., которые могут исправлять различные комбинации ошибок в зависимости от степени избыточности [2-3].

Способы *ARQ* основываются на повторной передаче информации, принятой с ошибками. Однако для того чтобы обнаружить ошибки в принятой информации, также применяются способы кодирования, которые взаимосвязаны со способами обнаружения и исправления. Коды Хэмминга, Голея, БЧХ могут использоваться как для обнаружения ошибок, так и для их обнаружения и исправления.

В сетях связи, использующих кабельные линии связи с медными жилами, вероятность возникновения ошибок высока и необходимый уровень семантической прозрачности между пользователями не гарантируется. Это диктует необходимость исправлять ошибки на уровне "звено - звено", как это сделано в сетях X.25,

где в каждом звене используется протокол HDLC (управление звеном передачи данных верхнего уровня) [4-6].

Очевидно, что при низком качестве обслуживания многие пакеты будут потеряны и потребуются их повторная передача. При использовании механизма скользящего окна возможна повторная передача и нормально принятых пакетов вместе с утраченными или принятыми с ошибками, что увеличивает объем трафика.

Количество пакетов, подлежащих повторной передаче, зависит от типа протокола ARQ и количества переданных, но еще не подтвержденных пакетов. Пусть используется алгоритм Go-Back-N, при котором среднее количество переданных, но не подтвержденных пакетов равно  $N_{OKH}/2$ , а вероятность события, что пакет искажен или утрачен -  $P_{PER}$ . Отсюда можно рассчитать, на какую величину возрастает трафик:

- если пакет принят правильно с повторной попытки, то ожидаемое количество повторных передач есть  $N_{OKH}P_{PER}(1-P_{PER})/2$ ;
- если после первой повторной попытки пакет снова принят с ошибкой и передается еще один раз, то вероятность того, что пакет будет принят правильно, равна  $P_{PER}^2(1-P_{PER})$ .

В этом случае ожидаемое количество повторно переданных пакетов равно  $N_{OKH}P_{PER}^2(1-P_{PER})/2$ . Повторные передачи осуществляются до тех пор, пока пакет не будет принят без ошибок.

Если просуммировать все вероятные случаи, то величина увеличения трафика равна:

$$R = \frac{N_{OKH}}{2} \frac{P_{PER}}{1-P_{PER}} \quad (1)$$

Предположим, что в сквозном соединении между пользователями системы участвует  $n$  звеньев, передача осуществляется пакета-

ми длиной  $L$  бит каждый, а вероятность ошибки на бит есть  $P_{BER}$ .

Будем полагать, что ошибки возникают только на уровне звена и распределены случайным образом. В этом случае вероятность доставки пакета в звене без ошибок есть  $(1-P_{BER})^L$ , а через  $n$  звеньев -  $(1-P_{BER})^{Ln}$ .

Вероятность того, что адресат получит пакет с ошибкой после его прохождения через  $n$  звеньев, составляет:

$$P_{PER} = 1 - (1 - P_{BER})^{Ln} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим величину увеличения трафика при его прохождении через  $n$  звеньев:

$$R(n) = \frac{N_{OKH}}{2} \frac{1 - (1 - P_{BER})^{Ln}}{(1 - P_{BER})^{Ln}}$$

Результаты расчетов  $R(n)$  в зависимости от вероятности ошибок на бит при доставке в сети пакетов ATM при  $n = 10$  представлены в табл. 1.

Таблица 1.

$P_{BER}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
$R(n)$	13	1,22	1,016	1,005

Численные исследования показывают, что обнаружение ошибок и повторная передача пакетов в каждом звене выгодны только в каналах связи с большим значением вероятности ошибки на бит, то есть в каналах низкого качества. В каналах высокого качества обнаружение и повторная передача пакетов в каждом звене к выигрышу (по сравнению с обнаружением и повторной передачей из конца в конец) не приводит. В то же время организация проверки ошибок по всей длине пакета требует, с одной стороны, наличия соответствующих вычислительных мощностей в каждом коммутационном центре, а с другой - увеличивает время обработки каждого

пакета. При использовании оптического волокна, где  $P_{BER} \leq 10^{-10}$ , необходимость проверки информационного поля пакета ATM исключается.

Ошибки, возникающие в сетях ATM, как и в любой сети с коммутацией пакетов, обусловлены как системами передачи, так и системами коммутации (мультиплексирования). Однако вследствие некоторых особенностей сетей ATM (отсутствие в звене контроля ошибок и повторной передачи) влияние ошибок отличается от классических систем с пакетной коммутацией.

Ошибки, возникающие в системах передачи, могут изменить (исказить) значение передаваемых бит. Если такая ошибка произошла при передаче информационного поля пакета, то искаженные биты будут переданы получателю, так как в звене контроль ошибок информационного поля не осуществляется. Если произойдет ошибка в поле идентификатора виртуального пути или в поле идентификатора виртуального канала, то коммутатор может неправильно идентифи-

цировать адрес и отправить пакет другому получателю по неправильному маршруту. Таким образом, один искаженный бит в заголовке может привести к тому, что один пользователь не получит предназначенный ему пакет, а к другому получателю поступит пакет, который ему не предназначался. Этот эффект в сетях ATM получил наименование "эффекта размножения ошибок".

Предположим, что в системе передачи вероятность появления ошибки на бит равна  $P_{BER}$ . Ошибки могут быть распределены равномерно или сгруппированы в длинные пачки ошибок (длиннее одного пакета). В случае прихода такой пачки ошибок информа-

ция в информационном поле пакета искажена, и поэтому искажение в заголовке, вызывающее потерю пакета, не вызовет эффекта размножения ошибок. В случае возникновения одиночной ошибки в заголовке адрес не будет найден, в результате чего пакет будет потерян, что вызовет эффект умножения ошибок. Пусть заголовок пакета состоит из  $H$  бит, информационное поле содержит  $I$  бит, и все пакеты имеют одинаковую длину  $L = H + I$ . Будем также полагать, что коммутационный узел АТМ интерпретирует все биты заголовка и использует их для определения направления передачи. В предположении гипотезы о равномерном распределении ошибок по длине пакета гипотетично можно предполагать, что вероятность возникновения ошибки в заголовке  $P_H \gg HP_{BER}$  и вероятность появления ошибки в информационном поле  $P_I \gg IP_{BER}$ .

Рассмотрим аналитические соотношения для оценки эффекта размножения ошибок в зависимости от варианта обнаружения и исправления ошибок в заголовке [7]:

1. Ошибки в заголовке не обнаруживаются и не исправляются, что приводит к неправильной маршрутизации. Если предположить наихудшую ситуацию, при которой любая ошибка в заголовке приводит к направлению пакета не по адресу, то в этом случае  $I$  бит поступит не по назначению а  $I$  бит поступит не по адресу. Таким образом,  $2I$  бит будут искажены. В этом случае вероятность ошибок на бит равна:

$$P_{BER}^{(1)} = \frac{I(2H+1)}{H+I} P_{BER}$$

Эффект умножения ошибок составляет:

$$W^{(1)} = \frac{P_{BER}^{(1)}}{P_{BER}} = \frac{2H+1}{1+H/I}$$

2. Ошибки в заголовке обнаруживаются, но не исправляются. Пакет с ошибкой в заголовке стирается. В этом случае  $I$  бит не поступит по своему назначению. Вероятность ошибок на бит и эффект умножения ошибок равны соответственно:

$$P_{BER}^{(2)} = \frac{I(H+1)}{H+I} P_{BER};$$

$$W^{(2)} = \frac{P_{BER}^{(2)}}{P_{BER}} = \frac{H+1}{1+H/I}$$

3. Ошибка в заголовке исправляется. Все информационные биты доставляются по назначению. Вероятность ошибок на бит и эффект умножения ошибок составляют соответственно:

$$P_{BER}^{(3)} = \frac{I}{H+I} P_{BER};$$

$$W^{(3)} = \frac{P_{BER}^{(3)}}{P_{BER}} = \frac{1}{1+I/H'}$$

Результаты расчета эффекта размножения ошибок при поле идентификатора виртуального пакета длиной 12 бит и поле идентификатора виртуального канала длиной 16 бит приведены в табл. 2.

Таблица 2.

Вариант защиты	1	2	3
Значение $W$	53,12	27	0,94

Например, для варианта защиты 1, когда ошибки в заголовке не обнаруживаются и не исправляются, при вероятности ошибки на бит  $10^{-8}$ , за счет эффекта размножения ошибок вероятность ошибок составит  $0,53 \cdot 10^{-6}$ . При условии, что в заголовке ошибки обнаруживаются и исправляются, эффекта умножения не происходит. Однако такая процедура обнаружения и исправления ошибок требует большого количества дополни-

тельных бит и достаточно сложна в реализации. Поэтому на практике используется более простой способ, при котором исправляются только одиночные ошибки.

Согласно эталонной модели протоколов ШЦСИО (Рек. ITU-T I.432) контроль над ошибками в заголовке является одной из функций физического уровня.

Каждый передатчик ячеек АТМ вычисляет значение поля контроля ошибок в заголовке по первым четырем октетам заголовка и заносит результаты вычислений в пятый октет. Значение поля контроля ошибок в заголовке согласно Рек. ITU-T I.432 определяется как остаток от деления по модулю 2 произведения  $X^8$  и содержимого четырех первых октетов заголовка на порождающий полином  $X^8 + X^2 + X + 1$ , к которому прибавляется по модулю 2 фиксированный набор 01010101.

Поле длиной 8 бит, отведенное для контроля ошибок в заголовке, позволяет обнаруживать и исправлять одиночные ошибки, а также обнаруживать большинство множественных ошибок. Блок-схема алгоритма контроля ошибок в заголовке, которая реализована для использования во всех подуровнях конвергенции с системами передачи физического уровня АТМ, приведена на рис. 3.

В обычном режиме схема на-

ходится в состоянии исправления одиночных ошибок (режим коррекции). При обнаружении одиночной ошибки она исправляется, но схема переходит в режим обнаружения ошибок (режим детектирования). Если в состоянии исправления одиночной ошибки обнаружена множественная ошибка, то пакет АТМ стирается, а схема переводится в состояние обнаружения ошибок.

В состоянии обнаружения ошибок все пакеты с ошибками,



Рис. 3.

обнаруженными в заголовке, стираются. При приеме пакета, у которого заголовок не имеет ошибки, схема снова переключается в состояние исправления одиночных ошибок.

Учитывая реальное распределение ошибок в оптических системах передачи, когда 65% ошибок являются одиночными, адаптивный алгоритм, обнаруживающий и исправляющий в заголовке пакета одиночные ошибки, обнаруживающий и стирающий пакеты ATM с множественными ошибками в заголовке, следует признать весьма эффективным и обеспечивающим требуемую семантическую прозрачность для большинства практических приложений.

На рис. 4 показаны характеристики механизма обнаружения и исправления ошибок в заголовке в зависимости от вероятности двоичной ошибки. Здесь сплошной

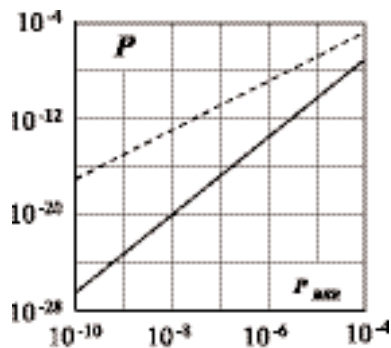


Рис. 4.

линией изображена вероятность ячеек с ошибочными заголовками, пунктиром - вероятность потери ячеек.

При вероятности двоичной ошибки, например  $10^{-8}$  (реальное значение для оптоволоконных систем передачи), вероятность отбрасывания ячейки (в результате ошибок в заголовке, которые были распознаны, но не были исправлены) составляет величину порядка  $10^{-13}$ .

Вероятность появления ячеек с ошибочными заголовками (ячейки, в которых ошибки в заголовке были не распознаны) составляет величину порядка  $10^{-20}$ .

**Заключение**

Одной из основных особенностей широкополосных цифровых сетей интегрального обслуживания, построенных на технологии ATM, является перенос всех видов информации различных служб единым методом - пакетами фиксированной длины (ячейками).

За счет использования высокоскоростных цифровых трактов, построенных на базе волоконно-оптических систем передачи и коммутационного оборудования, осуществляющего быструю коммутацию пакетов, удается с помощью разумных компромиссов выполнять основные требования служб к показателям семантической и временной прозрачности сети.

Переход на волоконно-оптические системы передачи дал возможность отказаться от проверки ошибок по всей длине пакета и от повторной передачи на уровне звена. Адаптивный алгоритм, позволяющий обнаруживать 89%

множественных ошибок и исправлять одиночные в заголовке пакета ATM на уровне звена, обеспечивает требуемые значения показателей семантической прозрачности для большинства практических приложений.

Показатели временной прозрачности сети ATM и методы их расчета будут рассмотрены в следующей статье.

**Литература:**

1. Назаров А.Н., Симонов М.В. ATM: Технология высокоскоростных сетей. - М.: Эко-Трендз, 1997. - 232 с.
2. Габидулин Э.М., Афанасьев В.Б. Кодирование в радиоэлектронике. - М.: Радио и связь, 1986. - 176 с.
3. Мартынов Ю.М., Крюков А.М., Разгон В.П. Математическое обеспечение сетей передачи данных. - М.: Радио и связь, 1986. - 288 с.
4. Вычислительные сети и сетевые протоколы. Пер. с англ. - М.: Мир, 1982. - 562 с.
5. Протоколы и методы управления в сетях передачи данных. Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1985. - 480 с.
6. Блэк Ю. Сети ЭВМ: протоколы, стандарты, интерфейсы. - М.: Мир, 1990. - 506 с.
7. Martin de Prycker. Asynchronous Transfer Mode: Solution for Broadband ISDN. - New York, London...: Ellis Horwood, 1993. - 331 p.

