

卡塞格伦光学天线光传输特性研究

何文森, 杨华军, 江 萍

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:对卡塞格伦光学天线光传输特性进行了理论分析,重点研究了影响光学天线光传输质量的几个重要因素,并进行了测试结果与仿真验证。为实际研究大气激光通信系统中光学天线的光传输特性提供了理论依据,具有重要的实用价值。

关键词:卡塞格伦光学天线;激光束;传输特性;天线增益因子

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.013

Research on laser beam propagation characteristic of Cassegrain optical antenna

HE Wen-sen, YANG Hua-jun, Jiang Ping

(College of Physical Electronic, University of Electronic Science and Technology, Sichuan Chengdu 610054, China)

Abstract:The laser beam propagation characteristic of Cassegrain optical antenna is analyzed theoretically. Several important factors (includes antenna gain factor, angle factor, distance factor, obscuration ratio, etc.) affecting the quality of laser beam in space optical communication have been researched in detail. This provides a theoretical basis for practical research on light-transfer characteristic of optical antenna in atmospheric laser communication system and has important practical value.

Key words:Cassegrain optical antenna; laser beam; propagation characteristic; antenna gain factors

1 引言

在激光工程应用中,由于卡塞格伦方式具有下述优点^[1-4]:①天线口径较大、不产生色差及波段范围较宽;②当采用非球面镜后,消像差能力较强;③光学系统结构简单、像质优良等。因此,在激光空间通信和雷达系统中,常常采用卡塞格伦天线作为光学发射和接收天线^[5-7]。

在参考文献基础上,下面对卡塞格伦天线的结构参数对增益的影响进行系统的理论分析。

2 光学天线的理论分析

假设经发射天线传输的光束为基模高斯光束^[8],则其分布可用下式^[1]表示:

$$E_0(r_0) = \sqrt{\frac{2}{\pi\omega^2}} \exp\left(-\frac{r_0^2}{\omega^2}\right) \exp\left(\frac{ikr_0^2}{2R}\right) \quad (1)$$

其中, ω 是光腰大小; R 为天线处的波面曲率。

根据衍射理论及菲涅尔近似^[9],可以得到在观察点 (r, θ) 处的强度分布为:

$$I(r, \theta) = \frac{k^2}{r^2} \times \left| \int_b^a \sqrt{\frac{2}{\pi\omega^2}} \exp\left(-\frac{r_0^2}{\omega^2}\right) \cdot \right.$$

基金项目:国家自然科学基金资助(No. 61271167);总装预研基金(No. 9140A07040913DZ02106)资助。

作者简介:何文森(1959-),男,工程师。主要从事光通信技术研究与仪器研发。E-mail:hewensen@uestc.edu.cn

收稿日期:2013-07-23;**修订日期:**2013-08-14

$$\exp\left[ik \frac{r_0^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \right] J_0(kr_0 \sin\theta) r_0 dr_0 \Big|^2 \quad (2)$$

其中, a 为天线主镜半径; b 为副镜半径。

光学天线的增益为:

$$G(r, \theta) = \frac{I(r, \theta)}{I_0} = \frac{8k^2}{\omega^2} \times$$

$$\left| \int_b^a \exp\left(-\frac{r_0^2}{\omega^2}\right) \exp\left[i \frac{kr_0^2}{2} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \right] J_0(kr_0 \sin\theta) r_0 dr_0 \right|^2 \quad (3)$$

其中, $I = 1/(4\pi r^2)$ 。设: $\alpha = a/\omega$, $\gamma = b/a$, $X = k a \sin\theta$, 则:

$$\beta = (ka^2/2) \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right) \quad (4)$$

其中, α 代表天线主镜口径与激光束光腰之比; γ 为遮挡比; X 代表光学天线的指向角度因子。

因此天线增益可写为:

$$G_T(\alpha, \beta, \gamma, X) = (4\pi A/\lambda^2) g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) \quad (5)$$

其中, $A = \pi a^2$, g_T 为天线增益效率因子。可得天线增益效率因子:

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

$$\left| \int_{\gamma^2}^1 \exp(i\beta u) \exp[-\alpha^2 u] J_0(Xu^{1/2}) du \right|^2 \quad (6)$$

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

$$g_T(\alpha, \beta, \gamma, 0) = \left(\frac{2\alpha^2}{\beta^2 + \alpha^4} \right) \times \{ \exp(-2\alpha^2) + \exp(-2\alpha^2\gamma^2) - 2\exp[-\alpha^2(\gamma^2 + 1)] \cos[\beta(\gamma^2 - 1)] \} \quad (7)$$

当接收点远离天线时(远区场), 有 $\beta \approx 0$, 式(7)可以简化为:

$$g_T(\alpha, 0, \gamma, 0) = \frac{2}{\alpha^2} \times [e^{-2\alpha^2} + e^{-2\alpha^2\gamma^2} - 2e^{-\alpha^2(\gamma^2 + 1)}] \quad (8)$$

对式(8)相对于 α 求导, 并令其等于零, 得增益取极值的必要条件:

$$\frac{2\alpha^2 + 1}{2\alpha^2\gamma^2 + 1} \exp[-\alpha^2(1 - \gamma^2)] = 1 \quad (9)$$

对于特殊的无遮挡天线, 若次镜 $b = 0$, 则 $\gamma = 0$, 式(9)简化为:

$$(2\alpha_0^2 + 1) \exp(-\alpha_0^2) = 1 \quad (10)$$

$$\text{若令 } y = (2\alpha_0^2 + 1) \exp(-\alpha_0^2) - 1 \quad (11)$$

可以通过图解法得到零解 ($y = 0$) 所对应的值: $\alpha_0 = 1.12$ (舍弃了 $\alpha_0 = 0$)。对于无遮挡天线, 该值对应于最大的轴上增益。

对于非零值 γ , 使用二阶微扰理论可以获得一

个近似解形式:

$$\alpha \approx \alpha_0 + \delta\alpha_1 + \delta^2\alpha_2 \quad (12)$$

式(12)中的 α_1, α_2 分别是零阶解 α_0 的 1 阶、2 阶修正量, 其中 δ 为量纲一的参数。

对于任意口径比 γ 取得最大轴向增益, 优化的口径与光束比 α 的关系为:

$$\alpha \approx \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 1.12 - 1.3\gamma^2 + 2.12\gamma^4 \quad (13)$$

3 光学天线增益的计算机仿真

3.1 主轴上的天线增益因子在远场区的仿真

当接收点远离天线时, 根据式(8)进行仿真得到天线主轴 ($X = k a \sin 0^\circ = 0$) 增益效率因子随着 α, γ 的变化关系, 如图 1 所示。

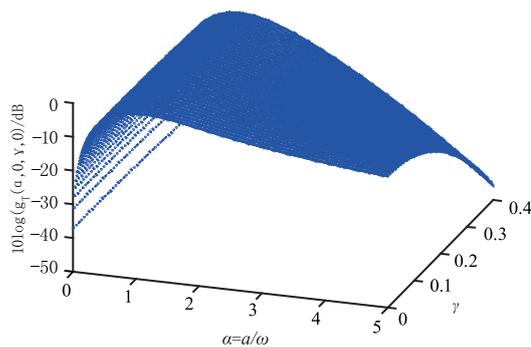


图 1 远场区: 主轴增益因子随 α, γ 变化关系

仿真结果表明: 在远场区, 主轴增益因子随着 α (主镜口径与激光束光腰之比) 的增加而迅速增加, 增加到最大后逐渐衰减 (在 $\alpha = a/\omega \approx 1.12$ 处达到最大)。而随着天线遮挡比 γ 的增加, 天线增益因子呈现下降趋势。

3.2 主轴上的天线增益因子随遮挡比的变化仿真

主轴因子随天线遮挡比及距离因子 $\beta/(2\pi) = \frac{a^2}{2\lambda} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{R} \right)$ 变化情况, 如图 2 所示。

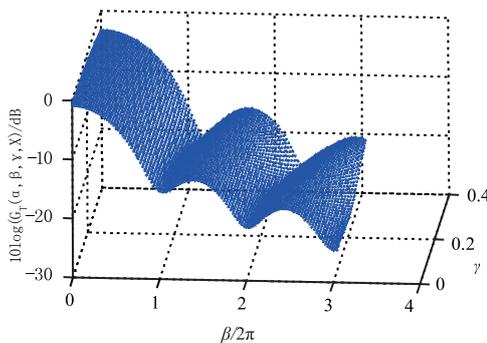


图 2 主轴增益因子随遮挡比和 $\beta/2\pi$ 的变化

仿真结果表明: 随着遮挡比的增加, 主、副瓣增益均有所下降。随着距离的增加, 增益呈现振荡形式的衰减, 增益有主瓣和多个副瓣。

从上面的分析可见遮挡比的增加,会使得增益有所下降。具体设计光学天线时,应尽量降低遮挡比 γ ,但它不能太小。减小遮挡比往往不利于像差的校正,而且太小也会导致次镜反射能量太小。综合分析各种因素本文拟选择遮挡比率 $\gamma = 0.2$,然后由式(13)得到最佳 α (即天线主镜孔径与束腰直径之比)为1.07。卡塞格伦光学天线主镜孔径选取为 $D = 2a = 150 \text{ mm}$,根据遮挡比要求,则次镜选取为: $2b = 2a\gamma = 30 \text{ mm}$ 。

3.3 增益因子随指向角度因子 X 和距离的变化关系

增益因子随指向角度因子 X 和距离因子 β 的变化关系,如图3所示。

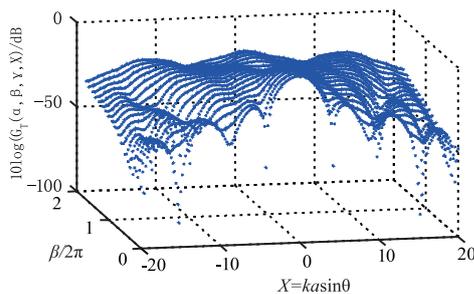


图3 天线增益随指向角度因子和 $\beta/2\pi$ 的关系

仿真结果表明:增益随着指向角度因子变化较为明显,表明卡塞格伦天线的辐射具有极强的方向性。除了增益最大的主瓣外,天线的辐射还有几个副瓣,其中最大的副瓣增益较主瓣增益小约20 dB。 $\beta = 0$ 对应于远场区,由图可见,随着 β 的增加(即距离减少),则主瓣和副瓣的增益差别愈来愈小,且主瓣增益逐渐减小。

3.4 增益随指向角度因子及波长的变化关系

选 $D = 2a = 150 \text{ mm}$, $2b = 30 \text{ mm}$, $\gamma = 0.2$,可求得对应遮挡比的最佳 $\alpha = 1.07$,计算得到激光束腰半径为70.1 mm,这可以通过设计主、副镜焦距及其位置对原始激光束扩束获得。

经过仿真得到图4所示的增益随指向角度因子与波长的变化曲线。

另外,天线的孔径 $D = 2a$ 将直接影响着天线的增益,孔径越大,增益越大,因此从提高天线增益的角度来说,卫星光通信系统的天线孔径应当选取大一些。但是,孔径增大,天线的体积、重量也要增加,会增加ATP系统调节机构的难度,故星上天线孔径也不能过大。一般卫星光通信系统的星上天线孔径在150~300 mm;由于天线副镜安装需要支撑架,因此会遮挡部分光线。合理地选择支架形式及参数也是天线设计的一个重要环节。

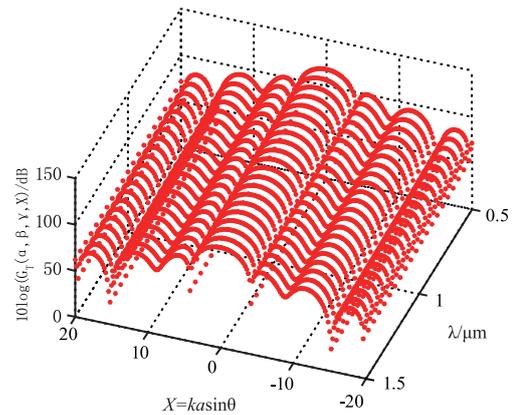


图4 增益随指向角度因子与波长的变化

4 测试结果与仿真实验

4.1 卡塞格伦光学天线三维仿真

主镜抛物面方程为: $y^2 = 2p_1x$,有效口径用 $2a$ 表示;副镜的抛物面方程为: $y^2 = 2p_2(x - d)$,有效口径 $2b$ 。扩束系统结构为双胶合透镜,孔径为 ϕ 。通过仿真,对光学天线进行优化设计,直观地显示光线经天线发射的情形,如图5所示。根据天线的技术指标要求,设计使之适合于:830 nm、860 nm、778 nm、917 nm多波长的光学天线,经理论计算得到如表1所示卡塞格伦光学天线的结构参数。

表1 卡塞格伦光学天线的结构参数

$2a$	p_1	$2b$	p_2	d	ϕ	放大倍数
150 mm	600 mm	30 mm	120 mm	240 mm	35 mm	20

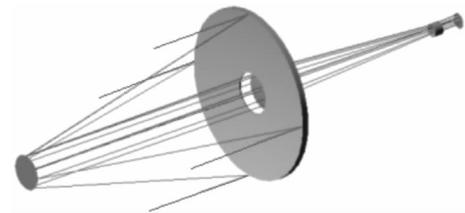


图5 卡塞格伦光学天线三维仿真图

4.2 卡塞格伦光学天线测试

图6为卡塞格伦光学天线原理图。

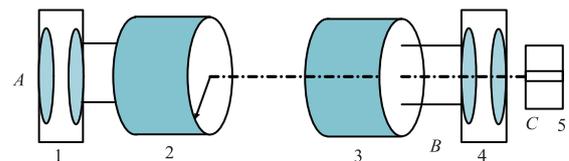


图6 卡塞格伦光学天线原理图

其中:1-准直系统;2-发射天线;3-接收天线;4-耦合透镜;5-探头。A点为测试的发射端功率;B点为测试的天线接收端功率。C点为测试的经多模光纤耦合后的出射功率。

表2所示为加装准直系统后,测试的(632.8 nm波长)激光束经卡塞格伦光学天线系统后实验

数据。

表2 A点和B点测试实验数据

测量次数	A点处功率 /mW	B点处功率 /mW	天线效率 $\sqrt{\frac{P_B}{P_A}}$
1	144.54	39.23	52.10%
2	145.36	39.36	52.04%
3	145.21	40.02	52.50%
4	146.02	38.96	51.65%
5	145.36	39.53	52.15%
平均值	145.30	39.42	52.09%
标准差	0.4714	0.3531	2.713×10^{-3}
方差	0.2223	0.1247	7.358×10^{-6}

表3所示为测试卡塞格伦光学天线接收端功率及多模光纤耦合后出射功率的实验数据。

表3 B点和C点测试实验数据

测量次数	B点处功率 /mW	C点处功率 /mW	耦合效率 $\frac{P_C}{P_B}$
1	39.23	19.91	50.75%
2	39.36	19.26	48.93%
3	40.02	19.87	49.65%
4	38.96	19.03	48.84%
5	39.53	18.79	47.67%
平均值	39.42	19.37	49.14%
标准差	0.3531	0.4485	0.0101
方差	0.1247	0.2011	1.029×10^{-4}

引起误差的原因分析:

- (1) 测试所使用的激光功率计所引起的测试误差;
- (2) 中心遮挡所引起的能量损失;
- (3) 中心轴线未精确对准所引起能量的损失;
- (4) 光学系统加工误差以及光学系统像差等因素所引起能量的损失。

4.3 卡塞格伦光学天线参数优化设计仿真

图7为卡塞格伦光学天线点列图。仿真结果表明:点列图为光学系统质量判断标准之一。能较大程度地将中心能量集中,有利于激光束远距离传输。

4.4 光学天线波像差测试

光学系统的波像差是衡量光学系统质量的关键性技术指标。高质量的光学天线系统是实现传输、通信、信息检测的关键。

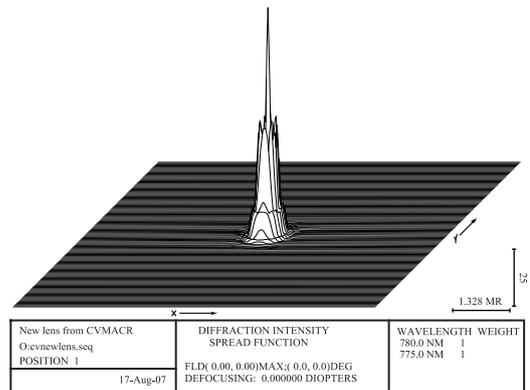


图7 卡塞格伦光学天线点列图

利用波像差测试仪对波长为830 nm的激光束测得光学天线系统横截面光斑分布如图8所示(其中的三个缺陷为卡塞格伦副镜的三个支撑架所遮挡而形成)。

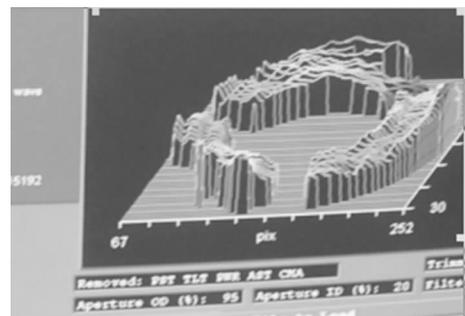


图8 光学天线波像差测试

实验测得的均方根值为 0.041λ 。测试结果表明,所设计的卡塞格伦光学天线完全满足其设计指标:波像差 $< \lambda/20$ 的要求。

5 结论

本文对卡塞格伦光学天线光传输特性进行了理论分析,重点研究了影响光学天线光传输质量的几个重要因素;并进行了测试结果与仿真验证。研究表明:对不同的天线增益因子、角度因子、距离因子、遮挡比设计具有不同的要求。为实际研究大气激光通信系统中光学天线的光传输特性提供了理论依据,具有重要的实用价值。

参考文献:

[1] Yuquan L, Yong Z, Jiangping W. Optical communication-theory and technology [M]. Beijing: Science Press, 2006. (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.

[2] Liying T, Jing M. Satellite optical communication technology [M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)

- 谭立英,马晶. 卫星光通信技术[M]. 北京:科学出版社,2004.
- [3] Yang Huajun, Yu Hu. Optimum design for optical antenna of space laser communication system[C]. 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS'06), 2006, 3: 2016 - 2019.
- [4] Jianfeng S, Liren L. Study of the transmitter antenna gain for intersatellite laser communications[J]. J. Opt. Eng., 2006, 45(5): 1 - 4.
- [5] Hemmati H. Overview of laser communications research at JPL[J]. Proc. SPIE, 2001, 4273: 190 - 193.
- [6] Guoyong Hu, Changying Chen, Zhengqiang Chen. Free-space optical communication using visible light[J]. J. Zhejiang University, 2007, 8(2): 186 - 191.
- [7] Yuanjie Y, Junxing M, Ke D, 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. 湍流大气中激光束经卡塞格伦天线后的传输[J]. 激光与红外, 2012, 42(7): 739 - 742.
- [8] Xizhen K, Xiaoli X. Introduction to wireless laser communication[M]. Beijing: BUPT, 2004. (in Chinese)
柯熙政, 席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [9] Bernard J K, John J D. Optical antenna Gain. 1: Transmitting antennas[J]. Applied optics, 1974, 13(9): 2134 - 2140.