

УДК 681.324

С.В. АЛЕКСЕЕВ, О.А. ДРОБОТ, А.Б. КУРЕНКО

Харьковский университет Воздушных Сил, Украина

## ОПТИМАЛЬНАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ПАКЕТОВ ПО КРИТЕРИЮ ВРЕМЕНИ ДОСТАВКИ В БИТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОЦЕДУРЕ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ С КВИТИРОВАНИЕМ

Предложен критерий оптимальной фрагментации пакетов данных для достижения максимально возможного при заданных условиях уменьшения среднего времени доставки. Приведен способ расчета оптимального числа фрагментов. Показана линейная зависимость оптимального числа фрагментов от длины информационной части исходного пакета.

**сеть передачи данных, фрагментация, вероятностно-временные характеристики, среднее время доставки, критерий оптимальной фрагментации, оптимальное число фрагментов**

### Введение

В современных сетях передачи данных (СПД) фрагментация в большинстве случаев является вынужденной мерой и осуществляется при необходимости передачи пакетов большого размера в сеть (через сеть) с меньшим максимальным размером пакетов.

**Анализ последних достижений.** В общем случае фрагментация приводит к увеличению накладных расходов [1].

При фрагментации исходный пакет обычно разбивают на фрагменты максимально допустимой для данной сети (протокола) длины. Например, для АТМ максимально допустимая длина пакетов равна 48 байтам, для IP - 65535 байт [1 – 3].

Последний фрагмент может иметь длину менее максимальной. При этом в его поле данных длиной от 1 до MTU (Maximum Transfer Unit – максимальная длина поля данных) помещается остаток поля данных исходного пакета.

Разбиение исходного пакета на минимальное число фрагментов обусловлено тем, что в этом случае минимальна вносимая избыточность служебных разрядов.

Из практики эксплуатации СПД известно, что передача пакетов максимальной длины не во всех

случаях обеспечивает наилучшие вероятностно-временные характеристики (ВВХ).

В [4] рассмотрен случай разбиения исходного пакета на фрагменты равной длины для простейшей бит-ориентированной процедуры передачи данных с квитирированием для одного звена передачи без учета дополнительных потоков информации на узлах коммутации. Показано, что при произвольном законе распределения ошибок в канале связи (КС) фрагментация приводит к увеличению избыточности за счет служебной информации, но при этом возможно значительное уменьшение относительного среднего времени доставки и существенное повышение достоверности данных (особенно при использовании КС плохого качества – с вероятностью ошибки в единичном элементе  $P_o > 10^{-4}$ ).

**Выделение нерешенной задачи.** К основным ВВХ процесса обмена данными относят среднее (относительное среднее) время доставки и вероятность ошибки (эквивалентную вероятность ошибки) в данных.

Приведенные в [4] результаты исследований доказали, что для рассмотренной процедуры обмена данными в заданных условиях возможно достичь максимального уменьшения среднего времени доставки или максимального повышения достоверности

за счет выбора числа фрагментов. В общем случае число фрагментов, соответствующее наибольшему уменьшению среднего времени доставки отличается от числа фрагментов, соответствующего наибольшему повышению достоверности данных. В некоторых случаях при фрагментации улучшение по одному из показателей может привести к ухудшению по другому показателю.

Поэтому необходимо определить критерии оптимальной фрагментации, позволяющие найти для заданных условий оптимальное число фрагментов для разбиения исходного пакета.

Выделим следующие случаи:

- достижение максимально возможного уменьшения среднего времени доставки без учета изменения вероятности ошибки;
- достижение максимально возможного повышения достоверности без учета изменения среднего времени доставки;
- уменьшение среднего времени доставки при одновременном повышении достоверности данных.

**Цели статьи:** определить критерий оптимальной фрагментации пакетов для достижения максимально возможного уменьшения среднего времени доставки данных без учета изменения вероятности ошибки, разработать способ расчета оптимального числа фрагментов в заданных условиях и практические рекомендации по применению механизма фрагментации.

### Основной материал

Исходный пакет длиной  $N$  разрядов в общем случае содержит  $M$  информационных,  $K$  служебных и  $R$  проверочных разрядов:  $N = M + K + R$ , где  $M \geq 1$ ,  $K \geq 1$ ,  $R \geq 0$ .

Для рассмотренной в [4] простейшей бит-ориентированной процедуры обмена данными с квитированием для одного звена передачи без учета дополнительных потоков информации на узлах коммутации при вероятности правильной доставки

квитанции равной вероятности правильной доставки пакета ( $P_{кв} = P_{np}$ ) среднее время доставки определяется формулой

$$T_{\Delta.cp} = \left[ \frac{1}{(P_{np} + P_{но}) \cdot P_{np}} \cdot (1 + \eta) - \eta \right] \cdot T_n, \quad (1)$$

где  $P_{но}$  – вероятность необнаружения ошибок в пакете;  $T_n$  – время передачи пакета (без учета времени распространения сигнала), выражаемое через его длину и скорость модуляции ( $B$ ):  $T_n = N/B$ ;  $\eta$  – коэффициент пропорциональности длительности тайм-аута  $T_{ма} = \eta \cdot T_n$ ,  $\eta \geq 1$ .

При произвольном законе распределения ошибок в КС вероятности отсутствия и необнаружения ошибок в пакете в общем случае определяются как:

$$P_{np} = (1 - P_o)^N; \\ P_{но} = \left[ 1 - (1 - P_o)^N \right] \cdot 2^{-R}. \quad (2)$$

Если при фрагментации число служебных и проверочных разрядов в каждом из фрагментов соответствует их числу в исходном пакете, а информационная часть пакета разбивается на  $D$  равных частей ( $D \geq 1$ ), получаем [4]:

$$T'_{\Delta.cp} = \sum_{i=1}^D \left[ \frac{1}{(P'_{np} + P'_{но}) \cdot P'_{np}} \cdot (1 + \eta) - \eta \right] \cdot T'_n, \quad (3)$$

где

$$N' = \frac{M}{D} + K + R;$$

$$T'_n = \frac{N'}{B};$$

$$P'_{np} = (1 - P_o)^{N'}; \quad P'_{но} = \left[ 1 - (1 - P_o)^{N'} \right] \cdot 2^{-R}. \quad (4)$$

Тогда при произвольном законе распределения ошибок в КС отношение среднего времени доставки исходного пакета к среднему времени доставки фрагментированного пакета исходя из формул (1) – (4) будет иметь следующий вид:

$$\frac{T_{\Delta.cp}}{T'_{\Delta.cp}} =$$

$$= \left[ \frac{1}{\left( (1-P_o)^N + \frac{1-(1-P_o)^N}{2^R} \right) \cdot (1-P_o)^N} \cdot (1+\eta) - \eta \right] \times$$

$$\times \frac{N}{D \cdot N' \cdot \left[ \frac{(1+\eta)}{\left( (1-P_o)^{N'} + \frac{1-(1-P_o)^{N'}}{2^R} \right) \cdot (1-P_o)^{N'}} - \eta \right]} \quad (5)$$

Исследуем зависимость отношения (5) от числа фрагментов (рис. 1).

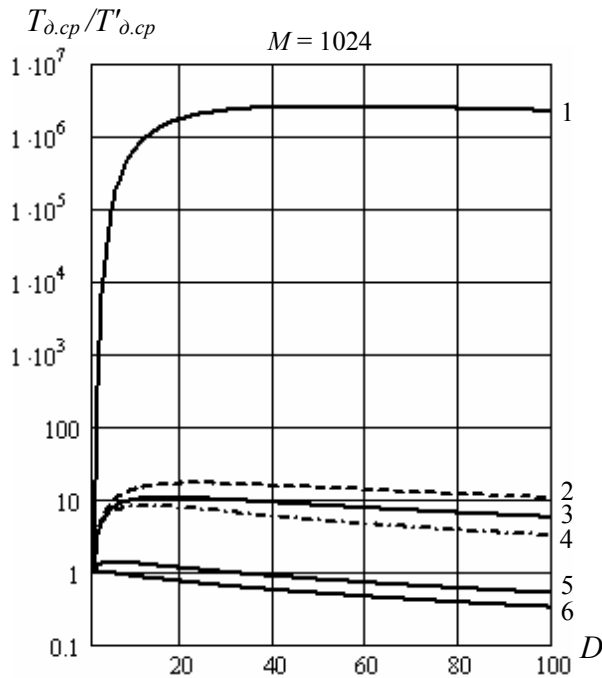


Рис. 1. Зависимость отношения среднего времени доставки исходного пакета к среднему времени доставки фрагментированного пакета от числа фрагментов при произвольном законе распределения ошибок в КС:

- 1 – при  $P_o = 10^{-2}$ ,  $K = 16$ ,  $R = 8$ ,  $\eta = 2$ ;
- 2 – при  $P_o = 10^{-3}$ ,  $K = 16$ ,  $R = 8$ ,  $\eta = 6$ ;
- 3 – при  $P_o = 10^{-3}$ ,  $K = 16$ ,  $R = 8$ ,  $\eta = 2$ ;
- 4 – при  $P_o = 10^{-3}$ ,  $K = 32$ ,  $R = 16$ ,  $\eta = 2$ ;
- 5 – при  $P_o = 10^{-4}$ ,  $K = 16$ ,  $R = 8$ ,  $\eta = 2$ ;
- 6 – при  $P_o = 10^{-5}$ ,  $K = 16$ ,  $R = 8$ ,  $\eta = 2$

Из приведенных на рис. 1 зависимостей видно, что отношение  $T_{д.ср}/T'_{д.ср}$  при любых значениях параметров  $P_o$ ,  $M$ ,  $K$ ,  $R$  и  $\eta$  имеет максимум (более четкий для графиков 2 – 5), которому соот-

ветствует единственное значение числа фрагментов  $D$ , являющееся оптимальным. Причем увеличение длительности тайм-аута приводит к возрастанию отношения средних времен доставки (так как фрагментация в этом случае позволяет снизить накладные расходы, обусловленные повторными передачами), а увеличение числа служебных разрядов – к уменьшению этого отношения (поскольку увеличивается избыточность процесса обмена данными).

Если фрагментация в заданных условиях не позволяет добиться уменьшения среднего времени доставки, число фрагментов будет равно  $D = 1$ , что соответствует отсутствию фрагментации.

Таким образом, критерий оптимальной фрагментации пакетов для достижения максимально возможного уменьшения среднего времени доставки данных без учета изменения вероятности ошибки может быть записан в виде

$$F \left\{ \frac{T_{д.ср}}{T'_{д.ср}} \right\} = \max, \quad D \geq 1. \quad (6)$$

Поиск оптимального числа фрагментов  $D_{opt}$  для заданных условий (т.е. при известных  $P_o$ ,  $M$ ,  $K$ ,  $R$  и  $\eta$ ) может быть реализован выполнением последовательности следующих действий:

$$D := 1$$

$$\text{while } \frac{T_{д.ср}(D)}{T'_{д.ср}(D)} \leq \frac{T_{д.ср}(D+1)}{T'_{д.ср}(D+1)} \text{ do } D := D+1$$

$$D_{opt} := D \quad (7)$$

Для большинства процедур обмена данными параметры  $K$  и  $R$  фиксированы: жестко заданы протоколом или определены в фазе установления соединения. Параметры  $P_o$ ,  $M$  и  $\eta$  могут изменяться в процессе обмена данными. При этом  $P_o$  и  $\eta$  зависят от характеристик используемого КС, а  $M$  – от интенсивности информационных потоков пользователя и/или приложений узла-отправителя.

Расчеты, проведенные в соответствии с (7) (рис. 2), показывают, что при заданных  $P_o$ ,  $K$ ,  $R$ ,

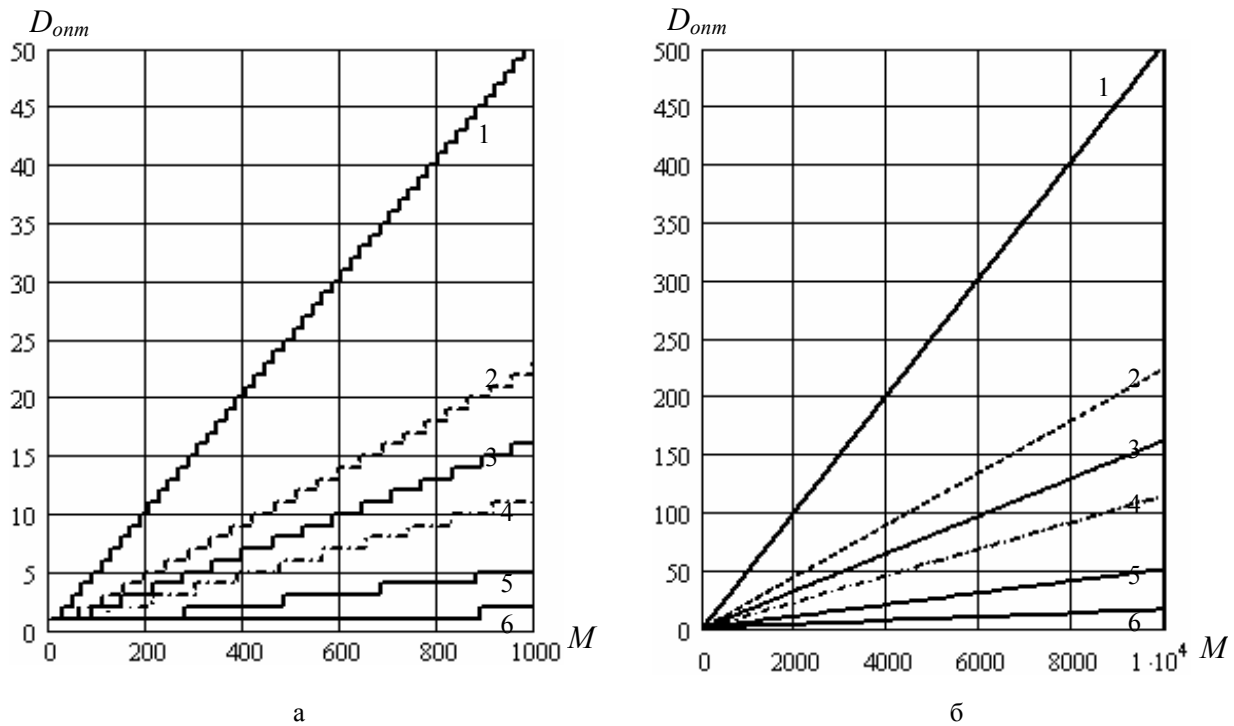


Рис. 2. Зависимость оптимального числа фрагментов от длины информационной части пакетов данных при произвольном законе распределения ошибок в КС (числовые обозначения графиков соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1): а – при  $M \leq 1000$ ; б – при  $M \leq 10000$

$\eta = const$  зависимость  $D_{omm}(M)$  является ступенчато-линейной.

Тогда

$$D_{omm} = \left\lceil \frac{M}{\alpha} \right\rceil, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности;

$\lceil \rceil$  – операция округления к ближайшему целому.

Из приведенных на рис. 2 зависимостей следует, что оптимальное число фрагментов возрастает при увеличении  $M$  и при ухудшении качества используемого КС.

Выигрыш по времени доставки при разбиении исходных пакетов на  $D_{omm}$  фрагментов, характеризуемый отношением  $\frac{T_{\partial.cp}}{T'_{\partial.cp}}$ , увеличивается при воз-

растании  $M$  и уменьшается при использовании КС более высокого качества (рис. 3).

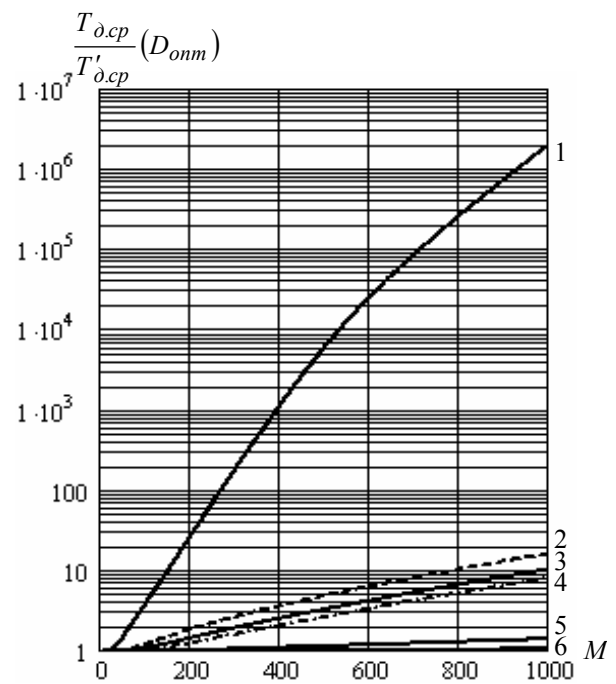


Рис. 3. Зависимость отношения среднего времени доставки исходного пакета к среднему времени доставки фрагментированного пакета от длины информационной части при оптимальном числе фрагментов (числовые обозначения графиков соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1)

При  $M = 10000$  и  $D = D_{onm}$  максимальное уменьшение среднего времени доставки составляет: для зависимости 1 –  $3,773 \cdot 10^{45}$  раз, для зависимости 2 –  $1,291 \cdot 10^7$  раз, для зависимости 3 –  $7,967 \cdot 10^6$  раз, для зависимости 4 –  $4,008 \cdot 10^8$  раз, для зависимости 5 – 15,841 раз, для зависимости 6 – 1,546 раз.

Длина информационной части фрагментов при оптимальной фрагментации может быть определена как

$$M' = \frac{M}{D_{onm}} \quad (9)$$

и при заданных параметрах с увеличением  $M$  асимптотически приближается к некоторому предельному значению (рис. 4). Скачкообразное изменение величины  $M'$  происходит в моменты изме-

нения значения  $D_{onm}$ , хорошо видимые на рис. 2, а, и обусловлено погрешностями округления (см. формулу (8)).

Можно утверждать, что оптимальная длина информационной части фрагментов

$$M'_{onm} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{M}{D_{onm}}. \quad (10)$$

Так, при  $M = 10000$ : для зависимости 1 –  $M'_{onm} \approx 19,7$ ; для зависимости 2 –  $M'_{onm} \approx 44,44$ ; для зависимости 3 –  $M'_{onm} \approx 61,5$ ; для зависимости 4 –  $M'_{onm} \approx 87$ ; для зависимости 5 –  $M'_{onm} \approx 197$ ; для зависимости 6 –  $M'_{onm} \approx 629$ .

Тогда для заданных  $P_o$ ,  $K$ ,  $R$ ,  $\eta = const$  формула (8) может быть записана в виде

$$D_{onm} = \left\lceil \frac{M}{M'_{onm}} \right\rceil. \quad (11)$$

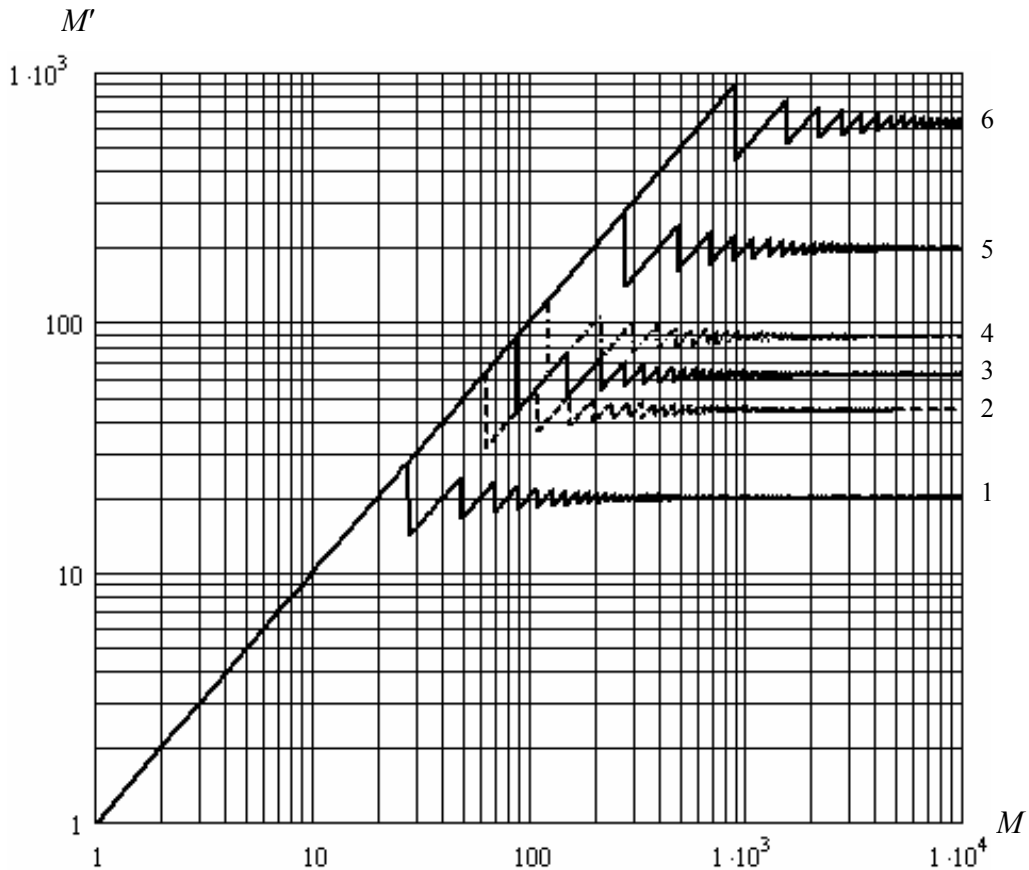


Рис. 4. Зависимость длины информационной части фрагментов от длины информационной части исходного пакета при оптимальном числе фрагментов (числовые обозначения графиков соответствуют обозначениям, приведенным на рис. 1)

Соответственно, для практического применения задача определения оптимального числа фрагментов в указанных условиях может быть реализована последовательностью следующих действий:

*Шаг 1.* Определение приближенного значения  $M'_{opt}$  при заведомо большем либо равном максимально возможному для данной сети (протокола) значению  $M$  – по формуле (9) на основе значения  $D_{opt}$ , полученного из формулы (7).

*Шаг 2.* Вычисление для текущего значения  $M$  оптимального числа фрагментов по формуле (11).

В заключение отметим, что разбиение исходного пакета на число фрагментов, отличающееся от оптимального, приведет к уменьшению выигрыша по времени доставки или даже увеличению времени доставки по отношению к нефрагментированным пакетам. Причем отклонение от  $D_{opt}$  менее критично для каналов связи более низкого качества (рис. 1).

### Выводы

1. Критерием оптимальной фрагментации пакетов для достижения максимально возможного уменьшения среднего времени доставки данных без учета изменения вероятности ошибки в них является максимум отношения среднего времени доставки исходного пакета к среднему времени доставки фрагментированного пакета.

2. При использовании для передачи данных КС плохого качества (с  $P_o > 10^{-4}$ ) и/или необходимости передачи пакетов значительной длины (с  $M > 1000$ ) преимущества фрагментации становятся более существенными. Для таких условий исходный пакет следует разбивать на большее число фрагментов меньшей длины.

**Перспективы дальнейших исследований.** Одним из направлений дальнейших исследований в данной области является определение критерия оптимальной фрагментации пакетов для достижения максимально возможного повышения достоверности данных без учета изменения среднего времени доставки.

В дальнейшем предполагается определение критерия оптимальной фрагментации для уменьшения среднего времени доставки при одновременном повышении достоверности данных, позволяющего получить для заданных условий оптимальное число фрагментов, на которое необходимо разбивать исходный пакет.

### Литература

1. Таненбаум Э. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2002. – 848 с.
2. Протоколы информационно-вычислительных сетей: Справочник / С.А. Аничкин, С.А. Белов, А.В. Бернштейн и др.; под ред. И.А. Мизина, А.П. Куликова. – М.: Радио и связь, 1990. – 504 с.
3. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб: Питер, 2005. – 864 с.
4. Алексеев С.В., Прозоров А.М., Коваленко Д.А. Фрагментация пакетов в бит-ориентированной процедуре передачи данных с квитированием // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – № 2 (10). – С. 11 – 18.

*Поступила в редакцию 7.06.2005*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Ю.И. Лосев, Харьковский университет Воздушных Сил, Харьков.