

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКНОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ  
СВЕТОВЫХ ВОЛН**

535.318

**ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ \*)***С. Бухсбаум*

*Поразительная способность света передавать информацию, распространяясь по тонким, почти невесомым стеклянным волокнам, открывает новые перспективы в обработке сигналов, отображении информации и средствах массовой коммуникации.*

Сто лет назад А. Г. Белл изобрел телефон. Вскоре после этого Белл изобрел также фотофон, новинку, которая передавала человеческую речь с помощью пучка света. Белл, испытывавший большой интерес к проблемам борьбы с глухотой, искал способы получения «видимой речи». Он приложил большие усилия, чтобы продемонстрировать свой фотофон, используя в качестве источника света Солнце, а в качестве модулятора — схему, подобную схеме Рубе — Голдберга. Хотя фотофон работал, Белл разумно отказался от него в пользу медного провода и электрического сигнала.

Современный интерес к связи на световых волнах пробудился полтора десятилетия назад после изобретения лазера, источника когерентного излучения, о котором раньше могли лишь мечтать наши предшественники — ученые и инженеры в области передачи информации. Последующие работы показали поразительную способность когерентного света нести информацию; началась гонка за возможностью эксплуатировать этот новый источник в области связи — гонка, подобная той, которая велась после второй мировой войны за эксплуатацию

*Почему «световые волны»?*

Мы применяем термин «связь на световых волнах» для описания методов использования света как носителя информации. Этот термин согласуется с существующей терминологией в области средств коммуникации, такой, как «ультракороткие и миллиметровые волны». Из нашего опыта, особенно обсуждая тему публикуемых статей с неспециалистами, мы обнаружили, что термин «оптическая» коммуникация часто нуждается в дальнейших уточнениях, так как его разговорное употребление включает также явления и функции, относящиеся к зрению. «Световые волны» более предпочтительны из-за своей точности, описательности и, мы надеемся, большей понятности.

\*) B u c h s b a u m S. J. An Overview.— Phys. Today, May 1976, v. 29, No. 5 (Special issue: Lightwave Communications), pp. 23—25.— Перевод Р. Г. Маева и А. С. Семенова.

© American Institute of Physics, Inc., 1976.

© Перевод на русский язык,  
Главная редакция физико-математической  
литературы издательства «Наука»,  
«Успехи физических наук», 1978.

ультракоротковолновых источников. Однако очень быстро стало очевидно, что один лишь источник света не может создать систему коммуникации, в особенности если он столь громоздок, неэффективен и неудобен, какими были первые лазеры. Он должен работать совместно с целым рядом других приборов: модуляторов, приемников, фильтров, усилителей, регенераторов; все они должны быть специально подобраны и сочетаться друг с другом, и, что наиболее важно, необходимо иметь



Рис. 1. Лазерный свет, выходящий из концов этих стеклянных волокон, прошел по кабелю, намотанному на катушку, часть которой видна внизу.

Такой 650-метровый кабель проложен в подземном трубопроводе для испытаний системы коммуникации на световых волнах в лаборатории фирмы «Белл» в Атланте. С помощью каждого из волокон, расположенных в ряд  $12 \times 12$  и способных пропускать поток цифровой информации со скоростью  $44,7 \text{ Мбит/сек}$ , этот кабель может обслуживать более 40 000 телефонных и других устройств, передающих речь. (Фото Э. Хартмана, с разрешения АТТ и лабораторий «Белл».)

надежную передающую среду. В некоторых приложениях атмосфера может играть роль передающей среды, но капризы погоды делают ее непригодной в тех случаях (например, в телефонии), где надежность является первостепенно необходимым качеством. Так, в частности, туман непрозрачен на большом расстоянии даже для лазерного света.

О современном уровне разработок в области связи на световых волнах, которого уже достигла промышленность, можно судить по фотографии на рис. 2, снятой при испытаниях макета системы в лаборатории фирмы «Белл» в Атланте.

В статьях этого специального выпуска «Physics Today», обсуждаются различные элементы систем коммуникации на световых волнах, включая и выбранную на сегодня передающую среду — оптическое волокно, или, как мы теперь предпочитаем говорить, волоконный световод (см. статью А. Чайновета \*)). Однако прежде чем углубиться в рассмотрение этих

\*) Перевод в этом номере УФН, с. 614. (Прим. ред.)

проблем, остановимся кратко на вопросе, чем примечательна связь на световых волнах и на некоторых общих свойствах соответствующих систем.

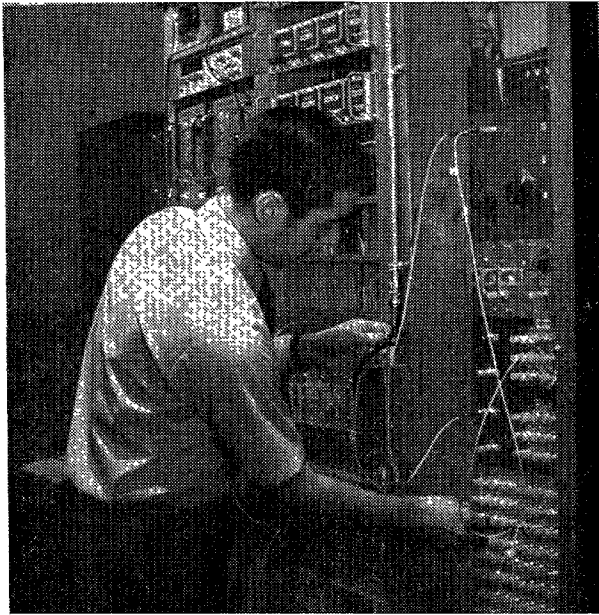


Рис. 2. При полевых испытаниях связи на световых волнах, проводимых М. Баклером в лаборатории фирмы «Белл» в Атланте, используются отрезки волоконного кабеля для присоединения к волокну из основного кабеля.

Каждое из волокон этого кабеля оканчивается оптическими переходными частями, колпачками которых являются «кнопки» в правой части передней панели. В оборудовании, которое смонтировано в стойке, входят регенераторы, усиливающие и преобразующие цифровые световые сигналы,

На рис. 3 показана эволюция несущей сети в «Белл систем» за последние три десятилетия. (Говоря о «несущей сети», мы имеем в виду ту часть сети,— главным образом внутренние переключющие устройства в центральных конторах,— в которой, из соображений эффективности и экономии, телефонные переговоры и другие методы передачи информации группируются вместе и передаются с помощью электромагнитного носителя, например, радио на УКВ.) Другие сети коммуникаций в США и вообще в мире испытывают аналогичный рост.

Тем не менее, несмотря на то, что происходит угрожающий информационный рост, коммуникационный взрыв пока еще находится в зачаточном состоянии. Хотя существующие средства коммуникаций — радио на УКВ, коаксиальные кабели и двухжильные провода — могут быть использованы

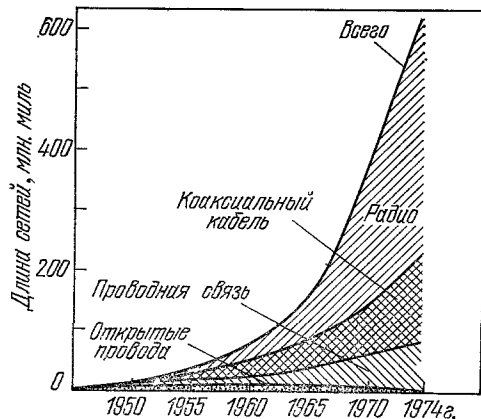


Рис. 3. Рост несущих коммуникационных сетей в «Белл систем» (другие сети испытывают аналогичный рост).

Новые способы, такие, как связь на световых волнах, должны начать конкурировать по экономичности с устройствами, используемыми в настоящее время: радио на УКВ, коаксиальные и двухжильные проводные кабели.

для удовлетворения любых будущих запросов, эти системы обладают многими ограничениями, существенным из которых является их стоимость. Отсюда возникло и внимание к новым средствам коммуникации — спутникам, миллиметровым волноводам и коммуникционным системам на световых волнах. Необходимо учитывать, что в любом случае новая коммуникационная техника, чтобы получить широкое распространение в условиях свободного рынка, должна быть готовой к экономической конкуренции с существующей техникой — радио, кабелями и проводами. Но именно потому, что возможности и перспективы здесь огромны, изобретение и разработка в 60-е годы источников света на полупроводниках, а также перспективы создания световодов с низкими потерями, сильнейшим образом стимулировали работы, связанные с передачей информации на световых волнах, практически в каждой лаборатории мира, имеющей хотя бы отдаленное отношение к проблемам коммуникации.

### ОШИБКИ И НАДЕЖНОСТЬ

Обязательными элементами любой системы связи являются передатчик, передающая среда и приемник. Для передачи на волоконных световодах передающим источником является инжекционный лазер или светозлучающий диод с высокой яркостью. Сердцем приемника является фотодетектор. Рабочие свойства систем коммуникации на световых волнах определяются:

— средней световой мощностью, которая может быть введена в волокно от источника;

— потерями и дисперсионными характеристиками волокна;

— чувствительностью фотодетектора.

В принципе, чтобы принудить свет переносить требуемую информацию, существует множество способов модуляции и кодирования. На практике для световодных систем вполне подходящими является бинарная модуляция источника света по принципу «включен — выключен» и детектирование по квадратичному закону. Разумеется, такая модуляция требует, чтобы вся аналоговая информация, как, например, звуковой или видеосигнал, предварительно подверглась цифровому кодированию. Таким образом, информационное содержание переносится вдоль волокна в

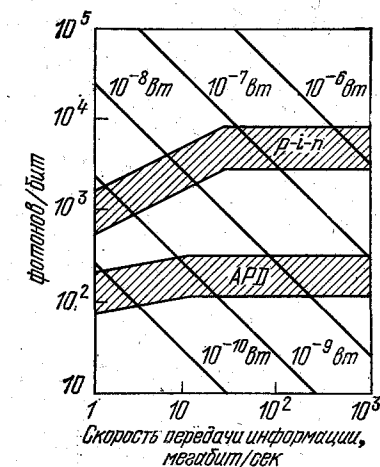


Рис. 4. Заштрихованные области показывают чувствительность фотоприемников с APD (лавинно-пролетный детектор. — Прим. перев.) и без ( $p-i-n$ )-лавинного усиления.

Диагональные жирные линии указывают пороговую мощность за импульс при 0,82 мкм. (Из работы Li T. — Bell Lab. Record, Sept. 1975.)

виде потока световых импульсов, а приемник детектирует эти импульсы с малой ошибкой или вообще без ошибки. Если бы приемник имел 100%-ную эффективность, предел среднего за импульс (и, следовательно, на 1 бит информации) числа фотонов, необходимого для того, чтобы иметь данную вероятность ошибки,  $P_e$  устанавливался бы собственными флуктуациями (квантовым шумом) приемника, например,  $n = 10,5$  для  $P_e = 10^{-9}$ . Существующие в настоящее время фотоприемники на один или два порядка менее чувствительны, как это видно из рис. 4. Разумеется, чувствительность приемника определяет нижний предел уровня оптической мощности, которая должна поступить на приемник и быть детектирована.

Для работы в качестве оптических передатчиков как светоизлучающие диоды, так и инжекционные лазеры могут быть изготовлены с излучающей площадью по размерам, совпадающей с волокном, и с выходной мощностью в несколько милливатт (см. статью Г. Крессела и его сотрудников \*)). Благодаря значительно более высокой когерентности лазера по сравнению со светодиодом, большая часть его мощности может быть довольно легко введена в волокно. Светодиоды же испускают свою энергию более или менее однородно во всех направлениях, так что в волокне может быть введено обычно менее  $0,05 \text{ мвт}$  оптической мощности. Однако платой за большую эффективность лазера будет большая сложность его самого и схемы питания, обеспечивающей стабильный режим генерации.

Пользуясь указанным выше значением мощности источников и приведенными на рис. 4 значениями чувствительности приемников, легко оценить величину максимально допустимых потерь между приемником и передатчиком или между ретрансляторами. (Ретранслятор — это скомпонованные в единую схему приемник и передатчик с усилением, фактически обеспечивающим восстановление сигнала между ними.) Мы видим, что эта величина зависит от желаемой скорости передачи информации (бит в секунду). При условии высокой скорости (сотни мегабит в секунду), простом  $p-i-n$ -детекторе и светодиоде этот допуск столь мал, что наш способ не представляет серьезного практического интереса, разве лишь для очень коротких расстояний. Для низкой скорости передачи информации (несколько  $\text{Мбит/сек}$ ), наличии инжекционных лазеров и лавинных фотоприемников, эта величина огромна (примерно  $10^7$ , что эквивалентно  $70 \text{ дб}$ ). Разумеется, возможны и другие комбинации, которые фактически более реальны, чем эти два крайних случая. Практически допустимые величины потерь лежат в диапазоне от 40 до 60  $\text{дб}$ .

Исходя из такого допуска, мы можем сразу же получить максимально допустимое расстояние между приемником и передатчиком, разделив эту величину на потери в волокне (измеренные в децибелах на километр), конечно, учитывая при этом поправку на потери, возникающие при объединении волокон в кабель, сращивании кабелей при других внутренних соединениях. Например, при допуске в 50  $\text{дб}$  и потерях в световодном кабеле 10  $\text{дб/км}$  максимальное расстояние между ретрансляторами 5  $\text{км}$ .

При небольшой скорости передачи информации расстояния определяется только полными потерями в волоконном кабеле. С увеличением скорости начинает играть роль дисперсия, которая в дальнейшем может ограничить способность системы передавать информацию. Для многомодовых волокон со скачком показателя преломления (обычно около 1%), в которых свет распространяется, испытывая полное внутреннее отражение, дисперсия мод ограничивает скорость передачи информации величиной, примерно равной 20  $\text{Мбит} \cdot \text{км/сек}$  (т. е. мы можем, например, передавать информацию со скоростью 4  $\text{Мбит/сек}$  на 5  $\text{км}$ ).

В многомодовом волокне с плавным изменением показателя преломления, величина указанного допуска может достигать нескольких  $\text{Гбит} \times \text{км/сек}$  и зависит от точности изменения показателя преломления. В любом случае при очень высоких скоростях расстояние между ретрансляторами определяется прежде всего дисперсией, а не потерями. В одномодовом волокне, в котором определяющей величиной являются потери, а не дисперсия мод, допуск составляет примерно 50  $\text{Гбит} \cdot \text{км/сек}$ . В многомодовых волокнах эта цифра может несколько возрасти за счет взаимодействия мод в волокне, в котором на расстояниях больше длины взаимодействия случайная дисперсия возрастает как квадратный корень расстояния.

\*) Перевод в этом номере УФН, с. 625. (Прим. ред.)

## ЭКОНОМИЧНОСТЬ

Таким образом, перед конструктором системы связи на световых волнах встает задача так подогнать эти и другие параметры, чтобы обеспечить оптимальное согласование между потерями, дисперсией, мощностью имеющихся источников и чувствительностью приемников. Следует заметить, что в любом таком расчете большое значение имеют соображения экономичности и реальности выбора.

Каковы наиболее привлекательные свойства систем связи на световых волнах? Волокна миниатюрны, малы и волоконные кабели; это создает значительные потенциальные преимущества при прокладке их в городских коллекторах, которые сейчас уже переполнены и место в которых стоит дорого. Волокна легки по сравнению с медной проволокой; это важное достоинство в тех случаях, где имеет значение вес, например, в самолетах, ракетах, спутниках. В волокнах отсутствует металл, следовательно, они полностью избавлены от электрических наводок. Очень слабая зависимость оптических потерь в волокнах от частоты и температуры упрощает электронную схему приемника: не требуется никаких коррекций. И наконец, совсем не в последнюю очередь имеется надежда, — более того, уверенность, — что эти системы окажутся более дешевыми, чем существующие до сегодняшнего дня и основанные на проводах, кабелях или радио.

Исследования, проведенные до сих пор, как показано в других статьях этого выпуска, уже подтвердили техническую осуществимость волоконной связи. Остается продемонстрировать ее экономическую реальность. Оптическая электроника пока развивается своим путем, и трудно преувеличить перспективы, которые она открывает в области обработки сигналов и отображения информации. Некоторые ученые утверждают, что оптическая электроника произведет эффект, аналогичный тому, который имели транзисторы в 50-х и интегральные схемы в 60-х годах. Если даже осуществится лишь часть этих предсказаний, результаты полностью возместят нынешние капиталовложения в эту новую область техники.