

А. Н. Бевзов, В. Д. Бобко, В. Ф. Головин, Ю. Н. Золотухин, А. Д. Петухов
(Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск)

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ, РЕЧИ И ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО ИНТЕГРАЛЬНЫМ СЕТЯМ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Since the 80'th IA&E supports the work in the research and development of integrated network systems. The most common practice uses ISDN channel switching. It have been researched possibilities of any information type (data, speech, video) transmission with packet switching methods according to the CCITT Recommendation X.25.

С начала 1980-х гг. в Институте автоматики и электрометрии СО РАН разрабатываются принципы построения интегральной цифровой сети, использующей единые коммуникационные методы и средства для поддержки обмена информацией различного типа (цифровые данные, речь, видеoinформация и др.) между абонентами. В отличие от концепции ISDN, использующей метод коммутации каналов, сформулирована общая концепция интегральной цифровой сети с использованием методов коммутации пакетов (рис. 1). Этот метод, в настоящее время широко используемый в сетях передачи данных (например, в соответствии с рекомендацией МККТТ X.25 [1]), требует при создании узлов

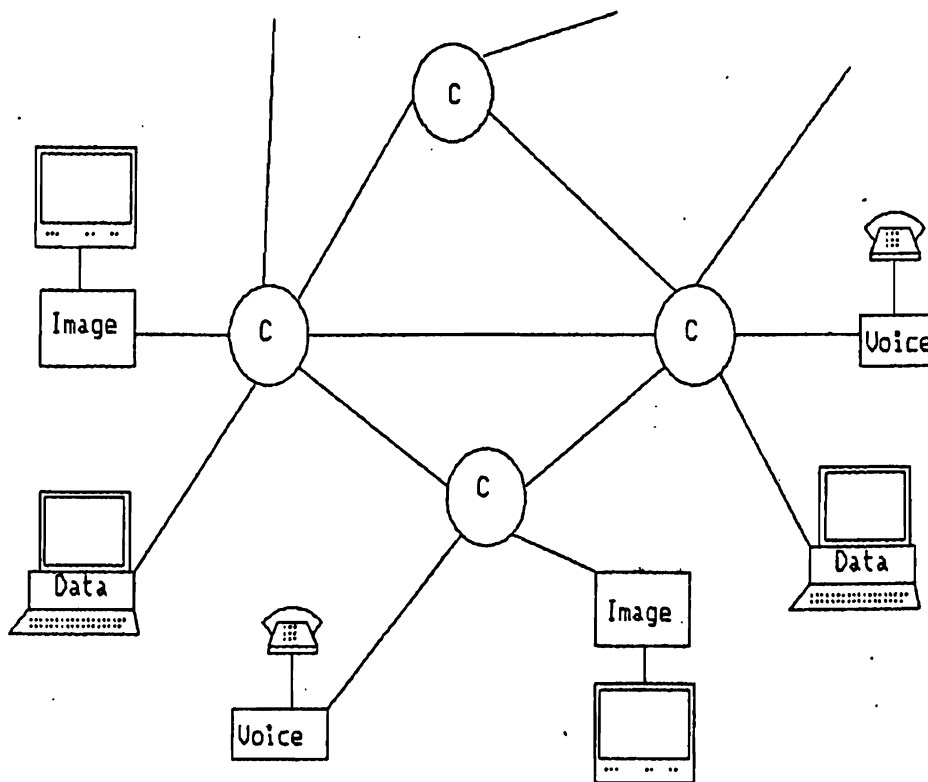


Рис. 1. Структура сети для совместной пакетной коммутации данных, речи и изображений (С — центр коммутации пакетов).

коммутации, концентраторов терминалов и абонентских комплексов применения вычислительных средств с достаточно высокими характеристиками. Попытка использовать метод коммутации пакетов для обмена информацией нетрадиционных видов, таких, как речь и телевизионное изображение, с очевидностью приводит к повышению уровня этих требований.

Нетрудно видеть, что даже при относительно невысокой нагрузке узел коммутации интегральной сети связи должен обладать производительностью, обеспечивающей обработку порядка нескольких тысяч пакетов в секунду и способностью работать с каналами связи на скоростях 50 и более килобит в секунду. Учитывая, что эти требования эквивалентны необходимости использования в узлах коммутации процессоров с производительностью около 10 млн. инструкций в секунду, принимая во внимание необходимость обеспечения отказоустойчивого функционирования и используя естественную возможность распараллеливания обработки потока пакетов, предложено реализовать узел коммутации в виде мультипроцессорной системы с многопортовой общей памятью. Разработанная система состоит из блоков трех основных типов (рис.2): процессорных, общей памяти и ввода/вывода. Каждый процессорный блок содержит микроЭВМ, локальную память и имеет доступ ко всем блокам ввода/вывода и общей памяти; каждый блок ввода/вывода включает линейные адаптеры, арбитражное устройство и имеет доступ ко всем блокам общей памяти; каждый блок общей памяти содержит запоминающие устройства, арбитражную логику и устройства связи с блоками других типов. Для связи процессорного блока с блоками общей памяти и блоками ввода/вывода в процессорном блоке устанавливается ведущее устройство соединителя (M), а в блоках общей памяти и ввода/вывода — ведомые (S). Передача данных осуществляется по тракту, образуемому шиной процессора, общей шиной соединителя и шиной выбранного блока общей памяти или ввода/вывода.

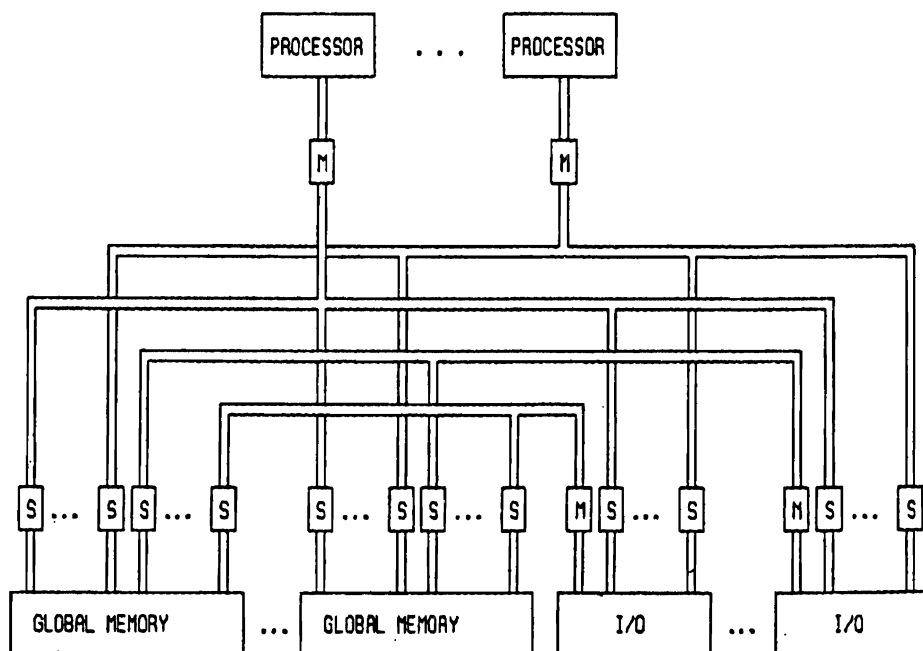


Рис. 2. Структурная схема мультипроцессорного узла коммутации пакетов на основе межблочных соединителей шин (M — ведущее устройство соединителей шин, S — ведомое устройство соединителей шин).

Аналогичные соединители используются для передачи данных между блоками ввода/вывода и общей памятью в режиме прямого доступа.

Разработанный с использованием мультипроцессорной системы узел коммутации пакетов [2] выполняет необходимый набор коммутационных функций: обеспечение взаимодействия с абонентами и соседними узлами сети, поддержание службы постоянных и коммутируемых виртуальных соединений, управление потоками, маршрутизация и т.д. Реализация узла коммутации в виде сильносвязанной мультипроцессорной системы делает необходимым решение ряда дополнительных проблем: синхронизации взаимодействующих процессов, обеспечения корректного доступа к общим ресурсам, реконфигурации системы при отказах и др.

Для оценки производительности построена [3] марковская модель мультипроцессорной системы, составлена система уравнений Чэпмена—Колмогорова [4]. Получено аналитическое выражение значения производительности мультипроцессорной системы с общей и локальной памятью:

$$V(m) = \frac{m}{q T_g (m / (1 - P_0) + T_l (1 - q))},$$

где $P_0 = \frac{1}{\sum_i q \lambda T_g m! / (m - i)!}$, m — число процессоров в системе, q — вероятность обращения в общую память, $1 / \lambda$ — длительность пребывания процессора в состоянии "внутренняя работа", T_g — длительность обслуживания заявок на доступ к общей памяти, T_l — длительность обслуживания заявок на доступ к локальной памяти.

Семейства кривых, отражающих зависимость суммарной производительности вычислительной системы от числа m при варьировании одним из параметров q , T_g , T_l , λ и фиксировании значений остальных, приведены на рис. 3.

Анализ моделей системы и экспериментальные исследования подтвердили, что в мультипроцессорных системах с распределяемой общей памятью предел суммарной производительности в конечном счете определяется интенсивностью обращений и временем доступа к глобальной памяти; с учетом этого при разработке функциональных блоков и структуры связей предприняты специальные меры повышения эффективности системы, а именно: в состав процессорных блоков введена локальная память значительного объема и использован метод однократного накопления пакетов, что обеспечило существенное снижение количества обращений в общую память; кроме того, создана возможность одновременного обращения к различным блокам памяти, широко использованы механизмы прямого доступа к памяти, реализован механизм циклического обслуживания запросов, что уменьшило среднее время обращения к памяти.

Не менее важной задачей, чем построение высокопроизводительной мультипроцессорной системы, является поддержка работы с быстродействующими каналами связи. Лишь сочетанием различных методов, таких, как рациональное разделение функций взаимодействия между аппаратными и программными средствами, применение аппаратных устройств обработки запросов, широкое использование механизмов прямого доступа к памяти и создание специализированных средств разрешения критических ситуаций при приеме кадров, следующих непосредственно друг за другом по высокоскоростному каналу, достигнут необходимый уровень быстродействия, позволивший обеспечить функционирование узла коммутации интегральной сети в реальном масштабе времени.

Особое место при создании интегральной сети занимают вопросы, связанные с передачей речи. Условия сохранения слитности речи и обеспечения диалога абонентов накладывают существенные ограничения на времена достав-

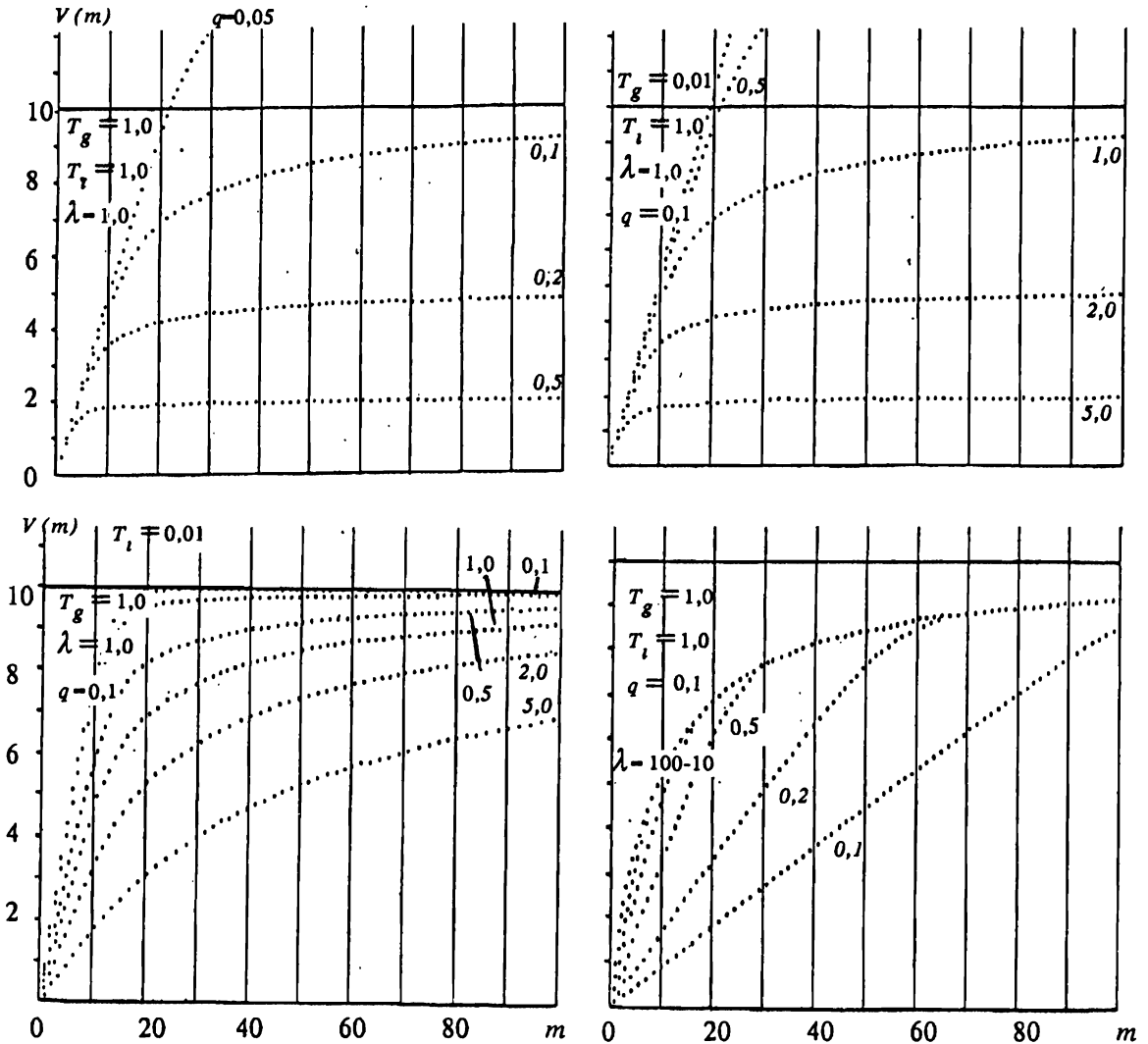


Рис. 3. Зависимости суммарной производительности вычислительной системы $V(m)$ от числа процессоров.

ки пакетов и величины флуктуаций моментов прихода пакетов, что лимитирует времена передачи и обработки пакетов в узлах коммутации.

Специфика пакетной передачи речи исследована на испытательном комплексе, созданном в ИАиЭ СО АН СССР, обеспечивающем возможность проведения телефонного диалога по каналу с протоколами взаимодействия, основанными на рекомендации X.25, при различных способах квантования речи, с варьируемой длиной пакета, с управляемой задержкой в доставке пакетов и имитацией искажений отдельных битов и потери пакетов. Определены величины допустимых задержек в узлах коммутации, рациональные длины пакетов при различных уровнях помех в каналах; для различных способов квантования получены оценки предельных значений вероятности искажения отдельного бита сообщения, при которых нарушается разборчивость речи и теряется узнаваемость диктора. В результате исследований сформулированы требования к каналам связи, базовым элементам (в первую очередь, узлам коммутации) и абонентским комплексам в части производительности, допустимых уровней ошибок, процедур обработки и протоколов взаимодействия.

Исследования по пакетной коммутации речи проводились с использованием разработанных в Институте базовых элементов интегральной цифровой сети

связи (см. рис. 1). Для изучения влияния потерь речевых пакетов на качество передаваемой речи написана подпрограмма генератора псевдослучайных чисел, реализующая псевдослучайное пропадание пакетов с задаваемой вероятностью. В табл. 1 приведены результаты экспериментальных исследований разборчивости речи при передаче коротких односложных слов русского языка для различных типов длин l и вероятностей p пропадания речевых пакетов.

Для исследования влияния трафика данных на качество передаваемой речи организуются независимые виртуальные соединения через центры коммутации пакетов (ЦКП) для передачи данных и речи. В случае, когда величина коммутационной производительности ЦКП достаточна для обслуживания суммарного трафика речи и данных, процесс передачи данных не влияет на качество речи. При увеличении загруженности ЦКП возникают дополнительные задержки речевых пакетов в ЦКП, вследствие чего происходит пропадание речевых пакетов. Проведена серия сеансов по передаче речи пакетами различной длины. Ниже представлены данные для исследуемых длин речевых пакетов:

l , байт	16	32	64	128
P , пакет/с	250	125	62,5	31,25
T , мс	4	8	16	32

При малой длине пакетов возрастают требования к коммутационным возможностям оборудования. Если производительность пакетного речевого терминала недостаточна, происходит потеря необработанных пакетов. В табл. 2 приведены результаты совместной передачи речи и данных.

Представленные результаты наглядно демонстрируют "вытеснение" потока пакетов данных более приоритетным потоком речевых пакетов. С введением трафика данных наблюдается увеличение интенсивности пропадания и искажения речевых пакетов. Для качественной передачи речи требуется иметь запас по пропускной способности ЦКП и каналов связи.

Для уменьшения времени задержки предложена и реализована процедура обработки "речевых" пакетов без механизма управления потоком данных. С этой целью при реализации процедур канального уровня (LAP В) в дополнение к рекомендации X.25 использован формат кадра "Ненумерованная информация" (UI), определенный в протоколе HDLC Международной организации по стандартам (МОС). Отказ от использования механизма управления потоком оправдан тем обстоятельством, что при установленном виртуальном "речевом" канале максимальный поток пакетов, передаваемых по нему, фиксирован. Такое решение, значительно сокращая время обработки, допускает возможность потери пакетов в сети. Исходя из большой информационной избыточности речи и наличия у абонентов возможности переспроса подобный компромисс признан допустимым на современном уровне развития вычислительных и телекоммуникационных средств.

Таблица 1

l , байт	p						
	1/2	1/3	1/4	1/5	1/7	1/10	1/16
32	19	13	6	6	4	3	3
64	19	12	12	9	8	5	1
96	25	14	14	8	7	6	1
126	26	15	13	7	5	5	2

Таблица 2

Длина РП	Принято РП	Потеряно РП	Обработано ПД
112	187	4	37
64	346	4	28
48	488	4	24
40	577	20	17
32	666	29	16
28	776	102	9
24	915	160	7
20	1171	150	6
16	1229	212	6

При реализации процедур взаимодействия в сети для дополнительного уменьшения времен задержек в узлах коммутации использовано введение для "речевых" пакетов относительного приоритета в обслуживании по сравнению в пакетами данных.

Организация передачи видеоизображений по коммутируемым сетям со среднескоростными каналами связи также представляет собой серьезную проблему, связанную, в основном, с огромным объемом информации, подлежащей передаче для воспроизведения телевизионного сюжета у абонента-получателя. Для обеспечения передачи нормального телевизионного сигнала в цифровом виде требуется канал с пропускной способностью до 50 Мбит/с, в то время как у каналов, на реальное использование которых можно рассчитывать в настоящее время, быстроедействие обычно ниже на два—четыре порядка.

Существует несколько факторов, обуславливающих возросший интерес к передаче/хранению видеоизображений:

— разработка эффективных алгоритмов кодирования изображений с целью сжатия/восстановления их для передачи по низкоскоростным каналам связи;

— последние достижения в электронике, позволяющие резко снизить объем и стоимость оборудования кодеков, реализующих алгоритмы сжатия/восстановления;

— принятие международных стандартов на передачу ТВ-изображения по низкоскоростным каналам связи, способствующих унификации и удешевлению оборудования.

Важнейшей задачей при передаче изображения по цифровым каналам связи является задача его сжатия. Учет статистических свойств изображения делает возможным более экономное кодирование передаваемой информации. Предпосылки к этому заложены в самом изображении: для передачи области изображения, имеющего одинаковую интенсивность во всех точках, достаточно передать координаты этой области и значение интенсивности. Что касается движущихся изображений, то естественно, что при передаче изображения, например, говорящего человека достаточно передавать от кадра к кадру только изображение его губ или глаз, т.е. изменяющихся фрагментов изображения. Выбор алгоритмов обработки и сжатия в значительной мере определяется классом изображений (бинарное или полутоновое), а также назначением передаваемых изображений.

Для сжатия бинарных изображений с нулевой ошибкой восстановления разработано значительное количество алгоритмов кодирования, большая часть которых в том или ином виде включает кодирование длин серий. Именно на этом принципе построены READ (MREAD, MMREAD) коды, применяемые в выпускаемых за рубежом факсимильных аппаратах.

Сжатие полутоновых изображений представляет собой более сложную задачу, что определяется статистической природой полутонового изображения. Одним из методов сокращения избыточности информации является декорреляция сигнала и кодирование полученных декоррелированных элементов (трансформант). Выбор вида преобразования определяется природой изображения и требованиями, предъявляемыми задачей к точности восстановления сигнала. В ряде случаев, когда передаваемые изображения рассчитаны на визуальное восприятие и не предназначены для извлечения из них морфометрической информации, от передаваемого изображения не требуется полной идентичности оригиналу, а вполне достаточно визуального сходства. В связи с этим представляют интерес алгоритмы сжатия с регулируемой ошибкой восстановления, которые позволяют значительно сократить объем передаваемой информации при сохранении его информативности.

Для передачи полутонового изображения существует несколько базовых методов, что и отражено в соответствующих рекомендациях МККТТ (JPEG, MPEG, р×64), в основе которых лежат методы кодирования с преобразованием. Кратко их можно описать следующим образом:

- оцифрованные элементы изображения (обычно 8 бит на точку) объединяются в двумерные блоки (4×4, 8×8, 16×16 и т. д.);
- блоки подвергаются линейному ортогональному преобразованию (обычно это дискретное косинусное преобразование, ДКП) с целью декорреляции изображения;
- полученные трансформанты квантуются и после специального сканирования кодируются кодами Хаффмена переменной длины (чаще встречающемуся значению присваивается код меньшей длины);
- вся полученная информация плотно упаковывается для передачи в канал связи.

Применение этих методов позволяет сократить избыточность вплоть до 0,3—1 бит на точку изображения в зависимости от характера изображения, при исходном значении 8 бит для черно-белого изображения или 24 бит для цветного изображения.

В ИАиЭ СО РАН разработаны алгоритмы, обеспечивающие устранение избыточности ТВ-изображения как во временной, так и в пространственной области. Функционирование алгоритмов основывается на оригинальном преобразовании, с помощью которого декоррелируются элементы изображения, а полученные трансформанты подвергаются адаптивному кодированию кодами переменной длины для передачи их в канал связи [5, 6]. При близком к ДКП коэффициенте сжатия разработанное преобразование позволяет избежать фрагментарного шума, особенно заметного на пологих участках изображения. Способ кодирования базируется на достаточно общих вероятностных свойствах трансформант преобразования и относительно прост в реализации.

Наиболее перспективно с точки зрения сокращения избыточности так называемое кодирование с преобразованием. При таком кодировании элементы изображения группируются по некоторым областям (например, квадраты размером 8×8 точек), подвергаются декоррелирующему преобразованию, а полученные трансформанты преобразования экономно кодируются для хранения или передачи. Применение подобного кодирования позволяет добиться сжатия неподвижных изображений до 0,1—1 бит/точку и до 64 Кбит/с для подвижного телевизионного изображения [7]. При передаче изображений и речи по сетям с пакетной коммутацией возникают проблемы, связанные с пакетным методом передачи информации, среди них:

- установление/разъединение связи;
- проблема анахронизмов. В общем случае информация, передаваемая по сети с пакетной коммутацией, может прибыть в пункт назначения не в той последовательности, в какой была отправлена. Вследствие этого должны быть пред-

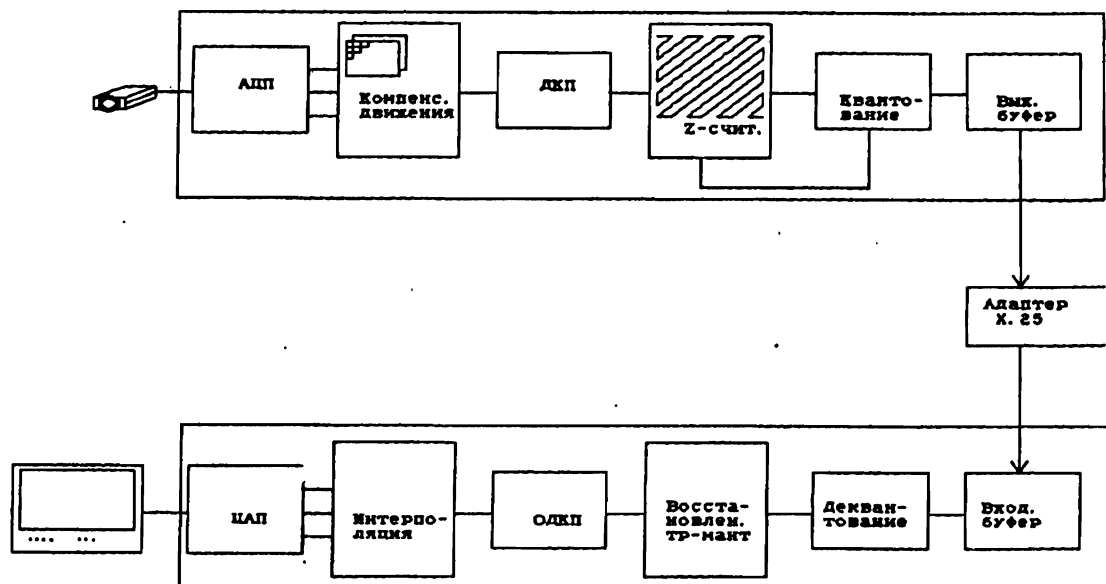


Рис. 4. Структурная схема передачи/приема подвижных изображений.

приняты специальные меры для того, чтобы пакеты, содержащие аудио- и видеоинформацию, поступали абоненту в детерминированном порядке;
— синхронизация речи и изображений при совместной передаче.

В целях минимизации искажений изображения при пропадании пакетов необходимо предусмотреть упаковку целого числа фрагментов в пакеты максимальной допустимой длины, поскольку при кодировании изображений используются коды переменной длины. Для проверки и исследования алгоритмов в ИАиЭ СО РАН была разработана исследовательская система для передачи/приема подвижных изображений по сетям с коммутацией пакетов (рис. 4).

Таким образом проведенные исследования подтверждают принципиальную возможность совместной пакетной передачи информации различного вида: данных, речи и изображения. Предварительная обработка информации различного вида, с учетом специфических требований для каждого вида, значительно снижает технические требования к каналам связи и узлам коммутации и создает предпосылки к практической реализации интегральных сетей на существующей элементной базе.

ЛИТЕРАТУРА

1. ССИТТ. VIII-th Plenary Assembly. Document N 56. Recommendation X.25. Red book. Malaga-Torremolinos. Geneva: 1980.
2. Бобко В.Д., Головин В.Ф., Золотухин Ю.Н. // Автометрия. 1993. N1. С. 79–87.
3. Бобко В.Д., Головин В.Ф., Золотухин Ю.Н. // Там же. 1992. N6. С. 91–100.
4. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания. М., 1966.
5. Ефимов В.М., Золотухин Ю.Н., Резник А.Л. // Матер. междуна. коллоквиума "Новые информационные технологии". М., 1991. С. 239.
6. Ефимов В.М., Золотухин Ю.Н., Колесников А.Н. // Автометрия. 1991. Т.6, N6. С. 93–97.
7. Головин В.Ф., Егоров А.В., Ефимов В.М. и др. // Матер. междуна. коллоквиума "Новые информационные технологии." М., 1991. С. 230–231.