

Cassegrain 光学天线系统的优化设计

马晓军,王冰,杨华军,江萍,张瑶
(电子科技大学物理电子学院,四川成都610054)

摘要:由于空间光通信中采用的激光束的光场分布呈高斯分布,反射镜对光线的遮挡将严重影响天线的传输效率,从而导致通信质量的下降,针对 Cassegrain 光学天线,对光学天线的系统结构以及次镜遮拦对天线增益的影响进行了分析,并根据高斯光束经过光学系统的变换与传输特性,分析了采用 Cassegrain 天线时,遮拦比以及入射光束束腰对光束透过率的影响,提出了一种提高光学天线传输效率的新方案,改进后的天线系统,使得传输效率有了显著提高。

关键词:Cassegrain 光学天线;遮拦;优化设计

中图分类号:TB851 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.013

Optimum design for Cassegrain optical system

MA Xiao-jun, WANG Bing, YANG Hua-jun, JIANG Ping, ZHANG Yao

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: The obscuration caused by the Gaussian distribution of the laser beam in the space optical communication will affect the transmission efficiency of the antenna seriously, which leads to a drop in the quality of communication. The system structure of the optical antenna and the influence on the antenna gain is analyzed, which is caused by the obscuration of the secondary mirror in view of the Cassegrain. According to the transformation and transmission characteristics of Gaussian beams through the optical system, the effect of the obscuration and incident beam waist on the light transmittance is analyzed when Cassegrain antenna is used, and a new way is proposed to improve the transfer efficiency of the optical antenna. The improved antenna system makes its transmission efficiency improve significantly.

Key words: Cassegrain optical antenna; obscuration; optimum design

1 引言

随着激光通信、激光雷达技术的日趋成熟,大口径激光通信系统的应用愈来愈广泛。由于大口径反射镜光学系统的结构简单,不存在色差,选用适当的膜系结构,可以使从紫外到远红外都有很高的反射效率等优点反射式两镜系统在空间光通信中已被广泛的采用^[1-3]。

主次镜结构的 Cassegrain 光学天线作为一种典型的反射式光学天线系统,在激光通信中得到了广泛应用^[3-4]。但是,激光束经过室内光学系统及 Cassegrain 光学天线扩束时,由于其次镜的遮拦造成输出圆环形光束,对于入射光束光场强度为高斯分布的空间光通信系统,严重影响了光通信系统的传

输效率^[3],因此,对光学天线的遮拦进行分析并进行改进具有重要意义。本文首先分析了 Cassegrain 光学天线系统的结构,然后对次镜遮拦对天线系统的传输特性的影响进行了系统的阐述,根据基模高斯光束经过光学系统的变换和传输特性,得到了 Cassegrain 光学天线遮拦比对光束透过率的影响,并进行了实验验证。最后提出了一种新的天线改进方案,用于提高光学天线的能量传输效率,通过改进后的天线系统,其传输效率提高到了 85% 以上。

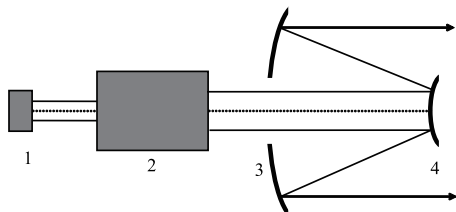
基金项目:国家自然科学基金项目资助(No. 61271167)及四川省学术带头人培养基金资助。

作者简介:马晓军(1989-),男,硕士研究生,主要从事光通信技术研究及其应用。E-mail: xiaomage22040408@163.com

收稿日期:2013-08-21

2 Cassegrain 光学天线结构分析

空间光通信中实际采用的光源为半导体激光器,具有非对称的激活通道,端面出射光束具有较大的发散角,在弧矢和子午方向上的发散角分别在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 和 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内,从而在远场形成发散的椭圆光斑,为了使光束具有更好的远场特性,在光线进入天线之前,先对半导体激光器发出的光束进行高质量的光束准直,经准直之后的光束再进入 Cassegrain 光学天线进行发射。经准直整形后的光束具有较小的发散角,通常在 $0 \sim 5$ mrad,因此可以看做是准平行光。从数学上可以证明,当光线平行于旋转抛物面主收入射到抛物面的凸面时,反射光线相当于从抛物面的焦点发出,因此,对于准直之后的平行光束,在选取反射镜面时,应当选用共焦的双抛物面系统。图 1 所示为由半导体激光器发出的光束经过预准直系统进行高质量的准直,进入 Cassegrain 天线,经过主次镜两次反射后由天线发出的过程。



1-激光器;2-预准直系统;3-抛物面主镜;4-抛物面次镜
图 1 Cassegrain 光学天线系统结构

3 次镜遮拦分析

3.1 天线遮拦比对天线增益的影响

对经过准直系统准直后的具有微小倾角入射的光束,可以将其看成是由距离天线很远的点光源入射,如图 2 所示,光束进入 Cassegrain 天线系统经次镜反射后再由主镜反射,以更小的发散角发射出去。通过理论分析可以得到^[4],天线增益因子为:

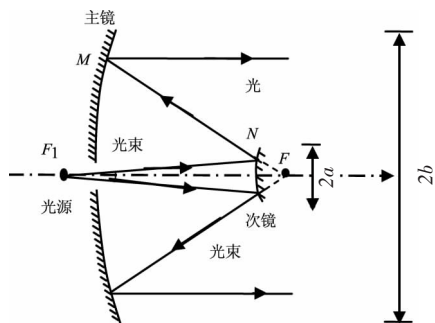


图 2 光束在 Cassegrain 光学天线系统中的传输模型

$$g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) = 2\alpha^2 \times$$

$$\left[\left| \int_{\gamma^2}^1 \exp(j\beta u) \exp(-\alpha^2 u) J_0(Xu^{1/2}) du \right|^2 \right]$$

其中, $\alpha = a/\omega$, 遮挡比 $\gamma = b/a$, $X = k a \sin\theta$, $\beta = (ka^2/2)[1/r + 1/R]$, R 为光波波阵面的曲率半径, k 为光波的波数。

对于轴上点有 $X = k a \sin 0 = 0$, 故得到天线主轴增益因子为:

$$g_T(\alpha, \beta, \gamma, 0) = \left(\frac{2\alpha^2}{\beta^2 + \alpha^4} \right) \times \{ \exp(-2\alpha^2) + \exp(-2\alpha^2\gamma^2) - 2\exp[-\alpha^2(\gamma^2 + 1)] \cos[\beta(\gamma^2 - 1)] \}$$

当接收点远离天线时,有 $\beta \approx 0$, 上式简化可以得到天线在远场辐射区的主轴增益因子:

$$g_T(\alpha, 0, \gamma, 0) = \frac{2}{\alpha^2} \times [e^{-2\alpha^2} + e^{-2\alpha^2\gamma^2} - 2e^{-\alpha^2(\gamma^2+1)}]$$

根据微扰理论^[5]可以得到系统的最佳遮挡比和光学天线系统孔径的关系为:

$$\alpha \approx 1.12 - 1.30\gamma^2 + 2.12\gamma^4$$

通过仿真可以得到天线的增益因子与指向角度因子及口径的关系以及天线在远场区的主轴增益效率因子关系曲线,如图 3 和图 4 所示。从图 3 可以看到,光波的主瓣、副瓣增益均随系统遮挡比的增加而下降。图 4 说明在远场区,主轴增益因子随着 α (主镜口径与激光束腰之比) 的增加而迅速增加,增加到最大后逐渐衰减 ($\alpha = a/\omega \approx 1.12$)。而随着天线遮挡比的增大,天线增益因子呈现下降趋势。所以在设计光学天线系统时,应选择合适的系统遮挡比,才能保证光学天线系统有较高的增益。

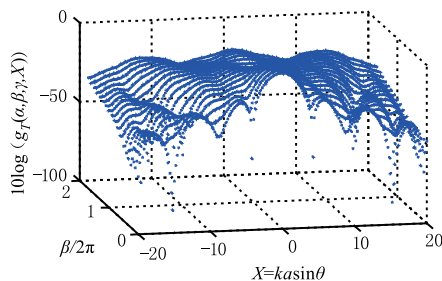


图 3 天线的增益因子与指向角度因子及口径的关系

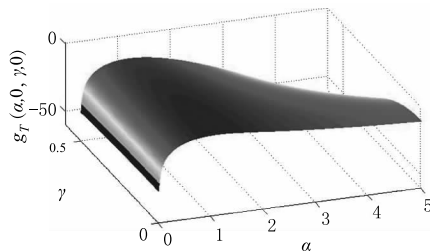


图 4 远场区主轴增益效率因子

3.2 次镜遮挡导致的能量损失

如图5所示,当光束经由次镜反射后,部分光束从主镜开孔处射出,而无法被天线发射,这样当采用激光束作为发射光束的时候会导致部分不能被忽略的能量损失,使接收到的信号变得微弱。

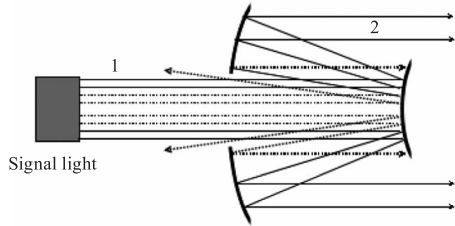


图5 Cassegrain 光学系统遮挡分析

假设高斯光束在某一横截面上的光场振幅分布为^[6]:

$$A(r) = A_0 \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right)$$

光场强度分布为:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega^2}\right)$$

式中, r 为截面至光斑中心的距离; ω 为该截面处的光腰半径。若 Cassegrain 光学天线的主镜口径为 a , 次镜口径为 b , 则高斯光束通过望远镜的功率 p 与总的入射功率 p_{in} 之间的关系式为:

$$\eta = \frac{p}{p_{in}} = \frac{\int_b^a \int_0^{2\pi} I_2(r) 2\pi r dr d\theta}{\int_0^a \int_0^{2\pi} I_1(r) 2\pi r dr d\theta}$$

其中, η 为天线的传输效率。取 $\omega = 14.6$ mm, 得到天线传输效率 η 与天线口径之间的关系曲线如图6所示。对于主镜口径为 150 mm, 次镜口径为 30 mm, 系统的遮挡比为 0.2 的天线系统, 天线的次镜遮挡损耗约为 20%。

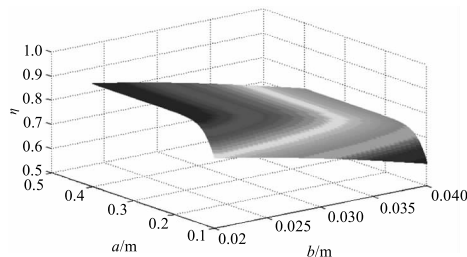
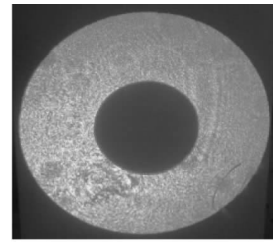


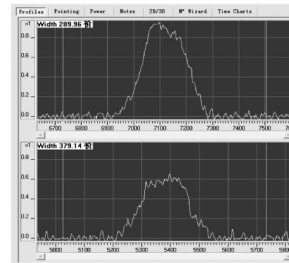
图6 天线传输效率 η 与天线口径之间的关系曲线

为了更进一步地说明天线中心遮挡导致的能量损失,以主镜口径为 150 mm,次镜口径为 30mm 的 Cassegrain 天线为实验对象,采集得到了经过 Cassegrain 天线传输后的光斑形状以及脉冲波形,如图7所示,可以很明确地得出天线中心遮挡导致输出的激光光束中心部分能量损失,无法被探测器所接

收到,从而导致脉冲峰值下降的结论。



(a) 通过Cassegrain光学天线的光斑形状



(b) 通过Cassegrain光学天线的脉冲形状

图7 通过 Cassegrain 天线系统的光斑形状以及脉冲波形

4 Cassegrain 天线的优化设计

通过分析可以知道^[7],由于被次镜遮挡部分的光束无法被主镜反射,考虑让这部分光束不被次镜反射而直接透过次镜,因此,采用在次镜上开孔的方式,让光束直接通过次镜,结合光束在自由空间中的传输特性,优化后的天线结构如图8所示。

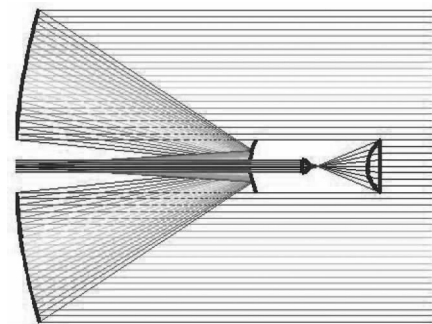


图8 卡塞格伦天线优化方案

图8中,次镜所遮挡部分光束通过开孔后直接通过次镜,进入一个倒置的开普勒望远系统,既避免了光束在传输过程中由于次镜的遮挡造成的能量损失,同时也起到了对光束的准直作用,可以将光束发射到需要的距离,并且经过一定的处理,使得透过次镜的这部分光束跟被天线发射的光束模式进行匹配。

光束经过倒置望远系统后腰斑的位置和半径分别为:

$$l' = f + \frac{(l-f)f^2}{(l-f)^2 + (\pi\omega_0^2/\lambda)^2}$$

$$(\omega')^2 = \frac{\omega_0^2 f^2}{(f-l)^2 + (\pi\omega_0^2/\lambda)^2}$$

由此我们可以求出光束经过透镜组之后的远场

发散角为:

$$\theta'' = \frac{\theta_0}{\frac{f_2}{f_1} \sqrt{1 + (\lambda l / (\pi \omega_0^2))^2}}$$

$$= \frac{\theta_0}{M \sqrt{1 + (\lambda l / (\pi \omega_0^2))^2}}$$

假设光束经过 z_1 的距离后进入扩束系统,所以在这里 $l = z_1$, 初始光腰半径为次镜开孔大小,通过仿真可以得到准直发散角与距离 z_1 和扩束倍率 M 之间的关系,如图 9 所示,随着 z_1 和 M 的增加,发散角极大的减小,因此可以通过适当的调整 z_1 和焦距比 M ,能够使通过补偿透镜的光束与经过 Cassegrain 天线反射的光束具有相同的光传输特性。

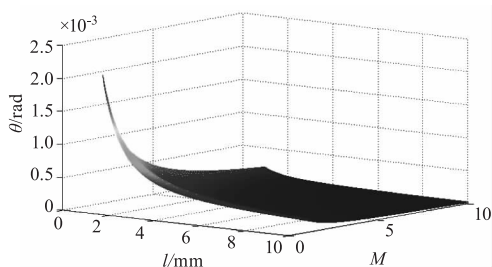


图 9 准直发散角与距离 z_1 和扩束倍率 M 之间的关系

通过改进后的光学天线,其能量利用效率大大提高,经天线发射的光功率可以表示为:

$$P'_{out} = \int_0^{2\pi} \int_0^b [|I_1(r)|^2] r dr d\phi$$

其中, b 为次镜口径大小; $I(r)$ 为由预准直系统入射到天线的光场强度分布,通过计算可以得到,通过改进后的光学天线的光传输效率可以达到 85% 以上。

5 结论

文章分析了 Cassegrain 光学天线系统的结构,并对次镜遮拦对天线增益因子以及天线传输效率的影响进行了详细阐述和分析,得出了天线增益因子随着次镜遮拦的增加而减小和天线的传输效率随着天线遮拦比的增大而减小的结论。根据以上结论以

及 Cassegrain 天线的等效模型,提出了一种次镜开孔的新的改进方案,通过这种办法,可以消除天线次镜遮拦所导致的能量损失,并且计算得到通过改进后的天线模型的传输效率可以提高到 85% 以上。

参考文献:

[1] Chuahua Wen, et al. Optical antenna in laser inter-satellites communication[J]. SPIE 2005, 5626:785 - 792.

[2] YANG Yuanjie, MA Junxing, DENG Ke, et al. Propagation of laser beams in the turbulent atmosphere passing through cassegrain antenna [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(7):739 - 742. (in Chinese)
杨元杰, 马俊兴, 邓科, 等. 湍流大气中光束经卡塞格伦天线后的传输 [J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 739 - 742.

[3] REN Guoguang. Status and development trend of air borne laser-based IRCM [J]. Laser & Infrared, 2000, 30(6): 323 - 327. (in Chinese)
任国光. 机载激光红外对抗的现状和发展趋势 [J]. 激光与红外, 2000, 30(6): 323 - 327.

[4] LI Yuquan, ZHU Yong, WANG Jiangping. The theory of optical communication [M]. Beijing: Publishing of Science, 2006:319 - 331. (in Chinese)
李玉权, 朱勇, 王江平. 光通信原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2006:319 - 331.

[5] Rachael Padman, J Anthony Murphy, Richard E Hills. Gaussian mode analysis of Cassegrain antenna efficiency [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(10):1093 - 1103.

[6] Lucimara Cristina Nakata Scaduto, Jose Sasian, et al. Two-mirror telescope design with third-order coma insensitive to decenter misalignment [J]. Optics Express, 2013, 21(6):6851 - 6865.

[7] Huajun Yang, Yu Hu, Chenghong Li, Kang Xie, Jin Fu, Hu wei. Optimum design for optical antenna of space laser communication systems [J]. IEEE, International Conference on Communications Circuits & System, 2006, 3:2016 - 2019.