



专题：新型网络

基于端侧计算的天地一体化 SDN 实现思路

李晶林, 万晓兰

(新华三技术有限公司, 北京 100094)

摘要: 天地一体化网络结构复杂, 并且存在网络异构、拓扑动态、间歇连通、节点高度暴露等特性, 传统 SDN 实现存在诸多限制, 提出了一种基于端侧计算的 SDN 实现方法, 基于 SDN 理念实现的天地一体化信息网络, 将天基网络控制与数据分离, 利用通信端(移动终端和固定地面骨干网络)的计算能力, 卸载天基平面的 SDN 控制器的计算工作量, 从而实现了数据转发平面的极大简化, 并提出了切实有效的验证方法。

关键词: 天地一体化网络; 天基网络; 端侧计算; 控制与数据分离; 软件定义网络

中图分类号: TN915

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020198

SDN resolve space-ground integrated network based on end side computing

LI Jinglin, WAN Xiaolan

New H3C Technologies Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract: There is a complex network structure of space-ground integrated network. And this kind of network has heterogeneous network, dynamic topology, intermittently connected node height exposure, and so on. There are many limitations in traditional SDN implementation. A method of SDN implement based on end side computing and a space-ground integrated network based on SDN were presented, which separated space network control and data, using the computing power of the communication terminal (mobile terminal and fixed ground backbone network), unloading the calculation of SDN controller in space-based plane, thus simplifying the data forwarding plane. A practical and effective verification method was also proposed.

Key words: space-ground integrated network, space network, end side computing, control and data separation, SDN

1 引言

随着卫星网络的不断发展, 网络空间的需求不断拓宽, 多种战略信息任务由陆地、海面等单一维度向海、空、天等多维度扩展, 传统网络难以满足日益多样的需求, 因此要求地面网络与天基网络结

合构成天地一体化信息网络提供多样化服务。

天地一体化信息网络是一种通过星间、星地以及地面链路, 有机联合陆、海、空、天各种平台的综合性信息网络系统。由于对维护国家信息安全、引领空间科技、带动新兴技术产业、形成核心竞争力等方面具有深远意义, 天地一体化信

息网络已成为当今世界重要的国际前沿科学和战略制高点,美欧等空间科技强国从 20 世纪中叶就开始了天地一体化信息网络的探索和研究。

天地一体化信息网络是一个复杂的大型体系,包含传输、感知、处理、时空基准和应用等多个不同的系统。在整个体系中,天基传输系统发挥着连接陆、海、空、天基平台并为其提供全球化信息支持的重要作用。作为天地一体化信息网络的基础设施,天基传输网络结构是整个天地一体化信息网络架构的基础,因此中外研究者对天基传输网络体系结构开展了诸多的研究。

SDN 是当前网络设计和构造的主要思路,在当前运营商骨干网络、大型互联网数据中心内部互联及数据中心间互联、行业广域、园区接入等场景中得到了广泛的应用。针对天地一体化网络,SDN 的思路得到了普遍重视,学术界也提出了很多 SDN 应用方案,但基于 SDN 的天地一体化信息网络的研究处于起始阶段,现有的基于 SDN 的天地一体化信息网络的研究大多处于理论阶段,实际部署实现难度大,仿真实现少。

传统 SDN 方案的共同点是利用全局统一的 SDN 控制器来实现路由计算,控制器是一个或者多个,被部署于地面或者卫星上,计算后得出的表项需要在全网进行刷新。卫星网络天然的不足:拓扑动态异构、间歇连通、可靠性不高,导致控制器

计算、表项同步负担很大,可靠性保障不好。

这里提出一种新的思路,即采用端侧计算方法和分段路由(segment routing, SR)理念,大幅减少控制器计算的工作量,简化卫星转发节点的工作负担,提升卫星天基网络的转发可靠性,同时提供不同用户/业务的业务优先级保障能力。

2 天地一体化信息网络和软件定义网络概述

2.1 天地一体化信息网络

天地一体化网络总体架构如图 1 所示,包括天、地两个平面。其中,天平面包括低轨、中轨和高轨卫星组成的天基接入网/高轨卫星组成的天基骨干网;地平面包括地面骨干网络以及车、船、飞机构成的离散移动通信节点。

地面骨干网或移动通信节点通过低轨/中轨卫星接入天基网络,报文再经过低轨—中轨—高轨等不同层次的天基网络转发给地基骨干网络或者地面移动通信节点,地面骨干网络实现与互联网及国内行业专网的互通。

2.2 软件定义网络(SDN)

2.2.1 SDN 体系架构

软件定义网络(SDN)是由美国斯坦福大学 Clean State 课题研究组提出的一种新型网络创新架构,是网络虚拟化的一种实现方式。其核心理念是通过将网络设备的控制面与数据面分离,

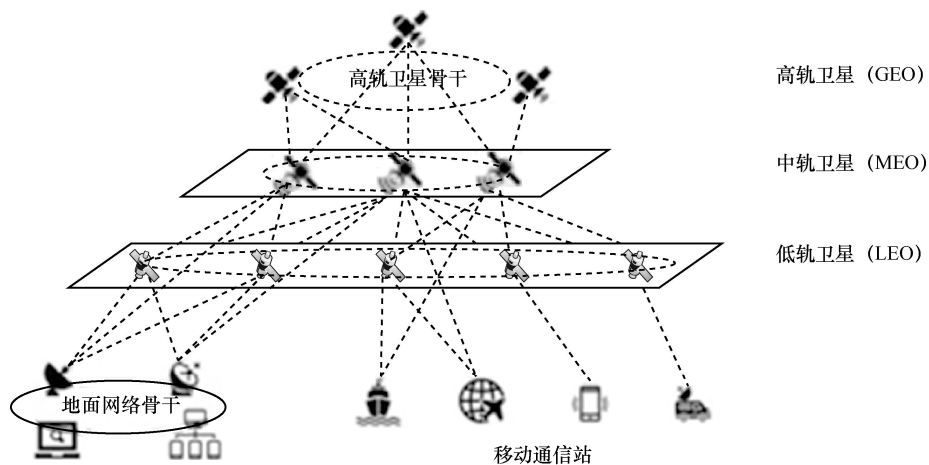


图 1 天地一体化网络总体架构



从而实现网络流量的灵活控制,使网络作为管道变得更加智能,为核心网络及应用的创新提供了良好的平台。SDN 理念示意图如图 2 所示。

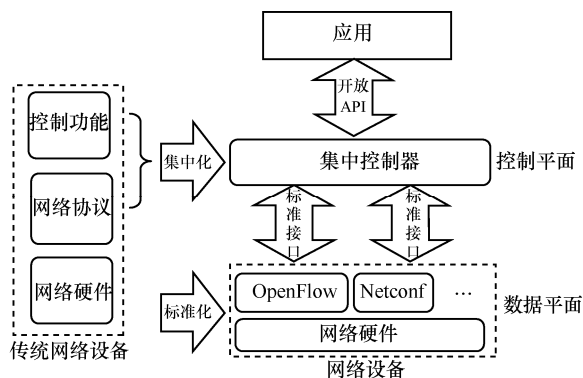


图 2 SDN 理念示意图

SDN 并不是一个具体的技术,它是一种网络设计理念或架构,规划了网络的各个组成部分(软件、硬件、转发面和控制面)及相互之间的互动关系,其主要特征包括:控制平面与转发平面分离、集中化的网络控制以及可编程的开放接口。

2.2.2 分段路由技术

分段路由是一种源路由协议,也称为段路由协议,由源节点为应用报文指定路径,并将路径转换成一个有序的分段(segment)列表封装到报文头中,路径的中间节点只需要根据报文头中指定的路径进行转发。分段路由示意图如图 3 所示。segment 是指导设备处理报文的任何指令,如:根据最短路径转发报文到目的地、通过指定接口转发报文、将报文转发到指定的应用/业务实例等。

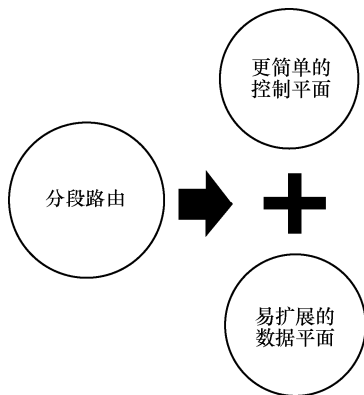


图 3 分段路由示意图

分段路由能够使网络更加简化,并具有良好的可扩展能力,主要体现在以下方面。

(1) 更简单的控制平面

对现在的控制平面进行简化,如在 MPLS 网络中,不再需要部署复杂的 LDP/RSVP-TE 协议,只需要设备通过 IGP 路由协议对 SR 的扩展实现标签分发和同步,或者由控制器统一负责 SR 标签的分配,并下发和同步给设备。

(2) 易扩展的数据平面

复用已有的 MPLS 和 IPv6 转发平面,网络设备不做改动或者进行小的修改就可以支持对分段路由的转发,如:在 MPLS 网络中,segment 就是 MPLS 标签,路径就是标签栈;在 IPv6 网络中,segment 就是 IPv6 地址,路径就是封装在一个路由扩展报文头(routing extension header)中的 IPv6 地址。

分段路由代表了一种全新的网络设计理念——应用驱动网络,因其与 SDN 天然结合的特性,也逐渐成为目前 SDN 数据平面的一种主流转发技术。

SR 包括基于 MPLS 标签的分段路由(SR-MPLS)和基于 IPv6 地址的分段路由(SRv6)。

在 SR-MPLS 中,SR 可直接使用 MPLS 转发面,此时一个 segment 就是一个标签,segment list 就是标签栈。当前活跃的 segment 位于栈顶,处理完的 segment 会从栈顶弹出,添加一个 segment 就是 push 操作。

在 IPv6 中,IPv6 地址即 segment,通过 IPv6 地址序列来表示报文转发路径。基于 IPv6 报文的原有路由扩展头定义了新的分段路由报文头(segment routing header, SRH),用于记录 segment 相关信息。

SRv6 能够将 IP 转发和隧道转发统一,具备 IPv6 的灵活性和强大的可编程能力,为未来智能 IP 网络切片、确定性网络、业务链等的应用提供了强有力的支撑。当前,SRv6 在产业、标准、商

用部署等方面均取得了较大进展。得益于其巨大的技术优势, SRv6 下一步会大规模加速部署。

3 基于端侧计算的天地一体化信息网络 SDN 实现方案

3.1 设计目标

本文设计的天地一体化网络架构应该达到以下目标。

(1) 极大地简化天基卫星网络数据平面设计
传统的 SDN 架构需要设置中心 SDN 控制器, 控制器负责收集网络拓扑状态、计算路径和下发转发表项; 对于天基卫星网络, 由于拓扑每时每刻都在变化, 控制器需要频繁收集卫星链路网络状态数据, 计算量大, 实现全网表项同步耗时长、效率低, 同时星载计算机物理受限, 性能压力大。本文基于 SDN 理念实现的天地一体化信息网络, 将天基网络控制与数据分离, 利用通信端(移动终端和固定地面骨干网络)的计算能力, 卸载天基平面的 SDN 控制器的计算工作量, 从而实现数据转发平面的极大简化。

(2) 实现网络多业务融合承载

天地一体化网络需要承载多种业务流量, 需要融合地面和空间等多种异构网络, 流量模型复杂。本文利用 SRv6 等技术, 在报文中嵌入业务指令, 从而实现多种业务的统一承载, 达到应用驱动网络的目标。

(3) 实现网络服务可定制

天基卫星网络由于卫星能力有限, 物理基础确定以后, 后续难以扩展, 难以实现针对用户按需提供服务。本文基于 SDN 可以根据不同的用户身份与通信需求, 灵活地为用户提供不同的通信保障服务, 基于不同的用户策略, 实现服务可定制。

(4) 实现天基卫星网络的高可靠转发

天基卫星网络相对传统地面网络存在更大的可靠性隐患, 链路拓扑时变、链路带宽时变、卫星通信可靠性有限, 需要考虑更多的措施保障通

信可靠性。本文利用通信端的缓存能力和高轨卫星 SDN 控制器的计算能力实现高可靠传输。

3.2 基于端侧计算的天地一体化网络

3.2.1 基于端侧计算的天地一体化网络 SDN 架构

基于 SDN 理念, 参考传统 SDN 控制面和数据面分离的思想, 简化或完全剥离了网络基础设施层面的控制功能, 设计天地一体化 SDN 架构如图 4 所示, 大大地简化了细节。该架构分为地基和天基两部分, 地基网络和天基网络均包括控制平面和数据转发平面。

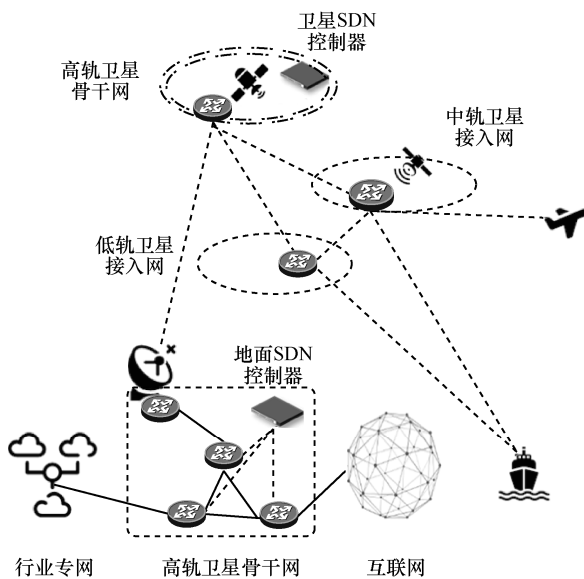


图 4 天地一体化 SDN 架构

(1) 天基网络的 SDN 控制器部署在同步轨道的高轨卫星上, 一共部署 2~3 台, 通过选举的方式确定主备关系, 这些都属于常规方式, 不再赘述。高轨卫星、中轨卫星和低轨卫星一起构成天基网络的转发平面。中轨卫星及低轨卫星同时负责地面通信端的接入, 具体分工依据卫星星图设计确定。

(2) 地基网络与传统地面 SDN 相同, 这里不是重点, 不再赘述。

天地一体化 SDN 逻辑架构如图 5 所示。整体逻辑体系架构分成 4 层, 即应用层、控制层、转发层、用户层。

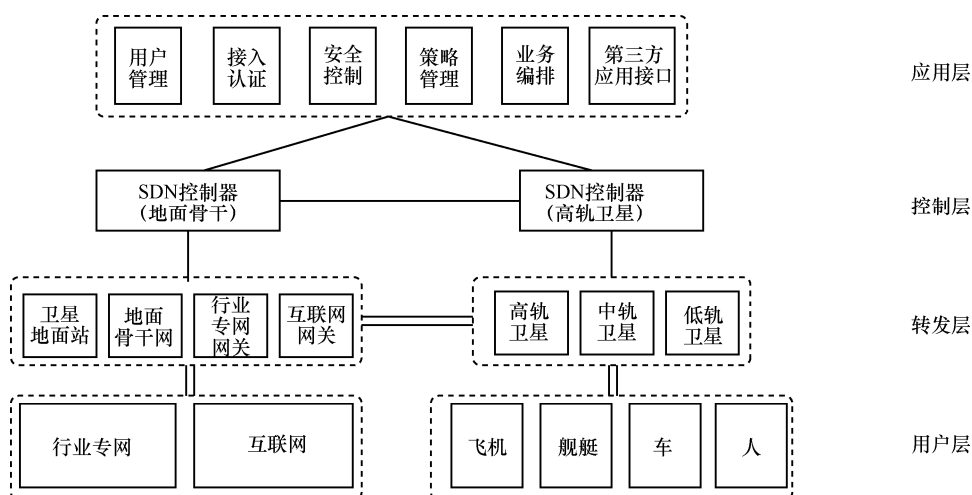


图5 天地一体化 SDN 逻辑架构

(1) 应用层

由位于地面数据中心的一系列服务器及应用系统构成。完成业务管理和编排、策略定义、监控和呈现等功能。

主要包括如下。

- 基础 App: OAM、业务抽象以及逻辑拓扑。
- 业务 App: 用户管理、接入认证、安全控制、策略管理、业务编排、第三方应用接口。

(2) 控制层

控制层包括天基和地基 SDN 控制器。天基 SDN 控制器控制高轨、中轨、低轨卫星的转发设备；地基 SDN 控制器控制地面骨干网络及各个网关设备。天基 SDN 控制器和地基 SDN 控制器都提供拓扑管理、设备转发控制、标准北向、南向

接口等功能。

(3) 转发层

接受控制器管理，支持 PCEP、BGP-LS，支持分段路由、OpenFlow 硬件转发等功能，包括地基转发网络和由高轨、中轨、低轨卫星构成的天基转发网络。

(4) 用户层

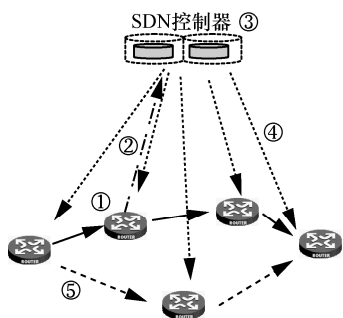
包括地面行业专网和互联网以及由飞机、舰艇、车、人构成的移动通信端。

3.2.2 传统 SDN 工作流程及主要问题

传统典型 SDN 工作流程如图 6 所示。

对于天基网络，采用这种工作流程存在很大的问题，具体如下。

- 天基网络拓扑时刻都在变化，每个卫星节点上报控制器的信息量大。



- ① 转发设备进行设备自检和链路状态检测
- ② 向控制器上报设备及链路状态 (BGP-LS)
- ③ 控制器构建整网拓扑，计算整网最佳路由
- ④ 控制器向转发设备下发转发表项 (OpenFlow、SR等) 和转发策略
- ⑤ 各转发设备根据控制器下发的转发表项和策略进行转发

图6 传统典型 SDN 工作流程

- 天基 SDN 控制器计算负担大, 因为转发节点多, 节点位置、链路拓扑变化剧烈, 整网计算负担大, 对性能要求高。限于卫星物理条件, 计算性能有限, 如果再考虑区分不同业务类型的服务保障, 则对控制器要求更高。
- SDN 控制器下发转发表项和策略负担大, 因为转发节点多, 转发表项和策略时刻都在变化, 控制器的负担始终居高不下。
- 因为转发卫星位置时刻发生变化, 链路状态也在变化, 卫星基于当前位置和链路状态上报信息以后, 控制器进行计算, 然后将计算结果下发, “上报—计算—下发”的过程需要时间, 容易造成链路利用率降低以及可能导致转发报文丢失。
- 高轨、中轨及低轨卫星运动速度不同, 在不同位置可能会因为角度等原因造成链路(激光、微波等)带宽发生变化, 而如果这种变化不能在转发表项中体现, 则很容易造成链路过载, 使报文丢失。

综上所述, 采用传统的 SDN 工作模型, 对于天基网络而言, 并不是很合适。

3.2.3 基于端侧计算的 SDN 天基网络实现

基于端侧计算的 SDN 天基网络实现思路如下。

- 天基部分的路由拓扑及转发路径计算不再依靠天基 SDN 控制器, 而是改由移动通信端和地面 SDN 控制器进行, 即由处于移动状态的人、车、舰艇、飞机等通信端计算其自身发出的报文的转发路径以及由地面 SDN 控制器计算地面网络发给天基网络的报文的路径。
- 天基 SDN 控制器只是作为备份路径计算手段以及天基网络的监控中心, 必要时计算卫星节点, 因为位置变动产生的拓扑和链路带宽差异, 并反馈给地面两侧通信端。

- 报文承载采用 SR 协议, 具体可以是 SR-MPLS 或者 SRv6。因为天基卫星网络为封闭网络, 因此为了提高报文封装承载效率, 有必要采用一套专门设计的 segment 格式, 符合 SR 理念和思路即可。
- 通信两端发出的报文即包括了转发路径, 天基卫星节点只需要根据内嵌的报文路径进行转发即可。
- 未来可以对 segment 进行扩展, 比如嵌入多条路径、嵌入基于时间的控制指令等, 从而实现高可靠转发。

3.2.4 基于端侧计算的 SDN 天基网络工作流程

整体工作流程如图 7 所示。

(1) 天基网络构建和维护天基网络转发状态信息数据库。

- 各卫星节点实时测试不同时间、不同位置的链路状态, 包括可用带宽、链路质量等, 上报位于高轨卫星上的天基 SDN 控制器。
- 天基 SDN 控制器基于卫星上报状态信息, 构建基于时间的天基网络拓扑和转发模型。
- 各卫星节点定期测试链路状态, 上报控制器。
- 控制器实时调整天基网络拓扑、转发模型数据库和关键参数。

(2) 天基 SDN 控制器向地面业务编排中心和 SDN 控制器通报传递星图、天基网络拓扑、天基网络转发模型以及关键参数。

(3) 地面移动通信端(人/车/舰艇/飞机等)入网认证, 具体如下。

- 移动通信端向接入卫星发送认证信息, 认证信息经过低轨卫星—高轨卫星—卫星地面站—用户管理中心。
- 认证报文需要走专门的认证报文通道, 低轨卫星收到后直接向高轨卫星转发, 高轨卫星直接向地面管理中心转发。认证报文中附带用户身份、地理位置、运动速率、

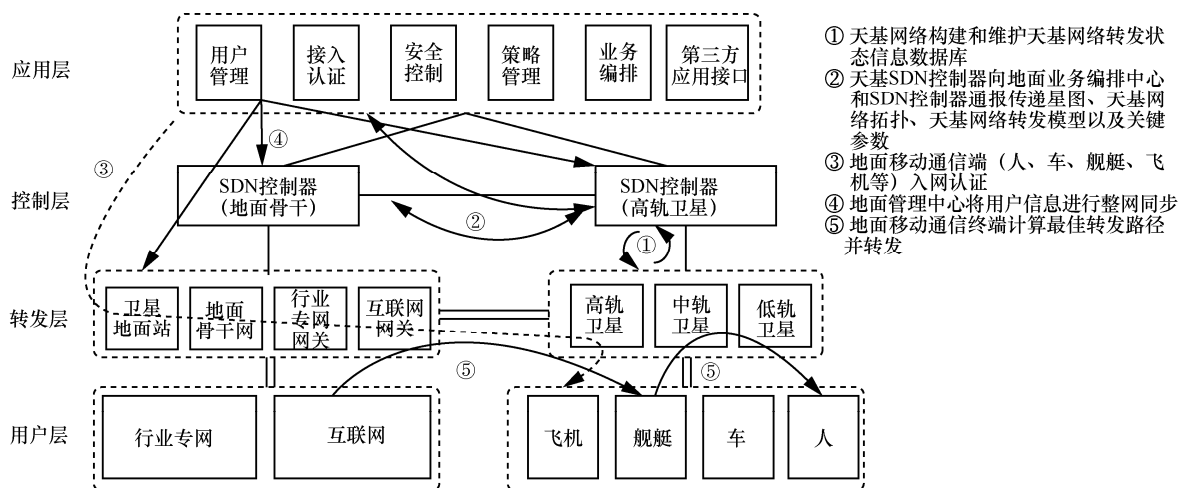


图7 基于端侧计算的SDN天基网络工作流程

方向等信息。

- 地面用户管理中心进行用户认证，具体用户认证流程有比较多的方案，这里不再展开。

(4) 地面管理中心完成用户认证以后，将用户信息进行整网同步。

- 地面管理中心向天基SDN控制器发送认证结果。
- 地面管理中心向卫星地面站网关发送用户的身份、业务类型、当前位置、运动方向、速率等信息。
- 天基控制器向移动用户发送卫星星图、天基网络转发模型以及关键参数等。
- 移动终端用户定期通过天基网络与地面用户管理中心握手，更新当前地理位置、运动速率、方向等信息。
- 地面用户管理中心将用户信息定期与地基&天基SDN控制器进行信息同步，地基SDN控制器负责与卫星地面站网关同步。

(5) 地面移动通信终端计算最佳转发路径并转发。

- 移动终端根据获得的卫星星图、天基网络转发模型、关键参数等，计算得到不同时间窗口的、到通信对端目的地的最佳路径和备用路径。

- 采用SR协议封装，在不同发送时刻，将相应的路径嵌入需要发送的通信报文中，向接入卫星发送。

- 接入卫星收到报文以后，按SR指示路径，依次将报文转发到下一个节点。

(6) 因为业务类型不同，涉及计算环节与过程也存在差异，分为以下几种情形。

- 移动终端A→移动终端B，具体如下：

(a) 终端A不知道终端B的位置，无法计算最佳发送路径，因此终端A首先发送的首报文目的地址为终端B，但嵌入的SR路径为终端A自己计算的、从终端A到卫星地面站网关的最佳路径；

(b) 卫星地面站网关根据天基SDN控制器缓存的终端B地理位置等信息，先经过访问合法性判断，再计算从地面站到终端B的最佳路径，重新嵌入SR报文中，发送给天基网络。天基网络再转发给终端B；

(c) 终端B收到终端的A首报文以后，根据自身安全策略控制，可以选择将自己的地理位置信息共享给终端A，以便终端A直接计算终端B的最佳路径，也可以选择隐藏，所有报文将都通过地面站网关中转。

- 移动终端A→行业专网/互联网，具体如下：

(a) 终端 A 根据自身位置, 计算到卫星地面站(网关)的最佳路径, 将路径嵌入 SR 报文中, 发给天基网络;

(b) 天基网络将报文转发到卫星地面站网关, 网关根据地基 SDN 下发的到行业专网出口网关/互联网出口网关的转发表项, 重新将路径嵌入 SR 报文中, 转发给行业专网网关/互联网网关;

(c) 行业专网网关/互联网网关将收到的 SR 报文剥离报文头, 一般还要经过地址转换(NAT)以后, 再转发给行业专网/互联网。

- 行业专网/互联网→移动终端 A, 具体如下:

(a) 行业专网出口网关收到转发给移动终端 A 的报文, 先经过访问合法性检查(访问权限、业务合法性、是否存在相应 NAT 会话表项、终端 A 业务权限等综合判断)后进行地址转换, 再将地基 SDN 控制器下发的到卫星地面站网关的最佳路径封装到 SR 报文中, 转发卫星地面站;

(b) 卫星地面站根据其缓存的终端 A 地理位置, 计算出到终端 A 的最佳路径, 再将路径重新嵌入 SR 报文中, 发送给天基网络;

(c) 天基网络将报文发送给终端 A。

(7) 业务可靠性增强方案: 因为卫星链路拓扑随时变化、带宽随时变化, 在链路变化的过程中, 很容易出现链路中断的情况, 如果此时发送数据, 则报文将丢失, 因此需要考虑额外的可靠性措施。

- 移动终端和地面卫星站在计算最佳路径的时候, 需要考虑足够的发送窗口, 如果发送窗口不够, 则需要先在本地缓存, 然后在最佳发送时间发送出去, 具体如下:

(a) 发送窗口需要考虑端到端的路径保持时间(即卫星在飞行过程中可以维持持续端到端链路的建立时间), 以确保发送时刻避开卫星链路倒换和重新建立的时间段;

(b) 通信发送端需要计算端到端链路带宽随时间变化的关系, 以便根据可占用的带宽, 实时调节自身发送的报文速率, 以避免链路过载;

(c) 通信端需要建立基于发送时刻和速率的缓存队列, 以在合适的发送时刻发送确定速率的报文。

- 因为多个通信端侧独立计算, 必然存在多个通信端可能挤占同一条链路的情况, 这时则造成卫星链路过载, 导致无法报文无法发送, 具体如下:

(a) 当卫星链路过载, 如果在当前时间窗口内无法发送, 则转发的卫星节点根据业务优先级, 丢弃所有无法在当前窗口发送的低优先级报文, 并截取丢弃报文的报文头(源/目的地址、报文序列号等)分组发送给高轨卫星;

(b) 高轨卫星将已经丢弃的报文头信息发送给相应的通信发送端;

(c) 各通信发送端收到被天基网络丢弃的报文头信息, 重新计算发送路径与发送时刻, 择机重新发送。

(8) 业务优先级保障: 不同用户、不同业务类型优先级需要区分。

- 地面用户/业务管理中心在完成用户认证以后, 可以根据用户/业务类型, 在发送卫星星图、天基网络转发模型以及关键参数时, 对其中的路径、带宽参数进行设定。以使移动用户根据此模型计算出来的发送路径、发送时刻等结果与用户/业务优先级直接挂钩, 即不同终端的用户身份/业务不同, 根据星图/模型/参数计算出来的路径和发送时刻, 结果不同。
- 天基 SDN 控制器实时计算当前天基网络负载情况, 配合地基 SDN 控制器以及地面管理中心等, 对有异常的通信端进行识别、纠正和惩罚。
- 报文可以增加 QoS 标识, 此标识由用户管



理中心统一动态分发，由通信端自行在报文中标识，卫星转发链路给予信任。因为 QoS 标识含义为动态定义，因此通信端无法自行提升业务优先级，而接入卫星无须对用户身份/业务进行识别和标识，大大降低了处理负担。

(9) 转发效率提升：因为卫星链路带宽有限，同时因为链路切换、重新建立需要时间，卫星链路的带宽利用存在问题，需要尽可能对通信信息报文进行压缩，包括报文头和报文载荷部分都要考虑压缩。

- 报文头压缩：如果采用标准 SRv6 封装，一个节点的 IPv6 地址就是 32 byte，多个卫星节点的转发地址链规模将非常庞大，将极大地降低报文载荷效率，有必要重新对 SRv6 SRH 字段和 MPLS SR 的标签字段进行重新定义。这个定义可以有很多种方法，关键是需要包括标识节点 ID、节点链路 ID 以及时间窗约束等。
- 报文载荷压缩：因为地面通信端计算能力和存储能力的扩展性远好于天基卫星网络，因此可以在地面通信端两侧考虑分别进行报

文压缩和解压缩，以提升报文传输效率。

4 方案验证

4.1 验证组网结构

验证组网结构如图 8 所示，验证网包括以下。

- 10 台路由器模拟高中低轨卫星转发网络：Rk、Rl 模拟高轨卫星，之间存在永久直连链路。Ri、Rj 模拟中轨卫星，Rc、Rd、Re、Rf、Rg、Rh 模拟低轨卫星，高轨、中轨、低轨卫星及地面终端之间用电缆直连。
- Ra+PCa、Rb+PCb 分别模拟地面固定/卫星移动通信端和卫星地面移动接入终端。
- PCc 模拟卫星地面网关，通过 Ra 与 Rk 直连，模拟地面站直连卫星骨干网络。PCc 可以存储卫星地面移动接入终端 PCb/PCa 的位置。
- 设置一台服务器作为星座模拟控制器，用来控制高轨、中轨、低轨卫星之间链路的定时中断与接通，以模拟卫星链路的动态变化过程，并与 PCc（卫星地面网关）交互相关信息。

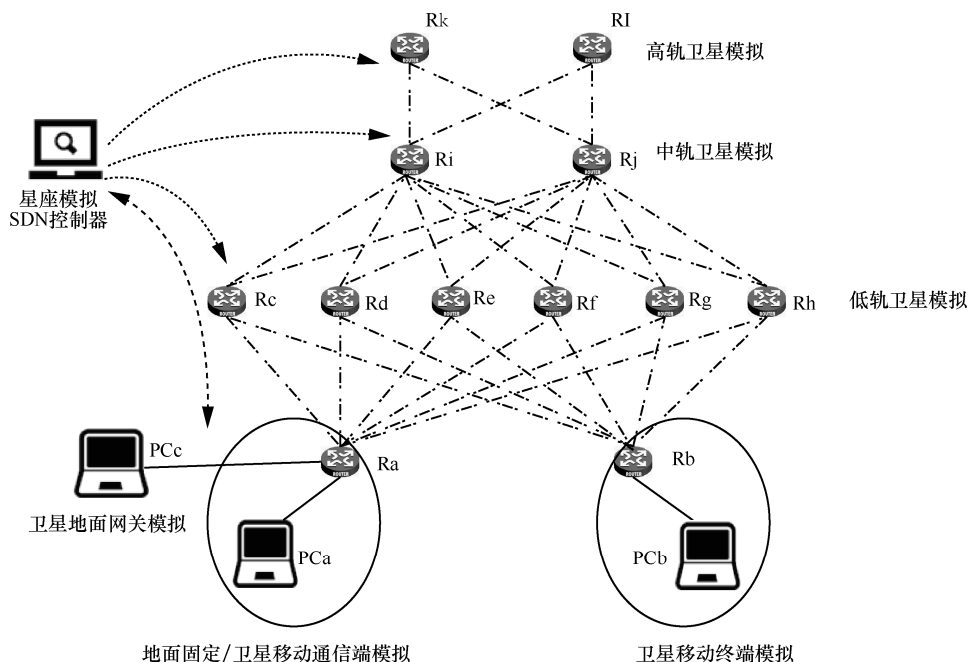


图 8 验证组网结构

4.2 具体方案验证

设备初始配置如下。

(1) 配置所有路由器为 SRv6 转发。

(2) 星座模拟控制器控制实现 $R_a \sim R_b$ 到 $R_c \sim R_h$ 之间链路、 $R_c \sim R_h$ 到 $R_i \sim R_j$ 之间链路、 $R_i \sim R_j$ 到 $R_k \sim R_h$ 之间链路的定时通断, 即模拟实际卫星接入链路的拓扑变化, 见表 1 (以 $R_a \sim R_b$ 到 $R_c \sim R_h$ 之间链路为示意, 以 5 min 为周期进行变化。 $R_c \sim R_h$ 到 $R_i \sim R_j$ 之间链路、 $R_i \sim R_j$ 到 $R_k \sim R_h$ 之间链路通断变化类似, 变化周期可设置为不同的值, 比如 $R_c \sim R_h$ 到 $R_i \sim R_j$ 之间链路变化周期为 18 min, $R_i \sim R_j$ 到 $R_k \sim R_h$ 之间链路通断变化周期为 25 min, 以模拟不同高度轨道卫星链路), 通过控制 R_b 与 $R_c \sim R_h$ 的链路通断时刻, 即可模拟不同地理接入位置。

(3) 地面 SDN 服务器实现与星座模拟控制器以及 PCc 交互, 实现相关拓扑、位置信息存储和分发。

(4) PCa、PCb、PCc 均配置端侧路径计算程序, 预先内置验证网络的拓扑及链路变化规律。

验证地面移动终端与地面固定网络通信 (所

有报文通过卫星地面网关转发), 具体如下:

- PCb 根据内置的验证网络拓扑及链路变化规律, 计算到 PCc (地面网关) 的可用路径, 将路径嵌入到 SRv6 报文 (目的地址为 PCa) 中, 发送给 Rb;
- Rb 根据 SRv6 路径指示, 将报文发送到对应的链路上, 例如是 Rb~Rh;
- Rh 根据 SRv6 路径指示, 将报文发送到对应的链路上, 例如是 Rh~Ri;
- Ri 根据 SRv6 路径指示, 将报文发送到对应的链路上, 例如是 Ri~Rk;
- Rk 根据 SRv6 路径指示, 将报文发送给 Ra, Ra 发送给 PCc;
- PCc 收到 PCb 发送给 PCa 的报文, 根据 PCa 的位置, 计算 SRv6 路径以后发送给 PCa;
- PCa 发送给 PCb 的报文, 也先发给 PCc, PCc 根据 PCb 的位置, 计算出相应的路径, 嵌入 SRv6 报文中;
- 在不同的时刻, PCb、PCc 计算得到的 SRv6 路径将是不同的, 即完全模拟在卫星拓扑不断有规律变化的情况下, 实现及时可靠

表 1 $R_a \sim R_b$ 到 $R_c \sim R_h$ 之间链路

链路	0~4 min	5~9 min	10~14 min	15~19 min	20~24 min	24~29 min
$R_a \sim R_c$	通	X	X	X	X	X
$R_a \sim R_d$	X	通	X	X	X	X
$R_a \sim R_e$	X	X	通	X	X	X
$R_a \sim R_f$	X	X	X	通	X	X
$R_a \sim R_g$	X	X	X	X	通	X
$R_a \sim R_h$	X	X	X	X	X	通
$R_b \sim R_c$	X	X	X	通	X	X
$R_b \sim R_d$	X	X	X	X	通	X
$R_b \sim R_e$	X	X	X	X	X	通
$R_b \sim R_f$	通	X	X	X	X	X
$R_b \sim R_g$	X	通	X	X	X	X
$R_b \sim R_h$	X	X	通	X	X	X



转发的目的。

验证地面固定网络与地面移动终端通信，具体如下：

- PCa 不知道 PCb 的位置，但是 PCc（地面网关）会保存 PCb 的信息（PCb 注册登录认证过程略），所以 PCa 发给 PCb 的报文，先转发给 PCc，PCc 计算到 PCb 的当前时刻可用路径，将路径嵌入 SRv6 报文中，发送给 Ra，Ra 转发到 Rk；
- Rk 根据 SRv6 路径指示，将报文发送到对应的链路上，比如可能是 Rk-Rj；
- Rj 根据 SRv6 路径指示，依次进行转发，后续过程略。

验证两个地面移动终端互相通信，具体如下：

- PCa 和 PCb 都知道地面网关 PCc 的位置和路径，因此 PCa 与 PCb 之间的通信均先转发到 PCc，由 PCc 进行中转；
- PCa 和 PCb 之间建立通信以后，根据各自安全策略，可以选择向对方通告当前位置和运动信息，这样对方即可直接计算当前路径，实现直接通信。

其他工作模式验证，具体如下：

- 可以通过设置高轨、中轨、低轨 3 层卫星模拟网络之间同时存在两条路径，模拟多路径情况下的路径优选计算；
- 可以通过设置链路通断周期，模拟终端移动速度的变化；
- 可以通过设置链路通断切换时刻的握手时间长短，模拟卫星链路从中断到建立的过程，此时卫星通信终端需要根据当前时刻的链路状态（是否已经建立）决定是否延迟发送，以避免报文丢失；
- 通过设置链路带宽变化，比如在链路切换时刻链路带宽小，以模拟卫星链路切换时刻不稳定的情况，此时卫星通信终端需要控制发送速率或延迟发送，以避免报文丢失。

5 结束语

基于端侧计算的 SDN 天基网络工作流程方案优点总结如下。

- 充分利用通信端侧的计算能力，大幅降低天基 SDN 控制器的计算负担、卫星节点表项信息同步工作量等。
- 卫星转发节点只根据报文中的转发路径链依次进行转发，不需要进行路径计算和判断，节点工作压力、需要的资源得到了极大的简化。
- 通信端可以充分利用本地缓存能力，在计算时可以综合考虑发送时间窗与天基网络链路变化趋势，从而尽可能确保传输的可靠性。
- 通过对天基网络模型与关键参数的控制，可以方便实现不同通信端的计算结果差异，从而实现不同业务/用户的业务优先级保障。

参考文献：

- [1] 李风华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. 通信学报, 2016, 37 (11): 156-168.
LI F H, YIN L H, WU W, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2016, 37 (11): 156-168.
- [2] 王春峰. 软件定义可重构卫星网络系统研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10 (5): 455-459.
WANG C F. Research on software defined networkreconstructing satellite network system[J]. Journal of China Academy of Electronic Sciences, 2015, 10 (5): 455-459.
- [3] 陈晨, 谢珊珊, 张潇潇, 等. 聚合 SDN 控制的新一代空天地一体化网络架构[J]. 中国电子科学研究院学报, 2015, 10(5): 450-454.
CHEN C, XIE S S, ZHANG X X, et al. A new space and terrestrial integrated network architecture aggregated SDN[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(5): 450-454.
- [4] IQBAL H, MA J, STRANC K, et al. A software-defined net-

- working architecture for aerial network optimization[C]// Proceedings of IEEE Netsoft Conference and Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2016: 151-155.
- [5] 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 the integrated information network[J]. Satellite and network, 2016 (3): 30-36.
- [6] Stanford University. Clean slate program[EB]. 2017.
- [7] MCKEOWN N. Software-defined networking[J]. China Communications, 2009, 11 (2): 1-2.
- [8] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
- CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.

[作者简介]



李晶林 (1970—), 男, 新华三技术有限公司首席架构师, 主要研究方向为网络技术及解决方案。



万晓兰 (1975—), 女, 新华三技术有限公司高级架构师, 主要研究方向为网络及其新型技术。