

天地一体多业务融合的物联网架构和关键技术

魏 肖, 张 景, 全子傲, 郭一诺, 冯 旭
(中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘 要: 为了满足广域大容量低成本物联接入、工业时敏控制等多样化垂直行业物联业务需求, 新一代天基物联网架构设计、技术研究和系统建设等工作正处于广泛研究和试验的阶段。在此背景下, 在分析研究现状和需求的基础上, 提出一种天地一体多业务融合的物联网架构, 开展系统架构设计, 以及多业务融合空中接口传输、导航定位一体和智能在轨边缘计算等技术研究, 并提出一种面向低纬度地区的天地一体多场景天基物联网解决方案, 为未来天基物联网技术发展和系统建设提供参考。

关键词: 天地一体; 多业务融合空中接口; 通信定位一体; 边缘计算

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022026

The Architecture and Key Technologies of the Internet of Things with Integration of Heaven and Earth and Multi Services

WEI Xiao, ZHANG Jing, QUAN Ziao, GUO Yinuo, FENG Xu
China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: In view of the requirements of the new internet of things, such as multi differentiated service, wide area high-capacity access, low power consumption and low cost, the architecture design, technology research and system construction of the new generation satellite internet of things are in the stage of extensive research and experiment. In this context, based on the analyzed of the research status and requirements, an internet of things architecture integrating heaven and earth was proposed. Then, the research on technologies such as multi service integration air interface transmission, communication and positioning integration, and intelligent edge computing were deeply studied. A multi-scene space based internet of things solution for low latitude areas was put forward, which provided a reference for the future development of space-based internet of things technology and system construction.

Keywords: integration of heaven and earth, multi services integration air interface, communication and positioning integration, edge computing

0 引言

近年来地面物联网产业正在快速发展, 随着5G和工业物联网等的部署, 物联网正逐步迈向产业应用高峰期。受限于地域限制、地面基础设施建设成本高、周期长等因素, 传统的地面物联网面向广域海量用户物联传输及广域连续性时敏控制等应用的服务能力有限。天基物联网发展需要应对卫星传输长时延、大多普勒等信道环境的挑战, 以及星地基础设施共享困难等问题^[1-4]。为此, 借助快速发展商用5G/6G移动通信技术、空间电子

与高效计算技术, 在传统天基物联网能力的基础上, 提出天地一体多场景融合的新一代天基物联网系统架构, 设计软件定义资源高效共享的天基物联系统; 基于卫星5G空中接口协议和边缘计算技术, 实现广域海量用户物联传输及广域连续性时敏控制服务等能力, 在有限的卫星基础设施资源条件下, 满足多样化天基物联业务的需求。

1 发展现状与需求分析

由于卫星通信具有覆盖广、全天候工作以及抗毁性

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-06-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2021YFB2900502)

Foundation Item: National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB2900502)

强等优点,卫星物联网在数据采集、监控、跟踪定位、报文传递等方面展现出良好的应用前景。随着商业航天的兴起,国内外纷纷开展了天基物联网系统的建设工作。目前已经建成了多个提供物联网服务的低轨卫星通信系统,典型国外星座包括轨道通信(Orbcomm)卫星系统^[5-6]、高级研究与全球观测(ARGOS)卫星系统^[7]、海事(Inmarsat)卫星系统^[8]。国内星座包括北斗卫星^[9-10]和行云工程^[11]等传统卫星通信系统。以及美国开普勒卫星^[12]、天气星座、和德宇航“天行者”星座等新型天基物联网星座^[1]。但对天基物联体制设计和系统建设的工作仍处于探索阶段,大容量接入、低功耗、多业务支持等问题尚未得到很好的解决。

基于GSMA和中国信息通信研究院的共同预测^[13],中国已经成为全球最大的M2M市场。天基物联网业务分为三大类:数据采集、数据广播、指挥控制/交互,业务特点主要集中在非时敏低速和时敏中低速两种,需要差异化的资源和技术支持,具体总结见表1。

表1 天基物联网业务场景与需求分析

业务类型	业务特点	应用场景
数据采集	非时敏低速	海洋、森林、矿产等资源的监视与管理;交通、物流、输油管道、电网等的监控管理;野生动物的跟踪监测保护
数据广播	时敏/非时敏低速	海上浮标、海上救生等;洪水、地震等自然灾害信息广域分发
指挥控制/交互	时敏中低速	无人机、导弹、舰船、车辆的协同控制

2 天地一体的物联网架构

天地一体的物联网架构包括空间段(物联载荷)、

地面段(关口站、地面物联网)和用户段(物联终端、物联数据服务中心)三大部分,如图1所示,该架构向各类物联用户提供无缝覆盖的、低功耗的端数据通信业务^[14]。在该系统架构下,空间段载荷具有在轨处理能力,拥有星间链路,同时空间段载荷和地面关口站平台采用相同的软件定义可重构架构设计,支持物联网协议的接入网和核心网功能网元以及物联数据智能边缘计算等功能在空间段和地面段灵活按需部署;地面关口站主要完成对用户的管理和地面网的接入,向用户提供各类通信服务,主要负责用户管理、呼叫管理、任务管理、资源调度、互联互通等。它们之间通过运行支撑网络连接在一起,构成一个统一的整体;用户段包括各种地面物联终端设备和物联数据服务中心,其中地面物联终端设备可直接接入卫星物联网或地面物联网获取服务,而物联数据服务中心面向共性化的大客户提供数据服务。

天地一体的物联网系统业务流程如图2所示,包括星上处理和星上转发两种典型模式。物联终端用来进行信息采集、分发、交互等;空间段物联载荷负责信号的转发或在轨处理;信关站进行业务接续、用户接入、分集控制、网络管理以及核心网的用户管理、信令管理、信令处理、移动性管理和业务接入;物联数据服务中心主要面向垂直行业提供数据产品、物联管理控制等信息服务。

3 天地一体的物联网关键技术

3.1 天地一体的物联网技术架构

天地一体的物联网系统基于天地一体支持多业务融

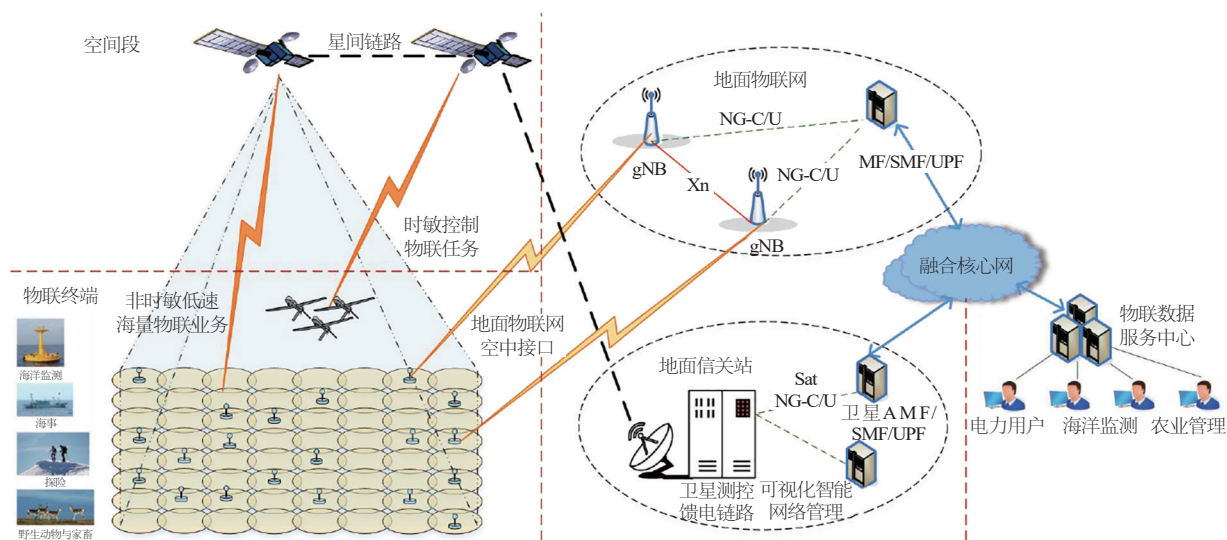


图1 天地一体的物联网架构

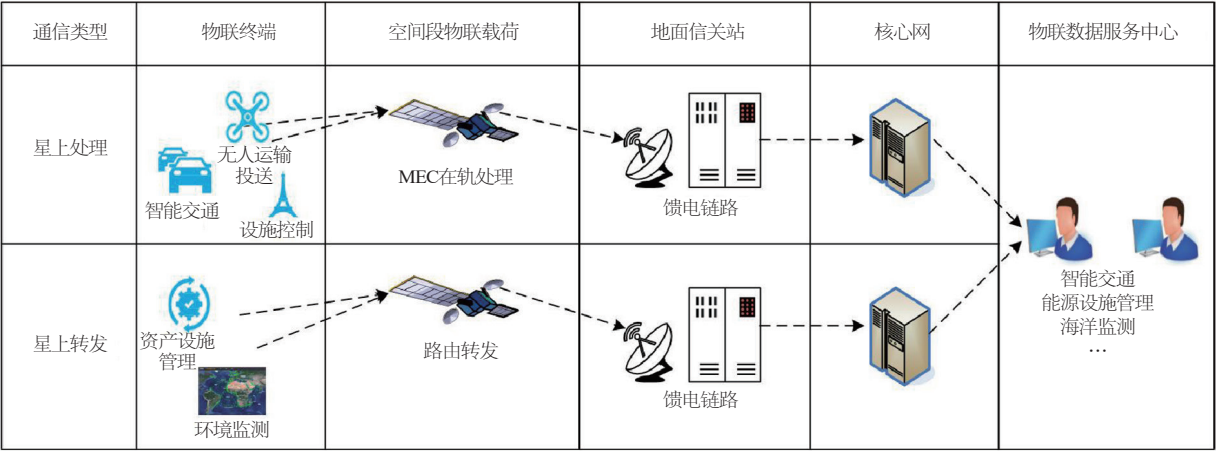


图2 天地一体的物联网系统业务流程

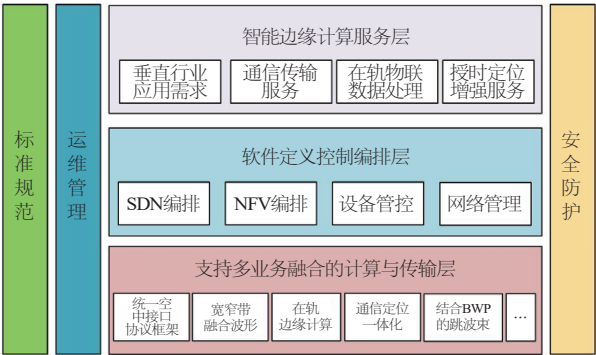


图3 天地一体的物联网技术架构

合的计算与传输层、软件定义控制编排层、智能边缘计算服务层3层架构，实现天地一体物联网的数据采集、传输和控制等信息服务功能，技术架构如图3所示。

支持多业务融合的计算与传输层主要面向多物联网业务场景下的差异化需求，在天地一体的感知、传输、计算（感传算）一体的平台架构下，提供在轨边缘计算与接入传输资源；同时在统一物联网空中接口协议框架下，支持宽窄带融合接入传输、通信定位一体化，满足天地一体多场景多业务应用需求。

软件定义控制编排层是基于软件定义的融合通信网络中重要和关键的功能，通过软件定义控制编排层可以将网络接入传输与星地计算能力抽象，并统一地开放给第三方及用户，实现天地一体融合网络的控制和管理。

智能边缘计算服务层具备在轨边缘计算功能，是地面行业基础云平台的天基延伸，为行业提供能力开放、扁平高效的通信传输、导航定位增强、在轨边缘计算服务，实现天地一体的物联应用平台，赋能N种垂直行业应用。

3.2 多业务融合的物联空中接口传输技术

卫星单位带宽成本和星座规模、单星容量成反比，垂直行业用户数量是支撑星座规模化建设的保证。然而，单个行业对天基物联网容量的需求不足以支撑大规模星座建设，需要采用多物联业务融合的技术路线。5G/6G移动通信软件定义空中接口（SDAI）技术、支持宽窄带切片融合部署的部分带宽（BWP）技术^[15-17]，为以上问题提供了很好的思路，提出的多物联业务融合的软件定义空中接口协议框架如图4所示。

在该协议框架下，MAC层及以上的协议采用软件化设计，基于容器/虚拟化等技术，将协议作为不同的虚拟网络功能实例，通过计算资源虚拟化参数配置实现网络切片计算资源的灵活共享。物理层采用基于BWP结合子带滤波的隔离技术，既可以满足不同业务的安全需求，又可以支持为不同的物联业务配置不同的带宽、波形参数等资源，满足宽窄带物联业务需求，实现一种体制下对不同物联终端类型的支持，增强系统的兼容性和灵活性。

在波束设计方面，将不同的BWP波形灵活映射到不同的波束，提高波束资源的利用率。同时，针对天基物联大容量数据采集与无人智能平台控制两类业务场景具有业务非均匀性和差异性的特点，采用捷变波束资源灵活调度设计是一种比较经济高效的卫星接入资源使用方法。为了避免波束之间的干扰，引入了频率复用因子，较高的频率复用因子可有效避免波束间干扰提升SINR，但降低了单波束的信道带宽和系统容量，在捷变波束系统中，通过合理的波束资源调度与干扰规避策略，实现灵活的带宽资源运用与SINR之间的平衡。

3.3 智能在轨边缘计算技术

数据服务与控制管理是天基物联网的两类核心业

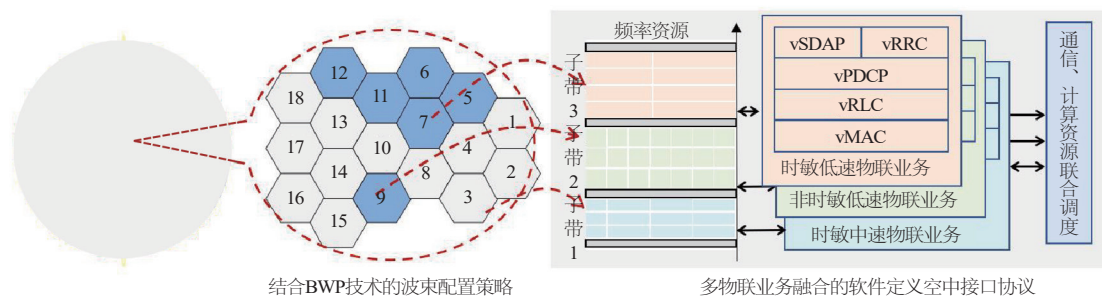


图4 多物联业务融合的软件定义空中接口协议框架

务, 天基物联网系统一方面需要处理海量的物联数据采集传输、汇聚处理以及数据产品服务的推送分发, 另一方面还需要向无人智能平台和能源交通设施等提供时敏高可靠的控制业务^[18-19], 传统的弯管转发星座在面向这些多样化应用方面具有较大的局限性。未来通过对天基物联多源业务模型的深入研究, 将数据计算资源作为天基网络基本资源要素, 联合星地多模接入、承载交换等资源进行联合资源抽象表征, 打破传统卫星网络各个资源维度各自封闭的结构, 从逻辑、部署、服务3个维度设计天地一体的多维融合的网络资源与能力表征模型, 如图5所示, 使得网络资源和业务编排更加灵活, 同时匹配天基物联网高动态特性和多源业务的不确定性。

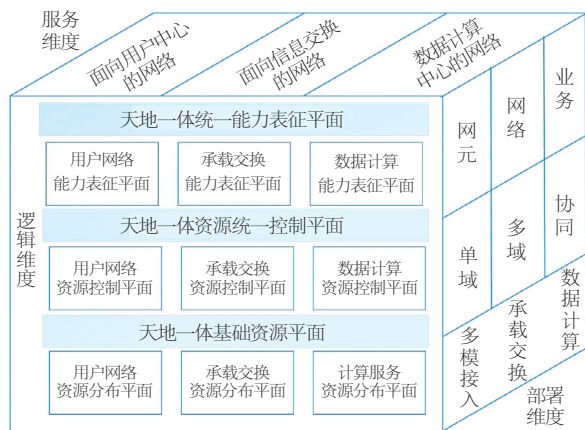


图5 天地一体多维融合的网络能力表征模型

美国太空发展局 (SDA) 在国防空间架构 T1TL (Tranche 1 Transport Layer) 中, 率先提出了将作战管理计算通信指挥模块 (BMC3) 集成到 Tranche 1 的地面段和空间段, 将计算资源作为空间资源维度, 联合网络传输资源进行统一编排调度, 更加高效地满足多样化作战任务的需求; 并且在 “Space Development Agency Tranche

1 Transport Layer Space Vehicles Request for Information SDA-SN-21-0003” 中, 明确提出了 BMC3 在轨计算能力采购需求: 大约 325 W 的平均功耗, 40 Gbit/s 的实时数据处理交换能力, 支持 FPGA/GPU 等异构 AI 计算能力。

未来的天基物联网星座具备在轨边缘计算功能, 是地面行业基础云平台的天基延伸, 为行业提供能力开放、扁平高效的感知、通信、计算服务。在图6所示的天地一体、云边端协同的星地边缘计算架构中, 地面的基础云设施是支撑层, 主要负责基础大数据挖掘与模型生成, 通信协议、算法模型、规则策略等基础服务优化, 以及资源管理、安全审计等运维管理服务。天基边缘云计算是执行层, 天基边缘云接纳垂直行业用户服务请求, 完成连接管理及安全认证, 在服务提供者和服务请求者之间建立交互, 支持扁平高效的资源发布建立、资源更新、资源获取以及释放; 地面基础云将生成的数据服务模型、数据产品、协议算法上注到天基卫星边缘计算平台, 由在轨边缘云向行业用户提供在轨的实时数据融合处理、时敏用户的导航定位增强与平台设施实时控制等服务。低轨卫星边缘云还需要支持数据与计算服务的迁移, 保障服务的广域一致性与连续性。最终实现天地一体的物联应用平台, 赋能 N 种垂直行业应用。

智能在轨边缘计算具有不同于地面边缘计算系统的特征, 受空间辐照引起的单粒子反转影响等因素, 通常需要考虑空间容错计算手段, 保障在轨边缘计算的服务可用度。三模冗余 (TMR) 和错误检测与校正 (EDAC) 数据存储、Flash 刷新等技术是对抗空间单粒子反转效应的有效措施。由于星上资源有限, 因此无法实现全局计算资源的 TMR 与 EDAC 数据存储, 可以对局部敏感电路或者重要的模块应用容错设计。此外, 虚拟机/容器等软备份技术为空间容错计算提供了一种有效的途径。采用三模冗余设计结合虚拟机/容器等软备份技术, 可以有效适应空间环境, 同时支持数据与计算服务的灵活迁移部署, 提供接近地面设施的高性能计算能力。物

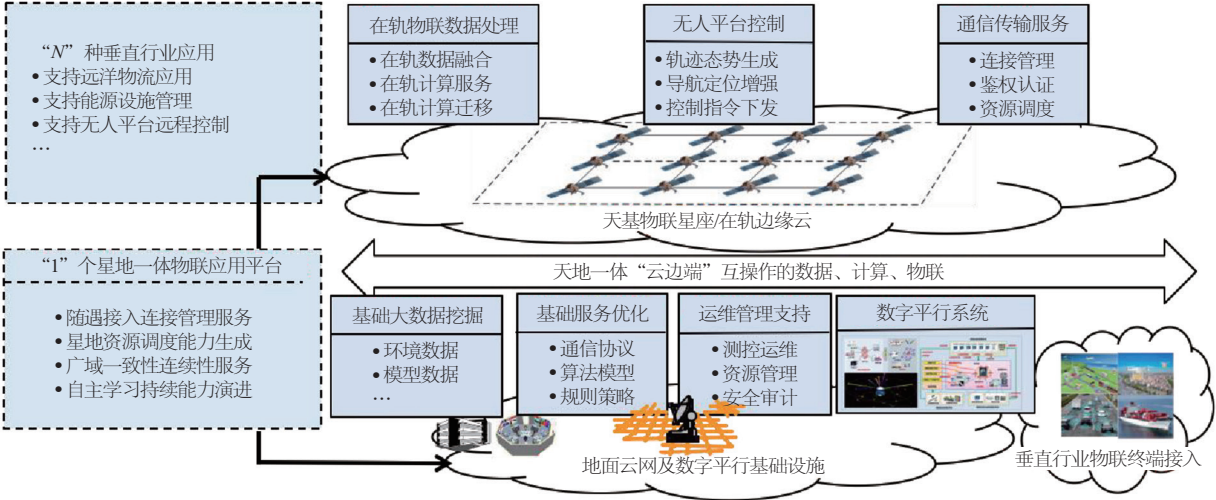


图6 天地一体、云边端协同的星地边缘计算架构

表2 物联网智能在轨边缘计算性能需求

项目	主要技术指标要求	技术途径
异构计算能力	FPGA/CPU/GPU异构计算 AI算力不低于1TOPS/W 支持云原生的算法、协议	商业货架芯片加固
存储能力	Tbit级	商业货架芯片加固
数据处理交换能力	不小于10 Gbit/s	商业货架芯片加固； 需要激光微波链路ISR支持
空间环境适应	-20℃~45℃	工业级器件加固
边缘云操作系统	边缘云构建时间：分钟级 云边迁移部署时间：小于1 h	基于KubeEdge/ K3S进行星地适应性设计部署
低轨600~1 200 km抗辐照能力/单粒子效应	总剂量不小于100 krad (Si) 单粒子翻转率小于10 ⁻¹⁰ /bit/天	FPGA/CPU三模冗余设计； SDRAM EDAC设计； Flash 遥控刷新
故障检测隔离 数据服务迁移备份	故障检测时间：秒级 备份迁移时间：10 s~1 min	板块端口及总线隔离技术、虚拟机、微服务容器技术、高性能轻量化宿主操作系统/虚拟化管理系统

联网智能在轨边缘计算性能需求见表2。

3.4 物联网与导航定位一体化技术

从上述分析的物联应用的现状和未来潜在发展来看，几乎所有的垂直行业天基物联网系统都需要天基定位授时系统的支持，特别是能源设施控制、交通运输、无人智能平台控制等任务关键型行业的物联应用，天基定位系统作为国家战略基础设施的地位将愈发重要。北斗和GPS定位系统是全球使用最为广泛的定位系统，但是在面向物联网行业应用场景时仍然存在以下两个问题。

一是现有的定位手段主要依靠北斗和GPS定位，精度一般能达到5 m左右，适用于室外较开阔的应用场景，但是单一手段的定位精度容易受到环境的影响，并且定位的精度和定位信息更新周期不能满足无人平台控制、高精度基础设施监测等物联应用提出的亚米级甚至厘米

级的定位需求。二是现有的北斗系统和GPS卫星定位系统可靠性和可信度容易受到环境的影响以及非合作干扰。2021年美国发布新版“美国天基定位导航授时政策”太空政策7号令，明确使用国外天基定位导航授时服务等相关规定，提出“基于弹性天基定位导航授时和卫星通信的导航战态势感知计划”将导航战提升至重要关注地位，未来需要研究具有高可信度和可靠性的定位服务实现机制。表3是本文参考3GPP 5G NR对IoT业务导航定位精度需求^[20]，提出的天基物联应用对导航定位精度的需求。

从上述的需求可以看出，构建通信导航（通导）一体、天地一体的低轨天基物联网未来可作为北斗卫星系统的能力的补充。如图7所示，网络侧设施包括北斗卫星提供全网的定位授时基准；地基导航定位增强系统用于修正导航定位信号误差，并将修正信息通过地面基站和物联网卫星发送给用户终端；物联网卫星和地面基站提

供网络化的基于观察信号到达时间差（OTDOA）普通精度，与基于载波的相位变化的高精度测距和相位信息，物联网卫星和地面基站的定时同步基准统一溯源至北斗卫星。卫星到用户终端的距离可以用式(1)表示。

$$r_i(k)=\lambda N_i+\lambda \phi_i(k)-\left(w_r+S_i\right) \lambda-c\left(\tau_r+\tau_a^i\right)$$

(1)

其中， N_i 是在定位计算期间的整周期模糊度； $\phi_i(k)$ 是系统测量的相位差； w_r 、 S_i 分别是接收机产生的相位噪声和多径产生的相位测量误差； τ_r 、 τ_a^i 分别是接收机的时钟偏差和第*i*颗卫星的时钟偏差。

考虑到星地的多径误差、卫星和终端的时钟偏差等因素，需要设置地基导航增强站，增强站定位管理服务器（LMF）收集北斗导航星座与物联星座卫星的定位测

量信息，形成误差数据模型。在需要高精度定位服务的应用场景，地基增强站可以消除多径误差、时钟偏差误差影响，计算用户终端的位置，并将结果发送给用户终端。地基增强站也可以将误差数据模型上传到星载边缘计算平台上的LMF，通过卫星在轨边缘计算终端的精确位置，提高位置信息更新的实时性。

3.5 物联网频率和天线技术

国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）下设秘书处、发展局、标准化局和无线电局等，其中无线电局按照《无线电规则》的规定，负责全球无线电的业务、频率和规则等技术方面的管理^[21-23]。ITU

表3 天基物联应用对导航定位精度的需求

业务	定位精度	可用度	更新周期	一体化需求	应用领域
1	水平5~10 m; 垂直3 m	95%	秒级	网络化自主定位	导航路径规划、陆地/海上物流仓储管理
2	水平5 m; 垂直3 m	95%	1 s	网络化自主定位/增强	郊区道路导航、驾驶辅助
3	水平1 m; 垂直2 m	99%	1 s	网络化自主定位/增强	密集城区道路导航，驾驶辅助
4	水平0.3 m; 垂直2 m	99.9%	50 ms	网络化自主定位/增强	基于在轨边缘计算的公路自动驾驶
5	水平0.2 m; 垂直0.2 m	99.9%	50 ms	网络化自主定位/增强、用户端惯性制导、雷达	基于在轨边缘计算的无人机、无人车船控制、无人智能协同
6	水平0.01 m; 垂直0.01 m	95%	分钟级	网络化定位增强	桥梁设施、大型建筑、山体滑坡监测

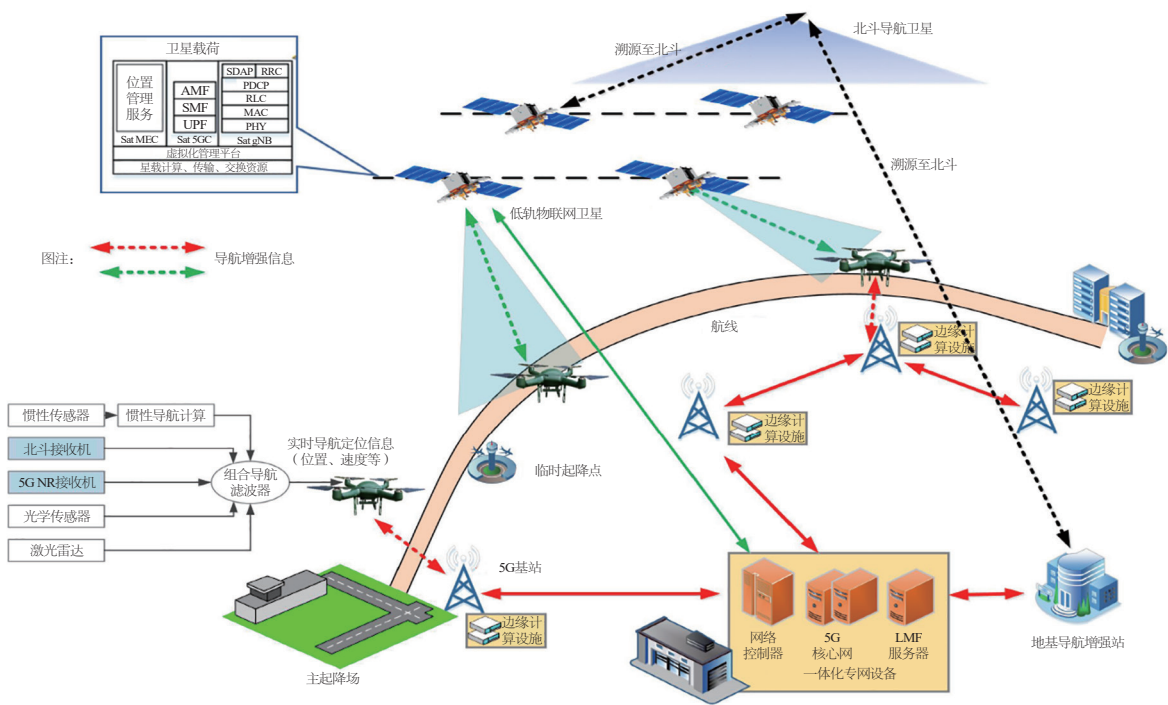


图7 通导一体的低轨天基物联网系统

表4 ITU对卫星通信频率的规划

频段	上行	下行	业务种类
L	1 610~1 626.5 MHz(16.5 MHz) 1 626.5~1 660.5 MHz(34 MHz) 1 668~1 675 MHz(7 MHz)	2 483.5~2 500 MHz(16.5 MHz) 1 525~1 559 MHz(34 MHz) 1 518~1 525 MHz(7 MHz)	MSS
S	2 025~2 110 MHz(85 MHz)	2 200~2 290 MHz(90 MHz)	SOS
S	1 980~2 010 MHz(30 MHz)	2 170~2 200 MHz(30 MHz)	MSS
Ext.C	6 425~7 075 MHz(650 MHz)	3 400~3 700 MHz(300 MHz)	FSS
C	5 850~6 425 MHz(575 MHz)	3 700~4 200 MHz(500 MHz)	FSS
X	7 900~8 400 MHz(400 MHz)	7 250~7 750 MHz(400 MHz)	FSS
Ku	13.75~14.8 GHz(1 050 MHz)	10.95~11.2 GHz, 11.45~11.7 GHz 12.25~12.75 GHz(1 000 MHz)	FSS、BSS
Ka	27.5~31 GHz(3.5 GHz)	17.7~21.2 GHz(3.5 GHz)	FSS、MSS
Ka	22.55~23.55 GHz, 24.45~24.75 GHz, 25.5~27.5 GHz, 2.3~33 GHz		ISS
Q	42.5~43.5 GHz, 47.5~51.2 GHz, 51.4~52.4 GHz	37.5~42.5 GHz	FSS、MSS、BSS

对卫星通信频率的规划见表4。

理论上VHF、L/S频段由于空间传播损耗小，基本不受雨衰等影响，是天基物联网应用的理想频段。国外的Orbcomm、Iridium、GlobalStar等星座系统，已经申请使用大部分的VHF、L/S授权频率资源。未来增量的天基物联网系统如果在UHF、S的非授权频段上部署，容易受到地面非合作系统干扰，服务质量没有保障。

近年来卫星相控阵天线的进步，结合低信噪比解调能力，使得在微波频段部署低功耗卫星物联网业务成为可能。目前国外的低轨星座SpaceX和Telesat大都采用相控阵技术^[24-25]。Ku/Ka相控阵捷变窄波束一方面可实现对用户密集区域的集中服务以及干扰抑制，可实现有限通信频谱资源在多个波束间复用，极大提升天基系统容量；另一方面通过灵活波束重构，在提升系统灵活性和韧性的同时更容易实现多业务支持，进一步降低建设成本。例如对于大容量数据采集应用场景，可以采用捷变多波束扫描的方式，采用FRF=1的参数配置，设计随遇接入与业务传输一体化的捷变波束策略，实现大容量用户数据采集与较高频谱效率。对于无人智能平台控制应用场景，可以采用捷变凝视波束跟踪的方式与FRF=（2，3）的参数配置，支持多星多波束接入传输协作和移动性管理等技术，以及低轨物联星座对高动态目标的时敏信息支援保障。

对于低轨卫星物联网Ku/Ka频段多波束相控阵，卫星相控阵天线通常需要达到60°左右。终端天线则根据不同的应用需求调整，例如对于无人机等无人智能平台时敏控制物联终端（类似5G NTN系统的eMTC业务终端），需要采用与卫星相控阵天线能力接近的捷变可调窄波束的相控阵天线；对于传感数据采集物联终端（类

似5G NTN系统的NB-IoT业务终端），需要采用低成本宽波束的微带天线设计。Ku/Ka频段的相控阵天线单元的间距通常在1 cm以内，此时对于多波束天线而言，其集成度将会更高，在具体实现上，可以采用高集成度的收发组件模块拼接的方式来实现不同阵列规模的相控阵天线的支持。

4 一种天地一体物联网解决方案

我国北纬30°以南地区具有多样化的自然地理条件，拥有丰富的海洋、森林资源。目前尚不平衡的区域生产经济结构，对发展天地一体的天基物联网信息基础设施提出了迫切需求。面向低纬度地区天基物联网覆盖需求，开展天基物联网解决方案设计，在星座设计方面，提出采用1个赤道圆轨道星座和3个倾角为25°的Walker星座设计，具体设计见表5，共71颗卫星，考虑到范艾伦带对卫星的影响，选择将赤道轨道布置于1 261 km的高度。赤道圆轨道卫星将波束俯仰角指向北半球，以增加对北半球的覆盖能力，同时避免对高轨卫星的干扰。该星座设计结合运用赤道圆轨道星座和低倾角Walker星座轨道形成覆盖能力互补。仿真验证表明，上述的低纬度地区天基物联网星座可对北纬30°以南地区一重无缝覆盖；对北纬23°以南地区实现两重覆盖，并且保证至少1颗星俯仰角大于32.29°。

链路预算分析表明，在上述低纬度地区天基物联网星座系统的支撑下：车辆/无人机/无人船通过配备类eMTC的物联终端，采用20 cm等效口径阵列天线，卫星单波束可支持对数十个甚至数百个终端进行实时控制与中低速率数据回传；对于低功耗传感数据采集类终端，可采

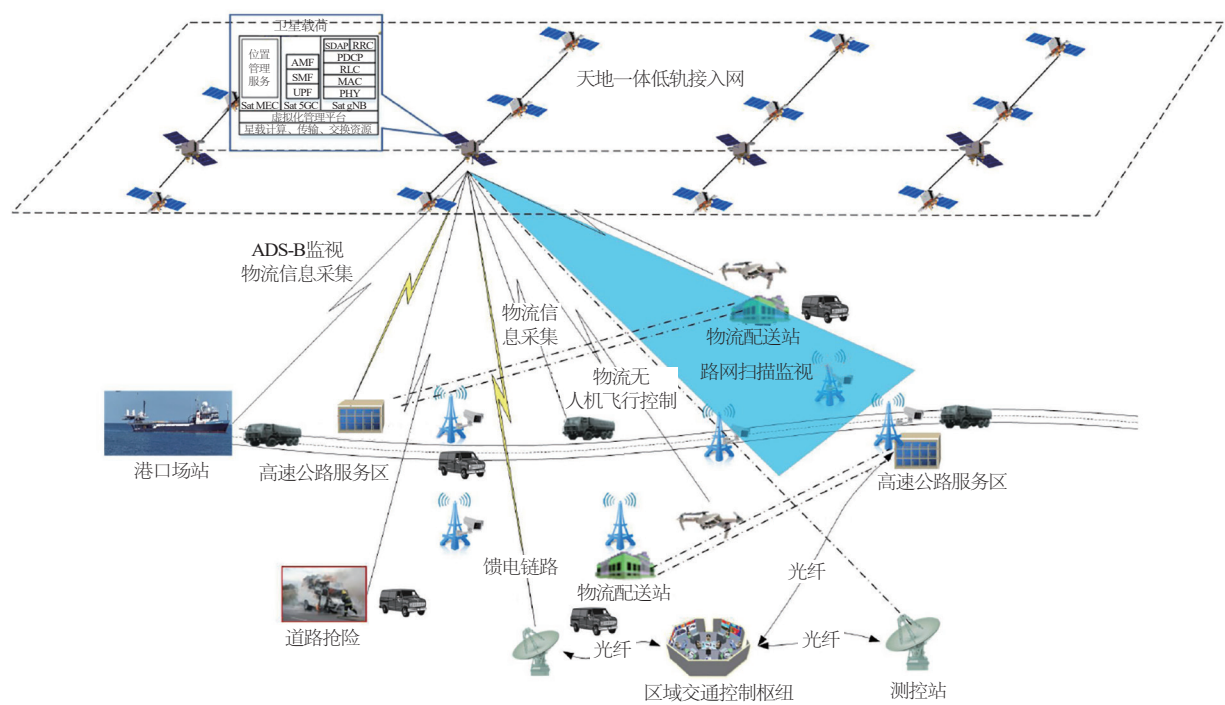


图8 低轨天基物联网系统在立体交通运输投送中的应用

表5 一种面向低纬度地区天基物联网的星座设计

星座参数		参数值
Walker轨道	轨道高度	1 261 km
	轨道倾角	25°
	轨道数量	3个
	单轨卫星数量	17颗
赤道轨道	轨道高度	1 200 km
	波束俯仰角方位角	70° /270°
	轨道数量	1个
	单轨卫星数量	20颗

用3 cm等效口径微带天线，终端发射功率为0.5~1 W，卫星单波束在过顶服务时间内（5 min）可支持4.8万个用户短数据采集。具体业务模型描述与链路预算见表6。

结合本文中所介绍的多业务融合空中接口传输、导航定位一体和智能在轨边缘计算等技术，通过低轨卫星物联网与区域内的地面网络设施协同，可以建立支持低纬度地区陆、海、空信息走廊，实现热点区域内物联终端的随遇入网，数据上云；支持开展陆海空交通运输物流数据采集，交通设施网络与运输平台的信息采集、在轨态势融合处理分发，无人化运输平台时敏控制，应急抢险指挥调度等应用，如图8所示。

表6 业务模型描述与链路预算

参数	时敏控制类 中低速上行	时敏控制类 中低速下行	传感数据采集类 低速上行（扩频）
工作频段/GHz	25~30	17~21	25~30
星地平均距离/km	2 500		
平均路径损耗/dB	189.34	185.51	189.34
其他损失/dB	12（大气衰减、馈线损耗、天线对准误差等）		
EIRP/dBW	36.15	50.37	10.376
发射增益/dB	33.15	42.37	15.88
接收 G/T（dB/K）	17.31	0.40	17.31
NF/dB	5	5	5
K（dBW/kHz）	-228.6		
信道带宽/MHz	100	100	10
C/N ₀ (dB·Hz)	83.70	84.86	57.93
C/N(dB)	3.70	4.86	-12.07
平均频谱效率 （bit/Hz/s）	约1.32	约1.47	约0.03
单波束业务能力	支持数十到数百个用户时敏控制中 低速（小于1 Mbit/s）数据传输业务		约4.8万个用户/5 min 数据采集

接收 $G/T=Ga-NF-10\log(T_0+(T_a-T_0)/(10^{0.1NF}))$ ，其中： T_0 是环境温度，通常取290 K， G_a 是接收天线增益； T_a 是天线温度，通常取290 K（天线增益0 dBi），取150 K（天线增益大于30 dBi）； $C/N_0(\text{dB}\cdot\text{Hz})=EIRP-\text{路径损耗}-\text{其他损耗}-K+G/T$ 。

传感数据采集传输业务模型：

数据包大小 (kbit·s ⁻¹)	一次成功 用户比例	重传一次 用户比例	重传两次 用户比例	接入协议 效率	波束服务 时间/s
0.8	60%	30%	10%	0.6	300

5 结束语

物联网业务正逐步迈向生产高峰期，天基物联网具有广域服务连续性、泛在弹性等优势，可与地面物联网形成优势互补。然而，天基物联网面临业务多样动态变换与建设成本高等因素的挑战，软件定义融合空中接口、在轨边缘计算、通导一体化等技术为星地基础设施资源的高效利用提供了一个解决途径。在此技术基础上，本文提出了一种天地一体多业务融合的新型物联网架构，开展了系统架构设计，以及技术体系和关键技术的研究，提出一种面向低纬度覆盖的物联网解决方案，有效满足多物联业务支持、广域大容量接入和低功耗低成本等新型物联网需求。

参考文献：

- [1] 张景, 魏肖, 吴云飞, 等. 天基物联网技术研究与发展综述[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 543-548.
ZHANG J, WEI X, WU Y F, et al. Research of technology and development in satellite Internet of Things[J]. Radio Communications Technology, 2021, 47(5): 543-548.
- [2] 刘永健, 李斌成, 王妍哲. 天基物联网发展与应用关键问题初探[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 81-86.
LIU Y J, LI B C, WANG Y Z. Key issues in development and application of the sky-based Internet of Things[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 81-86.
- [3] 王晓海. 天基物联网技术发展与应用研究[J]. 卫星与网络, 2017(8): 64-69.
WANG X H. Research on the development and application of space-based internet of things technology[J]. Satellite & Network, 2017(8): 64-69.
- [4] QIAN Y B, MA L, LIANG X W. The performance of chirp signal used in LEO satellite Internet of Things[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(8): 1319-1322.
- [5] 陶孝锋, 李雄飞, 翟继强, 等. Orbcomm星座卫星系统发展历程及其最新动态研究[J]. 空间电子技术, 2015, 12(2): 29-36.
TAO X F, LI X F, ZHAI J Q, et al. The research of orbcomm constellations about its development and new dynamic[J]. Space Electronic Technology, 2015, 12(2): 29-36.
- [6] 詹亚平, 华成明. ORBCOMM商用低轨道小卫星短数据通信系统[J]. 电子技术, 2001, 30(2): 24-27.
ZHAN Y P, HUA X M. ORBCOMM commercial low-orbit small satellite short data communication system[J]. Electronic Technology, 2001, 30(2): 24-27.
- [7] 张少永, 林玉池, 熊焰. Argos卫星发射平台研究与Argos通讯系统应用[J]. 海洋技术, 2005, 24(1): 25-28.
ZHANG S Y, LIN Y C, XIONG Y. Study on Argos transmitter terminal and its applications[J]. Ocean Technology, 2005, 24(1): 25-28.
- [8] 张华冲, 吴永欣, 杨贤, 等. 海事四代卫星网络架构及新业务分析[J]. 计算机与网络, 2021, 47(13): 58-62.
ZHANG H C, WU Y X, YANG X, et al. Analysis on inmarsat-4 satellite network architecture and new business[J]. Computer & Network, 2021, 47(13): 58-62.
- [9] 陈洪武, 李洪亮. 基于北斗卫星导航系统在物联网中的应用[J]. 全球定位系统, 2016, 41(4): 110-116.
CHEN H W, LI H L. Application of BeiDou navigation system based on Internet of Things[J]. GNSS World of China, 2016, 41(4): 110-116.
- [10] 梁俊斌, 邓雨荣, 郭丽娟, 等. 基于卫星物联网的输变电设施远程监控研究与应用[J]. 电力建设, 2013, 34(9): 6-9.
LIANG J B, DENG Y R, GUO L J, et al. Research and application of remote monitoring for power transmission and transformation facilities based on satellite Internet of Things[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(9): 6-9.
- [11] 杜利, 史俊松. 行云工程在八大重点行业的典型应用[J]. 卫星应用, 2020(3): 66-72.
DU L, SHI J S. Typical applications of Xingyun engineering in eight key industries [J]. Satellite Application, 2020(3): 66-72.
- [12] 沈俊, 高卫斌, 张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019, 35(5): 113-119.
SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5): 113-119.
- [13] 中国信息通信研究院, GSMA. 中国5G垂直行业应用案例[R]. 2020.
China Academy of Information and Communications Technology, GSMA. Application cases of 5G vertical industries in China[R]. 2020.
- [14] 魏肖, 成俊峰, 王静贤, 等. 基于5G技术的低轨卫星物联网技术[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 14-21.
WEI X, CHENG J F, WANG J X, et al. Research on low-orbit satellite IoT based on 5G technology[J]. Mobile Communications, 2020, 44(3): 14-21.
- [15] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non terrestrial networks: TR 22.811[S]. 2018.
- [16] 3GPP. Study on using Satellite Access in 5G: TR 22.822[S]. 2018.
- [17] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2019.
- [18] 王鹏, 张佳鑫, 张兴, 等. 低轨卫星智能多接入边缘计算网络: 需求、架构、机遇与挑战[J]. 移动通信, 2021, 45(5): 35-46.
WANG P, ZHANG J X, ZHANG X, et al. Low earth orbit satellite intelligent multi-access edge computing networks: requirements,

- architecture, opportunities and challenges[J]. Mobile Communications, 2021, 45(5): 35-46.
- [19] 张飞, 陈小前, 于帅, 等. 基于天基边缘计算的在轨智能技术[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(4): 19-24.
- ZHANG F, CHEN X Q, YU S, et al. On-orbit artificial intelligence based on space edge computing[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(4): 19-24.
- [20] 任斌, 张振宇, 方荣一, 等. 面向5G-Advanced无线系统的高精度定位技术[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 65-73.
- REN B, ZHANG Z Y, FANG R Y, et al. High-accuracy positioning for 5G-Advanced wireless systems[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 65-73.
- [21] 李国强, 徐启, 郭凯. ITU标准及其卫星轨道与频率资源申请规定解析[J]. 中国标准化, 2020(11): 224-228.
- LI G Q, XU Q, GUO K. Analysis on ITU standards and rules for application of spatial orbit-spectrum resources[J]. China Standardization, 2020(11): 224-228.
- [22] 夏春利. ITU空间频率轨道资源分配与协调规则研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2011, 13(6): 91-96.
- XIA C L. Study of the ITU spatial orbit-spectrum resources allocation and coordination rules[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2011, 13(6): 91-96.
- [23] 李芑芑, 郑娜, 佘沛川, 等. 全球5G频谱研究概述及启迪[J]. 电讯技术, 2017, 57(6): 734-740.
- LI P P, ZHENG N, KANG P C, et al. Overview and inspiration of global 5G spectrum researches[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(6): 734-740.
- [24] 王韵涵. 2021年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2022(2): 42-47.
- WANG Y H. Overview of the development of foreign communication satellites in 2021 [J]. Space International, 2022(2): 42-47.
- [25] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.

LIU X G, QIAN Z S, ZHOU J H, et al. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite Internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.

- [26] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.

[作者简介]



魏肖（1991—），现就职于中国电子科学研究院，主要研究方向为星地融合网络接入技术、卫星物联网传输技术、卫星5G接入技术等。



张景（1974—），现就职于中国电子科学研究院，研究员级高级工程师，主要研究方向为基于5G移动通信技术体制的卫星无线接入网技术、基于4G/5G技术体制的时敏专网、移动边缘计算技术在行业专用中的应用等。



量子傲（1996—），现就职于中国电子科学研究院，主要研究方向为卫星星座设计、星地融合网络接入技术等。



郭一诺（1996—），现就读于中国电子科学研究院，主要研究方向为非正交码本优化设计、星地融合随机接入和信号检测技术等。



冯旭（1987—），现就职于中国电子科学研究院，高级工程师，主要研究方向是天地融合网络和无线通信。