

# ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В СПУТНИКОВЫХ СЕТЯХ протоколов передачи данных с подтверждением

А.Луценко, технический директор Направления связи ОАО "КБ "Искра"

Автор рассматривает влияние времени задержки распространения сигнала и вероятности битовых ошибок на пропускную способность спутниковых систем передачи информации. В статье даны рекомендации, позволяющие снизить влияние этих факторов.

Современные сети связи, ориентированные на гарантированную доставку информации, обычно используют протоколы передачи, изначально разработанные для наземных сетей и эффективно в них применяемые. Однако при использовании в спутниковых сетях проявляются недостатки таких протоколов. Очень часто ожидания потребителей услуг связи, впервые столкнувшихся со спутниковыми технологиями, не оправдываются, поскольку ожидания эти основаны на опыте использования наземных каналов связи. Чаще всего возникают претензии к скорости передачи информации. Приходится объяснять, почему предоставляемый спутниковый канал 2048 Кбит/с по скорости сильно отличается от наземного.

Оценим пропускную способность системы связи на линиях с задержкой на примере простейшего алгоритма с остановкой и ожиданием. Пусть имеется канал со скоростью  $R$  [бит/с], соединяющий источник  $A$  с приемником  $B$ . Задержка распространения сигнала от  $A$  до  $B$  равна  $\tau$  секунд (рис.1). Источник  $A$  в момент времени  $T_1$  начинает передачу пакета информации размером  $L$  байт.

Приемник  $B$  получит последний бит информации в момент времени

$$T_2 = T_1 + \tau + 8L/R,$$

после чего направит источнику подтверждение о приеме всего пакета. В момент времени

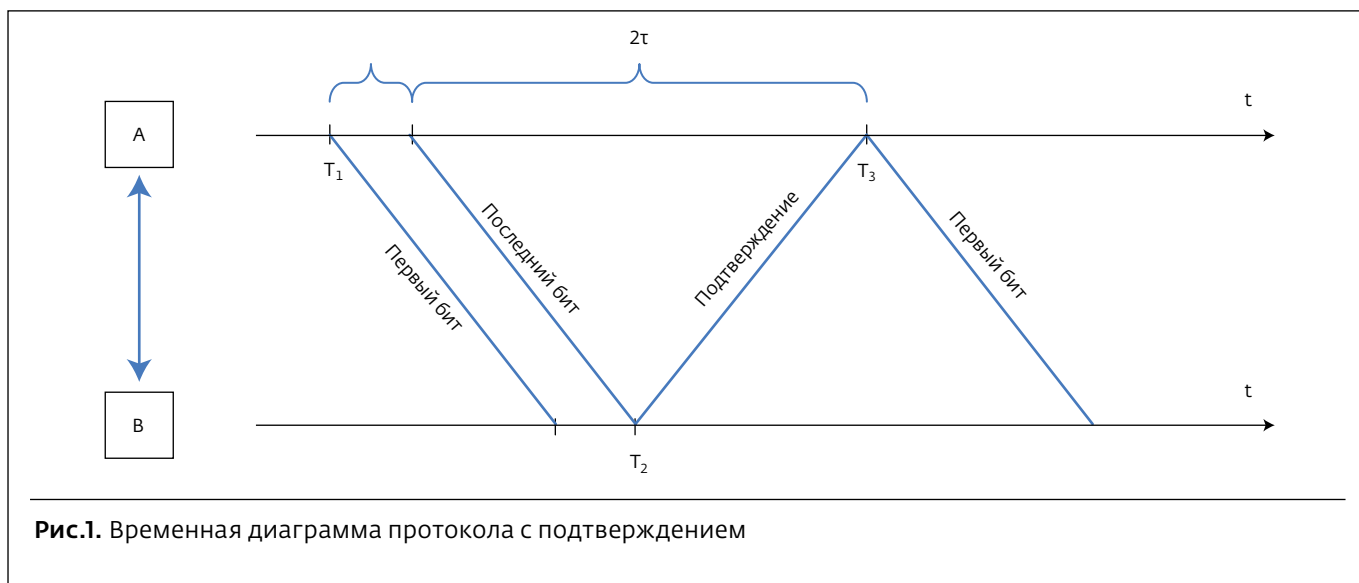
$$T_3 = T_2 + \tau$$

источник  $A$ , получив подтверждение от приемника  $B$ , сможет начать передачу следующего пакета информации. Далее цикл передачи повторяется. Таким образом, за время

$$T = 2\tau + 8L/R$$

будет передано от источника к приемнику  $L$  байт информации. Пропускная способность системы с подтверждением  $C$  [бит/с] составит:

$$C = \frac{8L}{2\tau + \frac{8L}{R}}. \quad (1)$$

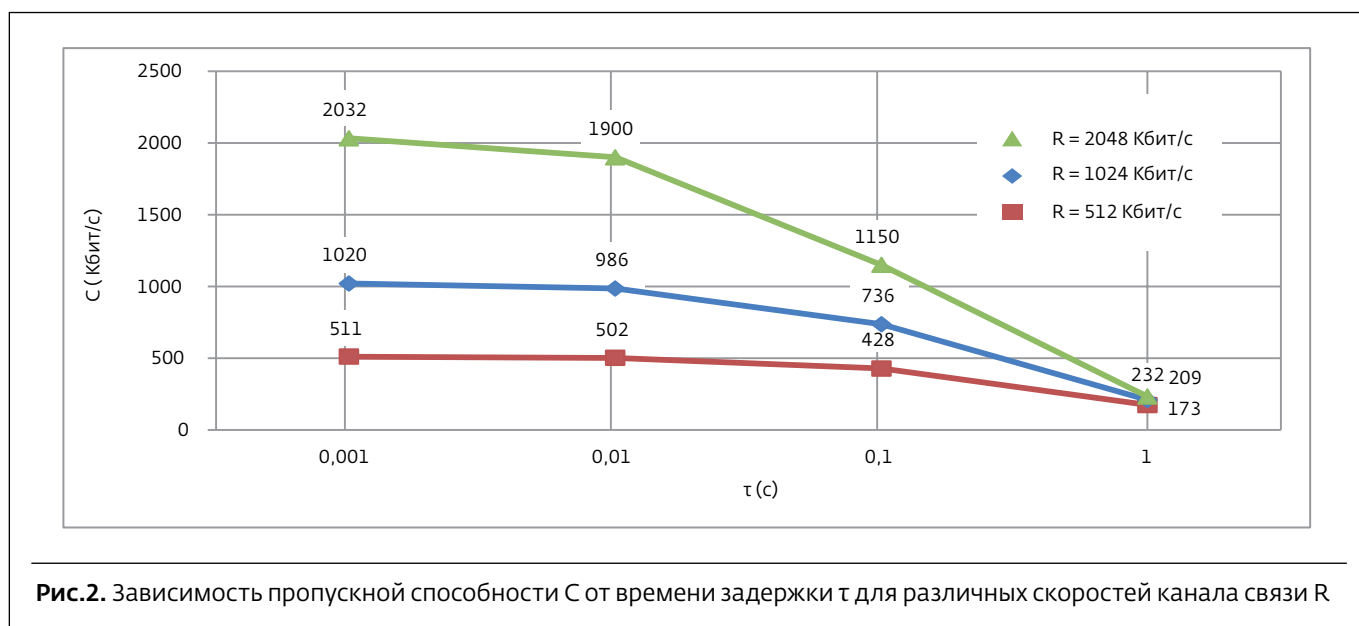


Формула справедлива для каналов без ошибок, чего на практике не бывает. Тем не менее, она позволяет понять влияние задержки на пропускную способность систем связи, использующих протоколы с подтверждением. На рис.2 приведена зависимость пропускной способности системы с подтверждением от времени задержки в канале связи при фиксированном размере пакета  $L$  и скорости канала связи  $R$ . Размер пакета принят равным 64 Кбайт. Расчеты выполнены для скоростей канала 512, 1024 и 2048 Кбит/с.

Приняв скорость  $R$  бесконечно большой, можно оценить теоретический предел пропускной способности системы с подтверждением:

$$C_{max} = \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{8L}{2\tau + \frac{8L}{R}} = \frac{4L}{\tau} \quad (2)$$

Вычислим максимальную пропускную способность для системы спутниковой связи, использующей космические аппараты на геостационарной орбите. Как известно, высота такой орбиты около 36000 км. Спутниковая линия включает в себя одну линию Земля-космос (линия вверх) и одну линию космос-Земля (линия вниз). Таким образом, сигнал от передающей до приемной станции проходит это расстояние дважды, и общая длина трассы равна примерно 72000 км. При таких условиях время доставки сигнала от источника  $A$  до приемника  $B$  составляет около 240 мс без учета



времени на буферизацию и обработку сигнала. Подставив в знаменатель формулы (2) полученное значение задержки, получаем, что при размере пакета 64 Кбайт теоретический предел пропускной способности составит около 1,1 Мбит/с.

Найдем пропускную способность спутникового канала со случайными ошибками, предварительно оценив влияние битовых ошибок на достоверность приема пакетов информации. Определим вероятность потери пакета длиной  $L$  байт в канале с ошибками. Будем считать, что пакет потерян, если искажен хотя бы один бит информации, содержащейся в пакете. Вероятность того, что ни один бит в пакете длиной  $n$  бит не будет искажен, равна произведению вероятностей правильной передачи каждого бита информации:

$$P = \prod_{i=1}^n (1 - P_{bi}),$$

где  $P_{bi}$  - вероятность искажения  $i$ -го бита. Если принять, что

$$P_{b1} = P_{b2} = \dots = P_{bn} = \text{BER},$$

где BER (Bit Error Rate) - коэффициент ошибок по битам, а  $n = 8L$ , то вероятность правильного приема пакета длиной  $L$  байт будет равна:

$$P = (1 - \text{BER})^{8L},$$

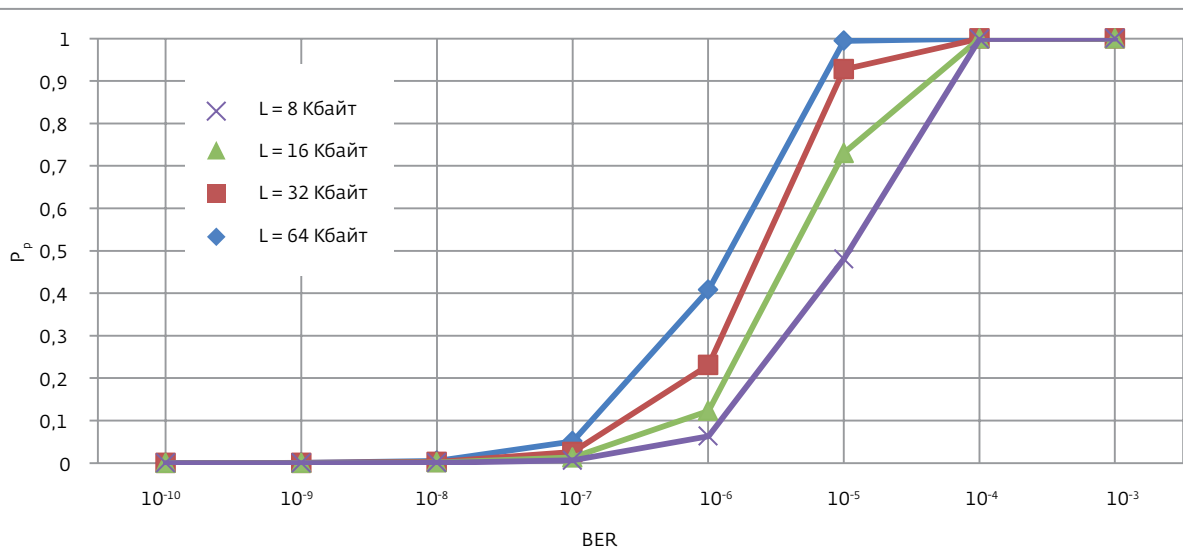
а вероятность потери такого пакета

$$P_p = 1 - (1 - \text{BER})^{8L}. \quad (3)$$

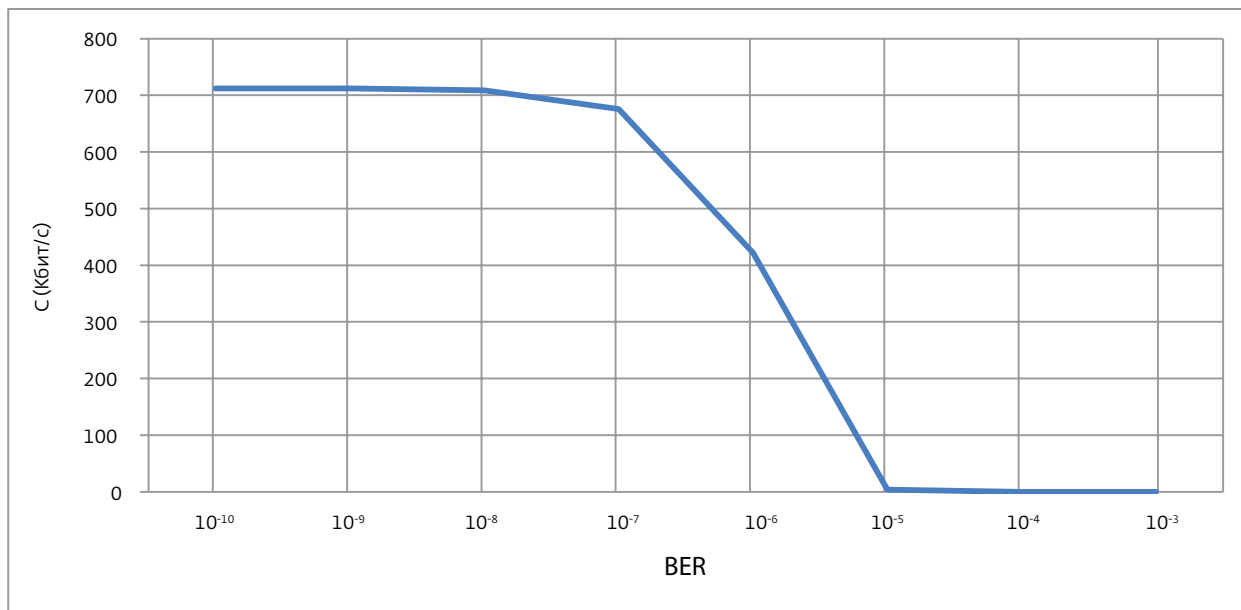
Графики вероятности потери пакета для различных размеров пакетов приведены на рис.3. Для расчета выбраны размеры пакетов 8, 16, 32 и 64 Кбайт. Как видно из графика, вероятность потери пакета резко возрастает при  $\text{BER} > 10^{-7}$ .

"Технические нормы на показатели функционирования сетей передачи данных", утвержденные Приказом Министерства информационных технологий и связи РФ от 27 сентября 2007 года № 113, допускают увеличение коэффициента потери пакетов информации не более чем до  $10^{-3}$ . Такие значения показателя обеспечиваются при  $\text{BER} < 10^{-9} \dots 10^{-8}$  в зависимости от размера информационного пакета.

Каждый искаженный пакет будет передан повторно, что дополнительно снизит пропускную способность системы. Поскольку пакет может быть неправильно принят и со второго, и с третьего раза, повторения будут идти до тех пор, пока пакет не будет доставлен без ошибок. Возникает дискретный случайный интервал времени между двумя соседними правильно принятыми пакетами. При отсутствии огра-



**Рис.3.** Зависимость вероятности потери пакета  $P_p$  от коэффициента ошибок по битам BER для различных размеров пакета  $L$



**Рис.4.** Зависимость пропускной способности  $C$  от коэффициента ошибок BER

ничений на количество повторных передач среднее время передачи пакета  $T_c$  составит:

$$T_c = T / (1 - P_p).$$

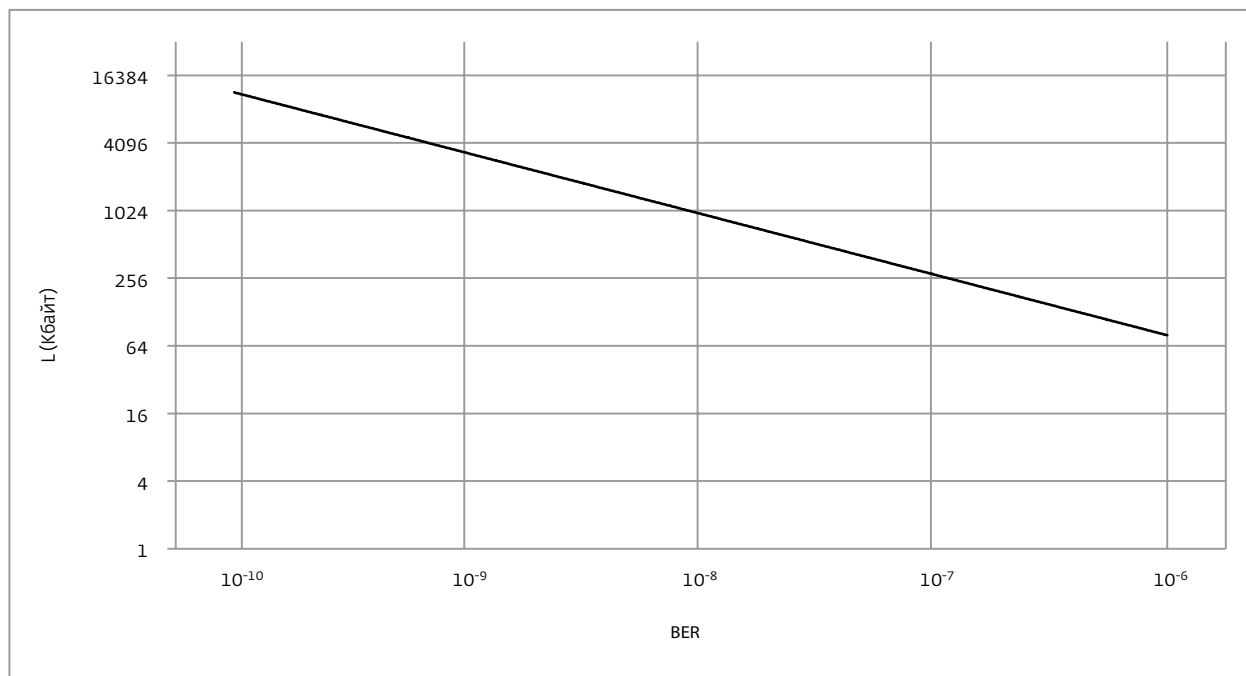
Перепишем формулу (1) с учетом этого:

$$C = \frac{8L(1 - BER)^{8L}}{2\tau + \frac{8L}{R}} \quad (4)$$

Зависимость пропускной способности системы с остановкой и ожиданием при постоянных  $\tau = 240$  мс,  $R = 2048$  Кбит/с и длине пакета  $L = 64$  Кбайт приведена на рис.4. Из графика видно, что для обеспечения снижения пропускной

способности не более чем на 10% должно выполняться условие  $BER < 10^{-7}$ .

Из сказанного можно сделать вывод, что при применении пакетных протоколов с подтверждением каналы связи с  $BER > 10^{-7}$  следует считать непригодными к использованию. Сравним с требованиями надежности основного цифрового канала ОЦК, установленными руководящим документом отрасли РД 45.041-99 "Нормы на электрические параметры цифровых каналов и трактов спутниковых систем передачи", где в качестве критерия отказа принимается повышение BER до величины более  $10^{-3}$  в течение 10 и более последовательных секунд. Как видно, требования для пакетных сетей должны быть



**Рис. 5.** Зависимость оптимального размера пакета L от коэффициента ошибок по битам BER

существенно выше. Коль скоро здесь упомянут руководящий документ отрасли, следует отметить необходимость появления подобных норм для спутниковых сетей, функционирующих на основе пакетных протоколов. И заказчику будет понятно, какие требования включить в документацию на закупку услуг, и у оператора будут четкие критерии качества функционирования сети. Уже несколько раз автор сталкивался с ситуацией, когда от оператора, оказывавшего услуги по передаче данных, требовалось выполнять условия документа РД 45.041-99.

Приведенные выше рассуждения показывают, что при увеличении размера пакета растет пропускная способность канала, но увеличивается вероятность потери пакета из-за ошибок в канале, что приводит к снижению пропускной способности. Очевидно, что существует оптимальный размер пакета, при котором пропускная способность будет максимальна при заданном значении BER. Результаты поиска максимального значения пропускной способности приведены на рис. 5. В расчетах принято время задержки  $\tau = 240$  мс и скорость канала  $R = 2048$  Кбит/с. При выборе соответствующего размера пакета пропускная способность сис-

темы связи, использующей протокол с остановкой и ожиданием, будет максимальной.

Разумеется, существуют и другие разновидности протоколов, обеспечивающих гарантированную доставку сообщений от отправителя к получателю. Например, протокол с возвратом к N или протокол с выборочным повторением. В обоих случаях пакеты формируются и непрерывно отправляются получателю без ожидания подтверждения. В случае протокола с возвратом к N, отправитель при получении отрицательного подтверждения или истечении установленного времени ожидания подтверждения возобновляет передачу с неподтвержденного пакета. В случае протокола с выборочным повторением, при получении отрицательного подтверждения или истечении установленного времени ожидания требуется повторная передача только неподтвержденного пакета. Эти протоколы, несомненно, имеют более высокую эффективность по сравнению с простейшим протоколом с остановкой и ожиданием, однако и они не лишены недостатков при больших задержках и ошибках в каналах связи.

Для снижения влияния спутниковой задержки применяются различные методы,

требуемые, разумеется, дополнительных аппаратных и вычислительных мощностей. Для оптимизации работы сети часто приходится детально выяснять потребности пользователя и настройки его сетевого оборудования, если таковое имеется. Рекомендуется разбивать сквозное соединение на несколько последовательных сегментов (два или три), применять кэширование, спуфинг или комбинацию различных методов в зависимости от решаемых сетью задач. Суть спуфинга в том, что отправитель сообщения получает подтверждение доставки пакета не от получателя, а от маршрутизатора, к которому непосредственно подключен источник сообщений. При этом создается иллюзия малой задержки, что заставляет источник передавать следующий пакет, не дожидаясь подтверждения от получателя сообщения. Кстати, именно этот метод используется для деления сквозного соединения на несколько последовательных сегментов. Кэширование применяется, как правило, в Интернете для доступа к часто используемым ресурсам. Кэширующий сервер хранит страницы или файлы, наиболее востребованные пользователями. Запрос конечного пользователя в первую очередь направляется серверу, который, если необходимая информация на нем хранится, возвращает пользователю интересующий ресурс без обращения к Интернету через спутниковый канал. Этот метод позволяет экономить также и на спутниковом ресурсе. Может использоваться комбинация спуфинга и кэширования, если каждый из методов по отдельности не дает желаемого эффекта. Интересные результаты тестирования различных методов, существенно повышающих пропускную способность спутниковых сетей связи, приведены в рекомендации МСЭ-R

S.1711-1 "Улучшение качественных показателей протокола управления передачей по спутниковым сетям".

Из вышесказанного можно сделать следующие выводы.

Применение на спутниковых каналах пакетных протоколов с повторной передачей ошибочно принятых пакетов приводит к снижению пропускной способности сетей связи. Причина заключается в большой задержке распространения сигнала, обусловленной расстоянием до спутника-ретранслятора, и ошибках в канале.

Эффективность спутниковой системы связи с применением пакетной передачи данных резко снижается при  $BER \geq 10^{-7}$ . При проектировании спутниковых сетей этот факт необходимо учитывать.

Оператор при эксплуатации сети должен следить за тем, чтобы ухудшение условий распространения сигнала из-за воздействия дождя или иных атмосферных явлений минимально сказывалось на показателях качества. Применение автоматической регулировки мощности сигнала передающей станции в зависимости от коэффициента ошибок на приемной позволяет это делать достаточно эффективно.

Для оптимизации работы пакетной сети связи, использующей спутниковые каналы, могут быть применены адаптивные методы изменения размера пакета в зависимости от коэффициента ошибок.

Необходима очень тщательная настройка оконечного сетевого оборудования пользователя для работы по спутниковым каналам, и здесь оператор должен дать соответствующие рекомендации, воспользовавшись которыми, пользователь оставит только положительные отзывы о спутниковой связи.