

天基物联网发展与应用关键问题初探

刘永健¹, 李斌成¹, 王妍哲²

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

2.电子科技大学格拉斯哥学院, 四川 成都 611731)

摘要: 分析天基物联网的优势和技术特点, 并简述天基物联网系统现状; 调研卫星通信产业现状, 并结合其他行业的发展、天基物联网适用性以及用户需求增长点, 从宏观产业角度分析天基物联网的市场现状和发展趋势, 并预测市场空间; 分析天基物联网关键技术, 按照接入技术、网络高层、应用层3个层次讨论技术需求和面临的挑战; 从技术层面和市场层面分析天基物联网的发展前景, 提出天基物联网发展与应用中需要关注的关键问题与关键要素, 并对天基物联网的发展建设提出建议。

关键词: 天基物联网; 物联网市场; 物联网技术; 卫星通信

中图分类号: TN393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021011

Key Issues in Development and Application of the Sky-Based Internet of Things

LIU Yongjian¹, LI Bincheng¹, WANG Yanzhe²

1.The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

2.Glasgow College, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China

Abstract: The advantage and technical characteristics of the space-based internet of things(IoT) was analyzed and present status of existing space-based IoT system was brief description. The present situation of satellite communications industry was studied, combined with the development of other industries, suitability of space-based IoT, and users demand growth, in a macro position with current situation and perspective of industry market and development trend of space-based IoT was discussed, and the market space was predicted. The key technology of space-based IoT was analyzed, technical requirements and challenges were discussed according to access technology, networking, application layer. The perspective of development of space-based IoT in technical and market prospect was analyzed, the critical issues and key elements in the development and application of space-based IoT need to focus on were put forward, and made recommendations for the development of space-based IoT.

Keywords: space-based internet of things, internet of things market, internet of things technology, satellite communication

1 引言

物联网(Internet of Things, IoT)的概念自1999年提出以来, 经过二十年来的发展, 取得了广泛的应用, 成为继计算机技术、移动通信技术和互联网技术之后的又一次信息技术革命。物联网技术由于渗透性强、涉及面广, 极大提高了人类认知世界和处理复杂问题的能力, 拓展了信息技术和网络技术的应用, 带动了诸多行业的

变革与飞速发展。

天基物联网利用卫星通信网络的优势, 通过卫星通信网络实现了全球覆盖, 弥补了地面通信网络覆盖能力有限的短板, 提供了全球全天候物联网接入服务, 拓展了物联网更广泛的应用场景。从卫星通信领域来看, 天基物联网实现并迅速发展, 已经成为卫星通信领域增长速度最快的一个分支, 有着非常广阔的发展前景。

2 技术特点和现有系统

2.1 技术特点

物联网是指通过各种信息传感器、射频识别技术、全球定位系统等各种装置,实时采集信息,通过各类网络接入,实现人、机、物的泛在连接,以及任何时间、任何地点对物品和过程的智能化感知、识别、互动和管理。物联网是与现有信息网络无缝融合的、基于标准和互操作通信协议的、具有自组织网络能力的、全球动态的网络基础设施,是互联网基础上延伸和扩展的网络。

物联网协议架构可分为3个层次:感知层、网络层、应用层,如图1所示。其中,感知层主要由物联网终端实现,完成数据采集/控制和网络接入功能,也可以由物联网接入网关、感知延伸网和物联网终端组成一个数据接入核心网络之前的传感器网络;网络层包括现有的各种网络,如互联网、地面移动通信网、卫星通信网以及Wi-Fi、Zigbee等,同时也包括物联网应用支撑层,用来完成物联网信息分发功能;应用层利用数据为用户提供特定的服务,如数据采集、系统监控等,为用户提供物联网应用。

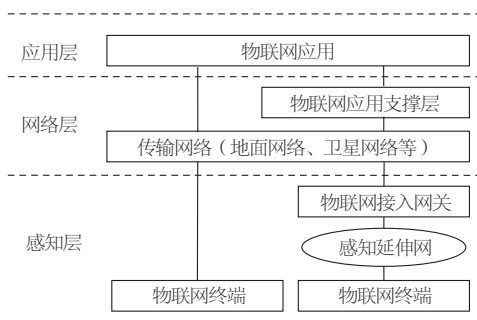


图1 物联网一般协议架构模型

物联网通常具有广域、海量连接、低功率、低带宽等特点,占较大比例的物联网终端的工作特点是数量大、分布地域广、休眠时间长、单次数据传输量小、有低功耗要求等,而现有网络技术体制不能完全支持这些技术要求。因此,物联网对无线通信技术提出了新的需求,以海量连接、远距离、低带宽、低功耗为特点的低功率广域网(Low Power Wide Area Network, LPWAN)快速兴起,其中最具有代表性的有窄带物联网(Narrow Band Internet of Things, NB-IoT)和远距离无线电(Long Range Radio, LoRa)。这些LPWAN技术作为地面物联网专用的技术体制,促进了物联网的快速发展。

地球表面70%的面积是海洋,海洋没有地面通信网络覆盖;陆地也有相当多的区域没有网络覆盖,我国85%以上的陆地面积、95%以上的海洋面积没有地面通信网络覆盖。大量的物联网应用如交通运输、航空、海洋开

发、极地应用等均在陆地无人区和海洋区域,这些应用都需要全球覆盖的通信网络来支持。极地、海上以及陆地无人区等布设基站难度很大,而卫星通信网络全球覆盖、对地形和距离不敏感,不受地理环境、气候条件的限制,因此,最简单有效的方式就是采用卫星通信网络来提供物联网接入服务,天基物联网成为必然选择。

与地面物联网的发展相似,虽然卫星通信系统已经发展得较为成熟,但现有的卫星通信系统仍然不能满足物联网的应用需求。现有卫星通信系统所提供的服务类型主要针对传统的通信业务,包括语音、短消息、低速IP接入和宽带接入。因此,专门针对物联网接入服务的卫星通信系统或分系统开始兴起,如Orbcomm(轨道通信)、Argos(高级研究与全球观测卫星)、Iridium-SBD、Inmarsat-D+等。这些系统或分系统采用专门针对物联网需求而设计的技术体制,满足了天基物联网的迫切需求。

2.2 现有系统概况

目前在轨运行的物联网系统中,有新建设的专门针对物联网的卫星系统,也有增加了物联网接入支持的在轨运行的系统,还有一些系统正在建设中,比较有代表性的系统主要有以下几个。

(1) Orbcomm系统:美国的Orbcomm系统是一个专门针对窄带数据通信的低轨星座,向用户提供远程数据采集、系统监控、车辆船舶跟踪定位等服务,在交通运输、油气田、水利、环保等领域有大量应用。该系统1997年投入使用,目前已经在13个国家建立了16个网关站,为120多个国家和地区提供服务。

Orbcomm系统空间段包括36颗卫星,轨道高度825 km。系统内所有通信均须经过网关站,卫星之间没有星际链路,采用存储转发模式工作。用户链路工作在VHF频段,信号受雨雪影响小。用户与卫星之间上行链路2.4 kbit/s,下行链路4.8 kbit/s。

(2) Argos系统:Argos系统是由法国国际空间研究中心与美国宇航局和海洋大气局核准的第一个全球定位和数据采集系统,主要目标是研究和保护地球环境。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,为水文、气象监测仪器提供良好的通信服务,可对全球范围内的固定和移动平台进行环境数据的采集、处理和分发,在气候变化监测、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领域得到了广泛的应用。

Argos系统由6颗极轨道卫星组成,轨道高度850 km,轨道周期约为100 min,单颗卫星的横扫直径为5 000 km。

(3) Iridium-SBD:铱系统短脉冲数据。铱系统主

要由4部分组成：空间段、系统控制段（System Control Section, SCS）、用户段、关口站段。其中空间段由分布在6个极地圆轨道面的72颗卫星（6颗备用卫星）组成，轨道高度780 km，星际链路速率25 Mbit/s。

SBD（Short Burst Data）系统包括现场应用模块、铱星传输单元、铱星星座、铱星网关、互联网以及应用商应用模块。SBD系统能够在现场设备与集中式主机系统之间、或现场设备之间传输短数据信息，最大有效字节数2 000 byte。在L频段10.5 MHz频带内按FDMA方式划分为12个频带，在此基础上再利用TDMA结构，帧长90 ms，每帧可支持4个50 kbit/s用户连接。

（4）Inmarsat-D+：国际海事卫星组织（Inmarsat）是一个国际卫星移动通信组织，也是世界上最主要的全球移动卫星通信供应商，广泛服务于航海和航空通信，是世界上最成功的卫星通信系统之一。Inmarsat提供B站、C站、D站、M站、BGAN等多种类型的终端和服务。

D+是Inmarsat-D站的增强型，具有位置报告和短信功能。D+终端高度集成化，安装非常简便。通过D+，可以在全球范围内无盲区地追踪船队，并与船队保持可靠的双向短信通信功能；与C站相比，D+去除了邮件和传真功能，但却具有无可比拟的成本优势，非常适合近海船舶和边远地区卡车的定位通信。

（5）我国的天基物联网系统：近年来，“天通一号”系统建成并投入使用，新一代卫星移动通信系统也正在建设中，上述系统均支持天基物联网应用。其中“天通一号”为GEO系统；新一代卫星移动通信系统包括GEO系统和极轨道低轨星座系统，能够实现全球覆盖。

我国的卫星移动通信系统建设采用天地一体化的建设理念，由高轨卫星网络、低轨卫星网络、地基节点网络组成；高轨卫星网络由布设在地球同步轨道的GEO卫星组成，低轨卫星网络由低轨卫星构成极轨道星座，地基节点网络由地面关口站等节点互联形成，并与地面网络互联互通；提供全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信的服务能力，为全球海陆空天各类用户提供网络信息服务。

低轨卫星网络节点配置多种载荷，支持多种业务，主要可分为三大类：窄带业务、宽带业务和行业专用业务。其中窄带业务包括传统的语音、短消息、低速IP接入以及物联网业务；宽带业务支持中高速宽带接入服务；行业专用业务包括AIS/VDES和ADS-B等。

物联网业务采用全新的技术体制，在分析对比现有技术的基础上，充分考虑新一代网络体系架构和未来的应用需求，进行了全新的设计。物联网终端针对不同类型的应用设置了多种工作模式，除常规的天基物联网的工作模式外，还包括快速响应模式等，以支持更多应用场景。

3 应用现状和需求

3.1 卫星通信产业现状

卫星产业链主要包含卫星制造、卫星发射、地面设备制造、卫星运营服务四大环节，其中卫星运营服务业和地面设备制造业是主要的组成部分，近十年来二者占比均为45%。而其中，卫星通信收入占卫星服务业收入的比重高达98.34%，且年增长率超过4%；卫星通信行业增长率略高于卫星产业总体增长水平，而遥感、卫星电视、卫星音频广播等行业年增长在-3%至-1.7%之间。上述市场数据表明，卫星通信应用的普及程度已经很高，因此通信服务收入和地面设备制造（主要是终端）已经成为卫星产业收入最主要的部分，同时，卫星通信应用仍然保持较高增长水平。

卫星通信可划分为3个主要业务类型：语音和窄带业务、宽带业务、物联网业务。在卫星通信市场平均年增长率为4%的前提下，最近十年里，物联网业务的年增长率远高于平均增长率，年增长率超过10%，并趋于更高，卫星物联网两大运营商Inmarsat和Orbcomm的营业年报与此增长率相符。

3.2 需求和市场空间

物联网用户的需求近十年来持续增长，特别是一些行业用户，物联网终端需要工作在地面网络无法覆盖到的区域，对天基物联网提出了迫切需求。其中需求最为突出的行业如下。

（1）气象水文地质监测：随着环境监测和灾害预警需求的提高，气象、水文、地质监测终端数量越来越多，布设也更广，气象和地质监测的终端经常需要布设在无人区，水文和海洋监测需要全球投放浮标；这些终端大多数无法使用地面网络，最佳方式是天基物联网。

（2）野生动物保护：在野生动物保护行业，实时追踪一直是一大难题，陆地野生动物活动区域广泛，且都在无人区，海洋动物和鸟类则可能全球活动，更为精确的动物实时追踪手段，需要依赖天基物联网。

（3）交通运输：交通运输行业是对天基物联网需求最为迫切的行业。在陆地交通方面，一方面是交通基础设施监控，路、桥、隧道、边坡数据点分布量大且广，偏远山区公路、桥梁等现有地面网络无法覆盖或自然灾害高发的区域难以接入监测网络；另一方面是车辆监控，随着交通运输业的发展和跨国道路运输的增长，以及车辆实时精确监控、电子围栏、驾驶员安全管理等技术的提高，对物联网提出了更高的要求。在海洋方面，随着智慧海洋、智能航行概念的提出和实用化，对天基宽带网络和天基物联网都提出了更迫切的需求。物流行

业属于交通行业的一部分，其中，全球集装箱位置跟踪是对天基物联网需求最大的场景。

综上所述，相关行业技术的发展、数字化信息化水平的提高，更加带动和强化了对天基物联网的需求。根据英国市场研究公司ABI Research、美国北方天空研究所（NSR）等的调查和预测数据，到2024年预期将有2 400万台设备通过卫星实现物联网接入，由此产生的卫星物联网产业链将得到进一步的完善与发展。

4 技术需求和挑战

天基物联网弥补了地面物联网的局限性，满足了应用需求，因此得以快速发展。随着天基物联网的快速发展，应用领域也不断拓展，对天基物联网技术层面又提出了新的挑战。天基物联网与地面物联网在技术上有很大差异，主要表现在通信距离远、卫星覆盖域广等方面，相对于地面物联网，天基物联网面临的技术需求和挑战主要表现在以下几个方面。

4.1 接入技术

按照物联网协议架构，接入技术从属于协议架构中的网络层，是天基物联网的核心技术之一。接入技术的实体包括卫星和终端，故技术需求与挑战主要包括以下几个方面。

（1）海量接入：卫星覆盖域远远大于地面网络基站的覆盖域，随着天基物联网应用规模不断扩大，天基物联网终端数量快速增长，网络规模不断扩大，在大容量并发信号的检测分离技术方面，以及接入控制和协议方面，天基物联网面临的技术挑战更为紧迫。

（2）接入策略：由于终端应用本身的差别，对终端特性的侧重点不同，可能对业务实时性要求很低、对终端低功耗要求很高，也可能相反或者折中，或者同一台终端在不同时刻的场景下，需求会有变化。因此，在海量接入技术基础上，从技术体制上还需要设计多种终端接入模式和策略，包括接收系统广播、休眠机制等，以解决不同应用类型或不同应用场景下的接入需求。

（3）天地一体的多模接入技术：天基物联网接入有诸多优势，但从资源合理利用、提高终端性能与降低功耗、提升可靠性、降低费用等多方面考虑，有效利用地面移动通信网络和其他地面无线网络仍然非常有必要，因此值得进一步研究。天地一体的多模接入技术包括具备多模接入能力的物联网终端，也包括应用支撑层技术，即支持天地一体多模接入的物联网信息汇聚与分发技术体制。

（4）终端自组织网络通信：终端间自组织网络在物联网概念上属于感知延伸网，在传统应用中，多个非独

立接入的物联网终端通过感知延伸网，连接到物联网接入网关，再通过物联网接入网关间接接入传输网络。在某些特定的应用场景中，独立接入的终端仍然对终端间的自组织网络有一定需求，一是在边缘计算场景下对自组织网络的需求；二是为提高终端可靠性，在传输发生故障情况下启用终端自组织网络通信，一个终端经由另一个终端中继，接入传输网络。

（5）频谱资源利用率：随着地面移动通信和卫星通信的高速发展，频谱资源紧张的局面进一步加剧，如何在有限的频谱资源内获得更大的系统容量，以及如何与地面系统共享频谱资源，都是目前面临的技术挑战。

（6）终端设计技术：一方面，天基物联网的终端主要工作在难以维护的场景，其应用场景决定了终端在低功耗、免维护、环境适应性等方面，技术需求均高于地面物联网终端；另一方面，随着应用水平的不断提高，地面物联网采用的人工智能、边缘计算等技术，将成为天基物联网终端的技术需求。

4.2 网络高层技术

按照物联网协议架构，网络高层技术仍然从属于物联网协议架构中的网络层。网络高层技术方面的需求主要包括以下几个方面。

（1）标准、互联与融合：目前，天基互联网处于各自发展的状态，一方面由于频率资源的限制；另一方面考虑与其他网系的互联与网络融合，都需要建立天基物联网方面的标准框架。在天基物联网技术不断发展的形式下，保证系统兼容性，促进互联与网间融合应用，是天基物联网行业下一步发展的必经之路。

（2）安全性：天基物联网上下行信道均为无线信道，由于功率和带宽有限，传输能力弱，传输协议通常采用轻量化协议，交互尽可能少，安全性相对不足。随着越来越多的关键应用采用天基物联网技术，如何在有效传输能力下提高安全性，是较为迫切的技术需求。

4.3 应用层技术

应用层技术实际上涵盖了两个层面，一是应用层本身，二是概念上属于网络层的应用支撑层。因此技术需求也包括以下两个方面。

（1）应用层：应用层本身更多建立在地面网络基础上，在5G等地面技术不断提高的形势下，以及云计算、大数据、人工智能等技术的推动下，应用水平和需求也不断提升，相应地对天基物联网应用层的协议体制框架也提出了更高的要求。

（2）应用支撑层：应用支撑层主要完成物联网信息

的汇聚与分发功能,应用支撑层一方面需要满足应用层协议体制框架的要求,另一方面需要考虑天基网络本身的发展演变,如GEO/LEO组合、多星座网系互联与融合等。

因此,应用层技术方面必须基于未来的发展需求,提出一个完整的、安全可信的、可伸缩裁剪的协议体制框架。

5 发展趋势和关键问题

5.1 技术层面

卫星通信产业进入了高速发展的时期,其驱动力一方面来自市场应用需求,另一方面也来自自身技术的发展,更先进的卫星通信技术能够支撑更先进的技术体制和更大的系统规模。发展趋势主要表现在以下几个方面。

(1) 低轨星座占比高:以往通信卫星主要部署在地球同步轨道,高度为36 000 km,低轨星座主要部署在高度为800~1 500 km的近地轨道。由于低轨星座传输时延和链路指标都更理想,不仅对宽带传输有更好的支持,也更符合天基物联网对链路质量和覆盖特性的需求。同时,更密集的低轨星座卫星,使每颗卫星或每个波束的覆盖域更小,这对于海量接入和安全性的技术挑战也有一定缓解。目前全球新推出的计划,均为中低轨星座并以低轨星座为主,包括O3b、OneWeb、Starlink等。

(2) Ka高频段物联网:随着信息技术的发展,边缘计算能力在灾害监测等天基物联网应用场景中显示出越来越强的必要性,物联网终端在进行边缘计算时对数据传输能力的要求比通常情况可能高几个数量级,这就要求物联网接入速率具有非常高的弹性,对传统物联网概念的窄带特征也是一个冲击。受限于频谱资源和接入体制,目前天基物联网使用L/S频段并且技术体制上只能提供窄带接入,考虑边缘计算的高弹性带宽应用需求,采用Ka频段是技术途径之一。天基物联网接入采用Ka频段,也是解决L/S频段资源紧张的途径。因此,Ka高频段物联网技术是未来的发展趋势之一,相关关键技术值得研究储备。

(3) 频谱共享技术应用:提高频谱利用率的技术是通信技术拓展的方向之一。随着卫星通信系统和地面移动通信系统的快速发展,频谱资源紧张的局面进一步加剧,并成为发展的主要瓶颈。如何共享频谱、有效提高频谱利用率,实现卫星波束和地面蜂窝小区的频率复用,是地面移动通信和卫星通信共同面临的问题,并得到了广泛的关注和研究。部分研究工作将认知无线电技术等应用于卫星—地面通信网络中,用以解决频谱共享问题。

(4) 系统架构创新:天基物联网广泛深入的应用,带来多方面技术的拓展。一是在新的天基物联网技术体制方面,从空中接口到高层体系架构不断发展,并与地面移

动通信系统进一步融合,软件定义网络等技术融入天基物联网体系架构,而不局限于传统物联网的技术特性,以提供更强的物联网服务能力;二是在安全性方面,在系统架构发展的同时,安全性设计更多纳入技术体制和协议框架之中;三是在应用层拓展方面,随着人工智能和数据挖掘等技术发展,给物联网应用层带来巨大变革。

物联网应用水平的提高将推动物联网技术进一步发展,这些发展潜力和趋势,给技术研究工作拓展了新的领域和方向。

5.2 市场层面

与计算机、移动通信、互联网技术的加速发展相似,物联网技术也处在不断加速的发展中。从物联网领域看,天基物联网是物联网的重要分支之一,对于某些行业用户的偏远地区数据采集、全球跟踪监控等应用,天基物联网是最佳选择。随着信息化水平的提高,相关行业对物联网应用越来越广泛深入,对天基物联网的需求也更加迫切。从卫星通信领域看,刚刚兴起的天基物联网已经成为卫星通信领域发展最快的一个分支,在目前卫星行业平均年增长率为4%的前提下,天基物联网分支的年增长率已经超过10%。而根据世界清算银行(BIS)研究公司《全球卫星机器对机器(M2M)和物联网(IoT)网络市场、2018–2023分析与预测》报告,全球卫星M2M和物联网市场到2023年将达到321亿美元,年复合增长率将达到32.58%,增长潜力仍然非常巨大。就像计算机、移动通信、互联网带来了电子商务、移动支付等社会生活方式巨大变革一样,未来几年天基物联网的应用水平以及所带来的深远影响很可能超过现在的预计,而不仅仅是天基物联网本身。市场层面发展趋势和关键问题主要表现在以下几个方面。

(1) 卫星部署数量快速增长:截至2019年9月,全球在轨卫星总数为2 218颗,其中2017年和2018年新发射卫星数量都超过350颗,2019年前3季度卫星发射数已达250颗。目前全球计划部署卫星星座公司近30家,卫星部署计划高达2万颗,预期在未来10年内,在轨卫星数量将提高10倍。

(2) 资源紧张加剧:由于卫星移动通信和天基物联网的市场空间,全球互联网公司、初创公司等纷纷申请各自的卫星星座,抢占轨位和频率资源,大量部署具备综合服务能力的卫星,包括窄带业务、宽带业务、物联网接入以及专用业务。因此,频率资源紧张的局面日益加剧,相对来说频谱资源比轨位资源更为紧张,特别是S/L频段更为突出,该频段除了各国卫星系统之间的激烈竞争外,地面系统也在进行激烈的使用权抢夺。ITU为

了不使这些资源成为“纸面卫星”，规定申请者需要在一定年限内发射卫星，预计未来几年内，具备稳定卫星制造和发射能力的公司能够锁定住更多的资源。

(3) 敏捷系统工程与超低成本控制：以Starlink星座为代表，建设过程采用一个多周期快速迭代过程，快速的决策、快速的原型开发和高效的验证，及时发现问题、及时改进，根据最新的用户需求、先进技术的发展，不断更新优化，实现整体最优并极大降低技术和决策风险。通过非航天器件选用、卫星批量化生产与发射部署、可回收运载技术等，大幅降低系统成本，目前成本仅为OneWeb的46%，预期还能降低30%以上。

6 结束语

天基物联网有着广泛的应用前景，近10年来处于加速发展中，并有着巨大的发展潜力。天基物联网的战略意义和巨大的市场空间吸引了各航天强国和有实力的公司在这个领域加紧布局，我国新一代的天地一体化信息网络也正在紧张建设中。在此形势下，应加快技术研发和系统建设，尽快申请轨位和频率资源，确保轨位和频率资源储备。

参考文献：

- [1] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016(3): 30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. The overall framework of space integrated-ground information network[J]. Satellite & Network, 2016(3): 30-36.
- [2] 梅强, 史楠, 李彦骁, 等. 天地一体化信息网络应用运营发展研究[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 95-102.
MEI Q, SHI N, LI Y X, et al. Research on application operation development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 95-102.
- [3] 刘立祥. 天地一体化信息网络的体系结构与协议分析[J]. 重庆邮电大学学报(社会科学版), 2018, 30(1): 9-21.
LIU L X. Analysis of architecture and protocol of space-ground integrated information network[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2018, 30(1): 9-21.
- [4] 肖永伟, 孙晨华, 赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空, 2018(11): 24-32.
XIAO Y W, SUN C H, ZHAO W S. Discussion on the problem of LEO communication constellation system design[J]. Space International, 2018(11): 24-32.
- [5] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. 物联网学报, 2020, 4(3): 3-19.
SHEN X M, CHENG N, ZHOU H B, et al. Space-air-ground integrated networks: Review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19.
- [6] 崔雪伟. 基于NB-IoT的低轨卫星物联网业务流程的研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
CUI X W. Research and design of business process for LEO satellite internet of things based on NB-IoT[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [7] BACCO M, BOERO L, CASSARA P, et al. IoT applications and services in space information networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(2): 31-37.
- [8] 徐冰玉, 韩森. 国际卫星通信标准研究进展[J]. 信息通信技术与政策, 2019(11): 41-44.
XU B Y, HAN S. International standards progresses for satellite communication[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(11): 41-44.
- [9] 周旭, 李泰新, 覃毅芳, 等. 基于边缘智能协同的天地一体化信息网络研究[J]. 电信科学, 2020, 41(7): 71-79.
ZHOU X, LI T X, QIN Y F, et al. Research on future spaceground integrated information network based on edge-intelligence collaborative[J]. Telecommunications Science, 2020, 41(7): 71-79.
- [10] 杨诗琦. 软件定义卫星网络架构设计研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
YANG S Q. Research on software-defined satellite network architecture[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.

【作者简介】



刘永健 (1969-), 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星移动通信。



李斌成 (1974-), 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为卫星通信。



王妍哲 (2000-), 电子科技大学格拉斯哥学院学生。