



低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战

沈俊¹, 高卫斌², 张更新³

(1. 西安空间无线电技术研究所, 陕西 西安 710100;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 3. 南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

摘要: 建立低轨卫星物联网 (LEO IoT) 是解决地面物联网在海洋、山区、沙漠等区域覆盖能力不足的有效手段。在分析低轨卫星物联网发展背景和发展现状的基础上, 给出了低轨卫星物联网的主要应用领域和业务特点, 重点研究了低轨卫星物联网面临的技术挑战和需解决的关键技术。

关键词: 低轨卫星物联网; 发展背景; 业务特点; 技术挑战; 关键技术

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019089

Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT

SHEN Jun¹, GAO Weibin², ZHANG Gengxin³

1. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China
2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China
3. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China

Abstract: The low earth orbit (LEO) internet of things (IoT) is an effective solution to solve the coverage inefficiency problem of terrestrial IoT in ocean, mountain and desert areas. On the basis of analyzing the developing background and situation of LEO IoT, the main application and service characteristics were given, finally the technical challenges and key technologies need to be solved for LEO IoT were discussed.

Key words: LEO IoT, developing background, service characteristic, technical challenge, key technology

1 引言

物联网 (internet of things, IoT) 的概念是在 1999 年由美国麻省理工学院 (MIT) 研究射频标识 (RFID) 的阿什顿 (Ashton) 教授提出的, 当

时它的定义很简单: 把所有物品通过射频标识等信息传感设备按照约定的协议与互联网连接起来, 进行信息交换和通信, 实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理以及支持各类信息应用 (智能交通、智能家居、环境监控管理和大众医疗健

收稿日期: 2019-03-09; 修回日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91738201)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91738201)



康等)的一种网络。目前,物联网作为一个解决物与物、人与物之间互联互通的网络,自1999年提出至今,已经形成了比较完整的技术体系,深入人类生活的众多方面,得到了广泛的应用。从智能家居、智慧城市,再到智慧地球,实现“万物感知、万物互连、万物智能”已经成为人类的共同愿景。在网络世界,2017年物的连接已经超过人的连接,可以说,现在物联网已成为人们日常生活的一部分。军事上,各类武器平台、无人作战系统、战场态势感知、物资管控、后勤保障、军事安防等也都对物联网提出了迫切的需求,军事物联网能够全面提升基于信息系统的体系作战能力^[1-8]。

2 低轨卫星物联网的发展背景和系统特点

2.1 低轨卫星物联网的发展背景

随着物联网应用渗透到人类活动的各个领域,其在一些大范围、跨地域、恶劣环境等数据采集的领域,由于空间、环境等限制,地面物联网无能为力,出现了服务能力与需求失配的现象。究其原因,主要是对于依靠无线接入的物联网来说,除了要有物联网终端外,还必须要有一个由足够多的基站构成的通信网络。但是在地面布设基站及连接基站的通信网却受到诸多的限制^[1,9]:无法在占地球表面大部分面积的海洋、沙漠等区域建立基站;在用户稀少或人员难以到达的边远地区建立基站的成本将会很高;发生自然灾害(如洪涝、地震、海啸等)时地面网络容易被损坏。因此,地面物联网在一些应用场景中表现出了服务能力严重不足的问题。

如果将物联网基站搬到“天上”,即建立卫星物联网,使之成为地面物联网的补充和延伸,则能够有效克服地面物联网的前述不足,并具有下列优势:覆盖地域广,可实现全球覆盖,传感器的布设几乎不受空间限制;几乎不受天气、地理条件影响,可全天时全天候工作;系统抗毁性强,

在自然灾害、突发事件等紧急情况下依旧能够正常工作;易于向大范围运动目标(飞机、舰船等)提供无间断的网络连接等。

在卫星轨道的选择上,相比采用对地静止轨道(GEO)卫星,采用低轨道(LEO)卫星实现物联网,将能够降低传播时延,提高消息的时效性;减小传输损耗,有助于终端的小型化;通过多颗低轨卫星构成星座实现全球无缝覆盖(含两极),提高物联网的覆盖范围;实现见天通,解决特定地形(如GEO卫星视线受限的城市、峡谷、山区、丛林等区域)内通信效果不佳问题;缓解GEO卫星轨道位置和频率协调难度大的问题^[1,9]。

因此,近年来低轨卫星物联网(LEO IoT)得到了研究者的广泛关注。

2.2 低轨卫星物联网的系统特点

相比地面物联网,低轨卫星物联网的主要特点如下所示^[1,10-11]。

(1) 覆盖范围广,可以实现全球覆盖

卫星的覆盖范围半径高达上千千米,多颗卫星组成星座可以满足全球覆盖需求。同时,地面传感器的布设突破地域空间的约束,可任意部署,并且在卫星覆盖区域内,卫星与终端的距离不影响通信成本,也易于向大范围运动目标(飞机、舰船等)提供无间断的网络连接等。

(2) 受天气、地理条件影响小,可全天时不间断工作

由于卫星位于高空,地面的地形条件和天气情况对它的影响相对较小,系统可实现全天时全天候不间断地工作。

(3) 抗毁性强,提高系统可靠性

由于卫星被部署在高空中,地面的地形地势和天气状况对系统的影响较小。同时,用户之间的通信不依赖地面通信网,人为因素的影响也很小,特别地,当发生地震、洪涝、台风等自然灾害时,地面通信网很有可能遭受破坏,无法提供服务,而利用卫星通信手段依然可以

表1 地面物联网与低轨卫星物联网的简要对比

项目	地面物联网	低轨卫星物联网
覆盖范围/基站	数千米级	数千千米
服务终端/基站	<5万	海量, >100万
传输体制	NB-IoT、LoRa	星地融合、5G
技术方案	成熟	国外有成熟案例, 国内正从技术验证走向工程实践
系统稳定性	受天气、地理条件制约, 自然灾害影响比较大	几乎不受天气、地理条件影响, 可全天时全天候工作
应用场景	共享单车、智能家居、智慧城市	物流监控、环境保护、水文监测、“一带一路”等

提供正常的物联网通信服务, 为灾区提供紧急通信及救援服务。

(4) 系统容量大, 可支持海量连接

卫星的可用频带很宽, 加之现阶段被广泛采用的多波束星载天线技术, 提高了系统容量, 可支持海量终端连接需求。卫星物联网更易于对海量的大范围运动目标提供网络连接支持与服务。

表1给出了地面物联网与低轨卫星物联网的简要对比^[1]。

3 低轨卫星物联网的国内外发展现状

3.1 国外低轨卫星物联网的发展现状

国外已经建成了多个能够提供物联网业务的地面物联网通信系统, 其中比较有代表性的有铱(Iridium)、全球星(Globalstar)、轨道通信(Orbcomm)和高级研究与全球观测卫星(ARGOS)等系统, 其中专门提供物联网业务的是Orbcomm和ARGOS系统。

美国的Orbcomm系统于1997年投入使用, 由地面段、空间段以及用户段组成, 上行频段使用148~150.05 MHz频率, 下行频段使用137~138 MHz频率, 馈电链路采用OQPSK调制方式, 用户链路采用SDPSK调制方式。系统中每颗卫星都安装有一个可提供4 800 bit/s的下行用户链路发射机和多个2 400 bit/s的上行用户链路接收机。目前, Orbcomm系统已经广泛应用于交通运输、油气田、水利、环保、资源勘探、工业

物联网等领域。

ARGOS系统由法国和美国联合建立, 该系统利用低轨卫星传送各种环境监测数据, 并对测量仪器的运载体进行定位, 为高纬度地区的水文、气象监测仪器提供了一种很好的通信手段。ARGOS在全球大洋中每隔300 km布放一个由卫星跟踪的剖面漂流浮标, 总计3 000个, 组成一个庞大的ARGOS全球海洋实时观测网。ARGOS系统的应用领域包括气候变化监测、海洋与气象监测、生物多样性保护、水资源监控、海上资源管理和保护等。

国外建设中的其他低轨卫星物联网系统如下。

- 加拿大HeliosWire公司计划发射30颗卫星构建空间物联网, 利用S波段30 MHz带宽, 支持50亿个传感器的数据采集。
- 美国开普勒通信公司(Kepler Communications)计划在2023年完成由140颗工作在高度为575 km极轨道上的纳卫星构成的空间网络部署, 分3个阶段建设, 第一颗试验卫星于2018年1月19日在中国酒泉卫星发射中心发射。开普勒通信公司的卫星采用3U立方体星结构, 工作在Ku波段(下行10.7~12.7 GHz, 上行14~14.5 GHz), 卫星载荷采用全可重配置的软件定义无线电架构, 使得同一个卫星硬件能够配置成以500 Mbit/s的速率与一个地面站通信, 或分别以1 Mbit/s的速率同时与10个物联



网业务汇聚节点进行通信。

- 澳大利亚舰队空间技术公司 (Fleet Space Technologies) 计划通过构建纳米卫星群帮助全球物联网设备实现低带宽连接, 计划发射超过 100 颗纳卫星, 首批 100 万个终端已经全部预订出去, 预计到 2025 年能为全球 750 亿部物联网设备提供免费的线上链接服务。目前已完成 500 万美元的 A 轮融资。
- 以色列的天空全球公司 (Skyand Space Global) 计划在 2020 年年底前发射约 200 颗纳卫星, 每颗卫星重量不超过 10 kg, 形成一个覆盖全球的网络, 系统工作在 S 波段, 地面终端采用 8 cm 的贴片天线, 能够提供语音、数据和即时消息。

3.2 国内低轨卫星物联网的发展现状

目前, 国内还没有正式投入使用的低轨卫星物联网系统, 但已经提出了很多建设计划, 有的已经启动建设, 其中比较有代表性的是“鸿雁系统”和“行云系统”。

由航天科技集团公司东方红卫星移动通信有限公司负责建设和运营的鸿雁通信卫星星座系统是一个全球低轨卫星移动通信与空间互联网系统, 系统初期将由 50 多颗卫星组成, 最终将由 300 多颗低轨道小卫星组成, 其可在全球范围内提供移动通信、宽带互联网接入、物联网、导航增强、航空数据业务、航海数据业务六大应用服务。其卫星数据采集功能可实现大地域信息收集, 满足海洋、气象、交通、环保、地质、防灾减灾等领域的监测数据信息传送需求, 并可为大型能源企业、工程企业等提供全球资产状态监管、人员定位、应急救援和通信服务。

由航天科工运载技术研究院旗下航天行云科技有限公司建设和运营的“行云系统”计划发射 80 颗低轨道小卫星, 建成一个覆盖全球的天基物联网。根据计划, 80 颗卫星将分 α 、 β 、 γ 3 个阶

段逐步建设系统。其中 α 阶段计划建设由“行云二号”01 星与 02 星组成的系统, 同步开展试运营、示范工程建设; β 阶段将实现小规模组网; γ 阶段将完成全系统构建, 并进行国内以及“一带一路”等国外市场的开拓。

此外, 国内一些民营企业, 如北京国电高科科技有限公司、北京九天微星科技发展有限公司、北京和德宇航技术有限公司等公司, 也在低轨卫星物联网系统建设方面开展了实质性的工作。

4 低轨卫星物联网的应用领域和业务特点

4.1 低轨卫星物联网的应用领域和市场预测

建设低轨卫星物联网是解决目前地面物联网覆盖范围有限这个短板的有效途径。其应用领域包括^[11-12]:

- 海洋、森林、矿产等资源的监视与管理;
- 森林、山体、河流、海洋等地区灾害的监测、预报;
- 深海、远海的海洋监测管理, 海上浮标、海上救生等;
- 交通、物流、输油管道、电网等监控管理;
- 野外环境下珍稀动物的跟踪监测;
- 军事的无人机、导弹、舰船、车辆的协同控制。

近年来, 国内外已公布了一批由低轨小卫星组成的星座, 它们将用于满足日益增长的物联网市场需求。传统上, 这一市场主要通过组合使用卫星固定业务 (FSS) 的甚小孔径终端 (VSAT) 系统和卫星移动业务 (MSS) 的系统 (如 Inmarsat、Orbcomm、Iridium、Globalstar 系统等) 来实现。2017 年 10 月美国北方天空研究公司 (Northern Sky Research, NSR) 针对低轨卫星物联网的市场需求进行了预测^[13], 图 1 给出了其预测的全球低轨道卫星物联网市场的发展趋势。由于目前所有规划中的低轨卫星星座都仍处于建设的起步阶段, 全球几乎没有在轨运营并提供物联网服务的

卫星星座，因此在初期，低轨卫星物联网市场的规模很小，处于千万美元以下级别。但随着各大星座的建成使用，低轨卫星物联网的市场规模将迅速扩大，从2020年的不到2000万美元增长至2027年的1.3亿美元，平均年增长率接近70%。届时，通过低轨卫星物联网获取应用的终端数量将突破370万，在全部卫星物联网终端数量中的占比将达到三成以上。

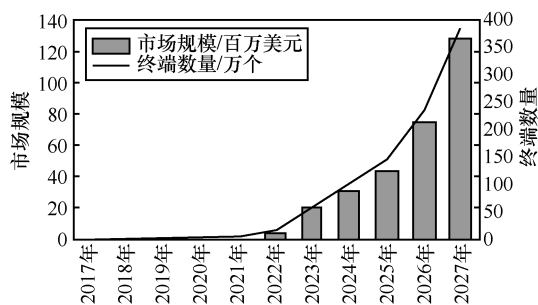


图1 全球低轨卫星物联网市场的发展趋势

4.2 低轨卫星物联网的业务特点

根据业务特点的不同，可把低轨卫星物联网的业务分为三大类^[12]。

- 数据采集：参数采集类，低速、非时敏；图像/视频采集类，高速、时敏/非时敏。
- 数据广播：低速/高速、时敏/非时敏。
- 指挥控制/交互：低速、时敏。

以布设在输油管道、输电线路、海洋浮标、森林草原、边境海岛等区域的传感器监测到的采集类数据为例介绍其业务特点。此类数据由于内容主要是一些格式固定的参数信息，数据量小，通常在比特量级。因此，对传输带宽、传输速率、硬件要求不高，终端容易做到小型化，适合大范围布设，用户数量比较多。不同应用的业务特性差异性比较大，包括：静态参数（管道状态、输电线路覆冰情况、海水温度、洋流速度）、位置或移动特性（浮标运动状态、野生动物运动轨迹等）、图像或视频应用特性（边境时频监控、野生动物图像、海底遥感信息等）。表2给出了典型参数采集类物联网业务的主要模型参数^[14-16]。

表2 典型参数采集类物联网业务的主要模型参数

参数指标		参数值		
激活频率	事件触发	静止参数特性	位置或移动特性	视频应用特性
单次数据量		10~50 byte	10~50 byte	流
平均带宽需求		600 bit/s	600 bit/s	128 kbit/s
移动速度/(km·h ⁻¹)		无	0~20	无
位置精度		无	米级	无
QoS		中	高	高
通信连续性		否	否	是
忙时时段/h		0~24	0~24	0~24

5 低轨卫星物联网面临的技术挑战和需解决的关键技术

与地面物联网相比，低轨卫星物联网的特殊性主要是传输信道不同，即利用低轨通信卫星作为中继来实现物联网信息的传输。因此，采用低轨卫星实现物联网主要面临以下一些技术挑战^[1,10]。

- 一个地面基站的覆盖范围一般在数千米量级，而一颗卫星的覆盖范围通常在数千千米量级，需服务的终端数量巨大。
- 由于低轨卫星围绕地球做高速运动，卫星波束将以每秒几千米的速度掠过地面，不仅引起较大的多普勒频移，而且导致网络连接关系动态变化和频繁切换。
- 地面物联网终端的通信距离一般是千米量级，而卫星物联网终端的信号传播距离通常是几千千米量级，导致非常大的传播损耗和传播时延，对低功耗设计和通信协议带来不利影响。
- 受限于其体积、重量和能源，卫星的频率资源、功率资源和处理能力都受限。此外，低轨卫星物联网也必然面临频谱资源受限、万物互联的安全可信问题等。
- 存在严重同频干扰的情况下如何满足物联网终端小型化、低功耗、低成本、大连接



的要求。由于低轨卫星物联网的波束覆盖范围大，覆盖区域时变动态，必须要做到全球频率协调才能避免同频干扰；如果做不到全球频率协调，争取在重点服务区域进行频率协调，获得干扰保护，从而支持小终端；在没有频率协调的情况下，技术体制上做到既不干扰别人，也不怕别人干扰。

因此，需要针对低轨卫星物联网的技术特点解决以下关键技术。

(1) 低轨卫星物联网体系架构设计

针对物联网低功耗广域 (LPWA) 的应用需求和低轨星座卫星通信系统的技术特点，结合地面蜂窝移动通信和物联网的设计思想和发展趋势，从感知、网络和应用不同层面进行低轨卫星物联网的体系架构设计，重点解决其天地一体和军民融合问题。

(2) 海量用户随遇接入方法

针对低功耗广域 (LPWA) 物联网海量连接的需求，结合卫星资源有限性和共享性的特点，以解决卫星“传输距离远、资源能力有限”与物联网用户“海量连接、低功耗广域”之间的矛盾、满足用户随遇接入的需求为目标，研究海量用户接入方法，重点解决海量连接条件下用户上行链路随遇接入策略和面向全球应用的下行链路用户寻址策略。

(3) 大容量并发信号可靠接收技术

卫星覆盖范围大，一个波束内可能包含大量的终端，信号碰撞是一种常态，多址接入方式必须容忍这种碰撞。采用 SIC 是一种有效的碰撞解决方案，但对于大容量并发信号来说，可能找不到不发生碰撞的信号，即没有干净副本。利用信噪比差异和已知的信号特征参数，通过信号分离技术检测具有最强信噪比的信号，通过信号重构和信号抵消技术，在原有的混合信号中消除已解出的信号，从而降低碰撞对系统性能的影响。

(4) 资源动态管控策略

针对物联网业务种类多、业务特征和工作环境差异性大、电磁环境复杂，难以事先预知的特点，研究资源动态管控策略，满足不同应用、用户和工作环境对于网络通信方式、传输能力、安全性的不同要求；研究面向任务和网络预测的系统资源预留和管理方法，提升网络资源利用率，并满足特殊用户和应用的服务质量需求。

(5) 低轨卫星物联网传输体制

针对电磁频谱资源严重不足和多系统同频工作的现实，面向小型化、低功耗、低成本应用需求，结合当前地面主流物联网技术体制（如 NB-IoT、LoRa）和卫星信号传播距离远、终端分布范围广、应用场景差异性大的特点，通过分析不同用户和应用的终端形态、技术需求、工作环境和应用场景，重点研究频谱共享策略和免配置自适应传输体制，实现对用户的按需覆盖和对资源的高效利用。

(6) 低轨卫星物联网高效可信协议

针对低轨卫星物联网终端分布范围广、信号传播时延长、工作条件不可控、可维护性差等特点，研究适合卫星物联网的高效通信协议，消除较大时延、终端开机时间短、处理能力弱对协议性能的不利影响；提出轻量级安全防护机制，解决终端存储处理能力有限、大部分时间不在线、使用环境不可控对信息安全造成的不利影响。

6 结束语

目前，国内外已经掀起了低轨卫星物联网研究和建设的高潮，国内也发射了很多颗低轨小卫星开展卫星物联网的试验。但受限于技术能力、投资规模等方面的限制，国内发射的这些卫星主要是基于低轨卫星通信系统实现数据采集，其重点在于通信链路和传输通道的设计和建设，而没有从云平台、传输网络、物联网终端 3 个方面进行面向物联网应用的低轨卫星物联网综合设

计, 也没有彻底解决海量低成本小型化终端的随遇接入和长期应用问题, 因此, 我国低轨卫星物联网的发展尚需要在技术上取得突破。

参考文献:

- [1] 张更新, 揭晓, 曲至诚. 低轨卫星物联网的发展现状及面临的挑战[J]. 物联网学报, 2017, 1(3): 6-9.
ZHANG G X, JIE X, QU Z C. Development status and challenges of low-orbit satellite IoT[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2017, 1(3): 6-9.
- [2] 孟勋. 物联网技术综述[J]. 中国科技信息, 2018(23): 46-47.
MENG X. Summary on content networking[J]. China Science and Technology Information, 2018(23): 46-47.
- [3] 陈山枝. 发展5G的分析与建议[J]. 电信科学, 2016, 32(7): 1-10.
CHEN S Z. Analysis and suggestion of future 5G directions[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(7): 1-10.
- [4] 吴军. 大数据和机器智能对未来社会的影响[J]. 电信科学, 2015, 31(2): 7-16.
WU J. Big data, machine intelligence and their impacts to the future world[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(2): 7-16.
- [5] 赵明慧, 张球, 亓晋. 基于区块链的社会物联网可信服务管理框架[J]. 电信科学, 2017, 33(10): 19-25.
ZHAO M H, ZHANG L, QI J. A framework of trusted services management based on block chain in social internet of things[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(10): 19-25.
- [6] 魏颖琪, 林玮平, 李颖, 等. 物联网智能终端技术研究[J]. 电信科学, 2015, 31(8): 146-152.
WEI Y Q, LIN W P, LI Y, et al. Study on key technologies of intelligent IoT device[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(8): 146-152.
- [7] 李洁. 互联网汽车发展及关键技术分析[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 34-38.
LI J. Introduction and critical technology analysis of internet of vehicle[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 34-38.
- [8] 王志宏, 杨震. 人工智能技术研究及未来智能化信息服务体系的思考[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 1-11.
WANG Z H, YANG Z. Research on artificial intelligence technology and the future intelligent information service architecture[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 1-11.
- [9] MAURO D S, ERNESTINA C, GIUSEPPE A, et al. Satellite communications supporting internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1): 113-123.
- [10] QU Z C. LEO satellite constellation for internet of things[J]. IEEE Access, 2017, 5(99): 18391-18401.
- [11] 靳聪. 低轨卫星物联网体系架构研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
JIN C. Research on low-orbit satellite IoT architecture[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [12] 柳罡, 陆洲, 周彬, 等. 天基物联网发展设想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 10(6).
LIU G, LU Z, ZHOU B, et al. Research on development of the space-based internet of things[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 10(6).
- [13] CRISP A. M2M and IoT via satellite[M]. Cambridge: Northern Sky Research, 2017.
- [14] 王海陶, 宋小明, 卢纪宇. 物联网业务特征及业务模型研究[J]. 广西通信技术, 2012(8).
WANG H T, SONG X M, LU J Y. The research on characteristics and service model of internet of things[J]. Guangxi Communication Technology, 2012(8).
- [15] 王计艳, 王晓周, 吴倩, 等. 面向NB-IoT的核心网业务模型和组网方案[J]. 电信科学, 2017, 33(4): 148-154.
WANG J Y, WANG X Z, WU Q, et al. Core network service model and networking scheme oriented NB-IoT[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(4): 148-154.
- [16] 董振江, 董昊, 韦薇, 等. 5G环境下的新业务应用及发展趋势[J]. 电信科学, 2016, 32(6): 58-64.
DONG Z J, DONG H, WEI W, et al. New services and development trend in 5G environment[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(6): 58-64.

[作者简介]



沈俊(1980-), 男, 西安空间无线电技术研究所工程师, 主要研究方向为卫星通信系统设计和星载网络技术。



高卫斌(1967-), 男, 北京跟踪与通信技术研究所副研究员, 主要研究方向为航天测控、卫星通信和卫星遥感。



张更新(1967-), 男, 南京邮电大学通信与信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、深空通信、空间信息网络。