

天地一体化网络研究进展与趋势

李贺武^{1,2}, 吴茜^{1,2}, 徐恪^{2,3}, 吴建平^{1,2,3}, 杨增印^{2,3}, 江卓^{2,3}, 朱亮^{2,3}

1. 清华大学网络科学与网络空间研究院, 北京 100084

2. 清华信息科学与技术国家实验室(筹), 北京 100084

3. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084

摘要 空间网络在覆盖范围和移动接入等方面与地面网络具有极强的互补关系。随着地面互联网、移动通信网络和空间网络的业务逐渐融合,近年来通过采用互联网技术实现空间网络与地面网络在协议体系层面的一体化融合演进,从而构建覆盖全球的天地一体化网络,不仅是网络技术的发展趋势,也是国际互联网巨头争夺的焦点,更与中国的全球化国家战略密切相关。通过对以卫星通信系统为代表的空间网络及其协议体系结构的研究现状及发展趋势的分析,归纳了天地一体化网络的体系结构、组网结构以及路由、端到端传输、安全控制等关键技术的研究难点和发展趋势,并提出了相应的研究思路和设计方案建议。

关键词 天地一体化网络;体系结构;组网结构;路由;端到端传输;安全控制

时至今日,网络已经和人类的社会活动密不可分,一张无所不在(覆盖陆海空天)、无所不连(万物互联)、无所不知(借助各类传感器)、无所不用(基于大数据分析)的未来网络已经初露端倪。当计算与通信技术走向全面融合,计算机网络也面临着前所未有的极致与挑战。

已经渗透到社会方方面面的海量增长的“杀手级”互联网应用不断驱动地面各类网络从简单的物理“连通”向协议体系层面的“互联互通”转变,进而向采用相同网络层协议(IP协议)的一体化融合演进,这使得现有地面各类网络在体系结构上正走向融合。

与此同时,以卫星通信为代表的空间网络技术发展日新月异,其应用除了早期的广播、导航、遥感等外,也逐渐实现了卫星宽带接入、卫星移动数据、卫星移动语音等业务。根据美国卫星工业协会发表的《2015年卫星产业状况报告》^[1],上述业务收入已经超过50亿美元,并呈现逐年上升的趋势。随着卫星业务的不断拓展和用户需求的多样

化,以通用卫星平台和网络基础设施承载各类综合业务引起了广泛关注,例如“铱星二代”明确提出将支持遥感业务^[2],而中国的北斗定位导航系统打破了传统导航卫星系统业务模式单一的现状,系统不仅能提供导航业务,还提供短信业务,初步实现导航与数据业务综合支持^[3]。

由于空间网络在覆盖范围和移动接入等方面与地面网络具有极强的互补关系,以Google、Facebook为代表的国际互联网巨头纷纷积极开展空天互联网基础设施建设,以期为用户提供全球互联网接入服务。例如,从2013年起,Google推出Google热气球计划,Facebook推出无人机计划;而卫星互联网公司OneWeb计划在2018年前发射680颗小型卫星^[4],SpaceX(由埃隆·马斯克领导的太空探索公司)则计划采用数量更加庞大的低轨卫星构建空间互联网基础设施^[5]。可以预见,空间互联网的争夺战一触即发,而天地一体化的网络也正逐渐呈现出来。

截至目前,天地一体化网络尚没有

统一的定义,通过对国际现状的调研与分析,并结合中国的实际情况,对天地一体化网络的理解如下^[6]:

天地一体化网络是以地面网络为基础、以空间网络为延伸,覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间,为天基、空基、陆基、海基等各类用户的活动提供信息保障的基础设施。

天地一体化网络是利用互联网技术实现互联网、移动通信网络、空间网络的互联互通,将3种网络业务承载方式打通,采用通用平台承载实现各类信息覆盖的网络系统。

天地一体化网络不仅符合未来技术发展的趋势,也是中国重大战略需求,科技部、发改委、工信部、中国工程院等部门正在共同组织专家进行“天地一体化信息网络”国家重大工程的论证。同时,2016年初发布的国家重点研发计划“网络空间安全重点专项”首批启动的项目之一就包括“天地一体化网络信息安全保障技术”,正在准备的“宽带通信和新型网络重点专项”也将天地一体化网络作为其重要研究内容。

收稿日期:2016-05-30;修回日期:2016-06-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2015AA015701);清华大学自主科研计划项目(20131089339)

作者简介:李贺武,副研究员,研究方向为无线移动网络、天地一体化网络,电子信箱:lihewu@cernet.edu.cn

引用格式:李贺武,吴茜,徐恪,等.天地一体化网络研究进展与趋势[J].科技导报,2016,34(14):95-106;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2016.14.011

本文对空间网络及其协议体系结构的研究现状与发展趋势进行分析,在此基础上归纳天地一体化网络的体系结构、组网结构以及路由、传输、安全等关键技术的研究难点和发展趋势,给出相应的研究思路和设计方案建议。

1 卫星网络发展现状与趋势

经过半个多世纪的发展,卫星系统取得巨大成果,全球已经发射 1200 多颗在轨卫星,分布在空间各个层次的系统,实现区域或全球全覆盖^[6]。卫星系统往往通过业务进行划分,如遥感卫星、导航卫星等,而天地一体化网络研究关注的重点则是以卫星通信系统为代表的空间网络。

1.1 国外卫星通信系统发展历程

总体而言,国外卫星通信系统的网络结构发展经历了“天星地网”、“天基网络”、“天网地网”3个阶段;而星上转发技术发展经历了透明转发、电路交换、星上 IP 分组交换 3 个阶段^[7]。本文以 Inmarsat、Iridium、TSAT 等典型的、广泛应用的卫星通信系统为例,介绍国外卫星系统的发展历程。

1.1.1 Inmarsat 系统发展历程

Inmarsat 系统是发展最早的基于同步轨道的卫星系统,采用“天星地网”的模式,由“星上电路”交换发展到“星上 IP 技术”,至今已经历了 5 代,目前正在使用的是第 4 代,并且正在开始建设第 5 代^[6,8],其业务演变可分为 2 个阶段。

第 1 阶段,1976—1997 年,Inmarsat 经历了 3 代的发展,使用传统电路交换技术承载各类语音、中低速的数据业务。

第 2 阶段,1998—2009 年之后,第 4 代 Inmarsat 的发射改变了原有电路交换技术,增加了数据分组交换技术,通过 IP 技术承载宽带数据业务。同时,在其关口站引入了公共移动通信网络的 3G 技术,采用 3GPP 标准,实现高达 492 kb/s 的数据带宽,支持 3G 语音、数据和视频传输等功能。

1.1.2 Iridium 系统发展历程

铱星 (Iridium) 系统是美国摩托罗拉公司 (Motorola) 于 1997 年投入使用

的低轨全球个人卫星移动通信系统。系统采用星间链路实现星间组网,相当于把地面蜂窝移动电话系统搬到了天上,开创了全球个人通信的新时代,被公认为是现代通信史上的一个里程碑^[7]。从系统发展角度来看,Iridium 系统整个发展过程经历了 2 个阶段。

第 1 阶段,1997—2007 年,铱星一代建成,系统采用 66 颗具有星上电路交换技术的低轨卫星,并采用星际链路实现星间组网,构成完整的天基网络,系统主要为全球用户提供语音服务。

第 2 阶段,2007 年之后,铱星二代提出,并开始初步部署。Iridium 二代除了提供一代的语音服务,还采用 IP 技术提供高速的数据业务。同时,由于传统的单一通信业务的 Iridium 系统建设和运营的成本较高,下一代系统 (Iridium Next) 向多功能综合发展,将在卫星上支持包括远程传感、气象监测、对地观测等多种业务。

1.1.3 TSAT 系统发展历程

2004 年,美国实施了 TSAT 计划,计划在太空建立类似地面的 Internet 网络,把太空、空中、陆地、海洋的网络整合为一体化,为地面用户、空中及太空武器平台的信息传输提供太空路由,从根本上改善美军的通信能力^[9,10]。TSAT

计划采用“天网地网”的架构,其中天基网络由 5 颗部署 IPv6、星载路由等互联网技术的同步轨道卫星通过星间链路构成,地面接入美军的全球信息栅格 (GIG),依托美军在全球设立的卫星通信区域交换节点 (RHN) 和电信港等实现全球互连,如图 1 所示。

TSAT 计划打造可以连接现有多个系统的空间骨干网络,虽然最终该计划因为经费等原因被推迟,但其先进理念仍在后续项目中得到继承,比如太空路由器 (IRIS), AEHF 系统的增强。

1.1.4 发展趋势

通过对上述典型卫星通信系统的分析,从业务类型、星上技术以及组网结构等方面进行总结可以得以下结论。

1) 空间各类业务趋向通信类业务融合,互联网业务逐渐成为空间通信业务的主流。

2) 星上业务的支撑技术也从电路交换向 IP 技术发展,星上采用 IP 技术成为空间网络发展趋势。

3) 采用星间链路构建空间网络,成为卫星系统发展趋势;同时,同步轨道卫星作为空间网络的骨干互联节点,能有效降低空间网络的复杂性。

4) 从组网结构上,在从“天星地网”向“天网地网”模式演进。

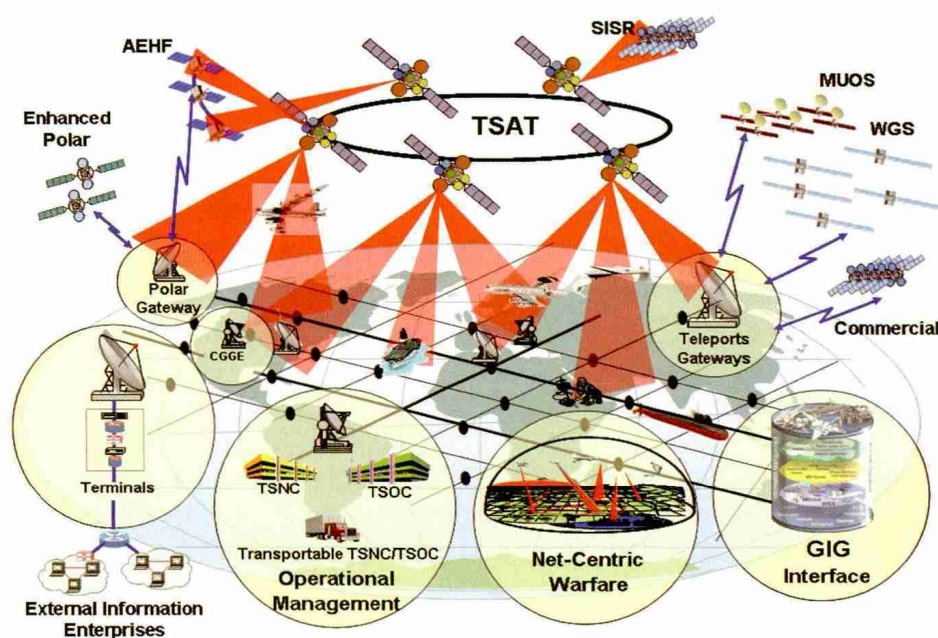


图1 TSAT系统示意

1.2 中国卫星通信系统发展历程

经过30多年的发展,中国已拥有在轨卫星100多颗,包括气象卫星、对地观测卫星、通信广播卫星、中继卫星、定位卫星等,其中主要有通信卫星和中继卫星两大系列的空间网络信息系统^[6]。

1.2.1 通信卫星系统

自1984年第一颗自主研制的通信卫星发射成功,历经近30年的发展,中国现拥有在轨运行的通信(广播)卫星数目已达20余颗,基本覆盖中国本土及亚太、非洲等部分地区,主要为中国国内用户服务,也为覆盖区内其他国家和地区的用户服务^[6]。

同时,中国拥有的在轨运行的中星、亚太等系列卫星都属于固定通信卫星,至今中国尚无自建的国内商用卫星移动通信系统。

1.2.2 中继卫星系统

目前中国面向中低轨航天器服务的信息网络主要是中继卫星系统^[11]。中国迄今共发射了3颗中继卫星,形成了包括东、中、西三星组网的中继卫星系统。该系统通过点波束实现全轨道覆盖,通过3颗星组网,实现了对中低轨航天器的100%覆盖。但因为容量有限,只能满足重要时敏数据(比如测控信息等)和部分空间信息的实时传输,大量空间信息(比如遥感图像信息等)仍然需要依靠地面站接收。

1.2.3 与国外差距

虽然中国已经建立相对比较完整的卫星体系,但在覆盖能力和通信能力上与欧美等强国相比有较大的差距,主要体现在以下几个方面。

1) 卫星覆盖能力弱。目前中国只有同步轨道通信卫星,而且通信能力有限,覆盖范围主要以中国领土、领海、周边地区为主,不能满足新时期国家利益拓展对全球信息覆盖的需求。

2) 系统互操作能力弱。各个卫星系统各自成体系,“烟囱”林立,系统间互通性差,难以满足信息融合和综合利用的需求。

3) 星上组网能力不足。中国尚未有空间组网的卫星通信系统,目前的通

信系统还是处于“天星地站”的阶段。

1.3 卫星通信协议体系发展现状

1.3.1 CCSDS 协议体系

空间网络标准化组织CCSDS(国际空间数据系统咨询委员会)于1982年1月由全球主要航天组织机构联合成立,负责开发、建立适应于航天测控、空间数据传输系统的各种通信协议和数据传输规范。

该协议体系针对空间数据传输系统存在的传输距离远、节点动态性高、链路时延变化大、链路不对称、间歇性的链路连接等特点进行优化,其体系模型如图2所示。CCSDS借鉴了互联网协议体系的思想,其体系结构自下而上包括物理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层。其中,每一层有包括若干可供组合的协议,例如SCPS-FP(文件协议)、SCPS-TP(传输协议)、SCPS-NP(网络协议)、SCPS-SP(安全协议)等^[12]。

CCSDS已被较多的航天机构采纳

和应用,并且已经过了多次航天任务考验。据统计,国际上采用CCSDS建议的航天任务已超过600个。同时,为适应地面互联网的快速发展和与TCP/IP协议族兼容,2012年9月发布了“IP over CCSDS Space Links”正式推荐标准(蓝皮书),在CCSDS的空间链路层协议(AOS、TC、TM、Proximity-1)上实现IP数据分组的传输^[13]。

CCSDS协议体系存在的问题主要体现在:无法与地面网直接互操作,需要进行协议转换;静态路由支持能力强,但移动接入能力差,动态路由支持能力弱;开发、测试、维护费用相对TCP/IP较高等方面。

1.3.2 DTN 协议机制

DTN(delay tolerant networking, 延迟容忍网络)起源于1998年美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(jet propulsion lab, JPL)对星际互联网(InterPlanetary Internet, IPN)的研究。星际互联网具有不同于传统地面互联

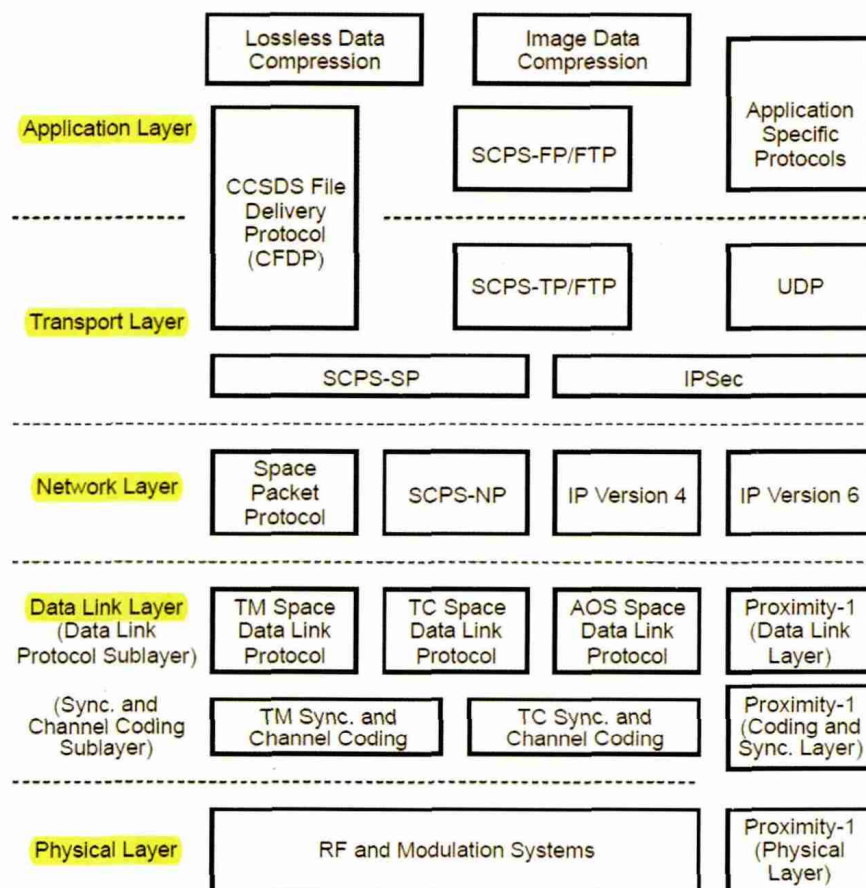


图2 CCSDS体系结构层次模型

网的特点,主要体现在:节点之间的传播延时会非常大且变化同样很大、节点之间往往由于天体遮挡而难以保证网络连通性(即间歇性连接现象)等^[14,15]。

DTN体系结构如图3所示,它在应用层之下传输层之上引入了1个Bundle层(覆盖层),并通过使用磁盘等永久存储方式克服网络的间歇性连接问题^[15]。Bundle层提供了类似于网关的功能,可以在各个底层协议之间(如TCP/IP、CCSDS等)提供互操作性。

NASA通过太空DTN发展计划,进行了一系列的DTN试验,应用领域涵盖了遥感、深空探测、空间站、中继通信等领域。探索了DTN在飞行试验中可能遇到的问题,对DTN技术的自动存储转发机制、网络协议和软件实现等关键技术要素进行了探索和验证。试验

表明,DTN能够正常运行在长时延和有中断情况的链路上,以及运行在非对称链路和单向链路上^[16,17]。

1.3.3 TCP/IP 协议体系

互联网的TCP/IP体系结构的设计与其当时的设计目标是紧密相关的。互联网设计时最基本最重要的目标就是充分利用现存网络实现“网际互联”,为此相应设计的网络连接层(IP)负责整个互联网的全网通达,是互联网体系结构的核心^[18]。在空间网络采用地面互联网体系结构,其优点主要包括可以使用商用网络设备与地面互联网直接互操作实现端到端通信,技术成熟度高、能缩减航天成本、易于升级以满足未来航天任务的需要等。

2002年,NASA/GSFC成立OMNI(Operating Missions as Nodes on the

Internet)项目^[19],研究如何将地面网络技术部署到空间网络,为未来空间任务提供全局编址和标准的网络协议,使得用户能在空间网上保持可靠传输。将地面互联网技术应用到空间航天器上,采用IP技术实现空间网络和地面网络的互联,并采用TCP协议实现地面用户与其航天器间的端到端连接。其协议体系如图4所示,采用分层思想可以使协议设计更简洁,屏蔽一些特殊空间网络问题,允许各子协议根据实际情况进行分块部署,模块化设计允许各区域独立更新^[19]。目前,OMNI不仅完成了概念研究,而且进行了一系列通过空间链路(TDRSS链路和地面跟踪站)的地面试验及飞行搭载试验,证明了在空间使用地面IP协议的可行性,为地面互联网向空间延伸提供了技术基础^[19,20]。

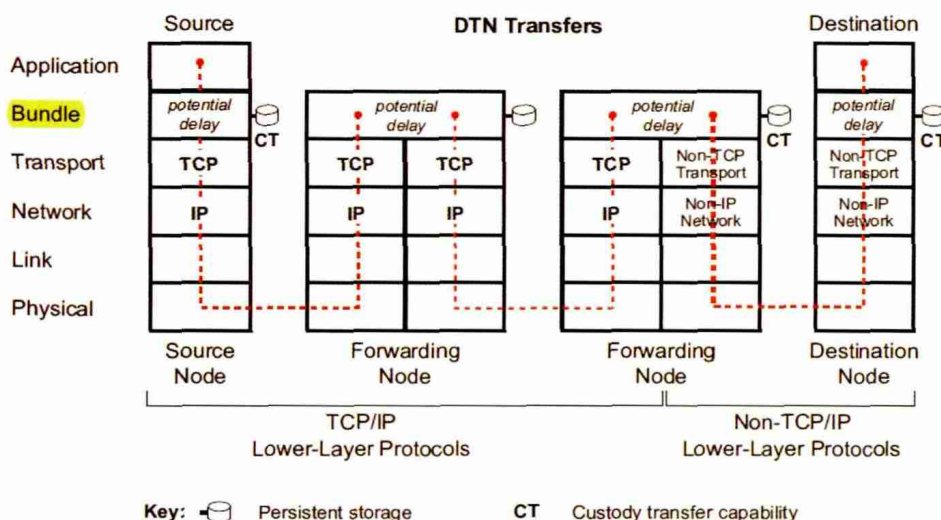


图3 DTN体系结构层次模型

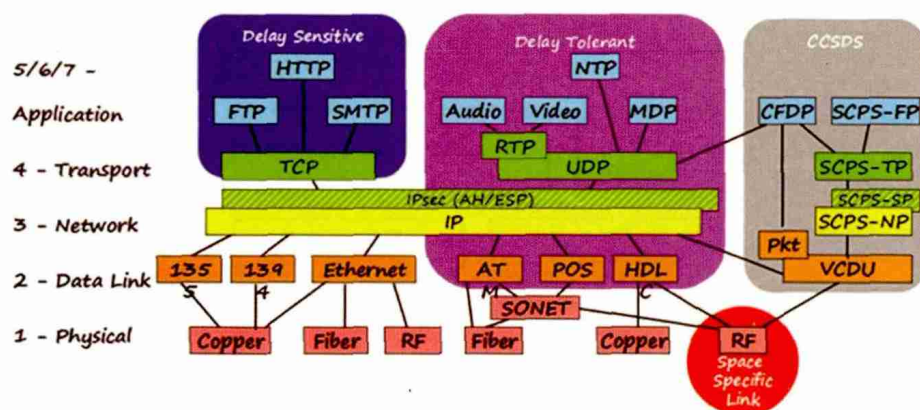


图4 OMNI开发的协议模型

2 天地一体化网络体系结构

2.1 体系结构

2.1.1 研究难点

天地一体化网络支持业务种类繁多,网络规模庞大,拓扑结构呈现立体多层次化,涉及互联网、移动通信网络和空间网络3张异构网络,各网络采用不同的体系结构和网络结构,对三网进行有效融合提出挑战。

相对互联网,移动通信网是垂直网络,新业务的开通需要新的业务网的支持,各业务相互独立,业务管理复杂,需要大量信令支持。为了实现互联网与移动通信网络融合,需要将信令与转发分离,将应用从网络设施中剥离。而空间网络本身呈现“烟囱式”的发展模式,不同卫星系统相对独立、专用,缺乏统一的网络协议规范,使得地面网络技术难以直接部署空间网络。

因此,如何把复杂多样、规模巨大的天地一体化网络,抽象为结构清晰、功能简洁、易于高效实现的网络体系结构,在体系结构的框架指导下构造网络的各组成部分,并建立相互关系,使网络既能适应通信技术的快速发展与变化,又能支持层出不穷的新型应用,对天地一体化网络体系结构研究提出了挑战。

2.1.2 设计思路及方案建议

互联网体系结构以网络层 IP 协议为核心,通过采用无连接分组交换技术,凭借简洁、高效、“尽力而为”的特点,使得网络层具备高度适应性和可扩展性,能够向下兼容各种通信网络技术,从而促进了互联网在全球范围的极大发展。同时,从 GSM 的全电路域到 UMTS 的电路域和分组域共存,再到 LTE 的取消电路域,可以看到移动通信网络的以 IP 协议承载数据业务和传统语音业务、以分组交换取代电路交换的发展趋势。即移动通信网络的体系架构已经朝着全 IP 化的方向发展,正在加速向互联网进行深度融合。

因此,作为互联网的技术精髓和最成功经验,IP 协议在未来天地一体化网络中应该得到继续坚持,并以此为基础针对天地一体化网络的特点开展体系结构方面的研究。同时,以互联网体系结构为基础,有效吸纳 CCSDS 体系结构和 DTN 协议体系面向空间网络的研究成果,取长补短。

图 5 所示为一种 TCP/IP、CCSDS 和 DTN 相结合的协议体系建议示例。在地面网络传输部分和系统内部(如海洋用户的网关设备及终端设备),使用成熟 TCP/IP 协议栈,并通过 IP 技术与移动通信网络进行融合。CCSDS 的 AOS 等数据链路层协议专为空间链路设计,经过多次航天任务考验,因此采用该技术进行空间网络单跳数据传输,并通过 IP over CCSDS 技术提供对 IP 的支持。低轨卫星运动轨迹动态性强,低轨卫星

之间以及低轨卫星与地面站之间的传输链路具有高动态断续特性,因此引入 DTN 技术。

由于互联网的关键技术已经相当成熟且获得了广泛认可,因此应继续坚持其优势成果,然后在此基础上面向天地一体化网络开展研究。例如,互联网分层的路由架构和技术,在互联网已经如此庞大的今天,依然保持了良好的效率和可扩展性,尤其是其中的域间路由技术,能够有效地对自治系统内的路由细节和路由变化进行屏蔽,避免对整网路由带来影响。这种分层路由架构和域间路由隔离机制对天地一体化网络同样至关重要,通过保持互联网路由的分层和自治系统原则,可以将异构网络内的路由细节进行隔离,避免相互之间的波及和影响,从而使得异构网络可以针对本网络的特点设计专门路由算法,并且不用考虑其他网络的影响;与此同时,面向未来天地一体化网络研究域间路由的信息交互和融合机制,以实现天地一体化网络路由的整体优化。

2.2 组网结构

2.2.1 研究难点

天地一体化网络的空间部分包含节点种类繁多,时空行为复杂,网络节点立体多层次化分布且高动态运动,各节点功能及组网特性不同。由于中国缺少分布全球的地面站,各空间节点的互联需要通过空间组网实现。如何设计涵盖高低轨卫星、临近空间平台、地面节点等多层次以及综合应用的空间网络结构是天地一体化网络建设的

难点。

地面网络拓扑相对固定、规模庞大,空间网络立体多层次、拓扑动态变化强、空间跨度大,使得天地一体化网络的不同组成部分在网络拓扑稳定性、网络规模等方面差异巨大。如果空间网络的任意设备(如卫星或飞行器)都可以通过地面关口站直接与地面互联网主干相连并进行路由交互,那么空间网络的高度动态性将会引发地面互联网主干的路由震荡。因此,空间网络与地面网络相互之间的连接方式以及由此形成的组网结构,将对天地一体化网络整体的互联和融合效果带来较大的影响。

2.2.2 设计思路及方案建议

以 TSAT 等为代表的研究计划,表明了“天网地网”组网结构将是未来天地一体化网络的发展趋势。同时,中国的国情限制了地面站将绝大部分采用本土布站的方式,全球布站在可行性上面临着极大的挑战,因此“天网地网”也是中国未来天地一体化网络组网结构的必由之路。

天地一体化组网结构建议如图 6 所示。该组网结构中,空间网络主要包括由高轨卫星组成的天基主干网,由地面关口站组成的地基主干网,以及由各类卫星、星座和临近空间飞行器等设备组成的多种空间接入网;地面网络主要包括地面互联网、移动通信网组成的主干网络 and 用户接入网;通过设置天地一体化网络互连节点,将空间网络、地面互联网、移动通信网进行互联互通和有效融合。

GEO 高轨卫星组成空间网络天基主干网,提供覆盖全球的高速数据传输服务。天基主干网采用星间激光链路或微波链路实现空间组网,提供 100 Gb/s 量级的通信容量,具备空间网络拓扑抗毁重构能力。同时,地面关口站形成空间网络地基主干网。空间网络通过这种双主干方式,为空中各种物理网络提供灵活有效的互联。同时,通过设立多个国家级天地一体化网络互连节点,以避免地面庞大的路由信息对空间网络的冲击,以及屏蔽空间网络动态性

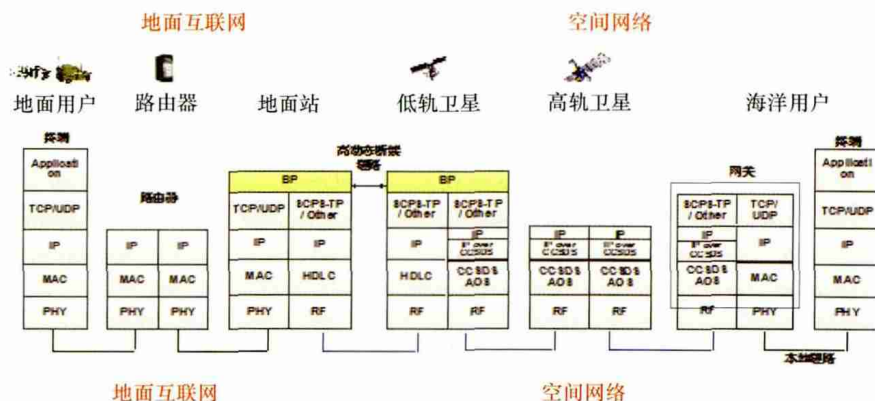


图 5 天地一体化网络协议体系建议示例

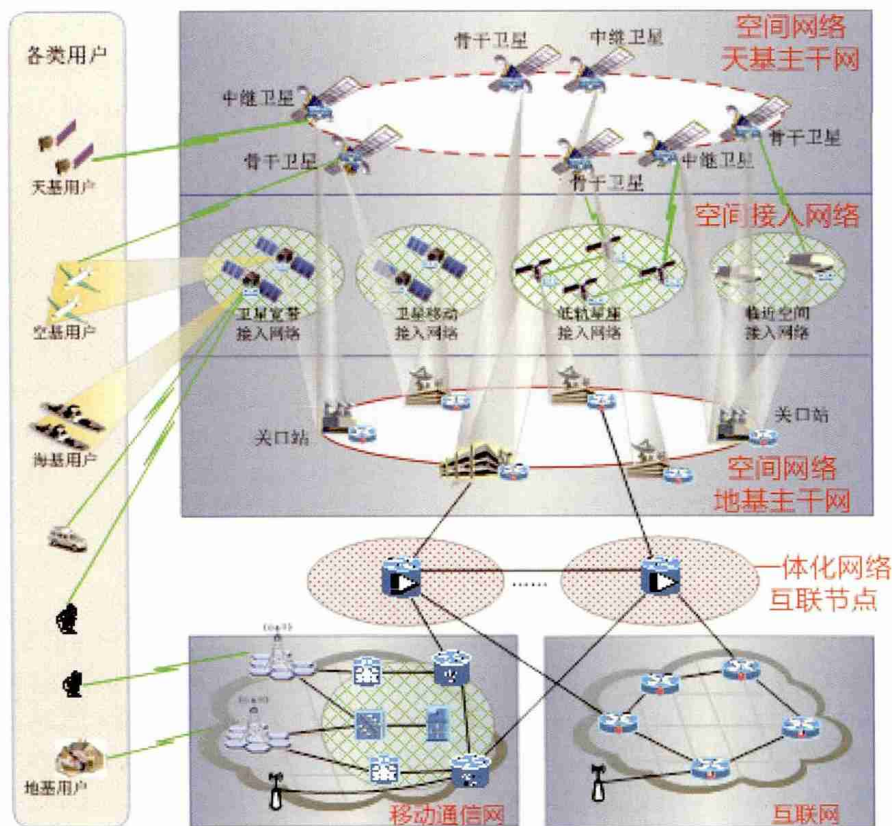


图6 天地一体化网络组网结构

所可能带来的地面网络路由震荡,实现空间网络、地面互联网、移动通信网的互联互通。

3 关键技术研究进展

天地一体化网络的路由技术、端到端传输技术和安全控制技术是互联网、移动通信网和空间网络之间形成天地一体化网络的最为重要技术基础,也是实现天地一体化网络信息共享、资源整合、互联互通、随遇接入的前提和保障。

3.1 天地一体化网络多维路由技术

空间网络拓扑频繁变化,空间节点计算、存储、带宽等资源分配不均,通信线路误码率、稳定性差异巨大,以及节点功率受限等现实,对路由的建立、维护和选择都产生了重大的影响,必须对传统的地面路由协议进行适应性扩展,才有可能高效、可靠、安全地实现空间信息分组的路由和转发。

同时,由于空间网络种类多样(既包含高、中、低轨卫星系统,也包括邻近空间网络等),与地面网络的连接关系

(同步/非同步轨道)、链路稳定性以及转发能力差异巨大,互联网分层路由架构和域间路由隔离机制对天地一体化网络至关重要。通过保持互联网路由的分层和自治系统原则,可以将异构网络内的路由细节进行隔离,避免相互之间的波及和影响,从而使得异构网络可以针对本网络的特点设计专门路由算法,并且不用考虑其他网络的影响。

3.1.1 空间网络路由协议

20世纪90年代,空间卫星网络技术发展主要采用电路交换(IRIDIUM)^[21,22],相应路由算法主要是面向连接的。为了适应空间网络拓扑多变特定,维护端到端链路稳定性,相关研究者^[23-26]利用卫星可预测的周期性运动规律,采用虚拟拓扑策略屏蔽拓扑的动态性,提前在地面计算路由信息。该类路由的设计思想是:1) 对一个周期的卫星拓扑进行离散化,将系统周期划分若干小的时间片,一个时间片内假设网络拓扑不变,路由计算仅在时间片的开始点完成;2) 针对一个系统

周期内,根据不同优化目标(负载均衡、通信时延最小、端到端的链路切换最小),采用不同优化方法,选择出所有时间片内的最优路径。其中,Chang等^[23,26]采用有限状态机(FSA)对卫星系统建模,通过卫星系统可预测的物理拓扑构建每个状态的拓扑关系图,然后基于流量需求计算最优路径,实现卫星负载均衡;针对低轨星座的星间链路出现的临时关闭与重建,导致端到端路径频繁更新,Werner等^[25]采用优化算法减少链路转交次数,满足特殊时延敏感类应用的需求。

进入21世纪,随着地面互联网和空间网络的业务发展,两者逐渐走向融合,在空间网络采用IP协议受到普遍关注。为了屏蔽空间网络拓扑动态特性,利用源、目的地址的位置信息(覆盖区域划分)^[27,28]或卫星节点的位置信息进行路由转发(虚拟节点)^[29,30]。覆盖区域划分^[27,28]假设每个数据包都有源、目的地址的位置信息,卫星根据该信息计算离该数据包空间距离最近的卫星节点,然后逐跳转发到目的节点。而虚拟节点^[29,30]则将卫星星座假设成“逐跳”周期运动的,或者说将系统周期划分为等于单轨道内卫星个数的时间片,每个卫星某一时间片内具有唯一的空间位置标识,卫星根据数据包中的目的卫星的位置标识,采用空间距离最短原则进行逐跳路由转发。该类路由协议采用分布式的星上路由转发,不需要提前进行路由计算,但适应星座类型有限,一般仅适应理想的极地低轨轨道。此外,一些研究者假设空间已部署类似地面网络的路由协议,开展面向低轨星座的IP协议,其路由选择主要实现星上负载均衡^[31-34]、拥塞控制^[35]及QoS等目标^[36,37]。

近年来,采用多层星座搭建空间网络受到广大研究者的关注,网络类型可分为LEO/MEO/GEO^[38]、LEO/MEO^[39,40]和LEO/GEO^[41,42]。该类研究的主要思想是:1) 假设空间高层的卫星(GEO、MEO)负责其覆盖区域低层卫星(MEO、LEO)的管理,包括网络信息的收集、路由信息的计算及路由信息的下

发,该管理卫星及其覆盖的所有卫星构成一个“域”(类似 OSPF 的区域),上层星座也可进行路由转发;2) 高层卫星周期收集路由信息进行路由重计算,并将路由表下发到低层卫星。同时,相关的研究者采用该网络结构开展了相关面向 QoS^[40]、负载均衡^[42]等路由选择目标的研究。该方案主要问题是,星座技术难度高,缺少真实的试验验证。

从以上研究可以看出,空间网络的路由研究逐渐向面向 IP 技术发展,基于多层卫星系统已成为研究热点。尽管空间路由研究取得大量进展,但还未有一个公认的、成熟的路由机制,相关路由协议的验证主要采用仿真的方式,缺少真实空间条件的验证。此外,现有的研究主要解决空间某个场景的特殊问题,通常将研究对象假设为一个单系统(单个自治域),缺少面向天地一体化的多空间系统融合以及天地融合的多域路由研究。

3.1.2 设计思路及方案建议

空间网络中的路由与转发,不仅仅包括为数据分组选择合适的下一跳卫星,还要与地面网络实现网络层的无缝融合。地面网络覆盖范围有限,路由计算与存储能力充足,网络拓扑较为稳定,同时节点数目多,路由规模庞大。而空间网络覆盖范围广(海洋、天空等),星上计算及存储资源极为匮乏,网络高动态变化,同时卫星节点数目少,路由不断更新。天地一体化路由设计既要求实现空间网络和地面网络的网络层融合,又要保证两者隔离:1) 防止地面垃圾流量进入到空间网络,对资源受限的空间网络造成冲击;2) 防止地面网络规模庞大的路由表对空间网络以及空间动态变化的路由对相对稳定的地面网络路由表的相互冲击。如何设计星地域间路由融合机制成为研究难题。

天地一体化网络路由的方案建议如图 7 所示。其中,天地一体化的空间网络采用双主干结构,空间高轨卫星作为主干网络实现各个独立的卫星系统接入,每个卫星系统作为一个独立自治域,独立进行管理;同时,通过地面主干

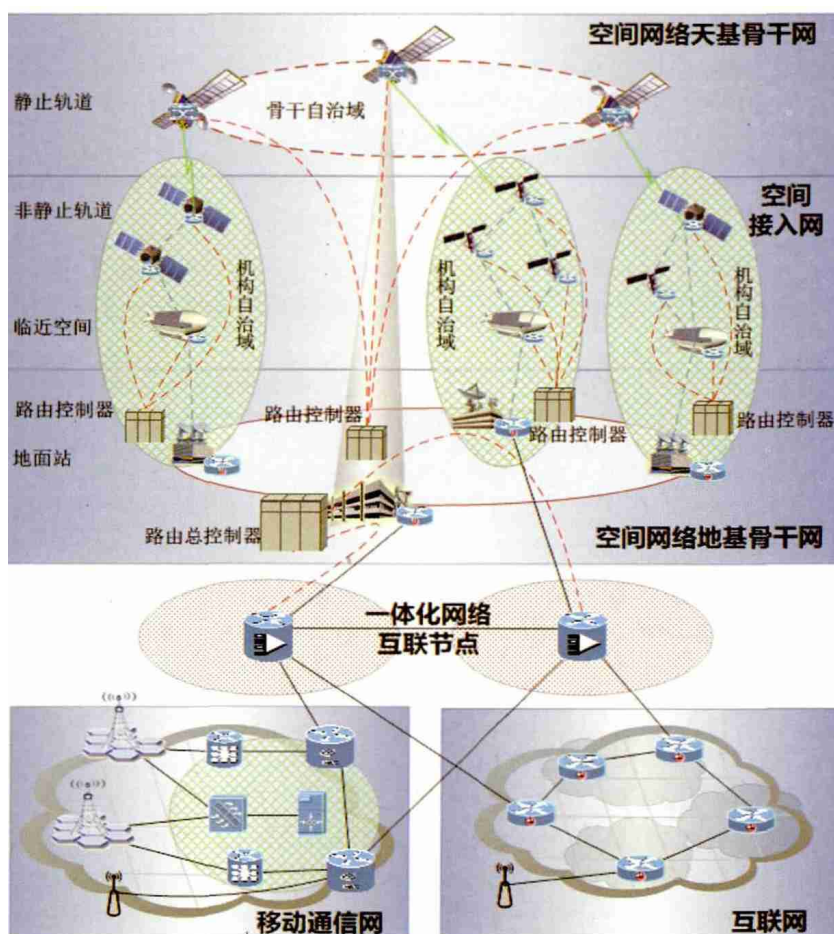


图 7 天地一体化多网融合路由方案

网连接各个空间自治域,并通过一体化互联节点与地面网络实现互联互通,有效地进行空间网络与地面网络的隔离和融合。地面网络的拓扑相对固定,域间连接关系基本固定,可采用 BGP 协议实现各个自治域的互联,相对有效地保证域间安全和高效互联。

3.2 天地一体化网络协同传输技术

窄腰模型是互联网技术成功的关键,端到端传输是窄腰模型的重要组成部分,它可以对上层各种应用提供端到端的可靠有序传输服务,为应用层各种功能的实现奠定了基础。

相比于地面网络,卫星链路具有高时延、高误码、非对称、链路动态断续的特点。标准 TCP 协议并不区分误码和拥塞丢包,在一个往返时间间隔内按照加法增加的方式改变窗口,同时对链路非对称性有一定要求,使其在高时延、高误码、非对称的链路特性下工作效率低下。

另外, TCP 的传输建立在在路由器等基础设施不发生相对运动的基础上,卫星网络链路的动态断续会导致路由器丢弃相应接口的数据包,最终导致 TCP 的超时和重传,进一步降低了系统带宽使用效率。

3.2.1 面向大时空跨度的端到端传输技术

随着卫星通信技术的发展,互联网国际标准化组织(IETF)开始关注 TCP 在空间网络中的应用与优化,于 1997 年 7 月成立 TCP Over Satellite (tcpsat) 工作组,在工作组制定的 RFC2488 标准中,建议采用包括慢启动、拥塞避免、快速重传和快速恢复在内的拥塞控制机制,这一机制后来发展成为由 RFC6582 规定的 NewReno 拥塞控制算法。在 TCP 选项上,建议采用窗口扩大、SACK 等选项。这些机制由 CCSDS 于 1999 年最初发布,在 2006 年更新的针对空间网络的传输协议 SCPS-TP 中

被采用。SCPS-TP 主要新增了选择否定/确认的 SNACK 选项和报头压缩选项等。在拥塞控制机制上, SCPS-TP 同时支持 Vegas 和 NewReno 拥塞控制机制。

然而, NewReno 以及 Vegas 拥塞控制在高时延、高误码、非对称的卫星链路中工作效率并不高, 研究人员在 IETF 以及 CCSDS 的相关标准基础上, 重点针对拥塞控制机制展开优化。结合地面互联网在高时延带宽积网络、无线网络中的研究进展, 分别针对卫星链路各个方面的特点提出了一系列的改进方案。其中, 针对高时延特性修改方案的主要思路, 是在保持带宽公平分配的基础上提高终端窗口增长速度, 具体有 TCP Hybla^[43]、TCP cubic^[44]、TCP peach^[45]、TCP peach+^[46] 和 P-XCP^[47] 等; 针对高误码特性修改方案的主要思路, 是加快差错的恢复速度以及区分拥塞和误码造成的丢包, 具体有 pepsal^[48]、TCP PETRA^[49]、westwood^[50]、P-XCP、TCP(Network Coded TCP)^[51] 等; 针对非对称特性修改方案主要从采用选择确认和降低确认频率的方式两个方面进行优化, 具体包括 SCPS-TP、ACC(Ack Congestion Control)^[52] 等。

由于实际卫星系统使用成本相对较高, 现有研究方案多数采用仿真的方式进行验证, 随着天地一体化网络研究的不断开展和相关试验验证环境的建设, 各研究方案的有效性有待进一步评估。

与此同时, 在应对空间网络动态特性方面, 1998 年美国国家航空航天局(NASA) 喷气推进实验室(Jet Propulsion Lab, JPL) 对星际互联网(InterPlanetary internet, IPN) 的研究中提出了延迟容忍网络(Delay tolerant networking, DTN)。IRTF 于 2002 年设立了 DTNRG 研究小组, 制定了包括 DTN 体系结构^[53]、Bundle^[54] 协议、LTP 协议在内的多个相关互联网标准。2010 年起, CCSDS 也发布了一系列针对动态断续网络的相关标准, 在其 DTN 相关蓝皮书^[55] 中给出了 DTN 的主要使用场景, 包括用于星际之间以及低轨卫星

与地面的动态断续传输。

随着近年来低轨卫星组网提供互联网接入服务被关注, 卫星网络和地面互联网的深入融合也越发重要。从传输层协议角度看, 在端到端的传输路径中既包括有基于 TCP 的传输方式, 也包括有基于 DTN 的传输方式, 如何实现 TCP 和 DTN 两者高效融合与衔接亟待解决。

3.2.2 天地协同多网络一体化传输技术

天地一体化网络涉及地面互联网、空间网络等多种异构网络, 天然地为端到端传输提供了多种可选途径, 需要研究多种异构网络的高效协同传输机制, 从而提升天地一体化网络端到端传输的整体容量和适应能力。

天地协同多网络一体化传输的方式之一, 是利用终端的多网络接入能力进行多路径并发传输。目前, 在地面网络, 多路径并发传输相关研究已成为研究焦点。IETF 于 2009 年成立了 MPTCP 工作组, 旨在通过扩展 TCP 协议在不改变应用层 API 的前提下支持多路径并发传输, 目前已经制定了包括 MPTCP 体系结构、MPTCP 联合拥塞控制和 MPTCP 应用层 API 接口。多路径传输相关研究, 主要围绕乱序问题、带宽资源分配问题和移动性管理问题展开。针对乱序问题, 包括 DAPS^[56]、MPTCP-TSC^[57] 等, 主要是在调度时考虑到达时间。针对带宽资源分配问题, 主要思路是耦合各条子流的窗口变化, 以达到更高效的资源分配, 具体包括 LIA^[58]、MPCubic^[59]、Coordinated TCP Westwood^[60]、Delay Based MPTCP^[61] 和 eXplicitMultiPath (XMP) congestion control^[62] 等。针对移动性管理问题, 主要思路是利用终端可以同时接入多张网络的能力, 保持移动过程中传输的连续性和高效性, 具体包括 mSCTP^[63]、MPTCP-MA^[64] 和基于同时关联多个 AP 的快速切换^[65] 等。

然而, 现有多路径传输的主要应用场景仍然集中在地面网络。天地一体化网络为终端进行端到端多路径传输提供了更多的接入选择, 随着天地一体

化网络相关研究的展开, 多路径传输在聚合带宽、更高效的网络资源分配、更好地支持移动性等方面的优势需要进一步在天地一体化网络中进行挖掘和呈现。此外, 空间网络与地面网络差异性也会使得现有 MPTCP 协议工作不够高效。以联合拥塞控制为例, MPTCP 默认的联合拥塞控制机制主要基于 NewReno, 因此 NewReno 本身在空间网络存在的问题 MPTCP 中依然存在, 需要基于端到端传输技术增强相关研究成果对联合拥塞控制进行优化。

3.3 天地一体化网络安全管控技术

天地一体化网络在国土安全防御、作战指挥决策、军事行动实施等领域均发挥着极其重要的作用, 也是决定着未来信息化战争成败的关键因素之一^[66]。因此, 为了能够应对来自不同方面和层次的网络安全威胁, 必须采用有效的安全防护措施来保障天地一体化网络的正常运行。

3.3.1 主要难点

天地一体化网络由于自身具有的结构时变性、通信平台异构性、链路易受干扰等特性, 使得天地一体化网络在安全防护方面受到不同方面和不同层次的安全威胁。

1) 多域环境下源地址伪造以及跨域切换时的非法接入问题。

在天地一体化网络的空间网络以及地面网络互联互通过程中, 消息传递可能会受到具有非授权或者伪造地址的通信实体窃取、篡改、伪造或者重放等攻击; 空间、临近空间和地面网络隶属于不同的管理域, 由于网络节点的动态接入以及接入管理域的频繁切换, 攻击者可能通过劫持合法用户 IP 地址冒充合法节点接入到天地一体化网络中, 假冒合法节点占用网络资源, 删除或篡改数据。另外, 传统互联网缺乏直接跨域追溯的机制, 极大地降低了互联网的安全性。对于具备网络拓扑复杂、高度异构以及实体类型多元化等特点的天地一体化网络来说, 可追溯性是安全的必要基础。

为了实现天地一体化网络不同移动终端之间的接入认证, 保证传输数据

的安全性,需要各种基于密码技术的数字签名和加解密机制来支撑。然而传统的密钥管理不再适用于天地一体化网络,其原因在于星上设备运算能力有限,容易出现通信阻塞、单点失效以及时延较长等问题^[67]。因此,在保证密钥协商协议是可证安全的同时,需设计轻量级密码,降低计算复杂度及存储复杂度,以更好地适应星上设备的特定需求。

2) 复杂时空环境中传输路径的安全验证。

在天地一体化网络复杂时空环境下,空间网络与地面网络互联互通需要跨越多个异构网络域,在空间网络的接入用户与地面网络的接入用户之间打通数据传输路径,但由于用户接入时变、拓扑灵活调整、带宽受限等链路环境特点,增加了受到劫持、假冒、重放等攻击威胁的可能性,提高了数据传输安全防护的难度。

为了设计安全高效的天地一体化网络安全路由协议,业界的研究主要集中在基于 IPSec 协议的数据安全传输通道技术^[68]及基于不同管理域策略的安全传输控制技术^[69]两个方面,并采取适当的机制及策略以尽量降低安全方案的实施对路由性能的影响,在安全性和性能之间寻求合理的平衡。

3.3.2 设计思路及方案建议

基于地址与身份分离、分级式身份鉴权与追溯、全过程路径真实性保证等研究思路,设计了天地一体化网络实体全覆盖的真实性保证机制,分别以地址真实性为基础、身份真实性为目标、网络传输路径真实性为手段,分层次、系统性解决天地一体化网络安全的基础可信问题。

1) 多域多层次的真实源地址验证和跨域切换时的状态同步技术。

基于 SAVI 体系将地址与实体的可信信任节点在路由器中进行绑定,当数据报文到达时,通过查询这种可信的绑定关系,以确定地址是否伪造,从而实现了对伪造或者假冒 IPv6 源地址的通信进行阻断。

另外,针对天地一体化网络中,终

端用户地址接入点频繁切换,导致绑定表状态与通信实体地址状态可能难以同步等问题,利用天地一体化网络的管理控制面对地址与可信节点绑定关系的运行时状态进行集中计算,通过获得域内各路由器上的绑定表,准确地将过滤策略部署在相应路由器上,并利用此映射作为 ACL 过滤伪源地址的报文,以解决多路由或非对称路由带来的假阳性问题;考虑到空间网络拓扑的规律性和地面网络拓扑的稳定性,可以预先判断将要发生切换的目标接入节点(路由器),由当前接入节点将已建立的绑定关系通过控制面重建至待接入节点,实现安全通道的整体切换。地址真实性验证总体架构如图 8 所示。

2) 异构网络环境下多元实体身份鉴权与追溯技术。

提出一种天地一体化网络专用的地址编码方式,如图 9 所示,支持用户分级别授权,可以合理、高效、轻量地对通信端进行层次化编码,以便层次化地区分通信实体军民划分、组织隶属关系及组织规模,从而实现对典型业务终端的身份鉴权。该编码方式能够抵御重

放、篡改等伪造攻击,在地址真实性得以确保的前提下,通过对地址反解实现鉴权,并进一步追溯用户信息。

3) 大跨度异构网络真实路径验证技术。

主要研究思路是各域存在一个(或全局存在一个)具有最高权限的路径认可服务角色(角色可以是虚拟功能或真实服务器实体),路径认可服务角色能够使用数据传输安全通道与其他各网络节点、各路径认可服务角色进行可靠的路径信息交换。需要真实可信服务的高级用户实体向路径认可角色提出真实路径验证结构申请,收到回复后数据发送方将验证结构嵌入数据头部载荷,传输路径上各网络节点依据自身单独密钥提取验证结构相应字段,完成真实路径转发行为鉴定。如果数据传输过程中网络拓扑发生了调整变化,探知拓扑变化的网络节点(特别是空间地面路径中的核心数据分发节点)可以重新向路径认可角色提出后续真实路径验证结构申请,置换数据头部载荷的验证结构后继续向接收方转发。

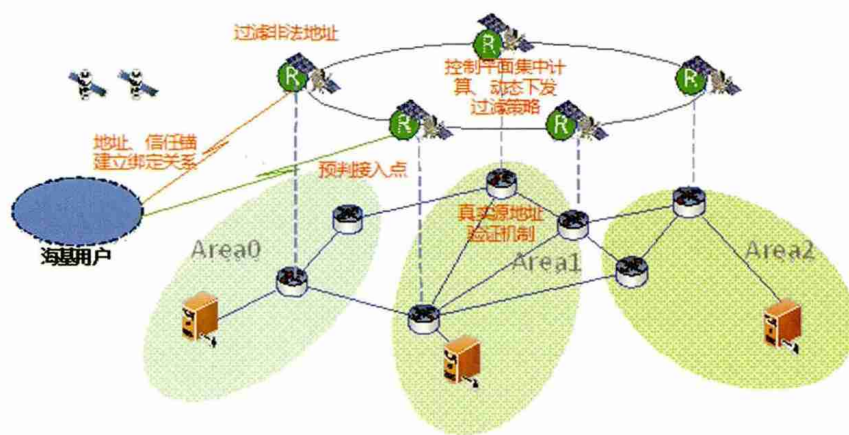


图8 天地一体化网络地址真实性验证总体架构

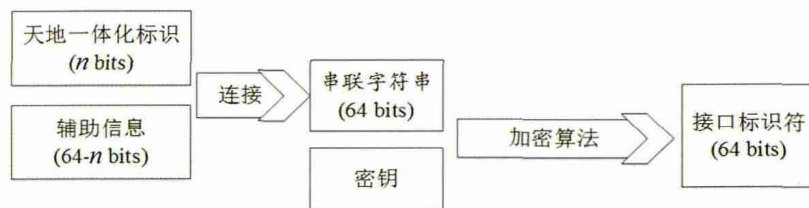


图9 天地一体化网络地址编码方式

4 结论

由于空间网络在覆盖范围和移动接入等方面与地面网络具有极强的互补关系,近年来通过采用互联网技术实现空间网络与地面网络在协议体系层面的一体化融合演进,从而构建覆盖全球、天地一体的网络,不仅是网络技术的发展趋势,也是国际互联网巨头争夺的焦点,更与中国全球化国家战略密切相关。

天地一体化网络的发展趋势是借鉴互联网技术,基于空间组网的方式,采用“天网地网”的结构,通过统一的网络体系结构,实现天地网络的有效融合。

梳理天地一体化网络的体系结构和组网结构的研究难点,结合中国实际情况,其设计方案建议为:

1) 天地一体化网络的协议体系采用分层的结构,基于IP技术实现三网

的网络层互联,实现对上层应用的透明和下层异构结构的隔离。

2) 天地一体化网络的网络结构采用“天网地网”的结构,空间网络则采用“双主干”的结构,通过空间主干网实现各类空间卫星系统的接入,通过地面主干网实现空间网络与地面网络的互联互通。

分析天地一体化网络的路由、端到端传输、安全控制等关键技术的研究难点,其技术发展趋势和研究建议为:

1) 路由技术。天地一体化网络涉及多种独立网络系统,包括地面网络的多个独立的网络系统和空间网络的多层次立体结构的卫星系统,而每个独立的网络系统作为独立自治域,实现自我独立管理,需要根据具体应用场景选择不同的路由协议;而自治域间应通过标准的域间路由协议实现安全可靠的互联。

2) 端到端传输技术。在面向大时空跨度的端到端传输技术增强方面,现有研究正朝着综合解决空间网络各种挑战、传输协议深度融合方面演进。在天地协同多网络一体化传输技术方面,现有研究相对较少,在开展研究时应充分考虑空间网络与地面网络的差异性,利用好网络信息以及底层链路信息进行更加有效地协同,以达到空间网络与地面网络的优势互补的目标。

3) 安全控制技术。天地一体化网络具有的结构时变性、通信平台异构、链路易受干扰等特性,使得天地一体化网络在安全接入、安全切换、安全路由等方面易受到不同方面、不同层次的安全威胁。本文基于地址与身份分离、分级式身份鉴权与追溯、全过程路径真实性保证等研究思路,给出了天地一体化网络实体全覆盖的真实性保证机制的方案建议。

参考文献(References)

- [1] Satellite Industry Association. State of the satellite industry report[EB/OL]. [2016-03-02]. http://www.sia.org/wpcontent/uploads/2013/06/2013_SSIR_Final.pdf.
- [2] Iridium. Iridium NEXT: The bold future of satellite communications [EB/OL]. [2016-03-02]. <https://www.iridium.com/network/iridiumnext>.
- [3] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.
Tan Shusen. Development and thought of compass navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 391-396.
- [4] Wikimedia Foundation Inc. OneWeb satellite constellation[EB/OL]. [2016-03-02]. https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb_satellite_constellation.
- [5] Wikimedia Foundation Inc. SpaceX satellite development facility[EB/OL]. [2016-03-02]. https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX_satellite_development_facility#Internet_communication_satellite_characteristics.
- [6] 中国计算机学会. 中国计算机科学技术发展报告[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
China Computer Federation. China Computer science and technology development report[M]. Beijing: China Machine Press, 2015.
- [7] 张军. 天基移动通信网络[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
Zhang Jun. Space-Based Mobile communication network[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [8] Wang Junlin, Liu Chunsheng. development and application of INMARSAT satellite communication system[C]//2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control. Beijing, China: IEEE, 2011: 619-621.
- [9] Liebrecht P, Schier J, Bhasin K B, et al. NASA's integrated space communications architecture[C]. AIAA SpaceOps, Huntsville, Alabama, April 25-30, 2010.
- [10] Florio M A, Fisher S J, Mittal S, et al. Internet routing in space: prospects and challenges of the IRIS JCTD[C]. IEEE Military Communications Conference. Orlando, USA, October 29-31, 2007.
- [11] 王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展[J]. 航天器工程, 2013(1): 1-6.
Wang Jiasheng. China data relay satellite system and its application prospect[J]. Spacecraft Engineering, 2013(1): 1-6.
- [12] CCSDS. CCSDS130.0.G.2 Overview of space communications protocols[S]. Washington, DC: The Consultative Committee for Space Data Systems, 2007.
- [13] CCSDS. CCSDS702.1-R-2IP Over CCSDS space links, Draft recommendation for space data system practices. Issue 2[S]. Washington, DC: The Consultative Committee for Space Data Systems, 2007.
- [14] Fall K. A delay-tolerant network architecture for challenged internets[C]//Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies Architectures and Protocols for Computer Communications. New York : ACM, 2003: 27-34.
- [15] Warthman F. Delay-tolerant networks(DTNs): A tutorial[EB/OL]. [2016-03-02]. <http://www.dtnrg.org/wiki/Docs>.
- [16] Ivancic W, Eddy W M, Stewart D, et al. Experience with delay-tolerant networking from orbit[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2010(28): 335-351.
- [17] Davis F A, Marquart J K, Menke G. Benefits of delay tolerant networking for earth science[C]//Proceeding of 2012 IEEE Aerospace Conference. New

York: IEEE, 2012: 6–11. .

- [18] Clark D. The design philosophy of the DARPA internet protocols[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 1988, 18(4): 106–114.
- [19] Hogie K, Criscuolo E, Parise R. Using standard internet protocols and applications in space[J]. Computer Networks, 2005, 47(5): 603–650.
- [20] Israel D, Parise R, Hogie K, et al. Demonstration of internet technologies for space communication[C]. SpaceOps 2002 Conference, Houston, Texas, October 10–19, 2002.
- [21] Sterling D E, Hatlelid J E. The IRIDIUM system—a revolutionary satellite communications system developed with innovative applications of technology [C]//Military Communications Conference, 1991. New York: IEEE, 1991: 436–440.
- [22] Ananasso F, Priscoli F D. Satellite systems for personal communication networks[J]. Wireless Networks, 1998, 4(2): 155–165.
- [23] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks[C]//Global Telecommunications Conference, 1995. New York: IEEE, 1995, 1: 529–535.
- [24] Gounder V V, Prakash R, Abu-Amara H. Routing in LEO-based satellite networks[C]//Wireless Communications and Systems, 2000. New York: IEEE, 2000: 221–226.
- [25] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(8): 1636–1648.
- [26] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037–1048.
- [27] Henderson T R, Katz R H. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks[C]//Global Telecommunications Conference, 2000. New York: IEEE, 2000, 2: 1119–1123.
- [28] Hashimoto Y, Sarikaya B. Design of IP-based routing in a LEO satellite network[C]//Proceedings of Third International Workshop on Satellite-Based Information Services. New York: ACM, 1998: 81–88.
- [29] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137–147.
- [30] Ekici E, Akyildiz I F, Bender M D. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks[C]//INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. New York: IEEE, 2000, 2: 500–508.
- [31] Mauger R, Rosenberg C. Qos guarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network[J]. IEEE Communications Magazine, 1997, 35(7): 56–65.
- [32] Svirgelj A, Mohorcic M, Kandus G, et al. Routing in ISL networks considering empirical IP traffic[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 261–272.
- [33] Mohorcic M, Svirgelj A, Kandus G, et al. Performance evaluation of adaptive routing algorithms in packet-switched intersatellite link networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2002, 20(2): 97–120.
- [34] Mohorcic M, Werner M, Svirgelj A, et al. Adaptive routing for packet-oriented intersatellite link networks: Performance in various traffic scenarios[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 808–818.
- [35] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, et al. Explicit load balancing technique for NGE0 satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17(1): 281–293.
- [36] Erçetin Ö, Krishnamurthy S, Dao S, et al. Provision of guaranteed services in broadband LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2002, 39(1): 61–77.
- [37] Chen C. A QoS-based routing algorithm in multimedia satellite networks[C]//Vehicular Technology Conference, 2003. New York: IEEE, 2003, 4: 2703–2707.
- [38] Akyildiz I F, Ekici E, Bender M D. MLSR: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411–424.
- [39] Lee J, Kang S. Satellite over satellite (SOS) network: A novel architecture for satellite network[C]//INFOCOM 2000. New York: IEEE, 2000, 1: 315–321.
- [40] Bayhan S, Gür G, Alagöz F. VoIP performance in multi-layered satellite IP networks with on-board processing capability[C]//Computer Networks, 2006 International Symposium on. New York: IEEE, 2006: 197–202.
- [41] Bayhan S, Gür G, Alagöz F. VoIP performance in multi-layered satellite IP networks with on-board processing capability[C]//Computer Networks, 2006 International Symposium on. New York: IEEE, 2006: 197–202.
- [42] Nishiyama H, Kudoh D, Kato N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998–2007.
- [43] Nishiyama H, Kudoh D, Kato N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998–2007.
- [44] Caini C, Firrincieli R. TCP Hybla: a TCP enhancement for heterogeneous networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22(5): 547–566.
- [45] Ha S, Rhee I, Xu L. CUBIC: A new TCP-friendly high-speed TCP variant[J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2008, 42(5): 64–74.
- [46] Akyildiz I F, Morabito G, Palazzo S. TCP-Peach: a new congestion control scheme for satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(3): 307–321.
- [47] Akyildiz I F, Zhang X, Fang J. TCP-Peach+: Enhancement of TCP-Peach for satellite IP networks[J]. Communications Letters, IEEE, 2002, 6(7): 303–305.
- [48] Zhou K, Yeung K L, Li V O K. P-XCP: A transport layer protocol for satellite IP networks[C]//Global Telecommunications Conference, 2004 IEEE. Dallas, Texas USA: IEEE, 2004, 5: 2707–2711.
- [49] Caini C, Firrincieli R, Lacamera D. PEPsal: A performance enhancing proxy for TCP satellite connections[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems

- Magazine, 2007, 22(8): 7–16.
- [50] Marchese M, Rossi M, Morabito G. PETRA: Performance enhancing transport architecture for satellite communications[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2004, 22(2): 320–332.
- [51] Mascolo S, Casetti C, Gerla M, et al. TCP westwood: Bandwidth estimation for enhanced transport over wireless links[C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Rome, Italy: ACM, 2001: 287–297.
- [52] Cloud J, Leith D, Medard M. Network coded TCP (CTCP) performance over satellite networks[C]. International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, SPACOMM, Nice, France, February 23–27, 2014.
- [53] Balakrishnan H, Padmanabhan V N, Katz R H. The effects of asymmetry on TCP performance[J]. Mobile Networks and Applications, 1999, 4(3): 219–241.
- [54] Cerf Vinton. Delay-tolerant networking architecture[R]. RFC4838. Fremont, California: IETF, 2007.
- [55] Scott K L, Burleigh S. Bundle protocol specification[R]. RFC5050. Fremont, California: IETF, 2007.
- [56] Consultative Committee for Space Data Systems. Rationale, scenarios, and requirements for DTN in space[R]. CCSDS734.0–G–1. Washington, DC: Consultative Committee for Space Data Systems, 2010.
- [57] Kuhn N, Lochin E, Mifdaoui A, et al. Daps: Intelligent delay-aware packet scheduling for multipath transport[C]// Communications, 2014 IEEE International Conference on. Sydney, Australia: IEEE, 2014: 1222–1227.
- [58] Park S Y, Joo C, Park Y, et al. Impact of traffic splitting on the delay performance of mptcp[C]//Communications, 2014 IEEE International Conference on. Sydney, Australia: IEEE, 2014: 1204–1209.
- [59] Raiciu C, Handley M, Wischik D. Coupled congestion control for multipath transport protocols[R]. RFC6356. Fremont, California: IETF, 2011.
- [60] Le T A, Hong C S, Lee S. MPCubic: An extended cubic TCP for multiple paths over high bandwidth-delay networks[C]//ICT Convergence (ICTC), 2011 International Conference on. Seoul, Korea: IEEE, 2011: 34–39.
- [61] Le T A, Hong C S, Huh E N. Coordinated TCP Westwood congestion control for multiple paths over wireless networks[C]//Information Networking (ICOIN), 2012 International Conference on. New York: IEEE, 2012: 92–96.
- [62] Cao Y, Xu M, Fu X. Delay-based congestion control for multipath TCP[C]//Network Protocols, 2012 20 th IEEE International Conference on. Austin, TX, USA : IEEE, 2012: 1–10.
- [63] Cao Y, Xu M, Fu X, et al. Explicit multipath congestion control for data center networks[C]//Proceedings of the Ninth ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. Santa Barbara, California: ACM, 2013: 73–84.
- [64] Koh S J, Chang M J, Lee M. mSCTP for soft handover in transport layer[J]. IEEE Communications Letters, 2004, 8(3): 189–191.
- [65] Lim Y, Chen Y C, Nahum E M, et al. Cross-layer path management in multi-path transport protocol for mobile devices[C]// INFOCOM, 2014 Proceedings IEEE. Toronto, Canada: IEEE, 2014: 1815–1823.
- [66] Croitoru A, Niculescu D, Raiciu C. Towards WiFi mobility without fast handover[C]//12th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation. Oakland, CA, USA: USENIX, 2015: 219–234.
- [67] 李华, 范鑫鑫, 秘建宁, 等. 空天地一体化网络安全防护技术分析[J]. 中国电子科学研究院学报, 2014, 9(6): 592–597.
Li Hua, Fan Xinxin, Mi Jianning, et al. Analysis of security technologies in integrated space-air-ground networks[J]. Journal of China Institute of Electronics, 2014, 9(6): 592–597.
- [68] 彭长艳. 空间网络安全关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
Peng Changyan. Research on key security technologies in space networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.
- [69] Consultative Committee for Space Data Systems. CCSDS713.5–B–1 Space communications protocol specification–security protocol[S]. Washington, DC: CCSDS, 1999.

Progress and tendency of space and earth integrated network

LI Hewu^{1,2}, WU Qian^{1,2}, XU Ke², WU Jianping^{1,2,3}, YANG Zengyin^{2,3}, JIANG Zhuo^{2,3}, ZHU Liang^{2,3}

1. Institute for Network Sciences and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

3. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract The space network is a great complement to the ground network in terms of coverage and mobile access, and applications of Internet, mobile communication network and space network are gradually integrating with each other. Building a space and earth integrated network with global coverage by using the same network architecture is becoming more and more popular. This is not only a technological trend but also the core of the competition among Internet giants. In this paper, we analyze and conclude the development trend and research progress on space network structure and protocol architecture, with the satellite communication system as its representative. Furthermore, the research challenges and development trends of space and earth integrated network including network architecture, routing, end to end transmission, security and so on are discussed. In the end, we give further research directions and network design suggestions.

Keywords space and earth integrated network; network architecture; network structure; routing; end to end transmission; security control

(责任编辑 韩星明)