特集

光 波 通 信

末 田 正*

(1987年 6月17日 受理)

Lightwave Communication

Tadashi SUETA*

(Received June 17, 1987)

Lightwave communication has been developed extensively in these years. One of the potentialities of the lightwave is its high-speed or broad-band property. Present communication system, however, utilizes only parts of this feature. The possibility of higher-speed systems, several or even several tens gigabits per second, is discussed.

Another interesting development towards next century is the repeater-less long-haul transmission. The key element is the ultra-low-loss infrared fiber with one-to-two order small attenuation constant compared with ordinary silica fiber.

Finally, lightwave transmission through outer space, e.g. inter-satellite link, is described. In this case, short wavelength of the lightwave yields the extremely sharp light beam with the radiator much smaller than the radio-wave antenna.

Key Words: Lightwave communication, High-speed system, Ultra-low-loss infrared fiber, Outer-space lightwave communication.

1. まえがき

古代中国では、烽火(のろし)を利用して千キロメートルを越えるような非常用通信システムが作られていたという。しかし、光エレクトロニクスという観点からは、今から百年余り前に発表された光線電話(photophone)が光通信の始まりであるといえる。このとき、当時の先端技術であった光電導効果が受光に利用されていたことは興味深い。

その後、光通信は、特殊な用途以外に顧みられることもなかったが、1970年頃、低損失、大容量光ファイバ伝送路の見通しがえられるに及んでふたたび注目を受け、1980年代に入って広く実用されるようになったのは周知のことである。来年度には、太平洋、大西洋横断の光海底ケーブルも開通の予定であり、さらに各家庭(いわゆる加入者)にも光ファイバーが配線される時代も遠くはないと思われる。また、長距離無中継光ファイバー伝送、超高速光伝送のよう

* 大阪大学基礎工学部 (〒560 豊中市待兼山町1-1)

* Osaka University, Department of Electrical Engineering. Faculty of Engineering Science
(1-1, Machikaneyama, Toyonaka, Osaka 560)

な新技術, 光波の特質を生かした宇宙通信への応用など, 今後高度情報社会の形成に向けての光通信の発展には大いに期待されるものがある。

2. 光波通信の特長

もちろん, 光も電磁波の一種であるが, マイクロ波などいわゆる電波に対する光波の特長はその広帯域性と高密度性にあるといえる。

前者は, 光周波数が高いことによるもので, 搬送波に対して同じ割合の周波数帯域幅が利用できるものとする, 光波領域では, マイクロ波に比べて1万倍から10万倍の帯域幅がえられることになる。たとえば, 波長 $1\text{ }\mu\text{m}$ の光波の場合, 1%の比帯域幅は3000 GHzにもなる。一方, 電気信号の時間分解能(たとえばパルス幅)は帯域幅の逆数程度であるから, 広帯域性は高時間分解能につながる。現在発生されている最短光パルスは6 fs (フェムト秒, 1 fs は 10^{-15} s)にも達している。

このように, 潜在的には, 光波の利用によって大容量あるいは高速度通信が可能となる筈であるが, 信号の発生・伝送・検出など思うように制御できる光パルス幅は, 現在のところナノ秒ないしはサブナノ秒の程度に過ぎない。現実の光ファイバ通信システムにおける伝送速度は, 実用段階のもので400 Mb/s, 開発中のものでも1.6 Gb/s程度である。このような観点から見れば, 現在の光ファイバ通信システムは, よくいわれるように「広帯域」ではなく, かなり「狭帯域」であるといわざるをえない。むしろ, 一層の広帯域化あるいは高速化, 種々の多重方式など今後発展の余地があるといえる。

光波のもう一つの特長は, 波長の短いことによる高い空間分解能(高密度性)あるいは鋭い放射指向性である。コヒーレント光ビームは, レンズなどにより, 直径が波長程度の明るい光スポットに集光することができる。また, 細い導波路に閉じ込めて伝送することもできる。光ディスクや光ファイバに見られるように, 広帯域性の場合とは対照的に, 高密度性はかなりの

程度まで達成されているといえる。

電磁波を開口径 D の光学系(あるいはアンテナ)で集束すると, 回折によって若干放射ビームは広がるものの, その半値幅は λ/D ラジアン程度となり, 波長の短い光波では極めて鋭い指向性をえることができる。このような特長は, 今後宇宙光通信などに応用されて行くものと思われる。

光波自身の特長ではないが, 革命的な伝送路としての石英光ファイバの重要性はいうまでもない。その低損失, 細径, 軽量, 耐電磁誘導などの諸性質は, 従来の電波伝送路に比べて格段に優れているといえる。また, 光波が潜在的に持つ帯域幅には遠く及ばないとしても, かなりの広帯域性を持っている。

3. 高速化と大容量化

現在実用されている代表的な高速光ファイバ伝送系は, 1985年の初期に完成した400 Mb/sの日本縦貫ルート(1.3 μm 帯単一モード光ファイバケーブル使用)であろう。また, 次世代のものとして, より高速の1.6 Gb/s システムの開発が進められている。しかし, 光波の潜在能力という観点から見ると, 高速化は十分達成されているとはいえず, 用いられているパルス幅も高々サブナノ秒程度である。そこで, 当面の目標として, ピコ秒領域(数ピコ~数十ピコ秒)のパルス幅, 数ギガ~数十ギガビット毎秒の伝送速度を持つ高速光ファイバ伝送系が考えられる。

このような高速系では, 光パルスの発生, 変調, 伝送, 復調のいずれをとっても高度な技術が要求される。数ギガビット毎秒程度の伝送速度は, 現在の技術の延長によって実現できるものと考えられているが, それ以上のものに対してはなんらかの新技術が必要となるであろう。

普通の方法による高速光パルス列の発生に限界があるとするれば, 次に考えられるのは, パルス幅の十分細かい複数組のパルス列を時間領域で多重化する方法である。パルス幅の広い場合には, パルス圧縮法の適用も考えられる。なお,

多重化に際して方向性結合器などの受動素子を合波器として用いると、合波損失が問題になる。

光ファイバはかなりの分散性をもっているで、当然、高速光パルスの伝搬には問題がある。波長 $1\ \mu\text{m}$ 、パルス幅 10ps とすると、光源が完全な単色光であるとしても、そのスペクトル幅は、およそ $\Delta\lambda = 1\text{nm}$ に広がる。その意味で、分散性を利用し、ファイバの非線形性と組合せて、固有の超短光パルス波形をそのまま伝搬させるソリトン伝送にも興味を持たれている。

高速光信号を受信するには、応答の速い光検出器と高速電子回路が必要になる。また、寄生容量の低減を図るための一体集積化技術も重要であろう。多重化によって構成された高速光信号の場合には、これを分離（タイムディマルチプレックス）して別々に復調する方法をとれば、個々の光検出回路にはあまり高速性を要求しなくてもよい。

大容量化を図るには、上のような時間領域の多重化（TDM）の他、周波数領域の多重化（FDM）も考えられる。現在までに開発の進んでいるものは、周波数（または波長）間隔が極端に離れている場合であり、多重度はあまり大きくない。これを波長多重（WDM）と称している。

周波数あるいは波長多重システムにおいては、多重・分離を行うための合・分波器が必要になる。多重度の低い場合、干渉フィルタを用いた微小光学回路が利用される。回折格子型のもものは、1個の素子で数個の波長成分に分離することができる。しかし、原理的に、小型の素子で高分解能のフィルタ作用を実現することは困難であり、あまり、多重度を上げるわけには行かない。

波長多重系は、光集積回路の観点からも注目されている。すなわち、複数個の半導体レーザーと多重光回路、分離光回路と光検出器などをそれぞれ集積一体化することによって、送受信回路を小型化することが可能となる。

一方、半導体レーザーの単一周波数化、安定

化が進むに従って、極めて近接した間隔の周波数多重の可能性も考えられるようになった。このような場合には、小型の光学フィルタによって各成分を分離することは困難であると思われる。そこで、ヘテロダイン受信法によって、光信号を、一旦、中間周波成分（マイクロ波）に直し、マイクロ波帯のフィルタによって分離を行うことも検討されている。

4. 長距離無中継伝送

石英光ファイバの低損失性を利用した長距離無中継伝送は興味ある問題であり、1982年になって100 kmを越える無中継伝送実験が発表されて以来、各地で競って研究開発が行われた。その後、最低損失波長（ $1.55\ \mu\text{m}$ ）帯DFBレーザの発展などによって距離はさらに伸び、最近では300 kmに達したものもある。また、高速度の伝送実験としては、 $117\text{ km} \cdot 4\text{ Gb/s}$ のものがある。

石英光ファイバの損失は、すでに、考えられる最低値（約 0.2 dB/km ）に達しており、これ以上はあまり期待できない。そこで、この最低値を事実上決めているレイリー散乱損失が波長の4乗に逆比例することから、より長い波長域（ $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ）において透明な材料による、いわゆる、超低損失光ファイバの可能性が注目されるようになった²⁾。これによって、1桁以上の低損失化の可能性があることが指摘されており、1,000 kmを越える無中継伝送も不可能ではないと考えられている。

実際にも、種々の材料を用いた新しい光ファイバが試みられているが、現在のところでは、ふっ化物ファイバによって、やっと 1 dB/km を切るものが発表されている程度である。また、長距離伝送では重要な、分散に関するデータもあまりえられていない。伝送系を構成するには、ファイバ以外に、この波長領域で動作するレーザー、検出器などの光デバイスも必要であるがその分野の研究はあまり進んでいないようである。

一方、空間伝送を利用する光波伝送系では、

次節に述べるように、桁違いに長距離の無中継伝送が考えられている。

5. 光波宇宙通信

大気圏外の宇宙空間は、吸収、散乱、分散などの心配がなく、光波の自由伝搬を利用する通信方式にとっては格好の舞台であり、衛星間光波通信は、次世紀にかけて発展の期待される研究課題であるといえる。

さきに述べたように、アンテナの指向性は、用いる電磁波の波長とアンテナの開口直径との比で決めるから、光波を利用することによって、極めて小型のアンテナ（実際には望遠鏡）によって鋭い放射ビームをえることができる。たとえば、開口径10 cm程度の望遠鏡は容易に実現されるが、その放射ビーム幅は、波長 $1\mu\text{m}$ の場合、およそ $10\mu\text{rad}$ という小さな値となる。このように、小型（軽量）のアンテナで鋭い指向性をえられることから、搭載物に対する寸法や重量の制限が厳しい衛星への光波通信の適用は有望であり、衛星間（静止衛星間、静止衛星・移動衛星間など）の数万キロメートルに及ぶ長距離無中継伝送の研究が行われている。

一方、このような鋭い指向性の場合、相手となる衛星あるいは移動体との通信を成立させるためには、極めて高精度の光ビーム制御技術が要求される。さらに、宇宙空間では、太陽、月、地球などによる背景光が雑音の原因となる。

光源としては、光ファイバ通信システムに比

べて高出力のものが考えられている。半導体レーザーの直接変調を想定し、衛星間の距離4万キロメートル、望遠鏡の直径20 cm、光波長 $0.8\mu\text{m}$ 、受信側の光フィルタの帯域幅3 nmなどとして見積もられた例では、太陽の背景光が存在する場合、直接検波方式で400 Mb/s誤り率 10^{-9} の伝送を行うためには、400 mWのレーザー出力が要求される³⁾。

衛星間光波通信に関しては、半導体レーザーの他、 CO_2 レーザー、Nd:YAGレーザーなどを用いるシステムが日、米、欧で検討されているとのことであり、今世紀中には、種々の実験が行なわれる予定である。

6. むすび

以上、いわば光波の潜在的利点とそれを生かすような新しい技術を中心に、最近の光波通信について述べた。加入者系への適用、光交換など、多くの興味ある話題を紙面の都合で割愛したが、とくに、前者は、光通信がどのような形で今後普及して行くのかに関係した重要な問題でもある。

参考文献

- 1) 電気通信技術審議会編：光通信技術の現状と将来、ぎょうせい、(1987)。
- 2) 高橋志郎：2～5 μm 波長帯光部品、電子情報通信学会誌70 (1987) 254。
- 3) 安川交二：光衛星間通信技術の研究開発動向、電子情報通信学会衛星通信研究会資料、(1987.05)