

# 宽带数字光波通信系统光学天线的设计及计算

刘华 胡渝 李岷淳 卢国纬 范垂英

(电子科技大学应用所, 成都 610054)

**提要** 从宽带数字光波通信系统光学天线的要求出发,采用一种简化的高斯光束计算模型,设计出收发合一,具有跟踪、扫描功能的离轴折反式光学天线,并给出了天线性能的计算和实验的结果。

**关键词** 光波通信,光学天线,高斯光束计算模型

## 1 引言

空间光波通信具有高数据率、保密性好、系统重量轻、可靠性高等优点,是通信领域内一个富有生命力的分支。随着电子通信与数据传输网络面对要求越来越高的市场和客户需要,通信网络的内部结构正在发生着深刻的变化。国外对空间光波通信的研究给予了高度的重视,我国也早就开始对空间光波通信进行了研究。本文所设计的光学天线便是宽带数字光波通信系统的一个重要部分。

宽带数字光波通信系统采用收发合一,具有跟踪、扫描功能的离轴折反式光学天线。它具有转动惯量小、灵敏度高、视场宽等优点。它要求在发射信号时,对信号光束进行准直,即压缩光束发散角,以使几公里远的接收信号光能量较为集中,从而提高系统的信噪比。经过准直后,接收光斑很小,还可使光波通信的高保密性得到体现;在接收端,光学天线能增大探测器的有效接收面积,从而大大提高系统的性能。本天线的研制为空间光波通信远距离跟踪扫描打下了基础。

## 2 光路系统及其原理

图1所示为宽带数字光波通信系统的光路示意图。图中,光学天线由一个主镜和一个副镜构成。其主镜为抛物面反射镜,副镜为薄透镜,组合成离轴的结构,因而可以做到收发合一。

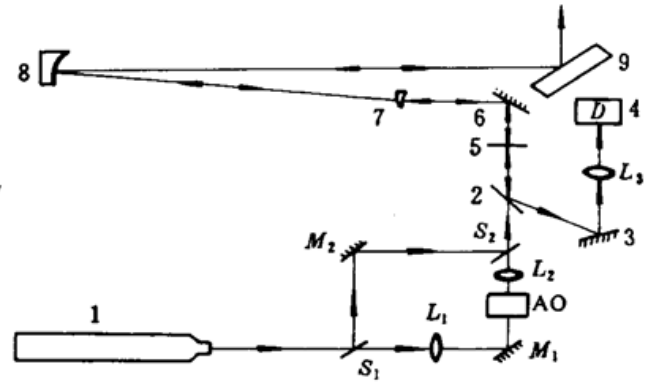
精扫镜由两面相互正交且分别与水平和垂直方向成 $45^\circ$ 的振镜组成,并可分别绕其中轴旋转,转动角度约为 $\pm 20$  mrad,经主、副镜后反映到接收端,由左至右,然后由上至下进行扫描。不考虑可能的不交轴光线,只考虑子午面,则光束与主光轴的夹角在 $\pm 20$  mrad内变化。在

接收机上加上合作目标,使得接收机一旦接收到扫描光束信号,便立即反馈给发射机,使发射机的精扫镜停止扫描。这样,就实现了扫描定位。

完成扫描定位后,发射机和接收机的天线已相互对准。这时如光发射机和接收机出现相对位移,使天线不再完全对准但又不至于使天线脱靶,两台端机的伺服系统便分别提取由章动镜产生的误差信号,从而控制各自的精扫镜,使得端机的光学天线重新对准。这样,就完成了跟踪的任务。

Fig. 1 Schematic diagram of an optical system

1: CO<sub>2</sub> laser; 2: Brewster's window; 3: mutation mirror; 4: detector; 5: 1/4 wave plate; 6: fine-scanning mirror; 7: secondary mirror; 8: primary mirror; 9: coarse-scanning mirror



### 3 天线的设计及其参数优化

首先提出一种简化的高斯光束计算模型。对于宽度为  $d$ , 发散角为  $\theta$  的高斯光束, 可以理解为由无数条近似沿光束方向的光线共同组成, 如图 2(a), (b) 所示。考虑最边缘的两条光线 1 和  $n$ , 根据光的直线传输性质, 显而易见, 光束的其它光线总在光线 1 和  $n$  之间。这样, 只要追迹光线 1 和  $n$ , 就相当于追迹了整束光, 如图 2(c) 所示。为了计算和分析方便, 在下面的文中, 将用高斯光束的中轴线  $K$  来代表以光线 1 和  $n$  为边缘光线的光束, 称为“光束  $K$ ”。这里,  $d$  为高斯光束与天线副镜相交处的光腰直径。

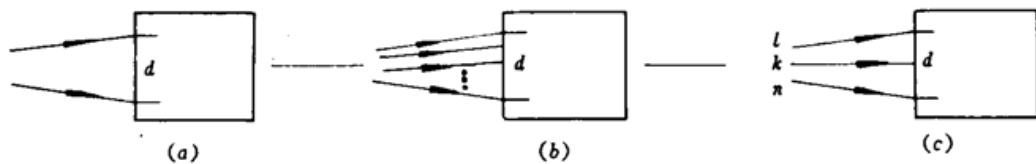


Fig. 2 Block diagram of the model of the optical beam



Fig. 3 Schematic diagram of the optical antenna

1: fine-scanning mirror; 2: secondary mirror; 3: primary mirror

在宽带数字光波通信系统中, 采用了如图 3 所示的收发合一折反式离轴光学天线。

图 3 中, 根据总体系统要求及加工条件, 选取中心曲率半径为 1300 mm 的抛物面镜为主镜, 它是从如虚线所示的整块抛物面镜上截下的实线部分, 其焦距为 650 mm。天线的副镜采用薄透镜, 也是从虚线所示的整片透镜上截下来的实线部分。根据系统要求, 其焦距取 65 mm, 中心厚度取 5 mm。

据薄透镜焦距公式和薄透镜最小球差公式<sup>[6]</sup>, 在所设计的系统中, 如选用折射率  $n = 4$  的

锗材料作副镜,可算得  $r_1 = 71.8 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 107.7 \text{ mm}$ ;如采用  $n = 2.4$  的硒化锌材料,可算得  $r_1 = 57.5 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 156.4 \text{ mm}$ 。在这里  $n$  为材料折射率,  $r_1$  为透镜的第一表面曲率半径,  $r_2$  为透镜的第二表面曲率半径。

在具体的天线设计中,还应考虑以下两个参数:(1)主副镜的相互距离  $L$ ; (2)从精扫镜入射到副镜的光束与主光轴平行时的离轴距离  $y$ 。 $L$  和  $y$  的值过大或过小都将严重影响天线的性能。

下面,将通过计算并采用优化的方法来确定光学天线的参数<sup>[2]</sup>。

在本系统中,要求光学天线能将发射的信号光束的发散角压缩 10 倍以上,从  $4 \text{ mrad}$  压缩到  $0.4 \text{ mrad}$  以下。 $\text{CO}_2$  激光器发出的激光束发散角约为  $4 \text{ mrad}$ ,从激光器到副镜的光路总长度约为  $1.5 \text{ m}$ ,所以,射到副镜上的激光束直径约为  $6 \text{ mm}$ 。

为了防止可能的本端反射,精扫镜距副镜的距离应大于副镜第一表面的曲率半径,对于锗透镜,应大于  $107.7 \text{ mm}$ ,取  $110 \text{ mm}$ ;对于硒化锌透镜,应大于  $156.4 \text{ mm}$ ,取  $160 \text{ mm}$ 。这样,从精扫镜入射的光束如要上下转动  $\pm 20 \text{ mrad}$ ,则光束在副镜的上下移动距离为  $\pm 2.2 \text{ mm}$ (锗透镜)和  $\pm 3.2 \text{ mm}$ (硒化锌透镜)。

追迹以入射角  $U$  ( $-20 \text{ mrad} \leq U \leq 20 \text{ mrad}$ ) 入射到副镜上离轴距离为  $y_0$  处的光束  $K$  (实际上相当于追迹入射角为  $U \pm 2 \text{ mrad}$ ,入射点离轴距离为  $y_0 \pm 3 \text{ mm}$  的两条光线  $1$  和  $n$ ),就可得到从振镜上出射的光束  $K$  经过天线系统后的发散角(即  $1$  和  $n$  经天线出射后的夹角)改变情况,从而可评价天线是否满足设计的要求以及满足的程度如何。

将进行两组计算,以解决两个问题:第一,找出主副镜相互距离  $L$  与出射光束发散角  $\theta$  之间的关系;第二,找出入射到副镜上的光束与主光轴平行时的离轴距离  $y$  和出射发散角  $\theta$  之间的关系。只有找出上述两个关系,才能给出天线结构的最优化参数。

在这两组计算中,每给定一组  $L$  和  $y$  值,都将只计算最上边和最下边的两束光,分别记为  $K_{\uparrow}$  和  $K_{\downarrow}$ 。

从下面的天线性能计算结果可知,以上两束光代表了可能入射的所有光束中最差性能的两条,其它光束都优于它们。所以,以上取法是合理的。

首先对折射率  $n = 4$  的锗透镜进行计算。

### 3.1 第一组计算

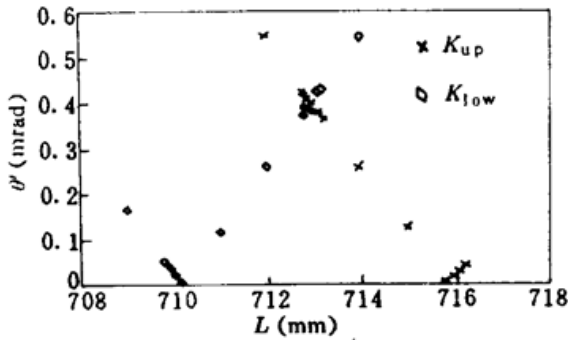
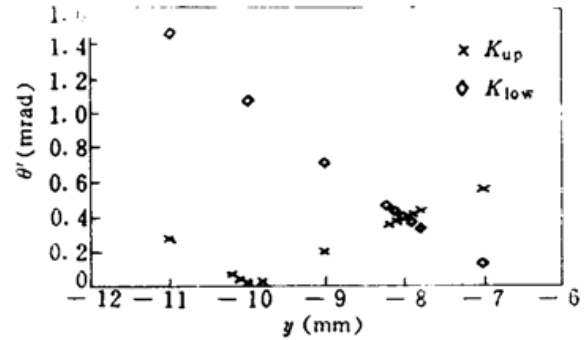
先设  $y = -8 \text{ mm}$ ,每给出一个主副镜相互距离  $L$ ,算出  $K_{\uparrow}$  和  $K_{\downarrow}$  光束出射发散角  $\theta$  的数值。根据所得数值可画出  $K_{\uparrow}$ 、 $K_{\downarrow}$  光束的出射发散角  $\theta$  与主副镜相互距离  $L$  的关系曲线,如图 4。

由图 4 可知,  $K_{\uparrow}$  光束的出射发散角  $\theta$  在  $L = 715.9 \text{ mm}$  处达到最小,  $K_{\downarrow}$  光束的  $\theta$  在  $L = 710.2 \text{ mm}$  处达到最小。两条光束在  $L$  约为  $713 \text{ mm}$  处的  $\theta$  基本相等,均为  $0.4 \text{ mrad}$ 。综合考虑,取  $L = 713 \text{ mm}$  较为适宜,这时,所有可能入射光束的出射发散角均不大于  $0.4 \text{ mrad}$ ,满足系统的要求。

### 3.2 第二组计算

给定  $L = 713 \text{ mm}$ ,每给出一个  $y$  值,计算得出  $K_{\uparrow}$ 、 $K_{\downarrow}$  光束的出射发散角  $\theta$  的数值。根据所得数据可以画出  $y$  与  $\theta$  的关系曲线,如图 5 所示。

从图 5 可知,  $K_{\uparrow}$  光束的出射发散角  $\theta$  在  $y = -9.9 \text{ mm}$  处达到最小,  $K_{\downarrow}$  光束的  $\theta$  随着  $y$  的增大而增大,在  $y = -8 \text{ mm}$  处,  $K_{\uparrow}$ 、 $K_{\downarrow}$  光束的  $\theta$  均约为  $0.4 \text{ mrad}$ 。综合考虑,选取  $y = -8 \text{ mm}$ ,

Fig. 4 Relationship between  $L$  and  $\theta$ Fig. 5 Relationship between  $y$  and  $\theta$ 

这时所有可能入射光束的出射发射角均不大于  $0.4 \text{ mrad}$ , 满足系统的要求。

另外, 根据天线系统的要求和主镜的几何参数, 我们选取副镜的口径为  $16 \text{ mm}$ , 近轴点的离轴距离为  $1 \text{ mm}$ 。

至此, 完全确定了以锗透镜为副镜的天线系统的全部参数。

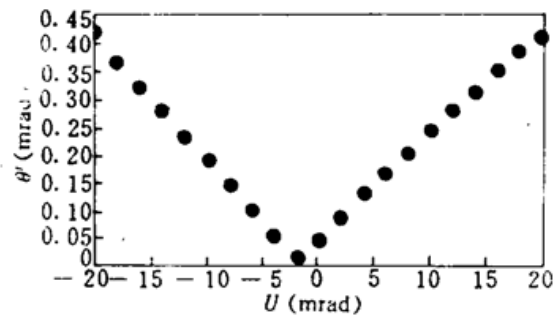
再对硒化锌透镜进行与锗透镜类似的两组计算和分析, 根据计算和分析可知, 两束光无论  $L$  取何值也不能同时使  $\theta$  等于或小于  $0.4 \text{ mrad}$ 。因此, 在本系统中不能采用硒化锌材料做透镜。

#### 4 天线的性能计算及其分析

最后, 对所设计的折反式离轴光学天线的性能进行计算和分析, 即计算从精扫镜射向副镜的光束自平行主光轴起, 每向上或向下转动  $2 \text{ mrad}$  时出射光束的发散角  $\theta$ 。从  $\theta$  的大小便可以知道天线性能是否满足系统的要求。

根据计算所得到的数据, 可以画出光束入射角  $U$  与出射光束发散角  $\theta$  的关系曲线, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着高斯光入射角  $U$  的增大, 出射光束的发散角  $\theta$  也逐渐增大, 这个结果不仅符合人们的一般经验, 也为在进行参数优化时只考虑性能最差的两条边缘光束提供了依据。

Fig. 6 Relationship between  $U$  and  $\theta$ 

#### 5 实验及总结

对按照设计尺寸加工好的天线进行了初步的测试, 得到如下结果: 光束出射处和距粗扫镜  $10 \text{ m}$  处, 光斑直径均约为  $90 \text{ mm}$ ; 距粗扫镜  $400 \text{ m}$  处, 光斑直径约增大  $120 \text{ mm}$ ; 距粗扫镜  $800 \text{ m}$  处, 光斑直径约增大  $220 \text{ mm}$ 。这样, 计算得到的出射光束发散角远远小于  $0.4 \text{ mrad}$ , 在工程误差范围内, 可以认为该天线完全满足系统的要求。目前, 该系统使用情况很好。

**致谢** 冯志超先生和李贤副教授对本工作给予大力支持, 并提出中肯的意见, 在此致以衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- 1 M. Shikatani *et al.* . Optical intersatellite link experiment between the earth station and ETS- VI. *Proc. SPIE, Free-space laser communication technologies I* , 1990, 1218 : 2~12
- 2 B. D. Seery. Goddard optical communication program. *Proc. SPIE, Free-space laser communication technologies I* . 1990, 1218 : 13~26
- 3 G. Oppenhäuser *et al.* . European SILEX project; concept, performance, status, and planning. *Proc. SPIE, Free-space laser communication technologies I* , 1990, 1218 : 27~39
- 4 Wayne R. Fenner. Future trends in crosslink communications. *Proc. SPIE, Free-space laser communication technologies V* . 1993, 1888 : 1~8
- 5 朱自强 等. 现代光学教程. 成都: 四川大学出版社, 1990. 387~392
- 6 母国光 等. 光学. 北京: 高等教育出版社, 1987. 99~100
- 7 张幼文. 红外光学工程. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 196~199

## Design and Computation of the Optical Antenna of a Wide-band Digital Lightwave Communication System

Liu Hua Hu Yu Li Minchun Lu Guowei Fan Chuiying

(*Institute of Applied Physics, UEST, Chengdu 610054*)

**Abstract** Following the demands of the optical antenna of the wide-band lightwave digital communication system, a bias-axis catadioptrical antenna which possesses the features of tracking and pointing has been designed with a novel simplified Gaussian optical beam computation model for the first time. The results of computation and experiment of the antenna are also presented, showing that they completely meet the requirements of the system.

**Key words** lightwave communication, optical antenna, gaussian optical beam computation model