



专题：天地一体化信息网络

天地一体化信息网络统一编址与路由研究

杨芫^{1,2}, 徐明伟^{1,2}, 李贺武^{2,3}

- (1. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084;
2. 清华大学信息科学与技术国家实验室, 北京 100084;
3. 清华大学网络科学与网络空间研究院, 北京 100084)

摘要: 天地一体化信息网络将是支持地面互联网、无线移动网络和空间网络相互连通、深度融合的一体化网络, 采用统一的网络层设计是实现高效融合与互联互通的关键所在。针对空间链路和空间网络在稳定性、可靠性等方面的特点, 提出了天地一体化信息网络的统一编址与路由的方案, 基于 IPv6 和层次路由的方式实现网络层的高效融合, 具有良好的可扩展性、可用性、稳定性、可控性。

关键词: 网络体系结构; 空间网络; 网络融合; 网络编址; 网络路由

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017320

Study on addressing and routing in space-ground integrated information network

YANG Yuan^{1,2}, XU Mingwei^{1,2}, LI Hewu^{2,3}

1. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China
3. Institute for Network Sciences and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: The space-ground integrated information network is considered to be promising for interconnection and integration of the terrestrial internet, mobile communication networks, and space networks. A unified network layer is significant for efficient integration. Motivated by the characteristics of space links and space networks, an addressing and routing approach for the space-ground integrated information network was proposed, which leveraged IPv6 and hierarchical routing to achieve good efficiency, scalability, availability, stability, and controllability.

Key words: network architecture, space network, network integration, network addressing, network routing

收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2017-12-06

通信作者: 李贺武, lihewu@cernet.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61625203); 北京市科学技术委员会资助项目 (天地异构网络地面互联融合系统研究)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61625203), Beijing Science and Technology Commission Project (Research on Heterogeneous Network Terrestrial Internet Convergence System)

1 引言

互联网的飞速发展给人们的通信方式带来了巨大的变化,高速通信网络覆盖的区域也在持续不断地扩展,对于国家和个人都有着意义深远的影响。如今,宇宙空间已经成为了各国继陆、海、空之后的第四疆域,我国在海洋、太空等领域的安全利益以及空间科学探索任务的飞速发展也对跨地域、跨空域信息实时传输和及时共享提出了更高的要求。空间卫星网络具有地理覆盖面广、组网灵活等优势,而传统地面互联网以及移动通信网具有技术成熟、资源丰富等长处,将它们进行一体化融合能最大限度地发挥各网络自身的特长,实现优势互补,提高资源利用率,实现对种类更丰富、数量更庞大的业务的支持,打破国外对技术进行垄断的现状。天地一体化信息网络是支持互联网、移动通信网络和空间网络互联互通、深度融合的一体化网络,目前业内已就其建设的紧迫性达成了广泛共识^[1,2]。

卫星通信技术在最近的几十年内得到了较大的发展,然而目前卫星的功能主要是作为信号中继,提供弯管式的信号转发,组网和存储转发的能力较为缺乏。为了实现空间组网和一体化网络融合,需要在物理层、数据链路层、网络层和传输层解决一系列的技术挑战,其中,统一的网络层设计是实现高效的多网融合与互联互通的关键所在。这不仅仅是因为统一的网络层能够避免协议转换或翻译带来的复杂性和开销,更是因为以 IP 技术为核心的网络层作为互联网沙漏模型的“细腰”,起到了对上层屏蔽链路差异的作用,正是这一抽象层的设计,奠定了互联网数十年来所取得的成功的基础,也成为了互联网与工业、能源等传统领域深度融合的动力^[3,4]。然而,现有互联网的编址与路由技术不能直接运用于空间网络,这主要是源于空间网络在稳定性、可靠性等方面的特点,如拓扑变化频繁、链路带宽和误码率波动较大等。因此急需在

已有互联网技术的基础上提出适合空间网络特性和多网融合目标的路由方案。

目前已有的研究主要解决天基网络或卫星网络自身的路由问题,缺少对天地多网融合这一目标的考虑,难以较好地实现天基网络与地面互联网和移动通信网络的互联互通。为此,本文以天地互联融合为目标,提出了天地一体化信息网络(尤其是其中天基网络部分)的编址以及路由方案,首先对天地一体化信息网络的组网结构进行概述,并在此基础上依次对天基网络的编址以及路由方案进行阐述。

2 组网结构概述

国际上已经有多个项目致力于建设融合了卫星网络的多网合一组网结构,这些已经完成或正在开展的项目既包括民用系统,也包括军用系统。从组网结构上看,已有系统可以分为天星地网、天基网络、天网地网 3 类。对于我国来说,领土特点使得卫星地面站难以在全球范围进行部署,为了实现通信全球覆盖,并提供关键应用快速响应能力,摆脱对国外卫星通信网络的依赖,需要设计具有创新性的天地一体化信息网络组网结构。综合这些因素,国内相关领域的专家经过探讨,创造性地提出了天地双主干结构的天地一体化信息网络^[2],其总体结构如图 1 所示。

在地球同步轨道(geostationary earth orbit, GEO)上,由 3 颗以上卫星搭载高性能空间路由器组成天基主干网络。借助地球同步卫星相对于地面静止和覆盖面广的优势,充分利用有限的地球同步轨道资源,使用高性能设备和高容量激光链路建设天基高速主干网,实现全球覆盖,将地表和空间任意位置的数据传回本土。

利用高速光纤将多个地面站互连,组成地基主干网络,并在地面站使用互为备份的微波链路和激光链路与天基主干网络互连,组成一个完整的主干网络。基于已经相对成熟的互联

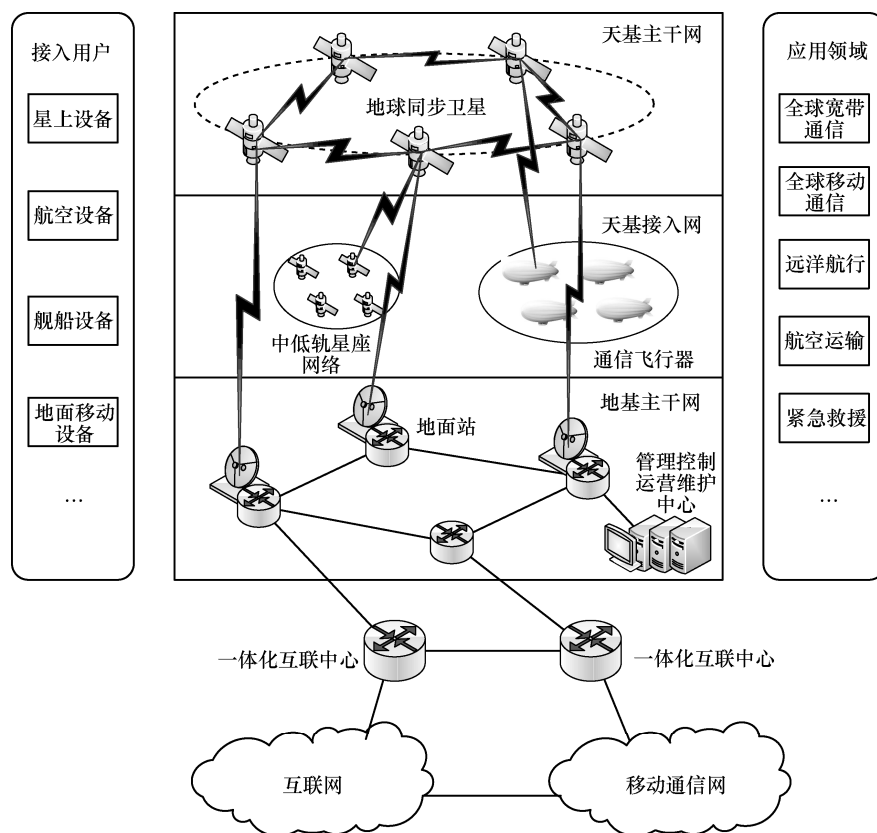


图1 天地一体化信息网络总体结构

网组网和路由技术，为天基网络提供最大限度的支持和保障。

由低轨道（low earth orbit, LEO）卫星、中轨道（medium earth orbit, MEO）卫星、平流层气球或其他飞行器组成一个个接入网络，为不同地域、不同用户的各类应用提供网络接入服务。这类卫星和飞行器的优势在于距离地面较近，用较少的资源即可提供较强的通信能力，缺点在于单一节点的覆盖面积较小，且中低轨卫星的运动速度较快。因此，一方面可以由大量的节点组成覆盖面积较广的网络，通过星地链路连接到地基主干网，从而获得更高速的传输信道；另一方面可以通过星间链路连接到天基主干网，利用天地双主干的优势与地面站点通信。

通过部署于地面的一体化网络互联中心，将地基主干网连接到互联网与移动通信网，实现异构网络的融合统一。

3 统一编址方案

网络层方案首先需要解决节点的编址问题，即如何标识与定位网络中的节点。根据互联网体系结构委员会（Internet Architecture Board, IAB）于2016年11月7日发布的关于推进IPv6部署的最新官方正式公告，建议IETF等标准化组织停止要求新设备和新的扩展协议兼容IPv4，未来的新协议全部在IPv6基础上进行优化，用行动支持并实施IPv6在全球范围内的部署。根据该发展趋势，未来天地一体化信息网络也将基于IPv6协议进行一体化融合。

本文提出的网络层方案是基于IPv6协议的，首先从可扩展性和天基链路动态建立这两个方面阐述采用IPv6协议族的内在优势，然后对编址方案的具体设计进行探讨。

3.1 协议族的选择

从可扩展性的角度看，尽管现有互联网普遍

使用 IPv4 协议，而 IPv6 协议仍在发展中，但是全球 IPv4 地址已经分配完毕，即使从拥有富余地址的互联网服务提供商那里获取地址，也很难满足天基网络节点和链路数量较多的情形，网络的可扩展性会受到很大的限制。例如，按照通常每条链路 4 个 IPv4 地址的分配方法，一个长度为 24 bit 的 IPv4 地址前缀仅仅能够支持 64 条链路。虽然可以使用无编号网络等技术来减少一定的地址，但这样很难对每个天基网络节点的接口进行细致的管理，且能够节省的地址数量十分有限。当天基网络需要为大量接入的用户提供公有地址时，地址紧缺和可扩展性的问题就将更为突出。一个可选的方案是使用私有 IPv4 地址+NAT 技术，然而这一方案对远程 ICMP 访问以及需要在两个方向建立连接的应用（如 FTP）的支持不够好，更本质的原因在于：NAT 技术的适用场景主要是位于网络边缘的接入用户，而天地一体化信息网络是具有提供全球互联能力的主干网。而如果采用 IPv6 地址对天地一体化信息网络编址，则可以依靠 IPv6 的庞大地址空间很好地解决可扩展性问题。一个与此类似的场景是物联网，其中的海量设备通信和管理是 IPv6 的一个典型应用。在物联网中，如何以较低的开销在低端的设备上实现 IPv6 协议栈是一个挑战，而在天地一体化信息网络中，实现 IPv6 协议栈的开销相比卫星上其他复杂系统而言是微不足道的。

从空间链路动态建立的角度看，中低轨卫星的运动会导致节点之间的可见性不断发生变化，需要空间链路具备动态建连的能力。此外，天基节点不像地面节点那样可以直接进行配置，所以空间链路动态建立和自动配置的能力是不可缺少的。传统的 IPv4 使用 DHCP 进行地址自动配置，然而这一方法存在对拓扑的要求：如果将每个天基节点的接口抽象为节点，将可能建立的链路抽象为边，则只有当拓扑满足二分图时，才能区分发起配置的节点（即 DHCP 服务器）和接受配置

的节点（即 DHCP 客户端），如图 2 所示。如果采用 IPv6 协议，则能够以较小的开销解决这一问题。具体方法是每个接口预先配置自己的公有 IPv6 地址前缀和地址，当两个接口相连时，通过邻居发现（neighbor discovery, ND）协议相互发现对方的前缀，并获取对方前缀下的一个 IPv6 地址。这样做的结果是，一条空间链路将具有两条 IPv6 地址前缀，对于路由计算的正确性不会产生影响，仅仅是增加了少量路由信息的开销；而每个接口都具有两个 IPv6 地址，通过其中任意一个地址都可以进行访问。当两个接口间的链路由于卫星的运动而断开时，每个接口将删除从对方获得的 IPv6 地址，仍然保留自己原有的 IPv6 地址前缀和地址，以便下一次与同一接口或其他接口建立链路。一方面，IPv6 对接口多地址提供了良好的支持，这一点在 IPv4 中只能通过手动配置 secondary 地址实现；另一方面，ND 协议对邻居自动发现和地址自动配置提供了良好的支持，在灵活性和高效性方面优于 IPv4 的 DHCP。

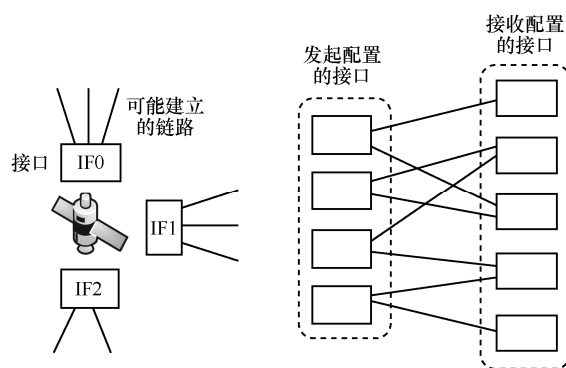


图 2 空间链路如采用单向配置方案则需要拓扑可二分

3.2 基于 IPv6 的统一编址

如前文所述，采用 128 bit 的 IPv6 地址为天基路由器上的一个接口赋予一个全球唯一可聚合单播地址。其中，前 64 bit 标识了此地址的路由前缀和子网标识，后 64 bit 为网络接口标识符，与 IEEE 802 系列规定的 EUI-64 地址保持一致。天地一体化信息网络中的中低轨卫星节点具有很强的动态性，这一特性带来了两种可能的编址方案。



一种方案是根据卫星相对于某个参照系的位置进行编址，例如卫星在地球表面投影的经纬度坐标。这种方案将空间按其所在的经纬度划分成若干个区域，并使用 IPv6 地址中的子网 ID 字段中的一部分对区域进行编号，子网 ID 字段中剩余的比特用于区分该卫星节点的不同接口，如图 3 所示。例如，当经度和纬度各采用 8 bit 来标识时，就可以支持 256×256 个区域，每个区域的边长最大仅约 156 km。该方案的优点在于，通过卫星接入的用户可以通过自己所在的地理位置，结合路由前缀，自动获取一个 IPv6 接入地址，即使用户接入的卫星发生了变化，用户也无需改变地址（子网 ID 中除经度 ID 和纬度 ID 之外的比特可以使用为接入网络预留的固定值）。而该方案的缺点在于，卫星节点需要频繁地动态更新地址和路由，给控制平面带来了较大的开销和不稳定性，尤其是划分的区域数量较多时。此外，还需要对一些边界情况进行处理，例如确保一个区域内不能有多颗卫星。从本质上看，这一方案是将卫星的动态性完全交给网络层来处理，使得用户的传输层和应用层保持简单，但不符合互联网“边缘复杂、核心简单”的设计原则。

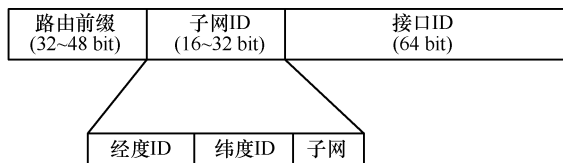


图 3 基于地理位置的编址

另一种方案是基于卫星的逻辑位置进行编址，将卫星编号或卫星所处的轨道和它在轨道中的位置嵌入 IPv6 地址子网 ID 字段的前面若干个比特，从而使得卫星无论运动到何处都具有永久不变的地址，如图 4 所示。这种方案的优点在于控制平面更加简单和稳定，地面站可以方便地对目标卫星进行访问而无需知道其当前坐标。此外，还可以方便地进行地址聚合，数据分组在星间进行转发时只需要使用目标地址中的卫星编号来查

找下一跳路由，而无需使用完整的 IPv6 地址，这样就可以大幅减小控制平面的存储、计算和带宽消耗，实现轻量的路由协议。此编址方案的缺点在于，随着中低轨卫星的高速运动，用户可能需要随着其接入卫星的改变而改变地址。然而，对于持续时间较短的通信而言，如浏览网页或推送消息，地址的改变并不会造成太大影响；而对于持续时间较长且不希望被中断的通信，如实时音频或视频传输，可以通过 IPv6 协议对移动性的支持来实现平滑的地址切换。

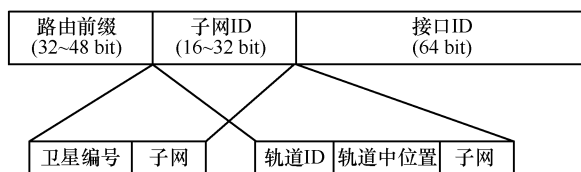


图 4 基于逻辑位置的编址

4 路由方案

天地一体化信息网络路由方案不仅要针对天基网络进行路由协议的优化或重新设计，更重要的是构建一个完整的路由协议体系，满足互联互通、可管控性、可扩展性等一系列需求，为此需要将一些不同的路由方案进行有机的结合。借鉴互联网路由的经验，本文提出了天地一体化信息网络中的层次化路由方案。具体而言，可以分为域间路由、域内路由与延迟容忍路由 3 个组成部分。

4.1 域间路由

站在整个天地一体化信息网络的角度，逻辑上可以将其看作一个大型的自治系统通过一体化互联中心连接到互联网和移动通信网，因此可以采用边界网关协议(border gateway protocol, BGP)来传递网络可达信息，尤其是当存在多个一体化互联节点提供对外连接时可以实现动态的路由优化。与地面互联网不同的是，天地一体化信息网络会承载军用、民用等更加多元化的业务，且确保天基节点安全的需求更为强烈，为此可以在 BGP 路由的基础上，结合真实源地址认证、用户

身份认证和多维策略路由等技术, 以实现流量感知、服务质量区分、安全隔离等功能。

进一步地, 天地一体化信息网络内部实际上并不仅仅包含一个自治系统, 尤其是随着网络规模的扩展和天基接入网络数量的增加, 天地双骨干网络架构的优点更加凸显出来: 天地双主干网络作为 **provider** 自治系统提供服务, 而天基接入网络作为 **customer** 自治系统。天地一体化信息网络内部各自治系统之间可能需要使用动态的空间链路相互连接, 因此域间路由方案需要根据具体情况, 灵活采用静态、分时配置、动态等方案。当采用动态路由方案时, 由于传统的 **BGP** 会在重新建立会话后重新交换所有的路由信息, 这在链路稳定性较低且拓扑动态性较强的情况下会极大地增加路由收敛的时间, 造成大量的资源浪费。因此, 可以对传统的 **BGP** 进行改进: 利用绝大多数域间路由信息变化不频繁这一特点, 当已经建立连接的 **BGP** 邻居之间的连接中断时, 双方仅对原有的路由信息进行标记而不是删除, 当同一对邻居间再次建立连接时, 双方仅仅需要交换在断连期间发生了变化的路由信息即可, 从而减少了发送的路由更新消息数量, 最好的情况下可以不发送任何路由更新消息, 节约了带宽等资源, 加速了域间路由的收敛。这一适用于天地一体化信息网络的域间路由协议称为 **BGP+**。

4.2 域内路由

在天地一体化信息网络中的自治系统内部, 各节点需要建立详细的转发表来实现数据分组的高效传递。转发表的建立对于动态性较强的天基节点而言是一个挑战。一种可行的方案是采用集中式计算转发表并下发给各节点的方式, 如采用 **SDN** 技术^[5]。这类方案能有效利用卫星运动可预测的特点, 提前为各天基路由器配置好路由, 使得路由具有较好的可控性。此外, 还可以根据需求对系统进行优化, 例如增加使用同一路由配置的时间片的长度以提高路由的稳定性^[6], 或者采

用多层卫星网络路由的方法来提高路由的可扩展性^[7], 或者通过综合考虑卫星的能耗和路径的质量实现节能的天基网络路由^[8]等。然而此类方案的缺点在于, 当网络拓扑发生难以预测的变化时不能快速地做出响应, 例如由于激光对准时间的原因导致链路建立的时间提前或推迟, 或者空间链路发生故障。为了处理这一情况, 可以将基于配置的路由方案与动态路由方案相结合。

设计天地一体化信息网络域内动态路由方案需要克服许多挑战, 在之前的一项研究中提出的 **OSPF+** 协议^[9]通过引入拓扑预测机制和修改 **OSPF** 状态机, 缩短了天基网络域内路由收敛时间。已有相关方案仍然存在进一步优化的空间, 但在天地一体化信息网络中需要考虑的另一个重要问题是动态路由如何与基于配置的路由协同工作。通常来讲, 基于配置的路由应该具有更高的优先级, 从而实现良好的可管控性, 而当配置的路由与实际网络情况不相符时则应该采用动态路由。为此, 天基路由器需要决定在什么情况下使用何种路由。可以采取的方法是让天基路由器与发起路由配置的集中式控制器之间发送轻量级的保活消息, 当集中式控制器不可访问时表示配置的路由可能已经失效, 应该将配置的路由设置为失效, 采用动态路由表项进行分组转发。

4.3 延迟容忍路由

除了上述域间路由和域内路由, 天地一体化信息网络还存在对延迟容忍网络 (**delay-tolerant networking, DTN**) 路由的需求。这主要出现在网络不连通导致无法进行端到端实时通信的特殊情况, 例如在部署前期卫星节点较为稀疏, 或者遭受军事打击或大规模故障时。由于基于卫星技术的天基网络拓扑可预测性较好, 已有的研究中较少涉及卫星网络中的 **DTN** 路由, 然而从重大工程的角度看, **DTN** 是增强天地一体化信息网络可用性和灵活性的一项重要技术。**DTN** 的转发方式与传统的互联网有着很大的不同, 它允许网络的中

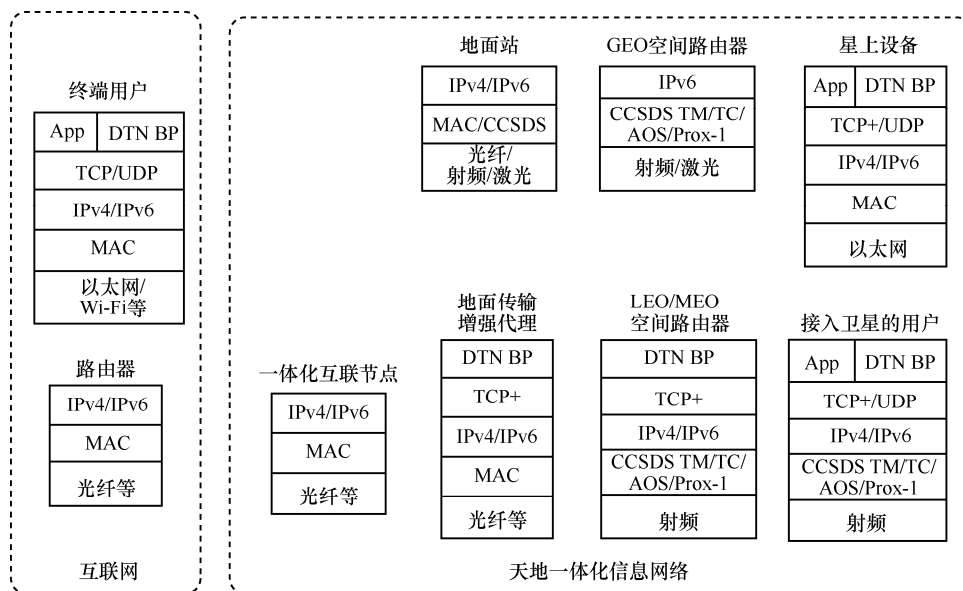


图5 天地一体化信息网络中各节点的协议体系结构

间节点长时间地存储数据，并在发现新的邻居节点时复制和概率转发数据。DTN 实际上跨越了网络层和传输层甚至应用层。由于 DTN 从原理上难以支持需要实时性交互的应用，所以不能简单地将 TCP/IP 与 DTN 协议进行相互转换。取而代之，在天地一体化信息网络中应当由终端用户发起 DTN 传输，即当终端用户的应用发现无法通过传统的或改进的 TCP/IP 建立连接时，能够选择性地切换到 DTN 模式来发送数据。与已有的 DTN 技术不同，网络中并不需要所有的节点都对 DTN 协议提供支持，这样可以在网络仍然连通的部分最大限度地数据发送到距离目的地最近的节点。DTN 节点在进行路由选择时也可以利用拓扑预测或其他域间、域内路由协议提供的信息来优化发送数据所需的时间。天地一体化信息网络中各节点的协议体系结构如图 5 所示。

5 结束语

本文以天地一体化信息网络重大工程为背景，介绍了天地一体化信息网络的组网结构，提出了以 IPv6 技术为核心的编址和路由设计。侧重点在于满足天地一体化信息网络高效互联融合的需

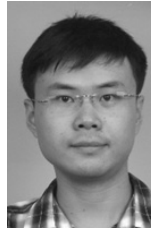
求，适应其天基网络部分的特点，提供具有较好可扩展性、可用性、稳定性、可管控性的编址和路由方案。限于篇幅和当前技术发展现状，本文的方案侧重于总体方案设计和各技术之间的协同工作，一些具体的协议和算法设计细节需要在今后的工程项目和科研工作中进一步细化和完善。

参考文献：

- [1] 李贺武, 吴茜, 吴建平, 等. 天地一体化信息网络研究进展与趋势[R]. CCF2014-2015 中国计算机科学技术发展报告, 2015.
LI H W, WU Q, WU J P, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[R]. CCF2014-2015 China Computer Science and Technology Development Report, 2015.
- [2] 李贺武, 吴茜, 徐格, 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.
LI H W, WU Q, XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
- [3] 杜娟, 王峰. 互联网的内涵、服务体系及对制造业的作用路径[J]. 电信科学, 2016, 32(1): 98-104.
DU J, WANG F. Connotation, service system of internet and its integrating path to manufacture[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(1): 98-104.
- [4] 刘甲男, 杜彦洁, 孟宪义. 基于互联网思维的能源互联网发展[J]. 电信科学, 2016, 32(3): 176-182.
LIU J N, DU Y J, MENG X Y. Development of energy internet

- based on internet thinking[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(3): 176-182.
- [5] 肖子玉. SDN 技术优化的最新研究综述[J]. 电信科学, 2015, 31(Z1): 132-139.
XIAO Z Y. A review of the latest research on SDN technology optimization[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(Z1): 132-139.
- [6] TANG Z, FENG Z, HAN W, et al. Improving the snapshot routing performance through reassigning the inter-satellite links[C]//IEEE Conference on Computer Communications Workshops, April 26-May 1, 2015, Hong Kong, China. New Jersey: IEEE Press, 2015: 97-98.
- [7] AKYILDIZ I, EKICI E, BENDER M. MLSR: a novel routing algorithm for multi-layered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10(3): 411-424.
- [8] YANG Y, XU M, WANG D, et al. Towards energy-efficient routing in satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC), 2016, 34(12): 3869-3866.
- [9] 徐明伟, 夏安青, 杨芾, 等. 天地一体化信息网络域内路由协议 OSPF+[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 57(1): 12-17.
XU M W, XIA A Q, YANG Y, et al. Intra-domain routing protocol OSPF+ for integrated terrestrial and space networks[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2017, 57(1): 12-17.

[作者简介]



杨芾 (1984-), 男, 博士, 清华大学计算机科学与技术系助理研究员, 主要研究方向为网络体系结构、互联网路由等。



徐明伟 (1971-), 男, 博士, 清华大学计算机科学与技术系教授、博士生导师, 主要研究方向为网络体系结构、高性能路由器、网络安全等。



李贺武 (1974-), 男, 博士, 清华大学网络科学与网络空间研究院副研究员, 主要研究方向为无线移动网络、天地一体化信息网络、网络体系结构等。