

自由空间光通信系统光学天线技术研究进展

梁静远,亢维龙,董壮,柯熙政*,董可

(西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048)

摘要:光学天线在自由空间光通信系统中发送或者接收光信号,天线结构决定系统的检测性能。详细介绍了光学天线基本结构、卡塞格林光学天线的研究进展、无独立信标瞄准、捕获和跟踪(PAT)系统和一点对多点通信光学天线,展望了光学天线未来的研究方向。

关键词:自由空间光通信;光学天线技术;卡塞格林系统;无独立信标光系统;一点对多点天线

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0001-10

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of optical antenna technology in free space optical communication system

LIANG Jingyuan, KANG Weilong, DONG Zhuang, KE Xizheng*, DONG Ke

(School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Optical antenna is used to transmit or collect optical signals in free space optical communication system, and the structure of optical antenna determines the detection performance of the system. This paper introduces the basic structures of optical antenna, the research progress of Cassegrain optical antenna, pointing, acquisition and tracking (PAT) system without independent beacon and the point-to-multipoint optical antenna in detail, the future research direction of optical antenna is prospected.

Key words: free space optical communication, optical antenna technology, Cassegrain system, optical system without independent beacon, point-to-multipoint optical antenna

0 引言

自由空间光通信技术是以激光为载体进行信息传输的通信技术,与传统射频通信相比,其光波具有更高的频率。光学接收和发射系统(下文简称光学天线)是自由空间光通信系统中的关键组成部分,承担着发射端的光信号发射、接收端的光信号接收耦合等功能。光学天线的性能直接影响整个光学通信系统的性能和通信质量。提高光信号的发射和接收效率,降

收稿日期:2022-05-11。

基金项目:陕西省教育厅科研计划项目(NO.18JK0341)资助;西安市科技创新引导项目(NO.201805030YD8CG14(12))资助;陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)资助。

作者简介:梁静远(1989—),女,陕西西安人,硕士,助理工程师。主要从事无线光通信系统基础理论与调制解调技术的研究工作。2017年以来获得省部级科技奖励3项,教学成果奖励7项。

***通信作者:**柯熙政(1962—),男,博士,二级教授,陕西省教学名师,中国电子学会会士,出版专著10部,主要研究方向为无线激光通信理论与技术、先进导航理论与技术。



低卡塞格林光学天线中间遮拦比等一直是无线光通信领域关注的问题。因此,光学天线的研究对于提高自由空间光通信系统的性能,满足未来通信对速度和容量不断增长的需求具有重要意义。本文介绍国内外光学天线的研究进展。

1 光学天线基本结构

自1953年美国开展“星球大战计划”以来,空间激光通信技术迅速发展,德国、法国、英国和日本等国家也相继开展了相关研究^[1],如研究作为通信系统收发端的光学天线的工作波长、信标光捕获及跟踪和天线结构形式等。

光学天线常用的结构形式有反射式、折射式和折返式。反射式光学天线适用于全波段,折射式光学天线通常适用于可见光和近红外波段的无线光通信,折返式光学天线因其像差校正优势适用于复杂大气情况下的长距离无线光通信^[2]。

反射式光学天线可以具有多个焦点,因此可以产

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

生多个不同的相对孔径、视场角以及焦距,常用的有牛顿光学天线、格雷戈里光学天线和卡塞格林光学天线,其原理图如图1所示。牛顿光学天线相对孔径较大,常被用于口径较大的光学天线中,但是制作成本高,对于离轴光线存在慧差。格雷戈里光学天线可以同时消除球差和色差,但是制作工艺要求高,实际应用不多。卡塞格林光学天线^[3]是一种双镜反射结构望远光学天线,具有系统尺寸短、体积小、质量轻和结构紧凑等优势;同时,该天线没有色差、球差,可以根据实际需求调整天线口径。这些优势和特点使卡塞格林光学天线在自由空间光通信中应用广泛^[3]。但是,双镜反射结构存在遮挡比问题,导致光信号能量浪费、轴外像差严重和牺牲视场为代价来获得高质量像点等后果。

折射式光学天线原理图如图2所示,其前端物镜是一组胶合透镜,光线通过物镜以后在目镜之前成像,像点经过目镜放大后被接收。折射式望远镜具有

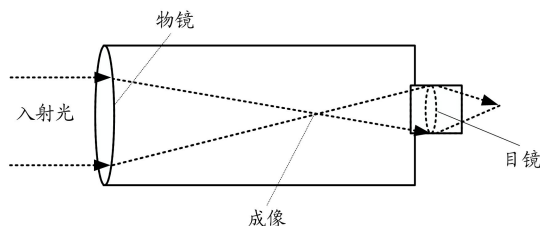


图2 折射式光学天线

视场宽阔、高对比度和高清晰度的优点,但是物镜导致折射式望远镜具有色差,且口径越大色差越严重;同时,镜筒长度决定焦距,导致折射式望远镜体积庞大。

折返式光学天线结构图如图3所示,折返式光学系统是将折射式光学系统的物镜与反射式光学系统结合,物镜为中央凸、周边凹和形状复杂的波浪状修正透镜,以修正球面主镜的球差。折反式光学系统主要有施密特-卡塞格林光学天线、马克斯托夫-卡塞格林光学天线(下文简称马卡天线)和菲涅尔光学天线。

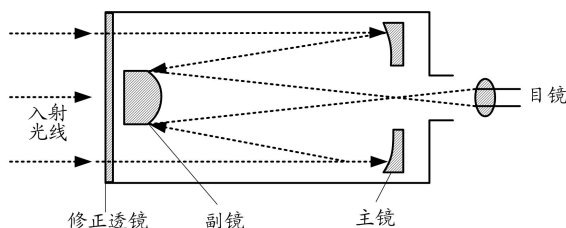


图3 折返式光学天线

施密特-卡塞格林光学天线以施密特天文观测仪为基础,通过施密特修正透镜来修正球面像差,承袭卡塞格林结构以凸面镜作为光学系统的次级反射镜。施密特-卡塞格林具有许多变形结构,如双球面镜组结构、双非球面透镜组结构和球面镜与非球面镜组合结构等。此类天线结构制作工艺较为简单,结构紧密,便于携带。

马卡天线的典型特点是次反射镜非常小,通常是校正镜上的一个镀铝的圆斑。折反射式结构使得马卡天线结构紧凑,通过较小的尺寸就可形成大口径和长焦距的透镜组系统。马卡天线作为空间光耦合系统时,可实现大口径耦合接收技术,具有较强的汇聚光功率的能力。另外,该天线焦距长,容易满足光纤数值孔径的要求,在同样的相对孔径(D/f)下,相比普通透镜系统,其长度可减少近1/2,在工程中具有较大优势。

菲涅尔光学天线基于卡塞格林结构,使用菲涅尔透镜替换前端的折射校正透镜。相比常规校正透镜,菲涅尔透镜具有聚焦能力强、焦距短、透镜厚度薄和重量轻等优点,其辐射通量超过90%,适用于大多数

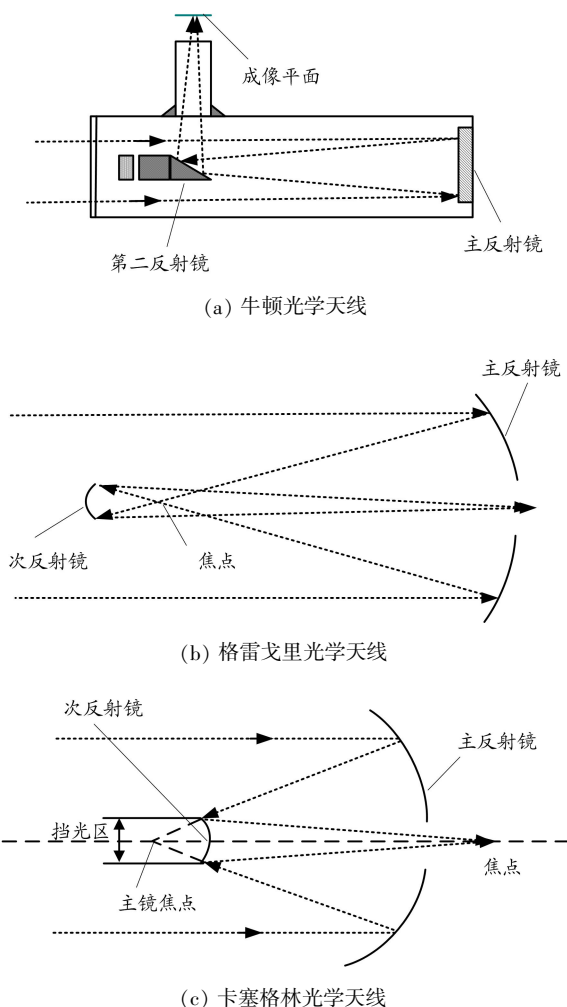


图1 反射式光学天线原理图

小视场、高增益的光学系统前端^[4]。

本文将光学天线 3 种结构形式的优缺点进行对比,具体如表 1 所示。

表 1 折射式、反射式和折返式结构对比

结构	优点	缺点
反射式	多焦点、不同数值孔径和视场角;消除了球差和色差;适用波谱范围宽;光学结构简单、像质优良	制作成本高,制作过程和工艺复杂;偏轴光线存在慧差
折射式	视野宽阔;高对比度和清晰度	色差严重;孔径对性能影响较大、体积庞大臃肿
折返式	消除了球差、色差及其它像差;同体积下焦距更长	校正透镜的制作难度大,费用高;天线整体组装校准过程复杂,制作成本高

2 卡塞格林光学天线

卡塞格林光学系统分为大口径卡塞格林天线、阵列卡塞格林光学天线、自由曲面卡塞格林光学天线、基于光束整形方案的卡塞格林光学天线、离轴双镜反射卡塞格林光学天线、阵列高斯光束离轴发射马卡光学天线和预准直卡塞格林光学天线等,本文对这些结构进行介绍并对比各自的优劣。

2.1 大口径卡塞格林光学天线

1998 年,AstroTerror 公司在弹道导弹防御组织(BMDO)的资助下设计和开发了光通信光学天线^[5]。该天线基于卡塞格林光学天线结构,重量为 31.5 磅,体积小于 1 立方英尺,天线口径为 100 mm,可以实现发射光束的对准和信号光的跟踪对准,能在最高 1 Gb/s 的传输速率下进行卫星-地面高速双向通信。

1999-2007 年,日本的轨道星间激光通信卫星(OICETS)项目^[6]、欧洲航空局的激光器星间链路实验(SILEX)项目^[7]和美国的光通信和传感器演示(OCD)项目^[8]中都使用卡塞格林光学天线作为主光学天线,天线口径分别为 260 mm、250 mm 和 100 mm,工作波长分别为 1062 nm、510 nm 和 830 nm,最大功率分别为 130 W、115 W 和 90.4 W。

2001 年,日本国家空间开发署开发了用于轨道卫星间自由空间光通信终端^[9],其上行链路工作波长为 1552 nm,下行链路工作波长为 1562 nm,发射天线口径为 150 mm,最高传输速率为 2.488 Gb/s。在通信信号强度为 -71.4 dBm 时通信终端的误码率为 10^{-6} ,接收灵敏度为 70 光子/bit,最远通信距离可达 2.5×10^6 km。

2013 年,NASA 航空局研制出月-地无线光通信

平台(LLCD)^[10],其月球上的通信终端采用卡塞格林光学天线,光学口径为 107.5 mm,工作波长为 1550 nm。该平台的通信距离达 4.5×10^6 km,并且在此距离上实现了上行 20 Mb/s、下行 615 Mb/s 的双向通信速率。

以上星地激光通信项目全部采用无色差、波谱范围宽的卡塞格林光学天线作为收发终端的光学天线。由于通信距离、通信容量和速率的不断增加,为克服卡塞格林光学天线中间遮挡比导致接收光信号能量低的问题,今后的研究将不断扩大卡塞格林光学天线的口径,增长其焦距,进而满足更高功率光信号接收的实际需求。

2.2 阵列卡塞格林光学天线

2004 年,PITMAN J T 等人^[11]设计出多孔径分布阵列光学天线(望远镜阵列),其结构示意图如图 4 所示。该结构由 9 个焦距相同的基础阵列单元按照一定布局进行排列后得到,其合成孔径为 1.5 m、焦距为 0.8 m。基础阵列单元是口径为 35 cm 的卡塞格林光学天线。整个遥感系统由前端的望远镜阵列、中继光学系统和后部的支撑、伺服控制系统组成。若将望远镜阵列作为子单元,则能组成更大的天线阵列,如:由 54 个基础阵列组成的天线阵列,其光束传输距离达 5000 km,天线最高分辨率为 4 m;同时,可以提供不同波段、距离和遥感任务下的精确伺服控制,以满足精准成像的要求。孔径阵列光学天线通过扩大合成孔径来增加有效接收面积,增大接收视场;另外,其定向接收和干涉测量技术使其可以应对多种多样的实际需求,目前应用较广泛。

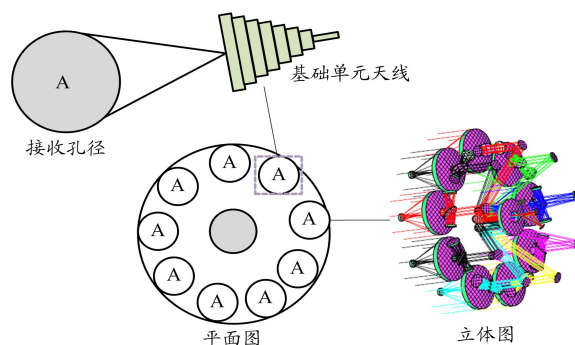


图 4 多孔径分布阵列光学天线结构示意图

2.3 自由曲面卡塞格林光学天线

2008 年,TAKAHASHI K 等人^[12]提出具有瞄准跟踪器的自由曲面光纤耦合卡塞格林光学天线。由玻璃扣和光纤制成的光纤耦合装置可以将光束无缝耦合到单模光纤上,信号光波长为 1562 nm,信标光波长为 980 nm,天线口径为 40 mm。光束倾斜角小于 $20 \mu\text{rad}$,

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

响应频率达到 2 kHz 的跟踪瞄准器可以有效降低到达角波动的影响。

2012 年,李晓明等人^[13]针对紫外光通信设计出一种新型自由曲面光学天线,该天线结构在复合抛物面的基础上引入双反射面,双反射面可以滤除可见光和红外光,进而降低背景噪声。

2020 年,谷茜茜等人^[14]提出了基于离轴自由曲面的无焦空间激光通信光学天线的设计方案,该方案采用无焦结构,解决了大功率信号源条件下传统光学聚焦原件焦点处功率密度过高的问题。仿真实验结果表明:信号光束的斯特列尔比大于 0.8,光学视场相对于传统天线增加了 26.7%。

2.4 基于光束整形的卡塞格林光学天线

2002 年,孔祥蕾等人^[15]提出了一种环形光束发射光学天线设计方案,其反射镜结构图如图 5 所示。该方案使用 2 个锥形反射镜或者复抛物面反射镜发射环形光束,巧妙地降低了由于卡塞格林光学天线中心遮拦造成的光束能量损失,最高可以减少 45.7% 的能量损失。受限于几何光学和加工水平,棱镜角度的精确性很难得到保证,因此该方案精度较低,误差较大。

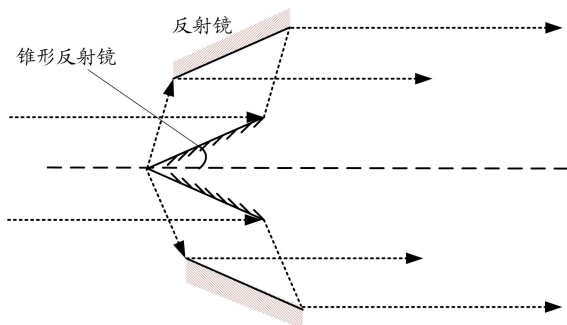


图 5 锥形反射镜结构示意图

2009 年,JUNG Y B 等人^[16]设计了一种可以控制光束波形的卡塞格林光学天线以应用于移动卫星通信波段的波束控制,如图 6 所示。天线由 2 个反射镜和 1 个伺服控制系统组成,主反射器用于提高天线增益,副反射镜在仰角和方位角上旋转用于控制波束,相控阵列控制器可以最大限度优化辐射方向。该方案可以在更大的视场内接收光信号,并且可以针对不同角度、不同光束的情况调整天线以达到最佳接收效果,进而扩大卡塞格林光学天线的接收视场。

2012 年,俞建杰等人^[17]利用衍射原件将高斯光束转化成环形光束之后,通过卡塞格林光学天线进行发射以提高发射效率,如图 7 所示。该方案通过光束整形和相位补偿校正一对二维光学衍射元件,将实心高斯光束转换成空心高斯光束,避免了中心遮挡导致的

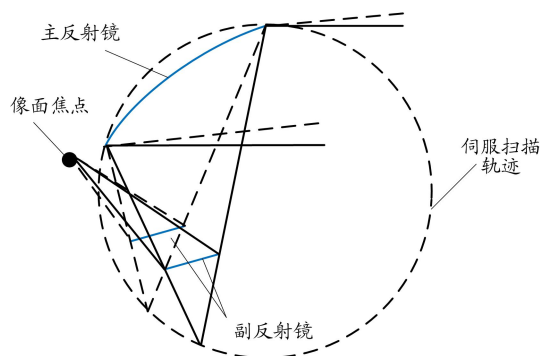


图 6 波形控制卡塞格林光学天线结构示意图

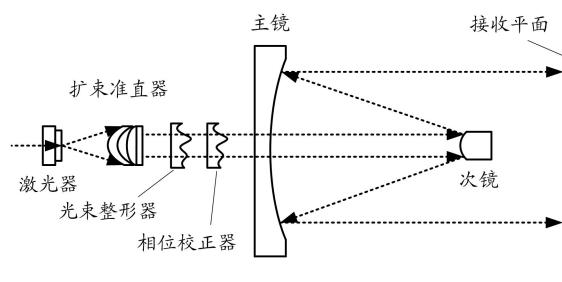


图 7 环形光束发射光学天线结构图

光束能量损失,此光学天线结构的发射效率超过 95%。

2018 年,徐芳雅等人^[18]设计了一种新型菲涅尔光学天线,如图 8 所示。信号光束首先入射到位于主镜中心的相位调制菲涅尔波带片,出射光束为有焦点的空心光束。该空心光束入射到双曲结构中的次镜后又经主镜反射,平行于天线结构出射。该天线使用自主设计的相位调制型菲涅尔波带片,次镜遮挡部分的高斯光束在天线出瞳处发射效率为 92.82%,与传统卡塞格林天线相比,效率提升了 31.42%。相比较于衍射元件环形高斯光束发射方案,菲涅尔波带片结构简单,便于操作和实现,虽然发射效率略低,但是其具有很好的实用性和可实现性。

综上所述,图 7 和图 8 中的方案利用相位整形原理,将光束输出成环形光束,因二元衍射元件具有良

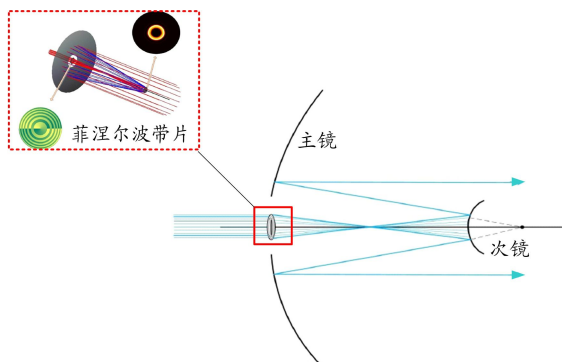


图 8 新型菲涅尔光学天线结构图

好的色散温差特性、极高的衍射效率、高精度以及可操作性的优点,更加适合实际应用。

2.5 离轴双镜反射卡塞格林光学天线

2017年,SHU G等人^[19]提出使用具有自由曲面的离轴双镜反射结构空间激光通信光学天线,如图9所示。光线经过自由曲面的发射可以准确入射到离轴双镜反射结构的第一块镀膜反射镜上,反射后的光线进入光学中继系统。

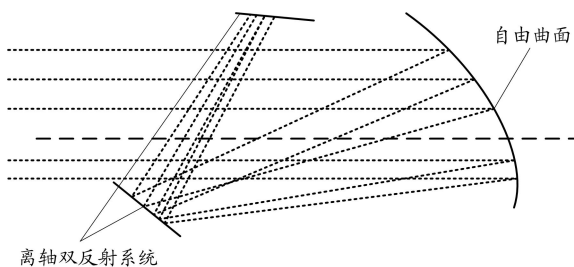


图9 自由曲面离轴双镜反射结构示意图

2020年,田棋杰等人^[20]设计出瞳距离轴四镜反射光学天线,该光学天线的出瞳位置与快反镜位置重合,省去了光学中继系统,因此避免了光学中继系统后向散射光对激光通信终端产生的不良影响。

根据以上结构的光学天线可知:自由曲面的设计能够有效校正离轴像差,与同轴传输系统相比,离轴反射系统的调制传递函数(MTF)数值更高,在大视场下更能以接近衍射极限的状态工作;随着视场的不断扩大,同轴系统的性能下降迅速,而离轴双镜反射结构仍旧稳定且可以接近衍射极限;离轴双镜反射结构避免了传统卡塞格林光学天线遮挡比导致的能量利用率低的问题,因此更适合星载激光通信使用,可提高空间激光通信系统的整体性能。

2.6 阵列高斯光束离轴发射马卡天线

为满足双工无线激光通信的需求,SIC L等人^[21]对马卡天线进行结构改造,设计了收发一体马卡天线,如图10所示。光信号通过标准接口与4路尾纤输出的半导体激光器相连;在尾纤的后端安装光纤准直器,改变尾纤光束的发散角;根据发射光纤的空间位置,将这4个尾纤环形分布固定于圆形发射光纤盘完成发射功能;同时将光纤放置于接收光纤盘中心,接收光信号透过发射光纤盘的通孔后可耦合进接收光纤盘中心的光纤内。将接收光纤盘放置在锥形光阑内的马卡天线焦点处,完成空间光-光纤耦合和光接收过程,三维效果图如图11所示。

SIC L等人^[21]针对所设计的收发一体马卡

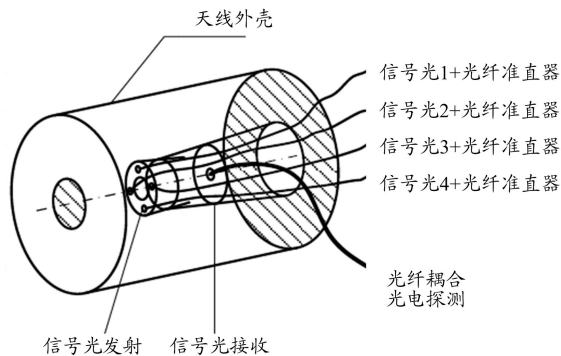


图10 收发一体马卡天线原理图

天线进行了高斯光束离轴发射试验,其实验结果如表2所示。马卡天线A、B分别作为发射天线和接收天线来测试离轴发射光功率、接收功率与耦合效率。通过实验测得经准直器后发射光功率为14.8 mW,经过马卡天线A后出射光功率为13.9 mW,发射效率高达94%,与沿轴发射方法(发射效率为9%)相比有了非常显著的提高,从而解决了由于次反射镜遮挡引起光功率损失的问题。



图11 收发一体三维效果图

2014年,雷思琛等人^[22]提出整理高斯光束的发射方案,如图12所示。在直角坐标系上,假设 N 束高斯光束均匀地分布在半径为 r_0 的圆上,相邻子光束的角间距均为 $\alpha_0=2\pi/N$ 。这 N 个子光束构成了一个径向分布阵列光束。他们经过推导和计算后进行了阵列高斯光束耦合仿真实验,根据实验和结果可以发现:发散的阵列高斯光束($F_0<0$)、准直的阵列高斯光束($F_0=\infty$)和汇聚的阵列高斯光束($F_0>0$)若沿着光轴水平传输,则随着传输距离的增大,高斯光束会因自身的波面曲率一直变化,最终都可以从分立的高斯光束演化为一束光束;且距离越远,光束耦合效果越好,中心能量衰减越大。

表2 收发一体马卡天线实验结果

距离/m	马卡天线B 发射光功率/ mW	马卡天线A 接收光功率/ mW	马卡天线A 耦合效率	马卡天线A 发射光功率/ mW	马卡天线B 接收光功率/ mW	马卡天线B 耦合效率
5	14.8	3.1	21.6%	14.8	2.8	20.2%
15		3.0	20.9%		2.9	20.9%
30		2.3	16.1%		2.2	15.8%

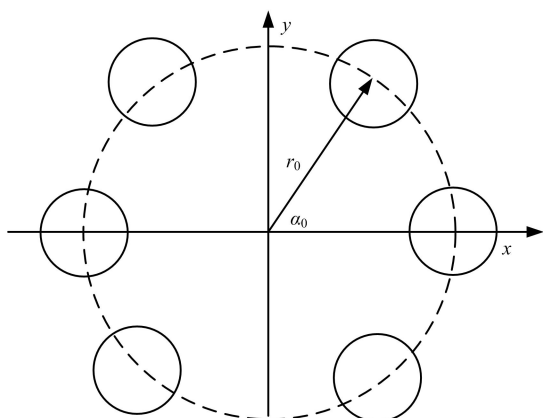


图 12 径向分布阵列光束示意图

2015 年,柯熙政等人^[23]针对马卡天线遮挡比导致的光信号能量浪费和同轴发射效率较低问题,对马卡天线锥形光阑进行改造,利用微透镜控制单模光纤发出的高斯光束各项参数,设计出 4 个高斯光束环形均匀排布离轴发射的马卡天线,其结构如图 13 所示。他们对该天线的光束耦合效果进行了实验,阵列高斯光束在不同传输距离时的发射光斑图如图 14 所示,其中单高斯光束离轴发射的实验结果如表 3 所示。可以看出,离轴发射将发射效率从 9% 提升至 53%,各端面存在反射、吸收损耗且半导体激光器束散角没有进行严格的控制,未能达到理想的 100% 发射。从图 14 和表 3 的实验数据可知:距离越远,光斑越大并且逐渐向中心靠拢。这是由于发射光束已经变成发散高斯光束并逐步出现了自耦合现象。

2.7 预准直卡塞格林光学天线

2006 年,YANG H J 等人^[24]设计了一种用于空间激光通信系统的新型非球面预准直卡塞格林光学天线,系统口径为 150 mm,非球面透镜的焦距为 250 cm (标准焦距)。该天线不仅能在放大倍数为 20 倍的前

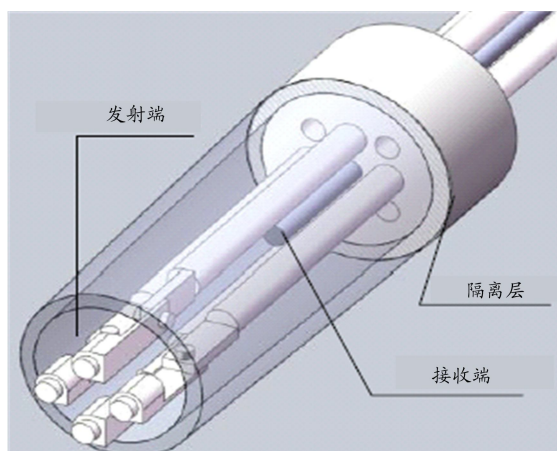


图 13 高斯光束均匀环形排布离轴发射天线示意图



图 14 阵列高斯光束在不同传输距离时的发射光斑图

表 3 单高斯光束离轴发射实验结果

实验	出瞳效率	出射光线与光轴夹角/(°)	光斑形状
正常发射 (实验)	9%	0	
离轴发射 (实验)	53%	2.2	
离轴发射 (理论)	100%	0.25×10^{-3}	

提下将光束压缩至最小 $6 \mu\text{rad}$, 而且还能提高光线发射增益,降低背景光噪声。

2007 年,江萍等人^[25]提出利用准直系统、光隔离器和分光棱镜等光学器件在卡塞格林光学天线的焦点后实现收发一体,这也是最常见的收发一体方法。

综上所述,对传统卡塞格林光学天线的进一步改进和研究主要是为了降低其天线结构中间遮拦的影响,光束自耦、光束整形、自由曲面和离轴反射等技术被提出或应用于光学天线中,这些技术在结构和作用上各有优劣,简要总结如表 4 所示。

近几年,光学天线领域出现了许多新的光学天线:如复抛物面形反射镜光学天线、伽利略光学天线与格里高利光学天线的组合应用、复杂面形的非球面透镜组合光学天线以及仿生复眼结构光学天线等。这些新结构光学天线不仅具备了传统卡塞格林光学天线的性能,还具有高增益、消像差等优势特性。但是,国内研究工作主要是对天线结构和设计方案的数值进行仿真^[26],缺乏实际工程应用,仅有中国科学院光电技术研究所^[27]、西安理工大学^[28]等少数单位具有试验与应用案例,因此该方面研究还有待进一步提升。

3 无独立信标光瞄准、捕获和跟踪(PAT)系统

自由空间光通信系统中的信号光束通常具有非

表 4 卡塞格林天线结构研究进展

天线	研究内容	优势与缺陷
大口径卡塞格林光学天线	大口径技术	大口径的天线可以增加接收光信号的功率,同时具有孔径平均效应,弱化波动
阵列卡塞格林光学天线	阵列天线技术	突破了单天线最大口径的限制;同时通过信号相干性可以获得阵列增益;多个基础单元信道可以获得分集增益,消除信道间干扰
自由曲面卡塞格林光学天线	自由曲面反射镜技术	降低了同轴反射天线的能量损耗,提高了天线的传输效率
基于波束整形的卡塞格林光学天线	光束整形技术	发散角准直整形可以使得接收端光斑最小;光场能量分布整形减小了天线固有的能量损失
离轴双镜反射卡塞格林光学天线	离轴反射技术	提高了天线的集光能力,增加了天线的探测范围;从技术成熟度、系统性能和未来通信需求考虑,离轴双镜反射天线具有更高的可行性与操作性
阵列高斯光束离轴发射马卡天线	光束自耦技术	可以有效解决马卡天线次镜反射引起的发射效率下降问题
预准直卡塞格林光学天线	透镜预准直技术	准直透镜进一步压缩了光束的发散角,提高了光斑质量和天线的接收效率、发射效率

常小的光束发散角以保证足够的检测信号强度,但小发散角不利于接收端的 PAT。因此,人们采用光束发散角较大的信标光与发散角较小的信号光同光路发送,以利于接收端的 PAT。由于信标光需要独立的光学发射系统,导致光学天线结构和伺服控制系统更加复杂,因此出现了无独立信标光 PAT 系统。

无独立信标光 PAT 系统是将信号光分出一部分给光斑位置探测器,完成光束位置检测^[29]。无独立信标光 PAT 系统终端信号光束与信标光束共用部分光学元件,因此,此类接收天线具有体积小、重量轻和功耗低等优点。2011 年,德国宇航技术中心发射的 Tesat-Spacecom 通信卫星使用了无信标捕获技术,是现今无独立信标光捕获技术中的最高水准^[30]。2017 年,国爱燕等人^[31]提出一种无信标跟踪捕获方法,该方法需要的激光发射功率为 0.135 W,捕获时间为 30 s,捕获概率为 95%。2018 年,欧洲航天局发射的一个卫星搭载 OPTEL-D 通信终端,接收孔径为 1016 mm,接收波长为 1550 nm,该终端使用反射式望远镜结构并结合复轴无独立信标光 PAT 系统^[32]。无独立信标光 PAT 系统规避了信标光 PAT 系统存在的缺陷,不需要额外的发

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

射信标光光学天线,大大简化了发射机和接收机的复杂度,是未来 PAT 系统发展的趋势。

4 一点对多点通信光学天线

由于点对点通信系统中的通信终端数量有限,不能进行多平台间的高速通信与信息中继,制约了自由空间光通信系统的应用推广。因此,一点对多点自由空间光通信系统的组网方式成为解决问题的研究方向。

1993 年,CLARKE S 等人^[33]提出使用大视场光学天线对低轨道用户全覆盖,并在天线焦平面上安装可移动微型探测器来进行一点对多点激光通信。

2002 年,美国通信卫星转型计划(TSAT)提出在不同位置放置多个收发端,以实现同时多点通信^[34]。同年,SHERMAN M P 等人^[35]提出在接收天线焦平面处放置光纤阵列来实现一点对多点的自由空间光通信。该方案虽然实现了一对多通信链路的设计,但是光纤数值孔径对接收信号的限制影响导致通信质量并不理想;同时,光纤以及光纤阵列的排布也具有一定的困难。因此,一点对多点自由空间光通信光学天线的实用性和集成小型化还有待于进一步探索。

2006 年,CHOI S T 等人^[36]针对室内无线光局域网和智能交通系统等短距离应用,开发了一种数据速率为 156 Mb/s 的 60 GHz 点对多点无线接入链路,60 GHz 光学天线的总尺寸为 50 mm×75 mm。

2011 年,姜会林等人^[37]提出以抛物面为基底的多反射镜拼接结构一点对多点光学天线,该天线由透镜球表面同心的前、中、后 3 个透镜组成,可以将视场角 160°范围内的通信目标成像于底部接收端平面上,同时在此范围内发射信号光束与其它目标进行双向通信,天线通信速率可以达到 2.5 Gb/s,俯仰角为±60°。

2014 年,郑阳等人^[38]提出一种轨面四镜反射光学天线,并基于此天线提出链路卫星组网方案。该天线能够在视场角 50°、俯仰角 40°范围内进行激光光源捕获,在伺服系统的控制下进行同轨道、不同轨道卫星之间的双向通信和动态跟踪瞄准。天线装置在不同城市(北京、漠河、拉萨和上海)的俯仰角都能满足 1500 km 及以上通信距离的要求。

2015 年,姜会林等人^[39]针对在轨多平台间组网通信问题提出了一种可以满足多点之间同步双工激光通信需求的光学天线设计方案,其结构图如图 15 所示。该光学天线由旋转抛物面反射镜和光学中继系统等组成,旋转抛物面反射镜的口径为 200 mm,俯仰角度为 73°。通信目标 A 和通信目标 B 分别是来自不同

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

方向上的通信目标,光线沿着抛物面反射镜的焦点方向入射到光学天线中并沿着平行于主轴的方向出射,进入后续光学中继系统。该天线视场大、通信范围广,结构简单且接收能量高,能够实现多点间同时双工通信,满足高轨道卫星(GEO)-GEO-光学地面站(OGS)间组网通信的要求^[40]。

姜会林等人^[39]还提出了一点对多点激光通信光学跟踪方案,该方案以旋转抛物面反射镜和三同心球结构作为光学天线,在实验中可以同时进行一对三的通信。三同心球结构示意图如图16所示,该结构具有水平和俯仰2个方向上120°的大视场角。光学天线可以在对应工作区域轨道上与多个收发终端进行同时双工通信,当收发终端沿着轨道离开当前光学天线工作区域,进入下一个区域时,由下一个光学天线对收发终端进行接管并建立通信链路。这种光学天线和建立通信链路的方案省去了跟踪瞄准的复杂步骤,为建立

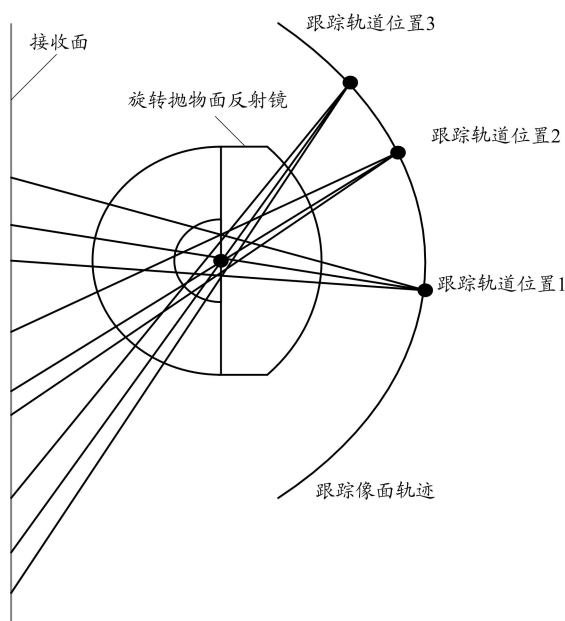


图16 三同心球结构示意图

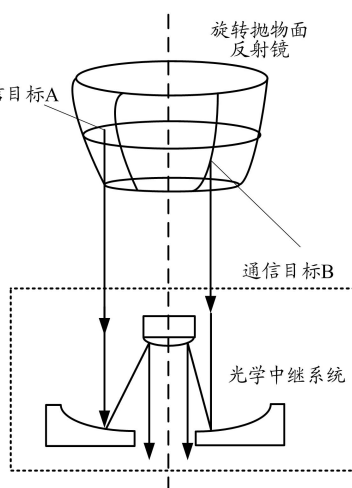


图15 旋转抛物面反射镜一点对多点激光通信光学天线结构图

多点同时双工通信轨道通信网络提供了一种可行性较高的方案。

2015年,张涛等人^[41]提出一种无线光通信组网光学天线设计方案,该天线可以实现同步双工空间激光通信,在方位角为360°,俯仰角为90°范围内以最高2 Gb/s的传输速率进行多点之间的双向通信。

2016年,江伦等人^[42]提出利用广角扩束镜与双光楔组合制作多点激光通信系统的光学天线,如图17所示。350 mm的广角扩束镜可以扩大视场范围,接收来自不同方向上的光信号。 N 对口径为100 mm的双光楔组合可以同时接收对 N 个不同信号源进行动态瞄准和跟踪,在低轨道进行一对三同时双向通信。在通信实验中,通信距离为400 km,通信速率为2.5 Gb/s,通信误码率小于 10^{-7} 。此光学天线根据通信目标的数量和位置对光楔组合的数量相对位置灵活控制,尽可能地利用光信号能量。与三同心球结构相比,旋转抛物面组合和双光楔组合结构略显复杂,重量和体积较高。但是,其对光能量的利用率更高,更适合远距离的无线光通信系统组网。

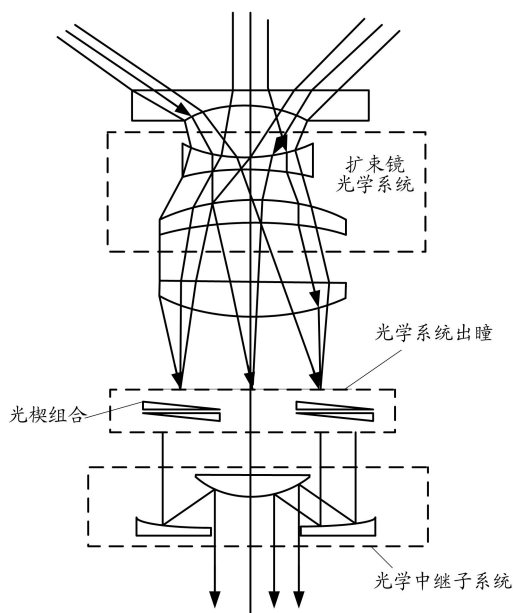


图17 广角扩束镜和双光楔组合结构图

一点对多点自由空间光通信光学天线各结构之间自有优劣,其对比如表5所示。建立天地空一体化全球信息网络是必然趋势,传统的点对点自由空间光通信不具备多端同时通信的条件,限制了自由空间光通信网络组网进程。因此,一点对多点自由空间光通信是发展组网技术的必由之路。

表5 一点对多点自由空间光通信光学天线研究进展

年份	研究进展	优势与缺陷
1993	大视场全覆盖光学天线	
2002	多收发端组合通信光学天线	光纤和卡塞格林光学天线的数值孔径限制导致视场仍然较小;杂散光比较严重,且器件的排布组合也比较困难,应用性和可行性不高,有待突破
2005	焦平面光纤阵列光学天线	
2006	室内无线光点对多点无线接入光学天线	
2011	多反射镜拼接抛物面光学天线	通信范围广,结构简单,可利用口径和光束能量高;通信距离较远,适合飞机、卫星和地面端多端组网
2014	轨道面四镜反射光学天线	
2016	广角扩束镜与双光楔组多点接收光学天线	
2015	三同心球结构多点接收光学天线	三同心球结构简单、质量轻小型化适用于短距离、组合灵活的激光通信网络
2015	无线光通信组网光学天线	

5 结束语

本文系统地光学天线技术在自由空间光通信系统中的应用和发展进行了总结,同时对许多新的结构和天线类型进行了介绍。光学天线的发展应该以迎合未来通信的需求为目标,因此对无线光通信系统光学天线的未来的研究方向作几点展望:

①一点对多点自由空间光通信系统光学天线可实现点对多点通信,为自由空间光通信组网提供了可能性。

②传统信标光 PAT 系统需要独立的光学天线发射,收发端天线结构复杂。无独立信标光 PAT 系统省去了一个光源,使得发射端的结构得以简化,可以满足未来光学器件小型化和集成化的要求。

③开展多发射多接收体制光学天线研究,能进一步提高自由空间光通信组网的灵活性,可以构成天地空立体自由空间光通信网络,更快推进自由空间光通信的实际应用。

④可进一步分析马卡天线离轴发射效率,并进行实验;设计新的离轴发射结构,提高光信号发射效率。

参考文献:

[1] 柯熙政,杨尚君,吴加丽,等. 西安理工大学无线光通信系统自适应光学技术研究进展[J]. 强激光与粒子束,2021,33(8):30-52.

[2] 孙文昌,袁丹. 宽视角光学接收天线研究与进展[J]. 大众科技,2012,14(6):54-57.

[3] 张玉侠,艾勇. 基于空间光通信卡塞格伦天线弊端的探讨[J]. 红外与激光工程,2005(5):60-63.

[4] 李湘,蓝天,王云,等. 室内可见光通信系统中菲涅尔透镜接收天线的设计研究[J]. 物理学报,2015,64(2):024201-1-024201-7.

[5] YUICHI F, MASAOKI M, TAKASHI O, et al. Optical inter-orbit communications engineering test satellite (OICETS)[J]. Acta Astronautica, 2007, 61(1): 163-175.

[6] TOLKER T, NIELSON B, DEMELENNE E. Desplats in-orbit test results of the first SILEX terminal[J]. SPIE Free-Space Laser Communication Technologies, 1999, 36(15): 31-42.

[7] TSUNYEE Y, MUTHU J, JAMES R. Progress on the development of the optical communications demonstrator [J]. Photonics West, 1980, 123(10): 94-101.

[8] TOYOSHIMA M, YAMAKAWA S, YAMAWAKI T, et al. Reconfirmation of the optical performances of the laser communications terminal onboard the OICETS satellite[J]. Acta Astronautica, 2004, 55(3-9): 261-269.

[9] 宋婷婷,马晶,谭立英,等. 美国月球激光通信演示验证-终端设计[J]. 激光与光电子学进展,2014,5(1):25-31.

[10] NOVOTNY L. Effective wavelength scaling for optical antennas[J]. Physical review letters, 2007, 98(26): 266802-1-266802-10.

[11] PITMAN J T, DUNCAN A, STUBBS D, et al. Remote sensing space science enabled by the multiple instrument distributed aperture sensor (MIDAS) concept [C]//SPIE. Proceedings of Instruments, Methods, and Missions for Astrobiology VIII. Berkeley: SPIE, 2004: 301-310.

[12] TAKAHASHI K, ARIMOTO Y. Compact optical antennas using free-form surface optics for ultrahigh-speed laser communication systems[J]. Optical Engineering, 2008, 47(1): 16-22.

[13] 李晓明,华文深,吴先权. 基于双反射面的紫外光通信光学天线的研究[J]. 光学仪器,2012,34(2):21-25.

[14] 谷茜茜,崔占刚,开波. 基于离轴自由曲面的激光通信光学天线设计[J]. 中国光学,2020,13(3):547-557.

[15] 孔祥蕾,郝沛明. 消除中心遮挡的反射式激光扩束新方案[J]. 量子电子学报,2002,21(3):205-209.

[16] JUNG Y B, SHISHLOV A V, PARK S O. Cassegrain antenna with hybrid beam steering scheme for mobile satellite communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1367-1372.

[17] 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[J]. 红外与激光工程,2013,42(1):130-137.

[18] 徐芳雅. 新型菲涅尔光学天线设计[D]. 成都:电子科技大学,2018.

[19] GUAN S H, WANG C H, TONG S H F, et al. Optical antenna design of off-axis two-mirror reflective telescope with freeform surface for space laser communication [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(12): 1222003-1-1222003-8.

[20] 田棋杰,张建华,张缓缓,等. 长出瞳距离离轴四反光学天线的设计研究[J]. 光学学报,2020,40(18):149-156.

[21] SIC L, XIZ K. Laser emitted through the off-axis Cassegrain antenna [C]//International Society for Optics and Photonics. Proceedings of Laser Communication Technologies and Systems. Beijing: SPIE, 2013: 531-537.

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

- [22] 雷思琛,柯熙政,邵军虎,等. 空间光 - 光纤阵列耦合自动对准实验研究[J]. 激光技术,2014,38(2):191-195.
- [23] 柯熙政,雷思琛,王天瑜. 基于光纤阵列的卡塞格林收发一体天线[J]. 激光与光电子学进展,2015,52(12):49-55.
- [24] YANG H J, HU Y, LI C, et al. Optimum design for optical antenna of space laser communication system[C]//IEEE. Proceedings of 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Guilin:IEEE, 2006: 2016-2019.
- [25] 江萍. 主被动多波长光学天线的设计与仿真[D]. 成都:电子科技大学,2007.
- [26] 姜文汉,张雨东,饶长辉,等. 中国科学院光电技术研究所的自适应光学研究进展[J]. 光学学报,2011,31(9):9-9.
- [27] 杨慧珍,李新阳,姜文汉. 自适应光学技术在大气光通信系统中的应用进展[J]. 激光与光电子学进展,2007,44(1):61-68.
- [28] 柯熙政,吴加丽. 无线光相干通信原理及应用[M]. 北京:科学出版社.
- [29] 李庆. 空间光通信中 ATP 系统微弱信标光信号处理技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.
- [30] WHITELEY M R, GOORSKEY D. Influence of aero-optical disturbances on acquisition, tracking, and pointing performance characteristics in laser systems [J]. The International Society for Optical Engineering, 2011 (3): 298-306.
- [31] 国爱燕,高文军,周傲松,等. 星间光通信无信标捕跟瞄技术[J]. 红外与激光工程,2017,46(10):7-10.
- [32] STUMPF M, ROTH C, MOSBERGER M, et al. OPTEL-D: an optical communication system for the deep space [C]// International Society for Optics and Photonics. Proceeding of Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXX. San Francisco: Conference on free-space laser

- communication and atmospheric propagation, 2018: 105240-21-105240-26.
- [33] CLARKE S, PRENGER R, ROSS M. Experimental results with a prototype three-channel multiaccess transceiver lasercom terminal[C]//SPIE. Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies V. Los Angeles: SPIE, 1993, 1866: 128-137.
- [34] ZHIZHONG Y, JINGYI C, XIANWEI Z. Development and technology of U.S. military satellite communications systems[J]. Communications Technology, 2009, 41(11): 55-58.
- [35] SHERMAN M P, JOHN A T. Point-to-multipoint free-space wireless optical communication system: 6445496B1[P]. 2002-09-03.
- [36] CHOI S T, YANG K S, NISHI S, et al. A 60 GHz point-to-multipoint millimeter-wave fiber-radio communication system [J]. IEEE transactions on microwave theory and techniques, 2006, 54(5): 1953-1960.
- [37] 姜会林,胡源,宋延嵩,等.空间激光通信组网光端机技术研究[J].航天返回与遥感,2011,32(5):52-59.
- [38] 郑阳,付跃刚,胡源,等.基于空间激光通信组网四反射镜动态对准研究[J].中国激光,2014,41(1):103-109.
- [39] 姜会林,江伦,宋延嵩,等.一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J].中国激光,2015,42(4):150-158.
- [40] PURVINSKIS R, GIGGENBACH D, HENNIGER H, et al. Multiple-wavelength free-space laser communications[C]//SPIE. Proceedings of Free-Space Laser Communication Technologies XV. Australia: SPIE, 2003: 12-19.
- [41] 张涛,付强,李亚红,等.多平台激光通信组网共焦点反射式光学天线设计[J].光学学报,2015,35(10):220-226.
- [42] 江伦,胡源,王超,等.一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J].光学学报,2016,36(5):37-43.