

第1章

绪论

射频微波和光波在本质上同属电磁波,因其频率及对应的波长不同,使得它们在产生原理、传播介质和处理方式上都有很大的不同。在航天测控领域,无线电测控设备具有技术成熟、可重构性强、易于互联、天线精度要求低、受天气影响小等优点,在现有各种航天测控工作场景下发挥主要作用^[1]。而光学测量控制设备则具有频率高、带宽大、距离损耗低、抗干扰能力强等优点,在深空测控、高速数据传输、高精度测距及授时等领域发挥重要作用^[2]。

为满足对更远航天器的更高速率数传和更高精度的测控需求,无线电测控设备从原有的 S 频段发展到 Ka 频段,目前正在向 W 频段及太赫兹等更高频率发展,但其在向高频发展的过程中也遇到了天线精度要求提升、器件制造难度大且成本高、受天气影响严重等瓶颈问题。

在航天测控领域,光学装备的应用范围也从传统的弹道测量扩展到高精度测量、高分辨成像和高速率通信等多个领域^[3],其中激光统一测控系统具有通信速率高、能耗低、终端重量小等特点,特别适用于远距离测控及高速数传等场景。由于光的波长更短,光学装备的镜面及光路精度需控制在纳米量级,所以在使用过程中需要采用自适应系统对大气湍流引入的相位误差进行消除。但是,因全系统的建设成本较高且工作状态受外界环境影响较大等问题严重影响了光学装备的推广应用。而将射频测控装备及光学测控装备进行融合建设运用,能够极大地提升装备的效能,降低装备的建设成本。

为解决射频及光学测量装备在研制建设中存在的问题,提升装备效能,国内外开展了大量射频及光学融合技术的研究,探索将光学及微波的各自优点进行融合,20 世纪末诞生的微波光子学学科成为近年来交叉学科领域的研究热点^[4]。例如上海交通大学、天津大学、北京航空航天大学等高校都成立了微波光波融合技术的研究中心。目前,微波光学融合领域的研究大量集中于单元器件层面,并在激光雷达、相控阵天线、无线通信、智能网络等领域获得了一定程度的应用。

1.1 射频光学一体化内涵

目前射频光学一体化交叉融合在多个领域中得到发展,在航天领域中也得到了广泛的运用。从体系融合层次上来看,射频光学一体化在航天领域主要表现在三个层面。

1.1.1 物理基础层融合

物理基础层的射频光学融合是指光学测量装备和无线电测量装备在硬件层面的融合,这也是射频光学融合的第一步。以航天测控装备为例,在航天测控系统中,光学测量装备和无线电测量装备共同配合完成航天器的测量任务,两类装备在设计初始阶段均采用独立设计、独立生产方式,但装备建设成本较高。在物理基础层上进行射频光学的一体化能够有效提升装备性能,同时可以降低装备建设成本。在物理基础层上的射频光学一体化主要有以下三种形式。

1.1.1.1 物理形态的组合叠加

在航天测控系统的初始建设阶段,光学测量装备主要进行航天器的高精度角度位置测量,无线电雷达装备主要进行航天器的高精度测距。利用单台设备无法获取航天器位置信息。

为完成航天器高精度定位,光学雷达一体化测量系统将高精度角度测量的光学望远镜和进行距离测量的脉冲雷达安装在同一跟踪架上,利用光学望远镜和脉冲雷达同时对飞行器进行测量,实现单一站址下的高精度定位。通过融合处理光学测角数据和雷达测距数据,可提升装备的跟踪稳定性,获得更好的测量效果。

光学装备和无线电测量装备在物理形态上的组合能够提升装备的使用便捷性^[5]。但这种方式仅是对两类装备的简单叠加,装备的整体建设成本较高,且装备的光学测量部分与无线电测量部分相互约束,导致系统整体性能无法大幅提升。

1.1.1.2 物理形态的融合运用

从技术体制上来讲,航天测控领域使用的光学装备和无线电装备均采用抛物面类天线对电磁波进行汇聚,在焦点位置采用强度探测器或相位探测器完成信号的接收,通过后续信号处理终端完成对目标的测量、成像及数传。基于光学装备与无线电射频装备相同的工作原理,两类装备可通过对部分功能类似的部件进行融合共用,实现光学装备和无线电射频装备的物理形态融合。

光学装备与无线电射频装备在物理形态上的融合目前主要集中在天线的融合。通过对现有的大口径低精度射频天线进行适当的改造,增加光学频段反射层及后端接收光路,形成光学频段的能量接收系统,可完成基于光强信号的测量、通信和成像,利用该方式能够以较低成本大幅提升光学装备

性能。对于天基装备而言,通过将载荷的光学天线和射频天线进行共面设计,两者复用跟踪机架和中心区域天线,可有效降低卫星载荷重量和发射成本。

1.1.1.3 处理后端的硬件复用

从技术原理来看,射频波段与激光频段测控系统采用相同的处理基带,在建设相应装备时,通过复用装备的后端处理终端能够降低装备的建设成本。对于相控阵雷达等装备而言,利用光波进行微波信号低损传输,并实现微波信号的产生、放大、滤波和传输,可解决微波信号传输带宽受限、带外杂散不易处理等问题,能够有效提高装备的效能。

1.1.2 技术体制层融合

在航天测控领域,由于各自的应用场景和工作机理不同,光学装备和无线电射频装备分别采用了不同的技术体制^[6]。而随着无线电射频装备向高频发展,光学测量装备向长波红外波段发展,两者在探测机理、噪声分布模型及数据处理方法上日渐趋同。通过在光学和射频领域互相借鉴各自先进技术体制进行创新,能够有效提升装备能力。

在无线电测量与通信领域,目前已经发展了较为成熟的调制编码方式^[7]。而在激光通信领域,受大气湍流、探测散粒噪声等因素影响,在激光通信特别是深空激光通信过程中有较强的通信闪断和探测散粒噪声,严重影响通信的可用性。为此,根据激光通信过程的噪声模型,借鉴无线电通信调制编码中常用的各类调制及编码方式,可提升激光通信编码效率。

同时借鉴无线电干涉测量及干涉成像技术,将光学干涉测量和成像技术应用于远距离目标成像和测量,在不增加望远镜口径前提下,可有效提升远距离目标的成像分辨力。参考无线电天线组阵微弱信号合成技术,研究强噪声条件下的光学目标探测技术,以实现空间目标的全天时光学探测。

1.1.3 信息应用层融合

在使用过程中,现有的光学装备和无线电射频装备均独立设计、独立工作,两者在数据和信息层面未相互融合。而这两类装备的探测能力、获取信息内容、环境适应性等方面可优势互补,通过对两类装备信息应用层的融合,能够有效提升信息获取能力。目前光学装备与无线电射频装备的信息融合主要有目标光电特征信息融合、光电融合捕获跟踪技术等。光电融合技术的研究及在装备中的应用,可提升目标特性测量体系能力,并成为信息获取与处理的“倍增器”。其中光电融合目标特性测量技术主要研究融合光

学特征和无线电信号特征的目标特征信息集,以及基于光电特征信息集的目标识别模型和判决算法。光电融合目标捕获跟踪技术研究基于光学测量信息为无线电测量装备提供目标指向信息,提高无线电装备发现捕获目标的概率,探讨基于无线电信号和红外信号的融合跟踪策略。

1.2 深空测控内涵

发展深空探测,探索未知世界,是我们人类矢志不渝的追求。深空探测活动离不开测控通信的支持^[8]。深空测控通信主要是指对深空探测器进行跟踪、遥测、遥控和数据传输等一系列技术的统称^[9],主要包含四方面:一是跟踪,即测量目标探测器的位置信息、速度信息、角度信息等,以精确确定目标探测器轨道;二是遥测,即接收目标探测器的工作状态及工作参数,实时监测探测器的健康状况;三是遥控,即发送相关控制指令对目标探测器的运行姿态、运行模式、工作参数进行控制;四是数据传输,主要是接收探测器载荷的科学探测数据,用于后续处理和科学研究。

与传统近地测控通信相比,深空测控通信面临多方面突出难点^[10]:一是距离遥远,近地航天器的通信距离通常在数千千米至数万千米,而月球探测的通信距离则达到了 38 万 km,火星探测的通信距离更是超过 1 亿 km;二是信号微弱,深空测控通信信号强度会随着距离的平方快速衰减,通常会比近地航天器信号低数十分贝以上;三是时延长,即使电磁波在真空中以光速传播,无线电信号从地球到火星仍然需要 20 余分钟才能实现往返,这与近地测控通信近乎无时延的实时操作形成鲜明对比;四是环境复杂,除了必须穿过近地空间的对流层和电离层,还有可能要穿越变化复杂的太阳等离子区,经受随时出现的太阳风暴的冲击。

此外,深空探测活动与方式的多样性和复杂性不断增加,对深空测控通信不断提出更多新的挑战。但也正是这些新挑战带动了一系列新技术的发展和應用,因此其研究一直处于测控通信领域的最前沿。

1.3 深空测控的射频光学一体化

由于深空航天器距离地面更远,到达地面的信号更微弱,利用传统的无线电测控手段需建设超大口径的天线,且获得的通信速率及测量精度较低^[11]。光学测控装备可获得较高的测量精度和通信速率,但为完成深空航天器的微弱信号接收,需建设大口径望远镜,这将导致装备建设技术难度与

成本急剧上升。

为完成深空目标的高精度测量与成像,实现对深空航天器的高速通信,需在物理基础层、技术体制层和信息应用层等各方面进行射频及光学技术的一体化设计,其主要有以下三方面。

1.3.1 物理基础层融合

为获得较高的通信速率和测量精度,在对深空航天器测控时需建设地基大口径接收天线^[12],目前无线电波段的深空测控天线口径普遍在30m以上。利用激光对深空航天器进行测控时还需建设4m以上口径的望远镜。为降低系统建设成本,在此探索将激光测控数传系统与无线电测控系统在物理基础层融合,将低精度无线电测控天线的部分口径改造成低精度光强接收天线,完成深空航天器回射激光的接收,通过激光脉冲位置调制方式完成对深空航天器的通信数传。

1.3.2 技术体制层融合

对深空目标的探测和成像可获得目标的精确位置,完成目标的识别分类,是深空探测的重要手段^[13]。由于无线电波长较长,能够较为便捷地对接收获得的无线电波相位进行记录。在无线电波段,对深空目标阵列的干涉测量与成像技术已较为成熟;在光学波段,由于其波长短,光场相干时间短,且单个光子的能量强,在对暗弱目标探测时散粒噪声明显,光学波段的干涉测量与成像对装备的精度要求极高,目前仅应用在天文观测领域。

为实现对地球中高轨道卫星、深空航天器及近地小行星等远距离目标的高精度测量与高分辨成像,需借鉴无线电干涉成像技术对光场干涉成像技术进行优化,探索利用光的二阶相干特性,利用低精度的光强接收设备,通过强度相干方式实现在光学波段的干涉成像。

1.3.3 信息应用层融合

由于激光的波束宽度远小于无线电波,其能够大幅降低星载终端的功耗和天线尺寸,但波束宽度小也导致在测控通信过程中链路建立难度较大。在建链过程中,通过无线电装备与光学装备进行互引导,将两类装备进行信息应用层的融合能够极大地提高激光通信链路的构建速度。

1.4 全书内容框架

本书研究构建射频光学一体化的深空目标的通信、成像和测量系统,充分融合射频和光学的优点,构建满足未来发展需求的深空测控装备。从内容来看,本书的第2章至第5章主要论述射频光学一体化的测控天线构建,以及射频光学一体化链路在深空通信和合作式测量中的实际运用。本书的第6章至第8章主要论述利用射频干涉成像的技术路线,进行光学波段的干涉成像。基于射频天线阵列,根据仿真结果实现对阵列排布的优化,完成光学波段的成像,并大幅提升成像分辨力。第9章利用室内实验设备仿真了不同排布密度和集光面面积的强度相干阵列对高轨卫星的成像质量,根据仿真结果实现对阵列排布的优化。

参考文献

- [1] 孟维晓,王钢. 现代无线电测控技术[M]. 北京: 电子工业出版社,2003.
- [2] 石书济. 深空探测与测控通信技术[J]. 电讯技术,2001,41(2): 4.
- [3] KINGSLAKE R. Applied optics and optical engineering V6[M]. [S. l]: Elsevier, 2012.
- [4] YAO J. Microwave photonics[J]. Journal of lightwave technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] 李振伟. 空间目标光电观测技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
- [6] 于志坚. 我国航天测控系统的现状与发展[J]. 中国工程科学,2006,8(10): 42-46.
- [7] 葛跃田. 自适应调制编码技术及其在移动通信中的应用[J]. 现代电子技术,2004, 27(2): 3.
- [8] 刘嘉兴. 向技术极限挑战: 深空测控通信的目标[J]. 电讯技术,2008,48(4): 7.
- [9] 刘嘉兴. 深空测控通信的特点和主要技术问题[J]. 飞行器测控学报,2005,24(6): 8.
- [10] 张乃通,李晖,张钦宇. 深空探测通信技术发展趋势及思考[J]. 宇航学报,2007, 28(4): 8.
- [11] 唐歌实. 深空测控无线电测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社,2012.
- [12] 于志坚,李海涛,李小梅. 可扩充深空天线组阵技术研究与试验验证[J]. 遥测遥控,2015(6): 8.
- [13] WEIREN W U, DENG YUN Y U. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1(1): 5-17.

第2章

深空测控系统概述

深空测控系统一词多指专门用于对距离地球 200 万 km 以远深空航天器进行遥测遥控和数据传输等任务的系统,在国内也指对月球航天器以远位置实现遥测遥控和数据传输等任务的系统。自深空探测开始以来,主要是基于射频技术开展深空测控。为此,需要修建非常巨大且技术先进的地面深空测控站,其特点是配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、先进的数字化信号处理系统以及高精度高稳定度时间频率源等,本章主要介绍深空测控技术的发展情况,并介绍近年来出现的新技术。

2.1 全球深空测控站概况

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)较早建起了多个深空测控站,并形成了相应的深空测控网。目前,中国深空测控网同样具备独立自主开展深空探测任务的地面测控支持能力,与美国、欧洲并列成为目前世界上技术先进、功能完备的三大深空测控网。俄罗斯、日本、印度、意大利等国家也研制建设了自己的深空测控站,但并未形成具备完整能力的深空测控网,以下主要对美国、欧洲、中国的深空测控网的基本情况做简要介绍。

2.1.1 NASA 深空测控站

NASA 在全球按经度间隔接近 120° 分布建设了 3 处深空测控站,分别位于美国加利福尼亚州戈尔德斯通(Goldstone)、西班牙马德里(Madrid)和澳大利亚堪培拉(Canberra)^[1,2]。各站均建有 1 个 70m 口径天线和若干个 34m 口径波束波导(beam waveguide, BWG)天线。3 个深空站与位于美国加利福尼亚州帕萨迪纳(Pasadena)的喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的操作控制中心共同构建成了美国深空测控网。美国深空测控网是目前世界上规模最大、能力最强的深空测控通信地面支持系统。

2.1.2 ESA 深空测控站

ESA 同样也于 2010 年起建成了 3 个全球分布的深空测控站,具备 24h 深空任务地面支持能力^[3]。3 个深空站分别位于澳大利亚新诺舍(New Norcia)、西班牙塞夫雷罗斯(Cebreros)和阿根廷马拉圭(Malargue)。各站均建有一个 35m 口径天线,可以由位于德国达姆施塔特(Darmstadt)的欧洲空间操作中心(European Space Operations Centre, ESOC)进行远程操作控制。

2.1.3 中国深空测控站

伴随着嫦娥探月工程“绕、落、回”三步走战略的实施,我国深空测控网从零起步,充分利用后发优势,开始了艰辛而又光辉的建设历程。从2008年起动工,于2012年分别在我国东北和西部地区建成了佳木斯66m S/X双频段深空测控站和喀什35m S/X/Ka三频段深空测控站,随后又于2017年在南美洲建成了阿根廷35m S/X/Ka三频段深空测控站(见图2-1)^[4-8]。三大深空测控站的建成初步构成了我国深空测控设备全球布站格局,将我国深空测控网对探测器星下点的测控覆盖率提高到了接近90%,使得我国深空探测器在绝大部分时间内均可与地面建立直接链路。为提高全网测控支持和数据接收能力,我国于2020年又在喀什深空站新建了3个35m X频段深空测控天线,通过下行组阵信号合成技术,使喀什站点的数据接收能力大幅提升。

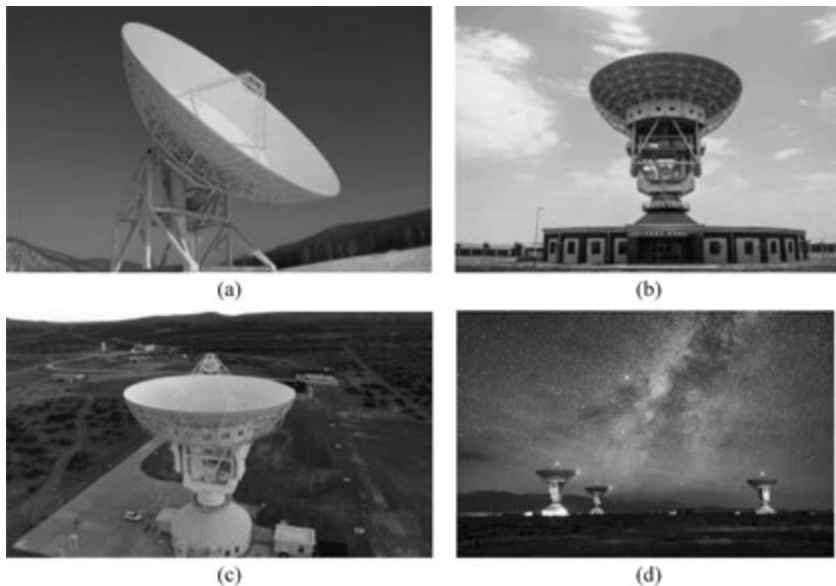


图 2-1 中国深空站天线

- (a) 佳木斯深空站 66m 天线; (b) 喀什深空站 35m 天线; (c) 阿根廷深空站 35m 天线;
(d) 喀什深空站新建的 3 个 35m 天线

除了以上三大深空测控网,意大利、俄罗斯、日本、印度等国也研制建设了自己的深空测控设备,表 2-1 给出了世界主要深空测控站的系统性能技术指标对比^[1-3,9,10]。由于我国首次研发的高功率发射机为 10kW 水平,因