

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ETHERNET

В.И. Виноградов

*Рассмотрены варианты построения нового поколения сетей и коммуникационных стандартов систем управления на основе Ethernet, применяемых в промышленной автоматизации. Показаны преимущества применения, проблемы и их решения при использовании таких сетей в задачах промышленной автоматизации.*

Традиционная сеть Ethernet используется для сопряжения и связи офисных ПК и рабочих станций, но в классическом виде с разделяемой средой связи она не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к системам управления в РВ, так как имеет непредсказуемые задержки и даже не гарантирует доставку сообщений. Первые сети обеспечивали скорость передачи 10 Мбит/с, затем появился стандарт FastEthernet (FE). Этот стандарт обеспечивает быструю связь со скоростью 100 Мбит/с. Fast Ethernet ныне применяется во множестве приложений, в том числе в приборных системах измерений, промышленных системах управления и др.

### Проблемы адаптации классической сети Ethernet для систем РВ

Согласно модели взаимодействия открытых систем OSI Ethernet охватывает первые два уровня и не включает третий уровень, на котором находится протокол TCP/IP. Сетевые хабы работают на физическом уровне протокола, коммутаторы — на втором, а маршрутизаторы — на третьем уровне модели OSI. Коммутаторы могут интерпретировать сигналы на первых двух уровнях, что отражается в таблице MAC-адресов. Если адрес отсутствует, то коммутатор посылает его всем портам. Если устройство не подключено (удалено), то его вход удаляется из БД. Тип подключения (MDI/MDIX) определяется автоматически.

Исходный протокол CSMA/CD является недетерминированным и не пригоден для РВ, поэтому решение проблемы требует разработки специальных методов управления сетью.

Системы РВ на основе Ethernet создают несколькими методами, используя различные варианты среды связи, исходя из стоимости и быстродействия. Один из методов создания систем РВ заключается в том, что вместо протокола CDMA/CD применяют переключаемые интервалы времени, распределяющие передачи пакетов и сообщений в последовательной сети, при этом ухудшается использование полосы частот.

Другой метод основан на упрощенном варианте сети только с одним ведущим контроллером и большим числом ведомых устройств с интерфейсом Ethernet без использования коммутируемой среды.

Распределенная система управления на основе такой сети использует метод интеракций одного ведущего со многими ведомыми устройствами.

Кроме метода создания сети с одним ведущим применяют современную коммутирующую среду связи. С помощью протоколов TCP/IP и новых системных решений на основе коммутаторов и маршрутизаторов получены определенные положительные результаты построения сетей для задач управления в промышленности на корпоративном уровне, в том числе в качестве полевой магистрали (Fieldbus).

Усеченная сеть Ethernet с одним ведущим (EtherCat фирмы Beckhoff) имеет стандартные интерфейсы Ethernet в распределенных устройствах (секциях) с модулями сбора данных и управления. Все устройства сети соединяются в последовательную кольцевую структуру. Ведущий контроллер может управлять распределенными узлами кольцевой сети, которые могут считывать данные, например из АЦП, в момент прохождения через них фрейма с данными от других устройств. Считанные данные вставляются в проходящий поток бит. Последний ведомый узел в кольцевой цепи возвращает все обработанные сообщения ведущему контроллеру для сбора и обработки данных в ПК.

Основное сетевое направление — это развитие коммутируемой среды связи. Коммутаторы и маршрутизаторы для быстрой связи используют двухточечные каналы связи для передачи адресуемых пакетов IP, при этом на основе таблиц маршрутизации определяют наилучший маршрут в локальной сети или Internet. Сложные функции маршрутизатора реализуются программно, поэтому они более совершенны по сравнению с коммутаторами, но обладают меньшим быстродействием. Новые маршрутизирующие коммутаторы объединяют преимущества обеих устройств по быстродействию и гибкости сетевой связи.

Сети Ethernet в процессе быстрого развития и широкого применения прошли этапы 10 и 100 Мбит/с, а по достижении быстродействия 1 Гбит/с (GE) становятся основной сетью для систем связи ПК. Важной вехой в развитии стал переход на оптические каналы связи благодаря взаимодействию технологии IP протокола и технологии MPLS, а также других транспортных возможностей сетей VDM и SDN нового поколения.

### Перспективные промышленные управляющие системы и сети PROFINET

Индустриальное применение сетей Ethernet в системах управления возможно, если соответствующее оборудование будет обеспечивать работу систем РВ в жестких условиях с обеспечением защиты от пыли, влаги, вибрации и электромагнитных помех. Промышленный вариант сети Ethernet для систем управления (PROFINET) разработан с целью унификации стандартов полевых сетей (Fieldbus) для построения систем, работающих в РВ со скоростью связи до 100 Мбит/с в жестких промышленных условиях эксплуатации.

Взаимодействие Ethernet-сетей с "классическими" сетями полевого уровня (Profibus, Interbus, DeviceNet) осуществляется с помощью шлюзов. Для конфигурации и диагностики применяют протоколы IP, TCP, UDP. С точки зрения физического носителя применяются сети на витых парах и оптоволокне в разных топологиях (линейной, кольцевой, звездной и древовидной). В линейной сети коммутатор на два порта устанавливают ближе к приборам, встраивают вместе с процессором в устройство или устанавливают адаптер сопряжения сети с традиционными интерфейсами типа RS-232/422/485, существующих во многих устройствах и встраиваемых системах.

Для каждого устройства выделяется свой коммутатор для управления конвейерными передачами. Избыточная кольцевая топология для надежности может включать две сети со встречным направлением передачи. Коммутаторы могут быть соединены радиально или в произвольной топологии. Особенности структуры кабельной связи в промышленных сетях связаны с жесткими условиями эксплуатации оборудования. Сеть PROFINET физически реализуется на экранированных витых парах медных проводов длиной до 100 м и с характеристическим сопротивлением 100 Ом (Ethernet 100 Base TX) не хуже категории 5 и класса D (ISO/IEC 11801). Каждое удаленное устройство подключают через активный компонент, образуя узел в сети. Вне шкафов оборудования используются кабельные соединители на основе стандартных вставок форм-фактора RJ45, но в жестком корпусе с защелкивающимся креплением. В полевых условиях для подключения оборудования связи применяют также четырехконтактные резьбовые соединители.

*Новые стандартные корпоративные сети* создаются на основе гигабитной версии Ethernet. Для каждого порта две пары пакетов данных могут передаваться и приниматься одновременно. Передатчик сети GigaEthernet (GE) преобразует 8-разрядные блоки в 10-разрядные, а приемник восстанавливает исходный код из получаемых пакетов.

Коммутируемые сети с интерфейсом Ethernet на гигабитные скорости стали стандартными (2006 г.), и многие современные процессорные модули сбора данных и управления уже включают, как правило, два или более встроенных интерфейсов, а также 2...8 портов быстрых последовательных интерфейсов USB. Это

стало уже своего рода обязательным "джентльменским набором" встраиваемых модулей для обеспечения функций ввода/вывода данных и подключения компактных устройств памяти с быстрым доступом.

### Особенности сети Ethernet для автоматизации приборных систем измерения

Приборные Ethernet-сети LXI разработаны для измерительных систем как замена прежнего приборного байтового интерфейса GPIB с разделяемой средой связи. Сети приборов на основе Ethernet-архитектуры предложены консорциумом производителей контрольно-измерительных систем в 2004 г. Широкое использование преимуществ объединения небольшого числа приборов в сеть позволяет отказаться от аппаратных секций (крейтов) и перейти к прямому подключению компактных приборов с интерфейсом LXI к портам коммутаторов и маршрутизаторов или использовать адаптеры для связи с существующими стандартными приборными системами. Стандарт LXI охватывает физические требования, протоколы, интерфейсы и запуск процессов в сети. Различают три класса приборов: основной для всех приборов класс С поддерживает протоколы Ethernet и интерфейс LXI; класс В дополнен возможностью запуска прибора по локальной сети и поддержкой синхронизации; класс А удовлетворяет требованиям классов В и С и добавляет шину параллельного запуска. Физический уровень интерфейса LXI обеспечивает гибкость механической конструкции сети. Он позволяет соединять настольные приборы по передней панели, настенные приборы и встраиваемые модули без передней панели. В отличие от существующих устройств типа PXI/VXI устройства с таким сопряжением могут иметь любые размеры и должны быть самодостаточными.

Каждое устройство имеет источник питания, систему запуска, защиту и интерфейс. В случае применения источников постоянного тока напряжение питания источника должно быть 48В. Охлаждение с передней, задней и боковых сторон должно допускать установку таких модулей в стек. Разъемы подключения сигналов находятся на передней панели, а интерфейс сети, питания и шина запуска – на задней. Стандартом допускаются версии сети на 10 и 100 Мбит/с, но рекомендуется версия гигабитной сети GE с автоматическим выбором скорости передачи (по умолчанию) и с автоматическим распознаванием полярности кабеля сети. Каждый прибор в сети должен иметь постоянный сетевой MAC-адрес и IP-адрес с возможностью динамической конфигурации в сети по протоколу DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol).

Устройства должны легко идентифицироваться в сети с помощью сетевого протокола VXI-11. Как минимум приборы должны отправлять свой идентификатор при получении команды IDN. Предусмотрены два режима связи приборов LXI: программный (с драйверами IVI) и интерактивный (с web-браузером). В программном режиме приборы поддержива-

ют драйверы IVI (IVI-COM, IVI-C). В интерактивном режиме приборы используют web-страничку в формате HTML, которую можно просматривать с помощью любого браузера. Страничка должна включать номер модели и серийный номер прибора, описание прибора и его производителя, версию стандарта LXI, MAC-адрес и IP-адрес устройства, номер версии программной прошивки или ПО и синхронизацию времени (IEEE1588). С помощью информации на страничке пользователь может настраивать конфигурацию устройства в сети и имя хост-компьютера, а также получить описание прибора. Кроме того, рекомендуется иметь возможность проверки состояния прибора и наличие ошибок.

Класс В приборов должен иметь режим синхронизации по стандарту IEEE1588 (то есть встроенные часы) и схему ПЛИС, позволяющую сообщениям миновать стек протоколов TCP/IP. Устройства устанавливают единое время по самому точному генератору в сети. Точность установки времени <100 нс. Устройства могут передавать информацию и данные о времени без использования компьютера, занятого задачами обработки данных в РВ. Дополнительная шина запуска в устройствах класса А может соединять устройства по схеме последовательной цепи или звезды (или их комбинации). Многоточечная шина M-LVDS имеет дифференциальные пары для передачи сигналов низкого уровня напряжения и обеспечивает прохождение сигналов между приборами с малой задержкой (3нс/м). Данный интерфейс является заменой интерфейса GPIB (HP-IB), который используют уже более 35 лет.

Для встраиваемых в стойки приборов рекомендуются придерживаться спецификации IEC по полному и половинному размеру ширины стойки с высотой 2 RU (Rack Unit – нормирующая единица размеров для стоек) и выше. Также введен новый размер 1 RU половинной ширины для измерительных систем. Конструкция устройства интерфейса физически включает соединители для LXI, разъем питания (100...240В), шину запуска событий (класс А), интерфейс Ethernet 802.3 (RJ-45), входы для сигналов, индикаторы состояния LAN, питания. Размер устройства: ширина – полная или половина стойки IEC, высота в принятых единицах RU IEC.

#### Развитие коммутируемых гигабитных сетей 10 GE

Развитием гигабитной сети (GE) стали сети со скоростью 10 Гбит/с (10GE), описание которых первоначально было определено в виде предварительных рекомендаций (IEEE 802.ae), вошедших в стандарт (IEEE Std 802.3-2005). Скорость передачи данных в сетях GE возросла в 10 раз по сравнению с полудуплексным вариантом GE и в 100 раз – с быстрой сетью FE.

Новая версия включает только дуплексный режим передачи (исключив полудуплексный и монополюсный). Этот стандарт поддерживает не только LAN, но и WAN, т.е. обеспечивает инкапсуляцию пакетов Ethernet в иерархию виртуальных контейнеров сетей SONET/SDH STS-192с/STM-64с. Для этого наряду с постоянными

межкадровыми интервалами IFG дополнительно ввели переменные пробелы IFS. Кроме того, добавили биты в преамбулу пакетов. Для согласования средней скорости MAC-подуровня со скоростью передачи фреймов данных SONET/SDH Std-192/STM-64 расширили минимальные пробелы. Предусмотрены следующие новые интерфейсы:

- XGMII – рекомендуемый интерфейс на физическом подуровне для использования оборудования DTE со скоростью 10 Гбит/с без разъемов;

- XAUI – рекомендуемый интерфейс для расширения соединений MAC-подуровня с физическим уровнем без разъемов;

- XSBI – интерфейс на 16 разрядов для физической реализации сервисного интерфейса PMA для спецификаций 10GBase-R и 10GBase-W на физическом уровне.

Новая спецификация определила побитную, побайтную и покадровую передачу, но возможны и другие формы передачи. Интерфейс XGMII ориентирован на формат с шириной потока данных в 4 байта. Для управления данными (MDIO/MDC) используют одноразрядные передачи. Сервисный интерфейс ориентирован на 16-разрядные передачи. Интерфейс MDI использует побитную последовательную передачу с мультиплексированием (WDM) четырех несущих длин волн для версии 10GBase-LX или передачи для других типов PMD. Расширитель, работающий с низковольтными сигналами, обеспечивает независимые пути приема передачи данных по 32 разряда (4 потока по 8 бит) с кодированием 8В/10В.

Предусмотрены три версии спецификаций стандарта для 10 GE:

- 10GBase-X определяет семейство четырех потоковых передач (формат 4x4 бит) по медным парам проводов или по оптическому кабелю (10GBaseLX4) на четырех длинах волн (lane) с шагом 13,4 нм во втором окне прозрачности (1300нм) с кодированием потоков 8В/10В. Эта версия поддерживается на всех уровнях интерфейса (MAC, RS, XGMII, XGXS, XAUI, PCS, PMA, PMD). Последовательный поток данных MAC-подуровня делится на четыре потока (lane 0...3 подуровня RS) по одному байту, к каждому из которых добавляется 1 бит управления. Кодер перекодирует данные 8/10В (подуровень PCS), формируя четыре группы 10-битовых последовательностей (подуровень PMA), принимаемых в PMD и через MDI передающий на модуляторы четыре несущих.

- 10GBase-R – определяет передачи по оптическому каналу связи в трех окнах прозрачности – 850нм (S), 1300нм (L) и 1550нм (E) для спецификаций (10GBase-SR, -LR, -ER).

Здесь группы 10-разрядных последовательностей на подуровне XGXS декодируются и объединяются в группы из 66 бит и кодируются по схеме 64В/66В (64 бита данных плюс 2бита синхронизации), включая данные и управление. Данные затем скремблируются и разбиваются на 16-разрядные блоки данных (интерфейс XSBI в PMA) и передаются на подуровень



LAN PMD, и через интерфейс MDI поступают на модулятор оптической несущей. При приеме сигналов выполняется обратный процесс.

- 10GBase-W – определяет передачи по оптическому волокну в трех окнах прозрачности по спецификациям 10GBase-SW, -LW, -EW. Здесь потоки кодируются (64B/66B) для их инкапсулирования во фреймы (SONET, SDN). Затем формируется заголовок фреймов (подуровень WIS) и выполняется дополнительное скремблирование. В результате поток адаптируется к скорости передачи SONET.SDN.

Среда оптической связи соединяет интерфейсы MDI. Симметричная модель оптической связи включает канал связи и оптические соединители. Тракт передачи/приема данных 10GBase-X представлен реализацией 10GBase-LX4 функций между сервисными интерфейсами PMD и MDI, включая функции управления вводом/выводом данных (MDID). Передачи данных организуются в виде одного и многих потоков. Многопоточковый канал связи использует мультиплексирование (WDM) с разделением длин волн на четыре потока данных. Модулированные оптические несущие мультиплексируются в поток  $4 \times 3,125 = 12,5$  Гбит/с на выходе MDI, где после преодоления сигналом соединительного кабеля (2...5 м) выполняется контроль качества передачи.

На выходе оптического кабеля перед MDI контролируют принимаемые четыре потока оптических сигналов, которые после демultipлексирования выделяются и синхронизируются на приемнике MDI. Тракт передачи по спецификации 10GBase-R/W представлен шестью реализациями (10GBase-SR/RW, -LR/LW, -ER/EW) и осуществляет функции передачи/приема между PMD/MDI интерфейсами, включая функции управления устройствами ввода/вывода (MDIO). Это одноканальная связь без мультиплексирования. Исследуется также создание пассивной гигабитной оптической сети на базе GE (EPON) с увеличенным расстоянием до 20 км и мульти-сервисным обслуживанием. Создана рабочая группа 10GEPON для разработки стандарта гигабитной сети в виде двух конфигураций: симметричной (10 ПУ вверх/вниз) и несимметричной (вверх 1 Гбит/с и вниз – 10 GE) с числом разветвлений до 32 ед. и дальностью до 20 км. Одной из перспективных программ является создание и внедрение коммутируемых структур последовательного типа на основе гигабитных сетей.

#### Перспективы создания коммутируемых гигабитных сетей 100 GE

Перспективы создания 100-гигабитной сети Ethernet (100GE) впервые обсуждались на пленарном заседании Группы по изучению быстрых систем (IEEE 802.3, 2006 г.). Особенности новой технологии включа-

ют: обеспечение только сверхбыстрой дуплексной связи; сохранение на уровне сервиса формата кадров Ethernet 802.3, включая минимальный и максимальный размеры; обеспечение дальности передачи, равной 10 км, на одномодовом волокне и 100 м – на многомодовом волокне; поддержание скорости передачи 100Гбит/с на интерфейсах VAC/PLS. Эта технология предполагается как для локальных, так и для глобальных сетей. Рассматривают вопросы создания интерфейсов GE для передачи по транспортным сетям WDM и CDWM, использование многопротокольной коммутации по метке (MPLS) вместе с технологией GE для организации больших сетей, а также разработку развитых в новых сетях SDH метода GPF-инкапсуляции кадров для передачи по сетям SDH/WDM. Сверхбыстрый 100GE позволяет использовать его в многопроцессорных системах высокой производительности. Другой важной областью применений 100GE является создание кампусов с радиусом <10 км.



Сетевой адаптер Ethernet EDW-100 для последовательных устройств (Westermo)

#### Создание избыточных промышленных сетей автоматизации на основе Ethernet

На производствах интегрированные сети создаются на основе промышленных коммутаторов, объединяющих уровни управления ТП и предприятием, что выдвигает новые требования к ширине полосы частот, резервирования и протоколов связи высокой степени готовности сетей в промышленных условиях. В отличие от

офисных и корпоративных сетей, функционирующих в помещениях с устойчивой средой и малыми изменениями влажности и температуры, промышленные сети работают в условиях резких колебаний температуры, вибрации и электромагнитной обстановки.

Для жестких условий эксплуатации используют промышленные коммутаторы для установки на монтажную рейку в специальном шкафу или в корпусе шинной системы. Выбор типа коммутатора зависит от окружающей среды и условий применения. Связь в гигабитных сетях осуществляют по витой паре (IEEE 802.3ab) и оптоволокну (IEEE 802.3az). Самый большой пакет из 1522 байта передается за 13 мкс.

Звездообразная топология офисных сетей обычно формируется вокруг серверов в центральном здании, а промышленные сети распределяют по технологическим помещениям, при этом не допускаются длительные ремонт и простои. Звездообразная топология промышленных сетей создает риск отказа в центральном узле, при этом значительно возрастает протяженность кабелей из-за территориальной удаленности отдельных технологических участков. Все это приводит дополнительно к увеличению стоимости и риска электромагнитных наводок в неэкранированных витых парах. Оптоволокну прокладывают в короба вдоль кабелей среднего и низкого напряжения

питания. Но звездообразная топология может привести к проблемам "вещательного шторма", создающего нерабочий режим в сети.

Оптимальное планирование приоритетов позволяет использовать сети Ethernet в режиме РВ для передачи не только данных, но и аудио- и видеoinформации, включая IP-телефонию. Многие фирмы начали производить гигабитные коммутаторы, хотя в основном они поддерживают такую скорость только на два порта. Однако многие традиционные разветвители не могут использоваться в гигабитных сетях. Надежность сети обеспечивают разными методами введения избыточности на разных уровнях систем.

Протокол связующего дерева STP (Spanning Tree Protocol) создан для сетевых структур, объединяющих до 7 коммутаторов, при этом время реконфигурации сети составляет 30 с, а RSTP – более быстрая версия протокола выполняет переконфигурацию за 1с (при этом опасность возникновения замкнутой петли сохраняется). На практике часто применяются группировка и дублирование каналов связи, когда прокладка кабелей осуществляется не в один и тот же короб, а кабели группируют по частям (например, северная и южная части здания). Кроме того, возможно резервирование на уровне маршрутизаторов по протоколу VRRP (Virtual Router Redundancy Protocol). Однако оптимальным является метод резервирования отдельных каналов в кольцевых структурах промышленных сетей.

Управляемые промышленные коммутаторы обеспечивают время переключения на резервные каналы за 100...200 мс и позволяют создать резервируемые сети с диагностикой. Для ввода/вывода данных и связи с существующими подсистемами РВ используют протоколы автоматизации типа ProfiNet IO и EtherNet/IP.

Компания Hirschmann создала на основе Ethernet сеть HIPER-RING на базе кольцевой связи компактных двухпортовых коммутаторов (до 80 ед.), в которой деактивируется один из участков кольца. В случае обнаружения нарушения в сети этот канал восстанавливается в течение 200...300 мс, создавая обходные (резервируемые) пути связи. Время переключения сети снижено до 50 мс. HIPER-RING с двойным резервированием в кольце (время переключения 0,5 с) для гигабитной сети Ethernet из 1000 узлов применена для автоматизации пяти зданий аэропорта в г. Дрездене. Конфигурация коммутируемой сети выполняется на основе системы HP Open View, а для диагностики и контроля сбоев при-

меняют модуль HiVision. Комбинацией новых промышленных неуправляемых и управляемых коммутаторов, например, типа SMCS 8GT и SFN 8GT Factory Line достигнута высокая скорость передачи по всем портам.

Для передачи данных по гигабитному сегменту с витой парой на расстояние до 100 м требуется кабель с четырьмя парами проводов, удовлетворяющий требованиям каналов связи на менее 5-й категории, а для более высоких требований – кабели 6-й категории. Для передачи по оптоволокну на расстояние до 550 м используют многомодовый кабель (стандарт 1000 Base-SX), для больших расстояний (20 км) – одномодовый кабель (1000 Base-LX).

Среди примеров резервирования в кольцевых структурах промышленных сетей известны другие решения, например, избыточные кольцевые сети Turbo Ring и двойные дублирующие сети. Коммуникационные устройства изготавливают для установки в стандартные стойки в компактном виде для настольного применения или для установки на рейки вблизи промышленных объектов управления.



Ethernet-коммутатор  
EDS-508 MOXA

#### Выводы

1. Одним из основных направлений создания современных промышленных сетей автоматизации являются сети ProfiNet на основе быстрого Ethernet (FE) на 100 Мбит/с, вытесняющего технологические сетевые стандарты предыдущих поколений.

2. Для обеспечения совместимости с существующим промышленным оборудованием некоторые производители создают специальные устройства (сетевые мосты, шлюзы, серверы) для подключения традиционных устройств с интерфейсами RS-232/422/485 к сетям управления с протоколом Ethernet.

3. В новом поколении промышленных систем управления возможно применение гигабитных сетей (GE), при этом типичные решения основаны на коммутаторах с 2-гигабитными портами для последовательного подключения, создания кольцевых структур или многокольцевых топологий сетей, а в перспективе – создание широкополосные коммутируемые сети 10 GE для быстродействующих подсистем сбора и обработки сигналов в РВ.

4. Большой класс систем составляют коммутируемые встраиваемые модульные системы РВ нового поколения на основе современных микропроцессоров и новых коммутируемых сред типа PCI Express, Compact PCI Express, Advanced System Interconnect, Rapid IO, Infiniband и др.

*Виноградов Вячеслав Иванович – д-р техн. наук,  
Лауреат Премии СМ СССР, член Международной академии информатизации.*

*E-mail: vin-ab03@ttk.ru*