

# 共口径偏振复用激光通信光学天线分光束结构设计

刘壮, 王超, 江伦, 史浩东

(长春理工大学 空间光电技术研究所, 长春 130022)

**摘要:**针对共口径偏振复用空间激光通信光学天线采用双色分光片分光而浪费高效率波段的问题,利用偏振分光棱镜、法拉第旋光器等器件设计了一种分光束结构。根据现有空间激光通信器件参数,分析了空间激光通信系统对分光束结构的隔离度的需求,计算了该结构的隔离度与光学损耗,并分析了其适用范围。计算结果表明该结构可以应用于共口径偏振复用空间激光通信光学系统。

**关键词:**光学天线;光学设计;共口径;偏振复用;隔离度;光学损耗

**中图分类号:** TN929.11; Q434 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)10-0016-04

**DOI:** 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.10.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Design of beam splitter structure for common aperture polarization multiplexing laser communication optical antenna

LIU Zhuang, WANG Chao, JIANG Lun, SHI Haodong

(Institute of Space Photo-electronics Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of wasting high-efficiency wavelength bands in the common aperture polarization multiplexing space laser communication optical antennas using beam splitter, a beam splitting structure is designed by using polarizing beam splitting prism and Faraday rotator. According to the parameters of the existing space laser communication device, the requirements for the isolation of beam splitting structure in space laser communication system are analyzed, the isolation and optical loss of the structure are calculated, and the applicable ranges are analyzed. The calculation results show that the structure can be applied to common-aperture polarization multiplexing space laser communication optical system.

**Key words:** optical antenna; optical design; common-aperture; polarization multiplexing; isolation; optical attenuation

### 0 引言

在空间激光通信系统中,为使结构简化,远距离空间激光通信光学天线多采用发射光与接收光共口径方案。共口径方案需要解决激光通信光学天线的发射光与接收光的分束问题。目前,已应用的星间或星地激光通信光学天线如美国光通信演示系统、欧洲

SILEX 激光通信终端<sup>[1-2]</sup>均采用发射与接收光异波长方案,利用双色分光片对光收发光束进行分离。然而,双色分光片光谱中的透过率与反射率之间的部分会占用光源波段,限制了波分复用技术的应用范围。Strv2、LCT-125 等系统<sup>[3-6]</sup>利用偏振分光棱镜实现发射光与接收光的分光束,这一方法虽然不影响光谱波段的利用,但无法通过偏振复用提高通信速率。

本文利用法拉第旋光器、偏振分光棱镜等分光器件设计一种分光束结构,方便共口径高速率空间激光通信系统的光束分离。

### 1 激光通信光学天线分光束结构与原理

完整的共口径空间激光通信光学天线光学系统主要包括:望远镜、粗信标相机、振镜、精信标相机、粗信标激光器、精信标激光器、分光束结构、通信发射机与通信接收机等组成,构成图如图 1 所示。其中,望远

收稿日期:2020-03-26。

**基金项目:**国家自然科学基金项目(61701045、61805028)资助;吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKH20190566KJ)资助;长春理工大学青年科学基金(KQNJJ-2018-20)资助。

**作者简介:**刘壮(1986—),男,博士,讲师,现就职于长春理工大学光电工程学院空间光电技术研究所,光学工程专业,中国光学学会会员,主要从事空间激光通信技术、激光雷达技术研究。负责完成和在研的省部级、国家级项目共 10 项。



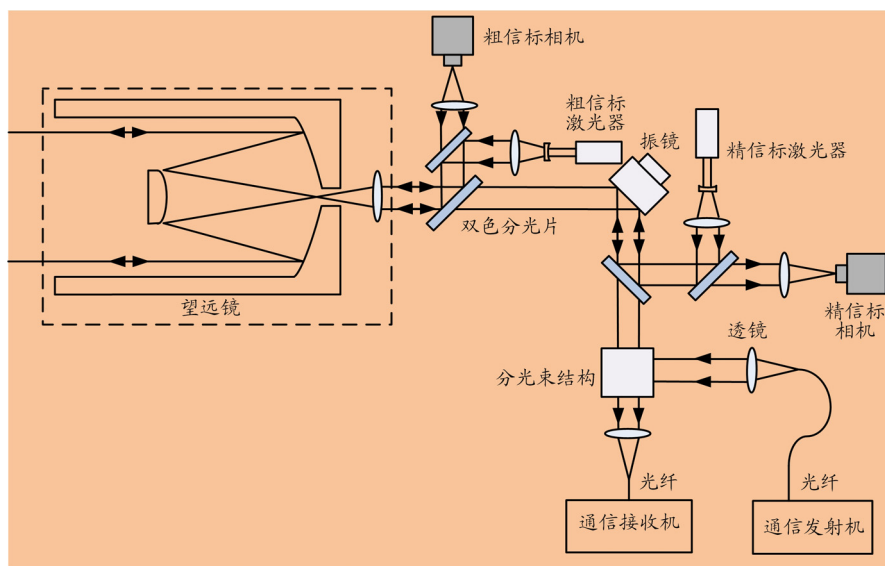


图1 共口径空间激光通信光学天线光学系统结构

镜用于发射光的扩束以及接收光的收集;粗信标相机用于在大范围内实现通信对象的捕获、跟踪与对准;振镜用于实现发射光与接收光角度的精确调整;精信标相机用于实现小角度范围内高精度捕获、跟踪与对准;信标激光器用于产生体现自身位置的光源;分光束结构要利用不同分光器件将不同功能、不同参数的光合并与分离,这些光包含:粗信标发射光、粗信标接收光、通信发射光与通信接收光。其中,信标光为可见光或者700~1064 nm的连续激光,与通信常用的1310 nm、1530~1605 nm波段间隔较远,可采用双色分光片分离。高速通信系统的通信发射光与通信接收光由于波长接近,是分光系统设计的难题。

## 2 分光束结构设计

### 2.1 设计目标

#### 2.1.1 与隔离度有关的指标需求

空间激光通信系统的通信波长、通信速率、调制解调模式、激光发射功率和探测灵敏度等均与隔离度指标有一定关系,但最直接的指标主要是激光发射功率和探测灵敏度。

①激光发射功率。空间通信通常距离比较远,大气激光通信信道存在大气吸收、散射等衰减因素,损耗均比较大,增加发射光功率是最直接的解决方法。目前,高速激光通信多采用连续光源相位调制的方式,满足高质量通信的激光信号经掺铒光纤放大器(EDFA)放大后功率可接近10 W,但是存在较大的噪声系数,权衡功率与噪声系数,通信功率一般限制在5 W以内。

②探测灵敏度。探测灵敏度主要取决于通信速率与通信调制解调模式,同时也可以通信接收机前端加前置EDFA来提高探测灵敏度。目前,星间空间激光通信常用差分相移键控(DPSK)调制方式,速率为5 Gb/s,此时理论极限探测灵敏度约为-52 dBm,实际可达-46 dBm左右<sup>[7]</sup>。

#### 2.1.2 隔离度需求

共口径激光通信光学天线的发射光与接收光间的隔离度要满足一定指标要求。

①发射光与接收光间的隔离度。发射光与接收光的隔离度要满足发射光进入接收端后不足以干扰通信。

根据信噪比与探测概率之间的关系曲线,如果发射光进入接收探测器的光功率大于等于接收光的光功率1/5时,接收光的探测概率将小于99%,可认为此时干扰起了作用。同时,如果干扰光功率小于探测器最低可探测光功率,则认为不足以造成干扰,干扰光要实现低于这2个要求的最低值,极限隔离度则要实现最大值。由发射光功率为5 W(37 dBm)、探测灵敏度为-46 dBm、接收余量为3 dB和接收光功率最小值为-43 dBm可推算出造成干扰的最低光功率为-43 dBm。若不考虑光学系统损耗,则发射光与接收光的极限隔离度要求为80 dB。

②接收光间的隔离度。接收光间的隔离度要满足经过发射系统损耗、空间损耗以及部分接收系统损耗的入射光进入不属于自己的光电探测器后不足以干扰通信。同样,当探测信号与干扰信号的信噪比大于等于5时,可探测概率大于等于99%,所以接收光间的隔离度一般要求大于等于7 dB。

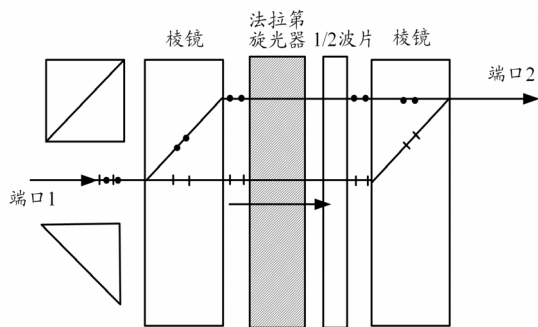
根据偏振复用光学天线对分光束结构的需求,设计需要满足以下功能与性能参数如表1所示。

#### 2.2 分光束结构与原理

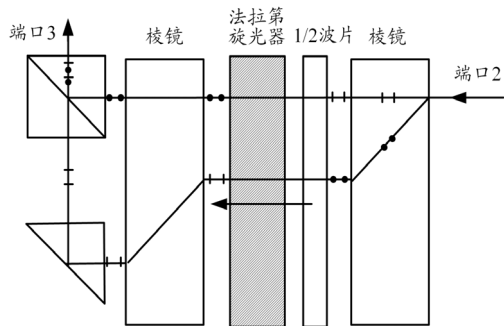
光纤中实现收发分离的器件主要是光纤环行器,高功率光纤环行器结构原理如图2所示。可以看出,其具有3个端口。若光从端口1输入,则只能从端口2输出;而光从端口2输入,则只能从端口3输出。无论哪个端口输出,其输出损耗都很小。所以,可以令端口1为激光发射端口,端口3为接收端口,端口2为共用的合束端口接入空间光设备,从而形成最简单的共口径空间光通信光学天线分光束结构<sup>[8]</sup>。

表 1 分光束结构功能与性能参数

| 功能或性能 | 分光束结构要求                              |
|-------|--------------------------------------|
| 复用形式  | 偏振复用                                 |
| 波长    | 发射与接收异波长                             |
| 隔离度要求 | 发射光与接收光间:最高优于 80 dB;<br>接收光间:优于 7 dB |
| 光学损耗  | $\leq 3.0$ dB                        |



(a) 发射光方向



(b) 接收光方向

图 2 光纤环行器工作原理

本文对空间光环行器重新设计,改变收发隔离与偏振隔离的顺序,简化系统结构,可实现传统光环行器相同功能,分光束结构如图 3 所示,工作原理如下:先利用 1/4 波片实现空间中左旋圆偏振光、右旋圆偏振光与 P 光、S 光(相对于纸面)的转换,然后利用偏振分光器实现不同 P 光与 S 光的分离,在每一路 P 光、S 光后再单独通过法拉第旋光器与偏振分光棱镜实现发射光与接收光的分离,最终实现 2 种偏振态的发射光与接收光的分别隔离。这一结构相较于空间光环行器放大结构缩减了 1 个偏振分光棱镜与 2 个反射镜。

### 2.3 光谱隔离器件选择

为进一步提高发射光与接收光间的隔离度,本文采用发射光与接收光异波长方案,发射光与接收光波长相差 2.0 nm,如发射光波段采用 1530~1550 nm,则

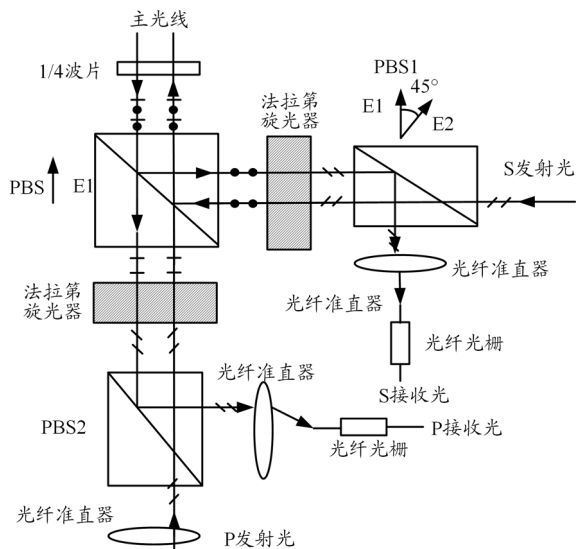


图 3 设计的分光束结构工作原理图

接收光波段采用 1552~1572 nm。光谱隔离器件可选择窄带滤光片、光纤光栅与波分复用器。其中,窄带滤光片在 1550 nm 波段的 3 dB 带宽最窄可达约 1.0 nm,隔离度约 10 dB;光纤光栅 3 dB 带宽可达 0.1~1.0 nm,反射率可达 99%,隔离度约为 15 dB;选用的密集波分复用器可使波长间隔达到 0.4 nm 级,当波长间隔为 0.8 nm 时,相邻波长隔离度可达 28 dB,相邻波长( $\geq 1.6$  nm)隔离度可达 40 dB。

在接收光耦合进光纤后,为进一步提高隔离度,在光纤中加入 2 个波长间隔为 0.8 nm 密集波分复用器,并间隔波长使用。

## 3 设计结果分析

### 3.1 隔离度分析

#### 3.1.1 发射光与接收光间隔离度

本地发射端对本地接收端的干扰主要来自于发射的振动方向为 P 的发射光对 P 接收端,振动方向为 S 的发射光对 S 光接收端的串扰,串扰形成的主要原因包含多个方面,其中主要来源于 P 光在反射面 A 与反射面 B 的少量反射(如图 4 所示),界面透过率大于 99%,反射率小于 0.5%。经统计,P 发射光从反射面 A 反射,共 6 次经过透射面、1 次经过偏振分光棱镜反射表面,则可反

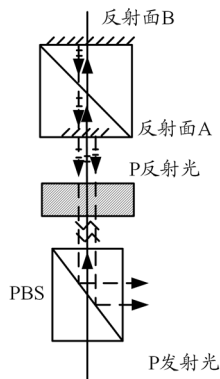


图 4 发射光干扰接收光原理示意图



射回的能量约为发射能量的 0.48% (-23.32 dB),加上波分复用器后总隔离度可达到 103.32 dB,可满足指标需求。

### 3.1.2 接收光间的隔离度

接收光间串扰主要包含不同波长相同偏振态光间的串扰以及相同波长、不同偏振态间光的串扰。其中,不同波长、相同偏振态接收光间的串扰来源于双色分光片等分光器件隔离度的不足,可用波分复用器件来解决,相邻波长间隔隔离度可以达到 28 dB,相隔波长(波长间隔 $\geq 1.6$  nm)隔离度可以达到 40 dB,完全可以满足要求。相同波长、不同偏振态间光的串扰主要由于光源偏振度不等于 1,偏振光经过大气以及光学系统后的消偏振作用使一部分偏振光偏振态发生了变化,经过测试,种子光源经过放大后的偏振度可以达到 94.5%,经过偏振分光棱镜或者偏振分光棱镜合束后,偏振度将进一步提高到 99.9%。根据文献[9]可知,高偏振度偏振光从空间经过大气后偏振度达到 99.4 $\pm$ 4.4%。由此可见,偏振度不会发生可引起串扰的变化。

### 3.2 光学损耗分析

仅考虑分光束结构损耗的情况下,发射 P 与 S 光光经过先后透过偏振分光棱镜(透过率 98%)、法拉第旋光器(透过率 90%)与偏振分光棱镜(透过率 98%),共损耗约 10 dB;接收 P 与 S 光经过先后透过偏振分光棱镜、法拉第旋光器与偏振分光棱镜,共损耗约 10 dB。光纤中器件的损耗包含波分复用器或者光纤的损耗,共约 1.5~3.0 dB。

### 3.3 适用范围分析

本文主要使用偏振分光棱镜与法拉第旋光器作为分光器件。法拉第旋光器在外型尺寸方面具有严格的限制,工作在 400~1100 nm(不包含 470~500 nm)波段的法拉第旋光器主要使用铽石榴石晶体材料,直径为 53 mm,分光束结构口径取决于偏振分光棱镜与实际需求,最大实用偏振分光棱镜口径为 50 mm,因此分束结构有效口径至少可以达到 50 mm,在望远系统放大率为 10 倍时,望远系统口径可达到 500 mm,可满足大部分应用需求;适用于大于 1100 nm 波段的法拉第旋光器主要使用钇铁石榴石晶体材料,由于其饱和磁场仅为几百高斯,所制得的器件尺寸仅为 4.0 mm $\times$ 5.0 mm<sup>[10]</sup>,则此时分束结构有效口径仅能做到 5 mm,需要在通信光路前加入二级扩束系统,在系统整体扩束为 30 倍时(大于 30 倍时将使结构设

计变得复杂),望远系统口径可达到 150 mm,可满足近距高速卫星通信以及大气内短距离空间激光通信需求。

## 4 结束语

本文采用偏振分光棱镜、法拉第旋光器等元件设计的分光束结构可实现发射光与接收光的分离,分析其可发射光与接收光间隔隔离度、接收光与接收光间的隔离度以及光学损耗指标均满足高速率通信系统要求。同时,该分光束结构在 400~1100 nm(不包含 470~500 nm)工作波段可满足大部分通信应用需求,在大于 1100 nm 工作波段可满足近距高速卫星通信以及大气内短距离空间激光通信需求。

## 参考文献:

- [1] HEMMATI H. Overview of Laser Communications Research at JPL[C]// Photonics West 2001-LASE, August 3-4, 2001, San Jose, United States. Bellingham: SPIE, 2001:190-193.
- [2] CHEN C C. Overview of the Optical Communications Demonstrator[C]// OE/LASE '94, August 16-17, 1994, Los Angeles, United States. Bellingham: SPIE, 1994: 85-94.
- [3] OPPENHUSER G, WITTING M. The European SILEX Project: Concept, Performance Status and Planning [C]//OE/LASE '90, July 1-2, 1990. Los Angeles, United States. Bellingham: SPIE, 1990: 27-37.
- [4] LAURENT B, DUCHMANN O. The SILEX Project: The First European Optical Intersatellite Link Experiment[C]//Optics, Electro-Optics, and Laser Applications in Science and Engineering, Los Angeles, June 1-2, 1991, United States. Bellingham: SPIE, 1991: 2-12.
- [5] KOREVAAR E, HOFMEISTER R J, SCHUSTER J, et al. Design of Satellite Terminal for Ballistic Missile Defense Organization (BMDO) Lasercom Technology Demonstration [C]//Photonics West '95, April 20-21, 1995, San Jose, United States. Bellingham: SPIE, 1995: 60-71.
- [6] KOREVAAR E, SCHUSTER J, HAKAKHA H, et al. Design of Ground Terminal for STRV-2 Satellite-to-Ground Laser Experiment[C]//Optoelectronics and High-Power Lasers and Application, May 27-28, 1998, San Jose, United States. Bellingham: SPIE, 1998: 153-164.
- [7] 佟首峰,姜会林,张立中. 高速率空间激光通信系统及其应用[J]. 红外与激光工程, 39(4):649-654.
- [8] 王冬寒. 结构紧凑型三端口环行器的设计与实现 [D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [9] TOYOSHIMA M, TAKENAKA H, SHOJI Y, et al. Polarization measurements through space-to-ground atmospheric propagation paths by using a highly polarized laser source in space [J]. Optics Express, 2009, 17(25): 22333-22340.
- [10] 纪荣进,方才翔,曾燕伟. 离子掺杂钇铁石榴石磁光材料研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(9):60-64.