

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ
И СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

УДК 681.324

А. Б. Мархасин
(Новосибирск)

**МНОЖЕСТВЕННЫЙ ДОСТУП С ДИНАМИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ
ТРАФИКОМ И КАЧЕСТВОМ ОБСЛУЖИВАНИЯ
В ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЕТЯХ АТМ**

Предлагается метод множественного доступа в распределенных территориальных широкополосных сетях с интегральным обслуживанием класса АТМ, который позволяет эффективно решить проблемы динамического резервирования ресурсов полосы и селективного динамического управления параметрами трафика и качеством обслуживания для каждого пользователя, каждого класса инкапсулируемых пакетов и каждого вида информации (речь, данные, команды, сигнализация, видеоинформация и т. д.). При этом обеспечивается высокая эффективность метода доступа. Характеристики метода не имеют тенденции к ухудшению в широком диапазоне величин времени распространения сигналов в среде. Приводится пример вероятностно-временных характеристик, производительности и пропускной способности сети АТМ, построенной на предлагаемых принципах.

Проблемы управления множественным доступом в сетях АТМ. Широкополосные сети с асинхронным способом передачи (АТМ) открывают для пользователей замечательные возможности. Они позволяют передавать и распределять потоки различных видов информации с различными типами трафика, обеспечивать для каждого пользователя, соединения и класса информации необходимые показатели пропускной способности и качества обслуживания, вести передачу на требуемых скоростях, инкапсулировать в ячейках АТМ пакеты сетей любого масштаба: от локальных до глобальных [1]. Тем самым создается многофункциональная и одновременно прозрачная для различных прикладных сетей и протоколов транспортная среда — мультисеть АТМ, которая поддерживает функции концентрации, коммутации, эмуляции локальных вычислительных сетей, протоколопрозрачного соединения, «чистой» сети АТМ.

Однако применение новой технологии широкополосных распределенных мультисетей АТМ пока ограничено стенами зданий и пределами компактных городских кварталов. Для увеличения дальности действия и расширения обслуживаемых площадей до размеров городских (MAN) и территориальных (WAN) сетей необходимо решить ряд проблем управления множественным доступом в распределенных мультисетях АТМ с интегральным обслуживанием. Главная проблема — обеспечение динамического (в процессе работы), гибкого и гарантированного управления параметрами трафика и качеством обслуживания для каждого пользователя и каждого класса информации и инкапсулируемых пакетов. С позиций технологий доступа в распределенную широкополосную (высокоскоростную) среду проблема сводится к минимизации затрат полосы на управление множественным доступом и функционированием сети, а также к преодолению, по крайней мере, двух барьеров на пути новой технологии: временного и динамического.

Возникновение временного барьера связано с явлением деградации характеристик известных протоколов с последовательной обработкой [2] команд управления множественным доступом (проверка среды CSMA-CD, передача маркера token-bus, token-ring и т. п.) при увеличении дальности действия и, следовательно, возрастании времени задержки распространения сигналов. В распределенных широкополосных сетях задержки на распространение сигналов в среде достигают 100 мкс и более, или 62208 бит на скорости 622,08 Мбит/с [3].

Динамический барьер проявляется, с одной стороны, в скачкообразном возрастании требований к динамичности, точности, адаптивности и эффективности управления параметрами трафика и качеством обслуживания, с другой стороны, в скачкообразном усложнении задач управления (увеличение размерности, емкости, потоков информации, транспортного запаздывания на распространение сигналов и т. д.) в широкополосных распределенных сетях ATM.

Для преодоления временного барьера в пактных спутниковых и радиосетях, которые по величине задержки на распространение сигналов в среде схожи с широкополосными сетями ATM, используются [4] протоколы резервирования с фиксированными (FPODA, FRAC и т. п.), а также адаптируемыми к нагрузке (DFRAC, ARDA и т. п.) форматами суперкадров (РСК). В [3] для ATM-концентратора с топологией пассивного оптоволоконного дерева предложены два варианта протокола резервирования: резервирование одиночных ATM-ячеек и резервирование группы ATM-ячеек в фиксированном многоячейном суперкадре, длительность которого (в цитируемом случае 125 мкс, или 176 ячеек) должна превышать время распространения.

Протоколы резервирования в суперкадре РСК, успешно преодолевая временной барьер, недостаточно эффективны в решении проблем динамики управления и адаптации, как это поясняется представленным на рис. 1, а, б примером характеристик времени задержки ATM-ячеек при динамическом регулировании формата суперкадра. При этом изменяется эффективность метода доступа (полезное использование суперкадра):

$$C_{\text{map}} = T_{\text{inf}} / (T_{\text{inf}} + T_{\text{res}}) = 1 / (1 + \theta N / J), \quad (1)$$

где T_{inf} — длина информационной части суперкадра, $T_{\text{inf}} = t_{\text{inf}} J$; t_{inf} — длина информационной ATM-ячейки; J — число информационных ATM-ячеек в суперкадре; T_{res} — длина резервирующей части суперкадра, $T_{\text{res}} = t_{\text{res}} N$; t_{res} — длина резервирующей мини-ячейки; N — число резервирующих мини-ячеек

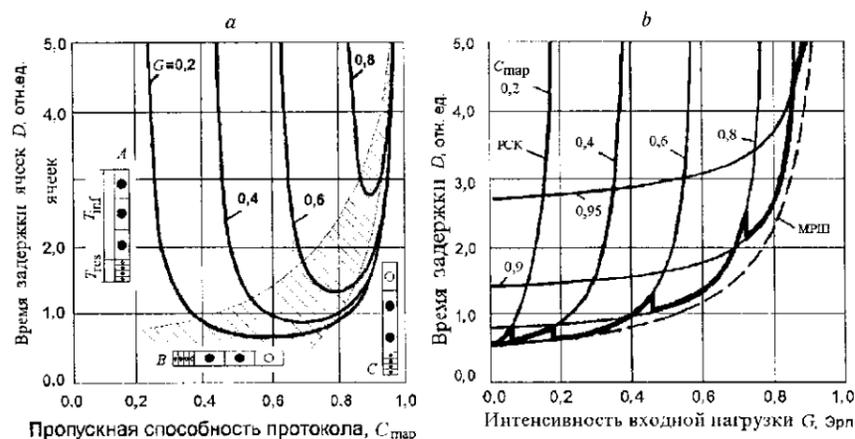


Рис. 1. Характеристики времени задержки ATM-ячеек при динамической адаптации полезного использования формата суперкадра (протокол резервирования РСК): в функции от пропускной способности (а) и интенсивности входной нагрузки (б)

в суперкадре; θ — относительные затраты на управление доступом (резервирование) одиночной АТМ-ячейки, $\theta = t_{\text{res}}/t_{\text{inf}}$.

На рис 1, а приведено семейство зависимостей среднего времени задержки ячеек D от эффективности $C_{\text{мар}}$ протокола резервирования РСК при различных значениях интенсивности входной нагрузки G , которые получены с помощью метода баланса интенсивностей нагрузок [5]. Представленные зависимости характеризуют способность протокола резервирования к адаптации путем динамического регулирования формата (полезного использования (1)) суперкадра при изменении интенсивности G входной нагрузки.

На графиках видно, что с ростом интенсивности входной нагрузки G зависимость времени задержки от полезного использования суперкадра (1) становится все более критичной по отношению к значению управляющего параметра $C_{\text{мар}}$ и графики имеют U -образный вид. Рабочая область характеристик (заштрихована), где величина времени задержки минимальна, с ростом интенсивности нагрузки G быстро сужается. Лавинообразное возрастание времени задержки на левых ветвях U -образных графиков (фрагмент А) обусловлено насыщением очереди информационных ячеек ($G \rightarrow C_{\text{мар}}$), на правых ветвях (фрагмент С) — насыщением очереди резервирующих мини-ячеек (интенсивность нагрузки резервирующих мини-ячеек $G_{\text{res}} \rightarrow 1 - C_{\text{мар}}$). В рабочей области (фрагмент В) поддерживаются соотношения $G < C_{\text{мар}}$ и $G_{\text{res}} < 1 - C_{\text{мар}}$.

Рис. 1, б иллюстрирует в координатах «время задержки D — интенсивность входной нагрузки G » сложность процесса динамической адаптации формата (полезного использования) суперкадра к изменению интенсивности входной нагрузки. С ростом G необходимо удерживать характеристики в оптимальной области путем перескоков на новые оптимальные форматы суперкадров (оптимальные значения полезного использования $C_{\text{мар}}$), как показано жирной пилообразной линией.

В данной статье развивается предложенный в [2, 6] адаптивный метод РП-маркерного широкополосного резервирования (МРШ—РП) с распределенным управлением, который позволяет получить эффективные решения рассмотренных выше проблем управления множественным доступом в распределенных сетях АТМ с интегральным обслуживанием для различных применений. По предлагаемому методу количество информационных АТМ-ячеек автоматически и непрерывно во времени адаптируется к текущему трафику нагрузки, как показано штриховой линией на рис. 1, б.

Метод основан на развитии возможностей рекуррентных псевдослучайных последовательностей (РП) для организации эффективного управления множественным доступом [7]: малозатратных способов адресации временных интервалов, кадров, команд управления множественным доступом (УМД) и станций, распределения полосы, поддержания единого системного времени, адаптивного временного разделения каналов и т. п. Используется комбинация механизмов передачи полномочий (РП-маркера) для команд УМД и широкополосного резервирования для информационных ячеек. Метод позволяет приблизиться к потенциальной пропускной способности [8] и гарантированно обеспечить требуемые характеристики трафика и качества обслуживания [6]. Практически исключается зависимость эффективности доступа от времени распространения, которое проявляется лишь как транспортное запаздывание.

Метод РП-маркерного широкополосного резервирования. Рассматривается сеть АТМ (рис. 2) с топологией виртуальной шины (пассивное либо активное дерево, U -образная шина и т. п.), в которой отношение времени распространения сигналов по шлейфу к битовой скорости $t_p/c \gg 1$. Пусть в некоторый момент времени t в сети активны N станций NU_i , на входы которых поступают потоки АТМ-ячеек с интенсивностями входных нагрузок G_{ikt} . Для каждой i -й станции и k -го класса обслуживания необходимо обеспечивать заданные в виде равенств либо ограничений сверху/снизу требуемые значения [X] пиковой $[P_{ikt}]$ и средней $[M_{ikt}]$ скоростей, среднего времени задержки $[D_{ikt}]$, вероятности потерь $[R_{ikt}]$, возможно, среднеквадратических отклонений $\sigma_{[X]}$ от требуемых значений [X], $X = P, M, D, R$, и других показателей



Рис. 2. Модель распределенной мультисети ATM

качества обслуживания [2, 6]. Главный механизм управления — распределение между станциями ресурса полосы Y_{it} , $i = 1, \dots, N_t$.

По предлагаемому методу вводятся (рис. 3) два типа ATM-блоков: управляющие мини-блоки (СВ) и информационные блоки (ИВ). Управляющие мини-блоки содержат 16-битовую преамбулу PLP_C и 8-битовое поле MAC_C; управления доступом, включающее адресный бит a_j и запрос r_{ik} i -й станции на передачу блока из некоторого числа $v_k = 0, 1, \dots, [v_{kt}]$ ячеек ATM k -го класса обслуживания. Информационные блоки включают преамбулу PLP_I, поле LLC_I, управления передачей и переменное число v_k ATM-ячеек.

Для распределенного управления множественным доступом используется изложенный в [2, 6] протокол маркерного широковещательного резервирования, который выполняется параллельно, децентрализованно и на паритетных началах каждой активизированной станцией сети. На основании прослушиваемых в широковещательном канале запросов r_{ik} ось времени эквидистантно разделяется каждой станцией по общему детерминированному алгоритму параллельной обработки запросов [6] на помесные идентификаторами A_j временные интервалы $[t_j, t_{j+1})$, $j = 1, \dots, M$, $M = 2^n - 1$ — период РП, которые содержат по одному служебному (СВ) и при наличии информации информационному (ИВ) блоку.

Идентификаторами служат неповторяющиеся подпоследовательности РП $A_j = a_{j-(m-1)}, a_{j-(m-2)}, \dots, a_j$ длиной m , $m \geq n$. Идентификаторы A_j упорядочены в логическое кольцо по рекуррентному закону так, что сдвинутые на одну позицию биты смежных идентификаторов совпадают, кроме первого бита a_{j-m} у предшествующего и последнего бита a_j у следующего по кольцу идентификатора. Последние и выполняют роль адресных битов a_j в адресных полях служебных блоков УМД (см. рис. 3), а текущие значения A_j распознаются путем накопления адресных битов a_j (самосинхронизации РП).

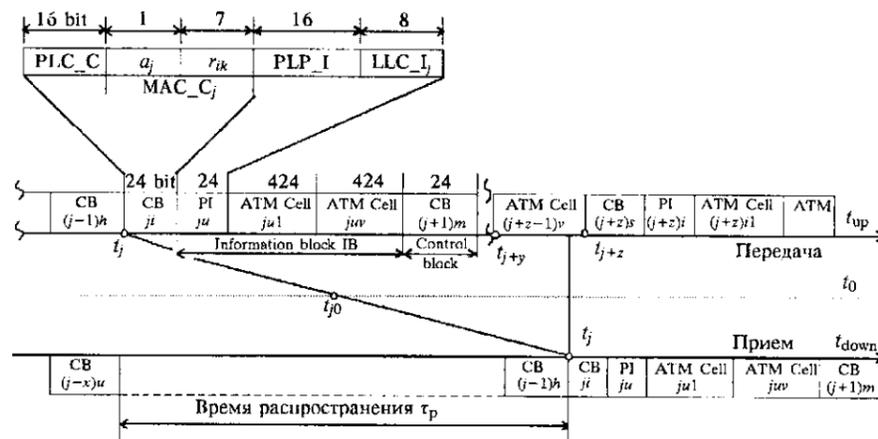


Рис. 3. Форматы и временная экспозиция ячеек (кадров) АТМ

Каждой i -й станции динамически назначается на децентрализованной основе некоторое пропорциональное требуемой величине ресурса полосы $[Y_i]$ число m_i «личных» идентификаторов A_{ji} для передачи запросов r_{ik} . Процедуры пропорционального динамического разбиения множества $\{A_j\}$ идентификаторов на i -е подмножества $\{A_{ji}\}$ и распознавания последних (процедуры адаптивной адресации [2]) легко выполняются с помощью специальных ключей — имен станций U_i , которые предложено кодировать оптимальными неравномерными кодами на основании нормированных значений $[Y_i]$ требуемых ресурсов [2, 6]. Функции обработки требований станций на ресурсы Y_i полосы и кодирования имен U_i возлагаются на администратора сети.

Для поддержки требуемых k -х классов обслуживания используется механизм приоритетных сегментов $[(j - l_k), j]$, здесь $M \geq l_k \geq \dots \geq l_2 \geq l_1 = 0$ [2, 6]. Таким образом, для протокольных АТМ-субъектов канального уровня удастся построить малозатратные, эффективные и надежные механизмы позиционной адресации относительно A_j (см. рис. 3) и управления.

Все активизированные станции параллельно выполняют обработку прослушиваемых в широкополосном канале «вниз» запросов по единому детерминированному алгоритму распределенного управления доступом [2], который поясняется на рис. 3. При этом они параллельно отслеживают текущие значения РП-адресов A_j и единое системное время, распределяют временные интервалы по запросам, вычисляют адрес A_{j+z} и момент времени t_{j+z} начала ближайшего незанятого интервала, контролируют наличие на приоритетных сегментах $[(j - l_k), jt]$ хотя бы одного запроса на передачу информации k -го класса. Распознав очередной личный адрес A_{ji} , i -я станция передает запрос r_{ik} , если у нее имеется подготовленная к передаче ячейка, или отрицательный запрос r_{i0} — иначе.

Если на приоритетных сегментах $[(j - l_k), jt]$, $k < k_u$, отсутствуют запросы более высокого приоритета, то для обслуживания запроса r_{ik} каждая станция, в том числе и i -я, эквидистантно выделяет ближайший незанятый интервал $[t_{j+z}, t_{j+z+1})$, удовлетворяющий условию $t_{j+z} - t_j \geq \tau_p$. В противном случае все станции согласованно блокируют обслуживание низкоприоритетного запроса r_{ik} и i -я станция повторяет запрос на ближайшем интервале, помеченном ее личным адресом.

Задачи динамического управления трафиком и качеством. Изложенный выше метод распределенного управления множественным доступом на принципах маркерного широкополосного резервирования открывает новые воз-

возможности для реализации динамического, непрерывного во времени, гибкого и гарантированного управления параметрами трафика и качеством обслуживания для каждого пользователя и каждого класса информации и инкапсулируемых пакетов. При этом для реализации управляющих воздействий используются те же механизмы адаптивной адресации, что и для управления множественным доступом, а стратегия динамического управления может быть построена как на централизованной, так и на децентрализованной игровой основе. В данном разделе рассматриваются две задачи, поясняющие обе стратегии динамического управления параметрами трафика и качеством обслуживания. Ряд других возможных постановок задач приведен в [2].

Примером централизованной стратегии управления служит

Задача минимизации средневзвешенной задержки. Даны интенсивности G_{ikt} нагрузок и зависимости $X_{ikt}(Y_t, l_t)$ показателей $X = D, P, M, R$ от векторов $Y_t = (Y_{1t}, \dots, Y_{it}, \dots, Y_{N_t})$ значений бронируемых ресурсов и параметров $l_t = (l_{1t}, \dots, l_{kt}, \dots, l_{K_t})$ приоритета. Необходимо для заданного отрезка $t' < t < t''$ найти такие допустимые значения векторов Y_t и l_t , которые минимизируют взвешенное по некоторым весам h_{ikt} время задержки:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K h_{ikt} D_{ikt}(Y_t, l_t) \rightarrow \min \quad (2)$$

при ограничениях вида:

$$D_{ikt}(Y_t, l_t) < [D_{ikt}], \quad i = 1, \dots, N_t, \quad k = 1, \dots, K,$$

$$R_{ikt}(Y_t, l_t) < [R_{ikt}], \quad i = 1, \dots, N_t, \quad k = 1, \dots, K,$$

$$P_{ikt}(Y_t, l_t) \geq [P_{ikt}], \quad i = 1, \dots, N_t, \quad k = 1, \dots, K,$$

$$M_{ikt}(Y_t, l_t) \geq [M_{ikt}], \quad i = 1, \dots, N_t, \quad k = 1, \dots, K.$$

При децентрализованной стратегии управляющие воздействия — бронируемые ресурсы Y_{it} — вырабатываются на игровой основе пользователями, а реализуются администратором сети с помощью механизма динамической адресации.

Игровая задача бронирования ресурсов. Пусть заданы некоторая мера $\Psi[G_k, W_k(Y)]$ ценности в единицу времени информации k -го класса в зависимости от интенсивности ее нагрузки G_k и вектора $\bar{w}_k(Y) = (D_k(Y), R_k(Y), P_k(Y), M_k(Y))$ качественных показателей ее доставки, а также тарифы в единицу времени за ресурсы (T_Y) и трафик (T_{G_k}). Положим далее, что i -е пользователи могут отслеживать статистические оценки (средние) интенсивности нагрузки $\langle G_{ikt} \rangle$ и качества обслуживания $\langle W_{ikt}(Y_{it}) \rangle$ при заданном значении Y_{it} ресурса полосы.

Необходимо некоторому i -му, $i = 1, \dots, N_t$, пользователю найти (забронировать) для заданного отрезка $t' < t < t''$ такое допустимое значение ресурса Y_{it} полосы, которое максимизирует его «выигрыш»:

$$\sum_{k=1}^K \{ \Psi[\langle G_{ikt} \rangle, \langle W_{ikt}(Y_{it}) \rangle] - T_{G_k} \langle G_{ikt} \rangle \} - T_Y Y_{it} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Пользователи, бронируя ресурсы Y_{it} и варьируя интенсивности нагрузок G_{ikt} (делая «ставки» Y_{it} и G_{ikt}), стремятся максимизировать «выигрыш» (3). Такие процедуры моделируются бескоалиционными динамическими играми N лиц.

В свою очередь, администратор сети, изменяя тарифы за ресурсы (T_Y) и трафик (T_{Gk}), может вступать в игру с пользователями с целью максимизации своего «выигрыша»:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K T_{Gk}(G_{ikt}) + \sum_{i=1}^N T_Y Y_{ii} \rightarrow \max. \quad (4)$$

Условия (3) и (4) обеспечивают саморегулирование входных нагрузок G_{ikt} , требуемых параметров трафика и качества обслуживания $[W_{ikt}] = (D_{ikt}, [R_{ikt}], [P_{ikt}], [M_{ikt}])$ и ресурсов полосы Y_{ii} для каждого k -го класса информации, каждого i -го пользователя, на каждом интервале времени $[t', t'']$.

Пример характеристик интегрального обслуживания. Для оценки характеристик интегрального обслуживания развит метод баланса интенсивностей нагрузок [5]. Пример характеристик сети АТМ с общим количеством станций $N_i = 1024$ четырех типов и четырьмя классами обслуживания приведен на рис. 4. Битовая скорость 622,08 Мбит/с, среднее число АТМ-ячеек в блоке $\langle \nu \rangle = 3,769$, распределение ресурсов Y_i — оптимальное по критерию средневзвешенной задержки (2), время распространения по шлейфу 50 мкс, или полное время распространения запроса и информационного блока 100 мкс. Остальные исходные данные указаны в таблице.

Приведенные на рис. 4 графики подтверждают возможность управления трафиком и качеством обслуживания в широком динамическом диапазоне требуемых характеристик с высокой эффективностью протокола доступа.

Пропускная способность для метода маркерного широковещательного резервирования

$$C_{\text{мар}} = \langle T_{\text{IB}} \rangle / (\langle T_{\text{IB}} \rangle + T_{\text{CB}}) = 1 / [1 + \theta_{\text{CB}} / (\langle \nu \rangle + \theta_{\text{PI}})], \quad (5)$$

где $\langle T_{\text{IB}} \rangle$ — средняя длина информационного блока, $\langle T_{\text{IB}} \rangle = t_{\text{АТМ}} \langle \nu \rangle + t_{\text{PI}}$; $t_{\text{АТМ}}$ — длина информационной АТМ-ячейки, 424 бита; t_{PI} — длина преамбулы информационного блока, 24 бита; T_{CB} — длина управляющего мини-блока, 24 бита; θ_{PI} — относительные затраты на инкапсуляцию, $\theta_{\text{PI}} = t_{\text{PI}} / t_{\text{АТМ}}$; θ_{CB} — относительные затраты на управление доступом (резервирование) одиночной АТМ-ячейки, $\theta_{\text{CB}} = t_{\text{CB}} / t_{\text{АТМ}}$.

Данные	Типы станций				Приоритетный сегмент	Емкость очереди	Число переспросов
	1	2	3	4			
Число станций, штук	8	256	728	32			
Входная нагрузка:	Вес, усл. ед. на станцию						
1-й класс (речь)	600				0	3	0
2-й класс (команды)		5		10	0	10	9
3-й класс (контроль)		5	5	10	16	10	9
4-й класс (данные)	200			80	96	10	9

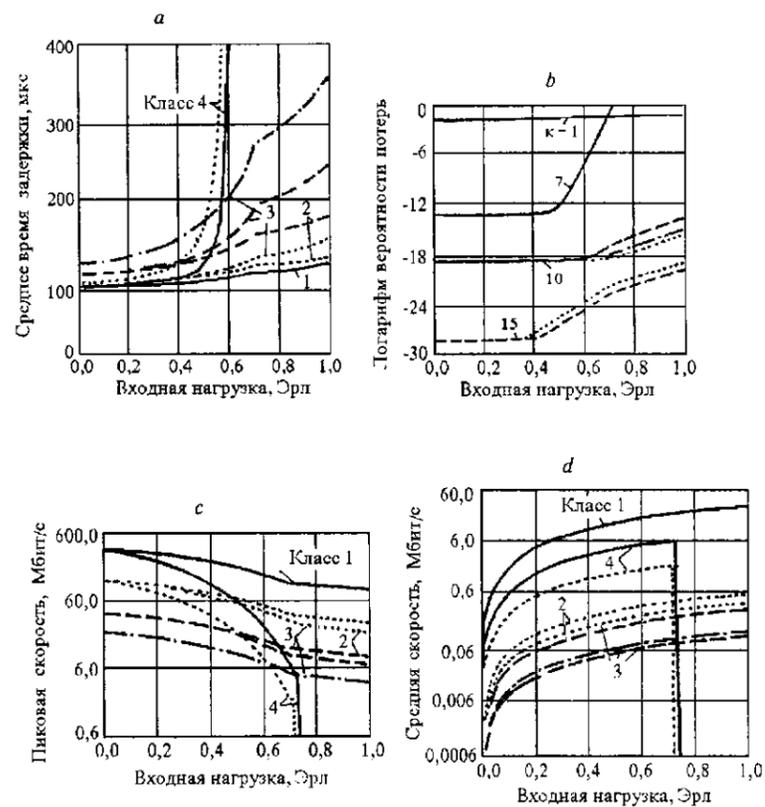


Рис. 4. Пример характеристик сети ATM:
a — время задержки; *b* — вероятность потерь; *c* — пиковая скорость; *d* — средняя скорость. Типы станций: 1 — сплошные линии, 2 — штриховые, 3 — штрихпунктирные, 4 — пунктирные (исходные данные в таблице)

В рассматриваемом примере пропускная способность (5) достигает 0,985, полезное использование за вычетом затрат на инкапсуляцию — 0,971.

Для оценки возможностей управления надежностью доставки (вероятностями структурных и информационных потерь) путем изменения емкостей очередей и чисел переспросов на рис. 4, *b* даны соответствующие характеристики метода маркерного широкополосного резервирования, полученные в [6].

ВЫВОДЫ

Показано, что предлагаемый метод множественного доступа с интегральным обслуживанием на принципах маркерного широкополосного резервирования открывает новые возможности для эффективного динамического распределения между пользователями ресурсов полосы и селективного динамического управления параметрами трафика и качеством обслуживания в территориальных широкополосных сетях ATM с децентрализованной архитектурой. Метод обеспечивает высокие значения производительности и других показателей при любом времени распространения сигналов в среде, которое проявляется как транспортное запаздывание.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петроски М. Все ли готово для поддержки ATM? // Сети. 1995. № 2.
2. Markhasin A. B. Flexible integrated service radio networks: architecture and dynamic control of structure, functions and delivery // Autom. Contr. & Comput. Sci. 1988. 22, N 3. P. 12.
3. Toniatti T., Verri L., Casals O. et al. Performance of shared medium access protocols for ATM traffic concentration // European Transact. on Telecommun. 1994. 5, N 2. P. 219.
4. Rubun I. Access-control disciplines for multi-access communication channels: reservation and TDMA schemes // IEEE Trans. Inform. Theory. 1979. IT-25, N 5. P. 516.
5. Markhasin A. B. Analys of protocol of shared access to noisy radio chanel // Autom. Contr. & Comput. Sci. 1983. 17, N 2. P. 32.
6. Markhasin A. B. Architecture of an integrated wide-area radio data network // Autom. Contr. & Comput. Sci. 1985. 19, N 5. P. 11.
7. Pat. 4413341 USA. Method for exchange of data between central station and peripheral stations / A. B. Markhasin, G. V. Beljaev, J. V. Babushkin, A. K. Petrov. Publ. 01.11.83.
8. Мархасин А. Б. Потенциальная пропускная способность сетей множественного доступа с временным разделением // I Всесоюз. конф. по информационным системам множественного доступа. Москва — Минск: ИППИ, 1989.

Поступила в редакцию 25 марта 1996 г.