

# 中国激光

## 空间目标多维度探测与激光通信一体化技术研究

徐森<sup>1,2</sup>, 史浩东<sup>1,2</sup>, 王超<sup>1,2</sup>, 刘壮<sup>1,2</sup>, 付强<sup>1,2</sup>, 李英超<sup>1,2</sup>, 董科研<sup>1,2</sup>, 姜会林<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

<sup>2</sup>吉林省空间光电技术重点实验室, 吉林 长春 130022

**摘要** 空间目标的探测、识别、预警、拦截以及相关海量信息的快速安全传输是目前重要和紧迫的研究方向。结合偏振、光谱等光学技术的多维度探测可并行获取目标形状、材质、位置等信息,从而有效增加空间目标信息维度和提升准确度;同时借助空间激光通信,将以上海量信息快速安全地传输给在轨卫星和管理部门等,可为目标进一步的处置及时提供决策依据。首先梳理空间目标探测与激光通信的国内外发展现状,分析主要难点,总结相关技术的原理、特点与应用;然后介绍本团队近年来在空间目标多维度(偏振、光谱、强度)探测和激光通信方面的研究进展,包括复杂背景下全偏振成像、高光谱全偏振成像和面阵光谱偏振成像、超分辨成像、激光测距、一对多同时激光通信等;提出空间目标多维度探测与激光通信一体化的系统设计思想和具体实施方案;最后对今后空间目标测通一体化发展方向提出一些建议。

**关键词** 光通信;空间目标;激光通信;多维度;一体化

**中图分类号** O439

**文献标志码** A

**doi:** 10.3788/CJL202148.1206002

### 1 引言

人类需要观测的目标多种多样,包括卫星、空间碎片、弹道导弹、高超飞行器太空目标,飞机、飞艇、低空小型慢速(低小慢)飞行器空中目标,海面船舶、地面车辆等地、海面目标。其中空间碎片的数量众多,在过去 20 年,平均每年发生 12 次空间碎片与太空工作载荷的碰撞<sup>[1]</sup>;另外,外国舰船、飞机频繁入侵我国海空领域,低小慢飞行器也多次窥探我国重要场所活动,导弹更是严重威胁我国领土安全,均需密切跟踪监视。因此,及时发现、识别、预警、拦截甚至打击这些目标是当前重要和紧迫的研究课题。

在空间目标探测方面,美国空间目标探测系统规模最大、水平最高;俄罗斯次之;欧洲起步较晚,但近年来发展迅猛。美国正试图构建天地一体化的空间目标探测与识别系统,包括地基雷达、地基光学监测站;低轨天基空间探测系统-1(SBSS-1)卫星、作战响应空间-5(ORS-5)卫星;地球同步轨道空间态势感知计划(GSSP)星座等<sup>[2]</sup>。累计编目 2.3 万多个目标。

俄罗斯采用天地一体、军民共用的思路,天基空间目标由导弹预警卫星监视,累计编目 1.1 万多个目标。我国起步较晚,主要开展地基观测,近年已进行天基观测实验,相继建设了无线电、光电望远镜、相控阵雷达、精密跟踪雷达等设备,初步形成了光电观测、雷达监测、无线电侦测等多种探测手段。

在多维度探测方面,国外开展了多种光谱偏振成像体制研究,提出了多块高级次波片计算层析型(CTIS)<sup>[3]</sup>、偏振光栅型、声光可调滤光器型(AOTF)<sup>[4]</sup>、傅里叶变换型<sup>[5]</sup>、微纳偏振滤光器件型等多种光谱偏振机制,探测能力不断提高。国内学者也研制了液晶型、声光可调型、多波段滤光型等多种机制的光谱偏振仪器。

在成像探测通信一体化方面,美国研制了 X2000 飞行终端,该终端可以实现双向通信、双向激光测距和高分辨率成像等功能。美国还提出了一种激光通信和空间成像一体化(ACLAIM)方案,激光通信天线和空间相机共用一个前置望远镜,以探测器阵列作为捕获跟踪系统,并同时作为成像接收器。

**收稿日期:** 2021-02-24; **修回日期:** 2021-04-05; **录用日期:** 2021-05-17

**基金项目:** 国家自然科学基金(61805028,61805027,61890960,61890963)、装发 2020 第二批快速扶持项目(61404140517)、中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(HCKF-201912GX01)

\*E-mail: HLJiang@cust.edu.cn

国内,长春理工大学提出了一种对空间碎片进行探测与信息传输的新方案,将激光测距、光谱偏振成像、激光通信三种功能融为一体<sup>[6]</sup>。

空间目标探测的主要难点包括:目标运动速度快,导致目标位置持续变化,图像稳定性和强度均衡性差;目标尺寸小,导致目标空间分辨率低,图像识别与提取技术要求高;目标暗弱,导致探测光能量不足,图像信噪比和对比度不够;距离太远,导致探测目标图像过小,系统接收能量不足;背景复杂,导致目标难以识别与提取,且图像对比度较差。

针对空间目标探测的迫切性和主要难点,必须突破以往单一维度探测的局限性,获取多维度信息,以增加探测识别概率,因此开展了多维度探测技术研究;同时要突破探测与通信分离的现状,把探测结果快速传输给空间飞行器等;为了同时与多目标进

行通信,还要突破现有激光通信只是点对点的局限性,开展一对多同时激光通信研究,以便为国家空间安全提供技术支撑。

## 2 多维度探测技术

偏振探测技术具有凸显目标、穿透烟雾、识别真伪<sup>[7]</sup>等突出优势;光谱探测技术具有分辨目标材质种类等物理特性的优势;强度探测技术光能利用率高、分辨率高。但是三者也有各自的弱点,如强度探测获取的目标信息单一,光谱探测易受环境干扰,偏振探测导致接收能量损失,成像分辨率下降<sup>[8]</sup>。几种探测技术的优缺点对比如表 1 所示。为此,将三个维度探测手段结合起来,发挥各自特点和优势,不仅能够克服空间目标探测难点,而且可以大幅度提升探测总体性能。

表 1 几种探测技术的优势对比

Table 1 Comparison of advantages of several detection technologies

Detection technique	Highlight objectives	Penetration through smoke	Distinguish true from false	Detection range
Visible light intensity imaging	Strong	Weak	Weak	Strong
Infrared intensity imaging	Strong	Stronger	Weak	Stronger
Spectral imaging	Stronger	Weak	Stronger	Normal
Polarization imaging	Stronger	Strong	Stronger	Normal
Multidimensional imaging	Stronger	Stronger	Stronger	Stronger

### 2.1 技术内涵和总体进展

偏振探测技术包括线偏振探测和圆偏振探测,二者相结合对凸显目标、穿透烟雾、识别真伪具有很大帮助。光谱探测运用多光谱或高光谱、超光谱等多通道传感器对同一目标获取多个细分光谱波段范围内的图像(空间目标探测主要应用于可见、近红外、长波红外波段)。强度探测则是指非偏振光在全光谱范围内进行的探测。

偏振光谱成像(SPI)是一种新兴的传感方法<sup>[9-11]</sup>,同时对场景光谱和偏振信息进行获取,可以应用于测量、反射特性估计、漫反射/镜面反射成分

分离、材料分类等方面。偏振光谱相机通常分为两大类:扫描式和快照式<sup>[12]</sup>。扫描式相机由于分时成像,不适用于快速移动的空间目标探测。快照式相机<sup>[13]</sup>包括分振幅和分焦平面两种,通过单次成像,同时获得偏振信息和光谱信息<sup>[14]</sup>。

针对地面目标,2013 年长春理工大学联合西安交通大学等单位<sup>[15-17]</sup>开展了地面复杂背景下关于全偏振成像探测基础问题的研究,成功研制了同时与分时偏振成像探测原理样机,开展了大量外场测试实验,如图 1 所示。获得的偏振图像的对比度比强度图像提高 35% 以上,实验结果如图 2 所示。

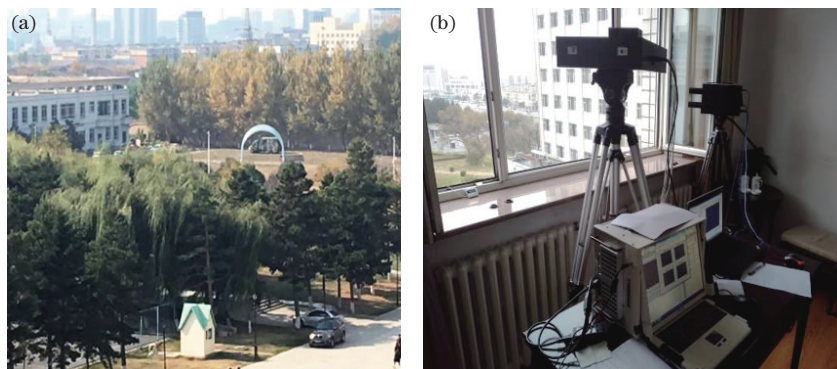


图 1 全偏振成像探测。(a)实验场景;(b)原理样机

Fig. 1 Full polarization imaging detection. (a) Test scenario; (b) principle prototype

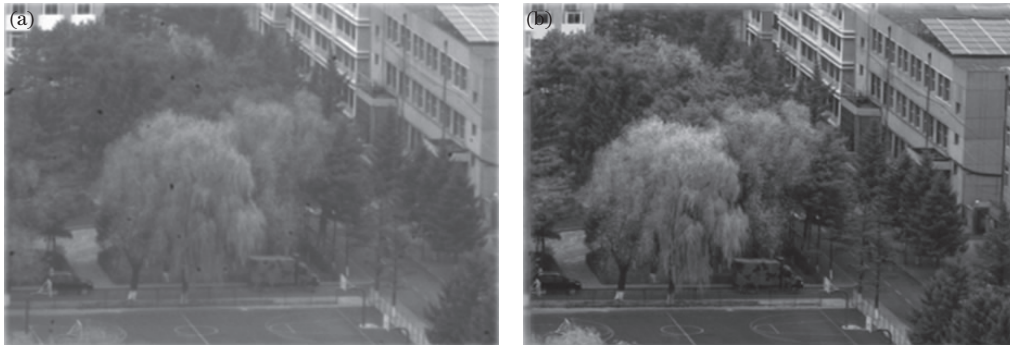


图 2 偏振成像实验结果。(a)可见光强度图像;(b)偏振图像

Fig. 2 Polarization imaging test result. (a) Visible light intensity image; (b) polarization image

此外,针对海面目标,2019 年长春理工大学联合自然资源部第一海洋所等单位<sup>[18]</sup>提出一种适用于海面目标监测的机载平台的“光谱+偏振+红外”多维度高分辨光学成像机制,并初步设计了原理样机方案,实现了全偏振、高光谱、宽谱段信息的同时获取,解决了溢油、赤潮、尾迹等典型海洋目标在海雾、耀斑、复杂光照等干扰下存在的“认不清”、“辨不出”、“看不远”三大难题。同年,于青岛开展多维度油种区分实验,初步验证多维度探测手段对于不同油种的区分能力,实验结果如图 3 所示。可见光偏振探测器型号为索尼 IMX250,分辨率为 2448(H)×2048(V),像元尺寸为 3.45 μm×3.45 μm,帧频为 79.1 frame/s。图 4 为 5 种溢油在不同观测角的偏振度,可知在 0°方位,观测角为-30°和 40°时,5 种溢油的偏振度有明显不同,可利用偏振图像区分油种。

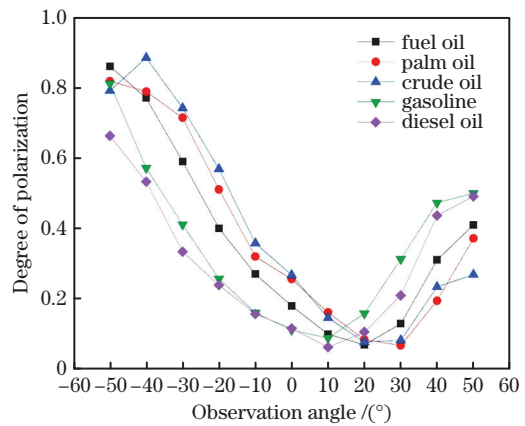


图 4 五种溢油在不同观测角的偏振度

Fig. 4 Degree of polarizations of five kinds of oils at different observation angles

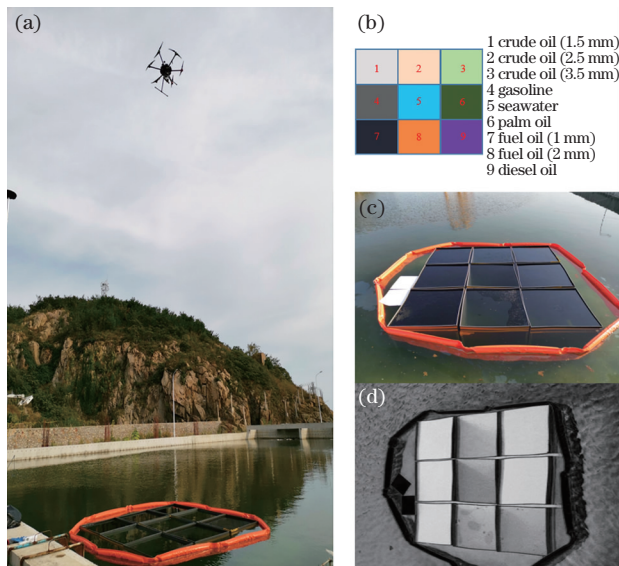


图 3 多维度油种区分实验现场及结果。(a)实验现场;(b)油种位置;(c)可见光图像;(d)偏振图像

Fig. 3 Multidimensional oil classification test site and results. (a) Test site; (b) oil location; (c) visible light image; (d) polarization image

2020 年,Zhang 等<sup>[19]</sup>提出一种基于色散补偿萨伐尔板(DCSP)的宽带快照式偏振光谱成像系统,在通道调制型偏振成像(CMPI)系统中,DCSP 可以代替传统的萨伐尔板产生消色差条纹场,显著提高条纹的对比度,在 446 nm 到 578 nm 的光谱范围内,获得了宽带快照式全偏振光谱图像,系统结构如图 5 所示。

针对太空目标,长春理工大学还提出了天基面阵快速偏振光谱成像方案,系统组成如图 6 所示。其中大视场光学系统用于收集广阔区域的信息,并将光束聚焦;分光片采用能量分光方式,一部分能量分给偏振成像模块,一部分分给光谱成像模块;偏振成像模块和光谱成像模块分别采用分焦平面偏振探测器和面阵光谱探测器进行实时探测,其中偏振探测模块可同时获取 0°、45°、90°、135°线偏振方向信息,光谱成像模块同时获取 8 通道光谱图像。两个探测器获取的图像视场匹配,以便后续图像融合。

## 2.2 空间目标超分辨探测

空间目标探测距离远、目标尺寸小,增强光学系统分辨能力的主要手段在于增大光学入瞳,这将使



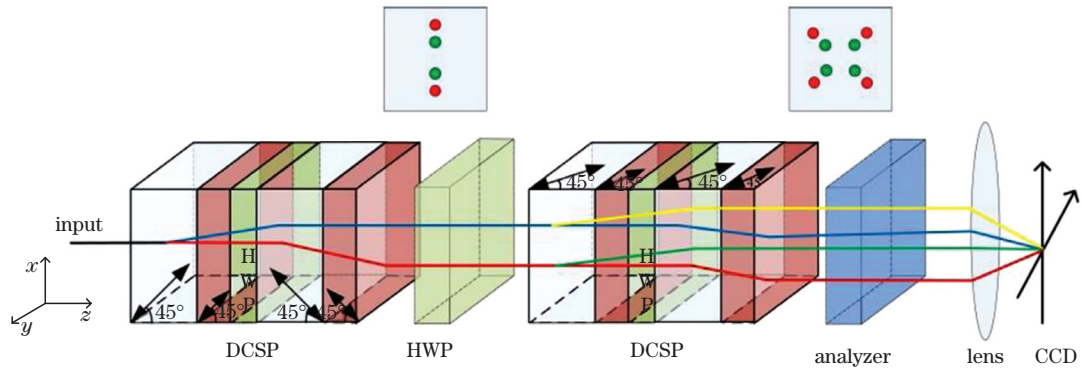


图 5 基于色散补偿萨伐尔板的通道调制型偏振成像结构图

Fig.5 Construction of the CMPI based on DCSP

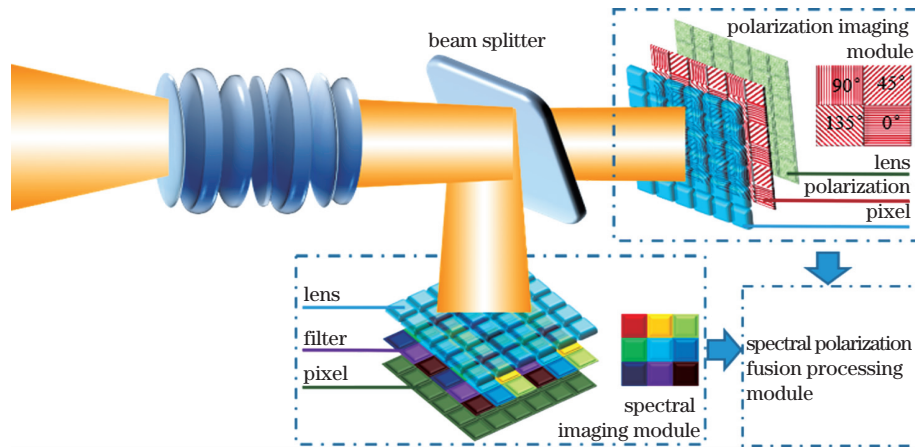


图 6 偏振光谱成像原理图

Fig.6 Schematic diagram of polarization spectrum imaging

得光学系统的体积呈平方倍率增加,因此人们希望找到在光学系统口径不变的前提下提高成像分辨率的新方法。光瞳滤波超分辨技术即为其中一项很有希望的技术,工作原理为:在光学系统光瞳处放置超分辨衍射元件(DSE),其具有很多同心环带,且每个环带具有不同的相位或透过率函数,使衍射斑的主瓣更细窄,从而提高光学系统的分辨率<sup>[20]</sup>。

2016年,Canales等<sup>[21]</sup>设计出一种以Strehl比率作为核心函数的二元相位滤波器。Zhao等<sup>[22]</sup>首次将基于变形镜的自适应光学应用到光瞳滤波器的

设计中。Liu等<sup>[23]</sup>将泽尼克理论引入到光瞳滤波器的设计中,并设计出泽尼克相位型光瞳滤波器,实现了1.32倍的超分辨成像性能。2017年,张巧鸽等<sup>[24]</sup>根据光波标量衍射理论,提出了一种在数字全息显微系统物光中加入幂级数光瞳滤波器或环形光瞳滤波器的成像新方法。2020年,Wang等<sup>[25]</sup>设计了大口径天基望远超分辨成像光学基底系统,在 $0.28^\circ$ 视场内,该系统的超分辨倍率为1.246~1.262,Strehl比率为0.300~0.307,旁瓣因子为0.087~0.094。其光瞳滤波器相位板环带分布如图7(a)所

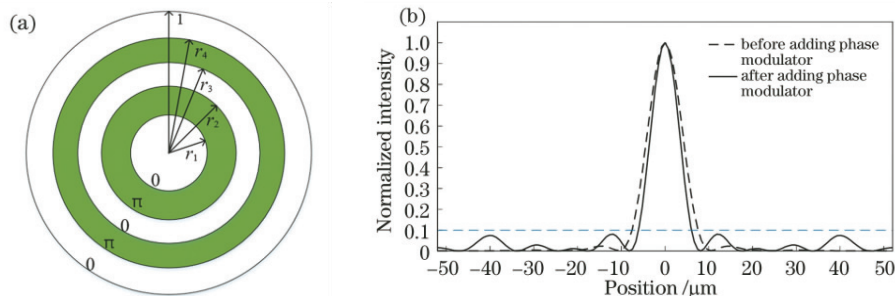


图 7 光瞳滤波器设计<sup>[25]</sup>。(a)相位板环带分布;(b)加入相位调制器前后 PSF 的对比

Fig.7 Design of pupil filter<sup>[25]</sup>. (a) Distribution of phase plate annular zone; (b) comparison of PSF before and after adding phase modulator

示,加入相位板前后点扩展函数(PSF)的对比如图 7 (b)所示,加入相位板前后各视场成像效果如图 8 所

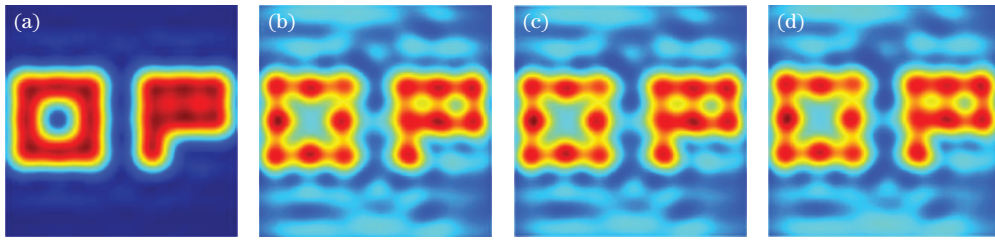


图 8 加入调制元件前后各视场成像效果<sup>[25]</sup>。(a) 无调制;(b)  $0^\circ$ ;(c)  $0.16^\circ$ ;(d)  $0.28^\circ$

Fig. 8 Imaging effects of each field of view before and after adding modulation element<sup>[25]</sup>.

(a) Free-modulation; (b)  $0^\circ$ ; (c)  $0.16^\circ$ ; (d)  $0.28^\circ$

### 2.3 空间目标激光测距

激光测距技术作为空间目标距离测量的主要手段之一,在空间碎片测量与监测领域发挥着重要作用<sup>[26]</sup>。由于空间碎片表面粗糙,激光发生漫反射,回波信号弱,增大了测量难度,目前地基探测方式已经基本突破了以上技术难点,实现了常规化探测<sup>[27]</sup>。相对于地基探测,天基探测设备具有不受地域、大气影响等特点,不仅能在轨机动运行,而且还可探测深空目标<sup>[28]</sup>。随着测距通信一体化技术的发展<sup>[29]</sup>,天基激光测距技术已经成为空间碎片测距技术未来的重要发展方向。

天基激光测距技术与地基激光测距技术的主要区别在于:卫星平台位置与角度不稳定,因此需要加入北斗与惯导系统;同时空间碎片回波能量较弱,发射激光束散角比较小,需要精度更高的跟踪单元。在跟踪系统中,反射镜组的面型精度要求很高,低频振动及喷流噪声等力学工况对反射镜组件的动态刚度也有较高的要求。2020年,柳鸣等<sup>[30]</sup>对激光通信与测距体化星间链路载荷小型单反射镜组件进行结构设计及力热稳定性研究,设计了一种底面双层圆弧形槽口柔性支撑结构,如图 9 所示,获得较为理想的支撑刚度和面型精度。

针对地基激光测距系统测量高轨空间碎片时测



图 9 反射镜组件实物<sup>[30]</sup>

Fig. 9 Reflector components<sup>[30]</sup>

示,可以看到加入相位板前后,在较大视场内分辨率得到了提高,超分辨率倍率约 1.25 倍。

距站点分布距离受限、激光能量受大气衰减的问题,孙威等<sup>[31]</sup>设计了一种高精度空间碎片激光测距卫星星座,如图 10 所示。采用分布式三星星座设计,部署于地球静止轨道,呈等边三角形构型,两两间距约 73030 km,星下点经度间隔  $120^\circ$ 。分析结果表明,碎片的方位误差可从千米级提高至米级,提升约 3 个数量级。结合星座本身的定位误差,空间碎片的综合位置误差可从千米级提高至十米级,提升约 2 个数量级。高轨空间碎片激光测距星座有助于提升空间碎片定位精度,具有重要的工程应用前景。

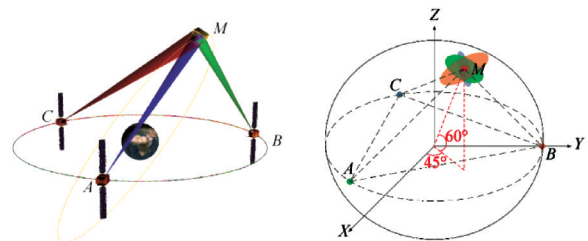


图 10 高轨空间碎片与激光测距卫星星座几何构型及在 XYZ 坐标系下的位置关系<sup>[31]</sup>

Fig. 10 Geometric configuration of high-orbit space debris and the laser ranging constellation as well as the position relationship in the XYZ coordinate system<sup>[31]</sup>

由于空间目标表面粗糙,激光发生漫反射,回波信号弱,又由于目标在高速运动,增大了测量难度。2018年,长春理工大学提出一种动对动激光指向预判方法,该方法基于光学测角系统提供引导信息,以先验轨道信息和实测数据修正光行差,根据视运动方程与光行差,实现动对动条件下测距激光的高精度指向,流程如图 11 所示。

在此基础上,刘壮等<sup>[32]</sup>提出了天基空间目标动对动激光测距光学系统方案,如图 12 所示,该系统具有体积小、重量轻的优势,采用高速高灵敏相机与二维振镜器件,通过精跟踪技术解决动对动激光测距指向、对准难题,实现天基空间目标激光测距精度优于 2 m。

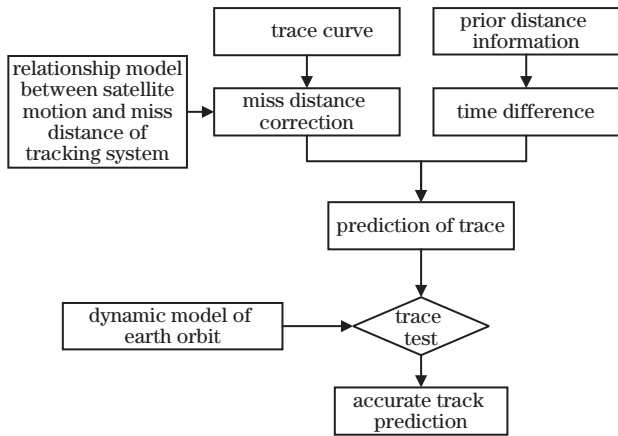


图 11 动对动激光指向预判方法流程

Fig.11 Flowchart of moving to moving laser pointing prediction method

### 3 一对多实时动态激光通信技术

#### 3.1 空间激光通信发展趋势

随着全球化和信息技术的发展,空间激光通信技术逐渐从点对点模式向中继转发和构建激光网络的方向发展<sup>[33]</sup>。国内外规划了多个基于激光通信链路的空信息网络,欧洲提出了欧洲数据中继系统(EDRS),被称为“空间数据高速公路”。2016年1月发射第一颗中继卫星EDRS-A,2020年8月6日发射第二颗卫星EDRS-C<sup>[34]</sup>,它们帮助地球观测卫星并实时地向欧洲传输大量数据,传输速率达到1.8 Gbit/s。2019年,美国计划实施激光中继演示验证(LCRD),进行高轨对地面的激光通信,采用差

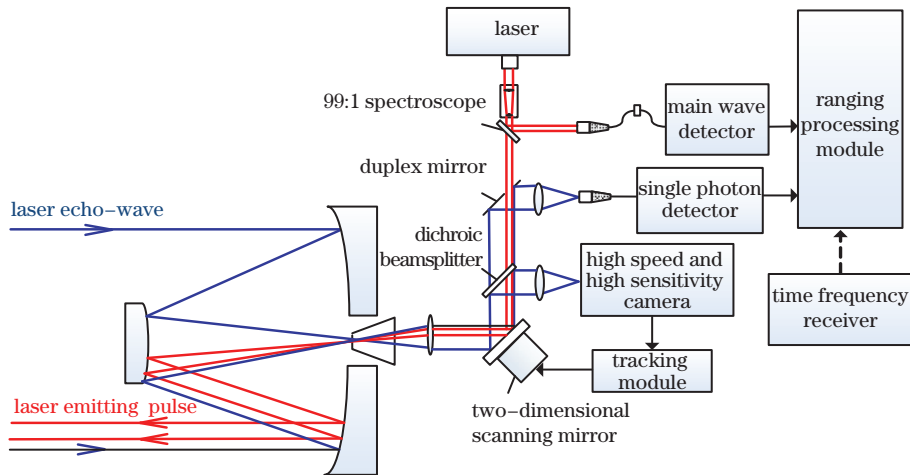


图 12 天基空间目标激光测距光学系统

Fig.12 Space-based optical system for laser ranging of space targets

分相移键控(DPSK)通信制式,通信速率为2.88 Gbit/s。2020年9月美国太空探索技术公司SpaceX已经成功在轨道上测试了星链卫星的激光通信能力,其中两颗在轨卫星通过太空激光系统传输了数百GB的数据。截止2021年1月,星链计划已经发射超过1000颗卫星。空间激光通信技术以通信速率高、抗干扰和抗截获能力强、保密性好、光端机轻小等突出优点,成为各国战略布局和竞争的焦点。

近年来,空间激光通信呈现出5大发展趋势<sup>[35]</sup>。

1) 高速率:为了满足海量数据实时传输需求,高速率已成为空间激光通信技术研究的一个主要目标。实验验证的激光通信速率从最初的几kbit/s、几Mbit/s,发展到如今的5 Gbit/s、10 Gbit/s、40 Gbit/s,实验室研究和实验的速率达到100 Gbit/s<sup>[36-37]</sup>以至Tbit/s,未来将向更高速率发展。

2) 网络化:为了满足中继和组网应用需求,网络化是空间激光通信技术未来发展的必然趋势。需要构建的主要网络包括天基、空基、天地、地海激光通信网络等。

3) 多功能:空间激光通信目前已经用于星间、星空、空空、空地等多种链路中,并逐渐向深空和 underwater 通信方向扩展。

4) 一体化:为增加系统的功能同时减小载荷的体积、质量和功耗,将信息快速实时传输,激光通信载荷正在向一体化的方向发展。

5) 多谱段:为了发挥不同谱段通信系统的优势,未来空间激光通信将向紫外、可见光、红外、太赫兹等多谱段相结合的方向发展。

#### 3.2 一对多同时激光通信光学原理与方案

2015年,姜会林等<sup>[38]</sup>提出以旋转抛物面为基底的光学天线一对多同时通信原理,原理如图13所示。当同时通信目标为2个以上时,则在原系统基



基础上加入旋转抛物面光学天线<sup>[39]</sup>,并对跟踪与通信收发分系统进行相应的改进;进一步提出了“一线变

一面,一面变多面”这一提高光能利用率的原理与技术途径。

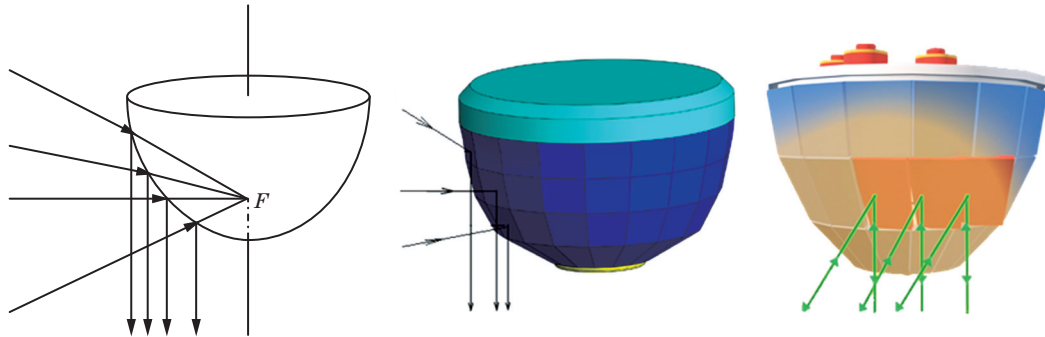


图 13 旋转抛物面原理

Fig. 13 Schematic of rotating paraboloid-based surface

一对多光端机光学部分由光学天线分系统、中继光学分系统、收发分光分系统组成。以旋转抛物面为基底的多反射镜拼接作为光学天线基本结构,每个反射镜单独可控,也可联动控制。入射光经光学天线反射镜反射,沿主轴平行入射到中继光学分系统,口径缩小后再进入到收发分光分系统,完成粗、精跟踪和通信。总体方案如图 14 所示。

朗联合进行了面向空间平台的多节点间同时激光高速信息传输实验。首次实现了野外环境动平台条件下一对二激光组网通信,如图 15 所示,并验证了飞艇飞行高度 200 m,主光端机与从机间通信速率 2.5 Gbit/s、通信距离 2 km、通信误码率优于  $10^{-9}$  的性能指标。

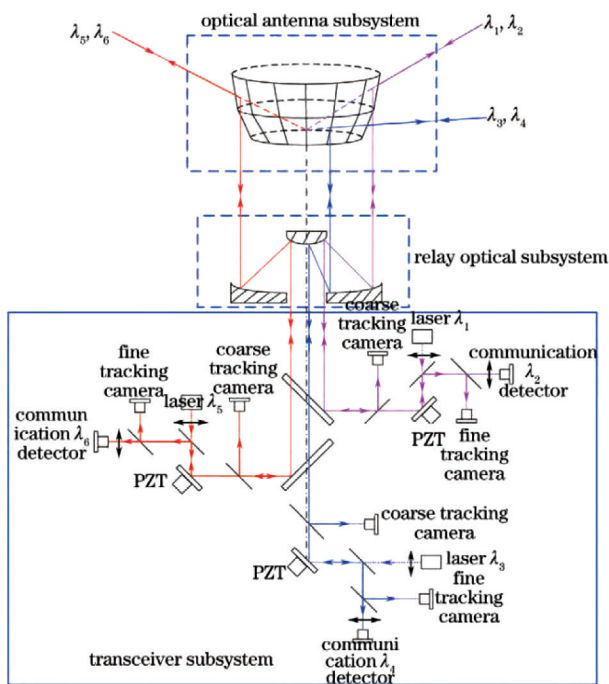


图 14 一对多点同时激光通信光学总体方案<sup>[38]</sup>

Fig. 14 Overall scheme of one-point to multi-point simultaneous space laser communication system<sup>[38]</sup>

### 3.3 一对多同时激光通信演示实验

长春理工大学基于以上方案制造了一对多同时激光通信系统,并于 2020 年 12 月 23 日至 2021 年 1 月 6 日,与北京市遥感信息研究所、中国科学院空天信息研究院、北京航空航天大学、武汉大学在西藏鲁

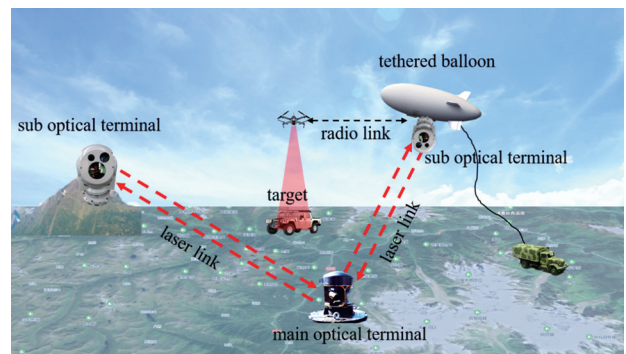


图 15 一对二同时激光通信野外实验示意图

Fig. 15 Field test diagram of one-point to two-point simultaneous space laser communication

## 4 多维度探测与激光通信一体化技术

### 4.1 技术需求分析

为增加系统的功能同时减小载荷的体积、质量和功耗,星上载荷正在向多功能、一体化的方向发展。姜会林等<sup>[6]</sup>提出了一种对空间目标进行探测与信息传输的新方案,将激光测距、光谱偏振成像、超分辨成像、激光通信四种功能融为一体,并进行了系统设计和研制。

空间目标多维度探测与激光通信一体化技术实现了碎片信息“测得准、辨得清、传得出”,确保航天器安全,兼顾编目与清除的功能。基于此功能提出了本方案的设计原则:搭载平台立足天基,同时天地结合;技术途径利用多维,同时光电结

合;信息传输强调快捷,实现多点传输;系统结构注重集成,实现小型化。总体功能简述为“探二通三”,其中“探二”是指探测空间目标距离轨道与多维图像;“通三”指将获取的目标信息传输给在

轨航天器,用于碰撞预警与规避,传输给空间目标监视平台,用于空间目标编目管理,传输给管理指挥部门,用于对目标进行清除或移除判断。总体功能如图 16 所示。

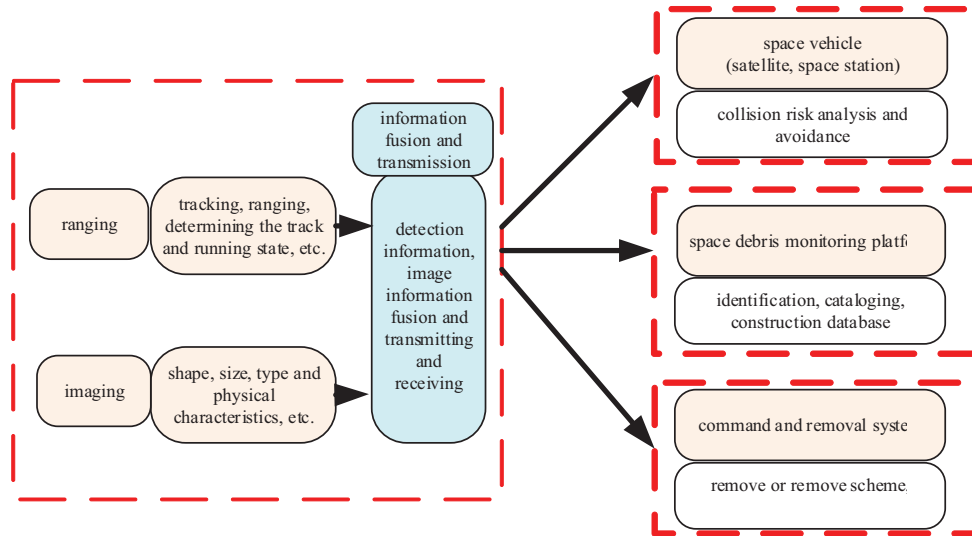


图 16 总体功能图<sup>[40]</sup>

Fig.16 General function diagram<sup>[40]</sup>

#### 4.2 解决方案

为实现上述功能,提出了一体化系统方案。系统组成如图 17 所示,由总控单元、普查分系统、多维度探测分系统(卡式光学天线、激光测距单

元、多维成像单元、超分辨率成像单元、信息处理单元)、信息传输分系统、跟踪转台分系统(探测跟踪转台、通信跟踪转台)和电控辅助分系统 6 部分组成。

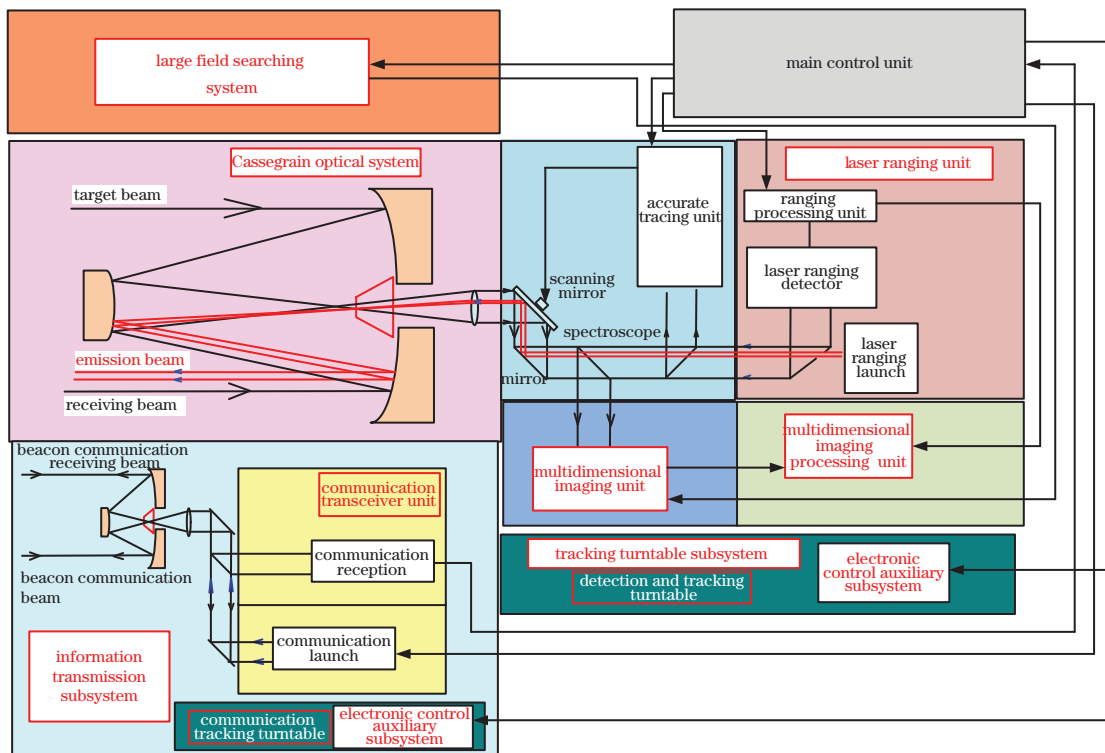


图 17 天基空间目标监测系统组成

Fig.17 Composition of space-based debris monitoring system



首先,通过普查分系统探测目标的初始轨道和位置信息,确定被探测目标的空间范围,控制跟踪转台使监测系统指向目标,实现目标粗跟踪;然后,通过卡式望远光学天线模块收集目标信息,利用精跟踪相机对目标进行高频成像,同时控制振镜,保证目标持续位于视场中心,实现稳定的精跟踪;在精跟踪成像基础上,利用多维度探测分系统分别对目标进行光谱探测和偏振成像,同时获取目标形状、尺寸、

材质等信息;对目标发射测距激光脉冲信号,通过望远天线模块接收目标反射的激光测距回波信号,根据时间差解算目标距离信息,完成激光测距;将获取的目标位置信息、距离信息及多维度图像信息输入至信息处理分系统进行融合、处理;最后,通信(精跟踪)收发分系统完成目标信息传输,将获取的目标轨道信息、图像信息、属性信息等传输给在轨飞行器、监视平台和管理部门。工作流程如图 18 所示。

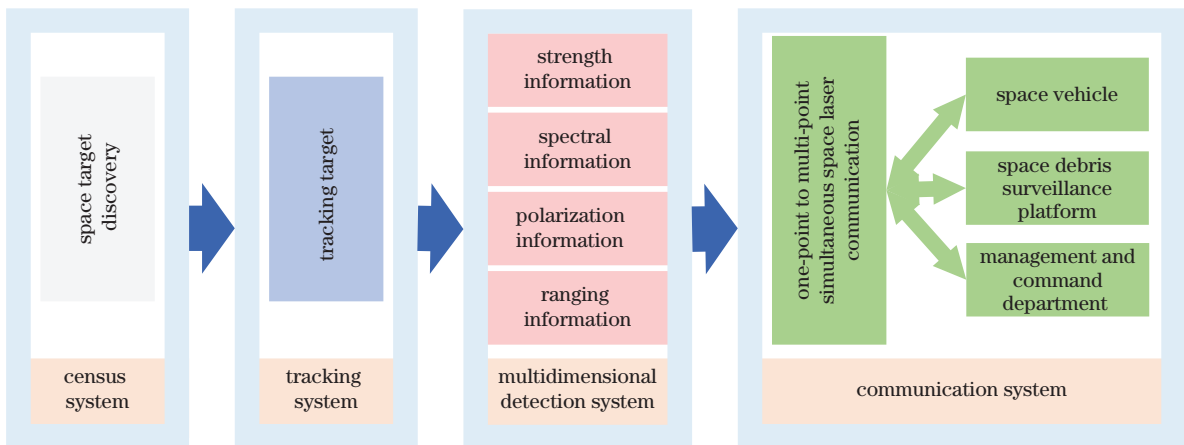


图 18 系统工作流程

Fig. 18 System work flowchart

### 4.3 实现指标

通过调研现有地基系统和在轨卫星能力,本方案实现指标如下。

1) 目标探测方面,本方案利用普查探测单元,能够实现 13 等星目标的探测;

2) 激光测距指标方面,目前星载激光测距还未在轨应用,本方案深入研究动对动激光测距误差理论和修正模型,地基理论测距精度可以达到 2 m;

3) 成像方面,本方案提出天基多维度空间目标成像识别方案,该方案可同时获取目标偏振、光谱、强度等多维信息,并研究突破远场超衍射分辨成像技术,既可提高目标对比度和分辨率,又可识别目标的属性;

4) 信息传输方面,本方案提出一对多同时高速激光通信方案,突破激光点对点通信限制,可为后卫星编队、信息实时共享提供技术基础,另外,通信速率达到 Gbit/s 量级,比目前在轨运行激光通信速率(几百 Mbit/s)更高。

根据以上方案,正在研制光学口径为 250 mm 的空间目标多维度探测与激光通信一体化原理样机,外观如图 19 所示。该样机目前处于指标测试阶段。

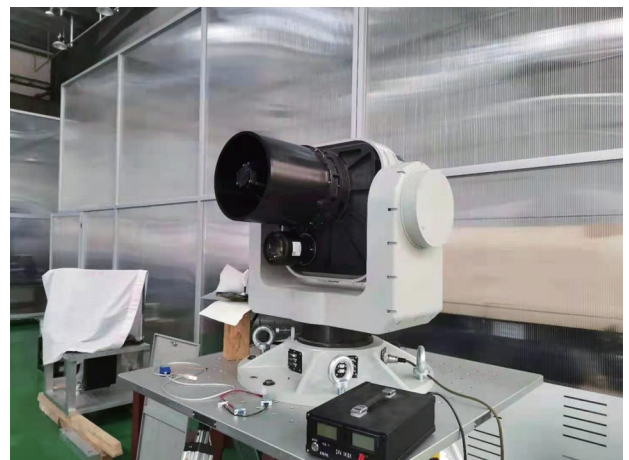


图 19 探测与成像一体化原理样机

Fig. 19 Principle prototype of integration of detection and imaging

## 5 结 论

介绍了空间目标多维度探测与激光通信一体化相关技术的国内外研究现状,总结了相关技术的原理、特点与应用。给出了本团队在相关方面的初步研究成果:在空间目标多维度探测方面,开展了探测机理研究,设计了大口径大视场天基望远超分辨成像光学系统,研制了复杂目标下同时与分时偏振成像探测原理样机,并开展了地面和海面实验;在空间

激光通信方面,在国内外首次提出一对多激光通信光学原理,研制出原理样机并率先开展了演示实验;在探测与通信一体化方面,阐述了一体化对空间安全的迫切需求,并给出了系统设计思想和具体实施方案。

空间目标探测技术正在快速发展中,空间目标监测系统向更小尺寸发展,系统分辨率要求更加精细;光学探测手段由单一模式向多功能集成趋势发展,多维度多源信息获取与处理能力要求不断提升;探测平台由天地独立探测向天地联合、优势互补方向发展;目标探测信息实时应用要求越来越迫切,探测与通信一体化势在必行。

我国应进一步开展深入研究,如用于空间遥感的超高分辨成像、全偏振和高光谱多维度探测、天基地基联合光学探测、多对多空间激光通信及天地一体化激光与微波混合组网等前沿技术,以彻底解决我国低轨目标看不全、高轨目标看不清、动态目标响应慢、空间目标编目少等难题,为我国空间安全提供技术保障。

### 参 考 文 献

- [1] European Space Agency. ESA's annual space environment report[R]. Paris: ESA, 2020.
- [2] Wang X Y. Development status research of foreign space target detection and identification systems[J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(3): 86-94.  
王雪瑶. 国外空间目标探测与识别系统发展现状研究[J]. 航天器工程, 2018, 27(3): 86-94.
- [3] Todorov T, Nikolova L, Stoilov G, et al. Spectral stokesmeter. 1. implementation of the device [J]. Applied Optics, 2007, 46(27): 6662-6668.
- [4] Gupta N. Development of spectropolarimetric imagers from 400 to 1700 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9099: 90990N.
- [5] Li J, Zhu J, Wu H. Compact static Fourier transform imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry[J]. Optics Letters, 2010, 35(22): 3784-3786.
- [6] Jiang H L, Fu Q, Zhang Y L, et al. Discussion of the laser ranging with polarization spectral imaging observations and communication technology for space debris[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(4): 0401001.  
姜会林, 付强, 张雅琳, 等. 空间碎片激光探测成像通信一体化技术探讨[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0401001.
- [7] Zhang S, Zhan J T, Fu Q, et al. Simulation research on sky polarization characteristics under complicated marine environment [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2201001.  
张肃, 战俊彤, 付强, 等. 复杂海洋环境下天空光偏振特性模拟研究[J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2201001.
- [8] He L Q, Duan J, Zhang S, et al. Simulation of polarization transmission characteristics of laser in sea fog environment [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(3): 0329001.  
赫立群, 段锦, 张肃, 等. 激光在海雾环境中偏振传输特性仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(3): 0329001.
- [9] Kulkarni M, Gruev V. Integrated spectral-polarization imaging sensor with aluminum nanowire polarization filters [J]. Optics Express, 2012, 20(21): 22997-23012.
- [10] Tu X Z, Spires O J, Tian X B, et al. Division of amplitude RGB full-Stokes camera using micropolarizer arrays [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 33160-33175.
- [11] Zhang C M, Quan N C, Mu T K. Stokes imaging spectropolarimeter based on channeled polarimetry with full-resolution spectra and aliasing reduction [J]. Applied Optics, 2018, 57(21): 6128-6134.
- [12] Sattar S, Lapray P J, Foulonneau A, et al. Review of spectral and polarization imaging systems [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11351: 113511Q.
- [13] Mu T, Pacheco S, Chen Z, et al. Snapshot linear-Stokes imaging spectropolarimeter using division-of-focal-plane polarimetry and integral field spectroscopy [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 42115.
- [14] Courtier G, Lapray P J, Thomas J B, et al. Correlations in joint spectral and polarization imaging [J]. Sensors, 2020, 21(1): 6.
- [15] Li S J, Jiang H L, Zhu J P, et al. Development status and key technologies of polarization imaging detection [J]. Chinese Optics, 2013, 6(6): 803-809.  
李淑军, 姜会林, 朱京平, 等. 偏振成像探测技术发展现状及关键技术 [J]. 中国光学, 2013, 6(6): 803-809.
- [16] Li J, Zhu J P, Zhang Y Y, et al. Spectral zooming birefringent imaging spectrometer [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 024205.  
李杰, 朱京平, 张云尧, 等. 光谱分辨率可调的新型干涉成像光谱技术研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(2): 024205.
- [17] Zhang N, Zhu J P, Zong K, et al. Imaging spectral bandwidth criterion equation of channeled modulated polarization imaging system [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 074210.  
张宁, 朱京平, 宗康, 等. 通道调制型偏振成像系统

- 的波段宽度限制判据[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 074210.
- [18] Duan Y, Research on real-time imaging system of spectral polarization for airborne marine environment monitoring[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019.  
段云. 机载海洋环境监测光谱偏振实时成像系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
- [19] Zhang N, Zhu J, Zhang Y, et al. Broadband snapshot polarimetric imaging based on dispersion-compensated Savart plates [J]. Optics Communications, 2020, 457: 124607-124607.
- [20] Sales T R M, Morris G M. Diffractive superresolution elements[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(7): 1637-1646.
- [21] Canales V F, Valle P J, Cagigal A M P. Analysis of Strehl ratio limit with superresolution binary phase filters[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 071101.
- [22] Zhao L N, Dai Y, Zhao J L, et al. Programmable super-resolution pupil phase filter with a deformable mirror[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(9): 091201.
- [23] Liu J, Miao E L, Sui Y X, et al. Phase only pupil filter design using zernike polynomials[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2016, 20(1): 101-106.
- [24] Zhang Q G, Li C G, Lou Y L, et al. Amplitude optical pupil filters with power function distribution [J]. Laser Technology, 2017, 41(5): 743-748.  
张巧鸽, 李重光, 楼宇丽, 等. 幂函数分布的振幅型光瞳滤波器[J]. 激光技术, 2017, 41(5): 743-748.
- [25] Wang C, Shi H D, Li Y C, et al. Design of super-resolution telescopic imaging optical system with relative large field-of-view [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1322002.  
王超, 史浩东, 李英超, 等. 较大视场超分辨望远成像光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1322002.
- [26] Tang R F, Zhai D S, Zhang H T, et al. Research progress in space debris laser ranging [J]. Space Debris Research, 2020, 20(4): 21-30.  
汤儒峰, 翟东升, 张海涛, 等. 空间碎片激光测距研究进展[J]. 空间碎片研究, 2020, 20(4): 21-30.
- [27] Zhang H F, Long M L, Deng H R, et al. Development and application for ground-based space debris laser ranging [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(11): 49-62.  
张海峰, 龙明亮, 邓华荣, 等. 地基空间碎片激光测距技术发展与应用[J]. 光子学报, 2020, 49(11): 49-62.
- [28] Wang W B, Wang T F, Guo J. Orbit determination for space target based on opto-electrical imaging, tracking and ranging on satellite [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(2): 528-539.  
王卫兵, 王挺峰, 郭劲. 基于星载光电成像跟踪测距的空间目标定轨[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 528-539.
- [29] Liu X N, Li Y F, Xiang C Y, et al. Study on integrated technique of laser ranging and communication and its applications in deep space[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2018, 5(2): 147-153, 167.  
刘向南, 李英飞, 向程勇, 等. 激光测距通信一体化技术研究及深空应用探索[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 147-153, 167.
- [30] Liu M, Li Z W, Li X, et al. Flexible design and thermal stability analysis of reflector assembly of space-based laser ranging load[J]. Chinese Journal of Space Science, 2020, 40(6): 1117-1124.  
柳鸣, 李振伟, 李响, 等. 天基激光测距载荷单反射镜组件柔性设计与力热稳定性分析[J]. 空间科学学报, 2020, 40(6): 1117-1124.
- [31] Sun W, Xue L, Huang C, et al. A high-precision satellite constellation for space debris laser ranging [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020, 41(5): 29-37.  
孙威, 薛莉, 黄晨, 等. 高精度空间碎片激光测距卫星星座[J]. 航天返回与遥感, 2020, 41(5): 29-37.
- [32] Liu Z, Wang C, Shi H D, et al. A space based laser measurement system for space target range optical system: CN111736163[P]. 2020-07-06.  
刘壮, 王超, 史浩东, 等. 一种天基空间目标激光测距光学系统: CN111736163[P]. 2020-07-06.
- [33] Wang T S, Lin P, Dong F, et al. Progress and prospect of space laser communication technology [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(3): 92-99.  
王天枢, 林鹏, 董芳, 等. 空间激光通信技术发展现状及展望[J]. 中国工程科学, 2020, 22(3): 92-99.
- [34] Calzolaio D, Curreli F, Duncan J, et al. EDRS-C -the second node of the European data relay system is in orbit[J]. Acta Astronautica, 2020, 177: 537-544.
- [35] Jiang H L, Fu Q, Zhao Y W, et al. Development status and trend of space information network and laser communication[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2019, 3(2): 1-8.  
姜会林, 付强, 赵义武, 等. 空间信息网络与激光通信发展现状及趋势[J]. 物联网学报, 2019, 3(2): 1-8.
- [36] Liu X Z, Wang T S, Lin P, et al. Up to 384 Gbit/s based on dense wavelength division multiplexing of 100-GHz channel spacing free space laser transmission performance in a simulated atmosphere channel with adjusted turbulence [J]. Optical



- Engineering, 2018, 57(10): 106109.
- [37] Liu X Z, Wang T S, Zhang X M, et al. 128 Gbit/s free-space laser transmission performance in a simulated atmosphere channel with adjusted turbulence [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10 (2): 1-10.
- [38] Jiang H L, Jiang L, Song Y S, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42 (4): 0405008.  
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): 0405008.
- [39] Li X M, Wang L M, Li X, et al. Optimization of integrated tilt-mirror for laser communication antenna [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106006.  
李小明, 王隆铭, 李响, 等. 激光通信天线一体化的摆镜面形优化 [J]. 中国激光, 2021, 48 (1): 0106006.
- [40] Fu Q, Shi H D, Wang C, et al. Research on new technology of photoelectric detection for space-based space debris [J]. Space Debris Research, 2020, 20 (4): 49-55.  
付强, 史浩东, 王超, 等. 天基空间碎片光电探测新技术研究 [J]. 空间碎片研究, 2020, 20(4): 49-55.

## Technology for Integrating Space Object Multidimensional Detection and Laser Communication

Xu Miao<sup>1,2</sup>, Shi Haodong<sup>1,2</sup>, Wang Chao<sup>1,2</sup>, Liu Zhuang<sup>1,2</sup>, Fu Qiang<sup>1,2</sup>, Li Yingchao<sup>1,2</sup>, Dong Keyan<sup>1,2</sup>, Jiang Huilin<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Jilin Key Laboratory of Space Optoelectronics Technology, Changchun, Jilin 130022, China

### Abstract

**Significance** Humans need to observe various targets, including space, air, ground, and sea targets. Space targets include satellites, space debris, ballistic missiles, and hypersonic vehicles. Air targets include aircraft, airships, and small craft. Ground and sea targets include surface ships and ground vehicles. The past 20 years have seen an average of 12 collisions between space debris and space payloads every year. In addition, foreign ships and aircraft frequently invade our territorial waters and airspace and repeatedly spy on the activities in our important places. Therefore, the detection, identification, early warning, interception, and even striking of these abovementioned targets are an important and urgent research topic presently.

Multidimensional detection based on combined polarization detection, spectrum detection, and other optical technologies can provide the shape, material, location, and other information of the target simultaneously, effectively improving the dimensions and accuracy of space target information. At the same time, with the help of space laser communication, massive information can be quickly and safely transmitted to orbiting satellites and management departments, which can provide the decision-making basis for further disposal in time.

**Progress** In terms of space target detection, the United States has the largest and highest level of space target detection systems, followed by Russia. Europe starts late, but their system has rapidly developed in recent years. China is the latest to start and mainly performs ground-based observations. However, in recent years, China has conducted space-based observation tests and devised various detection methods, including photoelectric observation, radar monitoring, radio detection, and other detection methods.

In multidimensional detection, polarization detection technology has the advantages of highlighting the target, penetrating smoke, and identifying the truth and falsehood of the target. Spectral detection technology can distinguish the physical characteristics of the target material. Intensity detection technology has high light energy utilization and resolution, but it also has its own weaknesses. The information obtained by intensity detection is less and easily disturbed by the environment. Moreover, loss of the receiving energy and decrease in imaging resolution can be introduced by polarization detection. Table 1 gives a comparison of the advantages and disadvantages of several detection technologies. Therefore, combining the three abovementioned detection methods to give full play to their own characteristics and advantages helps not only in overcoming the difficulties of space target detection but

also in greatly improving the overall detection performance. Changchun University of Science and Technology conducted a multidimensional oil species differentiation test; the test results are shown in Figure 3.

The X2000 flight terminal was developed in the United States from the aspect of integrating detection, imaging, and communication. It can realize the functions of bidirectional communication, bidirectional laser ranging, and high-resolution imaging. The United States also proposed the ACLAIM scheme, in which the laser communication antenna and space camera sharing a front telescope and a detector array is employed as the acquisition and tracking system and an imaging receiver. In China, satellite payloads were developed toward the direction of multifunctionality and integration to increase the system function and reduce the volume, mass, and power consumption of the load. This study proposes a new scheme for space target detection and information transmission, which integrates the four functions of laser ranging, spectral polarization imaging, super-resolution imaging, and laser communication into one. The system design and development were performed. Figure 17 depicts the system composition.

**Conclusions and Prospect** In summary, we introduce herein the research status of the technology of multidimensional detection and laser communication integration for space objects and summarize the principle, characteristics, and application of the related technologies. The preliminary research results of our team in the related aspects are as follows: 1) for space object multidimensional detection, the detection mechanism is studied, and a large aperture and a wide field-of-view space-based telescope super-resolution imaging optical system is designed; 2) a prototype of simultaneous and time-sharing polarization imaging detection for complex space targets is developed; 3) ground and sea surface tests are conducted. As regards space laser communication, the optical principle of one-point to multipoint simultaneous space laser communication is proposed for the first time by our team at home and abroad. Accordingly, a principal prototype is developed and a demonstration test is performed. For detection and communication integration, the urgent need for this space security technology is expounded, and the system design idea and a specific implementation scheme are given.

Our country should further perform an in-depth research on ultra-high-resolution imaging, full-polarization and hyperspectral multidimensional detection, space- and ground-based combined optical detection, multi-to-multi space laser communication, and integrated laser and microwave network communication to solve the problems of the incomplete detection of low-orbit targets, unclear detection of high-orbit targets, slow response of the dynamic target, and difficulties in numbering space objects, which can provide a technical guarantee for the space security in China.

**Key words** optical communications; space target; laser communication; multidimension; integration

**OCIS codes** 060.4510; 060.4250; 350.6090