

深空微波激光通信一体化技术现状及关键技术

赵焯,熊建林,刘向南*,蒋培文

(北京遥测技术研究所,北京 100094)

摘要:深空飞行平台促进了深空微波激光通信一体化技术的快速发展,但受空间搭载条件的限制,深空飞行平台对通信载荷的集成化和综合化的需求愈加明显。综述了国内外深空微波激光通信一体化技术的发展现状,分析了深空微波激光通信一体化技术涉及的主要关键问题,指出了微波激光通信一体化技术的发展趋势。

关键词:深空通信;卫星通信;微波通信;激光通信;微波激光通信一体化

中图分类号:TN256 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)01-0016-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Status and key technologies of deep space microwave laser communication integration technology

ZHAO Ye, XIONG Jianlin, LIU Xiangnan*, JIANG Peiwen

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100094, China)

Abstract: Deep space flight platform promotes the rapid development of deep space microwave laser communication integration technology. However, due to the limitation of space carrying conditions, the demand for integration and synthesize of communication payload is more and more obvious. This paper summarizes the development status of microwave laser communication integration technology in deep space at home and abroad, analyzes the main key problems involved in the integration technology of deep space microwave and laser communication, points out the development trend of integration technology of microwave and laser communication.

Key words: deep space communication; satellite communication; microwave communication; laser communication; integration of microwave communication and laser communication

0 引言

深空探测是人类探索宇宙奥秘、寻求长久发展的科学活动,对深空的探测和开发具有十分重要的科学价值和经济意义。随着深空探测任务多样化、复杂化的发展,对深空通信载荷提出了高速化、轻量化、小型化、综合化和集成化的应用需求。对于深空通信应用,虽然微波通信难以满足未来深空探测任务对高速数据回传需求,但是微波通信链路的可靠性和可通率却很高,因此微波通信仍将是深空探测的主用通信手段。

收稿日期:2020-03-27。

作者简介:赵焯(1993—),女,硕士研究生,辽宁盘锦人,现工作于北京遥测技术研究所,重点研究高速激光通信调制解调技术,参与了某民用航天预研项目。曾获得“中国工程院第五届‘空间信息技术与应用展望’院士论坛暨2019年卫星有效载荷学术年会优秀论文奖”。

*通信作者:刘向南(E-mail: 18310224565@163.com)。



激光通信具有通信速率高、方向性强以及载荷体积小、重量轻和功耗低等特点,可满足未来深空探测活动对高速通信、超远距离传输等需求,在未来的深空探测领域具有良好的应用前景^[1-4]。兼顾深空通信链路的高可靠性和高速率化应用需求,可以预见,未来深空微波通信和激光通信将相辅相成、融合发展。

受空间搭载条件的限制,深空飞行平台对通信载荷的集成化和综合化的需求愈加明显。为进一步降低通信载荷对飞行平台的搭载资源需求,将微波通信载荷和激光通信载荷整合为一体化通信载荷(即共用收发天线、跟踪机架和电学单元等部分),并通过这2种通信频段的灵活切换实现互备份,成为提高深空通信链路可靠性、改善深空通信系统兼容性、提升深空通信品质和节约深空飞行平台资源的一种有效解决途径。本文将综述国内外深空微波激光通信一体化技术的发展现状、趋势和关键问题。

1 发展现状及趋势

1.1 国外微波激光通信一体化技术现状

得益于良好的微波通信和激光通信技术研究基础,基于微波激光混合通信思想^[5](即通过在激光链路连接的2个节点间建立额外的微波链路,在天气恶劣的条件下利用微波链路来辅助信息传输以保障节点间的不间断通信),美国率先提出了微波激光通信一体化的概念和设计方法,完成了星载原理样机和工程样机的研制,并着手对射频激光混合通信深空地面站进行改造升级^[6-15]。这些研究成果代表了目前世界最先进技术水平,表明美国在微波激光通信一体化技术研究及深空应用规划方面已经处于领先地位。

1.1.1 星载微波激光通信一体化技术

美国国家航空航天局(NASA)委托喷气推进实验室(JPL)和霍普金斯大学联合研究用于火星探测的星载微波激光通信一体化通信载荷,旨在将高性能的混合微波通信和激光通信系统压缩成一个与火星勘测轨道飞行器(MRO)通信终端具有同等包络、重量和功耗的通信载荷,即在引入激光通信的同时,尽量减少航天器用于通信的资源需求,并降低依赖激光通信作为唯一通信手段的风险。

2008年,约翰斯·霍普金斯应用物理实验室(APL)的研究人员^[6]开展了基于共用天线的微波激光一体化通信技术预先研究,并提出了微波激光一体化通信系统的设计方法、工艺和天线样机的研制计划。基于以上研究成果,NASA^[7]于2012财年启动了无线光通信综合(iROC)项目,其研究成果代表了目前星载微波激光通信一体化技术的最高水平。iROC项目是美国NASA致力于提高深空—地面数据传输速率和链路可靠性的新项目,将为火星探测等任务研发深空中继通信新技术并研制星载微波激光通信一体化系统,在保证深空航天器最低能耗的同时获得最大的数据吞吐量,以实现深空探测器以更稳定、更有效的方式向地球回传数据。深空微波激光通信一体化链路示意图如图1所示^[12]。

iROC星载通信载荷通过共用微波激光一体化天线、跟踪机架、集成高速数字处理器、编译码器、调制

解调器、电源、即时延容忍网络(DTN)链路管理软件、支撑结构和热控等方式实现通信系统的高度集成,最大化地降低了星载通信载荷的体积、重量和功耗。通过突破基于数据融合的无信标精跟踪技术和基于微波激光共口径双频天线等技术,进一步解决通信载荷资源优化不足、链路建链难度大、通信速率低和系统鲁棒性差等瓶颈问题。iROC系统的主要技术指标如表1所示^[14]。

表1 iROC系统主要技术指标

指标	参数名称	数值
激光通信技术指标	通信速率	267 Mb/s
	链路距离	0.55 AU
	调制解调	SCPPM-16
	编码速率	2/3
	保护时隙	4个
	时隙时钟	0.5 ns
	脉冲重复频率	10~100 MHz
	峰值功率	700 W
	平均功率	13 W
	激光波长	1550 nm
射频通信技术指标	通信速率	85 Mb/s
	链路距离	0.55 AU
	调制解调	GMSK
	编码方式	LDPC 或 Turbo
	编码速率	1/2
	TWTA	75 W
	天线口径	3 m
	带宽	200 MHz
	频率	32 GHz

在通信过程中,iROC系统的激光信号和射频波形由同一个软件定义无线电模块产生。微波通道由行波管功放TWTA产生75 W的功率;激光通道由高功率光纤放大器产生13 W的功率。激光微波信号由共轴一体化天线发射。iROC通信系统的功能框图如图2所示^[12]。

iROC星载天线采用微波激光一体化共口径设计,在3 m口径网状射频天线中心处集成了一个0.25 m口径光学天线。为了满足空间搭载的限制条件,同时获得高精度的光学面形,使用传统材料已经不能满足iROC系统对射频激光一体化天线的应用需求。因此,APL早期利用复合材料来制作光学天线镜面,这种设计也考虑了射频激光通信一体化系统未来在其它可移动平台和小型天基平台上应用的普适性^[7],该天线采用直接馈源射频结构和卡塞格林光学望远镜结构,

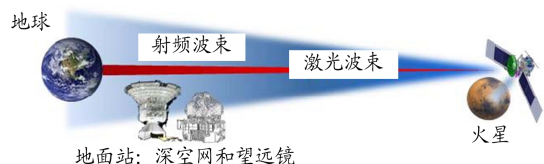


图1 深空微波激光通信一体化链路示意图

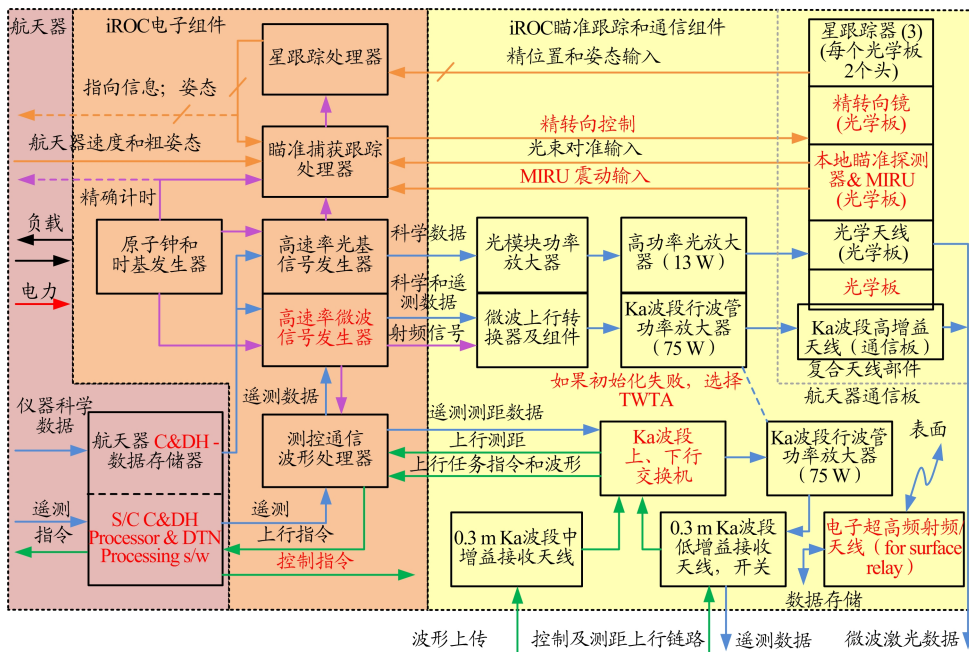


图2 iROC系统功能框图

能够兼容射频和激光传输通道的几何对称性,可以消除激光和微波这2种载波之间的对准失配。

为了进一步降低星载射频激光一体化天线的重量,NASA对采用不同材料设计的星载射频激光一体化天线重量进行了比较分析,具体数据如表2所示^[4]。分析结果表明:采用金属网状的射频天线与新型复合材料的光学天线一体化设计后,一体化天线的总重量仅为8.2 kg,与复合材料结构相比,其重量降低了一半。iROC星载射频激光一体化天线如图3所示。

对于不同的通信系统,通常利用品质因数(Tb/kg) (即回传数据总量与通信子系统总重量的比值)来评价通信链路的综合性能及品质。iROC系统与MRO通信子系统的性能品质因数的对比如表3所示^[2]。由此可知,iROC通信子系统的品质因数是MRO通信子系统的品质因数的5.2倍(射频通信)和19.1倍(激光通信)。综上分析,与MRO射频通信子系统相比,iROC通信子系统的微波激光混合通信能力将显著提升。

表2 不同材料的星载射频激光一体化天线重量

射频激光一体化天线重量分配		射频激光一体化天线总重量
3 m口径射频天线材料	25 cm口径光学天线材料	
复合材料(16.7 kg)	铍(0.8 kg)	17.5 kg
复合材料(16.7 kg)	复合材料(0.2 kg)	16.9 kg
金属网状(8.0 kg)	复合材料(0.2 kg)	8.2 kg

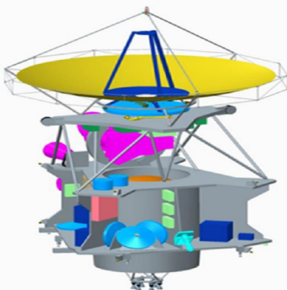


图3 iROC星载射频激光一体化天线

1.1.2 地面微波激光通信一体化技术

对于未来高速率、超远距的深空激光通信应用需求,激光地面站的天线口径将达到12 m^[16]。若直接建造12 m的激光地面站,其经费需求巨大。结合美国深空网的实际状况,将深空网的34 m波束波导射频天线进行技术改造升级,改成地面大口径射频激光复合天线,成为降低系统成本的有效途径。基于以上考虑,美国JPL实验室^[16-24]于2010年开始对DSS-13号34 m口径的深空射频测控站进行技术改造,使其在接收Ka波段射频信号的同时,也能够接收1550 nm的激光通信信号。

DSS-13的34 m口径射频激光站如图4所示。深空射频激光一体化通信地面系统是在射频接收天线的基础上嵌入了折反式光学系统,其光学系统的主镜采用64块六边形反射镜拼接合成的方式,分为4个子孔径,每个子孔径包含16块六边形反射镜,等效为一个8 m有效口径的光学天线。六边形反射镜采用铝合金材料,表面镀有 SiO_2/TiO_2 膜,射频天线中心开孔处安有激光、射频信号分离装置。射频信号被反射进入次镜背部的射频接收器,激光信号经次镜反射后光路进入红外电荷耦合原件探测器(CCD)。相关分析表明:采用了34 m深空射频激光一体化通信地面系统后,其单接收天线可以支持125 Mb/s火星对地通信;若该天线装配2套光学探测器,则可以支持250 Mb/s火星对地通信^[24]。

因此,利用深空射频激光一体化通信地面系统可以有效提升火星对地的通信能力。

表3 通信子系统性能品质比较

系统	重量/kg	2年任务期数据回传量/Tb	品质因数/($Tb \cdot kg$) ⁻¹
MRO通信子系统	63	34~53	0.54~0.84
iROC通信子系统	69	射频通信为303 激光通信为1111	射频通信为4.4 激光通信为16.1



图4 DSS-13的34 m口径射频激光站

1.2 国内微波激光通信一体化技术现状

在深空测控通信方面,我国在月球探测工程中设计并建设了全球布局的深空测控通信网,火星探测工程的实施将进一步带动深空测控系统能力的建设^[25-26]。此外,我国相继在“天链一号”、“北斗三号”和“嫦娥四号”中应用星间链路技术^[27],为后续深空通信链路应用提供了借鉴和参考。在空间激光通信方面,我国先后开展了“海洋二号”星地激光通信试验、“天宫二号”星地激光通信试验、“墨子号”星地相干通信试验、“实践十三号”以及“实践二十号”星地激光通信试验^[28],积累了丰富的星地激光通信经验。星地链路包括了低轨卫星对地、高轨卫星对地这2种类型,激光通信体制涵盖了非相干探测和相干探测这2种体制,星地激光通信速率高达10 Gb/s。

然而,目前国内尚无卫星或深空微波激光通信一体化技术方面的报道,只在一些研究报道中出现了微波激光通信一体化技术的迹象,如对微波激光混合通信系统及关键技术等进行了广泛研究^[29-31],提出了采用微波光子技术解决卫星微波与激光通信2种体制并存带来的信息融合问题^[32-33],并对激光微波混合链路卫星资源调度的基本方法进行了深入研究^[29,33]。虽然这些研究没有直接提及微波激光通信系统一体化问题,但为卫星微波激光通信一体化技术的发展提供了技术参考。随着我国深空激光通信技术的进一步发展,我国对深空微波激光通信一体化技术的需求将更加明确,这必将促进和带动深空微波激光通信一体化技术的发展。

1.3 深空微波激光通信一体化技术发展趋势

结合卫星激光通信技术的现状、发展趋势以及深空通信系统的需求,可以预测未来的深空微波激光通信一体化技术可能呈现以下发展趋势:

①微波光子技术将进一步促进微波通信与激光通信的深度融合。目前,iROC研制的微波激光通信一体化系统只考虑了微波和激光2种通信体制及系统软件、硬件的一体化因素,未涉及微波与激光之间的

深度融合问题,如基于微波光子技术的信号再生、转发等。随着卫星微波光子技术的逐步发展,微波光子技术将广泛应用于微波激光通信一体化系统,实现微波通信与激光通信的深度融合。因此,未来深空微波激光通信一体化系统将逐渐向兼容微波光子技术的微波激光通信一体化系统转变。

②星载及地面微波激光通信一体化技术呈现相辅相成发展趋势。深空微波激光通信一体化链路节点包括星载通信载荷和深空地面站。由于深空通信应用的特殊性,星载微波激光通信一体化载荷旨在实现高性能的微波通信和激光通信的同时,尽可能地压缩通信系统的体积、重量和功耗,以减少航天器用于通信的资源消耗,为飞行平台节约搭载资源。深空微波激光通信一体化地面站旨在实现微波和激光大口径接收的同时,尽量减少系统建造经费,节约研制成本。虽然星载载荷和地面站对微波激光通信一体化技术的需求出发点不同,但两者的设计思想和共同目标均是要实现超远距离、高可靠和高速率的深空通信,因此后续在深空通信链路应用和调度等方面将融合发展、相辅相成。

2 关键技术分析

2.1 星载射频激光一体化天线技术

对于深空航天器通信载荷而言,星载射频激光一体化天线是实现一体化通信面临的首要问题。其包含了2种技术:

①大口径轻质化星载射频激光复合天线技术。因为深空航天器的承载能力和搭载空间十分有限,所以对通信载荷的体积、重量的要求非常高。对于深空超远距离通信链路,光学天线和微波天线设计的共同点是2种通信系统均需要采用较大口径的收发天线。因此,如何实现星载大口径射频激光天线的轻质化是实现射频激光通信一体化的关键技术之一。在复合天线设计过程中,需重点对射频和激光天线的结构形式及材料进行优化。iROC早期研制的射频激光一体化天线样机采用了基于抛物面结构的共用轻质主反射器来实现光学天线与微波天线的兼容与集成,其射频天线的主反射器材料为复合材料,光学天线主反射镜材料为铍,天线总重量为17.5 kg。经结构形式和材料优化后,射频天线采用网状天线镀金钼丝网设计,光学天线主反射镜材料选用复合材料,天线总重量为8.2 kg。为了进一步降低天线的重量,随着薄膜天线技术的不断进步,有望在星载射频激光一体化天线中应用。

赵烨,熊建林,刘向南,等:深空微波激光通信一体化技术现状及关键技术

②高性能射频激光复合薄膜技术。在星载射频激光一体化天线设计过程中,为了提高光学天线的反射效率,同时降低射频副镜对光学天线的遮挡以及光学透镜对射频信号的衰减,需要在光学镜面镀制特殊的反射膜。光学天线主镜的反射膜需具有对射频和红外激光高反射率的特性;光学天线副镜在实现微波透射的同时实现红外光波的高反射。因此,在设计微波馈源时必须考虑光学天线副镜的影响。此外,在设计光学天线副镜和射频馈源的支撑结构时,其材料须满足对微波透射的要求。

2.2 射频激光混合链路管理技术

射频激光混合链路管理技术包含了2种技术:

①射频激光混合链路评估与自动切换技术。射频激光通信一体化链路可以利用同一根天线即可完成射频和激光这2种通信信号的收发功能。然而,由于该通信链路功率受限,因此在某一段工作时间内需要对实际链路的信道状况进行评估,从而判断建立激光通信链路还是射频链路。实际工作中,激光链路可以实现最高的信息传输速率。然而,当云层和其它大气效应引起激光通信失效时,此时需建立微波链路。通过采用射频激光混合链路评估与自动切换技术,可以提升深空通信链路的可用度。

②射频激光混合链路无独立信标捕获跟踪技术。快速捕获与稳定跟踪是实现深空射频通信和激光通信的前提条件。受航天器平台对通信载荷的重量、体积和功耗等因素的限制,无独立信标快速捕获与高精度跟踪技术成为深空通信应用的首选和发展趋势。无独立信标捕获方案可以省去独立的信标激光器和探测器,使得光路结构简化,进而有利于降低通信载荷的重量、体积和功耗,有利于实现通信载荷的轻量化、小型化和集成化。相关研究表明:可以利用星敏来提供激光通信载荷的指向信息,以替代上行信标光^[18,35]。

2.3 基于脉冲位置调制 (PPM)/单光子探测阵列接收的激光通信技术

深空激光通信链路面临发射激光功率受限、信号空间衰减大、大气影响严重和强背景光干扰等问题,因此如何在较低平均激光功率的情况下获得更高的峰值功率,以抵抗链路的空间衰减和大气干扰的同时能在极低光信噪比时获得较好的通信质量是深空激光通信应用的关键问题。为了解决上述问题,研究人员提出了基于PPM和单光子探测阵列接收的激光通信技术,是目前被广泛认可的有效解决途径。

PPM技术是一种以光脉冲为载波,通过改变脉冲

时隙位置来完成信息传递的调制方式,能够在较低的平均功率下获得较高的脉冲峰值功率。与传统的开关键控方式相比,PPM具有较高的功效利用率。相比于传统的雪崩光电二极管和相干光探测方式,单光子探测阵列接收具有更高的接收灵敏度(1 photon/bit)。同时,采用单光子探测阵列接收能够解决探测器重复利用率低的问题,而且还可以利用阵列分集接收来抑制各种衰落的影响。因此,将单光子探测阵列接收与PPM同时使用,被广泛用于超远距离的深空通信系统中。基于射频激光一体化天线,采用PPM可以适当降低对光学天线面型精度的要求,有利于射频激光一体化天线的工程应用。因此,基于PPM/单光子探测阵列接收的激光通信技术是深空微波激光通信一体化系统中的一项关键技术。

3 结束语

深空微波激光通信一体化技术的出现改进了微波通信和激光通信系统的传统结构,促进了微波通信与激光通信的融合发展,并保证了现有设施和技术的继承性。相比于传统的深空通信技术,微波激光通信一体化技术提高了深空通信系统的性价比和兼容性,有效降低了通信载荷的体积、重量和功耗,是未来卫星及深空通信技术的重要发展趋势。目前,国外已经完成了深空微波激光通信一体化关键技术攻关和样机研制,启动了后续工程应用规划;而国内目前尚未开展对卫星及深空微波激光通信一体化技术的研究,因此需制定相应研究计划并加快研究进度,为未来我国深空测控网光通信系统建设提供技术支撑。随着微波激光通信复合需求的不断增加,微波激光通信一体化技术在卫星及深空通信方面优势的逐渐凸显。在不久的将来,微波激光通信一体化技术将获得快速的发展,并在深空以及各类卫星通信系统中获得广泛应用。

参考文献:

- [1] 吴伟仁,于登云. 深空探测发展与未来关键技术[J]. 深空探测学报, 2014,1(1):5-17.
- [2] 吴伟仁,李海涛,李赞,等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学:信息科学, 2020,50(1):87-108.
- [3] 李凉海,刘向南,李晓亮. 深空激光通信进展及应用研究[J]. 深空探测学报, 2019,6(6):523-529.
- [4] 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.
- [5] KIM I I, KOREVAAR E. Availability of free space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems [C]//Optical Wireless Communications IV, August

- 21–22, 2001, Denver, United States. San Diego: SPIE, 2001, 4530: 84–95.
- [6] EDWARDS C L, BRUZZI J R, BOONE B G. Free-space high data rate communications technologies for near terrestrial space [C]//Free-Space Laser Communications VIII, August 10–12, 2008, San Diego, United States, San Diego: SPIE, 2008, 7091: 709109-1–709109-15.
- [7] FIELHAUER K B, BOONE B G, RAIBLE D E. Concurrent system engineering and risk reduction for dual-band (RF/optical) spacecraft communications [C]// IEEE Aerospace Conference, March 3–10, 2012, Big Sky, United States. Piscataway: IEEE, 2012: 1–7.
- [8] MURI P, MCNAIR J. A performance comparison of DTN protocols for high delay optical channels [C]//2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), April 7–10, 2013, Shanghai, China. Piscataway: IEEE, 2013: 183–188.
- [9] RAIBLE D, HYLTON A. Integrated RF/optical interplanetary networking preliminary explorations and empirical results [C]//30th AIAA International Communications Satellite System Conference, September 24–27, 2012, Ottawa, Canada. New York: AIAA, 2012: 216050-1–216050-10.
- [10] HYLTON A, RAIBLE D E, JUERGENSEN J, et al. On applications of disruption tolerant networking to optical networking in space [C]//30th AIAA International Communications Satellite System Conference, September 24–27, 2012, Ottawa, Canada. New York: AIAA, 2012: 1–13.
- [11] HYLTON A, RAIBLE D. Networked operations of hybrid radio optical communications satellites [C]//32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, August 4–7, 2014, New York, United States. New York: AIAA, 2014: 2014–4440.
- [12] RAIBLE D, ROMANOFISKY R R, BUDINGER J M, et al. On the physical realizability of hybrid RF and optical communications platforms for deep space applications [C]//32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, August 4–7, 2014, New York, United States. New York: AIAA, 2014: 2014–4482.
- [13] NOREEN G, SHAMBAYATI S, PIAZZOLLA S, et al. Low cost deep space hybrid optical/RF communications architecture [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 7–14, 2009, Big Sky, United States. Pasadena: IEEE, 2009: 1–11.
- [14] RAIBLE D, ROMANOFISKY R, PEASE G, et al. SCaN industry days presentation [EB/OL]. (2019-10-16) [2020-03-27]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20160010290>.
- [15] ROMANOFISKY B. Crazy Antennas [EB/OL]. (2019-10-16) [2020-03-27]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190025230>.
- [16] DEUTSCH L J, TOWNES S A, LIEBRECHT P E, et al. Deep space network: The next 50 years [C]//14th International Conference on Space Operations, May 16–20, 2016, Daejeon, Korea. New York: AIAA, 2016: 1–9.
- [17] ZELEDNIKAR D J, NAPPIERJ M, DOWNEY J A. Ka-band link Sstudy and analysis for a mars hybrid RF/optical software defined radio [C]//32nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference, August 4–7, 2014, San Diego, United states. New York: AIAA, 2014: 1–11.
- [18] ARETSKIN-HARITON E D, SWANK A J, GRAY J. Beaconless optical communication System Constraints [EB/OL]. (2019-08-14) [2020-03-27]. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20190002792>.
- [19] CHARLES J R, HOPPE D J, SEHIC A. Hybrid RF/optical communication terminal with spherical primary optics for optical reception [C]//International Conference on Space Optical Systems and Applications, May 11–13, 2011 Santa Monica, United States, New York: IEEE, 2011: 171–179.
- [20] VILNROTTER V A. Hybrid RF/optical communications via 34-meter DSN antennas [R]. IPN Progress Report 42-180, Pasadena, United States: JPL, 2010: 1–28.
- [21] HOPPE D, CHARLES J, PIAZZOLLA S, et al. Integrated RF/optical ground station technology challenges [R]. IPN Progress Report 42-181, Pasadena, United States: JPL, 2010: 1–38.
- [22] TORREZ T M. RF/optical hybrid antenna [R]. IPN Progress Report 42-201, Pasadena, United States: JPL, 2015: 1–9.
- [23] HOPPE D J, CHUNG S, KOVALIK J, et al. RF/optical demonstration: focal plane assembly [R]. IPN Progress Report 42-207, Pasadena, United States: JPL, 2016: 1–18.
- [24] DEUTSCH L J, LICHTEN S M, HOPPE D J, et al. Toward a NASA deep space optical communications system [C]//SpaceOps Conferences, May 28–June 1, 2018, Marseille, France. New York: AIAA, 2018: 1–12.
- [25] 董光亮,李海涛,郝万宏,等. 中国深空测控系统建设与技术发展[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 99–114.
- [26] 李海涛. 深空测控通信系统设计原理与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 26–27.
- [27] 刘向南,赵卓,李晓亮,等. 星间链路技术研究现状及关键技术分析[J]. 遥测遥控, 2019, 40(4): 1–9.
- [28] 徐晓帆,陆洲. 星地激光通信可靠性保障技术研究现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 650–657.
- [29] 赵静,赵卫虎,李勇军,等. 微波/光混合链路数据中继卫星系统资源调度算法[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1005005-1–1005005-8.
- [30] 谢文达,李志科. 一种微波/光混合链路中继卫星多目标资源调度算法设计[J]. 激光杂志, 2017, 38(8): 193–196.
- [31] 栗嘉,陈辉. 基于网络丢包率的混合 FSO/RF 系统切换技术研究[J]. 光通信技术, 2011(10): 28–31.
- [32] 赵尚弘,李勇军,朱子行,等. 星上微波光子技术应用研究进展[J]. 空间电子技术, 2012(4): 14–27.
- [33] 谭莹,艾勇. 卫星光通信与微波通信之转换技术研究[J]. 光通信技术, 2005, 29(5): 15–16.
- [34] 赵静,赵尚弘,李勇军,等. 中继卫星资源调度问题研究现状与展望[J]. 电讯技术, 2012, 52(11): 1837–1843.
- [35] SWANK A J, ARETSKIN-HARITON E, LE D K, et al. Beaconless pointing for deep-space optical communication [C]//34th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, October 18–20, 2016, Cleveland, United states. New York: AIAA, 2016: 1–11.