

УДК 681.324(047)

ПРИМЕНЕНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕТЯХ И В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

Н. М. Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

| | |
|--|-----|
| ВВЕДЕНИЕ | 201 |
| ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ И OSI-МОДЕЛЬ | 203 |
| ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ | 205 |
| Оборудование для объединения локальных вычислительных сетей | 205 |
| Применение коммутируемых технологий | 206 |
| Развитие сети Ethernet | 207 |
| КОММУТАЦИЯ ДАННЫХ В ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕТЯХ | 208 |
| Оптоволоконный канал | 209 |
| Оптоволоконный интерфейс | 209 |
| СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ ДАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ | 211 |
| Синхронный способ передачи и коммутации информации | 212 |
| АТМ-СТАНДАРТ | 215 |
| Общая характеристика АТМ-технологии [41] | 215 |
| Протоколы АТМ-технологии | 217 |
| Физический уровень АТМ-модели | 223 |
| Уровень адаптации | 224 |
| Состав аппаратуры | 224 |
| Качество обслуживания и вопросы надежности | 225 |
| КОММУТАТОРНЫЕ СТАНЦИИ И КОММУТАТОРЫ ДЛЯ АТМ-СПОСОБА ПЕРЕДАЧИ | 226 |
| Коммутаторные станции (switch fabric) | 226 |
| Архитектура параллельных коммутаторов | 227 |
| Применение искусственных нейронных сетей | 229 |
| Коммерческие разработки | 231 |

| | |
|--|-----|
| АТМ-ТЕХНОЛОГИЯ И ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ | 232 |
| Эмуляция ЛВС в АТМ-сеть | 232 |
| Виртуальные ЛВС | 233 |
| Сетевая мультимедиа и видеоконференции | 233 |
| ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ | 234 |
| Триггерная система установки ATLAS | 235 |
| Потоки данных | 237 |
| Построители событий [95–111] | 239 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 245 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 245 |

УДК 681.324(047)

ПРИМЕНЕНИЕ КОММУТИРУЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СЕТЯХ И В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

Н. М. Никитюк

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Рассмотрены вопросы применения ATM-технологии в экспериментальной физике высоких энергий. Приводятся примеры использования ATM-сетей в триггерной системе установки ATLAS. Описаны системы, в которых для передачи данных от детекторов к потребителям вместо общей магистрали применяются ATM-сети.

The questions of the use of ATM-technology in high-energy physics experiments are considered. The examples of the application of the ATM-nets in the trigger system of the set-up ATLAS are considered. The systems where ATM-nets are used for transmission of the data instead of dataway are described.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, для передачи данных между удаленными ЭВМ используются вычислительные сети. Современная сеть состоит из ЭВМ, аппаратных и программных компонентов. Идея создания вычислительных сетей возникла в начале 60-х годов, когда стали широко применяться относительно дешевые малые ЭВМ. Наличие систем прерывания и разделения времени позволило поддерживать несколько независимых потоков информации одновременно. Так возникла новая коммуникационная технология, позволяющая объединять в себе различные исследовательские институты и другие организации. Создана архитектура современных информационно-вычислительных сетей, доступных разработчикам [1, 2]. В зависимости от обслуживаемой территории современные вычислительные сети разделяются на глобальные сети общего пользования, корпоративные и локальные сети. Примером глобальной сети общего пользования является знакомая многим сеть Интернет [3, 4] или, как ее еще называют, сеть, состоящая из сетей. Корпоративные сети обслуживают замкнутую группу пользователей и ограничены территорией большого предприятия. Локальные вычислительные сети (ЛВС) предназначены для обмена данными между небольшой группой пользователей. Одним из серьезных недостатков современных сетей всех уровней является их низкая пропускная способность. Возможности сетей и качество обслуживания не всегда

отвечают требованиям обеспечения большой пропускной способности, необходимой для внедрения систем цифровой комплексной информации (мультимедиа) [5]. В то время как микропроцессоры обеспечивают сотни миллионов операций в секунду и уже испытаны персональные компьютеры (ПК), работающие на тактовой частоте 300 МГц [6], величина сетевой задержки колеблется от 0,01 до 0,001 с [1] и более, что следует из практики многочисленных потребителей. И это при том, что уже разработана и внедряется сетевая аппаратура на базе АТМ-технологии (Asynchronous Transfer Mode), обеспечивающая пропускную способность от сотен мегабит до нескольких гигабит в секунду.

Основная проблема заключается в том, чтобы обеспечить плавный переход от существующих многочисленных локальных сетей к сетям с более высокой производительностью. Одним из таких эффективных путей является переход на коммутируемые технологии, которые позволяют разрешать наиболее узкие места в сети, связанные с транспортировкой и коммутацией данных [7, 8]. На втором этапе развития сетей предполагается создавать локальные и глобальные сети на базе единого стандарта с использованием АТМ-технологии. Если рассматривать качественно, то такая сеть для многочисленных пользователей будет так же доступна, как твердый диск доступен одному пользователю ПК. Как следствие этого, телекоммуникации ближайшего будущего будут обеспечивать качественное телевидение высокой четкости, обработку и распознавание речи, объединение компьютеров в глобальные сети, высококачественные телеконференции и т. д. [9]. В кратком обзоре невозможно изложить все аспекты, связанные с технологией и архитектурой современных вычислительных сетей. Наиболее важной функцией, выполняемой в процессе передачи данных между потребителями, является коммутация информации. Поэтому предлагаемый обзор посвящен современному состоянию в области коммутируемых технологий, применяемых в вычислительных сетях.

Обзор состоит из введения, восьми разделов и заключения. Во введении отмечается актуальность тематики, связанной с применением коммутируемых технологий в вычислительных сетях. В первом разделе кратко рассмотрена модифицированная OSI-модель. Во втором разделе описано основное сетевое оборудование, применяемое в современных вычислительных сетях. Отмечаются важные функции, выполняемые коммутаторами. Некоторым вопросам коммутации данных в оптоволоконных сетях посвящен третий раздел. Описан способ повышения пропускной способности кольцевой оптоволоконной сети на основе топологии типа «лапша» («Shuffle Net»). Различные способы коммутации данных в широко используемых сетях приведены в четвертом разделе. Дана таблица, характеризующая три наиболее широко используемых способа транспортировки и коммутации пакетов: синхронный, асинхронный и «передача от точки к точке». Описанию АТМ-способа передачи и коммутации данных посвящен пятый раздел. Приведены АТМ-протоколы и примеры,

характеризующие способы адресации и коммутации ATM-ячеек, рассматривается оборудование, необходимое для построения ATM-сетей. В шестом разделе описываются блок-схемы ATM-коммутаторов и основные требования к таким устройствам. Обсуждаются вопросы надежности в ATM-сетях. Описываются также методы построения параллельных коммутаторов, являющихся основными в современных ATM-коммутаторах. Седьмой раздел посвящен вопросам построения виртуальных вычислительных сетей и эмуляции ЛВС в ATM-сети. И, наконец, в восьмом разделе рассмотрены вопросы применения телекоммуникационных сетей в экспериментальной физике.

1. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ И OSI-MODEЛЬ

OSI-модель [10] (Open Systems Interconnections — открытые системы коммуникации) была предложена еще в начале 80-х годов Международной организацией по стандартам. Модель является базой для разработки сетевых стандартов и определяет, каким образом сообщение от пользователя проходит по сети и какое оборудование и тип протокола работают на том или ином

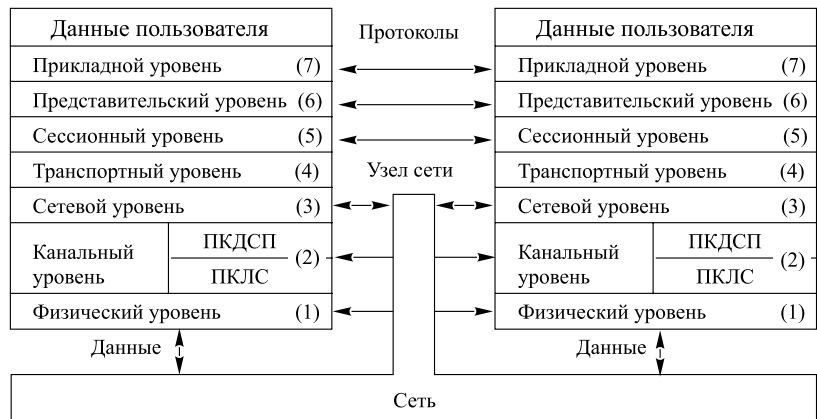


Рис. 1. Модифицированная OSI-модель: ПКДСП — подуровень контроля доступа к среде передачи; ПКЛС — подуровень контроля логического сигнала

уровне. Каждый уровень иерархии состоит из набора логических узлов, соединенных логическими линиями. Другими словами, каждый уровень OSI-модели отвечает за свои специфические функции. Как отмечается в [11], проблемам технологии управления сетями уделяется большое внимание. OSI-модель состоит из семи уровней, как это показано на рис. 1. В [12] рассматривается модифицированная OSI-модель, предложенная в IEEE (США). Эта модель

отличается тем, что разбивает канальный уровень OSI-модели на два подуровня: подуровень контроля доступа к среде передачи (Medium Access Control — MAC), который описывает способ доступа сетевого устройства к среде передачи данных, и подуровень контроля логического сигнала (Logical Link Control), который описывает способ установления и завершения соединения и передачи информации. Стандарты для MAC-уровня существуют для таких популярных ЛВС, как Ethernet и оптоволоконный интерфейс. Что касается второго подуровня, то здесь возможны три модификации управления: управление без подтверждения доставки и установления соединения, управление с установлением соединения и управление без установления соединения с подтверждением получения сообщения. Ниже перечисляются основные характеристики уровней модифицированной OSI-модели.

- Наиболее низкий, физический, уровень описывает среду передачи данных. В качестве последней могут служить витая пара проводов, коаксиальный кабель, оптоволокно, повторители сигналов или волна спутниковой связи.
- Канальный уровень обеспечивает передачу данных путем введения адресов, прохождение данных, вычисление кода синдрома на передающей стороне и коррекцию ошибок на стороне приемника. На канальном уровне работают такие известные локальные сети, как Ethernet и оптоволоконный интерфейс.
- Третий, сетевой, уровень отвечает за передачу данных между сетями, включая и маршрутизацию. На сетевом уровне возникает сетевая адресация.

Таким образом, первые три уровня OSI-модели относятся непосредственно к сети. Следующие четыре уровня представляют высшие уровни OSI-модели. Они отвечают за коммуникацию между источником и приемником данных.

- Транспортный уровень управляет потоком данных из одной программы в другую независимо от типа сети.
- Пятый уровень называется сессионным. Он управляет диалогом между двумя конечными станциями, т. е. между передатчиком и приемником данных, и наоборот.
- Шестой (представительский) уровень отвечает за общее представление информации, передаваемой между двумя потребителями сети.
- Седьмой уровень служит в качестве интерфейса между потребителем и OSI-моделью.

Нетрудно заметить, что внутри OSI-модели данные, поступающие от пользователя, проходят все ступени модели от первой до седьмой. При этом на каждом уровне, по необходимости, добавляется адресная, контрольная или оба типа информации.

2. ОСНОВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Оборудование для объединения локальных вычислительных сетей. ЛВС получили очень широкое распространение. Нередко даже в пределах одного предприятия таких сетей насчитывается десятки и более. С целью более эффективного использования ЛВС возникает необходимость в их объединении. В цикле работ [12–14] описывается функциональное назначение устройств, используемых для объединения сетей, таких как повторители, мосты, маршрутизаторы, шлюзы и коммутаторы. Рассмотрим кратко их назначение.

Функция повторителя весьма проста. Он обеспечивает усиление и формирование сигналов между сегментами ЛВС [13]. Функции повторителя выполняют также концентраторы данных [14, 15], пришедшие на смену общему кабелю, с помощью которого объединялись компьютеры ЛВС. Однако, используя концентраторы, невозможно решать проблему увеличения пропускной способности сети. В какой-то степени эту проблему решают многосегментные концентраторы, разделяя сеть на сегменты [15]. По сравнению с повторителем мост [12, 16] представляет собой более сложное устройство, поскольку он содержит список адресов, позволяющий сортировать данные, предназначенные разным сегментам или разным ЛВС. Мосты работают на канальном уровне OSI-модели. В силу наличия таблиц адресов, мосты имеют возможность ограничивать доступ к некоторым устройствам. Как показано в [16], в зависимости от сложности выполняемых функций существуют мосты четырех типов: прозрачные, транслирующие, инкапсулирующие и мосты с маршрутизацией от источника. В цитируемой работе детально описываются свойства различных модификаций мостов и приводятся блок-схемы сетей, в которых они применяются. Так, прозрачные мосты применяются для объединения сетей с идентичными протоколами на канальном и физическом уровнях. Транслирующие мосты используются для объединения сетей с разными протоколами на тех же уровнях и т. д.

Следующими по степени сложности устройствами, позволяющими эффективно объединять сети и увеличивать их размеры, являются маршрутизаторы, которые работают уже на сетевом уровне OSI-модели [12, 16]. Поэтому маршрутизаторы имеют собственные сетевые адреса. Объединенные маршрутизаторами сети могут иметь различные протоколы как на физическом, так и на канальном уровне. Они могут также манипулировать данными, используя

большее количество источников информации, пересылая пакеты на конкретный адрес и задавая альтернативные пути, если в этом появляется необходимость. По сравнению с маршрутизаторами шлюзы [12] выполняют еще более интеллектуальные функции. Они обеспечивают перевод сетевых протоколов, что позволяет различным устройствам сетей не только объединяться, но и работать как единая сеть.

Применение коммутируемых технологий. Рассмотрим использование коммутируемых технологий в широко известных стандартных сетях. Коммутаторы образуют довольно широкий класс сетевых устройств, позволяющих существенно повысить эффективность ЛВС.

Коммутация данных в сетях обеспечивает высокую пропускную способность и малое время задержки. Коммутаторы работают на втором уровне OSI-модели. Анализ сетей с коммутаторами приводится в [7, 8]. Коммутаторы позволяют эффективно объединять различные по своей архитектуре сети или повышать пропускную способность ЛВС, разделяя ее на отдельные сегменты. Выпускаемые в настоящее время коммутаторы можно разделить на два класса. Первый класс коммутаторов будем называть специализированными коммутаторами, так как они используются для повышения эффективности работы уже существующих, но имеющих различные стандарты сетей. Второй класс коммутаторов предназначен для построения сетей, использующих АТМ-технологии. Данный класс коммутаторов, или, как их еще называют, коммутаторные станции («switch fabric»), более подробно мы рассмотрим ниже. Развитие АТМ-технологии приводит к тому, что некоторые коммутаторы первого класса имеют порты, совместимые с АТМ-протоколом. Подробные характеристики модульных коммутаторов первого класса, выпускаемых компанией «Хулан», приведены в [14]. Кроме коммутирующих модулей, в комплектацию шасси, на которых они монтируются, входит один или несколько процессорных модулей управления. Пропускная способность матричной магистрали шасси OmniSwitch составляет 640/950 Мбит/с. Шасси с 5 интерфейсами расширения может поддерживать до 48 сегментов Ethernet, 8 серверов оптоволоконного интерфейса, 32 сегмента Fast Ethernet и 72 соединения АТМ-стандарта. В [17,18] приведены параметры активного сетевого оборудования, предназначенного для построения небольших сетей и создания корпоративных сетей. В перечень оборудования входят повторители, коммутаторы портов Ethernet, концентраторы для оптоволоконного интерфейса, маршрутизаторы, шлюзы и др.

Одним из перспективных направлений в применении коммутируемых технологий является инверсное мультиплексирование [19]. Оно предполагает коллективное использование нескольких низкоскоростных линий и позволяет разделить на физическом уровне канал и источник информации на несколько потоков, передать их через сеть и объединить в единый путь на стороне приемника.

Развитие сети Ethernet. Как будет показано ниже, весьма распространенная сеть Ethernet совершенствовалась в двух направлениях: переход на более высокие скорости и использование специализированных коммутаторов. Среди локальных сетей наиболее известной является сеть Ethernet, имеющая несколько сегментов, основу которых составляют отрезки коаксиального кабеля или витой пары проводов. Сегменты соединяются друг с другом с помощью повторителей сигналов, находящихся в узлах сети. Таким образом, все узлы сети имеют равноценный доступ к каналу Ethernet, который обслуживает до 1023 узлов. Кроме того, с помощью моста можно объединить до 800 географически разделенных сетей Ethernet. В настоящее время свыше 10^7 потребителей компьютерных сетей работают на обычной сети Ethernet. Однако при большом количестве потребителей даже в локальной сети существенно понижается пропускная способность от 10 до 2 МГц и менее. Поэтому ведутся работы, направленные на повышение пропускной способности сети Ethernet, разработка которой относится еще к 1982 г.

Как отмечается в [20,21], одним из несложных и экономичных путей перехода на более высокие скорости (на порядок) является переход на новую сетевую технологию быстрой сети Ethernet (100 Base-T Fast Ethernet), который был предложен в 1994 г. Данный стандарт довольно просто совмещается с обычным стандартом Ethernet, и это касается прежде всего протокола. Для передачи данных могут использоваться две или четыре витые пары проводов или две волоконно-оптические жилы, работающие в многомодовом режиме. Переход на Fast Ethernet осуществляется с помощью стандартной аппаратуры, характеристики которой приведены в [21]. Как видно из табл. 1, используя стандарт Fast Ethernet, можно экономичным способом, не меняя кабельной сети, на порядок повысить скорость передачи данных. Кроме того, в стадии проработки находится также гигабитный стандарт Ethernet, предназначенный для еще более быстрой локальной сети, работающей на частоте 1 ГГц. В качестве физической среды передачи данных используется оптическое волокно или витая пара проводов [22–24]. Важно, что данная технология является продолжением стандарта 10/100 Мбит Ethernet, и, как отмечается в [22], она является идеальным решением для подключения быстродействующих серверов. В [24] приводится блок-схема сети, включающей все три типа сетей Ethernet с выходом от Fast Ethernet посредством быстрого коммутатора на корпоративную (глобальную) сеть, содержащую гигабитный Ethernet и оптоволоконный интерфейс.

Другой путь к повышению гибкости и пропускной способности сети Ethernet является разработка коммутируемой Ethernet-технологии [25]. Здесь возможны два подхода: статическая коммутация [26] и динамическая [27]. Статическая коммутация используется для упрощения процедур добавления новых и передвижения старых узлов. Она осуществляется с помощью сетевого администратора путем обращения к услугам сетевого контроля и управления.

Это приводит к тому, что пользователь или рабочая станция могут быть легко «перенесены» из одного сегмента в другой. Для применения статической коммутации пользователям сети потребуется один модуль коммутатора с определенным количеством портов. Однако увеличения пропускной способности сети не происходит. Использование динамической коммутации приводит к увеличению пропускной способности сети. Достигается это тем, что с помощью коммутатора, подобно тому, как это делается в обычных телефонных сетях, пакет от какой-либо станции передается только конкретному абоненту, а не всем узлам сети, как это принято в обычной сети Ethernet. В результате устраняются коллизии в сети и значительно увеличивается ее эффективность. В работе [27] описывается также динамическая коммутация локальных сетей, таких как Fast Ethernet и оптоволоконный интерфейс с выходом в АТМ-сеть.

Таблица 1. Стоимость подключения для четырех сетевых технологий

| Технология | Стоимость одного подключения, \$ | Скорость, Мбит/с | Фирма |
|--------------------------|----------------------------------|------------------|-------------------|
| Fast Ethernet | 295 | 100 | «Microdyne» |
| ATM | 1300 | 155 | «Fore» |
| 100 VG | 400 | 100 | «Hewlett Packard» |
| Оптоволоконный интерфейс | 1500 | 100 | «Interphase» |

Примечание. Характеристики сети 100 BaseVG, разработанной фирмой «Hewlett Packard», приведены в [20].

3. КОММУТАЦИЯ ДАННЫХ В ОПТОВОЛОКОННЫХ СЕТЯХ

Оптоволоконные каналы передачи данных имеют ряд преимуществ перед традиционными носителями информации: широкая полоса пропускания, что является следствием высокой частоты передачи; малые размеры; слабые затухания; нет необходимости в использовании земляной шины; практически отсутствует влияние электромагнитного поля и взаимное влияние отдельных каналов друг на друга; связи между передатчиками и приемниками являются диэлектрическими; имеется возможность работы отдельного волокна в многомодовом режиме и др. К недостаткам можно отнести: необходимость точного согласования оптических разъемов и оптических волокон; хрупкость оптических волокон и сложность ремонта магистральных связей в случае обрывов; трудности передачи аналоговых сигналов с высокой точностью (свыше 8 бит) из-за нелинейности характеристик оптического волокна и электрооптических приемопередатчиков.

Широкую известность получили три стандарта для оптических систем передачи данных: оптоволоконный канал (Fiber Channel) [28, 29], упоминаемый нами выше оптоволоконный интерфейс [30] и синхронная система передачи. Рассмотрим кратко характеристики двух первых стандартов. Характеристики синхронной системы передачи приведены в [40].

Оптоволоконный канал. Первоначально оптоволоконный канал был введен для быстродействующих, полностью дуплексных систем передачи данных большими блоками. В дальнейшем он был модифицирован с целью передачи и коммутации информации пакетами. В настоящее время оптический канал используется для передачи данных между рабочими станциями, суперкомпьютерами, запоминающими устройствами и дисплеями. При этом могут устанавливаться различные топологии передачи информации: «от точки к точке», петля, типа «crosspoint» (перекрестные связи), с использованием коммутаторных станций и др. Передача данных может осуществляться на расстояние до 10 км с погрешностью менее чем 10^{-12} . Полностью сконфигурированный оптоволоконный канал с использованием коммутаторной станции может иметь агрегатную полосу пропускания в терабитном диапазоне. Он содержит пятиуровневый протокол FC-0–FC-4, соответствующий нижшим уровням OSI-модели. Уровень FC-0 определяет физическую среду передачи данных (витая пара проводов, коаксиальный кабель, одномодовый и многомодовый оптический канал). Фиксированные скорости передачи составляют 132,8; 265,6; 531,25 и 10262 Мбит/с. Оптические коммутаторы переключают сигналы со скоростью 1 Гбит/с. С помощью уровня FC-1 задаются тактовые сигналы и методы кодирования и декодирования протоколов из параллельного 8-разрядного в 10-разрядный последовательный код (так называемый метод 8B/10B). Далее, уровень FC-2 определяет метод трансляции данных: от «точки к точке» или с помощью коммутатора. Кроме того, на этом уровне задается протокол сообщения. В блоке данных может содержаться до 2112 байт. Заголовок сообщения занимает 36 байт. В свою очередь, уровень FC-2 разделяется на три подуровня. Подуровень 1 определяет способ передачи от «точки к точке», и, таким образом, оптимизируется максимальная скорость блочного способа передачи данных. Подуровни 2 и 3 определяют пакетный способ передачи информации. Основное различие между этими подуровнями заключается в том, что способ передачи по подуровню 2 гарантирует подтверждение получения пакета в случае заторов на коммутаторной станции, в то время как подуровень 3 такого качества не гарантирует. С помощью уровня FC-3 задаются режимы коммутации данных между портами (радиовещательный режим и др.). Уровень FC-4 определяет используемый стандарт вычислительной техники, что позволяет выполнять команды многих существующих интерфейсов.

Оптоволоконный интерфейс. Данная система остается основной технологией для организации больших магистральных сетей. Стандартная сеть,

разработанная еще в середине 80-х годов, имеет кольцевую архитектуру и рассчитана на передачу только световых сигналов со скоростью 100 Мбит/с,

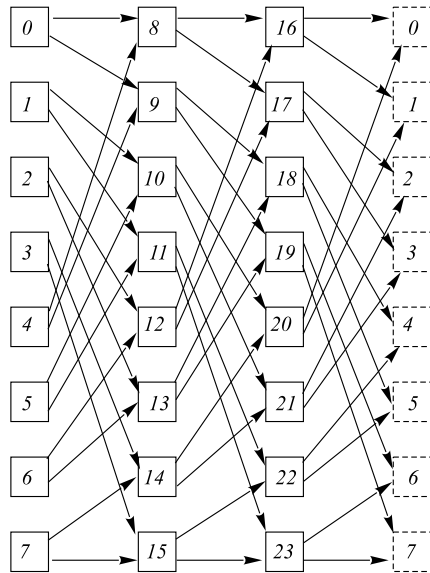


Рис. 2. Топология сети типа «лапша», содержащей 24 узла. Цифрами обозначены 2×2 -коммутаторы

как по локальным сетям (~ 10 км), так и на большие расстояния — до 100 км. К сети подключаются 500 узлов. Расстояние между узлами составляет 2 км. В свою очередь, узлы сети содержат порты, с помощью которых можно подключать другие оптические кольца. В 1993 г. Американским национальным институтом стандартизации была создана техническая спецификация оптоволоконного интерфейса на основе экранированной или неэкранированной витой пары проводов для передачи данных на расстоянии 100 м. Информация передается с помощью двух спаренных колец, по которым в противоположных направлениях циркулируют блоки данных. Каждый узел регенерирует оптические сигналы с помощью электрооптических преобразователей (прямое и обратное преобразование), что позволяет подключать к узлу коаксиальный кабель или витую пару проводов. Используя оба кольца для передачи данных в одном направлении, можно удвоить скорость передачи и довести ее до 200 Мбит/с. В случае обрывов одного или даже двух колец в узлах сети происходит автоматическое замыкание входов/выходов соответствующих интерфейсов, и сеть остается работоспособной.

Другими способами увеличения пропускной способности оптоволоконного канала являются повышение скорости передачи и использование дорогостоящих компонентов, что далеко не всегда является приемлемым. Высокопроизводительная система может быть создана путем увеличения количества колец и, соответственно, увеличения числа приемопередатчиков в узлах. Так, имея n колец и такое же количество приемопередатчиков в узлах сети, можно одновременно передавать n пакетов. Однако такой параллелизм ведет к усложнению системы. Возникают также проблемы с заторами в узлах и трудности с управлением большим количеством станций. Одним из путей решения проблемы увеличения пропускной способности является применение мультиплексирования нескольких несущих частот. Однако остается проблема, связанная с тем, что сигналы проходят сквозь большое количе-

ство узлов. В свою очередь, узлы сети содержат порты, с помощью которых можно подключать другие оптические кольца. В 1993 г. Американским национальным институтом стандартизации была создана техническая спецификация оптоволоконного интерфейса на основе экранированной или неэкранированной витой пары проводов для передачи данных на расстоянии 100 м. Информация передается с помощью двух спаренных колец, по которым в противоположных направлениях циркулируют блоки данных. Каждый узел регенерирует оптические сигналы с помощью электрооптических преобразователей (прямое и обратное преобразование), что позволяет подключать к узлу коаксиальный кабель или витую пару проводов. Используя оба кольца для передачи данных в одном направлении, можно удвоить скорость передачи и довести ее до 200 Мбит/с. В случае обрывов одного или даже двух колец в узлах сети происходит автоматическое замыкание входов/выходов соответствующих интерфейсов, и сеть остается работоспособной.

ство узлов. Более широкие возможности имеет модифицированный стандарт FDDI-II, позволяющий использовать мультиплексный (аппаратный) синхронный способ коммутации данных. Не вдаваясь в детали обеих модификаций стандартов, рассмотрим более подробно, как можно увеличить скорость передачи и одновременно обойти такой недостаток исходной сети, как необходимость прохождения сигналов через все узлы. Для этого в [31] предлагается использовать топологию сети типа «лапша», что приводит к многокольцевым сетям с большим числом распределенных узлов. В результате пути прохождения пакетов минимизируются. На рис. 2 приведена сеть типа «лапша», содержащая 24 узла с параметрами $p = 2$ (количество входов/выходов) одного узла и $k = 3$ (количество колонок в сети). Соответствующая ей кольцевая сеть, содержащая шесть колец, показана на рис. 3.

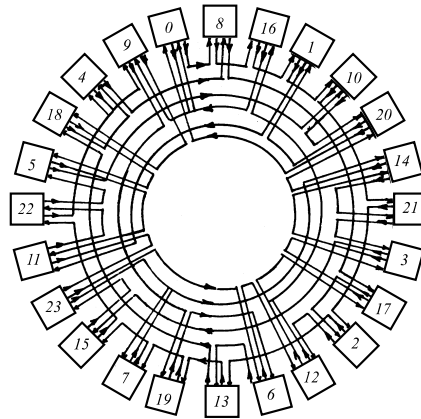


Рис. 3. Кольцевой аналог схемы, приведенной на рис. 2, для оптоволоконного канала

Видно, что каждый пакет в такой кольцевой сети проходит только три узла. В данной работе приводятся также формулы для расчета числа оптических колец в зависимости от параметров p и k и таблица с данными о пропускной способности кольцевых сетей в зависимости от параметров. Так, при $p = 2$ и $k = 3$ пропускная способность сети при скорости передачи 100 Мбит/с равна 1,47 Гбит/с, а при $p = k = 3$ пропускная способность составляет 6,82 Гбит/с. При этом количество колец равно 36, а количество узлов — 81.

4. СПОСОБЫ КОММУТАЦИИ ДАННЫХ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

Ниже в процессе рассмотрения методов передачи и коммутации данных в сетях мы будем пользоваться термином «цепочка» (circuit), который характеризует установление полного пути между двумя коммуникационными узлами. Путь существует между двумя узлами все время, пока идет обмен данными. Поскольку цепочка существует только в процессе обмена информацией между узлами и меняется циклически, то процесс коммутации протоколов, который имеет место в синхронных системах, будем называть цепочечным методом коммутации (circuit switching). Метод цепочечной коммутации ведет свое начало еще от традиционных телефонных коммутаторных станций.

Практика показала, что в вычислительной сети наиболее эффективным способом передачи сообщений является не передача типа «от точки к точке» большими блоками, а пересылка данных пакетами. Если сеть состоит из нескольких ЭВМ, то каждый пакет с определенной длиной в байтах должен,



Рис. 4. Применяемые методы коммутации данных в сетях: 1 — с пространственным разделением (передача «от точки к точке»); 2 — с временным разделением; 3 — синхронный с временными окнами; 4 — асинхронный с временными окнами; 5 — асинхронный; 6 — быстрый пакетный; 7 — блочный; 8 — пакетный способ в одной из первых сетей X.25

тационным сетям с общим управлением. Различные архитектурные концепции коммуникационных сетей даны в [33, 34]. Обзоры [35, 36] посвящены вопросам пакетного способа транспортировки и коммутации данных в сетях. Как видно из рис. 4 [37], известные методы цифровой коммутации разделены на два больших класса: цепочечная и пакетная, на одной из типов которой — асинхронной мы более подробно остановимся в следующем разделе. На рис. 5 приведен характерный пример цепочечной коммутации, состоящей из коммутаторной станции и нескольких телефонных абонентов [38]. Такая схема коммутации использовалась еще в старых коммутаторных станциях, где оператор вручную осуществлял одновременную и независимую связь между абонентами путем замыкания ключей, расположенных в узлах коммутаторной матрицы. Установленные таким способом пути прохождения речи являются независимыми друг от друга. Современный аналог такого коммутатора без блокировки может работать на частоте 100 МГц и более. Рассмотрим кратко особенности трех методов транспортировки и коммутации, получивших наиболее широкое применение (см. табл. 2) [39].

Синхронный способ передачи и коммутации информации. Этот метод передачи и коммутации данных прежде всего используется в тех сетях,

наряду с числовыми данными, содержать также информацию, определяющую адрес приемника (заголовок пакета). Использование пакетного способа передачи данных в вычислительных сетях имеет следующие особенности и преимущества:

- оптимизируется скорость передачи информации по каналу;
- не требуется большого количества дорогостоящих портов для ЭВМ, поскольку данные передаются по одному кабелю или по одной скрученной паре проводов.

История развития вычислительных сетей накопила широкий спектр методов транспортировки и коммутации данных. Этому вопросу посвящен ряд обзоров. В частности, в [32] приведена литература по многокаскадным комму-

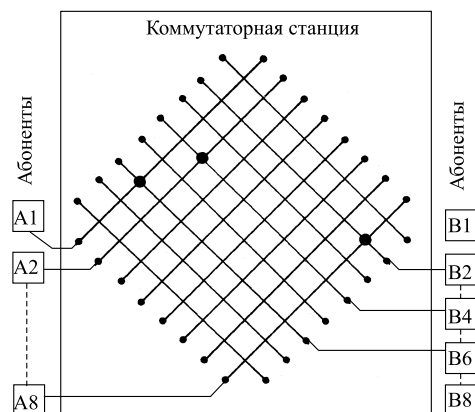


Рис. 5. Пример матричного коммутатора без блокировки на восемь входов/выходов с использованием цепочечной коммутации: A1 ÷ A8 — входы; B1 ÷ B8 — выходы. Показана одновременная связь абонентов A1–B6, A2–B4 и A8–B2

Таблица 2. Мультиплексные схемы коммутации и их модификации

| Способ мультиплексирования | Метод коммутации | Комментарии, область применения |
|--------------------------------|------------------|---|
| Синхронный с временными окнами | Циклический | Используется в телефонии, при побитной передаче с постоянной скоростью. Одинаковая пропускная способность для всех путей |
| Асинхронный | Пакетный | В сетях данных возможны заторы. Полоса пропускания регулируется в процессе коммутации. Возможна конкуренция между пакетами на коммутаторной станции |
| Специализированная связь | Блочный | Передача от «точки к точке». Эффективна при передаче данных большими блоками |

где передается речь. Наиболее известным стандартом синхронной телекоммуникационной системы является SONET (Synchronous Optical Network) и аналогичная по архитектуре и параметрам сеть SDH (Synchronous Digital Hierarchy) [40]. На стороне коммутаторной станции пакеты (блоки) коммутируются с помощью мультиплексора, который задает строго фиксированные временные циклически повторяющиеся окна. Данные и служебная информация передаются блоками определенной длины. Принцип цепочечной коммутации, применяемый при синхронном способе передачи, иллюстрируется с

помощью рис. 6. Слева на рисунке показаны входящие потоки информации (два входных линка), справа приведены два выходных линка. Блоки данных коммутируются с помощью входных и выходных мультиплексоров под управлением контроллера, который содержит таблицу соединений, приведенную ниже [39] (см. табл. 3), и определяет конфигурацию коммутатора для каждого временного окна.

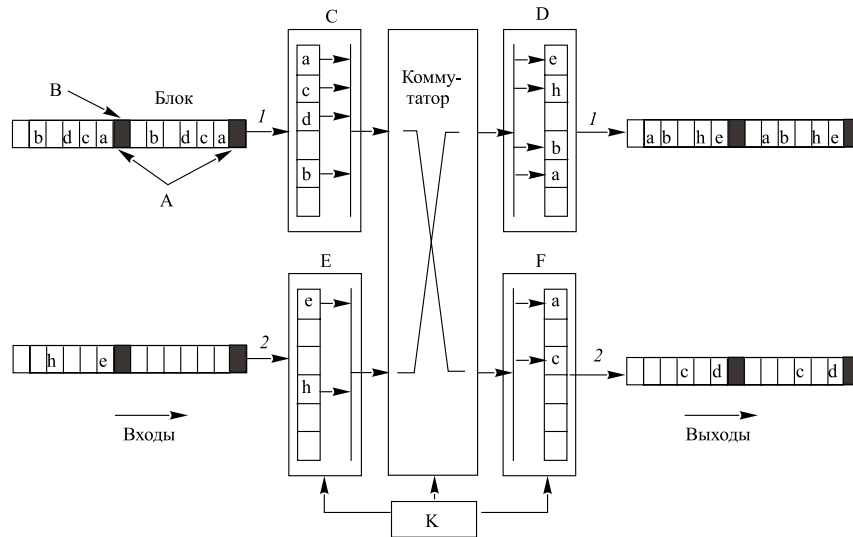


Рис. 6. Синхронный способ коммутации с временными окнами: К — контроллер, А — временной интервал; В — разделитель блоков; a, b, c, d, e, h — блоки данных; 1, 2 — входные/выходные порты; С, D, E и F — устройства для получения временных окон

Таблица 3. Таблица соединений

| Цепочка | Входы | Временное окно | Выходы | Временное окно |
|---------|-------|----------------|--------|----------------|
| a | 1 | 1 | 1 | 5 |
| c | 1 | 2 | 2 | 3 |
| d | 1 | 3 | 2 | 1 |
| b | 1 | 5 | 1 | 4 |
| e | 2 | 1 | 1 | 1 |
| f | 2 | 4 | 1 | 2 |

5. АТМ-СТАНДАРТ

Общая характеристика АТМ-технологии [41]. Одним из недостатков цепочечного синхронного и других способов коммутации, отмеченных выше, является то, что такая техника может использоваться для передачи данных, следующих с одинаковой скоростью, что приводит прежде всего к существенному снижению пропускной способности каналов. Такими данными могут быть телефонные, телевизионные и др., скорость передачи которых может меняться от 64 Кбит/с до 140 Мбит/с и более. Некоторые пакеты могут вообще не содержать никакой информации, а на коммутаторной станции в них выделяется временное окно. Кроме того, техника передачи информации достигла такого уровня, что использованные ранее способы передачи информации не удовлетворяют все возрастающим требованиям. Так, по оптоволоконному кабелю с использованием стандартных средств электроники можно передавать

до $2500 \cdot 10^6$ бит/с и поддерживать до 32000 телефонных вызовов и до 1000 цифровых телевизионных каналов. Современные лабораторные исследования показывают, что по оптическому волокну можно передавать до 10^{12} бит/с, применяя мультиплексную моду передачи данных с использованием нескольких несущих частот. Техника передачи данных с использованием витой пары проводов имеет скорость передачи до 100 Мбит/с в обычных локальных сетях. На рис. 7 приведен график, иллюстрирующий рост пропускной способности современных сетей и произ-

водительности микропроцессоров в МОПС (миллион операций в секунду). Видно, что производительность современных микропроцессоров адекватна скорости передачи данных по сетям.

В многочисленных публикациях отмечается, что в настоящее время и в ближайшие 10 лет наиболее эффективным способом передачи и коммутации данных, адекватным быстродействию микропроцессоров, является быстрый асинхронный пакетный способ передачи, или АТМ-способ. Две организации — ССИТ (Comite' Consultatif International de Te'le'graphie et Te'le'phonie) и ИТУ (International Telecommunicatios Union) — в 1990 г. [37] предложили АТМ-технология для телефонии. Затем АТМ-FORUM в 1991 г. предложил использовать эту технологию в вычислительных сетях [42]. Последние ново-

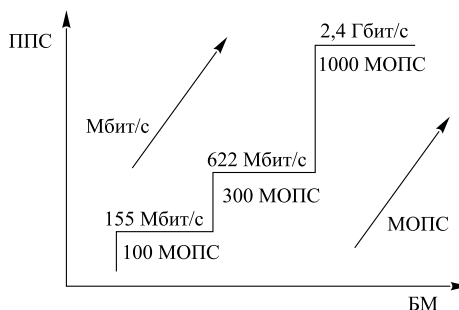


Рис. 7. Рост пропускной способности сетей и производительности микропроцессоров: ППС — полоса пропускания сетей; БМ — быстродействие микропроцессоров; МОПС — миллион операций в секунду

сти ATM-FORUM, касающиеся данного направления, можно найти в сети Internet [43]. В этой технологии использованы все лучшие достижения трех современных базовых технологий: полупроводниковой, волоконно-оптической и программного обеспечения, позволяющие существенно повысить пропускную способность сетей путем эффективного использования всех ресурсов сети всеми источниками информации. Асинхронным он называется потому, что производятся асинхронные операции между тактовыми импульсами источников данных и приемником данных. В отличие от других сетей, которые не могут расширяться не только по технологическим причинам, но и в силу архитектуры, ATM-сеть теоретически может расширяться до бесконечности.

ATM — это стандарт, разработанный для вычислительных и телекоммуникационных высокопроизводительных сетей, которые поддерживают мультимедиа и распределенные вычислительные сети и где информация представляется только в цифровой форме. Использование ATM-стандарта предполагает малую задержку, коммутацию пакетов практически без блокировки и работу с различными потребителями. ATM-технология позволяет довольно просто наращивать полосу пропускания и передавать по одной сети различную по своей природе информацию, такую как данные, видео, голос, графику, тексты и т. д. С целью достижения гибкости и высокой пропускной способности используется способ передачи информации с помощью небольших пакетов фиксированной длины, при котором данные передаются в сочетании со служебной информацией. Характерно, что путь, по которому передаются пакеты, является безадресным, так как они передаются по вычисленным на коммутаторной станции виртуальным путям, поскольку в заголовке указывается виртуальный маршрут. Применительно к ATM-технологии такие пакеты обычно называют ячейками (cells).

Сама по себе идея пакетного способа передачи данных использовалась еще в 60-х годах в сети типа X.25 [44]. Однако невысокая надежность используемых электронных компонентов сказывалась на надежности сети. В свою очередь, это приводило к необходимости усложнения протокола с целью обнаружения ошибок в информационных битах и необходимости контроля прохождения информации к приемнику данных путем отправки специального протокола. Кроме того, в некоторых сетях с пакетным способом передачи используется так называемый «datagram»-метод транспортировки пакетов, при котором каждый пакет посылается и принимается в соответствии с адресом конечной станции, содержащимся в пакете, независимо один от другого и без подтверждения доставки. Здесь мы имеем прямой аналог обычной почты. Другими словами, такой метод доставки пакетов называется «доставка без подтверждения соединения» (connectionless service).

В широкоизвестной ЛВС Ethernet в пакете переменной длины наряду с данными содержится также адрес источника и приемника информации. При этом не проверяется доступность устройства назначения, а просто посылается

пакет с информацией на общую магистраль. Все это в конечном итоге сказывается на пропускной способности сети в целом. Кроме того, пакеты имеют переменную длину и содержат адреса источников и приемников данных. При этом все устройства сети проверяют соответствие своего адреса и адреса назначения. В АТМ-сети используется принцип виртуального соединения, который заключается в том, что предварительно с помощью сигнального протокола конфигурируется по определенным правилам виртуальное соединение. Как только станция-источник определяет доступность станции-приемника, между ними устанавливается соединение. Современная технология позволяет установить такое соединение за весьма короткое время. Здесь уже мы имеем пример передачи цифровой информации, ориентированной на предварительное соединение (connection-oriented service). При такой связи гарантируется защита от несанкционированного подключения к данному каналу третьего абонента. В ряде работ [45–47] при пояснении принципа работы АТМ-сети проводится аналогия с работой обычной телефонной связи с передачей данных с помощью АТМ-сети. Вначале собеседники (конечные станции) должны зарегистрироваться, т. е. получить свои телефонные номера. Далее, для того, чтобы начать разговор, один собеседник должен позвонить другому. После этого сеть будет знать место расположения конечной станции и путь, по которому можно передавать информацию.

Протоколы АТМ-технологии. Рассмотрим кратко суть стандарта. Идея асинхронного способа передачи малыми пакетами фиксированной длины возникла в 1974 г. и использовалась в цифровой телефонной связи [48]. В настоящее время она применяется в сетях с высокой пропускной способностью типа ISDN и В-ISDN (Broad Integrated Digital Network — интегральная сеть с широкой пропускной способностью). Суть стандарта АТМ подробно изложена в [37, 49, 50], а также в серии статей [51–59]. Стандарт АТМ можно наглядно представить в виде модели [51], которая имеет некоторое сходство с OSI-моделью и содержит четыре платформы (рис. 8): пользовательскую — для передачи информации пользователя, контрольную — для обработки контрольной информации, платформу сетевого взаимодействия — для выполнения всех сетевых функций и платформу управления — для управления тремя предыдущими платформами. Все платформы АТМ-модели разделены на четыре уровня: физический

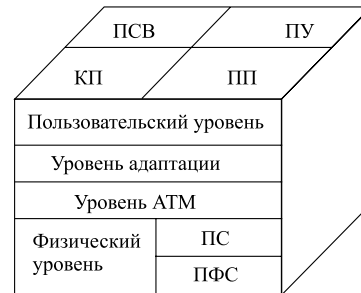


Рис. 8. АТМ-модель: ПП — пользовательская платформа; КП — контрольная платформа; ПСВ — платформа сетевого взаимодействия; ПУ — платформа управления; ПС — подуровень сходимости; ПФС — подуровень физической среды

уровень, ATM-уровень, уровень адаптации (AAL_n — ATM Adaption Layer, $n = 1 \div 5$ — индекс) и пользовательский уровень. Мы начнем с описания ATM-уровня, который является общим для всех потребителей и не зависит от физической среды передачи. Он отвечает за создание ATM-ячеек путем приема 48-байтных ячеек с уровня адаптации и добавляет 5-байтный заголовок

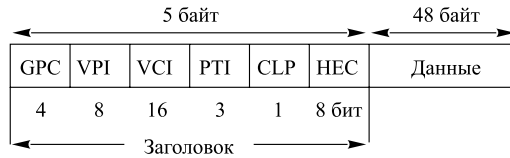


Рис. 9. Структура ячейки (данные и заголовок): GPC — резервные разряды; VPI — идентификатор виртуального пути; VCI — идентификатор виртуального канала; PTI — идентификатор информационной части ячейки; CLP — разряд для задания приоритета ячейки; HEC — синдром корректирующего кода

ются в качестве заголовка. Таким образом, для того чтобы уменьшить время прохождения через коммутаторную станцию, информационное поле ячейки выбрано относительно малым. Такой размер ячейки гарантирует, что она может быть скомутирована ATM-коммутатором за очень короткий промежуток времени. Кроме того, маленькие ячейки позволяют мультиплексировать данные, голос и видео в одном канале передачи. В свою очередь, три байта (24 бит), относящиеся к заголовку (VPI и VPC), представляют собой виртуальный адрес, с помощью которого на коммутаторной станции задается маршрут той или иной ячейки. Другими словами, маршрутизация осуществляется прежде всего с помощью заголовка ячейки. Такой процесс получил название автомаршрутизации (self-routing). Причем 16 бит виртуального заголовка (VCI) задают виртуальный канал (адрес от входной точки или линка к выходному линку коммутаторной станции). В свою очередь, 8 бит

[49, 50, 52]. Причем на этом уровне данные не обрабатываются, а передаются на выходные порты коммутаторной станции.

На рис. 9 приведен формат ATM-ячейки. Принято, что информация (речь, изображения и др.) передается с помощью малых ячеек с фиксированной длиной, содержащих 53 байт, среди которых 48 байт несут данные, которые надо передать через сеть, и 5 байт используются в качестве заголовка.

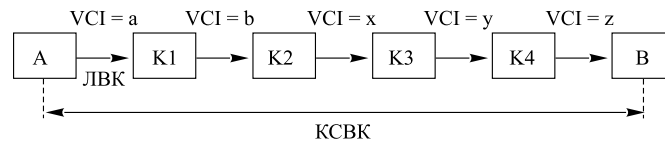


Рис. 10. Пример виртуального канала между конечными станциями А и В: $K1 \div K4$ — коммутаторы; ЛВК — связь (линк) виртуального канала; КСВК — конечный путь виртуального канала

заголовка (VPI) определяют виртуальный путь внутри коммутаторной станции. Такое разделение заголовка на две части — VCI и VPI — позволяет в случае необходимости группировать определенное количество виртуальных каналов, выполнять внутреннюю коммутацию отдельных каналов коммутаторной станции с целью получения общего виртуального пути в сети (рис. 10 и 11) (см. подробное описание ATM-стандарта в [49]).

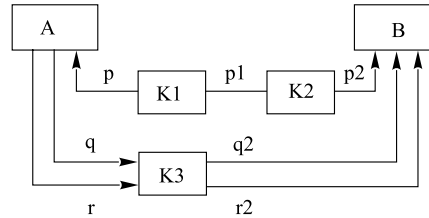


Рис. 11. Пример соединений виртуальных путей: p, p1, p2, q, q2, r, r2 — виртуальные пути; A и B — конечные станции; K1 ÷ K3 — коммутаторы

В процессе прохождения пакета на коммутаторной станции ему присваивается новый виртуальный адрес и т.д. (полагаем, что в сети имеется несколько коммутаторных станций, с помощью которых происходит передача ячеек от первоисточника к конечному потребителю). Важно отметить, что значения VCI и VPI в заголовке ячейки не являются ни адресом источника, ни адресом приемника информации. Они позволяют коммутатору задавать маршрут ячейки в сети и могут меняться на каждом коммутаторе ATM-сети. Другими словами, комбинация VPI/VCI является своего рода паспортом ATM-ячейки, с помощью которого она идентифицируется и передается через ATM-сеть в нужном направлении [53]. Тем самым дается ответ на вопрос: «Каким образом при ограниченных значениях VCI = 65536 и VPI = 256 можно поддерживать в сети бесконечное число устройств?»

В [54] детально рассматривается вопрос о том, каким образом комбинация VCI и VPI используется для идентификации различных соединений. Рассмотрим пример. На рис. 12 приведена блок-схема ATM-сети, состоящая из трех конечных станций КС1 ÷ КС3, которые одновременно являются источниками и приемниками данных, двух ATM-коммутаторов К1, К2, работа которых описывается с помощью соответствующих им таблиц соединений Т1, Т2. Конечные станции подключены в сеть с помощью интерфейсов потребителя ИП, причем станция КС1 посылает в сеть и принимает две различные по своему назначению задачи А и В, для которых установлены соединения со станциями КС1 и КС2 через коммутаторы К1 и К2 соответственно. И наоборот, станции КС2 и КС3 могут посылать данные на станцию КС1. Из рисунка видно, что у каждой задачи имеется свое соединение. Так, задача А на станции КС1 передает и посылает данные от задачи А на станции КС3 с помощью тех же значений VPI = 5 и VCI = 30. С другой стороны, задача А на станции КС3 передает и принимает данные от задачи А на станции КС1 через ту же самую пару VPI = 28 и VCI = 53. Причем величины VPI/VCI имеют только локальное значение и имеют смысл только для физически взаимосвязанных портов. Комбинация VPI = VCI создается интерфейсом пользователя

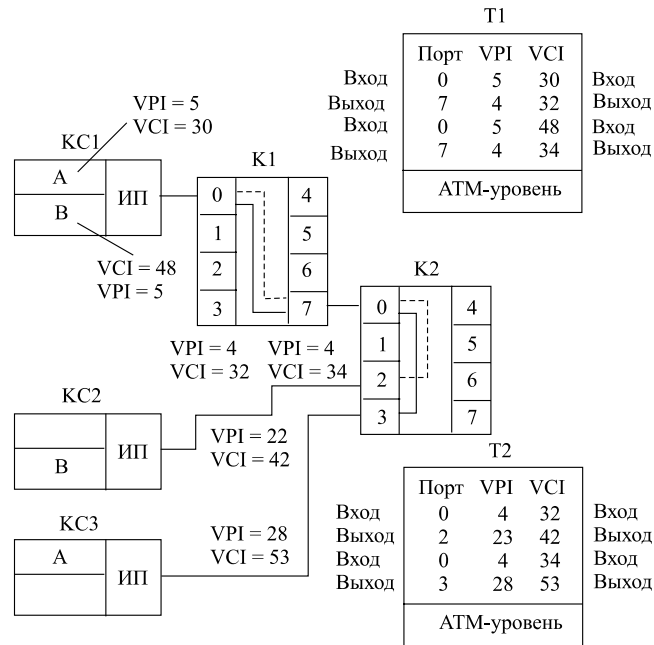


Рис. 12. Блок-схема, иллюстрирующая взаимодействие трех конечных станций КС1 ÷ КС3 в АТМ-сети: К1, К2 — коммутаторные станции; Т1, Т2 — таблицы виртуальных соединений; А, В — источники взаимодействия (задачи)

и коммутатором. Критерием для их выбора является следующий свободный путь и следующий свободный канал, что является следствием того, что коммутация данных в АТМ-коммутаторе носит статистический характер. Если учесть, что один виртуальный путь может содержать до 2^{16} виртуальных каналов и любая конечная станция — до 2^8 виртуальных путей, то получается, что любая КС может поддерживать одновременно (естественно, с учетом статистического временного мультиплексирования) 16 777 216 соединений через один порт, поскольку каждый из них в сети имеет один и тот же набор значений VPI/VCI. В используемых в АТМ-технологии коммутаторах каждый порт работает параллельно и независимо от другого.

Обращаясь к рис. 9, мы видим, что один бит заголовка CLK предназначен для задания приоритета сообщения и используется в процессе появления переполнения на коммутаторной станции. Другими словами, приоритетный бит определяет, какую из ячеек пропустить в случае возникновения затора. Для повышения достоверности передачи ячейки в заголовке выделено 8 бит для синдрома циклического корректирующего кода с целью коррекции и

обнаружения ошибок (НЕС). В то же время информационная часть пакета не защищена от ошибок, поскольку предполагается, что вероятность потери ячейки с учетом качества современной полупроводниковой технологии составляет 10^{-8} – 10^{-12} . Кроме того, в АТМ-сети отсутствует контроль прохождения и получения данных. Хотя и с малой вероятностью, в АТМ-сети возможны три вида ошибок: ошибки в отдельных разрядах, потеря ячейки вследствие ошибок в заголовке и потеря в процессе ввода ячейки в буферную память на коммутаторной станции, что является одним из серьезных недостатков данного стандарта. Три бита (PTI) используются для идентификации информационной части ячейки. Назначение четырех бит GPC еще полностью не определено и они могут использоваться факультативно. Таким образом, функции заголовка ячейки строго ограничены, что позволяет коммутаторной станции быстро мультиплексировать различные пути прохождения ячеек.

АТМ-ячейки поступают на входы коммутаторной станции в произвольные моменты времени (динамически) и коммутируются с помощью сигнального протокола, хранящегося в памяти коммутатора. При этом выходной ячейке присваивается новый виртуальный заголовок. В сложной сети ячейка может получать поочередно несколько виртуальных адресов. Свободные связи могут быть использованы для передачи других ячеек, что приводит к эффективному использованию ресурсов коммутаторной станции. Одним из преимуществ АТМ-способа передачи, что делает его конкурентоспособным и перспективным, является его расширяемость и возможность создавать гибкие сети для передачи различной по своей природе информации с высокой пропускной способностью. Основными недостатками АТМ-способа коммутации по сравнению с другими методами являются возможность появления заторов в коммутаторной станции и более сложная схема коммутации. Заторы могут возникать в том случае, когда, вследствие статистического характера поступления ячеек, скорость поступления пакетов превышает агрегатную скорость коммутаторной станции. Обычно заторы исключаются путем использования буферных ЗУ на входах/выходах коммутаторных станций.

Таблица 4. Таблица соединений

| Связи | Входы | VCI | Выходы | VCI |
|-------|-------|-----|--------|-----|
| A | 1 | a | 1 | u |
| B | 1 | b | 2 | v |
| C | 1 | c | 2 | x |
| D | 2 | d | 1 | y |
| E | 2 | d | 1 | z |

С помощью табл. 4 и рис. 13 иллюстрируется принцип коммутации ячеек с помощью АТМ-коммутатора [39]. Ячейки коммутируются между входными

и выходными портами коммутаторной станции с помощью виртуального индикатора связи (VPI/VCI), который содержится в заголовке пакета. Коммутаторная станция содержит таблицу соединений, с помощью которой пакет коммутируется на выходной порт. Кроме того, выходной ячейке с помощью контроллера присваивается новое значение VPI/VCI, если это необходимо.

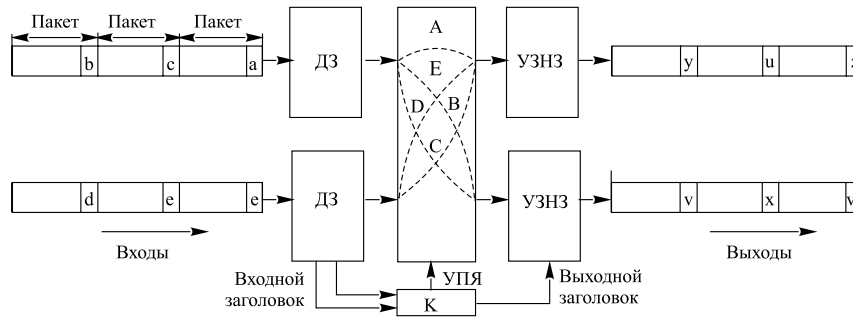


Рис. 13. Пример асинхронного способа коммутации ячеек: а, b, с, d, е — заголовки входных ячеек; ДЗ — дешифратор заголовка; К — контроллер; УЗНЗ — устройство занесения новых заголовков; u, v, x, y, z — заголовки выходных пакетов данных; А, В, С, D, Е — виртуальные каналы; УПЯ — установка пути ячейки

В зависимости от способа, посредством которого устанавливаются таблицы соединений в АТМ-коммутаторе, возможны два основных типа соединений [54]: постоянные виртуальные соединения, задаваемые вручную, и коммутируемые соединения, устанавливаемые автоматически посредством протокола сигнализации, который посылается в конечное устройство, требующее установить соединение. В каждом АТМ-коммутаторе должен содержаться процессор сигнализации и управления запросами, с помощью которого устанавливаются соединения вдоль всей цепочки от станции-источника до станции-приемника. В свою очередь, станция-приемник может отклонить или принять запрос на соединение. Для сигнального протокола установлены фиксированные значения $VPI = 0$ и $VCI = 5$, с помощью которых резервируется трафик (канал) для протокола сигнализации. После установления соединения по этому же трафику будут поступать все информационные ячейки. Все VCI со значением менее 32 зарезервированы для различных целей управления.

Как отмечается в [55], вопрос о том, к какому из семи уровней OSI-модели следует относить АТМ-уровень, остается открытым. По мнению одних специалистов, АТМ-уровень занимает протокол второго (канального) уровня OSI-модели. Другие специалисты отмечают, что АТМ-уровень обладает в большинстве своем характеристиками третьего, сетевого, уровня, такого как IP (Internet Protocol), о чем свидетельствует большая сложность процедур

адресации и маршрутизации, которые не зависят от того, работают ли другие протоколы сетевого уровня через АТМ-сеть или нет. В данной работе обсуждаются также протоколы маршрутизации АТМ для сигнальных запросов через узлы коммутации сети. На рис. 14 приведена схема прохождения информации с высших уровней через АТМ-модель после установки предварительного соединения [53]. К пользовательским данным размером 1024 байт добавляются ТСР/ІР-заголовки, в результате чего получается ІР-пакет длиной 1072 байт. Далее подуровень сходимости уровня адаптации ААL5 подготавливает ІР-пакет к сегментации. При этом добавляется контрольная информация. С помощью подуровня сегментации формируются АТМ-ячейки. От уровня АТМ ячейки поступают на физический уровень.

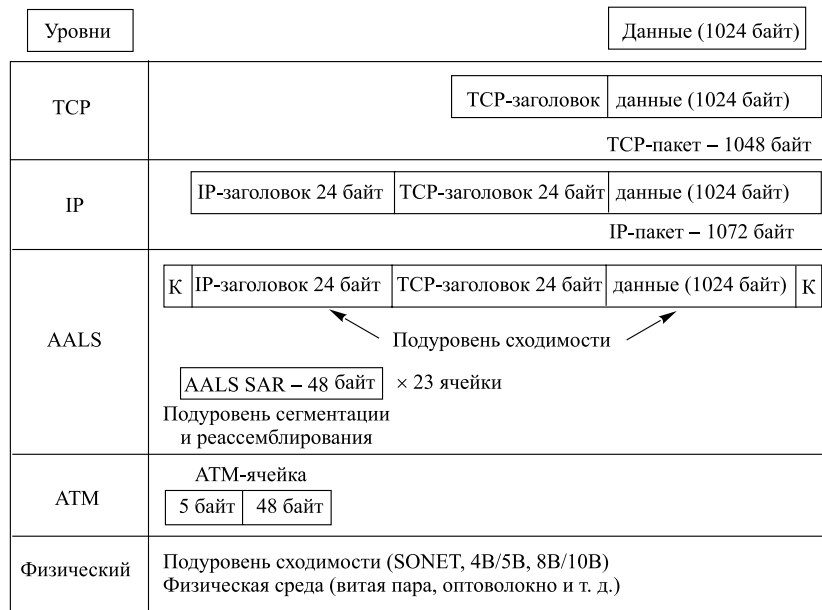


Рис. 14. Схема прохождения информации с высших уровней через АТМ-модель: К — контрольные разряды; ІР — Интернет-протокол; ТСР — протокол контроля перехода (Transition Control Protocol); SAR — процесс сегментации, асемблирования и реасемблирования пакетов в ячейки, и наоборот; 4В/5В и 8В/10В — процесс преобразования последовательных кодов: 4 бит в 5 бит и 8 бит в 10 бит

Физический уровень АТМ-модели. Физический уровень отвечает за передачу ячеек через среду передачи. Вообще говоря, в документах не предусмотрен стандарт на физическую среду. Есть некоторые рекомендации, определяющие тип физической среды, по которой происходит передача ячеек. Она

состоит из двух подуровней. Первый подуровень определяет скорость передачи, которая может составлять 155 Мбит/с, 622 Мбит/с и 2,5 Гбит/с. В свою очередь, второй подуровень стандарта АТМ задает физическую среду, с помощью которой выполняется побитовая передача. Определены также временные параметры. Предпочтение отдается стандартному синхронному оптическому каналу SONET/SDH [40], рекомендуемому для применения в качестве одного из интерфейсов, который может быть использован в локальных и глобальных сетях.

Уровень адаптации. Уровень адаптации обеспечивает доступ информации пользователя к коммутаторам АТМ и определяет, каким образом он настраивается на конкретные применения, связанные с временными параметрами: постоянная или переменная скорость передачи (например, видеoinформация), есть ли необходимость в реальном времени или нет, и т. д. [49, 50, 52]. Всего на данном уровне имеется пять модификаций протокола AAL1–AAL5. Для передачи данных целыми блоками, состоящими из АТМ-ячеек без заголовка, используется протокол AAL5. При этом ячейки емкостью 48 байт могут передаваться блоками емкостью до 64 Кбайт. В свою очередь, AAL-уровень разбит еще на два подуровня: один обеспечивает разборку и сборку больших пакетов в ячейки, а второй — синхронизацию для различных типов информации. Суть уровня адаптации подробно описана в [52].

Состав аппаратуры. На рис. 15 приведена структурная схема типичной ЛВС, в которой используется АТМ-стандарт. Она состоит из восьми рабочих станций (персональных ЭВМ — конечных станций (КС)) и двух АТМ-коммутаторов [56]. Каждая АТМ-

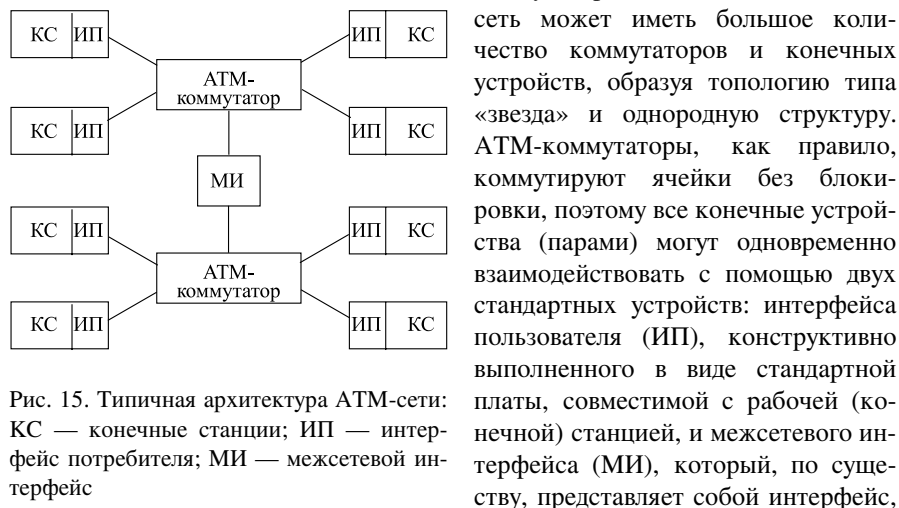


Рис. 15. Типичная архитектура АТМ-сети: КС — конечные станции; ИП — интерфейс потребителя; МИ — межсетевой интерфейс

соединяющий два коммутатора. Как видно из рис. 15, интерфейсы пользователей — это те места, где заканчивается сеть. В процессе передачи данных

участвуют только источник данных, коммутаторы, которые располагаются в узлах сети, и приемник данных. Формы ячеек для названных интерфейсов имеют некоторые отличия. Это касается первых четырех бит GPI, которые в ячейках МИ используются для расширения поля виртуального пути VPI. Кроме стандартного ИП в сети могут использоваться интерфейсы для подключения ЛВС типа Ethernet, оптоволоконный интерфейс и др. или ИП с мультиплексорами для подключения нескольких ЛВС к магистральной ATM-сети.

В [57–59] рассматриваются вопросы механизма взаимодействия и принципы адресации и сигнализации в сетях ATM. Так, запрос на соединение от конечной станции-источника распространяется через сеть до тех пор, пока не установится связь, о чем станция-получатель посылает ответное сообщение, если она свободна. Описывается также протокол проверки состояния топологии сети — P-NNI.

Качество обслуживания и вопросы надежности. В соответствии со стандартом коды, исправляющие ошибки в ATM-технологии, используются в заголовке ячейки и в протоколе ALL5 (общая проверка на весь блок ячеек). Надежность ATM-сети обусловлена прежде всего высоким уровнем современной компьютерной технологии. Определенный вид ошибок может возникать из-за пиковых нагрузок на ATM-коммутаторах, что является следствием того, что все потребители ATM-сети могут пользоваться одновременно всеми ресурсами. При пиковых нагрузках могут возникать потери ячеек. Однако вероятность потери ячейки весьма мала и составляет от 10^{-8} до 10^{-12} .

В ATM-технологии, в отличие от оптоволоконного интерфейса, отсутствует дублирование физических связей. Как показано в [60–62], в ATM-сети допускаются обрывы физических каналов без нарушения работоспособности сети. Это качество достигается за счет свойств ATM-коммутаторов и его необходимо учитывать в процессе проектирования ATM-сети. Как следует из рис. 16, в случае обрыва кабеля В нарушается связь между коммутаторами К1 и К4. Однако за счет связей между коммутаторами К1 и К2 или К3 и К4 (жирные линии) система будет работать корректно. Аналогично проблема решается в традиционных ЛВС, подключаемых к ATM-сетям [62].

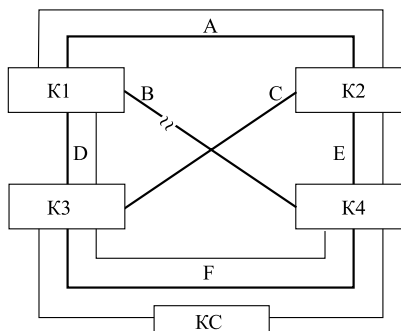


Рис. 16. Блок-схема ATM-сети с коррекцией повреждений в линиях связи или в коммутаторах: К1 ÷ К4 — коммутаторы; КС — конечная станция; А, В, С, D, E, F — запасные соединения. Тонкими линиями показаны основные соединения

ATM FORUM определил три негативных параметра, характеризующих качество обслуживания QoS (Quality of Service): задержка в передаче ячейки, вариация в задержке ячейки и отношение потерянных ячеек к переданным. Задержка в передаче ячейки определяется как время передачи между окончательными устройствами, ведущими диалог. Данный параметр зависит от скорости передачи и времени простоя в очередях на входах/выходах коммутатора. Вариация задержки ячейки является функцией задержки мультиплексирования при коммутации ячейки от входа ATM-коммутатора на один выход и вариации задержки в очередях на его входах и выходах. Что касается третьего параметра, то он зависит от работы алгоритма, устраняющего заторы в коммутаторе. Более детально эти вопросы изложены в [63].

6. КОММУТАТОРНЫЕ СТАНЦИИ И КОММУТАТОРЫ ДЛЯ АТМ-СПОСОБА ПЕРЕДАЧИ

Коммутаторные станции (switch fabric). Коммутаторные станции представляют собой аппаратные сети, предназначенные для параллельной передачи данных от N входов на M выходов. Коммутаторные станции применительно к АТМ-способу передачи являются довольно сложными устройствами, основу которых составляют параллельные коммутаторы. Основные требования к коммутаторным станциям заключаются в следующем.

1) Агрегатная, т.е. суммарная, пропускная способность должна составлять десятки и более Гбит/с.

2) Большое количество входов/выходов (свыше 16).

3) Возможность коммутации данных в обоих направлениях.

4) Расширяемость по числу входов/выходов.

5) Возможность быстрого прохождения ячеек в случае возникновения заторов.

6) Архитектура коммутаторных станций должна обеспечивать режим выравнивания частоты поступления ячеек в экстремальных условиях.

С учетом неравномерного поступления ячеек в АТМ-коммутаторах возникают два типа блокировок: блокировка на выходах и блокировка на входах. Первый тип блокировки появляется в тех случаях, когда совпадают хотя бы два адреса приемников данных. В этом случае ячейки будут проходить одни и те же пути и поэтому в конце концов встретятся. Такая блокировка может быть устранена путем установки очередей на выходах с помощью специальной схемы и использования буферных запоминающих устройств. Внутренняя блокировка может возникнуть в тех случаях, когда пути хотя бы двух ячеек пересекутся внутри коммутатора. Избежать таких блокировок можно путем применения специализированного процессора на входах коммутатор-

ной станции. Однако в любом случае это приводит к уменьшению пропускной способности коммутаторной станции.

В доступной литературе одна из коммутаторных станций, разработанная фирмой ALKATEL, описана в [64, 65]. Она состоит из двух функциональных блоков, построенных по модульному принципу, — входного и выходного. Входной блок состоит из 128 модулей-терминаторов, обеспечивающих прием, передачу и обработку ячеек, и параллельных 128×128 -коммутаторов, которые обеспечивают коммутацию данных, поступающих со скоростью 155 Мбит/с на каждый из входов. Таким образом, агрегатная полоса пропускания станции составляет 155×128 , т. е. свыше 100 Гбит/с. Между входными и выходными блоками имеются еще два блока коммутаторов, созданных на основе однокристалльных параллельных 32×32 -коммутаторов с возможностью наращивания числа входов/выходов. Помимо обычного режима работы, обеспечивающего параллельную коммутацию пакетов (в общем случае и с разной задержкой от канала к каналу), имеется также возможность в случае необходимости коммутировать данные «от одного на все» (радиовещательный режим) или любую комбинацию из n входов на n выходов. Входы и выходы АТМ-коммутатора обеспечивают преобразование входного последовательного кода в 8-разрядный параллельный код и наоборот. Основной принцип работы коммутаторной станции в процессе обработки входной ячейки образно сравнивается с продвижением земляного червя сквозь рыхлую почву, когда после прохождения определенного слоя земли, равного длине червя, входное отверстие закрывается. В зависимости от значения заголовка и другой служебной информации входная ячейка передается на три различных направления. Для обеспечения режима состязания между ячейками и установки очередей между ними имеется блок памяти емкостью 2 Кбайт. В качестве временной памяти нередко используют сдвиговые регистры, обеспечивающие малое время доступа.

Архитектура параллельных коммутаторов. Как уже отмечалось выше, параллельные (комбинаторные [68]) коммутаторы являются основной частью коммутаторных станций. Коммутировать ячейки можно, используя общую шину, матричные коммутаторы (crossbar switches), коммуникационные сети, создаваемые на базе 2×2 -коммутаторов, и так называемые коммутаторы с перекрестными связями (crosspoint switches) [66]. Последний тип коммутаторов создается на основе мультиплексоров, они имеют наименьшую задержку по сравнению с вышеупомянутыми типами коммутаторов. Общая шина не подходит для коммутации данных в АТМ-сетях в силу ограниченности подключаемых к ней объектов и малого быстродействия, поскольку невозможно одновременно коммутировать несколько каналов. Поэтому более перспективными являются последние три типа параллельных коммутаторов, архитектура которых будет рассмотрена на конкретных примерах. Историческим прототипом матричного коммутатора является коммутатор телефонной станции, где

оператор вручную осуществлял связи между абонентами. Применение находят также матричные коммутаторы, выполняемые по технологии перепрограммируемых логических матриц [67]. В узлах матрицы расположены логические ячейки и триггеры. Матрица имеет 48 входных и 48 выходных портов. Путем программирования соединений и занесения данных в соответствующие ячейки можно быстро менять выполняемые функции матричного коммутатора. Первая версия устройства работает с частотой 100 МГц. Наличие на кристалле банка памяти, состоящей из программируемых триггеров, позволяет реализовать контроль за правильностью работы коммутатора с помощью стандартного протокола последовательного типа, специально предназначенного для контроля больших интегральных микросхем. В матричных коммутаторах входной сигнал, в зависимости от позиции коммутируемого элемента, может проходить все логические элементы, расположенные в строках (столбцах) матрицы, и поэтому быстродействие коммутатора уменьшается с ростом числа его входов/выходов (см. рис. 5).

Коммутаторы и сети, создаваемые на базе 2×2 -переключателей, рассмотрены в обзорах [34, 35, 66]. Как отмечается в [66], для коммутации АТМ-ячеек можно использовать многокаскадные коммутаторы типа «баньян», «дельта» и «сеть Клоза», создаваемые на основе 2×2 -коммутаторов и обладающие свойствами автомаршрутизации. Практически это означает, что нет необходимости в общем контроллере для управления прохождением ячеек от входов на выходы, поскольку каждая ячейка коммутатора управляется одним битом адреса приемника. В свою очередь, такая архитектура коммутаторов обеспечивает их высокое быстродействие. Однако задержка в таких устройствах растет с увеличением числа входов/выходов коммутатора [34, 35].

На рис. 17 приведена блок-схема 32×32 -коммутатора направления типа «crosspoint», выполненного в виде большой интегральной микросхемы [66]. Такой коммутатор может быть использован для одновременной коммутации 32 одноразрядных слов на 32 направления. Применение такого коммутатора в АТМ-сетях, где данные передаются в виде последовательного кода, позволяет использовать для передачи информации с 32 на 32 направления одновременно. Модуль состоит из 32 мультиплексоров и двух конфигурационных регистров, позволяющих создавать различные режимы работы коммутатора и, в частности, радиовещательный режим. Видно, что задержка в таком коммутаторе практически не зависит от количества входов/выходов.

Описанный в [68, 69] метод построения параллельных коммутаторов имеет ряд принципиальных отличий от известных. Прежде всего данные не переключаются со входов на выходы, а преобразуются в кодовые слова других кодов, над которыми выполняются логические операции, например совпадение. Поэтому не требуется формирования адресов передатчиков, а адреса приемников получаются в результате выполнения простых логических операций. Кроме того, предлагаемые коммутаторы обладают корректирующими

свойствами. В качестве корректирующих кодов используются коды Адамара [68] и БЧХ-коды [69].

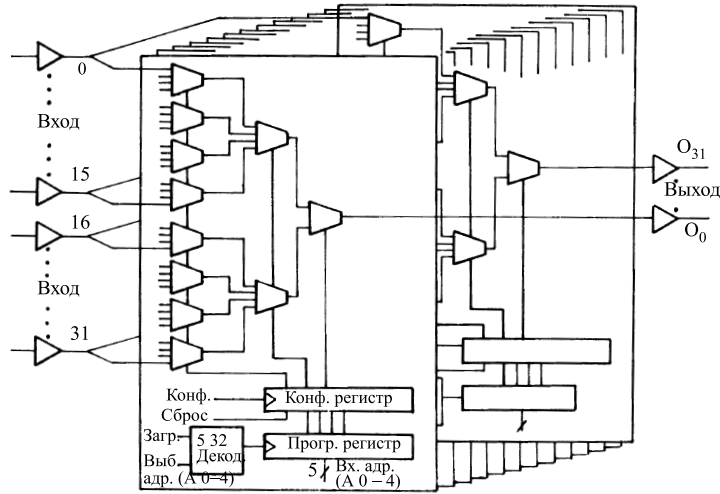


Рис. 17. Блок-схема одноразрядного 32×32 -коммутатора типа «crosspoint»: Конф. — вход конфигурационного регистра; Загр. — загрузка; Выб. — выборка; Декод. — дешифратор; Конф. регистр — конфигурационный регистр; Прогр. — программный регистр; Вх. адр. — входы для кодов адресов; Выб. адр. — выборка адреса

Применение искусственных нейронных сетей. В течение последних десяти лет существенно возрос интерес к нейронным сетям и их практическому применению (см. обзоры [70, 71]). Самый совершенный компьютер трудно сравнить с человеческим мозгом, отнюдь не только потому, что он содержит гигантское количество (хотя и весьма медленных) логических ячеек-нейронов. Принципиальное отличие прежде всего состоит в типе выполняемой логики, высокой степени параллелизма и связности между нейронами. Кроме того, данные в нейронных сетях, как в естественных, так и в искусственных, не содержатся в отдельном блоке памяти, как в обычном компьютере. Они распределены, запоминаются и содержатся в весах. Поэтому в нейронных сетях не возникает проблема коммутации информации, поскольку эта функция совмещена с вычислениями. В то же время ряд отмеченных нейронных сетей может быть использован для оптимизации задач, связанных с управлением объектами.

Так, в [72–74] предлагается применить нейронную сеть типа Хопфильда для управления коммутатором типа «баньян». С этой целью разработан кон-

троллер, выполненный в виде интегральной микросхемы и содержащий 8×8 нейронную сеть. Показано, каким образом можно использовать нейронную сеть для управления коммутаторами на большое число входов-выходов. Проблема оптимизации пропускной способности коммутатора типа «баньян» иллюстрируется с помощью рис. 18. На рисунке показано, каким образом запросы на обслуживание входных пакетов с помощью $N \times N$ матричного коммутатора могут быть представлены в виде $N \times N$ двоичной входной матрицы запросов (ВМЗ) r ($N = 4$):

$$r = \begin{pmatrix} 0110 \\ 0001 \\ 0000 \\ 1001 \end{pmatrix}, \quad c_1 = \begin{pmatrix} 0100 \\ 0001 \\ 0000 \\ 1000 \end{pmatrix}, \quad c_2 = \begin{pmatrix} 0010 \\ 0001 \\ 0000 \\ 1000 \end{pmatrix}.$$

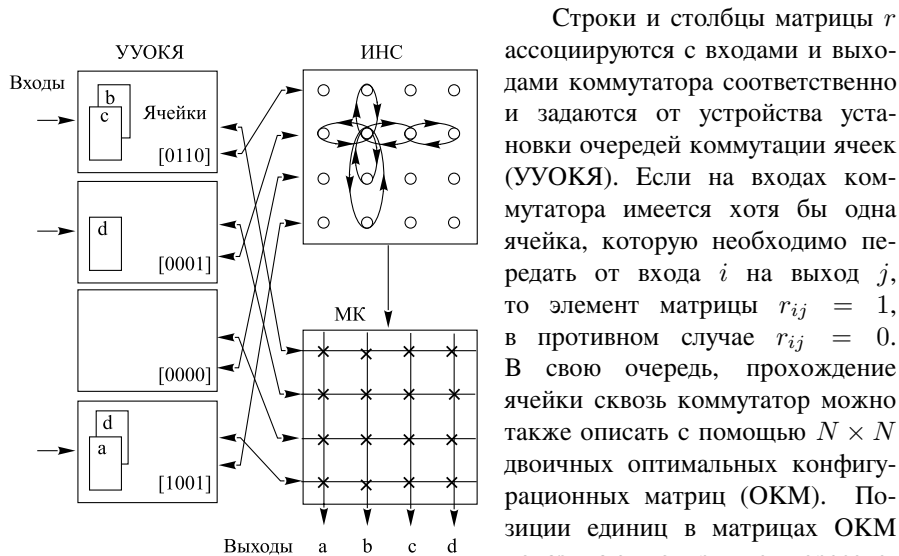


Рис. 18. Блок-схема контроллера на основе искусственной нейронной сети: УУОКЯ — устройство установки очередей коммутации ячеек; ИНС — искусственная нейронная сеть; МК — матричный коммутатор; a, b, c, d — пакеты данных

Строки и столбцы матрицы r ассоциируются с входами и выходами коммутатора соответственно и задаются от устройства установки очередей коммутации ячеек (УУОКЯ). Если на входах коммутатора имеется хотя бы одна ячейка, которую необходимо передать от входа i на выход j , то элемент матрицы $r_{ij} = 1$, в противном случае $r_{ij} = 0$. В свою очередь, прохождение ячейки сквозь коммутатор можно также описать с помощью $N \times N$ двоичных оптимальных конфигурационных матриц (ОКМ). Позиции единиц в матрицах ОКМ показывают «открытые» пересечения, т.е. $c_{ij} = 1$, и закрытые, если $c_{ij} = 0$. Таким образом, проблема нахождения оптимальных маршрутов и, соответственно, увеличение пропускной способности коммутатора сводится к нахождению оптимальных конфигурационных матриц.

Эти матрицы, как это следует из рис. 18, при наложении друг на друга дают исходную матрицу запросов. Функции нейронной сети совместно с УУОКЯ сводятся к вычислению оптимальной конфигурационной

матрицы. Причем для построения нейронной сети используются специальные ячейки-нейроны. Основное свойство такой нейронной сети состоит в том, что после включения напряжения питания в результате состязательности только один нейрон остается включенным, что обеспечивает активацию только одного выхода нейронной сети.

Коммерческие разработки. В [66, 75] приведен обзор, посвященный первому поколению разработок параллельных коммутаторов, выполненных в виде БИС. Параметры некоторых из них приведены в табл. 5 [75].

Таблица 5. Параметры некоторых БИС для АТМ-способа коммутации

| Фирма | Устройство | АТМ-функции | Комментарии Цена |
|--------------------------|---|--|--|
| «AT&T» | Phoenix T7650. Коммутируемая 2×2 матрица типа «cross-point» | Автомаршрутизация. Каскадируемый. Полоса пропускания 320 Мбит/с | Используется в небольших коммутаторных станциях. \$ 25 |
| «Fujitsu» | MB86680. 4 × 4 с автомаршрут. | Каскадируемый до 32 × 32. Полоса пропускания 155 Мбит/с | \$ 70 |
| «IBM» | Prizma. 16 × 16 направлений | 400 Мбит/с на один порт с памятью. Имеется буферное ЗУ. Каскадируемый. Радиовещательный режим. Автомаршрут. АПС = 6,4 Гбит/с | 4 · 10 ⁶ транзисторов. 472 вывода |
| «IGT» | WAC-188A. 8 × 8 направлений | Полоса пропускания 155 Мбит/с на один порт. Имеется общая память и память типа FIFO на выходных каналах. Контроль заторов. Каскадируемый. Обеспечивает пять уровней приоритета | \$ 76 |
| «TriQuint Semiconductor» | TQ801. 16 × 16 типа «crosspoint» | АПС 1,2 Гбит/с. Имеется оптический канал. Возможны конфигурации типа «сеть Клоза» и «дельта» | \$ 100 |

Примечание. АПС — агрегатная пропускная способность. IGT — Integrated Telecom Technology.

В [8] отмечается, что в связи с тем, что уже действует множество сетей, имеющих различные стандарты, в сложившейся ситуации представляется целесообразным разрабатывать и использовать разные по классу коммутаторы и другое сетевое оборудование. По этому признаку выделяются четыре класса АТМ-коммутаторов.

- Коммутаторы ячеек для настольных систем (desktop switch). Как правило, они имеют фиксированную архитектуру. Шасси имеет один-два быстрых порта, которые предназначены для прямого включения в ЛВС персональных компьютеров.
- Коммутаторы ячеек для рабочих групп (workgroup switch). Характеризуются, как правило, архитектурой с фиксированным количеством портов для сегментов и узлов. Некоторые устройства имеют встроенные маршрутизаторы.
- Магистральные коммутаторные станции масштаба глобальной сети (backbone switch). В коммутаторах данного класса встроены маршрутизаторы протоколов сети Internet и средства построения виртуальных сетей.

Наряду с АТМ-коммутаторными станциями ряд фирм выпускают также гибридные станции. Так, разработка [76] имеет четыре порта для сети Token Ring, 16 портов для сети Ethernet и два порта для АТМ-сети. Для мониторингирования АТМ-сети фирма «Hewlett Packard» разработала анализатор HPE5200A.

В [77] приводится сводная таблица, содержащая параметры аппаратуры, выпускаемые фирмой «Cisco Systems», для АТМ-сетей. Класс коммутаторов включает в себя коммутаторы для рабочих групп, коммутаторы сети предприятия и коммутаторы корпоративной сети.

7. АТМ-ТЕХНОЛОГИЯ И ЛОКАЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Эмуляция ЛВС в АТМ-сеть. Эмуляция ЛВС является эффективным средством подключения локальной сети к сети, выполненной в АТМ-стандарте. При этом решаются две задачи: создание и подключения уже существующих сетей через коммутатор к АТМ-сети. Например, такие стандартные сети с принципиально иным способом передачи протоколов как Ethernet, находящиеся в одном подразделении, могут обмениваться данными с серверами АТМ-сети, расположенной в другом здании. При этом все пользовательские программы сохраняются. С этой целью АТМ FORUM в 1995 г. рекомендовал стандартную систему эмуляции LANE (Local Area Network Emulation) [50], которая состоит из двух компонентов: LEC (Lan Emulation Client) и LES (Lan Emulation Servers). LANE-клиенты — это подключенные к сети АТМ мосты, коммутаторы, маршрутизаторы и компьютеры на рабочих местах [78]. Их функции заключаются в том, чтобы транслировать пакеты в ячейки, и наоборот, и создавать виртуальные соединения. LANE-сервисы находятся в сети на выделенных серверах и на подключенных к рабочим группам устройствах в эмулируемых ЛВС. Они помогают LANE-клиентам транслировать адреса и создавать широковещательный режим. В [79, 80] приводятся блок-схемы

подключения ЛВС, выполненных в стандартах Ethernet, и оптоволоконного интерфейса к сети, выполненной в стандарте АТМ.

Виртуальные ЛВС. Коммутируемая технология очень эффективно используется для построения виртуальных ЛВС [81–83]. Суть виртуальных ЛВС заключается в том, что сегменты ЛВС объединяются не по территориальному, а по логическому принципу, т. е. на основе общих интересов пользователей, расположенных на различных этажах или в различных зданиях. Помимо этого создание виртуальных ЛВС позволяет решать следующие задачи:

- выделение сегментов, работающих с конфиденциальными данными;
- увеличение пропускной способности ЛВС;
- эффективное решение проблемы изменений в сети, так как изменения в размещении потребителей осуществляются с помощью подключения станции к порту ближайшего коммутатора и настройки этого порта на соответствующую виртуальную ЛВС [81].

Основой виртуальных сетей служат конфигурируемые коммутаторы. Используемые схемы для создания виртуальных сетей описаны в [82, 83]. Наиболее эффективно виртуальные ЛВС реализуются с помощью АТМ-коммутаторов.

Сетевая мультимедиа и видеоконференции. Развитие коммутируемой технологии существенно сказывается на качестве передачи комплексной информации, которая получила название «мультимедиа». Мультимедиа представляет собой бурно развивающееся направление, включающее обслуживание экономики, потребителей электронных систем, кабельное телевидение, образование, вычислительную технику и телекоммуникационные системы. Значительная часть информации в мультимедиа передается в цифровой форме. И эта тенденция будет возрастать в будущем. По определению [84] цифровая мультимедиа представляет собой направление в технике вычислительных сетей, в которой под управлением ЭВМ передаются и обрабатываются в цифровой форме текстовая, графическая информация, различного рода образы и др. Для передачи речи скорость данных может варьироваться в пределах от 5–7 (невысокое качество речи) до 32–64 Кбит/с для качественной телефонной связи и вплоть до 250 Кбит/с, если требуется весьма высокое качество передачи голоса. Для передачи изображений в зависимости от качества требуются скорости передачи от 64 Кбит/с до 4–7 Мбит/с. Наряду с таким качеством, как универсальность представляемой информации, сетевая мультимедиа должна обладать также свойством интерактивности. При этом потребитель должен иметь определенный контроль за представлением информации. Сетевая мультимедиа, относящаяся к взаимодействию людей, может быть синхронной (аудио- и видеоконференции) и асинхронной (электронная почта).

Высшим достижением современных мультимедиа является возможность проведения на высоком качественном уровне видеоконференций, позволяющих географически удаленным коллаборациям ученых в реальном времени

обмениваться речевой, визуальной и другой информацией [85]. Другими словами, мы имеем виртуальную научную лабораторию без стен, где ученые «лицом к лицу» обсуждают свои текущие проблемы. В настоящее время в мире насчитывается несколько тысяч теле- и видеоконференций [86]. В [87] описывается минимальный набор аппаратуры и программных средств, необходимых для организации видеоконференций в одном помещении: электронная почта, электронная записная книга, Web-система, позволяющая включать в Internet копии научных статей, телемониторы и аудиосредства, которые управляются с помощью персональных компьютеров. Развитие видеоконференций стимулировало разработку соответствующей аппаратуры, программного обеспечения и персональных компьютеров, обеспечивающих цветное изображение в реальном времени.

В [88] приведены характеристики ряда персональных компьютеров, специально разработанных для видеоконференций. Одной из характерных особенностей таких ПК является то, что потребитель одной и той же машины может иметь соответствующие интерфейсы для доступа к сетевым мультимедиа. Например, типичный видеокomпьютер имеет следующие возможности: быстрый 32-разрядный процессор; видеоинтерфейс для подключения стандартного дисплея; видеовыход на стандартный дисплей; интерфейс для аналоговой или цифровой видеокамеры; цифровой сигнальный процессор для обработки цифровых видеосигналов; контроллер для подключения ISDN или другой сети; чипы для компрессии/декомпрессии данных; быстрый доступ к памяти. Широкое использование видеоконференций привело к необходимости разработки соответствующего стандарта. В [89, 90] кратко рассмотрена суть такого стандарта. В частности, описаны стандарты для терминалов, интерфейсы для подключения локальной сети к общей сети и рекомендуемые параметры разрешения для дисплеев: 176×144 и 352×288 пикселей, алгоритмы для компрессии видеоинформации.

8. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

Если рассматривать тенденцию использования средств вычислительной техники в экспериментах по физике высоких энергий, то можно отметить следующее. В 70–80-х гг. широко использовались малые ЭВМ. В 80–90-х гг. вследствие применения микропроцессоров получили распространение распределенные системы сбора и предварительной обработки физических данных (распределенные интеллектуальные системы), базирующиеся на тех или иных стандартах магистральных систем, где обмен данными происходит с помощью общей магистрали. И, наконец, начиная с середины 90-х годов наступает эра широкого применения коммуникационных вычислительных сетей [91]. Суть

проблемы создания современных систем сбора и обработки данных заключается в том, что количество каналов регистрации в будущих экспериментах может составить 10^8 в одной установке. Учитывая высокую частоту встречи пучков на современных ускорителях встречных пучков и тем более — на большом адронном коллайдере (LHC), можно сказать, что магистральный способ передачи данных в системах сбора и обработки физических данных становится узким местом в триггерных системах, в которых требуется высокая пропускная способность (сотни Мбайт/с и более).

С целью выбора наиболее эффективной сетевой технологии в 1993 г. в ЦЕРН был предложен проект *Nebulas (RD-31)* [92] для исследования возможности использования в экспериментах по физике высоких энергий ATM-технологии [93, 94]. Проект был направлен на изучение возможностей создания параллельной системы регистрации и обработки данных, получаемых на установке ATLAS. Основные направления исследований программы RD-31 следующие.

- Детальное изучение возможностей использования выпускаемых промышленностью коммутаторов в качестве строителей событий.
- Создание модели строителя событий.
- Разработка специализированных ATM-интерфейсов.

Наряду с строителями событий ATM-технология в экспериментальной физике высоких энергий используется для создания локальных и глобальных вычислительных сетей внутри систем сбора и обработки данных, вытесняя магистральные системы. ATM-сети находят широкое применение для передачи в реальном времени не только данных с детекторов, но и мультимедийных приложений. В последующих разделах некоторые аспекты применения ATM-технологии в экспериментальной физике будут рассмотрены более подробно.

Триггерная система установки ATLAS. На рис. 19 приведена структурная схема трехуровневой системы регистрации и отбора событий [95]. Частота поступления событий, которые будут регистрироваться с помощью детекторов, может составлять от 100 Мбайт/с до 10 Гбайт/с. По данным [96] при цикле 25 нс на внутренних трековых детекторах будет регистрироваться до 350 треков заряженных частиц и до 700 частиц может быть зарегистрировано в калориметрах. С помощью трехуровневой системы объем данных, поступающих от субдетекторов, может быть сокращен с сотен Гбайт/с до десятков Мбайт/с для последующей записи в системе массовой памяти. На рис. 20 приведена стратегия отбора событий на каждом уровне триггерной системы [97]. В среднем столбце показано содержание физических процессов, данные которых обрабатываются на соответствующем уровне. Сигналы от субдетекторов с частотой 40 МГц с помощью оптоволоконных линий передачи

поступают на первый уровень триггерной системы, который, по существу, представляет собой аналоговый конвейер. В каждом канале конвейера содержатся матрицы компараторов и аналоговые сдвиговые регистры для буферизации данных, благодаря чему система не имеет мертвого времени. На данном

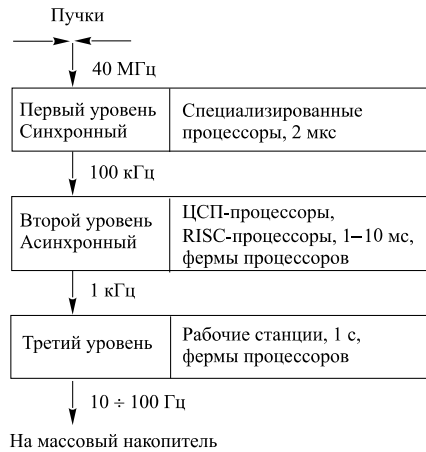


Рис. 19. Блок-схема трехуровневой системы регистрации и фильтрации событий установки ATLAS

уровне используются также цифровые логические схемы и процессоры с табличными методами решения. Причем на первом уровне определяются области субдетекторов, в которых имеются указания на возможность регистрации полезного события (RoI — Region of Interest). RoI-данные составляют 2% от максимально возможного количества регистрируемой информации в детекторе. При этом отбираются события, удовлетворяющие некоторым простым геометрическим критериям по топологии события и значениям энергий регистрируемых частиц. После оцифровки и мультиплексирования данные от принятых событий на первом уровне поступают на второй уровень триггерной системы с задержкой 2 мкс (время решения триггера первого уровня) и частотой 100 кГц. Причем ожидаемая полоса пропускания с учетом того, что на одно событие приходится свыше 1 Мбайт данных, составляет порядка 100 Гбайт/с. Вот почему традиционные методы коммутации данных на основе магистральных систем не могут быть использованы в экспериментах на большом адронном коллайдере. На втором уровне величина задержки, определяемая временем решения по отбору полезных событий, составляет 1 ÷ 10 мс, поскольку информация фильтруется по более сложным критериям. В качестве аппаратных средств используются, в основном, цифровые сигнальные процессоры промышленного изготовления.

С помощью триггерной системы третьего уровня, которая состоит из фермы мощных вычислителей, проводится анализ всего события. Затем данные о событии записываются на массовый накопитель. Частота записи данных на массовый накопитель составляет 10 ÷ 100 Гц.

Как показывают исследования [98], обработка определенного события будет выполняться с помощью отдельного вычислительного узла. Причем для каждого события данные передаются к выбранному вычислительному узлу от нескольких сотен источников, определяемых внутри RoI. Поэтому уже на втором уровне триггерной системы используются матричные процессоры

на первом уровне определяются области субдетекторов, в которых имеются указания на возможность регистрации полезного события (RoI — Region of Interest). RoI-данные составляют 2% от максимально возможного количества регистрируемой информации в детекторе. При этом отбираются события, удовлетворяющие некоторым простым геометрическим критериям по топологии события и значениям энергий регистрируемых частиц. После оцифровки и мультиплексирования данные от принятых событий на первом уровне поступают на второй уровень триггерной системы с задержкой 2 мкс (время решения триггера первого уровня) и частотой 100 кГц. Причем ожидаемая полоса пропускания с учетом того, что на одно событие приходится свыше 1 Мбайт данных, составляет порядка 100 Гбайт/с. Вот почему традиционные методы коммутации данных на основе магистральных систем не могут быть использованы в экспериментах на большом адронном коллайдере. На втором уровне величина задержки, определяемая временем решения по отбору полезных событий, составляет 1 ÷ 10 мс, поскольку информация фильтруется по более сложным критериям. В качестве аппаратных средств используются, в основном, цифровые сигнальные процессоры промышленного изготовления.

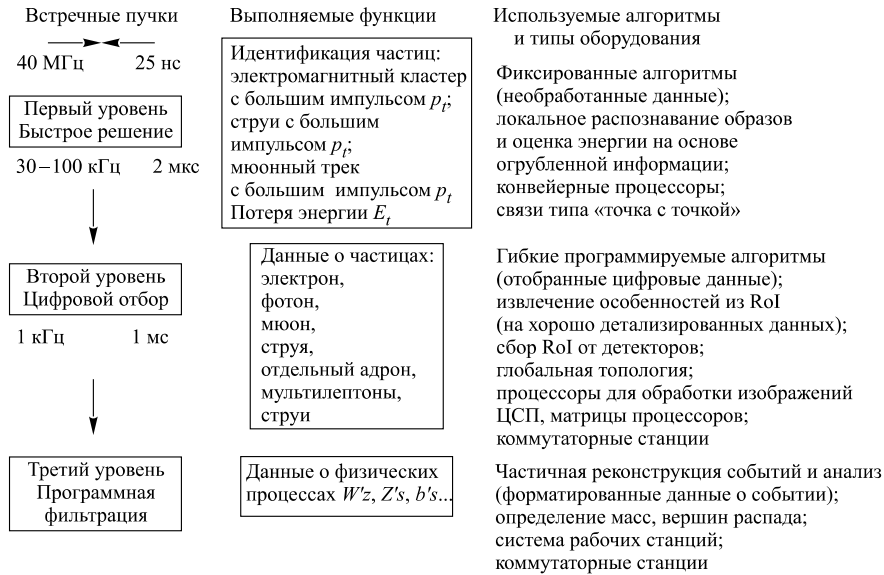


Рис. 20. Стратегия отбора событий в эксперименте ATLAS

(процессорные фермы), а данные (RoI) от источников на фермы процессоров передаются с помощью построителя событий, который, по существу, представляет собой широкополосную сеть, содержащую сотни входов и выходов.

Потоки данных. На рис. 21 приведена схема, иллюстрирующая потоки данных в триггерных системах второго и третьего уровней [102]. Сигналы, поступающие от субдетекторов, запоминаются в буферных ЗУ конвейерного типа (аналоговые или цифровые) на время работы триггерной системы первого уровня. Данные о событиях, принятых на первом уровне, с интерфейсом ROD (Read Output Driver) по оптическим линиям передаются в экспериментальный павильон и запоминаются в буферных запоминающих устройствах (ROB), количество которых составляет порядка 2000. Причем имеются отдельные буферы для калориметра, мюонного детектора и трековых детекторов. Данные, поступающие на триггерную систему второго уровня, соответствуют RoI. Оценки показывают, что каждое событие содержит данные в среднем от 5 RoI. Причем данные из RoI для каждого субдетектора обрабатываются отдельно и параллельно с помощью локальных (ЛП) и глобальных (ГП) процессоров триггерной системы.

Следует отметить, что для каждого субдетектора данные от каждого RoI, как правило, поступают от разных ROD. Поэтому для объединения и передачи этих данных в процессор для дальнейшей обработки служит коммуникационная матрица, составляющая основу построителя событий. Результаты

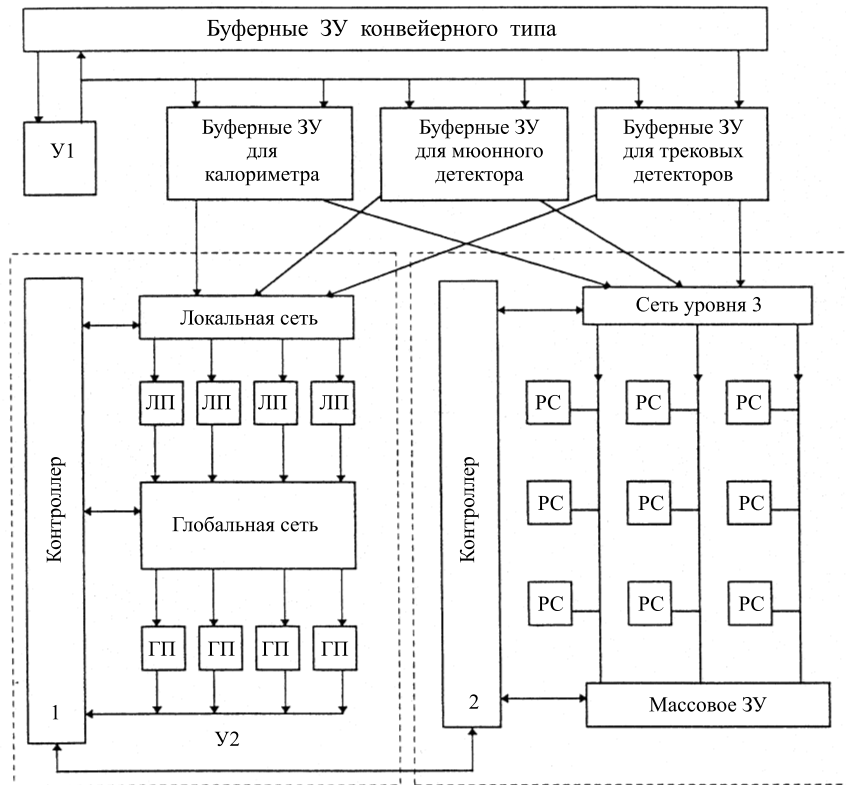


Рис. 21. Блок-схема, иллюстрирующая потоки данных: U_1 , U_2 , U_3 — триггерные уровни; ЛП — локальные процессоры; ГП — глобальные процессоры; РС — рабочие станции; ЗУ — запоминающее устройство

обработки, полученные с помощью локальных процессоров, передаются через глобальную сеть для дальнейшей обработки в глобальные процессоры в случае трехуровневой системы или остаются в одном и том же процессоре (что предпочтительно) в случае двухуровневой системы триггера, где второй и третий уровни обработки объединены в одной вычислительной ферме.

В табл. 6 приведены данные, характеризующие объем информации, регистрируемой в субдетекторах, на одно событие [95]. Используя эти данные и учитывая, что частота событий на входах триггерной системы второго и третьего уровней равна 100 и 1 кГц соответственно, можно оценить, что суммарная полоса пропускания триггерной системы должна составлять несколько десятков Гбайт/с.

Таблица 6. Оценки требуемой полосы пропускания

| СД | Объем событий, Кбайт | ПП У2, Гбайт/с | ПП У3, Гбайт/с |
|-------------------|----------------------|----------------|----------------|
| Трековый детектор | 770 | 10 | 6 |
| Калориметр | 400 | 5,6 | 3,2 |
| Мюонный детектор | 200 | 2,4 | 1,6 |
| Всего | 1370 | 18 | 10,8 |

Примечание. СД — субдетектор; ПП У2 — полоса пропускания уровня 2; ПП У3 — полоса пропускания уровня 3.

Построители событий [95–111]. Блок-схема. Как показали исследования, АТМ-сеть является наиболее удачной технологией для создания построителей событий. В частности, она обеспечивает необходимую полосу пропускания, может легко расширяться и работает надежно. Кроме того, стоимость оборудования неуклонно уменьшается.

По определению [96–98] построитель событий (event building), создаваемый на основе АТМ-технологии, представляет собой устройство, содержащее N источников и N приемников данных, соединенных между собой сетью. Основу такой сети составляет АТМ-коммутирующая станция. Другими словами, построитель событий включает в себя коммутационную сеть с соответствующими устройствами управления, определенное количество источников данных, заданное количество приемных модулей, в которых запоминаются фрагменты событий. В качестве приемников данных обычно используются буферные ЗУ. Для каждого события приемники собирают данные от субдетекторов и восстанавливают полную топологию событий с помощью мощных процессоров. Коммутационная сеть одновременно поддерживает параллельные потоки данных, так что множество событий восстанавливается одновременно в конкурентном режиме.

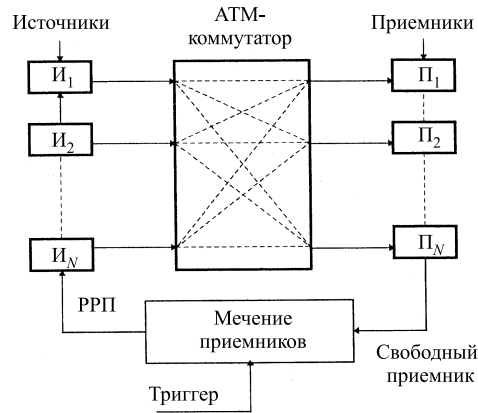


Рис. 22. Блок-схема типичного построителя событий. $I_1 \div I_N$ — источники; $P_1 \div P_N$ — приемники

На рис. 22 приведена блок-схема типичного построителя событий. Данные на входы источников $I_1 \div I_N$ поступают от триггерной системы первого

уровня. Виртуальные соединения, которые обозначены штриховыми линиями, открыты постоянно. После появления триггерного сигнала на отобранное событие контроллер инициирует работу всех источников в радиовещательном режиме. При этом каждый источник с помощью коммутатора посылает фрагменты события через виртуальные соединения на обозначенные приемники $P_1 \div P_N$. Для передачи данных используется протокол AAL5. Причем порядок поступления ячеек, содержащихся в AAL5-пакете и поступающих на входы, такой же, как и порядок ячеек, формируемый на передающей стороне. Однако порядок поступления на приемники фрагментов, относящихся к различным событиям, заведомо не определен и зависит от наличия свободного виртуального пути или очередности, устанавливаемой в источниках. В конце концов все фрагменты данного события окажутся в одном заданном приемнике данных.

Основные параметры и проблемы. Построители событий характеризуются рядом параметров.

- Задержка построителя событий равна времени между поступлением фрагмента события на вход построителя событий и формированием его на приемнике.
- Загрузочный фактор представляет собой максимальную часть агрегатной полосы пропускания коммутатора, которая используется для построения события.
- Частота работы построителя определяет время, в течение которого происходит формирование события или его фрагмента.
- Максимально возможная очередь ячеек на входах и выходах коммутаторной станции определяет емкость необходимой памяти на входах коммутатора.
- Количество входных/выходных портов.

Следует отметить, что коммутаторные станции в основном выпускаются для телекоммуникационных систем и поэтому в них не учитываются особенности передачи данных в экспериментах по физике высоких энергий. Суть проблемы заключается в том, что для каждого события все источники данных могут посылать в одно и то же время фрагменты событий на один и тот же приемник. В результате возникают заторы даже в случае большой суммарной пропускной способности коммутаторной станции. Для устранения заторов и состязательности ячеек при коммутации с помощью АТМ-коммутаторов RD-31-коллекция предлагает использовать два способа: выравнивание частоты поступления ячеек на входы коммутирующей станции (traffic shaping) и контроль потока ячеек внутри станции (internal flow control) [92, 95, 97].

Первый способ предполагает ограничение средней пропускной способности таким образом, чтобы суммарная пропускная способность на входах приемников не превышала номинальной пропускной способности выходных портов, и исключение, по возможности, кластеров так, чтобы данные на приемники поступали равномерно. Другими словами, необходимо, чтобы в каждом соединении номинальная пропускная способность была равна $1/N$. При этом выравнивание частоты поступления ячеек заключается в управлении потоками данных от источников: во-первых, в контроле скорости передачи ячеек по отдельным виртуальным соединениям; во-вторых, в измерении временной зависимости величины загрузки и изменении типа коммутации. При использовании второго способа (internal flow control) в случае возникновения затора коммутаторная станция посылает сигнал источнику, в соответствии с которым он должен уменьшить частоту поступления ячеек. С целью повышения эффективности работы построителя событий могут использоваться оба способа одновременно.

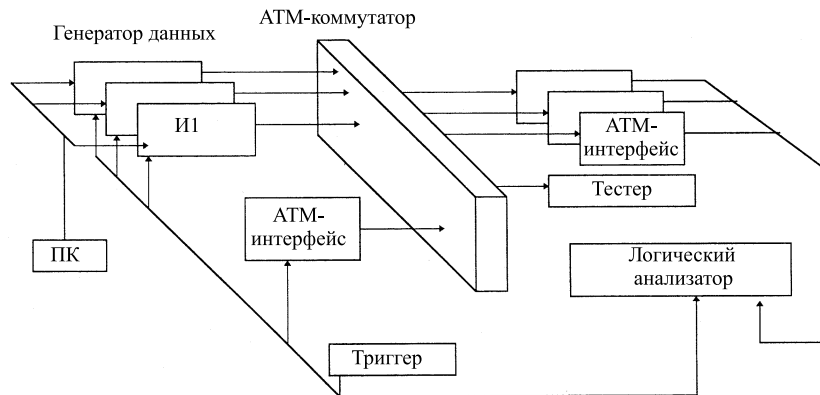


Рис. 23. Блок-схема модели построителя событий

Модель построителя событий на базе АТМ-технологии [95, 97–102]. На рис. 23 приведена блок-схема модели, созданной на основе восьмипортового АТМ-коммутатора с пропускной способностью 155 Мбит/с. Прототип содержит АТМ-интерфейс (см. ниже), выполненный в стандарте VME на основе RISC-процессора. Он используется в качестве источников и приемников данных. Интерфейс представляет собой обычную VME-плату, с помощью которой реализуются уровни АТМ-протокола, AAL5, АТМ и физический уровень. Для этих целей используются специализированные микросхемы. Причем с помощью физического уровня реализуется 155 Мбит/с SDH-протокол. Для

передачи данных используется одномодовое оптоволокно. Анализатор и тестер необходимы для контроля работы построителя событий и измерения внутренних времен задержки. Кроме того, в состав прототипа входит персональный компьютер, выполняющий функцию генератора данных.

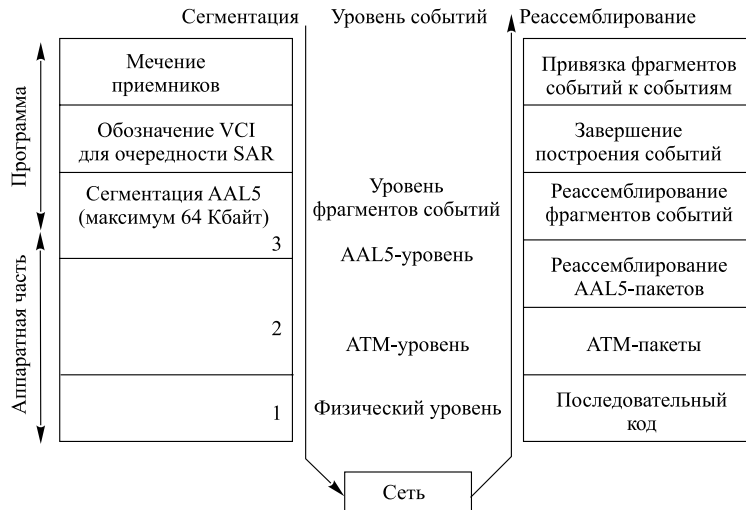


Рис. 24. Структура протокола построителя событий: SAR — система ассемблирования и реассемблирования

Протоколы построителя событий. На рис. 24 приведена структура протокола построителя событий. Уровни 3–1 являются стандартными: AAL5, ATM и физический уровень (SONET/SDH) соответственно. Протокол AAL5 используется для передачи фрагментов событий и служебной информации. Как отмечалось выше, AAL5-стандарт определяет передачу данных блоками емкостью 64 Кбайт. Сегментация и реассемблирование ATM-ячеек выполняются со специализированной микросхемы. Уровень фрагментов событий выполняет функцию объединения вместе фрагментов данного события. На этом уровне происходит формирование нескольких событий одновременно в конкурентном режиме и определяется время окончания сбора данных для каждого события. В [102, 103] модель построителя событий создана на базе ATM-коммутатора и быстрых рабочих станций, которые используются в качестве источников и приемников информации. Кроме того, в состав построителя событий входят также генератор событий, система запуска и контроля на основе сети Ethernet.

Применение транспьютеров. Весьма перспективным направлением в создании построителей событий является применение транспьютерных сетей. В одной из таких сетей используется высокопроизводительный транспьютер T9000 и ассоциированный с ним асинхронный коммутатор C104 [104], имеющий задержку 1 мкс и пропускную способность 264 Мбайт/с в обоих направлениях.

АТМ-сети и распределенные системы сбора и обработки экспериментальных данных. В будущих экспериментах количество каналов регистрации будет возрастать. Кроме того, сложилась тенденция в создании распределенных систем регистрации обработки данных. Пропускная способность такой системы должна составлять сотни и более Мбайт/с. Разработан ряд установок и распределенных систем, в которых для передачи данных на большие расстояния в реальном времени используются сети. Пожалуй, одна из первых установок, в которой для обмена данными между отдельными подсистемами вместо общей магистрали используется локальная сеть, описана в [105]. Часть аппаратуры с детекторами расположена на стратостате. Данные на землю передаются с помощью радиосигналов. Информация форматируется в виде пакетов так, как это рекомендуется в стандарте X.25. Наземная аппаратура состоит в основном из персональных компьютеров и рабочих станций, объединенных с помощью локальной сети. В [106] описана более совершенная установка, в которой для реализации протокола используется специализированная микросхема. На базе этой микросхемы построен контроллер, который находится в каждой подсистеме. Скорость передачи данных составляет 4 Мбит/с. Использование локальной сети позволяет каждой подсистеме, входящей в наземную часть установки, работать независимо одна от другой или отключаться от сети в случае необходимости. Кроме того, система легко расширяется.

АТМ-сети становятся неотъемлемой частью создаваемых экспериментальных установок. Как показано в [107, 108], объем данных при регистрации и скорость их обработки (DAQ — Data Acquisition System) можно увеличить, по крайней мере, на порядок путем использования АТМ-технологии. Кроме того, поскольку система получается распределенной, то повышается эффективность сотрудничества больших коллабораций: появляется возможность использовать общую информацию без необходимости копирования данных; данные поступают в реальном времени, практически независимо от расстояния до ускорителя и от конечных пользователей; появляется возможность контролировать работу установки в режиме удаленного доступа, проводить видеоконференции и текущее обсуждение получаемых результатов. В будущем появится возможность проведения экспериментов без присутствия физиков непосредственно на экспериментальной установке.

В рамках национальной сети SURFnet (Голландия) реализуется проект «Удаленная система регистрации, обработки и анализа физической информации». В состав распределенной сети сбора данных по состоянию на 1996 г.

входят лаборатория Ван-де-Граафа (Уtrecht), детектор GANIL (Франция) и нейтронный калориметр (Амстердам). Следующим этапом развития проекта будет включение в общую сеть установки для исследования плазмы и обеспечение связи с ЦЕРН [109] (рис. 25).

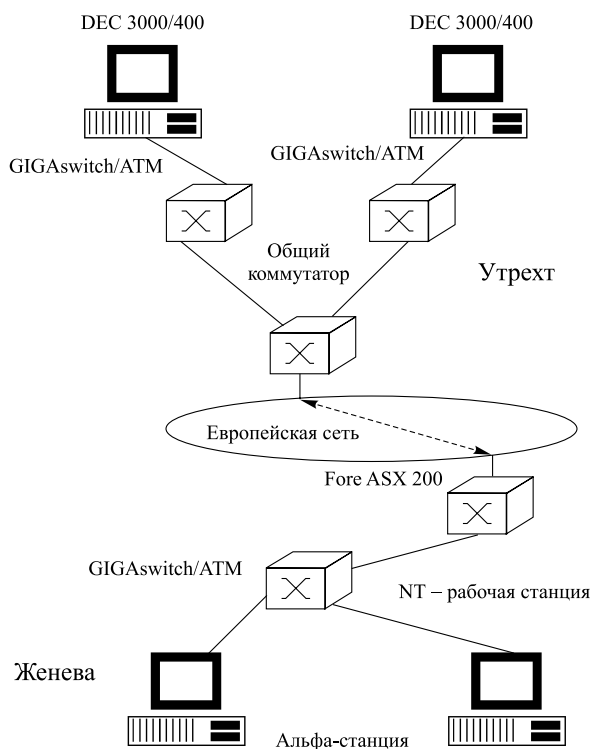


Рис. 25. Экспериментальная блок-схема сети ATM Utrecht–Женева: DEC 3000/400 — рабочие станции фирмы «DEC»; GIGAswitch/ATM — быстрый ATM-коммутатор; Fore ASX 200 — ATM-коммутатор фирмы «Fore»

Таким образом, использование ATM-технологии и мощных рабочих станций является весьма перспективным в экспериментальной физике. Однако в таких сетях необходимы многоуровневые системы управления в связи с необходимостью передачи разнородных мультимедийных потоков данных и для исключения заторов, которые резко снижают эффективность системы [110].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы показывает, что современные вычислительные сети имеют низкую пропускную способность и плохое качество обслуживания. Использование коммутируемых технологий, и прежде всего АТМ-технологии, позволяет создавать быстродействующие сети, в которых по одному каналу может передаваться весь спектр современной информации, включая данные и мультимедиа в цифровой форме. Основная проблема носит чисто организационный и финансовый характер. Учитывая пока еще высокую стоимость новой технологии и наличие огромного количества используемых ЛВС, в ближайшее время можно ожидать плавного перехода к АТМ-технологии. В перспективе в ближайшие 5–10 лет можно ожидать создания локальных и глобальных сетей на базе единого стандарта — АТМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Любимов А.* Сетевые технологии и решаемые задачи // Компьютер Пресс. 1995. №10. С.70–79.
2. *Осадчук А.* Сетевые архитектуры современных информационно-вычислительных сетей // Компьютер Пресс. 1995. №11. С.112–116.
3. Интернет. Всемирная компьютерная сеть / Ред. А. Гурин, Э. Замков, В. Цветков. М.: Синтез, 1995. 158 с.
4. *Шшимарев М., Клочков М.* Что такое Internet // Компьютер Пресс. 1994. №9. С.11–12.
5. *Любимов А.* Стратегия высокопроизводительных сетей // Компьютер Пресс. 1995. №5. С.51–55.
6. *Maxfield C.* The Pentium II Revealed // Byte. 1977. V.22, No. 9. P.51–52.
7. *Фоминов О., Любимов А.* Анализ сетей с коммутаторами // Компьютер Пресс. 1996. №7. С.62–63.
8. *Гасымов И.* Коммутаторы в сетевых решениях // Компьютер Пресс. 1996. №12. С.181–184.
9. *Радзецкая Н., Любимов А.* Телекоммуникации ближайшего будущего // Компьютер Пресс. 1995. №6. С.82–84.
10. *Casaca A. J.* Interpersonal Communications Using Computers // Proc. of the 1988 CERN School of Computing. Geneva, 1989. CERN 89-06. P.63–95.
11. *Любимов А.* Технология управления сетями // Компьютер Пресс. 1995. №9. С.90–93.
12. *Бондаренко Д.* Объединить локальные сети // Компьютер Пресс. 1994. №10. С.67–69.
13. *Бондаренко Д.* Объединить локальные сети // Компьютер Пресс. 1994. №9. С.26–28.
14. *Гасымов И.* Коммутаторы в сетевых решениях // Компьютер Пресс. 1997. №1. С.141–145.
15. *Барабанов С., Коростелин А., Крюков С.* Компьютерные сети: вчера, сегодня, завтра // Компьютер Пресс. 1997. №1. С.152–158.
16. *Бондаренко Д.* Объединить локальные сети // Компьютер Пресс. 1994. №12. С.78–81.
17. *Осадчук А., Любимов А.* Активное сетевое оборудование Digital // Компьютер Пресс. 1996. №10. С.42–50.

18. *Byran J.* LANs Make the Switch // *Byte*. 1994. V.19, No.9. P.113–120.
19. *Солнцев М.* Инверсное мультиплексирование: восхождение к АТМ // *Компьютер Пресс*. 1997. №10. С.56–62.
20. *Byran J.* Pumping up Ethernet // *Byte*. 1993. V.18, No.9. P.121–126.
21. *Потапов Ю.* Как перейти с Ethernet на более высокие скорости // *Компьютер Пресс*. 1997. №7. С.208–210.
22. *Альберт С.-М.* Gigabit Ethernet // *Компьютер Пресс*. 1996. №10. С.40–41.
23. *Hurwicz M.* Ethernet with Attitude // *Byte*. 1997. V.22, No.4. P.88NA3–88NA8.
24. *Lo S.* Inside Gigabit Ethernet // *Byte*. 1997. V.22, No.5. P.55–56.
25. *Мельник Е.* Настоящее и будущее сетевых технологий // *Компьютер Пресс*. 1997. №1. С.139–140.
26. *Любимов А.* Коммутируемая Ethernet // *Компьютер Пресс*. 1995. №7. С.69–71.
27. *Любимов А.* Коммутируемая Ethernet // *Компьютер Пресс*. 1995. №9. С.98–101.
28. *Warren A.* High-Performance Network Challenge Ethernet // *Computer Design*. 1992. V.31, No.7. P.77–92.
29. *Anderson D.* Fiber Channel: Fast and Flexible // *Byte*. 1996. V.21, No.5. P.173–174.
30. *Потапов Ю.* Технология FDDI — для тех, кто хочет жить спокойно // *Компьютер Пресс*. 1997. №10. С.30–37.
31. *Karol M. J., Gitlin R. D.* High Performance Optical Local and Metropolitan Area Network: Enhancement of FDDI and IEEE 802.6 DQDB // *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*. 1990. V.8, No.8. P.1439–1446.
32. *Веселовский Г. Г., Каравай М. Ф., Кузнецик С. М.* Коммутационные сети в многопроцессорных вычислительных системах с общим управлением // *Автоматика и телемеханика*. 1989. №2. С.3–29.
33. *Степанян С. О.* Коммуникационные сети в многопроцессорных ЭВМ // *Автоматика и вычислительная техника*. 1987. №3. С.31–43.
34. *Chen P. Y., Lawrie D. H., Yew P. C.* Interconnection Networks Using Shuffles // *Computer*. 1981. V.14, No.12. P.5564.
35. *Turner J. S.* New Detection in Communication // *IEEE Commun. Magazine*. 1986. V.24, No.10. P.8–15.
36. *Dias D. M., Jump J. R.* Packet Switching Interconnection Networks for Modular Systems // *Computer*. 1981. V.14, No.12. P.43–42.
37. *Dupraz J., Prucker M. D.* Principles and Benefits of the Asynchronous Transfer Mode // *Electrical Commun.* 1990. V.64, No.2/3. P.116–123.
38. *Engbersen T.* High-Speed Switching // *Proc. of the 1995 CERN School of Computing*. CERN 95-05. Geneva, 1995. P.161–164.
39. *Letheren M. F.* Switching Techniques in Data Acquisition Systems for Future Experiments // *Proc. of the 1995 CERN School of Computing*. CERN 95-05. Geneva, 1995. P.245–275.
40. *Ahmed H. et al.* Synchronous Transmission Systems and Cross Connects for Broadband Networks // *Electrical Commun.* 1990. V.64, No.2/3. P.194–204.
41. *Бондаренко Д.* АТМ — сетевая технология будущего // *Компьютер Пресс*. 1995. №2. С.87–89.
42. *Cooper L. F.* Playing the ATM Card // *Byte*. 1996. V.21, No.5. P.71–76.

43. «About ATM» at www.atmforum.com/atmforum/atm_basics/notes.html.
44. *Prucker M. D.* ATM: Solution for B-ISDN // Proc. of the 1990 CERN School of Computing. CERN 91-05. Geneva, 1991. P.9–46.
45. *Nance B.* Teach Your Apps to Speak ATM // Byte. 1996. V.21, No.8. P.97–101.
46. *Joch A.* Virtually Well Connected // Byte. 1996. V.21, No.8. P.97–101.
47. *Clarkson M.* All-Terrain Networking // Byte. 1993. V.18, No.8. P.111–116.
48. *Mullender S. J.* Interprocess Communication // Proc. of the 1992 CERN School of Computing. CERN 93-03. Geneva, 1993. P.47–79.
49. *Boudec J. V.* The Asynchronous Transfer Mode: a Tutorial // Computer Network and ISDN Systems. 1992. V.24. P.279–309.
50. *Hetter J. L.* Asynchronous Transfer Mode. www.gl.umbc.edu/jheetel/atmpaper.html. December 12, 1995.
51. *Бондаренко Д.* ATM — сетевая технология будущего // Компьютер Пресс. 1995. №5. С.48–50.
52. *Бондаренко Д.* ATM — сетевая технология будущего // Компьютер Пресс. 1995. №6. С.89–90.
53. *Серебрянная А., Бондаренко Д.* ATM — сетевая технология будущего // Компьютер Пресс. 1995. №11. С.117–118.
54. *Тормышов С., Баушев С.* Технология ATM для профессионалов // Компьютер Пресс. 1996. №10. С.26–30.
55. *Тормышов С.* Технология ATM для профессионалов // Компьютер Пресс. 1997. №2. С.164–168.
56. *Бондаренко Д.* ATM — сетевая технология будущего. Компоненты сети ATM // Компьютер Пресс. 1995. №8. С.99–100.
57. *Тормышов С.* Технология ATM для профессионалов // Компьютер Пресс. 1996. №12. С.176–179.
58. *Тормышов С.* Технология ATM для профессионалов // Компьютер Пресс. 1997. №3. С.168–170.
59. *Тормышов С.* Технология ATM для профессионалов // Компьютер Пресс. 1997. №5. С.176–180.
60. *Fritz J.* Bulletproofing ATM: Part 1 // Byte. 1997. No.6. P.59–60.
61. *Fritz J.* Bulletproofing ATM: Part 2 // Byte. 1997. No.7. P.55–56.
62. *Lohse S.* Reliable ATM Networking // Byte. 1997. No.4. P.55–56.
63. White paper. ATM Switch Traffic Management Essentials. www.igt.com/documentation.htm#unis
64. *Letheren M., Christiansen J., Mandjavidze I.* An Asynchronous Data-Driven Event-Building Scheme Based on ATM Switching Fabric // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1994. V.41, No.1. P.257–266.
65. *Boettle D., Henrion M.A.* Alcatel ATM Switch Fabric and its Properties // Electrical Commun. 1990. V.64, No.2/3. P.156–165.
66. *Goldberg L.* ATM Switching: A Brief Introduction // Electronic Design. 1994. V.42, No.26. P.87–103.

67. Child J. Bus-Switching Chip Busts Bandwidth Barriers // Computer Design. 1995. No.6. P.32–36.
68. Никитюк Н. М. Коммутаторы с алгебраической структурой для многопроцессорных систем // Автоматика и телемеханика. 1995. №5. С.174–172.
69. Alexandrov I. N., Kotov V. M., Nikityuk N. M. Investigation on Synchronous Switches // Proc. of the Second Intern. Workshop on Electronics for LHC Experiments, Balatonfured, Hungary, Sept. 23–27, 1996. CERN/LHCC/96-39. P.220–225.
70. Галушкин А. И. и др. Нейрокомпьютеры и их применение // Зарубежная радиоэлектроника. 1997. №2. С.3–10.
71. Bishop C. M. Neural Networks and Their Application // Rev. Science Instr. 1994. V.65, No.6. P.1803–1832.
72. Brown T. X. Neural Networks for Switching // IEEE Commun. Mag. 1989. V.27, No.11. P.73–81.
73. Brown T. X., Kuo-Hui Liu. Neural Network of a Banyan Network Controller // IEEE J. on Selected Areas in Communication. 1990. V.8, No.8. P.1428–1438.
74. Marrakchi A., Troudet T. A Neural Arbiter for Large Crossbar Packet Switches // IEEE Trans. on Circuits and Systems. 1989. V.36, No.7. P.1039–1041.
75. Goldberg L. ATM Silicon: Ready for Takeoff // Electronic Design. 1994. V.42, No.7. P.51–65.
76. White paper. Igt ATM Switching Solutions Position Paper. www.igt.com/documentation.htm#unis.
77. Федотов А. АТМ-коммутаторы // Компьютер Пресс. 1996. №10. С.32–38.
78. Барабанов С., Коростелин А., Крюков С. Компьютерные сети: вчера, сегодня, завтра // Компьютер Пресс. 1997. №4. С.29–36.
79. Baldazo R. ATM with Twist of LAN // Byte. 1995. V.20, No.11. P.255–256.
80. Salamone S. Virtual LANs Get Real // Byte. 1995. V.20, No.5. P.181–184.
81. Salamone S. Life in the Fast LANE // Byte. 1996. V.21, No.7. P.53–54.
82. Федотов А. Виртуальные сети // Компьютер Пресс. 1996. №8. С.76–82.
83. Барабанов С., Коростелин А., Крюков С. Компьютерные сети: вчера, сегодня, завтра // Компьютер Пресс. 1997. №3. С.158–162.
84. Fluchiger F. Networking and Electronic Highway // Proc. of the 1996 CERN School of Computing. CERN 96-08. Geneva, 1996. P.123–132.
85. Kiernan V. All the World's a Lab // New Scientist. 1997. V.154, No.2077. P.24–27.
86. Шишмарев М., Клочков М. Телеконференции — взгляд изнутри // Компьютер Пресс. 1994. №9. С.8–9.
87. Kouzes R. T., Myers J. D., Wulf W. A. Collaboratories: Doing Science on the Internet // IEEE Computer. 1996. V.29, No.8. P.40–46.
88. Reinhard A. Video Conquer the Desktop // Byte. 1993. V.18, No.10. P.64–80.
89. Garland E., Rowell D. Face-to-Face Collaboration // Byte. 1994. V.19, No.11. P.233–242.
90. Борзенко А. Система поддержки видеоконференций ProShare // Компьютер Пресс. 1997. №1. С.146–150.
91. Bu P. Le Du. Requirements for Future Experiments // Proc. of the Workshop «Applied of ATM in High Energy Physics», Paris, Sept. 21–22, 1998. P.13–23.
92. Christiansen J. et al. The «Nebulas» (RD-31) Project // Proc. of the Intern. Conf. RTD'94, Dubna, Russia, June 27 – July 1, 1994. P.299–310.

93. *Котов В. М., Никитюк Н. М.* ATM-технология. Сообщение ОИЯИ P11-99-13. Дубна, 1999.
94. *Назаров А. Н., Симонов М. В.* ATM: Технология высокоскоростных сетей. М.: Экотрендз, 1998. 234 с.
95. *Calvet D. et al.* A Study of Performance Issues of the ATLAS Event Selection System Based on ATM Switching Network // IEEE Trans. on Nuclear Sci. 1996. V.43, No.1. P.90–98.
96. *Mapelly L.* Architecture of Future Data Acquisition Systems // Proc. of 1992 CERN School of Computing. CERN 93-03. Geneva, 1993. P. 237–335.
97. *Costa M. et al.* ATM-Based Event Building. ATLAS Internal Note. DAQ-No-24. Geneva, 1994.
98. *Letheren M. et al.* An Asynchronous Data-Driven Event-Building Scheme Based on ATM Switching Fabrics // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1994. V.41, No.1. P.257–266.
99. *Costa M. et al.* An ATM-Based Event Builder System // Proc. of the First Workshop on Electronics for LHC Experiments. Lisbon, Sept. 11–15, 1995. P.340–344.
100. *Costa M. et al.* Lessons from ATM-Based Event Builder Demonstrators and Challenges for LHC-Scale System // Proc. of the Second Workshop on Electronics for LHC Experiments. Balatonfured, Hungary, Sept. 23–27, 1996. P.208–214.
101. *Costa M. et al.* Results from an ATM-Based Event Builder Demonstrator // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1996. V.43, No.3. P.1814–1820.
102. *Calvet D. et al.* Operation and Performance of ATM-Based Demonstrator for Sequential Option of the ATLAS Trigger // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. V.45, No.4. P.1793–1797.
103. *Calvet D.* Evaluations of ATM for the ATLAS Trigger and Data Acquisition System // Proc. of the Workshop «Application of ATM in High Energy Physics», Paris, Sept. 21–22, 1998. P.2/16-16/16.
104. *Dobinson R. W. et al.* Triggering and Event Building Results Using the C104 Paket Routing Chip // Nucl. Instr. Meth. A. 1996. V.376, No.1. P.59–66.
105. *Imori M. et al.* A Remote Console System for Ballon–Borne Experiment // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1992. V.NS-40, No.4. P.913–915.
106. *Imori M. et al.* A Local Network Integrated into a Ballon–Borne Apparatus // Nucl. Instr. Meth. A. 1998. V.414, No.1. P.194–204.
107. *de Laat C. Th. A. M. et al.* A Distributed Data Acquisition System by ATM Networks a Pilot Study // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1996. V.43, No.1. P.123–127.
108. *de Laat C. Th. A. M. et al.* Experiments with the Application of LAN Emulation in a Data Acquisition System // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1997. V.44, No.4. P.1635–1638.
109. *Andree H. M. A. et al.* Virtual Control Room, the «REMOT» Project, Networking Pilot Studies // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. V.45, No.4. P.1999–2003.
110. *Nomachi M. et al.* Performance Measurement of Mixed Data Acquisition and LAN Traffic on a Credit-Based Flow-Controlled ATM Network // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1998. V.45, No.4. P.1854–1858.
111. *Котов В. М., Никитюк Н. М.* Применение ATM-технологий в экспериментальной физике высоких энергий. Сообщение ОИЯИ P11-99-52. Дубна, 1999.