

空间物联网的分布式数据存储与传输技术

张钦宇, 顾术实, 王野, 薛佳音

(哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055)

摘要: 从物联网的基本概念和相关技术出发, 追踪当前世界低轨通信星座系统和我国构建天地一体化信息网络的发展趋势, 提出了空间物联网的基本概念。空间物联网与传统卫星物联网不同, 不仅是利用卫星中继解决远程的机器通信问题, 而是在天地一体化信息网络架构下的一种泛在物联网体系, 是地面物联网在全球立体空间层面的拓展, 是多种信息技术融合而成的综合性应用服务平台。总结了海量数据业务特征下的空间物联网面临的主要挑战, 包括系统负载过大、数据损毁丢失、链路频繁中断、能耗开销过高等数据存储与传输问题。进而提出了建立面向空间物联网应用服务的星地一体化分布式存储与传输系统的设计思路, 介绍了关键技术, 实现了海量信息业务的安全保障和跨域互联。最后, 对未来空间物联网的研究热点方向提出了展望和思考。

关键词: 卫星物联网; 天地一体化网络; 空间物联网; 分布式存储; 分布式传输

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2018.00072

Distributed data storage and transmission for space Internet of things

ZHANG Qinyu, GU Shushi, WANG Ye, XUE Jiayin

School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology(Shenzhen), Shenzhen 518055, China

Abstract: Based on the concepts and related techniques of Internet of things (IoT), tracking the development tendency of the satellite IoT and LEO constellation communication system abroad, and the deployment of the integrated satellite-terrestrial information network in China, the concept of space Internet of things (Space IoT) with its framework and main characteristics was proposed. Space IoT has the different concept compared to the traditional IoT, not just using the relay satellite to implement remote machine-to-machine communication. Space IoT is a ubiquitous IoT system under the integrated satellite-terrestrial information network architecture, and an expansion of the terrestrial IoT in the global three-dimensional world, and a service and application platform of multiple information technologies. With the recently era of big data, the space IoT has to face some data storage and transmission problems, such as excessive system load, data loss, frequent link interruption, high energy consumption, etc. Establishing a space-oriented IoT integrated distributed storage and transmission system was to meet the requirements of security guarantee and cross-domain interconnection with massive information businesses. Development status of related technologies were illustrated. At last, the prospect and thought of the future research of space Internet of things were presented.

Key words: satellite Internet of things, integrated satellite-terrestrial network, space Internet of things, distributed storage, distributed transmission

收稿日期: 2018-08-09; 修回日期: 2018-10-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61831008, No.61525103, No.61701136, No.61501140); 中国博士后科学基金资助项目 (No.2018M630357)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61831008, No.61525103, No.61701136, No.61501140), Supported by China Postdoctoral Science Foundation (No.2018M630357)

1 物联网与卫星物联网

“物联网”概念首次出现于 1999 年，MIT 的 Kevin Ash-ton 教授基于早期自动射频识别（RFID）和传感器网络（WSN）技术的应用，提出了“物与物皆可相连的互联网”的设想^[1]。2009 年，国际电信联盟（ITU）正式完善并规范了物联网的概念和内涵，即通过二维码识读设备、射频识别装置、红外感应器、全球定位系统和激光扫描器等信息传感设备，按约定的协议，把任何物品与互联网相连接，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理的一种网络^[2]。物联网集成了传感器、通信和计算等多个信息技术领域的研究成果，将成为未来新一代信息通信技术的重要分支，物联网技术的发展历程如图 1 所示。

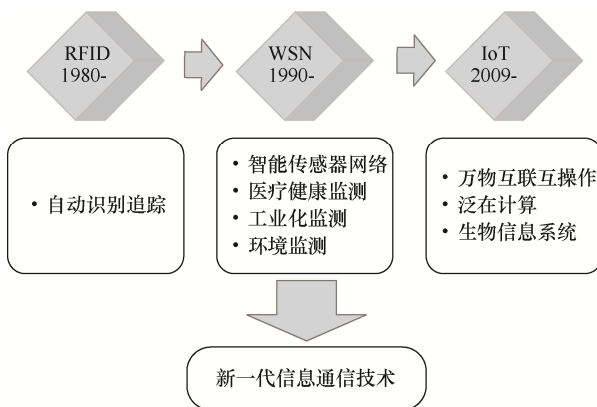


图 1 物联网技术的发展历程^[3]

近年来，依靠地面互联网、移动网的基础设施建设以及智能设备的普及化，物联网技术的发展十分快速，在医疗健康、交通运输、智慧农业、智能仓库、智能家居和环境保护等诸多应用方面取得了较大突破^[3]。与此同时，大数据^[4]、云计算^[5]、人工智能^[6]等技术与物联网进行了相互融合，更加促使相关物联网产品的蓬勃发展，产业规模日益壮大。物联网已成为面向未来“智慧城市”“智慧海洋”“智慧地球”等长远战略投资的关键目标，对我国经济、文化、国防等领域的信息化建设具有划时代的重要意义。2017 年 6 月，思科系统公司发布可视化网络指数（VNI, visual networking index）全球移动数据流量预测分析报告^[7]，预计到 2021 年，全球将有 90% 以上的用户主要通过移动设备获取媒体信息，物联网连接设备将达到 385 亿台，标志着大数据时代浪潮下的物联网技术将进一步成为世界全球化

信息领域未来发展的热点问题。

但是，基于传统 RFID、传感器的物联网应用具有一定的局限性，在面对一些地域跨度大、基础设施薄弱、环境恶劣的地区（航空、海洋、冰川、沙漠等），地面物联网往往出现服务能力与业务需求无法相互匹配的情况。例如，信道衰落严重、传播时延过长和链路频繁中断等问题，造成网络连接瘫痪或节点信息丢失，相关文献统称该场景下的物联网为远程物联网（IoRT, Internet of remote things）^[8]。针对上述情况，研究学者尝试以通信卫星与物联网相连的方式，卫星物联网的概念如图 2 所示，利用卫星的中继转发功能解决远程物联网覆盖范围内的机器通信（M2M, machine-to-machine）问题^[9]。卫星物联网（satellite IoT）的初期概念是把卫星作为一个重要角色加入地面物联网中，研究内容主要集中在卫星通信系统与传感器系统之间的互操作性、卫星 IPv6 协议的适用性以及卫星频谱资源管理等单一化问题上。

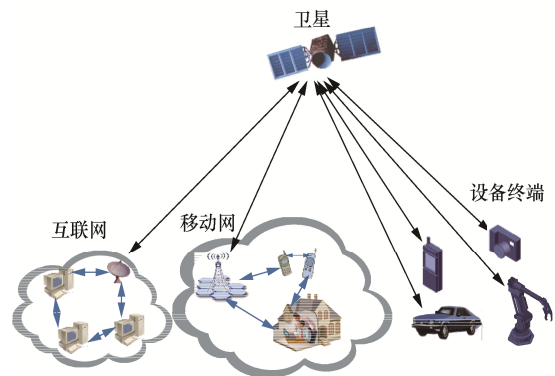


图 2 卫星物联网的概念

2 低轨通信星座系统及天地一体化信息网络的发展

20 世纪末至 21 世纪初，以美国引领的全球低轨通信星座系统逐渐进入人们的视野。由多颗低（中）轨通信卫星组成的互联网星座（Internet LEO constellation），相对于静止轨道卫星具有传输时延低、覆盖范围广（南北极）、尺寸小等优势，更加适用于全球化互联网卫星系统的建设思路。著名的 Iridium、Orbcomm、Globalstar 等低轨通信星座均已进行系统升级，近年来 O3b、One Web、SpaceX 等公司也相继提出了更宏大的星座部署计划，各系统的轨道高度、卫星数量、载荷频段和有无星间链路的情况对比分析如表 1 所示^[10-12]。

表 1 国外低轨通信星座系统的对比分析

系统名称	轨道高度/km	卫星数量	载荷频段	星间链路
Iridium	780	66 颗	L、Ka	有
Orbcomm	740~975	40 颗	VHF	无
Globalstar	1 400	48 颗	L、S	无
O3b	中轨 8 062	12 颗在轨 计划 30 颗	Ka	无
One Web	1 200	计划 720 颗	Ku、Ka	无

通过分析可知,为实现全球、实时、无缝的卫星网络覆盖,低轨星座系统的卫星数量、关口站数量以及星间链路是主要衡量指标。目前,各低轨星座系统的发展思路是以代替地面宽带互联网为主,在传输速率和载波频段上均向小型化的Ka频段发展。我国在低轨通信星座的部署上刚刚起步,但已经考虑了与地面物联网发展相结合的建设思路,航天科技和航天科工集团提出了300颗小卫星和全球数据业务处理中心组成的“鸿雁星座”系统,目的是构建全天候、全时段、强实时和低能耗的卫星物联网体系结构^[13-14]。同时要综合多种卫星功能,以三大卫星平台为例,卫星通信的作用是覆盖面积大,对地形和距离不敏感,提供广域、高密度信息采集和数据传输;卫星导航的作用是提供全天时、全天候、高精度定位,获取位置、速度、时间等精准信息;卫星遥感的作用是提供高分辨率、全方位的空间信息获取和物理世界感知。在面向航空运输、应急救援、海洋监测以及国防安全等特殊应用场景下,三大卫星平台与地面互联网、移动网和物联网进行无缝连接,形成立体全球化的广域卫星物联网,将对不受自然条件影响和空间环境限制的“万物互联”发展远景有无可替代的作用^[15-16]。

另一方面,我国科技创新2030中首个启动的重大项目——天地一体化信息网络,其概念和内涵远大于低轨通信星座系统,其构成包括由高轨卫星组成的天基骨干网、低轨和飞行器组成的天基接入网以及地面关口站和终端组成的地基节点网,并且与地面移动网和互联网紧密相连^[17]。旨在构建“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可靠”的网络体系结构,在战略安全通信、移动宽带服务、热点区域增强、联合信息支援、航天信息支援、防灾减灾服务、反恐维稳支持、航空信息服务、海洋信息服务和信息普惠服务等十大典型应用中发挥重要作用^[10]。因此,天地一体化信息网络概念的提出,其目

的是整合现有及未来规划的天基、空基平台,与地面电视网、移动网、互联网络等系统进行高度耦合。从物联网技术本身的发展来看,天地一体化信息网络在一定程度上拓展了传统物联网和卫星物联网的时空尺度,在物联网应用上可以衍生全新的概念。

3 空间物联网的特点与挑战

在卫星物联网及低轨通信星座系统的基础上,结合我国天地一体化信息网络建设的战略部署,伴随着大数据业务、智能化终端的增长趋势,提出以卫星平台、浮空平台和地面网络设施为基础的天地一体化空间物联网的概念。空间物联网,即利用天基(高、中、低轨卫星)和空基(无人机、飞艇、飞机)的骨干网络和接入网络,与地面物联网、互联网、移动网等子网进行跨域互联和数据调度,形成覆盖全球、无缝连接的泛在物联网体系。空间物联网是空间通信与多领域技术的有机融合,是传统物联网在应用空间上的物理拓展和在应用技术上的融合创新,形成综合化的应用服务平台,空间物联网的体系结构如图3所示。

相较于传统物联网,空间物联网具有以下特点与优势。

1) 覆盖广度深度大:由于空间物联网中的传感器网络与通信节点部署到地面、近空、太空等多层次立体空间,突破了传统物联网仅限于地面互联的碎片化物理范围,上万公里的跨地域数据调度和信息交互将很容易实现。

2) 应用服务类型多:空间物联网将天基节点和浮空平台与地面传感器网络融合,突破传统物联网简单识别、监测等以窄带物联网(NB-IoT)为基础的服务功能范畴,对多种数据业务(遥感、气象、地理环境等)类型也要进行相应支撑。

3) 系统顽健性强:空间物联网的网络节点大部分并不固定,网络拓扑具有可重构属性^[18],同类型网络节点可相互替换,网络路径和传输模式选择方案多,在系统稳定性和可塑性上有所增强。

4) 网络高度智能化:空间物联网融合了大量物联网智能终端、传感器等设备作为广域范围下的海量通信节点,在大数据的网络体系下容易实现边缘节点计算、云网一体化、在轨信息处理等复杂操作^[19]。

但是,随着全球大数据时代的到来,移动网、互联网、物联网中包含的数据量和业务类型都将呈

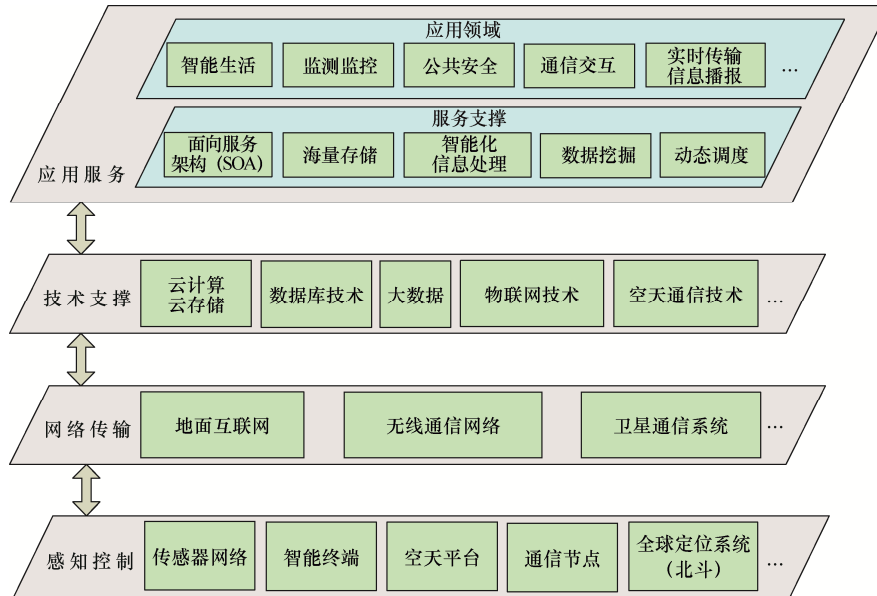


图3 空间物联网的体系结构

现爆炸式增长,根据思科公司2017年的VNI报告,全球物联网数据在2016年已达2 EB/每月,预计到2021年,这一数字将达14 EB/每月,年复合增长率将达49%^[7]。因此,基于天地一体化信息网络的空物联网,对海量数据的处理能力必将迎接以下新的挑战。

1) 系统负载过大:空间物联网与地面多个异构的子网络域进行数据连通,形成一个广域信息系统,热点数据在不同网络域内存在多个副本,用户提取不同网络域内的热点数据时,必须保证系统一致性,否则将造成网络负载不均衡,对外服务失效。

2) 重要数据丢失:空间物联网的感知层大部分由廉价传感器节点组成,传感器获取的数据具有时效性,一旦发生网络拥塞或节点损毁,丢失的数据将严重影响用户体验指标,因此,要求系统必须对重要数据具备容灾容错、快速修复的能力。

3) 网络链路中断:空间物联网的网络结构不是固定的,空基、天基、终端等节点之间的通信链路会发生动态切换,频繁发生随机或周期性中断,造成网络数据连通性较差,不存在可靠的端到端路径,属于典型的时延/中断容忍网络。

4) 通信开销较大:空间物联网依然要保持传统物联网低功耗的通信特点,但是由于卫星功率开销较大,运维成本较高,传统地面无线网络的资源管理手段在空间物联网应用环境和体系结构内,难以

获得全局或局部能耗最优的可行方案。

总结上述分析可知,空间物联网在面对海量业务数据时,节点间链路中断、星载设备损坏和星上缓存溢出,都对空间物联网数据存储的可靠性造成了严重影响。星载存储、计算和传输资源极其受限,稀疏的节点部署、有限的能源供给和庞大的业务体量,都制约了传统地面协作通信和分布式存储系统在空间物联网环境下的使用。因此,针对空间物联网系统内的大数据可靠存储和高效传输问题,仍有待于进一步深入研究。

4 空间物联网中分布式存储与传输系统的应用

针对上述挑战和问题,以天地一体化信息网络中的卫星平台为例,通过分布式卫星节点配合地面基础设施,构建如图4所示的高低轨星地一体化空物联网应用场景,缓解固有地面设备的存储、处理与通信压力,实现不同地域跨度的信息传输和数据调度,保障海量数据的可靠存储、高性能计算和快速修复等功能。利用高轨GEO卫星形成调度节点(骨干网络),低轨LEO星座作为云网平台(接入网络),地面网关连通的数据中心、物联网、移动互联网等陆地网络信息源,加上汽车、舰船、飞机等其他直连终端,构成了星地一体化的大数据空物联网。与此同时,为实现各个异构网络域之间的通信连接,可以利用天基卫星作为通信中继,采

用跨域的节点和链路协作，形成多路协同的星地一体化网络传输体制，支撑海量数据的全球互联和快速响应。

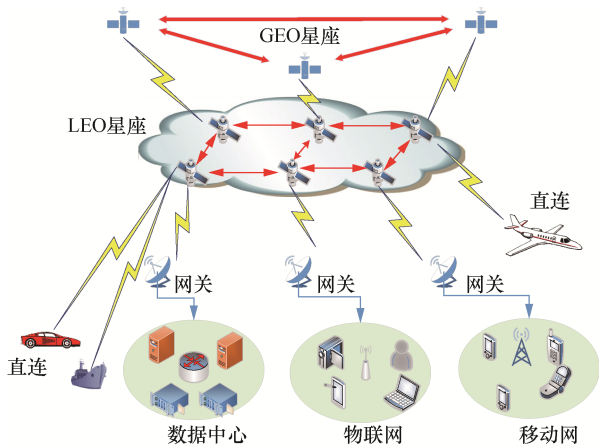


图 4 高低轨星地一体化空间物联网应用场景

针对链路状态复杂、节点资源匮乏的星地一体化网络环境，传统简单孤立、低效迟滞的存储与传输系统的工作模式，显然无法满足未来空间大数据的发展需求。为提升空间物联网的容错、容灾能力和快速响应能力，必须将天地一体化信息网络系统的存储和传输功能进行重新调整，通过星载存储资源和地面存储资源的综合调配，星间节点与星地节点之间的高效协同，构建及时修复、快速遍历、高效交互的空间分布式存储/传输系统。重点考虑星地一体化网络中连接图、信道条件和传输业务等因素的约束条件，系统关键技术包括分布式存储和分布式传输两大类，如图 5 所示。分布式存储技术包括备份复制、一致性协议、容错编码、数据更新、存储资源分配和数据重构等；分布式传输技术包括功率分配、机会式通信、路径选择、信道编码、中继转发和协作通信等。

4.1 分布式存储技术

分布式存储技术的首要目标是提升空间分布式存储系统的容错、容灾能力。首先，需要在空间尺度范围内的数据遍历过程，结合空间信道特性和业务特征，设计不同种类数据存储的部署方案，将重要数据分配在固定节点、次要数据分配在移动节点，满足在读取时更灵活、便利的需求；进而，研究数据丢失后的可靠修复过程，利用备份复制、纠删码、再生码以及局部修复码等进行数据快速重构，在帮助节点数量、节点修

复带宽、数据修复时延等指标约束下，尽量减小数据修复开销，保证系统顽健性和可用性；最后，研究数据更新后的一致性同步问题，利用 CAP 理论（一致性、可用性、分区容错性），设计分布式存储的一致性协议和数据更新策略，增强星上数据对多个地面异构网络内数据的关联性，减少冲突响应和系统请求时延，完善空间信息网络中的分布式存储功能。

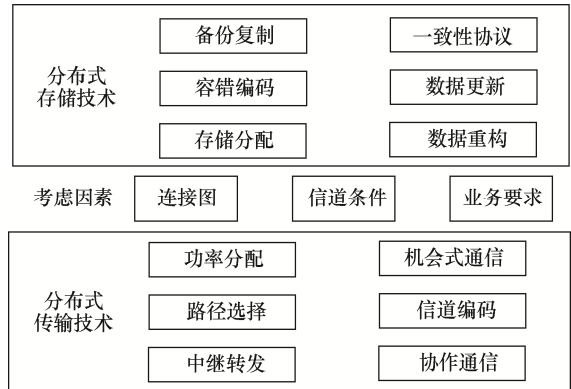


图 5 空间分布式存储/传输系统所包含的关键技术

针对分布式系统数据容错性的问题，常用的两种数据容错策略为复制和纠删码，空间分布式存储系统的数据修复理论与方法如图 6 所示。复制策略将数据备份几个副本，实施简单，但存储效率和系统可靠性低。纠删码策略将数据划分成 k 块，编码后产生 m 个校验块，将 $k+m$ 个文件分别存入 n 个节点，修复单个节点时，只需从任意 k 个节点收到数据即可完成修复，降低了存储开销，但由于要恢复整个文件，修复带宽的开销较大。再生码 (RGC, regenerating code) [20] 基于网络信息流最小分割定理，对不同分块数据进行最小存储开销和最小带宽开销的编码线性组合，显著减小了恢复单个节点数据的修复开销。与此同时，局部修复码 (LRC, local repairable code) 针对如何减少修复单个数据节点时需要访问的帮助节点数，降低了系统节点的 I/O 开销。考虑空间物联网中节点损毁或数据丢失等情况发生时，通过不等优先级策略以及多节点协作修复策略，设计具有全局最优存储/带宽效率的编码容错策略。

根据一致性 CAP 理论[21]：一个分布式系统不可能同时满足一致性 (consistency)、可用性 (availability) 和分区容错性 (tolerance of network partition)，最多只能同时满足两项。其中，分区容

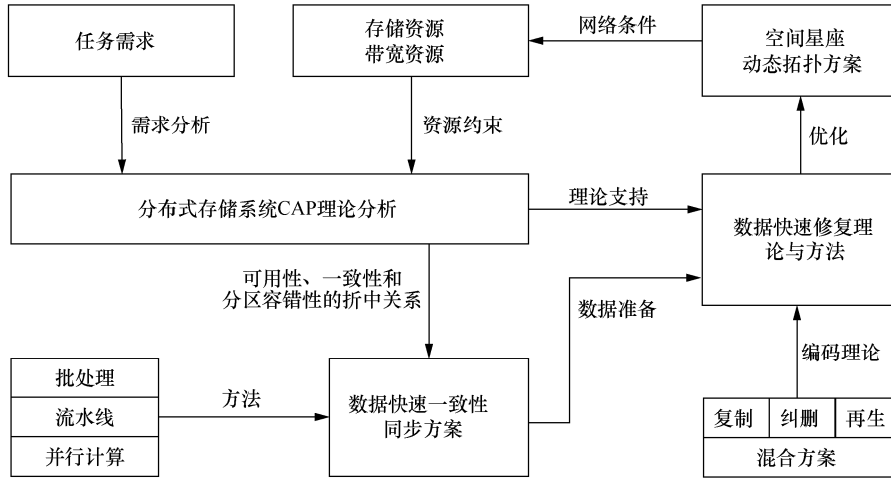


图 6 空间分布式存储系统的数据修复理论与方法

错性是必须满足的。若要求强一致性，则系统内所有副本必须全部保持一致才能对外提供服务，广域网节点间距离远且通信网络状态不可控，不能保证在有限的时间内将结果反馈给系统；若要求高可用性，系统必须在短时间内对客户端请求作出响应，此时副本间数据可能尚未达成一致。数据一致性协议（CP, consistency protocol）即解决一致性和可用性之间的折中问题。在现有的数据一致性分发与同步技术中，Multi-Paxos 协议是目前公认的解决数据分发与同步的有效协议，具有较好的理论完备性。但是，Multi-Paxos 协议存在过度依赖领导者节点、传输带宽利用率低以及同步速度慢等缺点，无法突破空间资源限制和任务时效性强的约束。需要综合考虑节点间可见性、节点间拓扑结构等约束，以降低领导者节点负载、提高分发过程的并行能力为切入点，对 Multi-Paxos 协议进行优化，开展空间物联网不同异构网络间的快速分发与同步方案研究，建立局部最优一致性协议，完善领导者节点划分和筛选策略。

4.2 分布式传输技术

分布式传输技术的首要目标是实现低能耗、低开销的快速响应。一方面，建立基于空间路径传输机会的理论模型，研究面向机会式传输的路径选择算法，探索基于时延/中断容忍网络的机会式传输机制^[22-23]。对链路可见性、传输节点间在不同频段上的信道状态、节点运行状态、节点间可用带宽以及节点存储资源等信息进行综合考虑，建立基于有限集 Markov 理论的空间网络传输机会的理论模型，分别从传输机会刻画精度和运算复杂度两方面分

析不同建模方法的有效性。另一方面，研究基于信道编码和网络编码的多节点联合传输技术，实现对多节点数据的低能耗协作传输，克服节点间链路不稳定、功率资源受限以及节点间可见时间有限等约束。设计具有非等差错保护和非等恢复时间特性的分布式喷泉码（distributed fountain code），通过信源和中继编码算法的相互协调，构建多路信道并行的可靠汇聚和分发策略，节约网络系统的能量开销。重点针对星间传输机会和能量资源无法对齐的条件，通过灵活汇聚多星传输资源，设计多星协作与预编码方案的低功耗、机会式传输方案。

根据传输任务的需求和具体传输策略，以最大化利用网络机会为传输目标，建立数据路径规划和编码方案。重点考虑星上存储资源和星间通信资源的约束，建立星上数据排队模型，并根据传输任务的需求，设计星上数据优先级调度策略，并对在传数据的“可生存性”进行分析，实现对在传数据完整生命周期的管理。联合考虑传输机会、数据状态、协作方案之间的关系，在保障信息可靠传输的前提下，实现机会式协同的消息传递机制。

当喷泉码（fountain code）作为一种信道编码应用于多用户网络中时，中继节点可采用网络编码（network coding）的方式，在保证信息可靠性的同时，提升网络系统的吞吐量，被称为分布式喷泉码^[24]。在空间物联环境中应用分布式喷泉码对不同业务进行一体化传输方案的设计，将不同信源存储的异质数据根据链路条件进行分布式编码，并通过中继节点网络编码融合为一条编码信息传输至目的节点，多信源分布式喷泉码传输方案如图 7 所示。保

证数据业务的快速恢复和实时播放，具有极强的灵活性和顽健性。在有限的连接时间内，采用分布式喷泉码对不同信源进行非等差错保护（UEP, unequal error protection）编码设计^[25]，对重要信源数据业务进行重点保护，以减少信道差错和链路中断造成数据分组丢失的情况。

空间物联网架构下空间分布式存储与传输系统的建立，是当前空间超高速信息传输技术向网络化拓展的重要组成部分，也是云网一体化技术和智能信息重构技术的重要基础支撑。完善空间分布式存储与传输系统的功能，可以预防星载数据遭受物理攻击和信息窃取攻击，避免天气等自然灾害造成的数据丢失，实现海量数据在空、天、地、海不同环境下的信息融合，能够推动新兴航天信息产业和领域的快速发展。

5 空间物联网的未来发展热点

面向未来构建覆盖全球无缝连接的天地一体化空间物联网，除了需要对分布式存储与传输技术进行相关研究，空间物联网还将面临其他基础理论问题和攻关关键技术，主要内容如下。

1) 多层异构网络组网机理:空间物联网由天基、空基和地面物联网共同组成，且不同的网络节点在可靠性、稳定性和处理能力等方面存在较大差异，是典型的多层异构网络，需要解决如何将网络中的控制、数据传输、存储以及计算等任务与网络结构进行适配的问题。将地面网络中的软件定义网络（SDN, software defined network）和网络功能虚拟化（NFV, network function virtual）等技术引入空间物联网领域^[26-27]，是解决该问题的可行途径。但是，

将 SDN 技术和 NFV 技术引入空间物联网，仍需要考虑节点能力受限、应用接口不统一和网络协议多样化等问题。

2) 海量节点接入控制与调度:相比于传统的地面物联网，空间物联网具有覆盖感知节点数量大、感知数据特征异质等特点。同时，由于空间物联网拓扑结构的时变性，实现海量节点的高效接入控制与资源调度是一项极具挑战的工作。基于认知无线电的动态频谱接入技术具有频谱利用率高、适应能力强等特点，可以作为空间物联网接入控制的有益参考。除此之外，物联网的应用将会产生大规模的小数据量分组，这些分组将引发“信令风暴”问题，在空间物联网骨干节点资源受限的条件下，“信令风暴”问题将更突出。利用空间物联网应用对实时性要求不高的特点，可以将时延容忍网络（DTN, delay tolerant network）协议与分布式存传技术相结合，形成统一、高效的业务承载体系，极大地缓解海量节点的接入压力。

3) 空间智能信息处理:空间物联网中由空间节点感知的数据包含海量的图像、气象、位置等信息，这些数据具有体量巨大、结构异质、价值密度低等特点，以现有的信息传输能力，无法及时传回地面与地面物联网信息进行及时的融合处理。因此，急需解决空间节点采集和在传数据的处理问题。基于人工智能和深度学习等技术^[28]，能够将空间节点采集和在传数据进行无效数据剔除、智能数据标注、关键目标识别、感兴趣区域快速提取以及智能信息融合等处理，极大地减少了对信息传输的要求，提高任务的响应速度，从而提升空间物联网的服务输出能力。

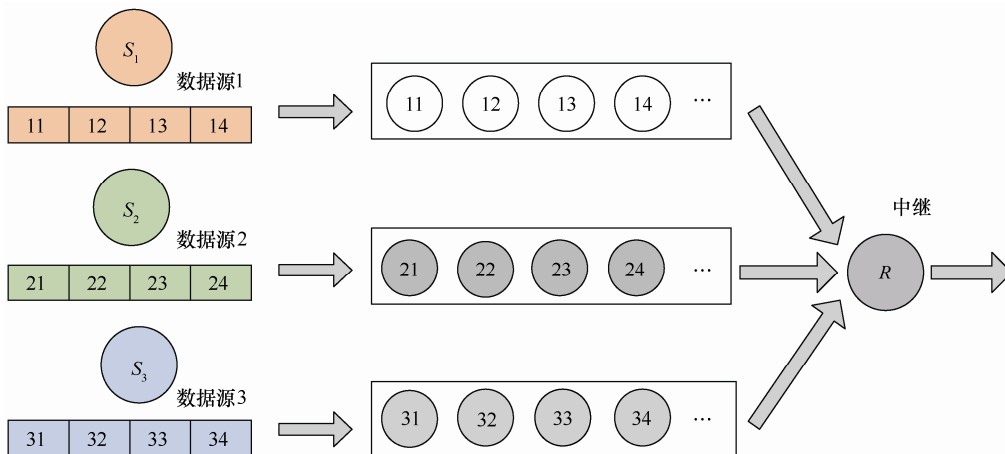


图7 多信源分布式喷泉码传输方案

6 结束语

传统地面物联网的相关技术和产业日趋发展成熟, 甚至已经改变了人类社会的生活方式。基于低轨通信星座系统及天地一体化信息网络的发展思路, 将物联网的应用场景延伸至全球乃至太空, 形成包含天基、空基、陆基的空间物联网综合化应用服务平台, 具有覆盖深度广度大、应用服务类型多、系统顽健性强以及网络高度智能化等优势。同时, 多源、异质、海量的信息业务对天地一体化空间物联网的数据存储与传输能力提出了严峻挑战, 基于容错编码、一致性协议、机会式通信等关键技术设计高效、可靠的空间分布式存储与传输系统, 是解决空间物联网与大数据应用相结合所衍生的一系列问题的有效途径, 促使空间物联网技术及其相关产业在全球信息化时代能够更快速、健康地发展。

参考文献:

- [1] AL-FUQAHA A, GUIZANI M, MOHAMMADI M, et al. Internet of things: a survey on enabling technologies, protocols and applications[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2347-2376.
- [2] 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 IoT technology[J]. *Satellite and Network*, 2017(8): 64-69.
- [3] XU L D, HE W, LI S. Internet of things in industries: a survey[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(4):2233-2243.
- [4] TAO F, CHENG Y, XU L D, et al. CCIoT-CMfg: cloud computing and Internet of things-based cloud manufacturing service system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2):1435-1442.
- [5] CAI H, XU B, JIANG L, et al. IoT-based big data storage systems in cloud computing: perspectives and challenges[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 4(1):75-87.
- [6] JIANG L, XU L D, CAI H, et al. An IoT-oriented data storage framework in cloud computing platform[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, 10(2):1443-1451.
- [7] Cisco. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2016-2021[R]. 2017.
- [8] SANCTIS M D, CIANCA E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting Internet of remote things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(1):113-123.
- [9] BISIO I, LAVAGETTO F, LUZZATI G. Cooperative application layer joint video coding in the Internet of remote things[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2017, 3(6):1418-1426.
- [10] 孙晨华, 肖永伟, 赵伟松, 等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. *电信科学*, 2017(12):43-52.
- SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. Development idea of low-orbit mobile and broadband communication constellation for the integration of heaven and earth information network[J]. *Telecommunications Science*, 2017(12):43-52.
- [11] 李小龙, 邓恒. “一网”星座的发展与启示[J]. *国际太空*, 2017(12):9-14.
LI X L, DENG H. Development and enlightenment of “one net” constellation[J]. *International Space*, 2017(12): 9-14.
- [12] 翟继强, 李雄飞. One Web 卫星系统及国内低轨互联网卫星系统发展思考[J]. *空间电子技术*, 2017(6):1-7.
ZHAI J Q, LI X F. Thoughts on the development of One Web satellite system and domestic low-orbit Internet satellite system[J]. *Space Electronics Technology*, 2017(6): 1-7.
- [13] 王亚, 朱立东. 太空互联网发展及应用[J]. *国际太空*, 2016(3): 43-49.
WANG Y, ZHU L D. Development and application of space Internet[J]. *International Space*, 2016(3): 43-49.
- [14] 刘悦. 新兴空间互联网星座对传统卫星制造发展的启示[J]. *国际太空*, 2016(11): 51-58.
LIU Y. Enlightenment of emerging space Internet constellation on the development of traditional satellite manufacturing[J]. *International Space*, 2016(11): 51-58.
- [15] 闵士权. 发挥卫星优势助推物联网发展[J]. *国际太空*, 2012(1):42-47.
MIN S Q. Giving full play to the advantages of satellites to promote the development of the Internet of things[J]. *International Space*, 2012(1): 42-47.
- [16] QU Z, ZHANG G, XIE J. LEO satellite constellation for Internet of things[J]. *IEEE Access*, 2017, (5):18391-18401.
- [17] SHI Y, LIU J, FADLULLAH Z M, et al. Cross-layer data delivery in satellite-aerial-terrestrial communication[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(3):138-143.
- [18] SHENG M, WANG Y, LI J, et al. Toward a flexible and reconfigurable broadband satellite network: resource management architecture and strategies[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(4):127-133.
- [19] HUANG H, GUO S, WANG K. Envisioned wireless big data storage for low-earth-orbit satellite-based cloud[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2018, 25(1):26-31.
- [20] DIMAKIS A G, RAMCHANDRAN K, WU Y, et al. A survey on network codes for distributed storage[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2011, 99(3):476-489.
- [21] GILBERT S, LYNCH N A. Brewer’s conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services[J]. *Sigact News*, 2002, 33(2): 51-59.
- [22] FRAIRE J A, FINOCHIETTO J M. Design challenges in contact plans for disruption-tolerant satellite networks[J]. *Communications Magazine IEEE*, 2015, 53(5):163-169.
- [23] ARANITI G, BEZIRGIANNIDIS N, BIRRANE E, et al. Contact graph routing in DTN space networks: overview, enhancements and performance[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3):38-46.
- [24] PUDUCHERI S, KLIEWER J, FUJA T E. The design and performance of distributed LT codes[J]. *IEEE Transactions on Information*

Theory, 2007, 53(10): 3740-3754.

- [25] BAIK J, SUH Y, RAHNAVARD N, et al. Generalized unequal error protection rateless codes for distributed wireless relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(12): 4639-4650.
- [26] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOU P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3):54-60.
- [27] ZHANG N, ZHANG S, YANG P, et al. Software defined space-air-ground integrated vehicular networks: challenges and solutions[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(7):101-109.
- [28] KIBRIA M G, NGUYEN K, VILLARDI G P, et al. Big data analytics, machine learning and artificial intelligence in next-generation wireless networks[J]. IEEE Access, 2018(6): 32328-32338.

[作者简介]



张钦宇 (1972-), 男, 博士, 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院教授, 主要研究方向为空间通信、无线通信等。



顾术实 (1986-), 男, 博士, 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院博士后研究员, 主要研究方向为深空通信、卫星物联网、分布式编码等。



王野 (1983-), 男, 博士, 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院助理教授, 主要研究方向为空间信息网络、无线资源分配、分布式存储等。



薛佳音 (1985-), 女, 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院博士生, 主要研究方向为空间物联网和雷达成像技术。