

利用衍射锥镜降低卫星光通信探测器位置精度要求的方法

俞建杰^{1,2}, 胥全春¹, 周彦平¹, 马晶¹, 谭立英¹

- (1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 哈尔滨工业大学 仪器科学与技术博士后流动站, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对卫星光通信系统中接收系统对探测器位置的精度要求, 提出利用扩大焦深范围的方法降低探测器的轴向位置精度要求。并根据接收光学天线存在中心遮挡的实际情况, 采用切趾圆环对数型衍射光锥实现光束强度的轴向均匀分布。利用能量守恒法获得了衍射锥镜的位相分布函数和振幅透过率函数。计算机仿真结果表明, 利用该光锥实现光强轴向均匀分布的能力远大于普通透镜, 它将有效提升卫星光通信系统捕获、跟踪、通信性能的可靠性。

关键词: 衍射锥镜; 卫星光通信; 长焦深

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)11-3683-05

Method for reducing accuracy requirement of detector position with diffractive axicon in satellite optical communication

Yu Jianjie^{1,2}, Xu Quanchun¹, Zhou Yanping¹, Ma Jing¹, Tan Liying¹

- (1. School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Post-doctoral Mobile Station of Instruments Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Due to the high accuracy of the detector position in receiving system of satellite optical communication, the method expanding the focal depth was put forward to reduce the acquirement of the axial detector position accuracy. According to the central obstacle caused by receiving optical antenna, apodized annular-aperture logarithmic axicon was utilized to achieve uniform distribution of the beam on the optical axis. By means of the geometrical law of energy conservation, the phase distribution function and the intensity transmittance function of the diffractive axicon were obtained. Numerical simulation results show that the capacity which uses apodized annular-aperture logarithmic axicon to achieve uniform distribution of the beam on the optical axis is much larger than that of ordinary lenses', which can enhance the reliability of the acquisition, tracking and communication in satellite optical communication system significantly.

Key words: diffractive axicon; satellite optical communication; long focal depth

收稿日期: 2014-03-06; 修订日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(10904026); 黑龙江省博士后基金(LBH-Z10140)

作者简介: 俞建杰(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间光学系统设计及检测方面的研究工作。Email: yjjhit@163.com

0 引言

卫星激光通信是以激光作为信息的载体,在卫星间或星地间进行极远距离、极弱信号传输的通信方式,是地面光通信技术在卫星应用领域的拓展,也是现代大容量空间通信领域的重要研究方向^[1-2]。卫星光通信系统在光信号的瞄准、捕获和跟踪过程中对接收光斑的质量均具有非常严格的要求,其对接接收探测器的位置精度要求很高,通常在微米量级。接收探测器的横向和轴向位置变化会造成接收光功率下降,导致跟瞄误差增大、信噪比下降等,从而影响接收系统性能。

接收探测器的横向位置通常可通过精密加工和装调予以保证。然而,与横向位置精度相比,当接收光束的波长处于不可见光波段(例如现在通信常用的光波长为 1 550 nm)时,很难将其轴向位置精度控制在微米量级。例如,在对信号探测器进行调试时,由于光束不可见,只能通过接收信号的强弱来判断探测器的位置是否准确。由于一般采用平行光管调试,经过光学系统后,平行光束聚焦在探测器上,如果聚焦光斑尺寸小于信号探测器的光敏面尺寸,探测器能在一定轴向范围内满足接收信号最大的判断要求,即任务在一定的轴向范围内信号探测器的位置都足够精确。然而在实际使用中,信号探测器具有一定的接收视场角,对于处于上述能使入射平行光信号最大而实际偏离聚焦透镜焦平面位置的探测器而言,当接收信号光以一定视场角入射时,一部分光束可能会入射至探测器光敏区外,从而造成信号衰减。

此外,接收探测器的轴向位置还会受到振动、机械误差、热梯度等因素的影响,使其偏离光学系统的焦平面。因此,如何降低接收探测器的位置精度要求,使其在轴向位置发生一定变化时仍能保持光学接收性能是光通信系统中优化设计的重要问题。

为消除探测器轴向位移造成的不利后果,提高系统的稳定性和可靠性,要求接收探测器前端的聚焦透镜组具有高横向分辨率和长焦深特性。传统的光学元件(透镜、反射镜等)不能同时满足高分辨率和长焦深要求^[3]。为同时满足系统对高分辨率和长焦深的要求,可采用衍射锥镜(Axicon)替代普通球面透镜^[4-5]。

此外,由于卫星光通信系统一般采用卡塞格林

式的同轴两镜型光学天线,此时接收成像透镜组前的光强分布为环形分布。针对此特点,文中提出采用切趾圆环对数型衍射光锥进行轴向均匀接收光学系统的设计^[6]。

1 基于能量守恒法的圆环对数光锥设计

为得到比普通透镜组更大的轴向焦深范围,可将透镜设计成光锥的形式。1992年,Sochacki和Jaroszewicz等人利用几何光学光线追迹的方法,利用能量守恒法设计对数光锥,从而实现无衍射光束^[7]。

如图 1 所示,设 $P_s(r_1)$ 为入射光束沿径向的功率密度分布, $P_z(z)$ 为出射光束沿轴向的功率密度分布。按几何光线追迹和一一对应原则,并根据能量守恒有^[8]:

$$2\pi P_s(r_1)r_1 dr_1 = P_z(z) dz \quad (1)$$

公式(1)在半径为 r_1 、宽度为 dr_1 的环带与轴向距离为 z 、间距为 dz 之间建立了一一对应的能量映射关系。

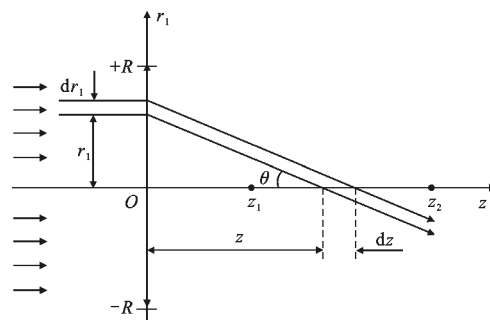


图 1 能量守恒法改善圆锥透镜的光束传播特性

Fig.1 Beam propagation characteristic of axicon based on energy conservation

对公式(1)取积分得到^[8]:

$$2\pi \int_{\rho}^{r_1} P_s(r_1)r_1 dr_1 = \int_{z_1}^{z(r_1)} P_z(z) dz \quad (2)$$

由于卫星光通信终端之间的通信距离极大,其接收端接收到的光强分布可近似为均匀分布,所以实际入射光的强度分布和所要求的轴向强度分布均可视为均匀分布,即 $P_s(r_1)=P_s=\text{const.}$ 和 $P_z(z)=P_z=\text{const.}$, 将其代入可得:

$$z(r_1) = z_1 + a(r_1^2 - \rho^2), \rho \leq r_1 \leq R \quad (3)$$

式中: $a = \frac{\pi P_s}{P_z} = \frac{z_2 - z_1}{R^2 - \rho^2}$ 。

将 $z(r_1)$ 代入远轴微分方程(参考图 2), 有^[8]:

$$\frac{d\phi(r_1)}{dr_1} = -\sin\theta = -\frac{r_1}{\sqrt{r_1^2+z^2(r_1)}} \quad (4)$$

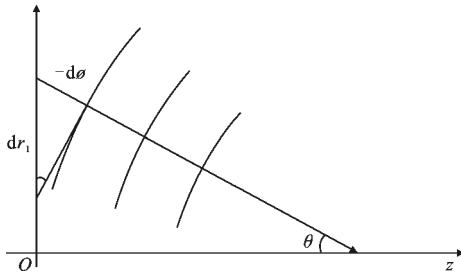


图 2 光程函数与光线偏角间的关系

Fig.2 Differential relationship between optical path length and light deflection angle

求解该式便可得到器件的光程函数为^[8]:

$$\phi(r_1) = -\frac{1}{2a} \ln\{2a[a^2r_1^4 + (1+2az_1)r_1^2 + z_1^2]^{1/2} + 2a^2r_1^2 + 1 + 2az_1\} + \text{const.} \quad (5)$$

在旁轴近似条件 $(R/z_1 \ll 1)$ 下, 公式可简化为^[8]:

$$\phi(r_1) = -\frac{1}{2a} [z_1 + a(r_1^2 - \rho^2)] + \text{const.}, \rho \leq r_1 \leq R \quad (6)$$

利用前文所述的光程函数即可得到衍射光锥的位相分布函数:

$$\varphi(r_1) = -\frac{2\pi}{\lambda} \phi(r_1) \quad (7)$$

2 切趾圆环对数光锥的设计

由参考文献[8]可知, 入射光束在经过纯位相器件后, 其轴向光强分布仍存在较大振荡, 并且横向分辨率也有较大变化。

为减小输出光束的强度振荡, 进一步提高轴向均匀性和横向分辨率, 将切趾圆环对数光锥在圆环对数光锥的基础上作了如下改进: (1) 平滑 P_1 平面上 $r_1 = \rho$ 附近的强度透过率, 使其呈连续变化, 以减小由圆环边界的不连续引入的能量波动; (2) 平滑焦深范围 $(z_1 - z_2)$ 内的轴上目标强度分布, 使其呈连续变化, 以减少光强振荡。

考虑以上, 最终轴向功率密度分布如下^[8]:

$$P_2(z) = \begin{cases} P_2 \sin^4[\pi(z-z_1)/2\delta z] & z_1 \leq z \leq z_1 + \delta z \\ P_2 = \text{const.} & z_1 + \delta z \leq z \leq z_2 - \delta z \\ P_2 \sin^4[\pi(z_2-z)/2\delta z] & z_2 - \delta z \leq z \leq z_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中: δz 为焦深范围内强度分布平滑区的长度。它满足:

$$\delta z = z_2 - z_1 \quad (9)$$

注意, 公式(8)具有连续的一阶偏导, 这种选择形式使其强度分布具有平滑和对称性质。

假设衍射光锥的位相分布函数式和光线方程式保持不变, 考虑强度透过率函数后, 输入和输出间仍满足能量守恒定律:

$$2\pi P_s T(r_1) r_1 dr_1 = P_z(z) dz \quad (10)$$

式中: 输入光束的二维功率密度 $P_s = \text{const.}$ 仍为均匀分布, 而输出的一维功率密度 $P_z(z)$ 则满足公式(8)。求解公式(10)的微分 dz/dr_1 , 可得到衍射光锥的强度透过率函数^[8]:

$$T(r_1) = \frac{1}{\pi b_2 R^2 P_s} P_z[z(r_1)], \rho \leq r_1 \leq R \quad (11)$$

式中: $b_2 = (z_1 + z_2)/z_2^2$ 。将上式代入公式(10)中, 并考虑能量守恒关系:

$$\pi R^2 (1 - z_1^2/z_2^2) P_s = (z_2 - z_1) P_z \quad (12)$$

即可得到^[8]:

$$T(r_1) = \begin{cases} \sin^4 \left[\frac{\pi(r_1^2 - R^2 z_1^2/z_2^2)}{2b_2 R^2 \delta z} \right] & \rho \leq r_1 \leq \rho(1+b_1 \delta z)^{1/2} \\ 1 & \rho(1+b_1 \delta z)^{1/2} \leq r_1 \leq R(1-b_2 \delta z) \\ \sin^4 \left[\frac{\pi(R^2 - r_1^2)}{2b_2 R^2 \delta z} \right] & R(1-b_1 \delta z)^{1/2} \leq r_1 \leq R \end{cases} \quad (13)$$

式中: $b_1 = (z_1 + z_2)/z_1^2$ 。

此时, 与公式(13)相应的振幅透过率分布函数为:

$$A(r_1) = [T(r_1)]^{1/2} \quad (14)$$

至此, 用光线追迹方法得到了衍射光锥的强度透过率函数 $T(r_1)$ 和位相透过率函数 $\varphi(r_1)$ 。根据波动光学传播方程, 可利用菲涅耳衍射公式计算距离光锥 z 处平面内的光强分布^[8]:

$$I(z, r_2) = \left(\frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_{\rho}^R \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \left[\frac{r_1^2}{2z} + \varphi(r_1) \right] \right\} \cdot J_0 \left(\frac{2\pi r_1 r_2}{\lambda z} \right) r_1 dr_1 \right|^2 \quad (15)$$

式中: J_0 为第一类零阶贝塞尔函数; r_2 为距离为 z 处平面的径向坐标。

当 $r_2 = 0$ 时, 有 $J_0(2\pi r_1 r_2 / \lambda z) = J_0(0) = 1$, 因此轴向的光强分布为^[8]:

$$I(z, 0) = \left(\frac{2\pi}{\lambda z} \right)^2 \left| \int_{\rho}^R \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \left[\frac{r_1^2}{2z} + \varphi(r_1) \right] \right\} r_1 dr_1 \right|^2 \quad (16)$$

下面将根据该方程计算衍射光锥后的轴向光强分布,以期得到比普通透镜更宽的焦深范围。

3 数值仿真

采用改进 GS 算法在 MATLAB 软件中对光锥后的轴向光强分布情况进行数值仿真。

假设卫星光通信接收光学天线的遮挡比为 T ,且当接收光束经过该接收天线缩束后,光束半径为 R ,则光束中心被挡光部分的半径为 $\rho=RT$ 。显然,根据上节的推导公式,当切趾圆环衍射锥镜的几何尺寸与光束的几何尺寸吻合时,整个聚焦系统的传输效率最高,此时 $\rho=(z_1/z_2)R$,其中 R 为衍射锥镜的最大有效半径, z_1 和 z_2 分别为所要求焦深区域的起始位置。

根据卫星光通信系统的一般设计要求,设置具体仿真参数如下:接收光束波长 $\lambda=800\text{ nm}$;接收光学天线的遮挡比 $T=1/4$;焦深平滑区宽度 $\delta z=10\text{ mm}$,焦深范围 $24\sim 96\text{ mm}$;光斑直径变化率小于 30% ;衍射锥镜的最大有效半径 $R=5\text{ mm}$ 。

按以上参数计算可得光束中心被挡光部分的半径为 $\rho=(z_1/z_2)R=1.25\text{ mm}$ 。为便于比较,取普通透镜的焦距 $f_0=(z_1+z_2)/2$,观察两者在轴向和垂轴内的强度分布。

根据设计参数,可计算衍射锥镜的位相分布函数和振幅透过率函数,分别如图 3 和图 4 所示。

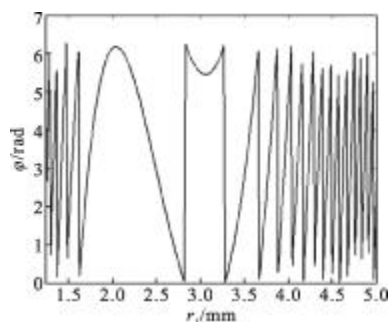


图 3 衍射切趾圆环锥镜的相位分布

Fig.3 Phase distribution of diffractive apodized annular-aperture logarithmic axicon

光束经过衍射锥镜后,在焦深范围内的强度分布也可利用上节的公式进行计算。如图 5 所示,入射的均匀光束经过衍射锥镜后,其位相和振幅均受到调制,从而在整个焦深范围内实现了很好的轴向均匀性和横向均匀性。

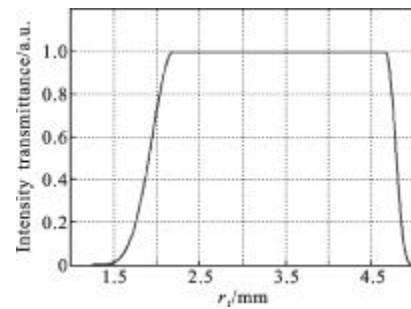


图 4 衍射锥镜的强度透过率

Fig.4 Intensity transmittance distribution of diffractive axicon

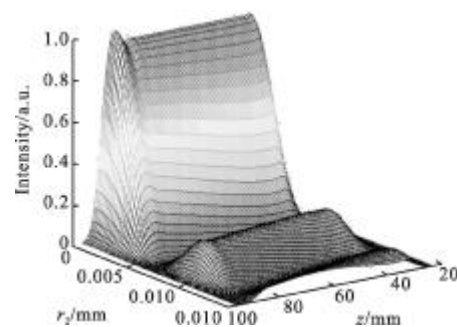


图 5 焦深范围内的光束强度分布

Fig.5 Beam intensity distribution for diffractive axicon along focal region

如图 6 所示,入射的接收光束在经过衍射锥镜后,其轴向强度分布(曲线 2)除了一些轻微的振荡外,与理想的轴向光强分布(曲线 1)非常吻合,很好地实现了设计要求。进一步比较衍射锥镜的轴上焦深范围和普通透镜的焦深范围,即对比曲线 2 与曲线 3 可知,衍射锥镜的轴上焦深范围远大于普通透镜的焦深范围,说明衍射锥镜确实能有效扩展焦深范围。

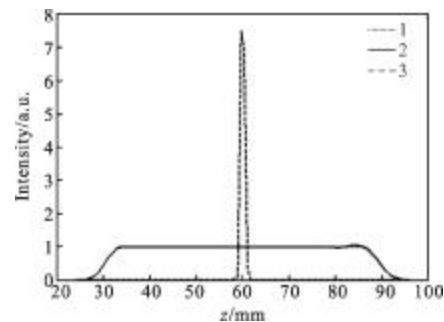


图 6 利用衍射锥镜得到的轴上强度分布

Fig.6 On-axis intensity distribution obtained by diffractive axicon

为进一步观察光束在光轴横截面方向上的变化,选取焦深范围内的几个特殊垂轴面,即 $z=z_1+\delta z$, $(z_1+z_2)/2$ 和 $z=z_2-\delta z$ 平面,观察这些平面内的光束强度随光斑直径的变化情况。由图 7 可知,这些横截面内的光强分布具有非常相似的形式,均为贝塞尔函数分布,且光斑主极大的半径均在 $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 左右。此时,对比普通透镜聚焦后的光斑,焦距为 $f=(z_1+z_2)/2$ 的普通透镜形成的 Airy 斑主极大半径为 ($r_d=1.22\lambda f/D=5.9\ \mu\text{m}$)。这说明衍射锥镜和普通透镜组之间的光斑大小相差极小,充分说明衍射锥镜的横向分辨率与普通透镜相当。

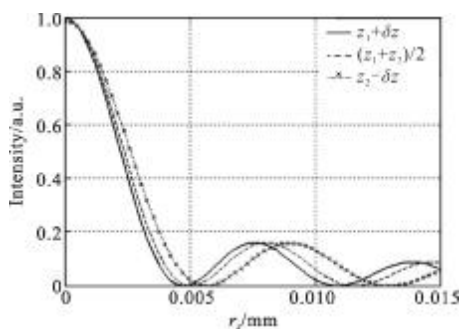


图 7 垂轴面内的光束强度分布
Fig.7 Lateral intensity distribution

图 8 则进一步证明了衍射锥镜具有很高的横向分辨率。由该图可知,入射光束经过衍射锥镜后,整个焦深范围内的中心光斑直径基本保持不变,其光斑的直径变化率小于 $1.5\ \mu\text{m}$ (30%以内),满足卫星光通信接收系统对光斑的设计要求。

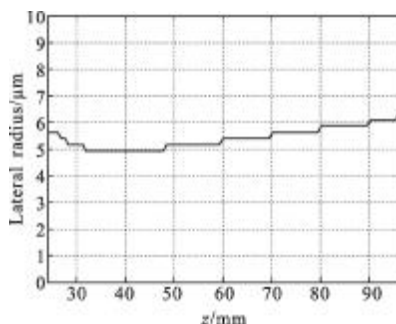


图 8 光束中心光斑直径沿轴向的变化
Fig.8 Variation of central spot radii along optical axis

4 结论

研究了采用卡塞格林光学天线的卫星光通信终

端的接收可靠性问题,利用接收光强分布为环形分布的特点,采用切趾圆环对数光锥实现了接收光强在光轴方向的均匀分布,扩展了接收光学系统的焦深范围,由此降低了接收探测器对位置精度的要求。相应的计算机仿真结果表明,利用切趾圆环对数光锥实现光强轴向分布的能力远大于普通透镜,它将有效提升卫星光通信接收系统的可靠性。

参考文献:

- [1] Mecherle G S, Horstein M. Comparison of radio frequency and optical architectures for deep-space communications via a relay satellite[C]//SPIE, 1994, 2123: 36-53.
- [2] Nilsson. Fundamental limits and possibilities for future telecommunication [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(5): 164-167.
- [3] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] Ben-Eliezer E, Konforti N, Milgrom B, et al. An optimal binary amplitude-phase mask for hybrid imaging systems that exhibit high resolution and extended depth of field[J]. Optics Express, 2008, 15(25): 20540-20561.
- [5] Feng D, Ou P, Feng L S, et al. Binary sub-wavelength diffractive lenses with long focal depth and high transverse resolution[J]. Optics Express, 2008, 15(25): 20968-20973.
- [6] Yu Jianjie, Han Qiqi, Ma Jing, et al. Potential application of diffractive optical elements in satellite laser communication terminals [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(1): 130-137. (in Chinese)
俞建杰, 韩琦琦, 马晶, 等. 衍射光学元件在卫星激光通信终端中的潜在应用 (英文)[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 130-137.
- [7] Sochacki J, BarÀ S, Jaroszewicz Z, et al. Phase retardation of the uniform-intensity axicon[J]. Opt Lett, 1992, 17(1): 7-9.
- [8] Jaroszewicz Z, Sochacki J, Kolodziejczyk A, et al. Apodized annular-aperture logarithmic axicon: smoothness and uniformity for intensity distributions [J]. Opt Lett, 1993, 28(22): 1893-1895.