

ской волной). В частности, путем голографической регистрации таких фронтов можно получать полутоновые фильтры с требуемым импульсным откликом.

Авторы выражают искреннюю благодарность канд. техн. наук П. Е. Твердохлебу за полезные советы, высказанные им при чтении рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. М., «Мир», 1970.
2. A. Vander Lugt. Signal detection by complex spatial filtering.— "IEEE Trans.", 1964, April, IT-10, vol. 2, p. 139—145.
3. Ю. В. Чугуй. Оптическая обработка сигналов с помощью силуэтных фильтров.— «Автоматика», 1972, № 5.
4. Л. А. Луизова, В. Н. Кирпичников. Использование оптического Фурье-преобразования при обработке спектрограмм.— В кн.: Проблемы голографии (Межвузовский сборник научных трудов). Вып. IV. М., 1974.
5. Ю. В. Чугуй. Анализ спектров сигналов с многодорожечной силуэтной записью.— «Автоматика», 1974, № 6.
6. С. Г. Раутиан. Реальные спектральные приборы.— «УФН», 1955, XVI, вып. 3.
7. В. А. Зубов. Оптический метод исключения аппаратной функции прибора.— «Опт. и спектр», 1968, т. XXV, вып. 5.
8. Carl W. Helstrom. Image restoration by the method of least squares.— "J. Opt. Soc. Am.", 1967, vol. 57, № 3.
9. George W. Stroke, Franz Furrer, Donald R. Lamberty. Deblurring of motion-blurred photographs using extended-range holographic Fourier-transformation division.— "Opt. Commun.", 1969, vol. 1, № 3.
10. Б. Е. Кривенков, П. Е. Твердохлеб, Ю. В. Чугуй. Оптический метод кодирования изображений при помощи преобразования Адамара.— «Автоматика», 1974, № 6.

*Поступила в редакцию 24 апреля 1975 г.*

УДК 681.3:621.391.23

**Я. П. ВЫСТАВКИН, Г. Н. КУКЛИН, С. А. РЕДКОЗУБОВ**

*(Москва)*

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАКЕТИРОВАНИЯ СООБЩЕНИЙ В СЕТЕВЫХ СИСТЕМАХ ОБМЕНА ИНФОРМАЦИЕЙ**

**Введение.** Сетевые системы обмена и передачи информации по особенностям построения аппаратуры передачи данных можно разделить на два больших класса. К первому классу относятся сетевые системы, в которых после коммутации канала и установления связи между отправителем сообщения и его адресатом осуществляется передача и обмен информацией без всяких трансформаций передаваемого сообщения. К этому классу сетевых систем обмена информацией можно отнести, например, систему EDS (Elektronische Datenvermittlung Systems), которая разрабатывается в ФРГ. Ко второму классу сетевых систем обмена информацией можно отнести системы, в которых отправитель сообщения независимо от состояния своего адресата передает сообщение через промежуточные центры обмена информацией — коммуникационные процессоры (КП), осуществляющие накопление, редактирование, сборку и передачу сообщения адресату. Такого рода системы можно назвать сетевыми системами с накоплением информации. К этому клас-

су относятся системы: ARPA (Advanced Research Project Agency), разработанная в США, NPL (National Physical Laboratory), созданная в Англии, и другие. В сетевых системах с накоплением обмениваемой информации передача информационных массивов осуществляется в форме стандартных пакетов сообщений. Квантование информационных массивов на пакеты сообщений производится коммуникационными процессорами. В одних сетевых системах (например, в ARPA, NPL и других) используются форматы пакетов сообщений переменной длины; в других сетевых системах (например, в CYBERNET) — стандартные форматы пакетов сообщений постоянной длины. В сетевых системах ARPA и NPL максимальный размер формата пакета сообщений 1024 бит, минимальный размер формата пакета 128 бит.

В данной работе решается задача оценки эффективности квантования информационных массивов на стандартные форматы пакетов сообщений постоянной и переменной длины. Оценка проводится по количеству неэффективных (служебных и бланковых) битов, появляющихся в стандартных форматах пакетов при квантовании информационного массива, по частоте переполнения буфера КП и задержке передачи сообщений в связи с этим. В группу служебных битов, обязательно имеющих в начале каждого пакета сообщения, входят стартовые, адресные, индикаторные, контрольные и другие. Бланковые (неинформационные) биты являются своего рода «ошибками квантования», возникающими в результате возможной несоизмеримости длины передаваемых информационных массивов и длины стандартных форматов пакетов сообщений, на которые квантуется передаваемый информационный массив.

Актуальность поставленной задачи оценки эффективности пакетирования передаваемых сообщений связана с широким распространением существующих и проектируемых сетевых систем с накоплением обмениваемой информации, передаваемой по каналам связи в форме стандартных пакетов сообщений. Выбор оптимальных способов пакетирования информации в этих системах позволит построить наиболее экономичную систему передачи данных и повысить пропускную способность каналов связи в сетевых системах обмена информацией.

**Оценка эффективности пакетирования сообщений по количеству служебных и бланковых битов в стандартных форматах пакетов сообщений.** Обозначим через  $N_b$  размер памяти буферного коммуникационного процессора (КП) и будем считать, что величина буфера  $N_b$  и длина стандартного формата пакета сообщения кратны одному и тому же единичному отрезку, который будем называть сегментом. В этом случае длина стандартного формата пакета сообщения и величина буфера КП могут быть измерены целым числом сегментов. Обозначим через  $l_2$  отношение длины служебных битов ( $d_{сл}$ ) к средней длине передаваемых в сетевые системы информационных массивов  $\bar{a} \left( l_2 = \frac{d_{сл}}{\bar{a}} \right)$ . Отношение всей длины сегмента ( $d$ ) к величине  $\bar{a}$  обозначим через  $l_1 \left( l_1 = \frac{d}{\bar{a}} \right)$ .

Далее обозначим через  $\bar{S}$  число сегментов, получающихся при квантовании информационного массива средней длины  $\bar{a}$  на стандартные форматы пакетов сообщений. Тогда  $\bar{S} \bar{a} l_1$  означает длину квантованного на стандартные пакеты информационного массива средней длины  $\bar{a}$ . Очевидно, всегда  $\bar{S} \bar{a} l_1 > \bar{a}$ , поскольку в квантованном на пакеты информационном массиве постоянно присутствует по крайней мере одна служебная группа битов ( $l_2 \neq 0$ ), обязательно входящих в первый сегмент стандартного пакета сообщения, и поскольку при квантовании информационного массива на пакеты сообщений в стандартных форматах пакетов практически всегда остаются незаполненные полезной информацией отрезки формата — неинформационные биты. Следовательно, чем мень-

ше неэффективных битов (служебных и неинформационных), тем ближе  $\bar{S}a_1$  к  $\bar{a}$ . Таким образом, отношение

$$0 < \gamma = \frac{\bar{a}}{\bar{S}a_1} < 1 \quad (1)$$

можно использовать для оценки эффективности квантования передаваемых информационных массивов по указанному качеству.

Математическое ожидание числа сегментов в одном информационном массиве  $\bar{S}$  можно представить как произведение ожидаемого числа пакетов в одном информационном массиве на ожидаемое число сегментов в одном пакете, т. е.

$$\bar{S} = \sum_{i=1}^{\infty} iP_{na}(i) \sum_{i \in \kappa} iP_{sn}(i), \quad (2)$$

где  $P_{na}(i)$  — вероятность того, что на один информационный массив при его квантовании на пакеты приходится  $i$  пакетов сообщений;  $P_{sn}(i)$  — вероятность того, что один пакет состоит из  $i$  сегментов;  $\kappa$  — множество возможных чисел, выражающих количество сегментов в пакете сообщения при квантовании информационного массива на пакеты сообщений.

Ожидаемое число пакетов сообщений, состоящих из  $i$  сегментов при квантовании одного информационного массива на пакеты сообщений, можно представить следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{\infty} iP_{na}(i) P_{sn}(i) = E_{sn}(i). \quad (3)$$

Тогда

$$\bar{S} = \sum_{i \in \kappa} iE_{sn}(i). \quad (4)$$

Следовательно,

$$\gamma = \frac{\bar{a}}{l_1 \bar{S}} = \frac{1}{l_1 \sum_{i \in \kappa} E_{sn}(i)}. \quad (5)$$

Рассмотрим два способа квантования информационного массива на пакеты сообщений:

1) единичный односегментный способ пакетирования, когда каждый пакет сообщения формируется из одного информационного сегмента;

2) непрерывный способ пакетирования, когда пакеты сообщений могут формироваться из любого числа сегментов от 1 до  $N$ .

Ограничим анализ тем случаем, когда длина ( $x$ ) передаваемых по сетевым системам информационных массивов подчиняется распределению Эрланга  $k$ -го порядка:

$$F_k(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left(-\frac{kx}{a}\right) \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{j!} \left(\frac{kx}{a}\right)^j, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (6)$$

При односегментном способе пакетирования один передаваемый информационный массив разделяется на информационные сегменты длиной  $z$ :  $0 < z \leq \bar{a}(l_1 - l_2)$ .

Вероятность того, что в процессе пакетирования информационный массив будет разделен на  $i$  пакетов или в данном случае на  $i$  сегментов (так как каждый пакет состоит из 1 сегмента информации)

$$P_{na}(i) = F_k[i\bar{a}(l_1 - l_2)] - F_k[(i-1)\bar{a}(l_1 - l_2)]. \quad (7)$$

В этом случае при квантовании одного информационного массива на пакеты сообщений ожидаемое число односегментных пакетов

$$E_{sn}(i) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\infty} j P_{na}(j), & i = 1; \\ 0, & i \geq 2. \end{cases} \quad (8)$$

При непрерывном способе пакетирования передаваемый информационный массив длиной  $x$

$$0 < x \leq \bar{a}(l_1 N - l_2) \quad (9)$$

в процессе квантования разбивается на пакеты, которые могут формироваться из любого числа сегментов от 1 до  $N$ . При этом информационный массив длиной  $x$  можно в квантованной форме представить следующим образом:

$$j\bar{a}(l_1 N - l_2) + \bar{a}[(i-1)l_1 - l_2 + \delta(i-1)l_2] < x \leq ja(l_1 N - l_2) + a(il_1 - l_2), \quad (10)$$

где  $j = 1, 2, 3, \dots$ ;  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\delta(i-1) = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i \neq 1. \end{cases}$

Из формулы (10) следует, что при непрерывном способе пакетирования любой информационный массив может быть разделен на  $j$  пакетов сообщений, состоящих из  $N$  сегментов, и на один пакет сообщения, состоящий из  $i$  сегментов. Вероятность того, что на один информационный массив придется  $i$  пакетов сообщений

$$P_{na}(i) = F_k[i\bar{a}(Nl_1 - l_2)] - F_k[(i-1)\bar{a}(Nl_1 - l_2)]. \quad (11)$$

Ожидаемое число пакетов сообщений, состоящих из  $i$  сегментов,  $E_{sn}(i)$  при квантовании одного информационного массива непрерывным способом пакетирования представляется следующим образом:

$$E_{sn}(i) = \begin{cases} \sum_{j=0}^{\infty} j \{F_k[ja(Nl_1 - l_2) + a(il_1 - l_2)] - F_k[ja(Nl_1 - l_2) + a(i-1)l_1 - l_2 + \delta(i-1)al_2]\}; & i \in \kappa; \quad i \neq N; \\ \sum_{j=0}^{\infty} \{F_k[ja(Nl_1 - l_2) + a(N-1)l_1 - l_2] + jP_{na}(j+1)\}, & \end{cases} \quad (12)$$

$$\delta(i-1) = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i \neq 1; \end{cases}$$

При непрерывном способе пакетирования вероятность того, что один пакет сообщения будет состоять из  $i$  сегментов  $P_{sn}(i)$ , выражается следующим образом:

$$P_{sn}(i) = \frac{E_{sn}(i)}{\sum_{j \in \kappa} E_{sn}(j)}; \quad \kappa = \{1, 2, \dots, N\}. \quad (13)$$

Сравнение односегментного и непрерывного способов пакетирования ( $\kappa = 1$ ;  $l_2 = 0,1$ ) по эффективности квантования показывает, что при односегментном способе квантования информационных массивов на пакеты сообщений при значениях  $0,1 < l_1 < 0,4$  величина  $\gamma$  непрерывно возрастает от 0,3 до 0,67; в области  $l_1 \approx 0,4$   $\gamma$  достигает максимального

значения  $\gamma_{\max} \approx 0,67$ . В диапазоне  $0,4 < l_1 < 1$  величина  $\gamma$  плавно уменьшается от 0,67 примерно до 0,58. При непрерывном способе пакетирования ( $N=10$ ) в области  $0,1 < l_1 < 0,6$  величина  $\gamma$  существенно выше, чем при односегментном пакетировании. В окрестности  $l_1=0,1$   $\gamma$  достигает максимального значения  $\gamma = \gamma_{\max} \approx 0,82$  и затем при  $0,1 < l_1 \leq 1$  плавно уменьшается приблизительно до 0,6 при  $l_1=1$ . Анализируя эти результаты, можно сделать вывод: при увеличении множества длинных передаваемых информационных массивов (т. е. при уменьшении величины  $l_1$ , что соответствует возрастанию средней длины передаваемых информационных массивов) вероятность появления пакетов сообщений, состоящих из большого числа сегментов при непрерывной системе пакетирования, увеличивается. Это приводит к некоторому увеличению бланковых (неинформационных) битов («ошибки квантования») и к значительному уменьшению общего числа служебных битов (адресные, контрольные и т. д.), что в целом в области малых значений  $l_1$  дает преимущество непрерывной системе пакетирования перед односегментной системой формирования пакетов сообщений. При увеличении частоты появления пакетов сообщений, состоящих из малого количества сегментов, в диапазоне значения  $l_1 > 0,45$  преимущества непрерывной системы пакетирования перед односегментной системой постепенно исчезают, поскольку большое число служебных битов при односегментной системе пакетирования примерно уравнивается большей величиной появляющихся при непрерывной системе пакетирования бланковых (неинформационных) битов.

**Оценка эффективности пакетирования сообщений по частоте переполнения буфера коммуникационного процессора и вероятности задержки передачи сообщений.** Вероятность переполнения буфера коммуникационного процессора ( $P_z$ ) можно определить как вероятность сложного события, заключающегося в совместном наступлении двух событий: в одном пакете сообщения, приходящего в КП, содержится  $i$  сегментов и свободный объем буфера КП, выраженный в сегментных единицах, меньше  $i$ , т. е.

$$P_z = \sum_{i \in \kappa} P_{sn}(i) P_c; \quad (14)$$

$$P_c = \sum_{i_1+i_2+\dots+i_r > N_B-i} [P_1(i_1) P_2(i_2) \dots P_r(i_r)]; \quad (15)$$

где  $r$  — число выходных каналов из КП;  $N_B$  — размер буфера КП;  $P_j(i_j)$  — вероятность того, что в буфере КП находится  $i_j$  сегментов ( $i=1, 2, \dots, N$ ;  $j=1, 2, \dots, r$ ), подлежащих передаче через  $j$ -й выходной канал КП.

Проведем анализ в предположении, что за некоторое время в КП прибудет  $m$  пакетов сообщений с вероятностью, подчиняющейся распределению Пуассона со средним значением  $\bar{\mu}\lambda$  пакетов сообщений в единицу времени:

$$P_m(t) = \frac{(\bar{\mu}\lambda t)^m}{m!} e^{-\bar{\mu}\lambda t}. \quad (16)$$

Здесь  $\lambda$  — среднее число информационных массивов, прибывающих в данный КП в единицу времени;  $\bar{\mu}$  — среднее число пакетов сообщений в одном передаваемом информационном массиве.

Время, необходимое для передачи одного сегмента, примем за единичный интервал времени.

Для определения стандартных вероятностей состояний буфера КП

$$P_j(n), \quad n=0, 1, 2, \dots, N; \quad j=1, 2, \dots, r$$

( $r$  — число выходных каналов КП,  $n$  — число сегментов, находящихся

в буфере и подлежащих передаче через  $j$ -й канал КП), можно составить следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} P_1(n) &= \tau_0 P_1(n+1) + \sum_{i=1}^n \tau_{n-i+1} P_1(i) + \tau_n P_1(0); \\ P_2(n) &= \tau_0 P_2(n+1) + \sum_{i=1}^n \tau_{n-i+1} P_2(i) + \tau_n P_2(0); \\ &\vdots \\ P_r(n) &= \tau_0 P_r(n+1) + \sum_{i=1}^n \tau_{n-i+1} P_r(i) + \tau_n P_r(0); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^N P_j(i) = 1, \quad j = 1, 2, \dots, r; \quad (18)$$

$$N = N_B + 1. \quad (19)$$

Здесь  $N_B$  — размер буфера КП, выраженный в сегментных единицах;  $P_j(n)$  — вероятность того, что в момент времени сразу после передачи одного сегмента в буфере КП имеется еще  $n$  сегментов, подлежащих передаче через  $j$ -й канал КП, включая передаваемый сегмент;  $\tau_j$  — вероятность того, что число сегментов, прибывающих в данный КП в единицу времени, равно  $j$ .

Если прибытие пакетов сообщений в КП подчиняется закону Пуассона, то для определения  $\tau_j$  можно записать следующее выражение:

$$\tau_j = \begin{cases} \sum_{x=0}^j \frac{(\mu\lambda)^x e^{-\mu\lambda} P^x(j)}{x!}, & j = 1, 2, \dots; \\ e^{-\mu\lambda}, & j = 0, \end{cases} \quad (20)$$

где  $P^x$  —  $x$ -кратная свертка  $P_{sn}(l)$ ,  $P_{sn}(l)$  — вероятность того, что в первом пакете сообщения  $l$  сегментов. В этом случае

$$P^x = \begin{cases} \sum_{\sum l=j}^x \prod_x P_{sn}(l), & j = 1, 2, \dots, \quad x \neq 0; \\ 0, & j = 0, \quad x \neq 0. \end{cases} \quad (21)$$

Используя формулы (17) — (21), можно последовательно определить стандартные вероятности  $P_j(i_j)$  ( $j=1, 2, \dots, r$ ;  $i=0, 1, 2, \dots, N$ ) и вероятности переполнения буфера КП  $P_z$ .

В диапазоне значений  $0,2 \leq l < 3$  и  $N_B = 10 \bar{a}$  вероятность переполнения буфера КП  $P_z$  при односегментном способе пакетирования составляет величину порядка  $10^{-5}$ — $10^{-4}$ ; при непрерывном способе пакетирования — примерно в 10 раз выше. В диапазоне значений  $0,5 < l \leq 1$  величина  $P_z \cong 10^{-4}$  при односегментной системе пакетирования и примерно в 5—8 раз меньше, чем при непрерывной системе пакетирования. Это объясняется тем, что при непрерывной системе пакетирования существует большая вероятность появления сравнительно длинных пакетов сообщений, состоящих из большого числа сегментов; поэтому возрастает вероятность события, когда длина поступающего пакета сообщений окажется больше свободного объема буфера КП, т. е. возрастает вероятность переполнения буфера КП и задержки передачи сообщения.

## ВЫВОДЫ

Сравнивая односегментный и непрерывный способы квантования информационных массивов на стандартные форматы пакетов сообщений, можно заметить, что при сравнительно длинных передаваемых ин-

«формационных массивах при непрерывной системе пакетирования значительно возрастает вероятность квантования информационных массивов на длинные пакеты сообщений. Это приводит к некоторому увеличению неинформационных бланковых битов («ошибки квантования»), к значительному уменьшению количества служебных битов и в целом к сокращению среднего числа неэффективных битов в пакетах сообщений. При уменьшении средней длины передаваемых информационных массивов указанное преимущество непрерывной системы квантования информационных массивов в пакеты переменной длины перед односегментной системой пакетов фиксированной длины почти исчезает и обе системы характеризуются в среднем примерно одинаковым количеством появляющихся неэффективных битов в пакетах сообщений. Это объясняется тем, что при передаче сравнительно небольших информационных массивов при использовании системы квантования на пакеты постоянной длины появляются больше служебных битов (адрес, контрольные биты и т. д.) и меньше неэффективных бланковых битов («ошибки квантования»), чем в случае непрерывной системы квантования информационных массивов на пакеты переменной длины.

По частоте переполнения буфера КП и вероятности задержки передачи сообщений односегментная система квантования информационных массивов на стандартные пакеты фиксированной длины значительно лучше, чем непрерывная система квантования на пакеты сообщений переменной длины. Это объясняется тем, что при непрерывной системе квантования на переменные длины существует большая вероятность квантования информационных массивов в сравнительно длинные пакеты сообщений. Это приводит к более быстрому заполнению буфера КП и к увеличению частоты появления таких ситуаций, когда длина поступающего пакета сообщения больше свободного объема памяти буфера КП, что ведет к задержкам в передаче сообщений.

Таким образом, при передаче множества сравнительно небольших информационных массивов ( $0,4 \leq l_1 < 1$ ) односегментная система пакетирования примерно равна непрерывной системе по эффективности квантования и существенно лучше последней по критерию частоты переполнения буфера КП и задержки передачи сообщений. При передаче множества сравнительно длинных информационных массивов  $0 < l_1 < 0,4$  возрастают преимущества непрерывной системы по количеству появляющихся при квантовании неэффективных битов, но по частоте переполнения буфера КП эффективность непрерывной системы существенно ниже односегментной.

На основе приведенного анализа можно сделать общий вывод, что хотя по количеству неэффективных битов при передаче множества сравнительно длинных информационных массивов односегментная система фиксированной длины пакетов уступает непрерывной системе переменной длины пакетов, но по частоте переполнения буфера КП и вероятности задержки передачи сообщений односегментная система фиксированной длины пакетов значительно лучше, чем непрерывная система переменной длины пакетов. Следует отметить, что при использовании системы квантования информационных массивов на пакеты фиксированной длины технически более просто и надежно реализуется квантование информационных массивов на пакеты, чем при использовании непрерывной системы квантования на пакеты переменной длины.

*Поступила в редакцию 10 мая 1975 г.*