

ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382: 621. 395

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛАЗЕРНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ И КОРПОРАТИВНЫХ СЕТЯХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

Я.В. АЛИШЕВ, В.Н. УРЯДОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 12 апреля 2003*

Рассмотрены физические принципы действия основных компонентов лазерных информационных систем и сетей телекоммуникаций, а также теоретический анализ их предельных характеристик, синтез систем и корпоративных сетей на этой основе.

Ключевые слова: лазер, фазированные лазерные решетки, квантовый шум, волновое разделение каналов, оптический коммутатор, волновой конвертор, оптический мультиплексор, оптические усилители.

Введение

Известны огромные достоинства волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) по сравнению с системами передачи по кабелям с электрическими жилами, возможность реализации больших длин регенерационных участков, большой пропускной способности, высокой помехозащищенности, отсутствия несанкционированного доступа и др. Эти достоинства привели к возможности создания широкополосных корпоративных цифровых мультимедийных сетей телекоммуникаций (одновременной передачи речи, данных, организации видеоконференцсвязи, документооборота, высокоскоростного доступа в Интернет и т.п.).

Наиболее рациональной инфраструктурой мультисервисных корпоративных информационно-телекоммуникационных сетей, как показывает мировая практика, являются интерактивные многофункциональные волоконно-оптические системы кабельного телевидения. Архитектура таких сетей разнообразна, но в общем случае сеть состоит из двух основных уровней — транспортного и абонентского доступа. Учитывая, что в настоящее время в мире насчитывается около 1,5 млрд аналоговых телевизоров, экономически и технически целесообразным будет создание интерактивных (с обратным каналом) гибридных волоконно-коаксиальных сетей кабельного телевидения. Базовая головная станция в такой сети формирует совокупность всех передаваемых в обоих направлениях различных цифровых потоков по транспортным волоконно-оптическим линиям связи. Например, SDH (синхронная цифровая иерархия). Сеть абонентского доступа имеет гибридную волоконно-коаксиальную структуру (ГВКС). Применение ГВКС в качестве абонентского доступа обеспечивает решение задач многопрограммного телевизионного вещания, высокоскоростной доступ в Интернет, организацию цифровой телефонии, видеоконференцсвязь, передачу компьютерных данных, диспетчеризацию инженерного оборудования в домах и офисах пользователей, документооборот для государственного и делового сектора.

В статье приведены результаты исследований возможностей создания корпоративных сетей телекоммуникаций с использованием перспективных технологий в лазерных информационных системах.

Теоретический анализ

Операторы телефонных сетей занялись беспроводными системами, особенно системами мобильной связи (видя в этом большой спрос пользователей), и попыткой создания опытных зон цифрового наземного телевизионного вещания (см. Программу развития связи в Республике Беларусь на 2001–2005 г.). Подобные зоны, созданные в таких мегаполисах России, как Москва, С.-Петербург и Н. Новгород, показали несостоятельность наземного телевидения. "У эфирного вещания нет будущего — все перевернет система кабельного телевидения" — это слова Министра телерадиовещания РФ М.Ю. Лесина [1]. Действительно, в крупных городах разноэтажной архитектуры создаются "мертвые" зоны, не позволяющие жителям малоэтажных зданий принимать высококачественное изображение на свои телевизионные приемники.

Например, корпоративные сети обеспечивают передачу от 8 до 32 цифровых телевизионных каналов по волоконно-оптическим линиям в магистральной части. Для обмена другими цифровыми потоками с районными административными центрами (компьютерные данные, документооборот, видеоконференцсвязь, высокоскоростной доступ в Интернет) будут использованы один или несколько каналов. Для передачи телевизионных программ в областные и крупные районные центры (как в системе BIGFON — Германия) могут быть использованы имеющиеся в республике телекоммуникационные волоконно-оптические сети синхронной цифровой иерархии (SDH). Обеспечение большой дальности без регенерационных участков (без оптоэлектронного преобразования) может быть достигнуто двумя путями.

Первый путь — использование нелинейных свойств оптического волокна при вводе достаточно большой мощности лазерного излучения. Для получения такой мощности и создания режима солитонов возможно применение фазированных лазерных решеток (ФЛР). Уникальность солитона заключается в том, что на его параметры при распространении по ОВ оказывают влияние лишь оптические потери. Это позволяет использовать в качестве носителей информации в ВОСП сверхкороткие, порядка пикосекунд импульсы и рабочей длины волны 1,55 мкм, где потери в волокне минимальны (достигают величины менее 0,2 дБ/км). Солитон обладает относительной устойчивостью к различного рода возмущениям, связанным с неоднородностями и микроизгибами.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты [2, 3] показывают принципиальную возможность и экономическую целесообразность построения сверхвысокоскоростных солитонных ВОСП, технические характеристики которых значительно превышают параметры обычных систем. Реализация таких систем откроет возможность построения линий связи со скоростью передачи информации до нескольких терабит в секунду. С этой точки зрения источник непрерывной последовательности сверхкоротких импульсов на основе полупроводникового AlGaAsP гетеролазера представляется уникальным.

Второй путь увеличения длины регенерационного участка и резкого повышения пропускной способности сетей телекоммуникаций — использование волнового (спектрального) разделения каналов с применением оптических усилителей на промежуточных пунктах [4].

Возможности таких систем настолько впечатляющи, что позволяют говорить о достижении суммарной пропускной способности в линии связи на одном ВС на уровне до 10 Тбит/с и выше. По оценкам зарубежных специалистов, стремительный рост потребностей в объемах информационных потоков и новых услуг связи, и в первую очередь Интернет, потребует к 2005 г. общей полосы пропускания около 300 Тбит/с (предельная возможность волоконных световодов оценивается также этой величиной).

Рассмотрим подробнее эти пути.

Наши исследования показали [5], что, согласно теории связанных мод, поле ФЛР может быть представлено через поля отдельных лазеров в виде

$$E(x, y, z) = \sum_{m=1}^M A_m(z) E_m(x, y) e^{j\gamma_m z}, \quad (1)$$

где m — номер элемента ФЛР; M — общее число элементов; $A_m(z)$ — коэффициент, определяющий степень фазировки; $E_m(x, y)$ — поперечный профиль поля m -го элемента; γ_m — постоянная распространения вдоль полосы отдельного излучателя.

Общее поле ФЛР может быть найдено в результате решения задачи определения собственных значений и собственных функций системы связанных резонирующих элементов, т.е. системы уравнений

$$dE/dz = jQE, \quad (2)$$

где E — M -мерный вектор с составляющими $E_m = A_m e^{j\gamma_m z}$; Q — ленточная матрица с элементами $Q_{m,m} = \gamma_m$; $Q_{m,m+1} = K_{m,m+1}$, $Q_{m+1,m} = K_{m+1,m}$ и т.д.; $K_{m+1,m}$ и $K_{m,m+1}$ — коэффициенты связи между соседними элементами.

Решение задачи (2) — собственные функции

$$E^{(v)}(z) = E^{(v)}(0) \cdot e^{j\sigma_v z} \quad (3)$$

носят названия супермод; σ_v — продольная постоянная распространения v -й супермоды.

При некоторых приближениях ($K_{m,m+1} = K_{m+1,m} = K$, $\gamma_m = \gamma$ и $m=1, \dots, M$) решение уравнений (2) имеет вид

$$E_m^{(v)}(z) = \sin\left(\frac{m\pi v}{M+1}\right), \quad (4)$$

$$\sigma_v = \gamma + 2K \cos\left(\frac{\pi v}{M+1}\right). \quad (5)$$

В результате решения задачи определяется спектр генерируемых колебаний, причем в нем может оказаться несколько супермод, отличающихся длиной волны λ (с интервалами $\Delta\lambda$ — ширина спектра излучения). Практически величины $\Delta\lambda$ (при $\lambda \cong 1,3-1,55$ мкм) составляют от десятых долей до нескольких ангстрем. Все конструктивные модификации ФЛР направлены на подавление супермод высших типов так, чтобы доминировала низшая супермода (O^0 -мода), обеспечивающая синфазное возбуждение всех элементов, минимальное число дифракционных лепестков и ширину главного лепестка (нулевого порядка), близкую к дифракционному пределу $\lambda! Md$ (где d — межэлементное расстояние).

Появление инжекционных лазеров полосковой геометрии привело к разработке технологий, позволяющих создавать ФЛР как единый прибор на общей подложке с минимально возможными расстояниями, а неэквидистантное размещение излучателей, т.е. изменение величины шага между излучающими элементами, позволит осуществить когерентное сложение мощностей источников и существенно сузить диаграмму направленности при сравнительно малом числе элементов.

Решение задачи получения однолепестковой диаграммы направленности может быть выполнено применением метода теории стохастической аппроксимации, который может состоять, например, в размещении излучателей, заданных полиномами интерполяционных формул Лагранжа, Чебышева, Лежандра и т.п.

Если обозначить N — число излучателей опорной решетки (из условия единственности); M_0 — реальное число лазеров в этой же решетке при неэквидистантном размещении, то выражение для уровня боковых лепестков может быть определено из [6]:

$$F_{\text{дб}}(\partial A) \approx -10 \lg \frac{M_0}{4} + 10 \lg \left(1 - \frac{\lambda}{2d_{\text{нб}}} \right), \quad (6)$$

где

$$d_{\text{ср}}/\lambda \approx \sqrt{S/M_0\lambda^2}, \quad (7)$$

$d_{\text{ср}}$ — средняя величина шага решетки; S — площадь решетки. Из (6) и (7) находим:

$$F_{\text{аз}}(\text{дБ}) \approx -10\lg \frac{M_0}{4 - 2\sqrt{\frac{M_0\lambda^2}{S}}}. \quad (8)$$

Пользуясь формулами (6)–(8), можно показать, что при заданном значении $F_{\text{бл}}$ [20 дБ необходимо около 400 излучателей. Снижение требований по уровню $F_{\text{бл}}$ приводит к резкому уменьшению необходимого числа инжекционных лазеров. Так, при $F_{\text{бл}}$ [–10 дБ потребуется всего лишь 42 излучателя.

Наиболее распространенными в настоящее время являются ФЛР, полученные на основе полосковых низкороговых AlGaAs-гетероструктур, в которых при ширине полосок 3 мкм и шаге 10 мкм в 10-элементных линейках достигнуто когерентное сложение полей с расходимостью, близкой к дифракционной [7], мощность излучения в непрерывном режиме до 600 мВт, в импульсном режиме (длительность импульсов 150 нс) — до 1 Вт при КПД 36 %.

Перейдем к рассмотрению решения вышеизложенных задач по второму пути.

Достижения резкого увеличения пропускной способности лазерных информационных систем стали возможны благодаря базовым компонентам систем и сетей волнового разделения каналов. Это, прежде всего, многоволновые полупроводниковые лазеры (ППЛ) с распределенной дифракционной решеткой, принципы действия которых показаны на рис. 1.

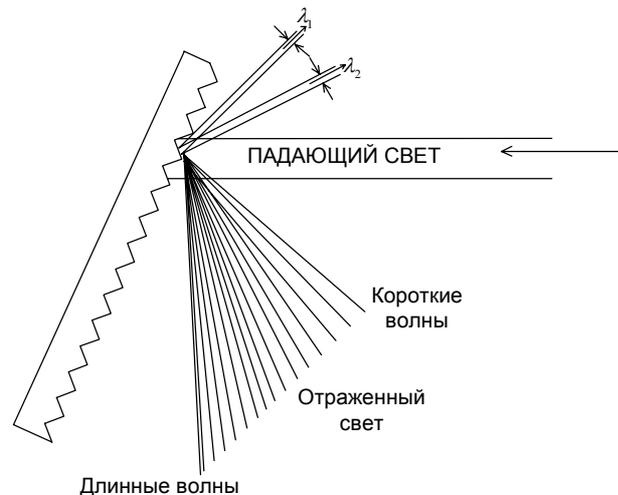


Рис. 1. Принцип действия многоволнового полупроводникового лазера с распределенной дифракционной решеткой

Дифракционная решетка (ДР) представляет собой зеркало, на которое нанесены штрихи с очень малым расстоянием d между ними, составляющими 0,8 мкм (от 600 до 1200 линий на 1 мм). При попадании на поверхность решетки параллельного луча света с определенной длиной волны λ каждый штрих, отражая его, создает цилиндрическую волну с новыми (дискретными) направлениями лучей, которые зависят от длины волны. Наиболее важной особенностью ДР является способность дифрагировать (распределять) различные длины волн под различными углами.

Оптическое мультиплексирование и демультиплексирование основано на комбинированных или расположенных последовательно друг за другом узкополосных фильтрах. Для фильтрации применяют тонкопленочные структуры.

В настоящее время наибольшее распространение получили устройства оптического мультиплексирования и демультиплексирования с частотным интервалом между отдельными

каналами в 100 ГГц (~0,8 нм). Появляющиеся в последнее время мультиплексные устройства могут обеспечить большую плотность размещения каналов с частотным интервалом 50 ГГц и меньше [8]. Современные оптические мультиплексоры создаются преимущественно на основе тонкопленочных фильтров и немного реже на матрицах волноводных.

Тонкопленочный фильтр (рис. 2) состоит из нескольких слоев прозрачного диэлектрического материала с различными показателями преломления, нанесенных последовательно друг за другом на оптическую подложку. На каждой границе раздела между слоями из-за различия их показателей преломления часть падающего светового луча отражается обратно. Этот отраженный свет усиливает или подавляет падающий (отраженная волна интерферирует с падающей) в зависимости от длины волны.

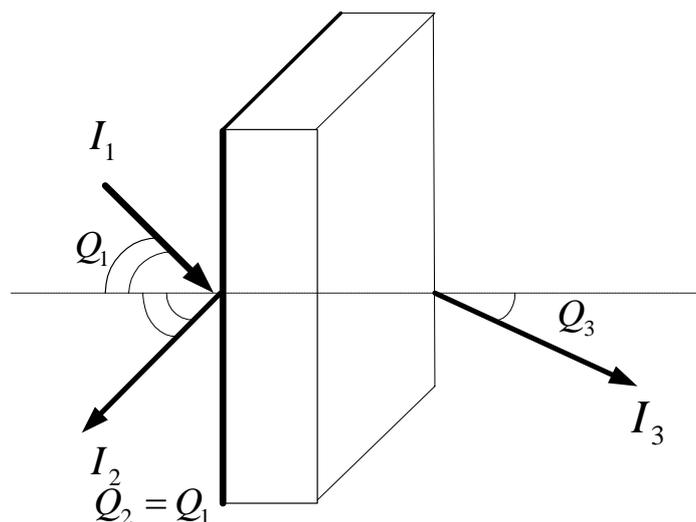


Рис. 2. Прохождение светового луча через тонкопленочный фильтр

Одним из наиболее важных компонентов систем и сетей с волновым разделением каналов являются коммутаторы длин волн оптических сигналов. На рис. 3 представлена схема поляризационного оптического светоправляемого коммутатора оптических сигналов. Переключатель выполнен на кристалле МДПДМ-структуры 1 и $p-n$ -переходом, содержащим туннельно прозрачные слои 2 и токопроводящие покрытия 3. К структуре прикладывается постоянное электрическое напряжение в запирающем $p-n$ -переходе направлении. При этом все электрическое поле концентрируется в узкой области $p-n$ -перехода. После поляризатора 4 коммутируемый световой поток проходит через область сильного поля в $p-n$ -переходе, где его плоскость поляризации поворачивается на 90°, и после отклоняющегося элемента 5 (двоякопреломляющая призма) прошедший свет попадает в канал неотклоненного луча (А). Импульс отклоняющего света, поглощаемый в полупроводнике, воздействует на структуру со стороны электрода, прилегающего к $p-n$ -переходу, вызывает переброс электрического поля в область базы кристалла. Соответственно на выходе коммутатора световой поток попадает в канал (Б) отклоненного луча. На данной схеме длина волны коммутируемого луча равна 1,3 мкм, а управляющего — 0,82 мкм.

Не менее важным из основных узлов современных волоконно-оптических систем связи с волновым разделением каналов является оптический усилитель. Создание широкополосных оптических усилителей (наряду с другими элементами) позволило в конце 90-х годов создать экспериментальные волоконно-оптические системы связи со спектральным мультиплексированием более ста каналов и достичь скорости передачи информации более нескольких терабит в секунду [9, 10].

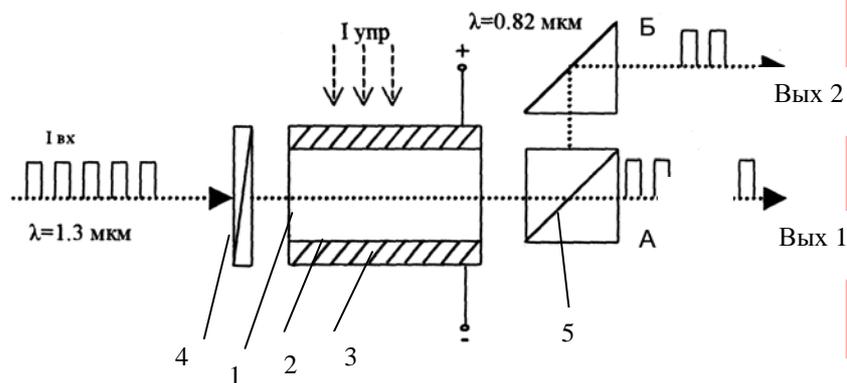


Рис. 3. Схема поляризационного оптического светоуправляемого коммутатора оптических сигналов

Оптические усилители, аналогично лазерам, используют принцип индуцированного излучения. Существует несколько различных типов оптических усилителей.

Наиболее широко распространены два типа оптических усилителей: полупроводниковые и волоконно-оптические. Схема полупроводникового усилителя представлена на рис 4. Здесь I — активная зона, представляющая собой лазерный полупроводниковый кристалл с "накачкой" электрическим током. Такая среда называется инверсной и может усиливать интенсивность излучения с резонансной частотой. Коэффициент усиления при этом пропорционален току накачки.

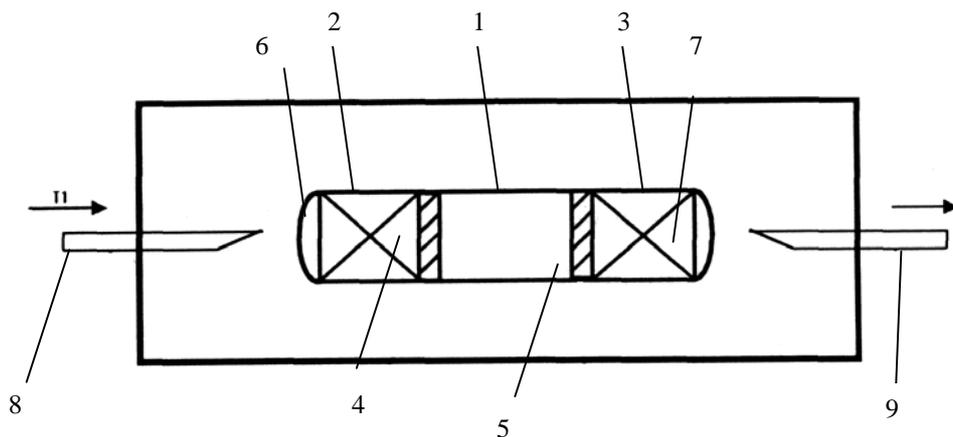


Рис. 4. Схема полупроводникового усилителя

В полупроводниковых усилителях в отличие от лазеров на входную и выходную грани полупроводникового кристалла 1 нанесены просветляющие многослойные покрытия 4 и 5 на рабочую длину волны. Эти покрытия фактически являются оптическими полосовыми фильтрами. Они необходимы для исключения положительной оптической обратной связи, которая может превратить усилитель в генератор, т.е. в лазер. Для этой цели служат оптические изоляторы 2 и 3 . Также для уменьшения возможности попадания отраженного излучения торцы волокон 8 и 9 выполняются скошенными. Полусферические линзы 6 и 7 служат для фокусирования луча. Отметим, что в современных полупроводниковых оптических усилителях в качестве активной среды применяются так называемые квантово-напряженные структуры, практически нечувствительные к поляризации усиливаемого излучения.

В волоконно-оптических усилителях активной средой служит оптическое волокно, легированное ионами редкоземельных металлов. Такие волокна аналогичны активным кристаллам твердотельных лазеров, являющихся материалом для создания инверсной среды. Усиление или поглощение световых волн в такой среде обусловлено его квантовомеханическими свойствами. Схема усилителя представлена на рис. 5. Основным его

элементом является активное волокно *1*. При невозбужденном энергетическом состоянии активного волокна резонансное взаимодействие света с веществом приводит к поглощению, а при возбужденном состоянии среды происходит экспоненциальное усиление интенсивного света. Поддержание среды в возбужденном состоянии производится путем ввода в среду оптического излучения (накачки) более высокочастотного, чем усиливаемое излучение, а мощность накачки должна существенно превышать мощность усиливаемого излучения.

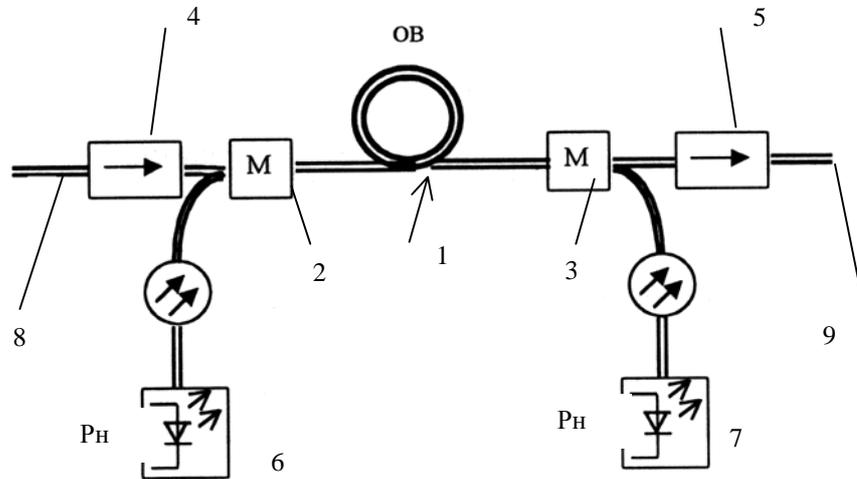


Рис. 5. Схема оптического усилителя

Чтобы ввести (и вывести) оба излучения через торец активного волокна *1*, применены волоконно-оптические мультиплексоры 2 и 3. Для исключения положительной обратной связи из-за отражений от торцов волокон установлены оптические вентили 4 и 5. Накачка осуществляется в один или оба входа мультиплексоров 2 и 3 излучения от лазеров накачки 6 и 7. В зависимости от назначения усилителя (прием или передача) накачка может осуществляться как в оба торца активного волокна (если усилитель включен на передающей стороне), так и в один из торцов (в этом случае усилитель включен на приемной стороне). В соответствии с этим выбирается и длина активного волокна (от 1 до 10 м).

Минимальная мощность оптического усилителя ограничивается квантовыми шумами. Эта мощность на единицу частотного интервала для оптического усилителя представлена уравнением [11]

$$P_{\text{éä.ø}} = 2P_{\phi} (G - 1)h\nu, \quad (9)$$

где $P_{w}/1$ — фактор случайного шума; G — внутреннее усиление; h — постоянная Планка; ν — оптическая частота.

Показатель внешнего усиления шума (в дБ) определяется выражением:

$$P_{\text{áí.ø}} = 10 \log \left[2P_{\phi} - \frac{2P_{\phi} - 1}{G} \right] + \eta, \quad (10)$$

где η — затухание входного соединения усилителя (в дБ).

Если мы сделали упрощенные предположения, что суммарная выходная мощность (включая накопленную мощность квантового шума) равна после каждого усилителя, и что усиление ГЭЭ1, тогда отношение сигнал/шум определяется аппроксимированием:

$$P_{\text{ñ/ø}} = P_{\text{ááö}} - L - P_{\text{áí.ø}} - 10 \log n - 10 \log (h\nu\Delta\nu_0), \quad (11)$$

где $P_{\text{вых}}$ — выходная мощность (на канал) в дБ; L — диапазон затухания между усилителями в дБ; n — количество интервалов в линии; $\Delta\nu_0$ — оптический диапазон рабочих частот.

Здесь мы предположили, что все (диапазонные–интервальные) затухания равны.

Таким образом, на основе цифровой волоконно-оптической технологии могут быть созданы системы телевидения высокой четкости, которые будут применяться как в пределах студии, так и вне ее, для связи между студиями и телецентрами, для передачи на головные станции кабельного телевидения, а также для организации магистральных сетей. При использовании волоконно-оптических систем, обеспечивающих скорости передачи гигабитового диапазона, повсеместно сольются в единый цифровой поток телевидение, Интернет и телефония, поэтому конвергенция технологий и требования абонентов к качеству услуг приведут к интенсивному развитию корпоративных сетей на базе кабельного телевидения.

Корпоративная сеть телекоммуникаций с предоставлением широкого набора услуг (передачи компьютерных данных, речи, видеоизображений, организацией видеоконференцсвязи, документооборота, высокоскоростного выхода в Интернет и т.п.) должна обеспечивать информационную безопасность, прежде всего защиту от несанкционированного доступа.

В настоящее время сфера информационной безопасности достаточно уязвима, т.е. может быть подвергнута разрушающему воздействию со стороны вероятных политических и экономических противников. Это вызвано, кроме других обстоятельств, тем, что белорусские предприятия не производят необходимый спектр информационных и телекоммуникационных аппаратно-программных средств, который обеспечил бы высокий уровень технологической независимости от зарубежных стран.

В БГУИР разработан аппаратно-программный комплекс управления смешанным трафиком (видеоизображение, компьютерные данные, цифровая речь и др.), удовлетворяющий требованиям МСЭ-Т [12], в лазерной информационной системе, используемой на Минской телевизионной сети кабельного телевидения.

LASER INFORMATION SYSTEM PERSPECTIVE TECHNOLOGIES IN CORPORATE TELECOMMUNICATION NETWORKS

Y.A. ALISHEV, V.N. URYADOV

Abstract

Basic principles of natural philosophy in laser information telecommunication system components are reviewed. Their ultimate specifications are figured out. Telecommunication Corporate Systems designing with the components above are considered.

Литература

1. *Припачкин Ю.И.* // Broadcasting. 2003. № 1. С. 8–16.
2. *Захаров В.Е.* // ЖЭТФ. 1971. Т. 61. С. 118–134.
3. *Hasegawa A., Tappert F.* // Appl. Phys. Lett. 1973. Vol. 23. № 3. P. 142–144.
4. *Алишев Я.В.* // Изв. Белорус. инж. акад. 2002. № 2. С. 28–31.
5. *Алишев Я.В., Урядов В.Н., Шимановский Н.О., Ямайкин В.Е.* // Весці НАН Беларусі. 1999. Сер. фіз.-тэхн. навук. № 4. С. 50–54.
6. *Алишев Я.В., Хацкевич О.А., Ямайкин В.Е.* // Докл. АН Беларусі. 1992. Т. 36. С. 806–809.
7. *Carlson N.V. et al* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 52. № 12. P. 939–941.
8. *Иванов А.Б.* // Волоконная оптика (компоненты, системы передачи, измерения). 1999. Сайрус системс.
9. *Потапов В.Т., Егоров Ф.А.* // Фотон-экспресс. 2000. № 2. С. 10–12.
10. *Заркевич Е.А., Павлов Н.М., Скляр О.К.* // Электросвязь. 2000. № 6. С. 12–14.
11. Рекомендация G. 692 МСЭ-Т "Оптические интерфейсы многоканальных систем с оптическими усилителями".
12. Рекомендация G. 784 "Требования к управлению сетью".