

激光空间通信中的天线研究*

葛林** 邱昆 唐明光

(电子科技大学光纤通信国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】 论述了中心遮挡高斯分布情形下卡塞格伦光学天线的增益理论。根据计算结果,绘出了设计曲线并讨论遮挡率和指向误差对增益的影响。分析表明,即使微弧量级的误差,也会对增益产生很大影响。此外,还讨论了卡塞格伦天线的设计问题。

关键词 激光通信; 高斯波束; 卡塞格伦天线; 增益

中图分类号 TN929.1

在激光空间通信和雷达系统中,采用卡塞格伦天线作为光学发射和接收天线。由于卡塞格伦方式具有天线后瓣小,天线轴向尺寸短,设计馈源灵活及增益高等优点,因此,特别适合于空间通信系统。但是,卡塞格伦天线中次级反射镜的中心遮挡效应对光学天线增益和波束发散均有较明显的影响,有关专家在理论上已作了不同程度的分析^[1]。本文结合目前所研究的课题编制出一套软件,对光学天线增益进行计算分析。

根据激光空间通信的距离方程

$$P_s = P_T G_T G_R T_T T_R T_A \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

式中 P_s 为接收机探测器接收的入射光功率; P_T 为发射机功率; G_T 和 G_R 分别为发射和接收天线增益; T_T 和 T_R 为发射机和接收机效率; T_A 为大气传输损耗; $(\lambda/4\pi R)^2$ 表示自由空间损耗。从式(1)可以看出,发射机和接收机的天线增益对激光空间通信的功率预算起着非常重要的作用。此外,我们还对光学天线设计中的技术要求进行了讨论。

1 理论与分析

1.1 理论推导

对微波通信或激光通信系统,均可采用麦克斯韦方程进行分析。其远区辐射场满足惠更斯—夫累涅尔原理,空间任意一点的波幅大小是由各次级波源在该点波幅矢量迭加而成。

图1是卡塞格伦天线示意图,其中 a 、 b 分别表示初级和次级反射镜口面半径。首先假定初级反射口径面具有以下电场分布

$$E_0(r_0) = A \exp\left[-\frac{(r_0)^2}{\omega^2}\right] \exp\left(\frac{jk(r_0)^2}{2R}\right) \quad (2)$$

式中 ω 为激光光腰; R 为波阵面曲率半径。

对于固体激光器,输出波束为圆对称且电场满足高斯分布,而对于半导体激光器,可采用单模光纤将椭圆波束转化为圆波束,或利用光学透镜实现椭圆波束到圆波束的转化。

1998年1月13日收稿

* 国防科研基金资助项目

** 男 29岁 硕士生

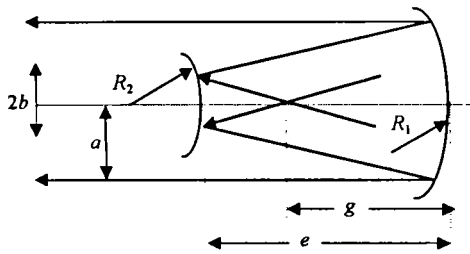


图1 卡塞格伦天线示意图

积分得到观察点的强度分布为^[2]

$$I(r_1, \theta_1) = \frac{k^2}{(r_1)^2} \left\{ \left| \int_b^a \left[\frac{(2)^{\frac{1}{2}}}{(\pi)^{\frac{1}{2}} \omega} \exp\left[-\frac{(r_0)^2}{\omega^2}\right] \exp\left[\frac{jk(r_0)^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R}\right)\right] J_0(kr_0 \sin\theta_1) \right] r_0 dr_0 \right|^2 \right\} \quad (5)$$

各向均匀辐射器的强度分布为

$$I_0 = \frac{1}{[4\pi(r_1)^2]} \quad (6)$$

光学天线增益定义为:来自天线的辐射强度与各向同性辐射器的辐射强度的比值。因此,天线增益为

$$G(r_1, \theta_1) = [I(r_1, \theta_1)]/I_0 = \frac{8k^2}{\omega^2} \left| \int_b^a \exp\left[j \frac{kr_0^2}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{R}\right)\right] \exp(-r_0^2/\omega^2) J_0(kr_0 \sin\theta_1) r_0 dr_0 \right|^2 \quad (7)$$

定义 $\alpha = a/\omega$, $\gamma = b/a$, $X = ka \sin\theta$, $\beta = (ka^2/2)[(1/r) + (1/R)]$, 则

$$G_T(\alpha, \beta, \gamma, X) = (4\pi A/\lambda^2) g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) \quad (8)$$

其中

$$g_T(\alpha, \beta, \gamma, X) = 2\alpha^2 \left[\left| \int_\gamma^1 \exp(j\beta u) \exp(-\alpha^2 u) J_0(Xu^{\frac{1}{2}}) du \right|^2 \right] \quad (9)$$

式中 $g_T(\alpha, \beta, \gamma, X)$ 称为天线增益效率因子。令 $X = 0$, 则得到天线主轴增益, 即

$$g_T(\alpha, \beta, \gamma, 0) = \frac{2\alpha^2}{\beta^2 + \alpha^4} \{ \exp(-2\alpha^2) + \exp(-2\alpha^2\gamma^2) - 2\exp[-\alpha^2(\gamma^2 + 1)] \cos[\beta(\gamma^2 - 1)] \} \quad (10)$$

采用微扰理论可以得出,最佳遮挡率和口径的关系为

$$\alpha \approx 1.12 - 1.30\gamma^2 + 2.12\gamma^4 \quad (11)$$

1.2 计算结果分析

图2为根据式(8)得出的天线方向图。天线设计中,考虑遮挡率 $\gamma = 0.2$, 相应地 $\alpha = 1.07$ 。图中分别示出 $\beta = 0, 0.54, 1.27$ 时,天线增益因子与角度的关系。对于口径 7.5 cm 、波长 $0.83 \mu\text{m}$ 的光学天线,当 $\beta = 0.54$ 时,观察点到天线距离 $r = 7 \text{ km}$, 位于辐射近场区(大于 13.5 km 为辐射远场区),因而 $\beta = 0, 54, 1.27$ 时天线方向图发生畸变。图3表示天线理论增益值(不考虑遮挡及其他因素的影响)与天线口径的关系。图4为指向误差对天线增益影响的曲线。我们分别考虑 $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$, 口径 7.5 cm 和 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, 口径 25 cm 两种情形: 1) 理论增益值为 109 dB , 计算结果为: 主轴增益 107.6 dB , 指向误差 $\theta = 5 \mu\text{rad}$ 时, 增益值为 105.7 dB ; 2) 天线理论增益值为 114.1 dB , 计算

其次,假定口径平面输入光功率为1,即归一化

$$P = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty [|E_0(r_0)|]^2 r_0 dr_0 d\psi \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),得

$$A = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}} \omega$$

因此,式(2)变为

$$E_0(r_0) = \left(\frac{2}{\pi\omega^2}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{(r_0)^2}{\omega^2}\right] \exp\left[\frac{jk(r_0)^2}{2R}\right] \quad (4)$$

对于夫累涅尔近似场区的辐射场,采用基尔霍夫

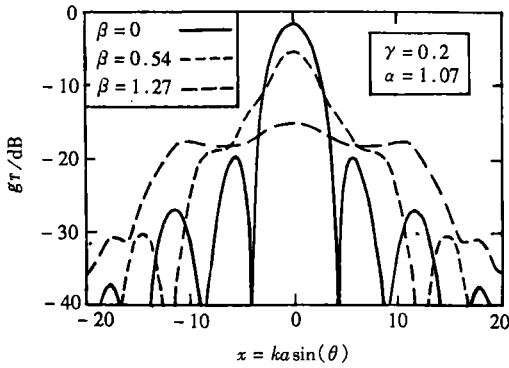


图2 发射天线方向图

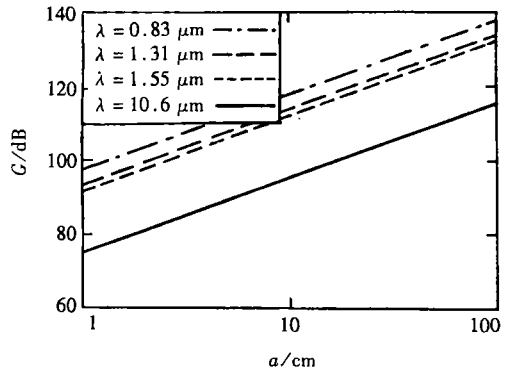


图3 天线增益与口径大小的关系

结果: 主轴增益 112.5 dB, 指向误差 $\theta = 5 \mu\text{rad}$ 时, 增益为 106 dB。因此, 指向误差对天线增益影响相当大(即使几个微弧), 并且口径越大, 增益值下降越快。

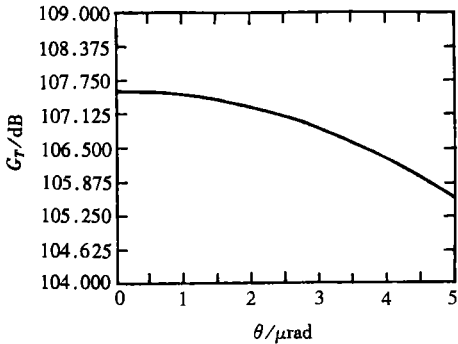
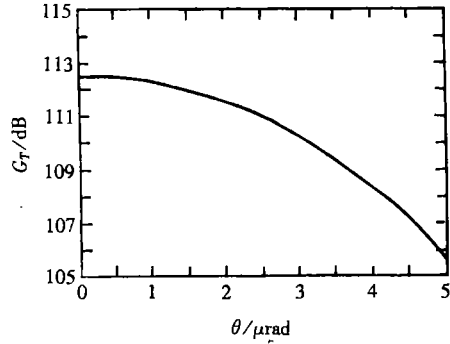
(a) $\lambda = 0.83 \mu\text{m}$; 口径为 7.5 cm 的情形(b) $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$; 口径为 25 cm 的情形

图4 指向误差对天线增益的影响

分析得出, 指向误差对激光空间通信具有十分严重的影响, 如何保持星间的精确对准是空间光通信中一个十分关键的技术, 但这属于定向、探测和跟踪分系统(PAT)的范畴, 在此不作讨论。

2 天线设计

2.1 主要光学性能要求

1) 高的光学质量 对于波长 $0.83 \mu\text{m}$, 视场(FOV)为 $2000 \mu\text{rad}$ 时, 波阵面均方根误差(RMS)小于 $\lambda/20$, 曲率半径大于 65 km。

2) 低的遮挡率 b/a 越大, 次级反射镜对天线的遮挡效应越显著, 天线增益降低; 但是, b/a 太小, 次级反射镜附近的绕射效应不能忽略, 造成不需要的空间方向上辐射功率, 降低天线增益, 而且次级反射面口径太小, 加工也相对困难。在激光空间通信中, 要求次级反射镜及其他附件对天线的遮挡率小于 5%, $b/a = 0.2$ 较为适宜。

3) 光学透镜的高透射率及主、次反射镜的高反射率。

4) 低的散射光效应。

5) 材料的热膨胀系数小, 机械强度高, 重量轻, 使用寿命长^[3]。

2.2 光学天线设计问题

为满足激光空间通信对天线的要求,我们选择卡塞格伦天线,如图1所示。光学天线包括以下几部分:1) 抛物面初级反射镜;2) 双曲面次级反射镜;3) 聚焦透镜。

卡塞格伦天线设计包括初、次级反射镜口径大小,焦距长度,角度放大倍数以及初、次级反射镜的相对位置等重要参数。根据近轴透镜公式: $X = f^2 / (R - f)$ 。假定 $R = 100 \text{ km}$,当初级反射镜焦距 $f = 35 \text{ cm}$ 时,初、次级反射镜可容忍的位置公差只有几微米,因此,卡塞格伦天线的设计是一个十分困难的问题。

聚焦系统由一组透镜构成,它成像在天线结构的外部,从而增加了馈源设计的灵活性。此外,空间环境要求天线重量轻,可考虑采用全玻璃陶瓷,其热膨胀系数非常低(小于 $0.5 \times 10^{-6} / \text{K}$),抗张强度大,使用寿命长,非常适合用作环境温度变化很大的空间光通信系统的光学材料^[4]。

3 结束语

本文论述了高斯波束情形下光学天线的增益理论,对计算结果进行了分析,并涉及到天线的设计。由于光学天线的设计是一个十分复杂的问题,需要结合具体技术要求进行分析计算,并经过地面状态的反复试验,因而,尚没有条件进行这方面的论证与实验。

参 考 文 献

- 1 张德齐.微波天线.北京:国防工业出版社,1987
- 2 Katzman Morris. Laser satellite communication. London: Prentice-Hall Inc, 1987
- 3 Henneberg Peter, Schubert Hermann. A new telescope concept for space communication. SPIE Freespace Laser Communication Technologies, 1990, (1 218): 153 ~ 159
- 4 Nakagawa Keizo, Yamamoto Akio. Preliminary design of laser utilizing communications equipment (LUCE) installed on optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS). SPIE Freespace Laser Communication Technologies, 1995, (2 381): 14 ~ 25

Study of Optical Antenna for Laser Space Communication

Ge Lin Qiu Kun Tang Mingguang

(State Key Lab. of Optical Communication, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In this paper, the theory of optical antenna gain of centrally obscured Gaussian distribution is described. According to the calculations, design curves are drawn and the influence of obscuration ratios and pointing errors on antenna gain are studied. The analysis shows that even a pointing error on the order of microradians can strongly affect the antenna gain. The design problem of Cassegrainian telescope is also discussed.

Key words laser communication; Gaussian beam; Cassegrainian telescope; gain

编辑 叶红