

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ**ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ
СВЕТОВЫХ ВОЛН**

535.318

ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ *)***C. 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 соглашается 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.

*) Buchsbaum 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.

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 коммуникаций на световых волнах в лаборатории фирмы «Белл» в Атланте. С помощью каждого из волокон, расположенных в ряд 12×12 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.

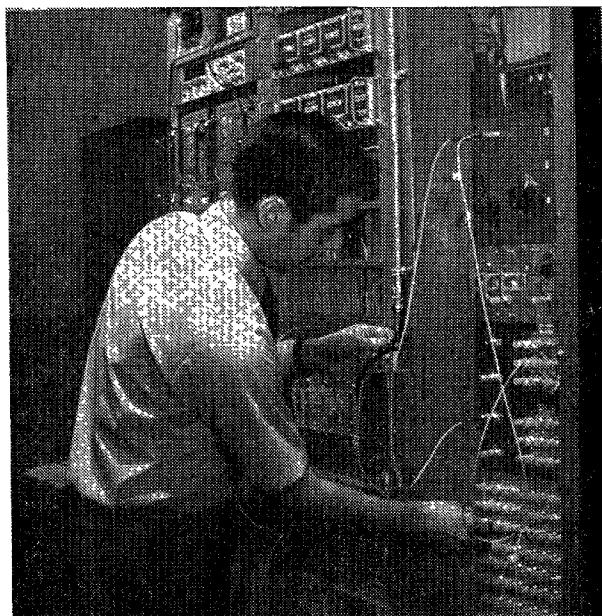


Рис. 2. При полевых испытаниях связи на световых волнах, проводимых М. Баклером в лаборатории фирмы «Белл» в Атланте, используются отрезки волоконного кабеля для присоединения к волокну из основного кабеля.

Каждое из волокон этого кабеля оканчивается оптическими переходными частями, колпачками которых являются «кнопки» в правой части передней панели. В оборудование, 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 переключающие 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 двужильные провода — могут быть использованы

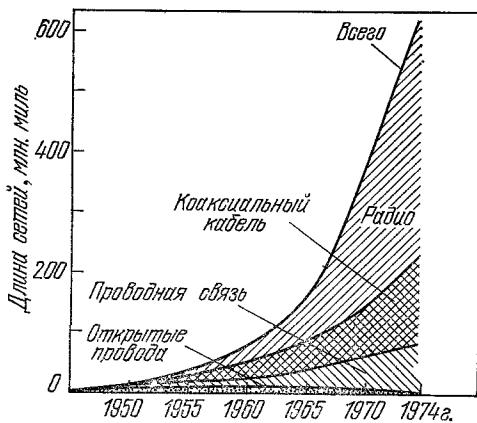


Рис. 3. Рост несущих коммуникационных сетей в «Белл систем» (другие сети испытывают аналогичный рост).

Новые способы, такие, как связь на световых волнах, должны начать конкурировать по экономичности с устройствами, используемыми в настоящее время: радио на УКВ, коаксиальные и двужильные 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 коммуникационным 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 светозилучающий 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 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 (i , 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.

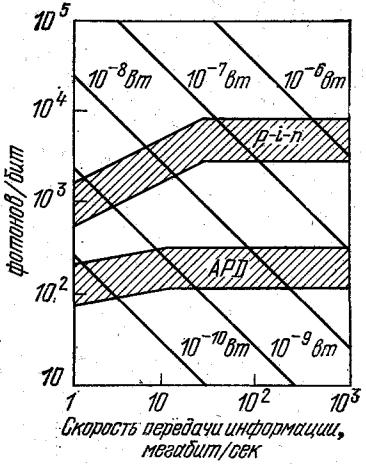


Рис. 4. Заштрихованные области показывают чувствительность фотоприемников с АРД (лавинно-пролетный детектор. — Прим. перев.) и без ($p - i - n$)-лавинного усиления.

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 (i , 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 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 скомпанованные 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 Мбит/сек), наличия инжекционных лазеров и лавинных фотоприемников, эта величина огромна (примерно 10^7 , что эквивалентно 70 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 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, сращиваниях кабелей при других внутренних соединениях. Например, при допуске в 50 дб и потерях в световодном кабеле 10 дб/км максимальное расстояние между ретрансляторами 5 км.

При небольшой скорости передачи информации расстояние 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 Мбит·км/сек (т. е. мы можем, например, передавать информацию со скоростью 4 Мбит/сек на 5 км).

В многомодовом волокне с плавным изменением показателя преломления, величина указанного допуска может достигать нескольких Гбит \times 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 Гбит·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.