

激光与光电子学进展

基于 MPLC 提高卡塞格林天线传输效率的方法

阮铖^{1,2}, 高世杰^{1,2*}, 马烈¹, 王晞名^{1,2}, 于溪畅^{1,2}, 张国强^{1,2}¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 卡塞格林天线作为重要的光学天线,广泛应用于空间激光通信中,但卡塞格林天线不可避免的次镜遮挡问题严重影响了传输效率。为了消除次镜遮挡所带来的不利影响,提出一种基于多平面光转换(MPLC)技术提高卡塞格林天线传输效率的方法,利用MPLC将通信高斯光转换为与卡塞格林天线遮拦比相匹配的双高斯环形光,使出射光充满卡塞格林天线有效范围的同时避开次镜遮挡。所提方法适用于任意遮拦比的卡塞格林天线,均可以大幅提升传输效率,降低了通信难度,对于远距离传输的空间激光通信研究具有一定意义。

关键词 卡塞格林天线; 激光通信; 传输效率; 多平面光转换

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232063

Method of Improving the Transmission Efficiency of Cassegrain Antenna Based on MPLC

Ruan Cheng^{1,2}, Gao Shijie^{1,2*}, Ma Lie¹, Wang Ximing^{1,2}, Yu Xichang^{1,2}, Zhang Guoqiang^{1,2}¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Cassegrain antennas, as crucial optical antennas, find widespread application in space laser communication. With the increasing demands of communication, there is a continuous rise in the requirements for antenna transmission efficiency. However, the unavoidable secondary mirror obstruction issue significantly hampers transmission efficiency and complicates communication. In order to address this problem and eliminate the adverse effects of secondary mirror obstruction, this paper proposes a novel method to enhance Cassegrain antenna transmission efficiency based on multi-plane light converter (MPLC) technology. MPLC is utilized to transform communication Gaussian beams into hollow Gaussian beams that matches the Cassegrain antenna's obscuration ratio, ensuring that the outgoing beam fills the effective range of the Cassegrain antenna while avoiding secondary mirror obstruction. This method is applicable to Cassegrain antennas with varying obscuration ratios and can substantially improve transmission efficiency, reducing communication complexity. It holds significance for research in long-distance space laser communication.

Key words Cassegrain antenna; laser communication; transmission efficiency; multi-plane light converter

1 引言

空间激光通信是利用光载波在自由空间进行信息传递的一种新型通信技术,凭借其独特的优势,逐渐成为通信领域的研究重点^[1-7]。光学天线作为通信系统的关键组成部分,直接决定了整个光学通信系统的性能和通信质量^[8]。卡塞格林光学天线因其众多突出优势,成为应用最为广泛的光学天线,但其不可避免的中

心遮拦问题会导致严重的光能量损失,降低传输效率^[9]。传统的解决方法是将卡塞格林系统改为离轴式系统^[10-11]或在通信系统发射端提高发射功率,但同样会引入装调难度大、使用环境苛刻等众多问题。随着空间激光通信对通信速率、通信距离、通信容量要求的不断增加,对光学天线的要求也越来越高,所以如何解决卡塞格林光学天线中心遮挡所引发的一系列问题一直是通信领域的关注重点。

收稿日期: 2023-09-06; 修回日期: 2023-10-27; 录用日期: 2023-11-07; 网络首发日期: 2023-11-17

通信作者: *13604329504@163.com

随着环形激光束的发展产生了双高斯环形光,其能量分布呈现两侧为高斯型、中心能量极低的特点^[12],其独特的光束能量分布可有效解决次镜遮挡问题,所以将其应用在激光通信领域的相关研究越来越多,但如何将高斯光转换为环形光又成为新的难题。传统的光束整形方法有衍射光学元件法^[13]、非球面透镜组法^[14]、双折射透镜组法、微透镜阵列法。但由于刻划难度大、整形效果不理想、透镜间存在衍射等问题,并不能实现理想的光束整形,多平面光转换(MPLC)技术的出现可以在避开这些问题的同时,精准地进行光束整形。

MPLC 是一种可以实现任意空间么正变换的技术^[15],由相位板和反射镜构成,通过多次的纯相位调制和自由空间传输来实现精准的相位控制。MPLC 凭借其独特的模式转换精度和光束控制能力,最开始被应用于复用解复用的系统中,实现了 3 模式^[16]、10 模式^[15]逐渐到 1035 模式^[17]的复用,后来被广泛应用于激光通信等众多领域中。2020 年,Calvo 等^[18]在通信系统中使用 MPLC 进行解复用和湍流补偿。同年,Billaud 等^[19]在通信系统中使用 MPLC 进行星间通信指向误差补偿。2022 年,Bayol^[20]在激光焊接中使用 MPLC 技术进行光束整形,以增强各种激光焊接工艺的光束质量。此外,MPLC 在模式扰频器^[21]、图像加密^[22]、光学混频器^[23]、单元转换器^[24]等领域的应用也取得了很好的效果。

本文将 MPLC 技术应用至通信系统的卡塞格林天线中,首先研究了卡塞格林天线的中心遮挡对传输效率的影响,然后使用 MPLC 在卡塞格林天线的前端将通信高斯光转换为双高斯环形光,有效避开中心遮挡,减小甚至消除中心遮挡所带来的隔离度、传输效率损失等问题的影响,最后,采用仿真分析的方法建立基于 MPLC 的卡塞格林天线传输模型,并验证了该方法的有效性。

2 卡塞格林天线次镜遮挡问题研究

2.1 卡塞格林天线原理及优势

激光通信系统中多使用经典式的卡塞格林天线,如图 1 所示,其主镜为抛物面镜,次镜为双曲面。该天线利用抛物面和双曲面的反射特性,抛物面的焦点和双曲面的虚焦点重合^[25],焦点处发出的光到达次镜后反射到主镜上,实现扩束。其主次镜面型结构能够很好地消除球差,且其具有结构紧凑^[8]、口径约束性小、无色差、可收发一体、频带范围宽等众多优势^[9]。

2.2 卡塞格林天线次镜遮挡问题

卡塞格林天线有众多优势,但其不可避免的次镜遮挡问题同样对通信系统的传输效率造成了严重影响。图 2 是卡塞格林天线的平面光路图,图中阴影部分为因次镜遮挡而损失的光,这部分光入射至次镜后并未反射至主镜,而是反射至主镜的中空处返回终端,造成光损失。虚实两条光路为天线有效范围的边缘光

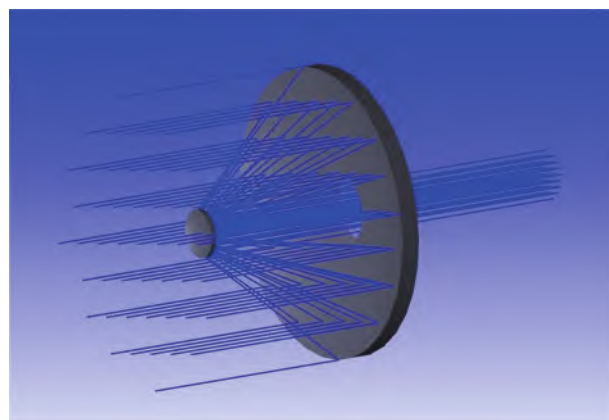


图 1 经典式卡塞格林天线
Fig. 1 Classic Cassegrain antenna

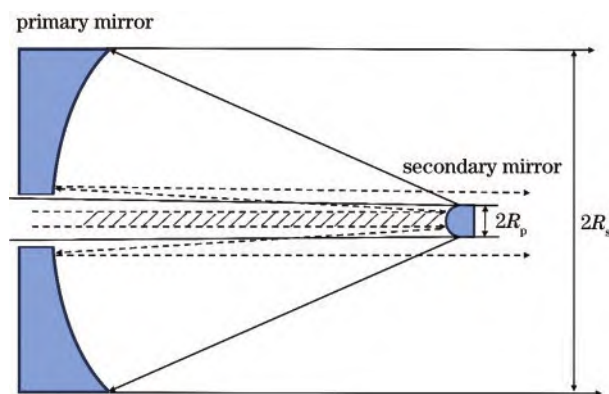


图 2 卡塞格林天线平面光路图
Fig. 2 Plane optical path diagram of Cassegrain antenna

路,其中, R_s 、 R_p 分别为卡塞格林天线的主次镜半径尺寸, α 为其遮拦比,它们满足以下关系^[26]:

$$|\alpha| = \frac{R_p}{R_s}. \quad (1)$$

通过上面的分析可知,卡塞格林天线的次镜遮挡会导致输入光束的中心能量损失,而在通信系统中,入射光源通常是高斯光,能量主要集中在中心,加剧了通信光束的能量损失,导致传输效率降低。传输效率^[27]的表达式为

$$\eta = \frac{|E_o(x, y)|^2}{|E_i(x, y)|^2}, \quad (2)$$

式中: E_i 为入射进卡塞格林天线的光场能量; E_o 为从卡塞格林天线出射的光场能量; η 为传输效率。除了传输效率的降低外,这部分光还会反射回通信系统终端成为干扰光,严重影响系统的收发隔离度,增加了通信系统的通信难度。

下面对遮拦比对传输效率的影响进行分析,高斯光的表达式为

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

式中: I_0 为常数; ω_0 为高斯光束腰半径; r 为距离中心点

的距离。将高斯光作为入射光光场代入式(2),通过上面的分析可知,次镜遮挡所造成的损失为高斯光的中心能量,通过不同的遮拦比对中心能量的不同遮拦程度进行计算,得到出射光光场并代入式(2),整理后有

$$\eta = \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_{a/r_0}^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\infty} I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right) r dr} \quad (4)$$

通过式(4)可以得出理想条件下,卡塞格林天线遮拦比与传输效率的关系,具体如图3所示。从图3可以看出,天线的遮拦比对天线的传输效率影响极大。下面围绕如何解决卡塞格林天线的次镜遮挡问题展开相关研究。

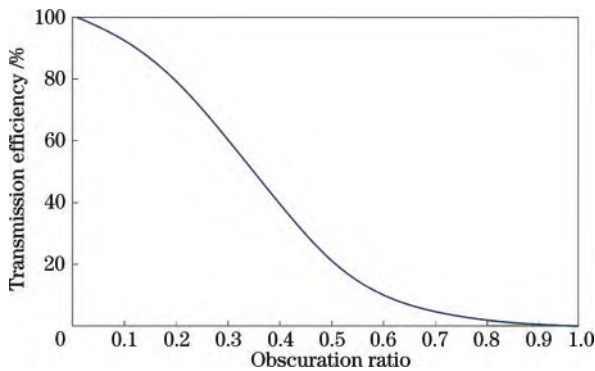


图3 卡塞格林天线遮拦比与传输效率的关系

Fig. 3 The relationship between the obscuration ratio and transmission efficiency of the Cassegrain antenna

3 基于MPLC解决卡塞格林天线次镜遮挡问题

3.1 MPLC工作原理

MPLC是一种自由空间型器件,如图4所示,入射光进入MPLC后打到相位屏上,通过纯相位调制进行相位处理,然后经过一段自由空间传输后再次打到相位屏上,如此反复循环至预设次数后,完成光束转换,出射理想光束。

MPLC是通过连续相位调制和自由空间传输来实现光束转换的,Morizur等^[28]将相位调制和自由空

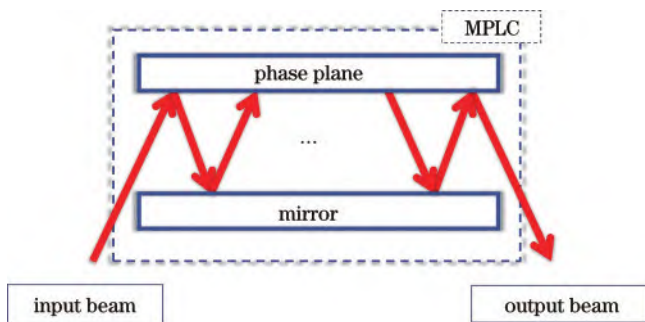


图4 MPLC工作原理示意图

Fig. 4 MPLC operating principle

间传输的所有可能组成设为集合 $\mathbf{H}$,所有么正变换设为集合 $\mathbf{U}$, $\mathbf{U}_{ij}$ 为其子集, $\mathbf{U}_{ij}$ 包含所有可能的 $\mathbf{T}_{ij}$, $\mathbf{T}_{ij}$ 可表示为

$$\mathbf{T}_{ij}(\theta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cos \theta & \cdots & \sin \theta & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & -\sin \theta & \cdots & \cos \theta & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $\sin \theta$ 项和 $\cos \theta$ 项位于第 i 行和第 j 列。通过计算发现连续的相位调制和自由空间传输组合又可以组成任意的 $\mathbf{T}_{ij}$,因此所有的 $\mathbf{U}_{ij}$ 都在 $\mathbf{H}$ 里,即 $\mathbf{H}$ 就是 $\mathbf{U}$ 。同时这也说明使用MPLC的连续相位调制和自由空间传输可以实现任意的么正变换。

3.2 波前匹配算法理论分析

高斯光表达式见式(3),双高斯环形光^[12]表达式为

$$E = E_0 \left(\frac{r^2}{\omega_1^2} \right)^n \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_1^2} \right), \quad (6)$$

式中: E_0 为常数; n 为阶数; ω_1 为双高斯环形光环宽半径。么正变换在坐标变换过程中内积保持不变,对式(3)和式(6)分别进行内积计算,可以发现计算后二者内积相同,所以将高斯光变换为双高斯环形光的变换过程符合么正变换,因此使用MPLC可以将高斯光变换为双高斯环形光。

MPLC的核心是相位屏,它直接决定了MPLC的转换效率。MPLC的转换效率^[24]为

$$\rho = \left| \iint_{(x,y)} \overline{O_i}(x,y) O_i(x,y) dS \right|, \quad (7)$$

式(7)描述了理想出射光束光场 O_i 和实际出射光束光场 O_i' 之间的相似程度。当 ρ 趋近1时,意味着经过MPLC转换后的实际出射光与理想出射光的相似程度增加;当 ρ 等于1时,意味着经过MPLC转换后的实际出射光与理想出射光完全相同,因此通过观察 ρ 值可以直观评价MPLC的性能优劣。

MPLC相位屏需要在已知入射光束和出射光束的情况下,选择合适的算法生成。本文采用波前匹配算法^[29],该算法与其他相位屏生成算法相比有收敛速度快、产生的相位屏的相位分布平滑等优势。其原理如下:首先,入射光束正向传播、出射光束反向传播至第一块相位屏处,根据两个光束的相位差来计算生成合适的相位屏,图5给出了单个相位面的匹配过程。随后,将这个过程逐步推进至最后一个相位屏,完成一次循环,再反方向从最后一个相位屏开始向第一个相位屏进行同样的相位差计算和更新。通过反复迭代至预设次数,生成精确的相位屏,使得出射光场与目标光场

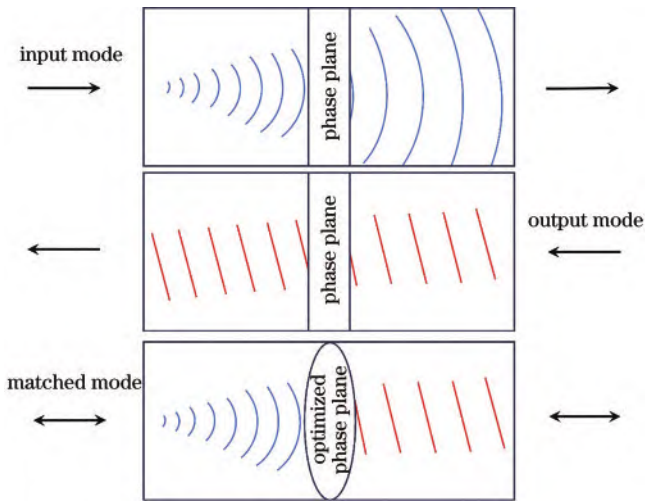


图5 波前匹配算法中单个相位面的匹配过程

Fig. 5 The matching process of single phase plane in wavefront matching algorithm

尽可能匹配。通过波前匹配算法生成的相位屏具有高

精度和高效性,能够确保出射光束的质量和性能达到预期要求,使光束转换过程更加准确和可控。

3.3 基于MPLC解决卡塞格林次镜遮挡问题的方案

利用MPLC其独特的模式转换精度和光束控制能力,在通信高斯光进入卡塞格林天线前,将高斯光转化为双高斯环形光后再入射到卡塞格林天线中,双高斯环形光具有中心能量极低、两侧能量高的特点,可以有效避开天线的次镜遮挡,降低光能量损失和收发隔离度影响,示意图如图6所示。通过合理进行双高斯环形光的光束设计,有

$$\frac{r_1}{r_2} = |\alpha| = \frac{R_p}{R_s}, \quad (8)$$

式中: r_1 和 r_2 为双高斯环形光内外环半径尺寸,其值影响双高斯环形光的环宽半径 ω_1 。使环形光内外环半径比值与式(1)的卡塞格林天线遮拦比相匹配,则可使出射的环形光充满卡塞格林天线的有效范围,且无反射回光干扰,大大提升传输效率。

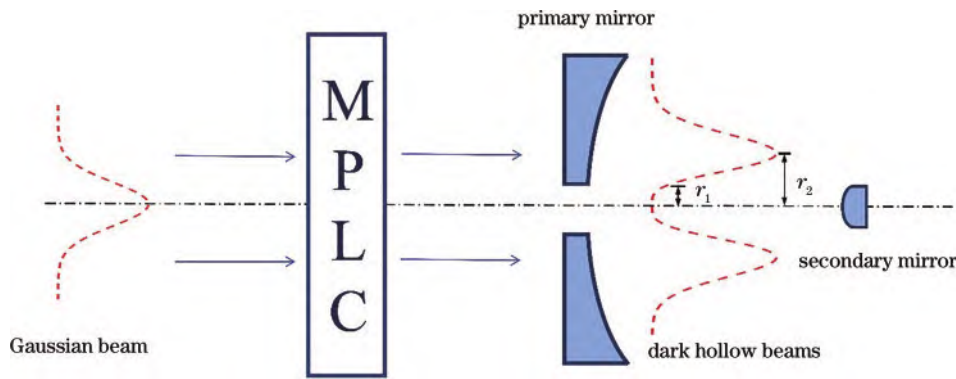


图6 基于MPLC提高卡塞格林天线传输效率示意图

Fig. 6 Schematic diagram of improving the transmission efficiency of Cassegrain antenna based on MPLC

3.4 双高斯环形光远场传输特性分析

通信高斯光通过MPLC转换为双高斯环形光后,会经历数万公里的传输到达通信系统接收端进行通信。若经过远场传输后双高斯环形光仍为环形光,这并不利于光束的捕捉和探测,因此需要对双高斯环形光的远场传输效果进行精准分析。通过建立夫琅禾费衍射模型,仿真双高斯环形光在传输45000 km后的光束能量分布,具体如图7所示。

结果表明,双高斯环形光经过远场传输后变成了类高斯分布的实心光束,满足通信的远场光束分布要求。同时环形光经过远场传输变为实心光束后,会降低通信系统的误码率^[30]和发散角。所以基于MPLC将高斯光转换为双高斯环形光后进行通信,不会增大通信系统的接收难度,且会提升通信效果。

4 仿真分析

MPLC的转换效率直接决定了MPLC对卡塞格

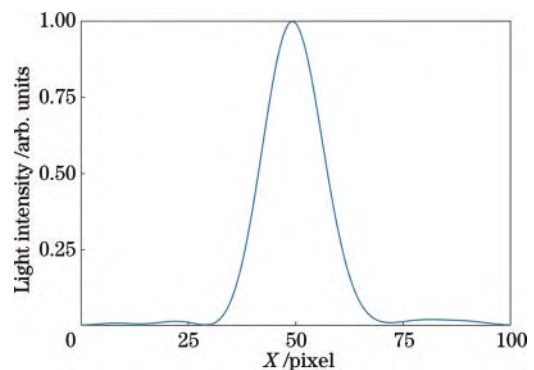


图7 双高斯环形光传输45000 km后光束能量分布

Fig. 7 Beam energy distribution after 45000 km transmission of hollow gaussian beams

林天线传输效率的提升程度,所以首先仿真MPLC的相关参数与转换效率的关系,并选择合适的参数。然后,对比高斯光直接进入卡塞格林天线和经过MPLC转换为双高斯环形光后进入卡塞格林天线的情况,以传输效率作为评价标准。

4.1 相位屏数量与转换效率关系仿真

相位屏作为 MPLC 的关键组成部分,直接决定了 MPLC 的转换效率。理论上随着相位屏数量的增加, MPLC 的转换效率可以逐渐接近并达到百分之百。但是在实际中,相位屏数量的增加会引入一定的反射率、对准误差等损耗,所以在转换效率满足应用的条件下,应选择合适数量的相位屏。

为了选择合适数量的相位屏,在入射高斯光束束腰半径为 5 mm、出射环形光束半径为 5 mm 的情况下,通过改变相位屏的数量,来仿真转换效率的变化情况。图 8 为高斯光-环形光转换效率随相位屏数量的变化情况。通过分析对比可知:在单个相位屏情况下,仅完成一次相位调制, MPLC 无法将高斯光转换为环形光;在两块相位屏的情况下, MPLC 可以较好完成转换,但是由于转换不完全,仍会有部分能量未完成转换而造成传输效率损失;在 3 个相位屏的情况下, MPLC 对高斯光到环形光的转换效率就已经达到 99.45%,满足实际应用需求,所以选择 3 块相

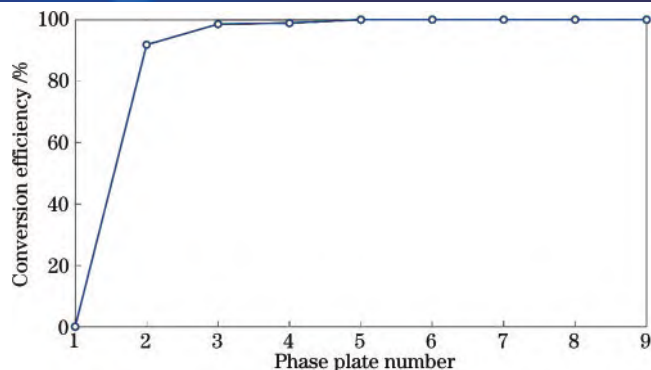


图 8 相位屏数量与转换效率之间的关系

Fig. 8 Relationship between phase plate number and conversion efficiency

位屏进行仿真。

通过波前匹配算法,则可以生成如图 9 所示的相位屏,完成束腰半径为 3 mm 的高斯光到束腰半径为 4 mm 的双高斯环形光的转换,并根据不同的卡塞格林天线尺寸调整束腰半径,进一步优化相位屏。

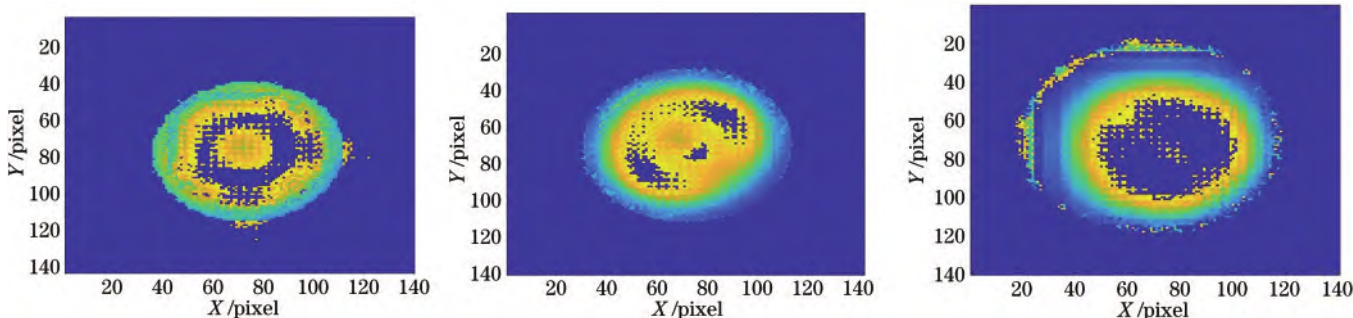


图 9 相位屏示意图。(a)第一块相位屏;(b)第二块相位屏;(c)第三块相位屏

Fig. 9 Phase plate. (a) The first phase plate; (b) the second phase plate; (c) the third phase plate

4.2 入射、出射光束束腰半径与转换效率关系仿真

MPLC 进行光束转换的前提是已知入射光和出射光光场分布,所以入射光和出射光的光场分布对 MPLC 转换效率有所影响。将式(3)的高斯光作为入射光,将式(6)的双高斯环形光作为出射光,利用波前匹配算法生成合适的相位屏后,仿真得到实际出射光束光场 O_i 并代入式(9)中计算转换效率。

$$\rho = \left| \iint E_0 \left(\frac{r^2}{\omega_1^2} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_1^2} \right) O_i^* dS \right|^2 \quad (9)$$

随后通过改变高斯光束束腰半径 ω_0 和环形光束束腰半径 ω_1 得到 3 块相位屏情况下,环形光束环宽半径、高斯光束束腰半径和转换效率的三维关系图,具体如图 10 所示。

通过分析可知,入射高斯光束的束腰半径对 MPLC 的转换效率影响较小,最大仅会有 2% 的波动,尤其在环形光的环宽半径达到 4 mm 后,入射光高斯光束的束腰半径变化不再对转换效率产生影响。出射环形光束的环宽半径对转换效率影响较大,随着环宽半径的增大,转换效率也逐渐增大,在环宽半径达到

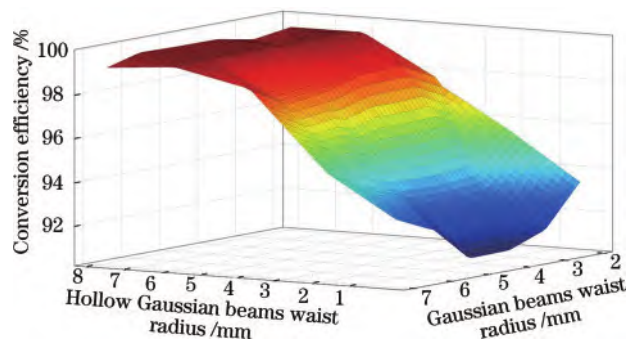


图 10 环形光束环宽半径、高斯光束束腰半径和转换效率之间的关系

Fig. 10 The relationship among the hollow Gaussian beams waist radius, the Gaussian beams waist radius, and the conversion efficiency

5 mm 后,转换效率逐渐趋于稳定且接近于 1。

4.3 基于 MPLC 提升卡塞格林天线传输效率仿真

选取主镜直径尺寸为 100 mm、遮拦比为 0.2 的卡塞格林天线和与其尺寸相匹配的双高斯环形光进行仿真分析。将式(3)的高斯光作为 MPLC 的入射光,将

式(6)的双高斯环形光作为 MPLC 的出射光进行仿真。利用波前匹配算法生成合适的相位屏后,仿真得到实际出射光场 O'_1 ,图 11(a)为通过式(6)仿真的理想双高斯环形光能量分布,图 11(b)为仿真的实际出射光场 O'_1 的能量分布。然后将 O'_1 作为入射进卡塞格林天线的光场,代入式(10)中:

$$\eta_1 = \frac{O'_1}{E_0 \left(\frac{r^2}{\omega_1^2} \right)^2 \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_1^2} \right)}, \quad (10)$$

式中: η_1 为基于 MPLC 转换后卡塞格林天线的传输效率。计算得到的基于 MPLC 转换为双高斯环形光后入射进天线的传输效率为 99.45%,通过式(2)可知,高斯光直接入射进天线的传输效率仅为 81%,说明应用 MPLC 后卡塞格林天线的传输效率提升了 18.45 百分点。图 12 为理想出射和实际出射的中心截面能量分布图,通过两图的对比,发现 MPLC 可以极好地将高斯光转换为双高斯环形光以保证提升卡塞格林天线的传输效率。

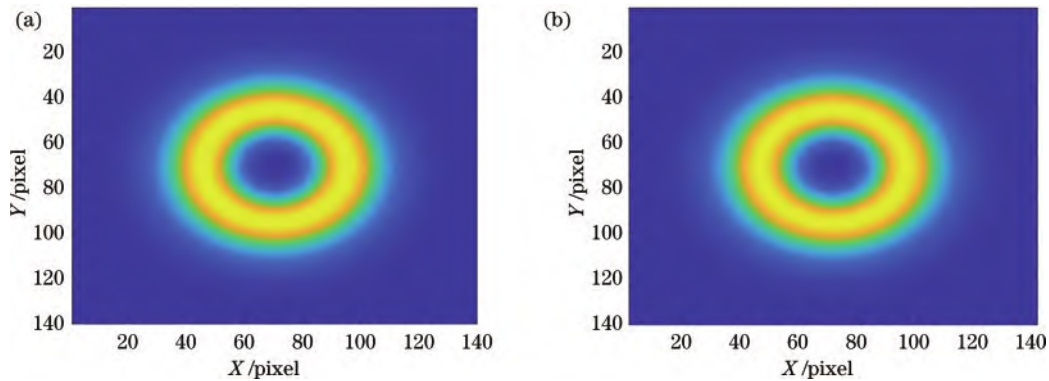


图 11 双高斯环形光仿真结果。(a)理想出射光场;(b)实际出射光场

Fig. 11 Hollow Gaussian beams simulation results. (a) Ideal outgoing light field; (b) actual outgoing light field

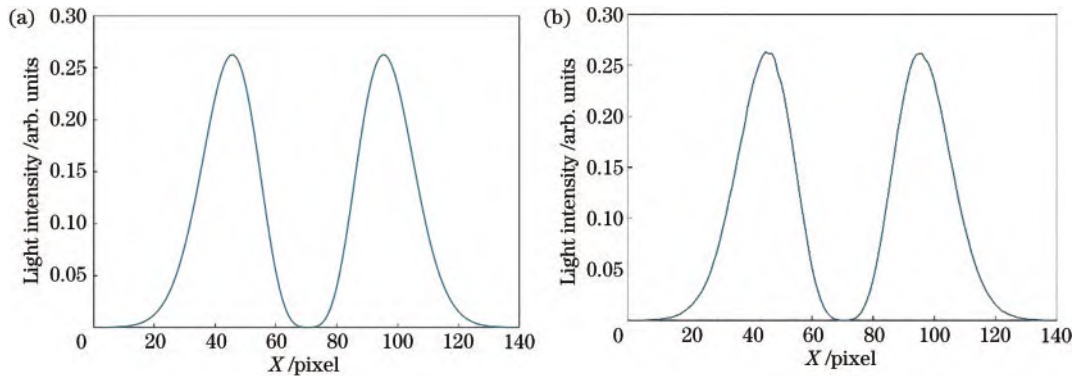


图 12 中心截面能量分布图。(a)理想出射光场中心截面能量分布;(b)实际出射光场中心截面能量分布

Fig. 12 Energy distribution in central section. (a) Energy distribution in the center section of the ideal outgoing light field; (b) energy distribution in the center section of the actual outgoing light field

为了验证其严谨性,随后在满足实际情况的基础上,通过控制变量改变卡塞格林天线的遮拦比、入射光束腰半径和出射光环宽半径进行了多组仿真,结果如图 13 所示:

在满足实际遮拦比的情况下,改变入射光束腰半径 ω_0 和出射光环宽半径 ω_1 ,应用 MPLC 将高斯光转换为双高斯环形光后,传输效率均可提升至 98.5% 以上,可以看出,MPLC 对高斯光到双高斯环形光的光束转换具有极高的稳定性。

应用 MPLC 将高斯光转换为双高斯环形光后,仿真得到实际出射光束光场 O'_3 ,代入式(10)可计算应用 MPLC 后,卡塞格林天线的传输效率提升:

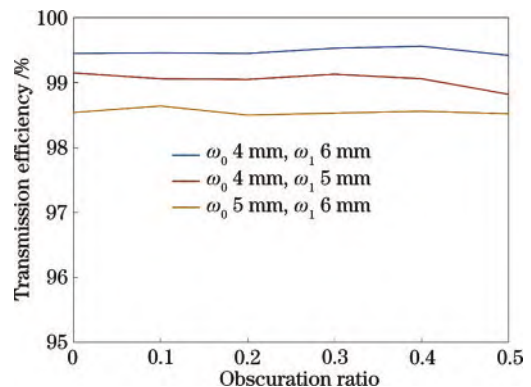


图 13 应用 MPLC 后,传输效率随天线遮拦比变化曲线

Fig. 13 After applying MPLC, the transmission efficiency varying with the antenna obscuration ratio

$$\eta_0 = \frac{\left| \frac{O_3'}{E_0 \left(\frac{r^2}{\omega_1^2} \right)^2 \exp \left(-\frac{r^2}{\omega_1^2} \right)} \right|}{\left| \frac{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty I_0 \exp \left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) r dr}{\int_0^{2\pi} d\theta \int_0^\infty I_0 \exp \left(-\frac{2r^2}{\omega_0^2} \right) r dr} \right|}, \quad (10)$$

式中： η_0 为应用MPLC后，卡塞格林天线传输效率的提升值。随后通过改变遮拦比来进行多组仿真，结果如图14所示：

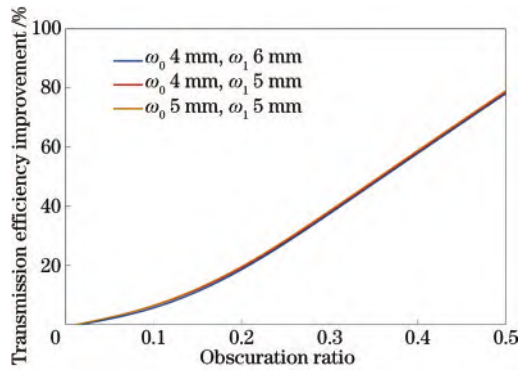


图14 应用MPLC后，传输效率随天线遮拦比变化曲线
Fig. 14 After the application of MPLC, the transmission efficiency varying with the change curve of antenna obscuration ratio

图14为在应用MPLC将高斯光转换为双高斯环形光后，满足实际遮拦比的情况下，卡塞格林天线的传输效率曲线。可以发现，随着遮拦比的增大，MPLC对卡塞格林天线的传输效率提升也逐步增大，且改变入射光束腰半径 ω_0 和出射光环宽半径 ω_1 并不会影响MPLC的稳定性。

通过上面的仿真结果，验证了MPLC将高斯光转换为双高斯环形光进而提升卡塞格林天线传输效率的可行性。对于满足实际情况下的任意尺寸遮拦比的卡塞格林天线，MPLC都可以将高斯光转换为与其遮拦比尺寸相匹配的双高斯环形光，传输效率均可提升至98.5%以上，且对于遮拦比越大的卡塞格林天线，MPLC对其提升效果越明显。

5 结 论

通过分析卡塞格林天线的次镜遮挡对通信系统传输效率的不利影响，提出一种基于MPLC技术提高卡塞格林天线传输效率的方法。该方法利用MPLC技术将通信高斯光转换为与卡塞格林天线遮拦比相匹配的双高斯环形光，提升卡塞格林天线的传输效率。仿真分析了应用MPLC后卡塞格林天线的传输效率，结果表明，在不同入射光束束腰半径、不同出射光束环宽

半径、任意尺寸遮拦比情况下，MPLC均可以将卡塞格林天线传输效率提升至98.5%以上。且对于遮拦比越大的卡塞格林天线，MPLC对其提升效果越明显。仿真结果说明了所提方法的有效性，对于提高卡塞格林天线的传输效率和MPLC在通信终端的应用具有一定理论意义。

参 考 文 献

- [1] 姜会林, 佟首峰, 张立中. 空间激光通信技术与系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 15-28.
Jiang H L, Tong S F, Zhang L Z. The technologies and systems of space laser communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 15-28.
- [2] Rabinovich W S, Moore C I, Burris H R, et al. Free space optical communications research at the U.S. Naval Research Laboratory[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7587: 758702.
- [3] 张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500001.
Zhang R F, Zhang W R, Zhang X J, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500001.
- [4] 白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(7): 070001.
Bai S, Wang J Y, Zhang L, et al. Development progress and trends of space optical communications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(7): 070001.
- [5] 任伟杰, 孙建锋, 周煜, 等. 多体制兼容相干探测卫星激光通信技术[J]. 光学学报, 2023, 43(12): 1206002.
Ren W J, Sun J F, Zhou Y, et al. Multi-system compatible coherent detection technology of satellite laser communication[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(12): 1206002.
- [6] 李响, 刘赫, 高亮, 等. 复合式激光通信系统多光轴一致性温度影响研究[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1806002.
Li X, Liu H, Gao L, et al. Temperature influence of multi-optical axis consistency in compound laser communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1806002.
- [7] 柯熙政, 赵锦. 利用双反射镜控制实现无线光通信光束对准[J]. 光学学报, 2023, 43(24): 2406003.
Ke X Z, Zhao J. Beam alignment for wireless optical communications using dual-reflector control[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(24): 2406003.
- [8] 梁静远, 亢维龙, 董壮, 等. 自由空间光通信系统光学天线技术研究进展[J]. 光通信技术, 2022, 46(4): 1-10.
Liang J Y, Kang W L, Dong Z, et al. Research progress of optical antenna technology in free space optical communication system[J]. Optical Communication Technology, 2022, 46(4): 1-10.
- [9] 张玉侠, 艾勇. 基于空间光通信卡塞格林天线弊端的探讨[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 560-563.
Zhang Y X, Ai Y. Drawback of Cassegrain antenna system based on space optical communication[J]. Infrared

- and Laser Engineering, 2005, 34(5): 560-563.
- [10] 王蕴琦, 刘伟奇, 付瀚毅, 等. 离轴式共口径激光通信光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 010602.
Wang Y Q, Liu W Q, Fu H Y, et al. Design of laser communication optical system with off-axis common aperture[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 010602.
- [11] 任兰旭, 谭庆贵, 张缓缓, 等. 主三镜一体化离轴三反光学天线设计[J]. 应用光学, 2021, 42(1): 23-29.
Ren L X, Tan Q G, Zhang H H, et al. Design of off-axis three-mirror optical antenna based on integration of primary-tertiary mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(1): 23-29.
- [12] Cai Y J, Lu X H, Lin Q. Hollow Gaussian beams and their propagation properties[J]. Optics Letters, 2003, 28(13): 1084-1086.
- [13] 俞建杰, 谭立英, 马晶, 等. 一种提高卫星光通信终端发射效率的新方法[J]. 中国激光, 2009, 36(3): 581-586.
Yu J J, Tan L Y, Ma J, et al. A novel method to improve the emission efficiency of satellite optical communication terminal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(3): 581-586.
- [14] 宋志化, 江伦, 曹海帅, 等. 非球面整形镜在空间激光通信终端中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(10): 100601.
Song Z H, Jiang L, Cao H S, et al. Aspheric homogenizer applying in space laser communication terminal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(10): 100601.
- [15] Labroille G, Jian P, Barre N, et al. Mode selective 10-mode multiplexer based on multi-plane light conversion [C]//2016 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 20-24, 2016, Anaheim, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016.
- [16] Morizur J F, Jian P, Denolle B, et al. Efficient and mode-selective spatial multiplexer based on multi-plane light conversion[C]//Optical Fiber Communication Conference, March 22-26, 2015, Los Angeles, California. Washington, DC: OSA, 2015: W1A.4.
- [17] Fontaine N K, Chen H S, Mazur M, et al. Hermite-Gaussian mode multiplexer supporting 1035 modes[C]//2021 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), June 6-10, 2021, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2021.
- [18] Calvo R M, Allieux D, Reeves A, et al. Alternative passive fiber coupling system based on multi-plane light conversion for satellite-to-ground communications[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11272: 112720Q.
- [19] Billaud A, Allieux D, Laurenchet N, et al. Pointing error compensation for inter-satellite communication using multi-plane light conversion spatial demultiplexer [EB/OL]. (2020-12-18)[2023-03-05]. <https://arxiv.org/abs/2012.10247>.
- [20] Bayol J. Development of an MPLC-based laser head[J]. Photonics Views, 2022, 18(6): 54-58.
- [21] Gao Y, Jiao S M, Fang J C, et al. Multiple-image encryption and hiding with an optical diffractive neural network[J]. Optics Communications, 2020, 463: 125476.
- [22] Kobayashi H, Tsuda H. Spatial mode multiplexer for 42 single mode fibers to the 7-core, 6-mode fiber[C]//2019 24th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2019 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 7-11, 2019, Fukuoka, Japan. New York: IEEE Press, 2019.
- [23] Fontaine N K, Zhang Y H, Chen H S, et al. Ultrabroadband polarization insensitive hybrid using multiplane light conversion[C]//2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), March 8-12, 2020, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020.
- [24] Tanomura R, Tang R, Umezaki T, et al. Scalable and robust photonic integrated unitary converter based on multiplane light conversion[J]. Physical Review Applied, 2022, 17(2): 024071.
- [25] 毛玉林, 舒仕江, 吴艳锋, 等. 激光通信与成像卡塞格林形式收发光学天线结构初解[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210173.
Mao Y L, Shu S J, Wu Y F, et al. Initial structure solution of Cassegrain type transceiver optical antenna for laser communication and imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210173.
- [26] 孔祥蕾, 郝沛明. 消除中心遮拦的反射式激光扩束新方案[J]. 量子电子学报, 2002, 19(3): 205-209.
Kong X L, Hao P M. New method to remove central shade for reflecting laser beam expander[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2002, 19(3): 205-209.
- [27] Ma X J, Yang H J, Wang B, et al. An optimum analysis for Cassegrain optical antenna[J]. Optik, 2015, 126(11/12): 1171-1174.
- [28] Morizur J F, Nicholls L, Jian P, et al. Programmable unitary spatial mode manipulation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2010, 27(11): 2524-2531.
- [29] Hashimoto T, Saida T, Ogawa I, et al. Optical circuit design based on a wavefront-matching method[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2620-2622.
- [30] Li M, Chen Y, Song Y J, et al. DOE effect on BER performance in MSK space uplink chaotic optical communication[J]. Chinese Optics Letters, 2020, 18(7): 070601.