

基于空间光通信卡塞格伦天线弊端的探讨*

张玉侠,艾勇

(武汉大学电子信息学院激光通信实验室,湖北武汉430079)

摘要:对于任何通信系统而言,天线能否正确发射和接收有效信号是人们最为关心的问题。对于点对点的激光通信系统而言,由于激光与电波迥然不同的特点,在天线系统的设计上更需严格要求。在空间光通信系统中,光学天线是一个物镜系统,通过折射、反射和折射-反射光学系统实现,目前应用比较广泛的是牛顿系统、格林系统以及卡塞格伦系统。讨论了卡塞格伦天线系统,该系统的结构(双反射式)决定了存在遮挡比造成光能量浪费的潜在问题,也就是所谓的渐晕现象。另一个问题是像差,也就是卡塞格伦天线系统要获得良好的像质必须以牺牲视场为代价。基于这两点提出了减小渐晕的几种新方案,并从减小像差上进行了理论分析。

关键词:激光通信; 光学天线; 卡塞格伦天线; 渐晕; 像差

中图分类号:TN929.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2276(2005)05-0560-04

Drawback of Cassegrain antenna system based on space optical communication*

ZHANG Yu-xia, AI Yong

(Laser Communication Laboratory, Electronics Information Institute, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Antenna, which whether transmits or receives correct signal or not is our main care and our direction, is an important part in any communication systems. Because of the characteristics of laser different from radio, the antenna system of point-to-point laser communication system must be designed strictly. Newton system, Green system and Cassegrain system are accepted commonly in optical antenna systems as field lens which include refraction system, inflection system and refraction-and-inflection system. In this paper, Cassegrain antenna is discussed. However, the potential problem of sheltering ratio in Cassegrain system leads to a loss of effective power of the optical system so called vignette phenomena. The other is related to optical aberration, because Cassegrain antenna sacrifices sight field for perfect image. We put forward some new solution and analyze theoretically how to reduce aberration based on the two considerations.

Key words: Laser communication; Optical antenna; Cassegrain telescope; Vignette; Aberration

收稿日期:2005-01-17; 修订日期:2005-02-28

* 基金项目:武汉大学国家自然科学基金资助项目(10477014/A07)

作者简介:张玉侠(1980-),女,湖北仙桃人,硕士生,主要从事自由空间激光通信方面的研究。

0 引言

自由空间光通信亦指无线激光通信,与其他通信系统一样,也需要设计一个合适的光学天线子系统接收尽可能多的对方的光信号和发射尽可能“真实”的光信号给通信对方。可见这样的—个光学天线子系统对通信质量的好坏至关重要。目前光学天线系统主要有卡式、格式和牛顿式,应用最广泛的是卡式-卡塞格伦望远镜系统。因为卡塞格伦望远镜系统具有多方面的优点,普遍受到设计者的青睐。但是就激光通信系统而言,天线的使用有些美中不足。因为从望远镜系统结构方面来讲,该天线会产生光遮挡、渐晕现象,尤其对通信用的激光光源问题更加严重。一些研究表明望远镜次镜和隔阑即使仅遮挡整个光束面积的8.4%,但由此产生的渐晕使光能量损失了大约30%。从系统成像方面来讲,卡式系统虽然相对其他系统易于校正像差,但是对于远方目标,视场较大情况,轴外像差很大。基于卡塞格伦系统存在的这些问题,本文提出了改进方案。

1 卡塞格伦天线系统

1.1 卡式光学天线的优势

在卡式、格式和牛顿式三种光学天线结构中,卡式望远镜的应用最为广泛。原因在于它比其他光学天线有更为突出的实用优势。

卡塞格伦望远镜光学系统采用双反射设计,由抛物面主镜和双曲面次镜组合而成。其中次镜的一个焦点和抛物面主镜的焦点重合,另一个焦点为整个系统的焦点。对于反射式系统而言,它的特点是系统的尺寸短、体积小、质量轻、结构紧凑;另外焦距长,会聚光束可以通过主镜的中心孔引到主镜的外面,放置各种接收器件较方便^[1];从像差方面考虑,反射式系统没有色差,并且可以消除球差;从其他方面考虑,口径可以做得较大,尽可能多的接收光能量;反射镜可以用金属制作,也可以在普通玻璃上镀—层金属或其他介质反射膜^[2],取材简单,而且反射光能损失少,常用的镀铝发射面对红外波段的反射率一般在95%以上。

1.2 卡式光学天线存在的问题

任何光学系统设计本身有好的一面也有不足的

一面,卡式天线系统也不例外。虽然卡式光学天线有其独到的使用价值,但系统本身还存在问题。首先非球面镜加工难度较大、成本较高,而且像质容易受加工误差,温度变化等影响,因而给加工、装配和检验带来不便;从像差上考虑,反射系统没有色差,可校正球差,但是却存在较严重的轴外像差。通过对望远镜光学系统进行光路分析,发现即使采用—个较小的视场角,焦面上的弥散斑直径也很大,一般反射系统的有效视场不超过2°。此外卡式光学天线还有一个很独特的缺陷:卡塞格伦次镜和隔阑有遮光的能力,它会导致中心部分的光被遮挡^[3,4],产生渐晕。激光通信中—般用基模激光 TEM_{00} ,基模激光的光强度服从高斯分布,从分布曲线可知,中心地方的光强最大,所以即使次镜和隔阑所占据的光束面积很小,造成的光能量损失也会很大,因而卡塞格伦系统的这种渐晕现象是设计者需要注意的。下面将围绕卡式系统的渐晕和像差两个方面,讨论该系统的改进思路。

2 改进分析

2.1 渐晕消除考虑

前面已经提过自由空间光通信是采用 TEM_{00} 激光,光束强度满足高斯分布,因而中心处的光强最大。当光束被耦合到天线时,最—有用的光束就会被主镜前中央的次镜隔阑遮挡掉。这样使得光学天线增益损失达50%甚至更多。为了解决渐晕问题,下面给出了两种解决方案。

(1) 附加光器件法

这种方法的主要思路是添加额外的光器件,使光路改变,从而避免中心遮光的发生。选择合适的光器件是设计者首要解决的问题,而光器件的设计有必要从整个系统的视场变化、元件加工难度、成本以及装校等方面进行综合考虑。

—种思路是采用远焦折反射光学切光棱镜 将入射的光束分成两束或两束以上的扇形状光束并分布在望远镜口径的四周。每束光的大小与望远镜子口径大小—致,可以通过望远镜并且不会产生附加的次镜隔阑渐晕。单个切光棱镜外观上与金字塔的单个面形—样,每个这样的面可以将从中间入射的光束经过三次反射后向两傍边分成两束,从而避免了次镜隔阑的

遮光问题。图 1 是这种切光棱镜的光路轮廓图。

需要说明的是这种棱镜的金字塔状平面数可以根据设计要求增加,但是原理是一样的。从数学的角度看,如果使平面数趋于无穷的话,相当于主镜周围是一圈光环。但是对于光器件而言就是圆锥体,加工起来很复杂。关于使用这种锥体形器件耦合到望远镜的方法已有人分析和研究^[5,6]。这种望远镜系统的结构原理如图 2 所示。

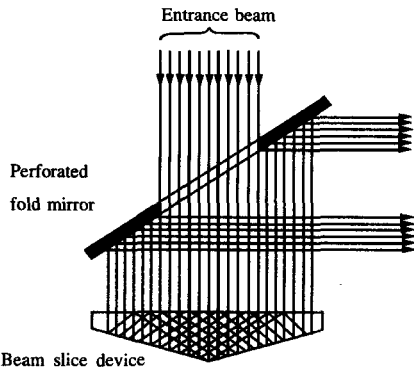


图 1 切光棱镜光路轮廓图

Fig.1 Beam layout of slice-beam prism

镜的四周也能分布同样的光束,我们可以采用多个激光光束进行耦合,另加一些辅助的光器件,以达到消除渐晕的目的。

2.2 减小像差考虑

首先看一个用软件分析的卡塞格伦系统,由图 4 发现即使只用 2° 的入射角,像点偏离中心轴的距离就已经很大。说明光束只有严格平行入射,光束才能会聚到焦点处。如果稍微有一点发散角,所获得的像

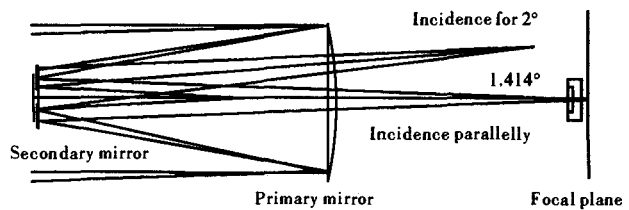


图 4 卡塞格伦天线系统

Fig.4 Cassegrain telescope

质一定很差。而对于远距离的激光通信如卫星间激光通信(GEO-LEO),视场角大约为 30°,可想而知,在焦面上根本不可能得到理想信号。针对这一点,讨论一下通信用的望远镜系统,目标在无穷远时与像差有关的因素。下面是双反射系统初级像差系数公式^[7,8]。

球差:

$$S_I = \frac{a(1+\beta_2)^2(1-\beta_2)}{4} - \frac{a(1-\beta_2)^3}{4}e_2^2 + \frac{\beta_2^2}{4}(1-e_1^2)$$

彗差:

$$S_{II} = \frac{1-a}{a} \left[\frac{a(1-\beta_2)^3}{-4\beta_2}e_2^2 + \frac{a(1+\beta_2)^2(1-\beta_2)}{4\beta_2} \right] - \frac{1}{2}$$

像散:

$$S_{III} = \left(\frac{1-a}{a} \right)^2 \left[\frac{a(1+\beta_2)^2(1-\beta_2)}{4\beta_2^2} - \frac{a(1-\beta_2)^3}{4\beta_2^2} \right] - \frac{(1-a)(1-\beta_2)(1+\beta_2)}{a\beta_2} - \frac{-a\beta_2 + \beta_2 - 1}{a}$$

场曲:

$$S_{IV} = -\beta_2 + \frac{\beta_2 - 1}{a}$$

畸变:

$$S_V = \left(\frac{1-a}{a} \right)^2 \left[\frac{a(1-\beta_2)^3}{-4\beta_2^2}e_2^2 - \frac{a(1+\beta_2)^2(1-\beta_2)}{-4\beta_2^2} \right] -$$

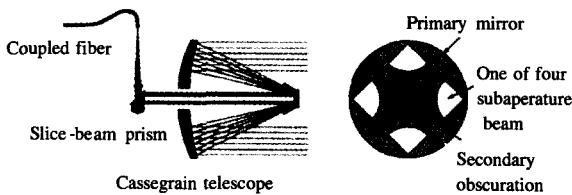


图 2 切光棱镜在卡塞格伦系统中的应用

Fig.2 Slice-beam prism implemented in Cassegrain system

(2) 半口径照明法

这种解决次镜遮挡的方法在结构设计上最简单。其原理是将光直接耦合到望远镜的半口径,光束不经过次镜和隔阑,这样次镜和隔阑被避开,也就不存在遮挡。图 3 为半口径照明法光束光路原理图。

与半口径法同样原理的一种改进思路是让望远

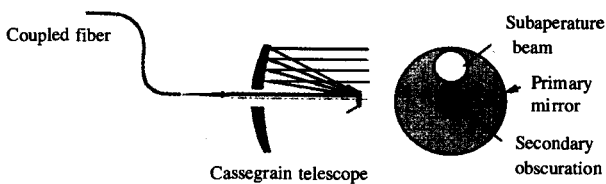


图 3 半口径照明的光路图

Fig.3 Beam layout generated by half-aperture lighting

$$\frac{3}{2} \frac{(1-a)^2 (1+\beta_2)(1-\beta_2)}{a^2 \beta_2^2} + \frac{2(1-a)(1-\beta_2)}{a^2 \beta_2}$$

式中 e_1 和 e_2 分别表示主镜和次镜的离心率; a 、 β 分别表示次镜的遮挡比和放大倍率。从公式中可以看出这五种像差系数都是这四个参数其中几个参数的函数,所以我们可以根据设计需要消除哪种像差或减小几种像差进行折衷分析,确定合适的主次镜。比如卡式系统,主镜是抛物面 $e_1=1$,设计要求消球差使第一个式子为0,选定一个合适的 β 值就可以确定 e_2 的值;如果要求同时消除或削弱其中的两种像差必须对对应的两个式子综合计算分析来确定次镜的面形。此外对于其他双反射系统消除或削弱像差的原理是同样的。

当然也可以通过改变卡塞格伦天线系统的结构来解决优化像质的问题。由于卡塞格伦望远镜轴外像差严重,在大视场内成像质量很差。因而人们也研究了一些改进的卡式系统,如施密特-卡式将主镜由抛物面镜换成了球面反射镜,另加了一个校正主镜像差的校正透镜^[9],双反射式变成了折返式。类似的还有曼金折反射系统、马克苏托夫系统,都对原始卡塞格伦系统进行了改进,从而达到减小像差的目的。

3 结论

讨论了卡塞格伦光学天线系统存在的一些问题,主要从解决卡式光学天线在光通信中产生渐晕和像差两个方面阐述如何达到良好的通信效果。文中综合的两类方案具有一定的实践性价值,希望能够给光学系统设计者一点启发。光学系统设计讲究的不仅是充实的理论功底,而且与精细、耐心,系统设计经验的积累有关,往往一个性能优、用途好的光学系统需要无

数次的推导、试验和改进才能得到。

参考文献:

- [1] ZHI Xin-jun, AI Yong. Design and analysis of a kind of optical system for free space optical communication [J]. Semiconductor Optoelectronics(支新军,艾勇.一种自由空间光通信光路的设计与分析.半导体光电), 2003, 24(3): 197-216.
- [2] XIAO Ze-xin, Wang Kun. The research of refractive receive of ray antenna design in free space optical communication [J]. Wireless of Optical Communication Technology (萧泽新,王昆.自由空间光通信折射式接收光天线的设计研究.无线通信技术), 2003, (2): 26-29.
- [3] GAO Zhan, Zhang Yi-bo. Optical antenna system in free space optical communication system [J]. Modern Science & Technology of Telecommunications (高瞻,张一波.自由空间光通信系统中的光学天线系统.现代电信科技), 2003, (3): 24-27.
- [4] Juan M Ceniceros, James R Lesh. Optical communication study for the next generation space telescope [A]. SPIE[C]. 1999, 3615.
- [5] Peters W N, Leger A M. Techniques for matching laser TEM₀₀ mode to obstructed circular aperture [J]. Appl Optics, 1970, 9(6): 1435-1442.
- [6] Klein B J, Degnan J J. Optical antenna gain-1-transmitting antenna [J]. Appl Optics, 1974, 13(9): 2134-2111.
- [7] CHEN Hai-qing. Modern Practical Optical System [M]. Wuhan: HUST University Press. (陈海清.现代实用光学系统,武汉:华中科技大学出版社), 2003.
- [8] YU Dao-yin, TAN Heng-ying. Optical Engineering [M]. Beijing: China Machine Press. (郁道银,谈恒英.工程光学.北京:机械工业出版社), 1999.
- [9] WU Zong-fan, LIU Mei-lin, ZHANG Shao-ju, et al. The Infrared and Micro-optics Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press (吴宗凡,柳美琳,张绍举,等.红外与微光技术.北京:国防工业出版社), 1998.

欢迎订阅《红外与激光工程》

《红外与激光工程》系中国宇航学会光电技术专业委员会会刊,由中国航天科工集团公司主管,创刊于1972年,是国家科委和国家新闻出版署批准的国家级学术刊物,中国科技论文统计源期刊,中国无线电电子学、电信技术类核心期刊,被英国“科学文摘(SA)”、俄罗斯“文摘杂志(AJ)”、美国“剑桥科学文摘(CSA)”、收录,入编中国学术期刊(光盘版),2004年第1~6期全部被EI核心数据库收录。

本刊为A4开本,国内外公开发行人,128页,2006年订价90元(含邮费)。邮发代号为6-133,欢迎订阅。