

卡塞格伦光学天线偏轴及性能分析*

冉英华¹⁾ 杨华军^{1)†} 徐 权²⁾ 谢 康²⁾ 黄 金¹⁾

1) 电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

2) 电子科技大学光电信息学院, 成都 610054)

(2008 年 1 月 25 日收到, 2008 年 8 月 3 日收到修改稿)

设计了具有抛物面结构的卡塞格伦光学天线. 通过对偏轴下的卡塞格伦光学天线系统的分析, 得到了不同偏转角所对应的接收光斑面积表达式和功率衰减曲线. 讨论了偏轴下的接收天线增益与波长及偏转角的关系, 仿真出在偏轴与轴对准两种情形下的增益曲线. 仿真结果表明, 最大偏轴比轴对准情形增益降低了 6.564 dB. 最后分别针对轴对准与某种偏轴情形下的系统做了光斑测试实验与天线耦合效率测试实验. 结果为: 偏轴下天线耦合效率降低了 26.966%. 这些研究为星间光通信中控制系统实现光轴的精确对准提供了理论依据, 具有重要的实用价值.

关键词: 偏轴, 卡塞格伦光学天线, 偏转角, 增益

PACC: 4230Q, 4215E, 4278F

1. 引 言

随着通信技术和光器件的不断发展, 光纤通信和星间光通信的发展越来越快, 并在信息的快速传递中起着重要的作用^[1, 2]. 星间光通信与微波通信相比, 具有速率高、传输容量大、组网灵活、重量轻的优点^[3-6]. 多波长发射和接收光学天线技术是星间光通信中的关键技术, 国内外在这方面投入了大量的人力与物力, 已研制出各种多波长光学系统. 但是, 这些研究大多是建立在光学平台系统中所有的光轴均对准的基础上. 然而, 在实际的应用中, 精确光轴对准比较困难. 当光轴发生偏离时, 相应的天线增益、天线耦合效率、通信距离等都会受到影响, 所以我们对偏轴的系统进行研究. 这些研究将会在光通信领域有广泛的应用前景^[7, 8]. 本文采用卡塞格伦天线作为光学发射和接收天线. 因为它有以下突出的优点^[9]: 口径可以做得较大, 不产生色差且可用波段范围较宽. 采用非球面镜后, 有较大的消像差能力, 可以做到收发合一.

2. 光学天线光轴偏离的理论建模与仿真

卡塞格伦天线的主镜和副镜一般均采用二次曲

面镜, 如: 双曲面、抛物面等^[10]. 比较常见的组合有抛物面加抛物面、双曲面加双曲面、抛物面加双曲面, 每一种组合都有各自的优缺点. 而本文设计的卡塞格伦天线采用共焦的抛物面系统. 因为经准直整形后的光束具有较小的发散角, 这样的入射光可以被近似地看成平行光. 而共焦的抛物面系统可以满足平行光入射和平行光出射的要求. 这种系统对通信大为有利. 通过优化设计得出天线结构: 主镜面方程为 $y^2 = 2p_1x$, 孔径 $2a$ 为 150 mm, p_1 为 600 mm. 副镜面方程为 $y^2 = 2p_2(x - d)$, 孔径 $2b$ 为 30 mm, p_2 为 120 mm. 两镜面顶点间距 d 为 240 mm.

假设光学平台系统(包括预准直子系统、传输子系统和天线子系统)中除两卡塞格伦天线光轴未对准外, 其余光学子系统的轴均已对准. 如图 1 所示, 设偏转角为 γ , 并设接收天线入口处与接收天线主镜的距离为 l . 根据光传输理论, 则通过接收天线后出射光斑的面积为图中两光斑的重叠部分. 图 1 中的阴影是由中心遮挡而形成, 椭圆光斑为偏轴情形下发射天线发出的光斑在接收探测器上的投影, 圆光斑是轴对准时接收探测器上所获得的光斑. 又设光束在横截面上的能量分布是均匀的, 则不同的偏转角所对应的功率衰减为 $P_r/P = S/\pi(a^2 - b^2)$, 其中 P , P_r 分别为发射、接收功率, S 是探测器上接收

* 国家杰出青年科学基金(批准号 60588502)和电子科技大学中青年学术带头人计划资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: yanghj@uestc.edu.cn

到的光斑面积.下面将针对不同的偏转角展开讨论.

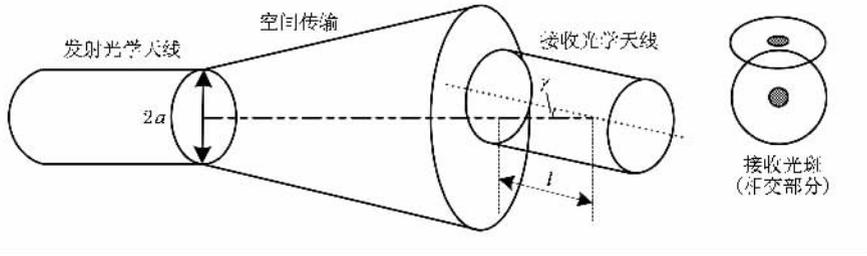


图 1 光学天线轴未对准示意图

1) 当 $\gamma > \arcsin\left(\frac{a + ak}{l}\right)$ 时, 两光斑没有重叠部分, 其中 $k = \cos \gamma$.

2) 若 $\arcsin\left(\frac{a + bk}{l}\right) \leq \gamma \leq \arcsin\left(\frac{a + ak}{l}\right)$, 此时接收到的光斑如图 2(a) 所示, 设 r 为圆的半径, a_0 为椭圆的长轴, b_0 为椭圆的短轴, 经推导得

$$S_0 = 2 \int_0^{x_1} (\sqrt{r^2 - x^2} - y_1) dx + 2 \int_{m-b_0}^{y_1} \frac{a_0}{b_0} \sqrt{b_0^2 - (y - m)^2} dy, \quad (1)$$

其中 $m = l \sin \gamma$, S_0 代表任意椭圆与圆的相交面积, (x_1, y_1) 是它们在第一象限交点 A_1 的坐标. 将点 $A_1(\sqrt{a^2 - (l \tan(\gamma/2))^2}, l \tan(\gamma/2))$ 的坐标代入(1)式可得

$$S_0 = a^2 \arcsin(G/a) - FG + \pi Ha/2$$

$$+ Ha(I \sqrt{H^2 - I^2}/H^2 + \arcsin(I/H)), \quad (2)$$

其中 $F = l \tan(\gamma/2)$, $H = a \cos \gamma$, $I = F - m$, $G = \sqrt{a^2 - (l \tan(\gamma/2))^2}$. 此种情况下的光斑面积 $S = S_1 = S_0$.

3) 当 $\arcsin\left(\frac{b + bk}{l}\right) \leq \gamma \leq \arcsin\left(\frac{a + bk}{l}\right)$ 时, 如图 2(b) 所示, 点 A_1 的坐标表达式同上, 点 $A_2(x_2, y_2)$ 则有

$$S_2 = kx_2 \sqrt{b_0^2 - x_2^2} + b_0^2 k \arcsin(x_2/b_0) + x_2 \sqrt{a^2 - x_2^2} + a^2 \arcsin(x_2/a) - 2x_2 m, \quad (3)$$

$$S = S_1 - S_2. \quad (4)$$

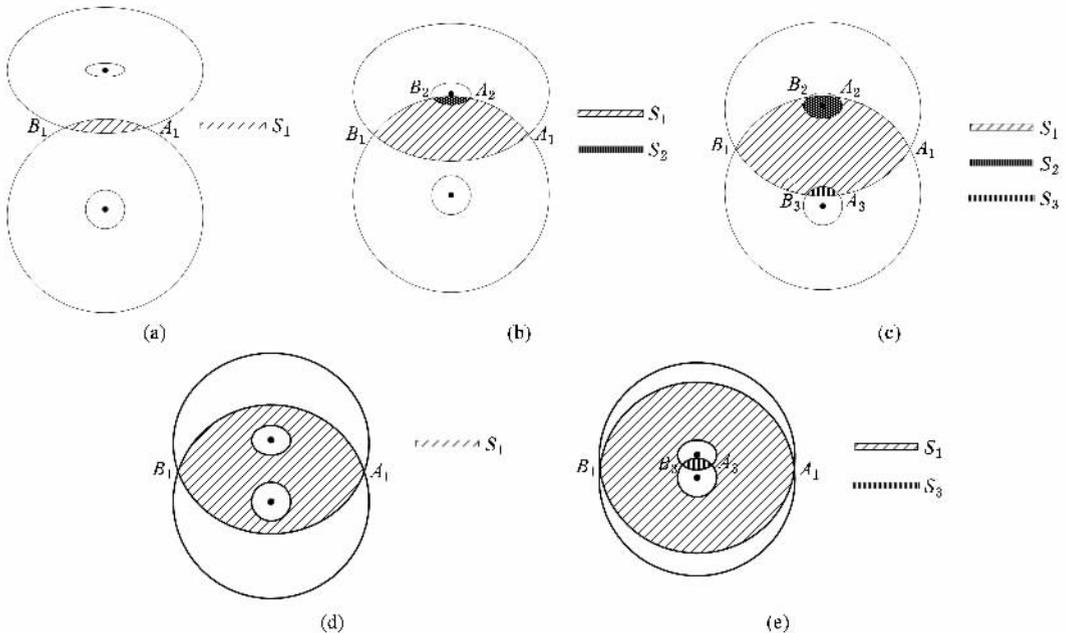


图 2 各种情形下探测器接收到的光斑分布 (a) 大椭圆与大圆相交 (b) 大圆与大、小椭圆相交 (c) 大圆与大、小椭圆相交, 且大椭圆与小圆相交 (d) 大圆与大椭圆相交, 且小圆与小椭圆被包含在相交部分 (e) 大圆与大椭圆相交, 且小圆与小椭圆相交

(3) 式中 S_2 代表了大圆与小椭圆相交面积 (4) 式中 S_1 代表了大圆与大椭圆相交面积, 表达式同上种情况的 S .

4) 若 $\arcsin\left(\frac{a-bk}{l}\right) \leq \gamma \leq \arcsin\left(\frac{b+ak}{l}\right)$, 由图 χ_c 可知, S_1 和 S_2 的表达式同上, S_3 的表达式与 S_1 同, 只是需将 a 换成 b . 则

$$S = S_1 - S_2 - S_3. \quad (5)$$

5) 若 $\arcsin\left(\frac{b+bk}{l}\right) \leq \gamma \leq \arcsin\left(\frac{a-bk}{l}\right)$, 由图 χ_d 可得

$$S = S_1 - \pi b^2 - \pi b^2 \cos \gamma. \quad (6)$$

6) 当 $0 < \gamma \leq \arcsin\left(\frac{b+bk}{l}\right)$ 时, 探测器上接收到的光斑如图 χ_e 所示, 有

$$S = S_1 - \pi b^2 - \pi b^2 \cos \gamma + S_3. \quad (7)$$

通过上面的推导, 各种情况下的光斑面积已经得出, 再利用 $P_r/P = S/\pi(a^2 - b^2)$ 可获得图 3 所示的功率衰减曲线. 仿真结果表明: 随着夹角 γ 的增加, 功率衰减得很快. 当 $\gamma > 12^\circ$ 后 ($l = 300 \text{ mm}$), 接收到的光斑的功率衰减得更快, 当 $\gamma = 28.07^\circ$ 时, 功率将衰减到零.

3. 偏轴下接收天线的性能分析

当系统中接收天线的光轴发生偏离时, 它的增益、耦合效率、接收灵敏度等都会发生改变. 由于篇幅所限, 下面主要对接收天线的增益进行讨论. 本文采用的天线是卡塞格伦天线, 它的增益为^[11]

$$G_R = 10 \log \frac{4\pi^2 a^2 k}{\lambda^2} + 10 \log(1 - \beta^2) + 10 \log \eta, \quad (8)$$

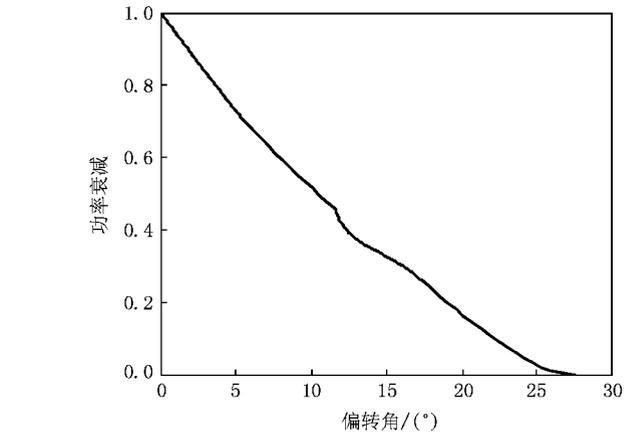
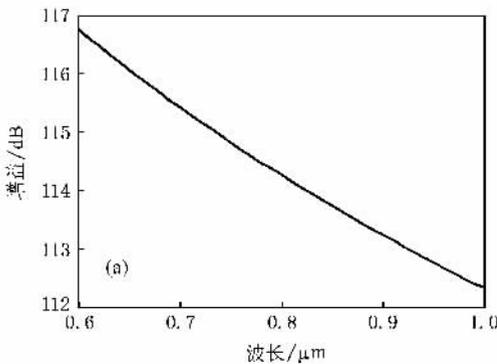


图 3 功率衰减与偏转角的关系

其中 G_R 为接收天线增益, 单位为 dB, 遮挡率 $\beta = b/a$, η 是效率因子, $k = \cos \gamma$. 第一项代表无遮挡损耗时的增益, 第二项体现了由于中心遮挡引起的损耗, 最后一项是探测器上的损耗. 由 (8) 式可得出图 4 所示的增益仿真图. 由图 4 可得, 无论是轴偏离还是轴对准天线系统, 当波长逐渐变短时, 接收天线的增益反而在逐渐增加, 这对减小整个天线系统的体积很有利. 因为采用的波长越短, 在提供相同增益的情况下, 要求的尺寸就越小, 重量也就越轻. 而与偏轴天线系统相比, 轴对准时的接收天线的增益将更大, 当波长为 830 nm 时, 最大可达到 113.937 dB, 而偏轴时只有 107.373 dB, 降低了 6.564 dB.

4. 实验测试

按照前面优化设计的天线结构, 进行加工的光学平台实物如图 5 所示. 利用衰减片等仪器对光学平台系统进行近距离 (6.5 m) 模拟远距离 (10000 km)

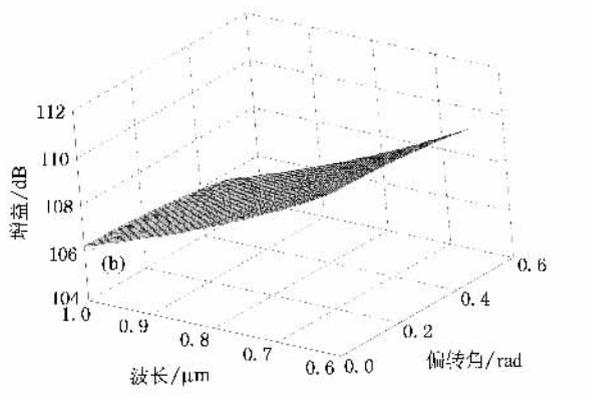


图 4 接收天线的增益仿真图 (a) 轴对准情形 (b) 偏轴情形

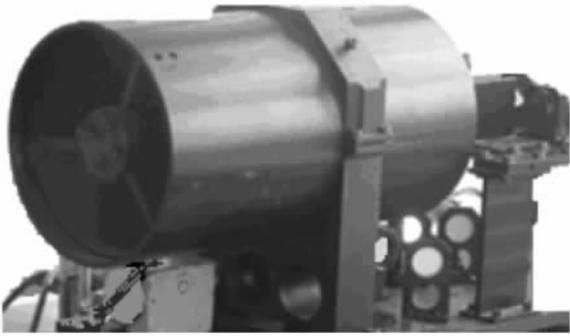


图 5 光学平台系统实物

的实验测试.系统中信号光源是波长为 830 nm,功率为 150 mW 的半导体激光器.当光学平台开始工作时,探测器上接收到的光斑如图 6(a)所示,通过测试得到此时的功率衰减 $P_r/P = 0.298$ (所使用的数字功率计型号 2832-C).由前面的理论(2)式和 P_r/P

$P = S/\pi(a^2 - b^2)$ 可得出偏转角 γ 为 17.35° .以此为根据进行光轴调试,先进行粗对准,然后通过反复的对准、跟踪、精密机械转动装置调整直至功率衰减比 P_r/P 无限接近于 1,这就实现了发射天线和接收天线之间光轴的精确对准.当发射与接收天线的光轴对准时,离焦情形下得到的光斑见图 6(b),其中的三个阴影由天线的三个支架遮挡而形成.

通过上面的实验,发射天线与接收天线之间的光轴得到了对准.此种情形下的光通信端机系统在通信码率为 155 Mbps 时,测得的通信误码率优于 10^{-6} (所使用的误码仪型号:N4903A).在此基础上,对光学天线系统的耦合效率进行测试.在近距离下,天线耦合效率测试原理如图 7 所示,设进入准直系统前的功率为 P_1 ,接收天线中经准直系统后的功率为 P_2 ,则单独一个天线的耦合效率为 $\sqrt{P_2/P_1}$,测试结果如表 1 所示.

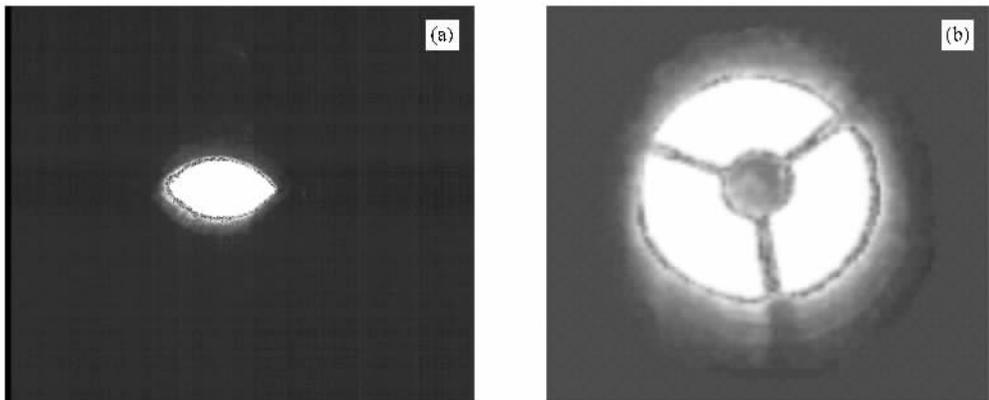


图 6 探测器上接收到的光斑图 (a)偏轴情形 (b)轴对准情形

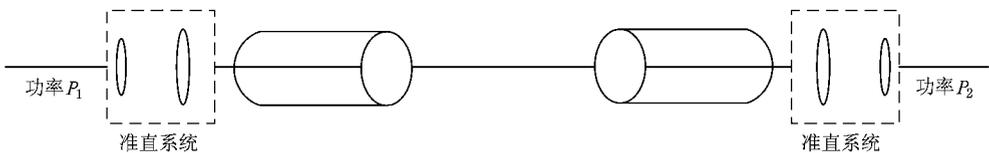


图 7 光学天线耦合效率测试示意图

本实验中获得功率值是在数字功率计的探头上加上衰减片(衰减倍数为 1000 倍)测得的.当偏转角 γ 为 17.35° 时,天线的耦合效率是 $\eta = \sqrt{0.298} \times 59.38\% = 32.42\%$.将两种情形下计算的天线传输

耦合效率值比较发现,偏轴时的效率降低了 26.966%,具有较大的影响.因此,为了提高天线的耦合效率,必须对平台中的所有光轴进行精确的对准.



表 1 830 nm 波长天线耦合效率测试数据

	P_1/nW	P_2/nW	天线耦合效率/%
	2912.2	1027.5	59.4
	2915.3	1028.6	59.4
测量	2915.6	1025.3	59.3
次数	2913.8	1024.6	59.3
	2914.2	1028.2	59.4
	2914.5	1031.8	59.5
平均值	2914.30	1027.70	59.38
标准差	1.22	2.58	0.08
方差	1.48	6.65	0

5. 结 论

本文从光传输理论出发,得到了不同偏转角下的光斑面积表达式与功率衰减曲线.当偏转角逐渐

变大时,探测器上接收到的信号功率会越来越小,当 γ 超过 28.07° 时,探测器上就接收不到任何信号,也就无法进行通信.另外,对偏轴下的接收天线的增益进行了理论分析与仿真.仿真结果表明,最大偏轴比轴对准情形增益降低了 6.564 dB.最后分别针对轴对准与某种偏轴情形下的系统做了光斑测试实验与天线耦合效率测试实验.与轴对准天线相比,偏轴下的天线耦合效率降低了 26.966%.因此当光通信中光学平台实际工作时,需要通过检测功率衰减来判断出轴偏离程度,再调整控制系统使得捕获、跟踪、对准(ATP)系统能进行光轴的精确对准,从而提高系统的增益、耦合效率和增加对准精度,以确保通信的顺利进行.

- [1] Pei L, Ning T G, Li T J, Dong X W, Jian S S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1630 (in Chinese) [裴丽、宁提纲、李唐军、董小伟、简水生 2005 物理学报 **54** 1630]
- [2] Gong J M, Fang Q, Liu J, Wang Y C 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1287 (in Chinese) [巩稼民、方强、刘娟、王永昌 2000 物理学报 **49** 1287]
- [3] Busch T E, Oleski P J, Dorrian K W, Nicholson D J 1994 *SPIE* **2123** 24
- [4] Hemmati H 2001 *SPIE* **4273** 190
- [5] Araki T, Nakamori S, Hisada Y, Fukuda T 1994 *SPIE* **2123** 2

- [6] Boroson D M, Bondurant R S, Scozzafava J J 2004 *SPIE* **5338** 37
- [7] Basu S, Voelz D 2006 *SPIE* **6304** 63041M-1
- [8] Liu X M, Liu L R, Sun J F, Lang H T, Pan W Q, Zhao D 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5149 (in Chinese) [刘锡民、刘立人、孙建锋、郎海涛、潘卫清、赵栋 2005 物理学报 **54** 5149]
- [9] Cho Y M, Kong H J, Lee S S 1994 *Opt. Eng.* **33** 2481
- [10] Yang H J, Hu Y, Xie K 2007 *Chin. J. Lasers* **34** 1608 (in Chinese) [杨华军、胡渝、谢康 2007 中国激光 **34** 1608]
- [11] Degnan J J, Klein B J 1974 *Appl. Opt.* **13** 2397

Properties of Cassegrain optical antenna with inclined optical axis^{*}

Ran Ying-Hua¹⁾ Yang Hua-Jun^{1)†} Xu Quan²⁾ Xie Kang²⁾ Huang Jin¹⁾

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

2) *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China*

(Received 25 January 2008 ; revised manuscript received 3 August 2008)

Abstract

A Cassegrain optical antenna with parabolic structure is designed. By detailed analysis of Cassegrain optical antenna in partial axis situation, the expression of the area of the receiving spot and the power decline curve are obtained for different deflection angles. The relations between the received antenna gain and the wavelength and deflection angles are discussed in partial axis situation, the curves of gain for partial axis and axis alignment are simulated. The simulation result indicates that the gain of the maximal partial axis decreases by 6.564 dB compared with that of axis alignment. Experiments of the optical spot test and the antenna coupling efficiency test are carried out separately for axis alignment and certain partial axis situations. The results show that the antenna coupling efficiency under partial axis situation is 26.97% lower than that of axis alignment. This study will provide a theoretical foundation for the control system to realise perfect alignment of optical axis in inter-satellite optical communications.

Keywords : partial axis , Cassegrain optical antenna , deflection angle , gain

PACC : 4230Q , 4215E , 4278F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (Grant No. 60588502) and the Program of Middle and Young Scientific Leaders of University of Electronic Science and Technology of China.

[†] Corresponding author. E-mail : yanghj@uestc.edu.cn