

# 155 Mbits/s 大气传输光通信系统及其测试

蔡燕民 陈 刚 董作人 陈高庭 方祖捷

(中国科学院上海光机所 上海 201800)

**提要** 研制了通信速率达 155 Mbits/s 的大气传输光通信系统, 传输距离为 2 km, 采用光纤输入、光纤输出方式。介绍了该系统的设计考虑、基本原理、系统组成等, 总结了长期外场实验的结果, 该系统具有一定的实用价值与市场潜力。

**关键词** 光通信, 半导体激光器, 误码率, 光学系统

大气激光通信曾掀起了研究的热潮, 但自从 70 年代光纤通信的迅速发展以及大气光通信受到天气的严重影响, 使得一度辉煌的大气光通信研究陷入低谷。近些年来随着半导体激光器件和光电探测器件的日益完善, 使大气光通信的研究又形成了新的高潮。一些先进国家已经推出大气光通信的一些产品, 比如美国朗讯的 2.5×4 Gbps 波分复用系统, 日本佳能的无线光通信系统等等<sup>[1]</sup>, 我国通信事业的迅速发展对大气光通信也提出了市场要求。大气光通信主要优点是: 潜在的传输速率极高, 通信容量极大; 光束方向性好, 保密性高; 不需无线电频率使用许可, 不需占用、租用光纤通道; 体积小、重量轻, 安装简便快捷, 不影响市政建设, 成本低。

大气光通信可在很广的范围内获得应用。可以作为光纤通信和微波通信紧急后备措施; 可以应用于移动通信基站间的互连; 在技术上或经济上不宜敷设光缆的地区, 在不宜采用或限制使用无线电通信的地方, 在军事设施或其他要害部门及需要严格保密的场合, 在单位内部的数据传输等方面, 大气光通信是一个很好的候选者<sup>[2]</sup>。针对市场要求, 我们设计研制了速率达 155 Mbits/s 大气传输光通信系统, 传输距离为 2 km。

## 1 系统设计方案、工作原理及系统组成

### 1.1 设计方案

大气传输光通信系统方案设计的第一要点是首先要确定激光器的类型和工作波段。虽然气体激光器、固体激光器功率很大, 但是其体积也很大, 而且需要使用高电压电源, 抽运和驱动比较复杂。而半导体激光器驱动电压不到 3 V, 可以直接电流调制, 调制速率高达 GHz 量级, 可以满足 155 Mbits/s 调制速率的要求, 同时价格低, 使用方便, 有商品供应。从波段选择来说, 可见光缺乏保密性, 波长太长的红外光, 缺乏相应的高速探测器; 而近红外波段有高效、高速和价格相对低廉的探测器, 同时近红外 0.79 μm 波段存在大气高透过窗口<sup>[3]</sup>。因此本大气传输激光通信系统采用近红外波段工作的半导体激光器作为光源。

大气传输光通信系统设计的第二个要点是通信传输速率的确定。根据目前通信速率的制式,一种是 SDH/PDH 系列,另外一种和数据网的速率。考虑到同公用网接口的需要,确定采用 155 Mbits/s 速率,该速率是 SDH 的最低一级 STM-1 的速率,可以同 SDH 端机相连接。

大气传输光通信系统设计的第三个考虑是工作距离的确定。近年来移动通信成为通信事业发展的重点,移动电话用户激增。随着移动通信用户的增加及服务业务内容的扩大,基站与基站之间、基站与交换中心之间传输的信息容量要求大大增加。目前移动通信基站间距离约为 3~5 km,由于降低手机发射功率的需要和其他技术因素,蜂窝网密度将进一步提高,也考虑到技术上的可行性,大气传输光通信系统工作距离确定为 2 km。

## 1.2 工作原理

大气传输光通信系统基本工作原理如图 1 所示(图中只画出系统的发射和接收部分),该系统采用在同一端机内发射接收互相分离,光纤输入光纤输出的设计方案。将需要传输的信号从光纤端口输入,经探测器转换为电信号,放大输出到激光器的驱动器,来推动调制 0.79  $\mu\text{m}$  红外半导体激光器。光信号经过光学系统准直成平行光,平行光经过大气传输一段空间距离后,到达光接收端机。接收端机的核心是一个光电探测器,光信号经过接收光学系统会聚后,在光电探测器内转化为电信号,经前置放大、整形放大,输出信号推动激光器发光,由光纤输出实现通信。

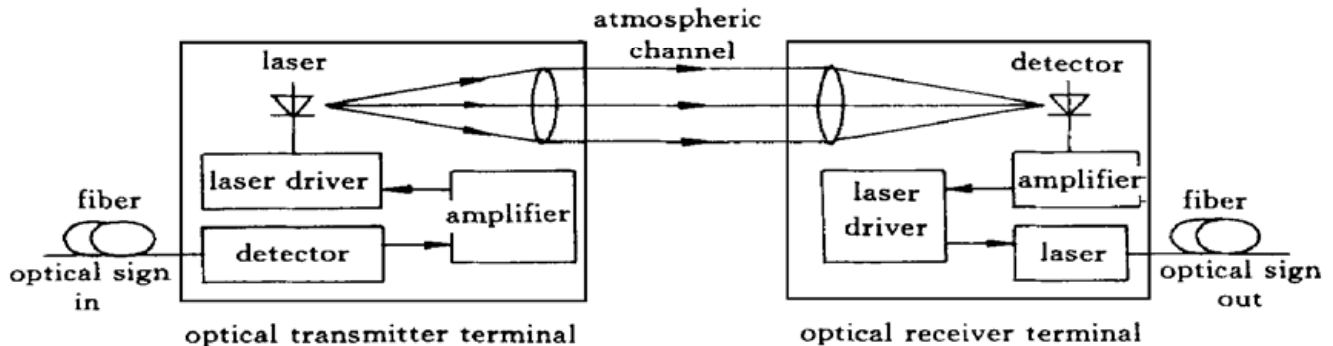


图 1 大气传输光通信系统原理图

Fig. 1 Basic principle of atmospheric optical communication system

## 1.3 系统组成

大气光通信系统包括发射、接收和瞄准三种功能的光学系统。由于研制目标是作用距离为数公里量级、定点工作的通信设备,暂时不考虑光信号的自动跟踪瞄准,因此采用较为简单的发射、接收和瞄准三种光学系统分离的方案。大气光通信系统端机发射部分的主要组成:(1) 半导体激光器发射光源及其驱动电源;(2) 发射光学系统;(3) 信号输入和处理电路。待传输信号从光纤端口输入,经放大输出到激光器的驱动器,来推动激光器。接收部分的主要组成:(1) 光电探测器;(2) 接收光学系统;(3) 信号处理与输出电路。探测到的光信号转化为光电流后,经前置放大、整形放大,输出推动 1.3  $\mu\text{m}$  激光器发光,从光纤端口输出光信号。另外每台端机配置一个瞄准用望远镜。

半导体激光器的近场光斑十分小,只有微米量级,其发散角很大,而且在平行和垂直二个方向上发散角相差很大,因此准直压缩倍率要求数百倍以上,不宜采用倒伽里略系统,一般采用有限焦距光学系统,半导体激光器的发散角与准直系统的相对孔径相匹配。由于激光器和探测器位于发射和接收光学系统的焦点上,无需校正色差和轴外像差,光学系统对球差和像散的

要求十分高<sup>[4]</sup>。经分析比较,从简化系统、以牺牲部分光功率为代价降低成本出发,确定采用球面光学系统,并考虑到尽可能减少整机的体积和重量,采用大相对孔径设计,这样使系统高级球差的贡献量很大,给系统像差校正带来一定的困难。从接收光功率角度出发确定发射系统口径为 50 mm,相对孔径为 1/3;接收系统口径为 150 mm,相对孔径为 1/2。2。实际测试中远场光斑较好。



图 2 大气传输光通信系统端机照片  
Fig. 2 Photograph of atmospheric optical communication system

激光器是本系统的关键。光纤通信常用的 1300~1550 nm 激光器功率不能满足大气传输的要求,根据器件的功率和调制速率要求,以及国际市场的产品规格,确定采用日本日立公司 HL7851G 型 790 nm 波段 AlGaAs/GaAs 单模半导体激光器,其发光区的线度约为  $1 \times 3 \mu\text{m}$ 。该器件具有很高的调制速率,一般可达到大于 GHz 量级以上。光电探测器是光通信系统的重要器件。硅光探测器对于 790 nm 波段是十分理想的,采用 HP 公司的 HFBR-5203 型模块,该组件的一个优点是包含自动增益控制和整形电路,输出提供二路 ECL 数据信号,波形很好,并可提供无输入监控信号。大气

传输光通信系统端机照片如图 2 所示。

#### 1.4 光功率估算

发射光学系统的发散角设计为 1 mrad,光束传输 2 km 之后光斑直径为 2 m,接收光学系统口径为 150 mm,假设远场光斑以高斯分布近似,如果接收光学系统正处于接收端光斑中心,那么接收光学系统接收到的光功率占接收端光斑功率的比率为

$$r_0 = \frac{\int_{-0.075}^{0.075} \exp(-4x^2) dx}{\int_{-1}^1 \exp(-4x^2) dx} \times \frac{\int_{-0.075}^{0.075} \exp(-4y^2) dy}{\int_{-1}^1 \exp(-4y^2) dy} = 2.8\% \quad (1)$$

如果考虑接收光学系统光轴与发射系统光轴的对准误差,假设对准误差为 0.1 mrad,考虑最严重情况,即接收系统光轴偏离发射系统光轴 0.2 m,并且忽略接收系统离轴引起的子午面光束分布与弧矢面光束分布的微小差异,那么接收光学系统接收到的光功率占接收端光斑功率的比率为

$$r_1 = \frac{\int_{0.125}^{0.275} \exp(-4x^2) dx}{\int_{-1}^1 \exp(-4x^2) dx} \times \frac{\int_{0.125}^{0.275} \exp(-4y^2) dy}{\int_{-1}^1 \exp(-4y^2) dy} = 2\% \quad (2)$$

考虑接收光学系统对准偏离 0.1 mrad 时接收 2% 的光,由于接收系统采用双分离型式,4 个界面分别镀增透膜各反射约 1% (同时考虑光学玻璃吸收),系统透过 89%,即接收系统到探测器损耗 17.5 dB。发射激光器的功率为 30 mW (14.8 dBm),实测发射光学系统后光功率约 15 mW,即损耗 3 dB。

大气传输光通信系统的一个主要问题,是通信距离同大气能见度的依赖关系。大气能见度决定于天气状况,也同水平高度有关系。根据有关资料,在海平面处轻雾天的条件下,能见度为 2 km 时,传输损耗约为 6.5 dB/km,系统 2 km 大气传输损耗为 13 dB。

这样接收到的光功率为 -18.7 dBm,在大气能见度 2 km 条件下实测接收光功率为 -20

dBm 左右,与估算接近。接收探测器灵敏度为 $-27$  dBm,有较大的冗余度,方案是可行的。

## 2 实验样机通信性能测试结果

研制完成的样机,首先在实验室内对光电技术参数进行调试检测,然后安装到外场进行通信性能测试实验。为了同时比较大气能见度的测试数据,利用高速公路测雾仪的条件,在上海市江桥镇华江新苑民房 18 楼同相距 1540 m 的沪宁高速公路管理所办公楼 5 楼平台之间进行实验。

通信实验采用的测试仪器为德国 WG 公司的 SF-60 型 SDH/PDH 通信/抖动分析仪。155 Mbits/s 样机是针对 SDH 光通信的接口,采用光纤输入、光纤输出方式。作通信性能测量时, SF-60 误码仪输出为 NRZ OPTICAL 伪随机码 155 Mbits/s 光信号,码长为 $(2^{23}-1)$ ,光波长为 1300 nm,平均功率为 $-8$  dBm。样机输出亦为 1300 nm 光信号,平均功率为 $-9$  dBm。实验为环测,即一端样机用光跳线作自环,另一端样机用 SF-60 误码仪作 ITU-T G. 821 标准分析。图 3 为接收信号眼图,图 4 为环测典型实验结果,测试时间为 2000 年 1 月 28 日 16:00 至 2000 年 1 月 29 日 16:00,连续 24 h。显示的参数为有效秒百分比(%EFS)和严重误码秒百分比(%SES),每一点对应于 15 min 的统计结果。

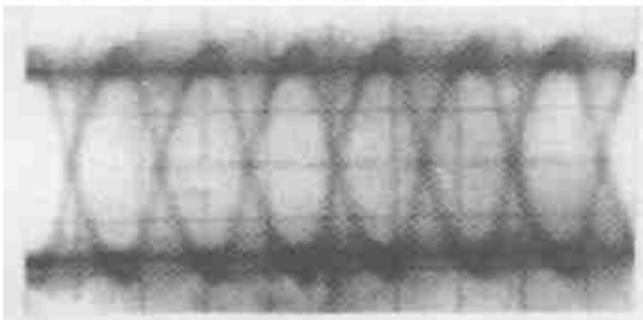


图 3 155 Mbits/s 端机接收信号眼图  
Fig. 3 Eye diagram pattern of sign received by 155 Mbits/s terminal

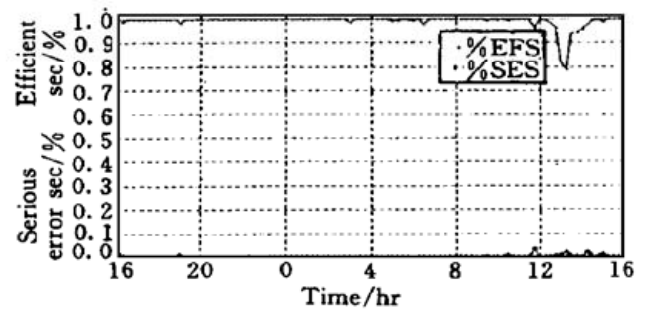


图 4 155 Mbits/s 样机环测典型实验结果  
Fig. 4 Typical measurement result of 155 Mbits/s terminal

测量结果表明,在连续 24 h 的统计时间内,有效秒百分比(%EFS)的平均值为 99.12%,有效秒百分比低于 95% 的持续时间约为 30 min,最低值为 79%;有 145 个严重误码秒(SES),不可用时间为零,误码率 BER 小于 $10^{-10}$ 。上述结果表明,155 Mbits/s 样机本身已达到了研究目标,在一定的环境条件下已具有一定的实用性。

## 3 讨 论

由于大气有雾、云、雨、雪等气候现象,另外空气中还有烟雾、灰尘等悬浮物,激光束在大气中传输时将被大气吸收和散射而衰减<sup>[5]</sup>,这样大气对激光通信系统的误码率影响很大。系统在晴天、阴天、雨天、小雪和薄雾的天气条件下都工作良好。实验中没有遇到特别大、特别密的雨,此种条件有待实验。系统在雾很大时误码率上升,能见度小于 1000 m 时,通信可利用时间减少,通信性能下降;能见度小于 100 m 时,通信可利用时间为零,通信中断。

大气微小温度随机变化导致大气风速随机变化从而形成大气的湍流运动,在湍流大气中



传输的激光束波前随机起伏,从而引起光束抖动、强度起伏、光束扩展、像点抖动等光传输湍流效应。大气湍流对激光大气通信系统影响严重。在大气湍流运动比较明显时,用肉眼可以观察到光束强度闪烁,在严重时不断引起比特及帧失步等误码。在实验中用计算机对接收探测器输出光强进行数据采集,图5为一个典型的光功率记录数据,从图5中可以看出光强的抖动。

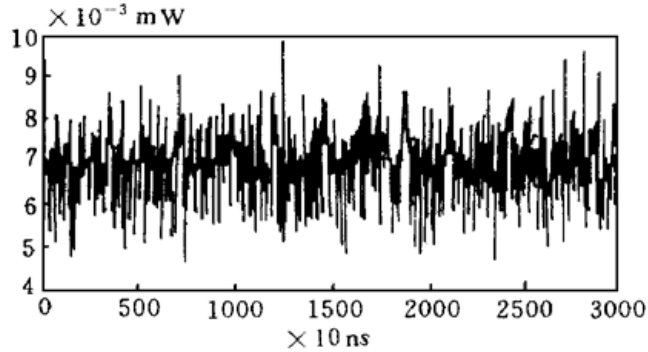


图5 接收光功率抖动测量曲线

Fig. 5 Measurement data of optical power received by 155 Mbits/s terminal

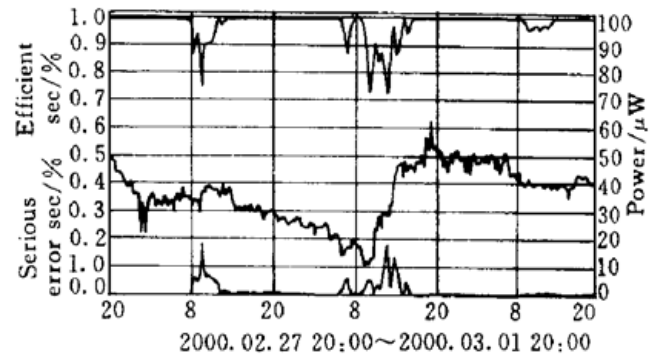


图6 光束抖动引起的误码典型曲线

Fig. 6 Typical measurement data of BER by scintillation

进行了光束抖动引起误码的初步统计。图6是光束抖动与误码的初步测试结果。图中每点数据对应30 min的统计结果。Power为接收光功率,单位为微瓦。从图中三天的测试曲线可以看出,每天上午8点到14点温度变化较快时,引起系统误码率升高,严重时系统有效秒降至80%以下。这里仅仅给出一些观察到的现象,抖动特性与误码率的定量研究另文介绍。

### 参 考 文 献

- 1 Robert Pease. Optical laser-communications systems carve niche in metro markets. *Lightwave*, 1999, (9): 23~ 27
- 2 Chen Gang, Fang Zujie, Chen Gaoting *et al.*. 34 Mbit/s atmospheric laser communication systems. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1999, 28(Z3): 128~ 130 (in Chinese)
- 3 Shisiwusuo. *Electro-Optics Handbook*. Beijing: Defense Industries Press, 1978. 61 (in Chinese)
- 4 Zhang Yimo. *Applied Optics*. The second edition. Beijing: Engineering Industry Press, 1988 (in Chinese)
- 5 Brian R. Strickland, Michael J. Lavan *et al.*. Effects of fog on the bit-error rate of a free-space laser communication system. *Appl. Opt.*, 1999, 38(3): 424~ 431

## 155 Mbits/s Atmospheric Optical Communication System and Its Measurement

Cai Yanmin Chen Gang Dong Zuoren Chen Gaoting Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

**Abstract** Atmospheric optical communication system with fiber in and fiber out is developed. It is in the lead domestic that communication rate is 155 Mbits/s and availability distance is 2 km. Design consideration, basic principle and system architecture of atmospheric optical communication system are demonstrated. Experiment result outdoors is analyzed, and the system's practicability is mentioned.

**Key words** optical communication, semiconductor laser, bite-error-rate, optical system