

## 基于 SDN 的卫星网络分布式移动管理研究

李恒智<sup>1</sup>, 王春锋<sup>2</sup>, 王为众<sup>3</sup>, 张杰<sup>3</sup>

(1. 河北对外经贸职业学院, 河北 秦皇岛 066311; 2. 钱学森空间技术实验室, 北京 100094;  
3. 北京邮电大学信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

**摘 要:** 分布式移动管理 (DMM, distributed mobility management) 是解决移动切换问题的有效方法之一, 因此, 被认为是能够应用于卫星网络移动性管理的技术。提出了一种基于 DMM 的软件定义网络 (SDN, software defined network) 的分布式移动管理方案, 来解决卫星网络中的流量重定向问题。与传统 DMM 应用场景即基于网络或基于终端不同, SDN-DMM 方案在 SDN 控制器中实现位置管理和地址切换。因此, 基于 SDN 的卫星网络分布式移动管理方案相比于传统的方案可以实现分组转发路径优化, 并在网络开销和流量管理方面表现出显著的优势。

**关键词:** 软件定义网络; 卫星网络; 分布式移动管理

中图分类号: TN915

文献标识码: A

## Research on distributed mobile management of satellite network based on software define network

LI Heng-zhi<sup>1</sup>, WANG Chun-feng<sup>2</sup>, WANG Wei-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>

(1. Hebei Institute of International Business and Economics, Qinhuangdao 066311, China; 2. Qian Xuesen Laboratory of Space Technology, Beijing 100094;  
3. Institute of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Distributed mobility management (DMM) was an effective method to solve the mobile address handover. Therefore, it was considered to be a technology that can be applied to satellite network mobility management. A distributed mobile management scheme which based on software definition network (SDN) was proposed to solve the traffic redirection problem in satellite network. Different from the traditional DMM application scenario which was network-based or terminal-based, the SDN-DMM scheme implements location management and address handover in SDN controllers. Therefore, SDN-based satellite network distributed mobile management scheme can realize packet forwarding path optimization compared with traditional scheme, and it shows significant advantages in management cost and traffic management.

**Key words:** soft define network, satellite network, distributed network management

### 1 引言

卫星通信是一种理想的长途通信, 可以克服地理条件的限制, 为用户提供廉价、稳定、可靠的通信信道。卫星的覆盖范围非常广阔, 从而能够实现长距离、高速率的大数据传输, 同时, 卫星通信还具有多址通信、组网灵活、见效快等优点。卫星比其他通信设施在装置和维护方面具有很大的便利,

无论通信距离远近, 所需费用几乎相同, 适合人口分散地区的通信, 能满足不同洲际、国家、地区、国内各城市间的数据通信和信息传递的快速化、准确化需求。目前, 世界上主要航天国家都在调整并制定 21 世纪航天发展战略。总的趋势是各国的航天活动更加注重实效, 把下一步发展目标定位于在完善卫星系统种类和提高卫星系统功能的基础上, 发展小型卫星并建立网络化的新型综合性卫星通

收稿日期: 2017-09-07

基金项目: 科技部重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFB0503300)

Foundation Item: Key Research and Development Plan of the Ministry of Science and Technology (No.2017YFB0503300)

信体系<sup>[1]</sup>。

卫星移动管理提供了用于个人、本地和广域网中不间断地为用户维护活动和无缝连续性会话的机制。目前，已经存在的移动网络技术，如局域网方面的 WLAN，以及广域网方面的 LTE 技术，都还不能提供全球范围内的互联网的无缝接入，有 2 点原因。1) LTE 可以支持移动节点从一个小区移动到另一个小区，但当节点移动到另一种媒介上时，LTE 就要求节点改换 IP 地址。2) 数据链路层方案只能在一定的地理范围内提供移动性，像 802.11 局域网方案可以在一个校园或特定场所提供可移动性，一旦用户离开这个范围，将无法提供服务。所以通过卫星设计依靠移动管理在各媒介普遍适用的方案对全球互联网无线接入十分关键。

传统卫星移动管理研究更多的是借鉴 IP 网络，并且都是基于中心管理架构，互联网工程任务组 (IETF, internet engineering task force) 的当前 IP 移动解决方案大部分依赖于集中式移动锚点实体，负责移动性相关控制平面和用户数据转发。这种集中式网络节点的存在使移动性管理易于出现以下几个问题和限制：1) 次优路由选择；2) 低扩展性；3) 信令开销大；4) 更加复杂的网络部署；5) 由于

存在潜在的单点故障带来的安全性和可靠性问题；6) 移动性管理服务缺乏粒度<sup>[2,3]</sup>。

### 2 SDN 卫星网络简介

SDN 是一种具有解耦合转发功能的网络控制架构新型网络架构，它将网络的控制平面与数据平面分离，使网络设备与资源虚拟化，从而实现底层硬件的可编程化，底层基础架构能够为应用程序和网络服务进行抽象化，完成对资源的按需调配。用户可以通过集中管理器 (SDN controller) 配置具有 SDN 功能的交换机和路由器。

SDN 使网络具有可编程、可管理和适应性更广的特性，适用于高度可扩展的移动无线网络。OpenFlow 作为 SDN 系统中最常用的通信协议，能够访问、启用和管理 SDN 交换机的转发平面，并根据应用和网络服务的需求进行重新配置。用户可以通过 OpenFlow 控制器远程编程支持 OpenFlow 的交换机中的流表，使每个流量路径可以从入口节点追溯到出口节点，作为单独的流量路径，这样的方法可以使流量重定向到新的移动锚点，过程中不发生任何 IP 地址转换或修改。

SDN 卫星网络架构如图 1 所示。

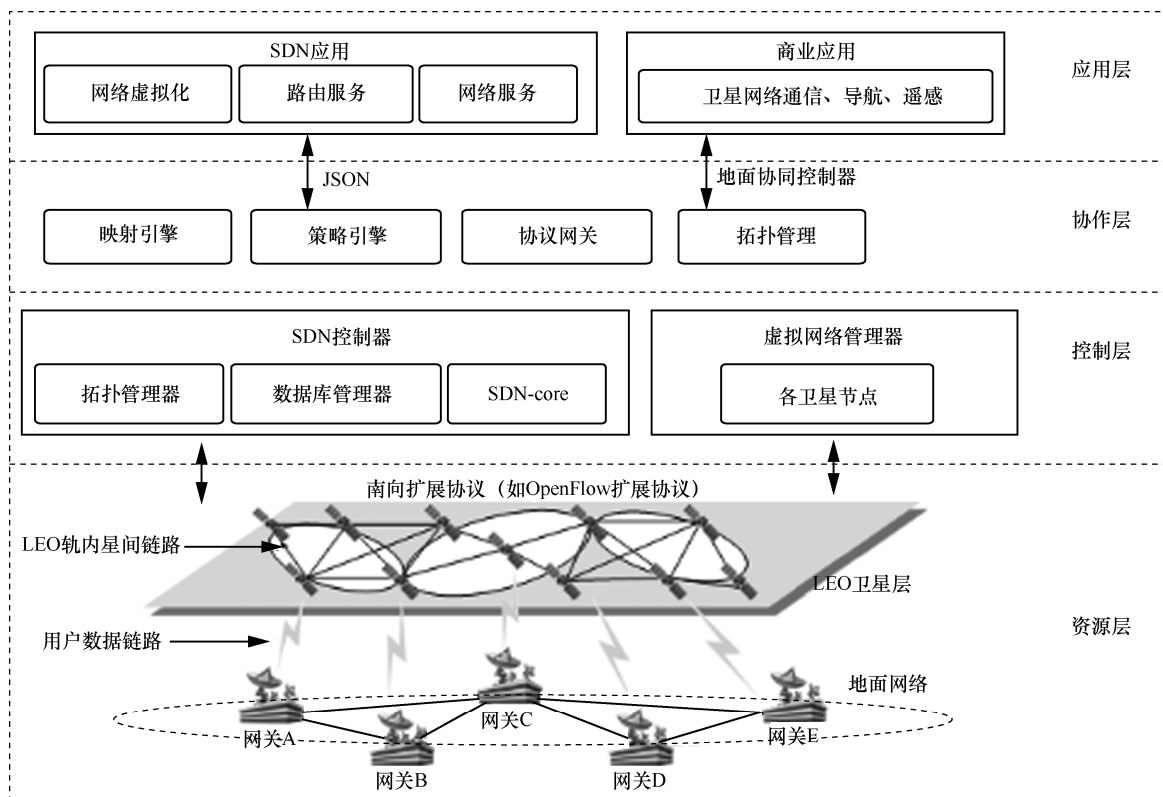


图 1 基于 SDN 的卫星网络架构示意

图 1 中的资源层由天基接入网和地基节点网组成,包括 LEO 卫星、地面网关、星间链路、地面网络等通信设施,用户通过资源层接入到天地一体化网络之中。

SDN controller 位于架构中的控制层和虚拟网络管理器进行配合,完成拓扑管理、数据库管理、网络节点信息收集等功能。从而,构建一个统一控制中心,对多层卫星网络进行智能管控。

协作层连接控制层和应用层,为 SDN 应用和商业应用提供基础支持功能,协作控制层提供天地一体化网络天基骨干网的网络配置、信息同步、灾难备份、抗毁性能等功能。

在该网络模型中,SDN controller 承担卫星网络中多域控制器的作用,连接多个异构网络,将资源层的设施合理有序的划分成由单域控制器管理的控制域,使网络组网方式更加灵活有效。多域控制器直连各个单域控制器,在每个时间切片内,单域控制器上报路由流表给多域控制器,由多域控制器完成整理、统计、策略选择、下发流表等功能。

### 3 基于 SDN 的卫星网络 DMM 系统

标准移动 IP 协议是一种广域支持 IP 移动性的协议。但是,在卫星空间场景下,外地网络远离卫星节点的家乡网络、卫星骨干网络带宽有限,标准移动 IP 的每次改变子网即向 HA 注册的机制就会带来很多问题:1) 在骨干网络中将引发大量注册报文的传输,这些控制消息会消耗大量骨干网络的带宽资源和计算资源从而影响网络性能,当移动节点(MN, mobile node)数量较多、骨干网的带宽负载尤其严重;2) 造成较大的切换延迟,特别是当 MN 远离家乡网络时,将引起数据分组的丢失和通信吞吐量的下降。

#### 3.1 SDN-DMM 系统技术特征

IETF 为了解决集中式移动管理带来的不足提出的分布式移动管理<sup>[4]</sup>。其核心是将移动管理实体部署在网络边缘的接入路由器,使它更靠近终端,移动管理的控制平面与数据平面分离,用户可继续使用已经配置完毕的家乡网络前缀(HNP, home network prefix),也能利用实体分配新网络前缀发起新的会话从而实现移动管理,属于分布式和动态式的管理。

目前,网络中部署 DMM 的定义要求如下所示。

1) 分布式部署。由 DMM 提供的 IP 地址移动

性和路由解决方案必须能够进行移动性管理和分布式处理,使流量不需要遍历已经集中部署的移动性锚点,从而避免非最佳路由选择。

2) 透明度。DMM 解决方案必须在 IP 层上方提供透明的移动支持。

3) 共存性。DMM 解决方案必须能够与现有的网络部署和终端主机共存。例如,根据部署的 DMM 环境,DMM 解决方案可能需要与其他部署的移动协议兼容,或可能需要与不支持 DMM 协议的网络或移动主机/路由器进行互操作。

4) 安全机制。DMM 解决方案不得引入新的安全风险或扩大现有安全机制/协议无法提供足够保护的现有安全风险。

5) 灵活的多播分发。DMM 应考虑多播,设计方案应不仅在需要时提供移动性 IP 支持,而且可以避免多播流量传递中的网络无效率问题。

以上为已有 DMM 研究的技术定义,本文在基于软件定义的卫星网络中,添加如下定义。

6) 动态性。即使通信节点没有特定的路由优化支持,允许通过移动锚点或非锚节点传播的不同路径分割数据流来动态使用移动性支持。这一定义将解决集中式移动管理方法缺乏细粒度的问题。

7) 分离控制层和数据平面。在分配数据平面的同时集中控制平面是降低移动锚点之间信令开销的一种可能解决方案。

8) 网络协同。通过 SDN-DMM 解决方案可以使用户设备在不承担额外的信令开销下保持用户忽略域内的切换过程。

通过第一部分的描述,SDN/OpenFlow 可以实现对交换机和路由表的远程编程操作,通过流表将网络的流量进行分离。OpenFlow 协议可以通过流表的形式,帮助网络运营商实现 IP 地址连续性部署和流量重定向功能。同时,SDN 控制器可以修改如以太网、VLAN 和 IP 所使用的数据分组头或帧标题,也可以添加、修改或删除流表和操作列表,来对特定的数据流进行操作,从而实现专用通道的安全连接。

#### 3.2 基于 SDN 的卫星 DMM 方案

图 2 说明了 SDN-DMM 中的位置更新过程。首先,当移动卫星连接到 access router (AR) 时,AR<sub>1</sub> 向控制器发送位置更新消息。然后,控制器更新移动卫星的位置信息表,即移动卫星的 IP 地址和 AR<sub>1</sub> 的 IP 地址的映射(步骤 1)和步骤 2))。更新位置

信息后，控制器通过 AR<sub>1</sub> 向移动卫星发送位置确认消息（步骤 3）。当 MN 移动到 AR<sub>2</sub>（步骤 4）时，执行相同的位置更新过程（步骤 5~步骤 7）。

移动卫星在从 CN（correspondent node）接收到分组时移动到 AR<sub>2</sub>，图 3 表示出了 SDN-DMM 数据转发过程。移动卫星在移动到 AR<sub>2</sub> 之后进行正常的位置更新过程，没有任何切换事件触发（步骤 1）。当接收到位置更新消息（步骤 2）时，控制器向前一个 AR 和交叉路由器（CR, crossover router）发送 OpenFlow 消息，以激活它们的缓冲功能（步骤 3）。然后，先前的 AR 和 CR 启动数据分组缓冲。同时，控制器计算到新 AR 的最佳路径，并通过 OpenFlow 命令将转发表更新到中间路由器（步骤 4和步骤 5）。更新转发表后，缓存的报文和即将发送的报文可以通过最优路径转发到 AR<sub>2</sub>（步骤 6）。

在 SDN-DMM 中，由于在数据平面中建立了从 CN 到 MN 的最佳路径，所以分组可以被转发到 MN 而没有任何隧道开销。另一方面，传统的 DMM 方

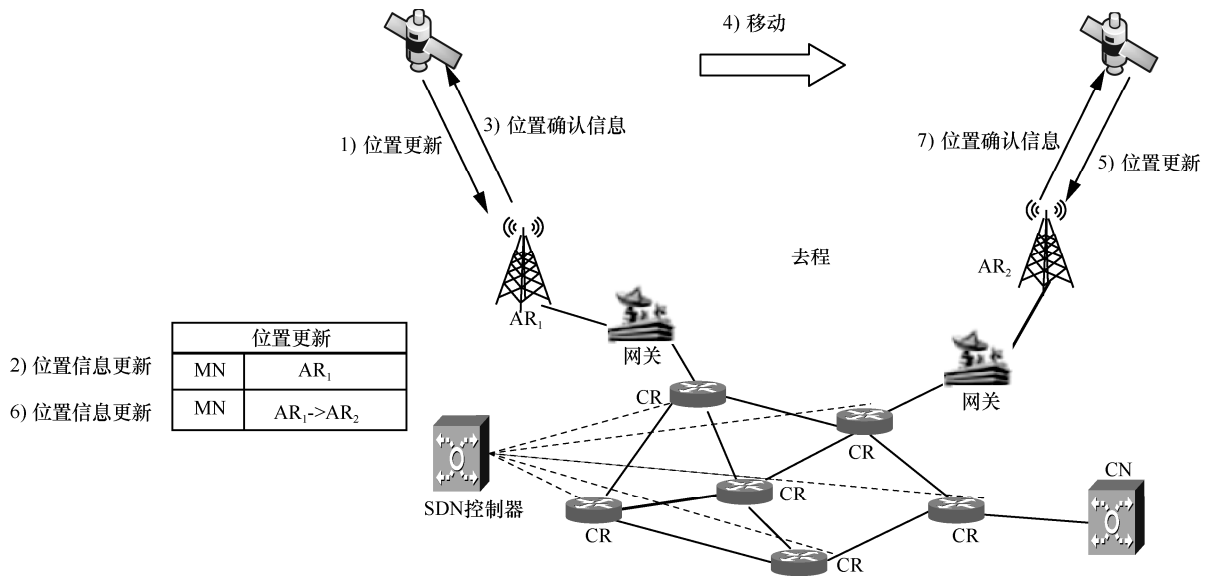


图 2 SDN-DMM 位置更新过程

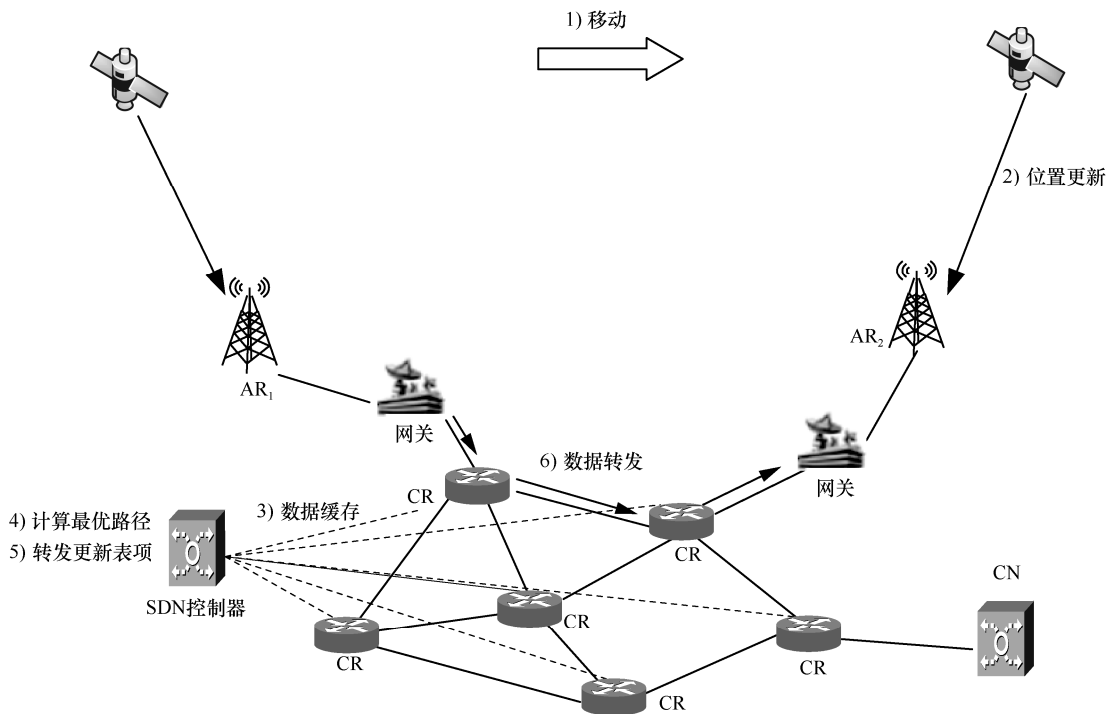


图 3 SDN-DMM 数据转发过程

案依赖于通过 IP-in-IP 分组隧道实现的从先前 AR 到新 AR 的分组转发。由于 IP-in-IP 分组隧道需要额外的 IP 分组报头,所以消耗更多的带宽并且期望更长的延迟。具体地,如果先前的 AR 和新的 AR 不直接相连,则可以进一步增加隧道开销。

### 3.3 基于 SDN 的星地 DMM 方案

由前文所述,目前,存在的卫星网络移动方案是基于 IP 网络来设计的,星地链路频繁切换会导致管理开销的增加,如何降低管理开销是研究者的研究重点。如图 4 所示应用于 MIPv6 的低轨卫星网络。

在该场景中,HA<sub>1</sub> 是移动节点 MN 的家乡代理并且设置移动节点家乡地址 HoA<sub>1</sub>。在空间环境下,移动节点包括卫星和终端设备,移动节点从卫星接入路由器 (satellite access router) 切换时,需要获取转换地址 CoA<sub>2</sub>,用来更新 HA<sub>1</sub> 的转发表。集中式的管理方式在切换中会产生大量的更新分组,如果 HA<sub>1</sub> 的距离较远,那么管理开销会在频繁的切换过程中快速增加。并且当 CN 需要与 MN 建立链路的时候,将很难保证最优路径的选择。

基于 SDN 的星地 DMM 方案可以作为解决卫星移动管理的方法之一,通过部署 SDN 来实

现移动锚点的分布式管理,使其尽可能的接近移动节点。基于 SDN 的星地 DMM 方案<sup>[5,6]</sup>设计基于以下考虑。

1) 位置信息管理。通过 SDN,实现了 HA 的位置管理和转发管理,使其能够和卫星网络协同处理信息,由于卫星存储、转发资源的有限性,位置信息主要通过地面网关进行传输。当移动终端和卫星连接时,注册信息将会发送至最近的地面网关,SDN 控制器将会在最大覆盖范围对所有的网关进行位置信息同步。

2) 地址信息管理。在集中式移动管理方案中,生成的转交地址会在整个移动通信过程中保持有效性。这样的机制产生了很大的管理开销和导致非最优路径选择,通过 SDN 的 DMM 方案,可以实现每个接入卫星的地址唯一性,从而减少管理开销。

3) 信息转发管理。由于基于 IP 的传输机制与位置管理器绑定,因此,地面网关还需要提供转发功能。当 CN 请求与 MN 建立连接,数据分组将会发送到最近存储有 MN 位置信息的网关,网关将会以此为根据进行转发。不合理的地面网关位置信息会导致带宽资源的浪费和路由环路的生产,引入 SDN 的转发控制分离机制,能够有效避免以上情况。

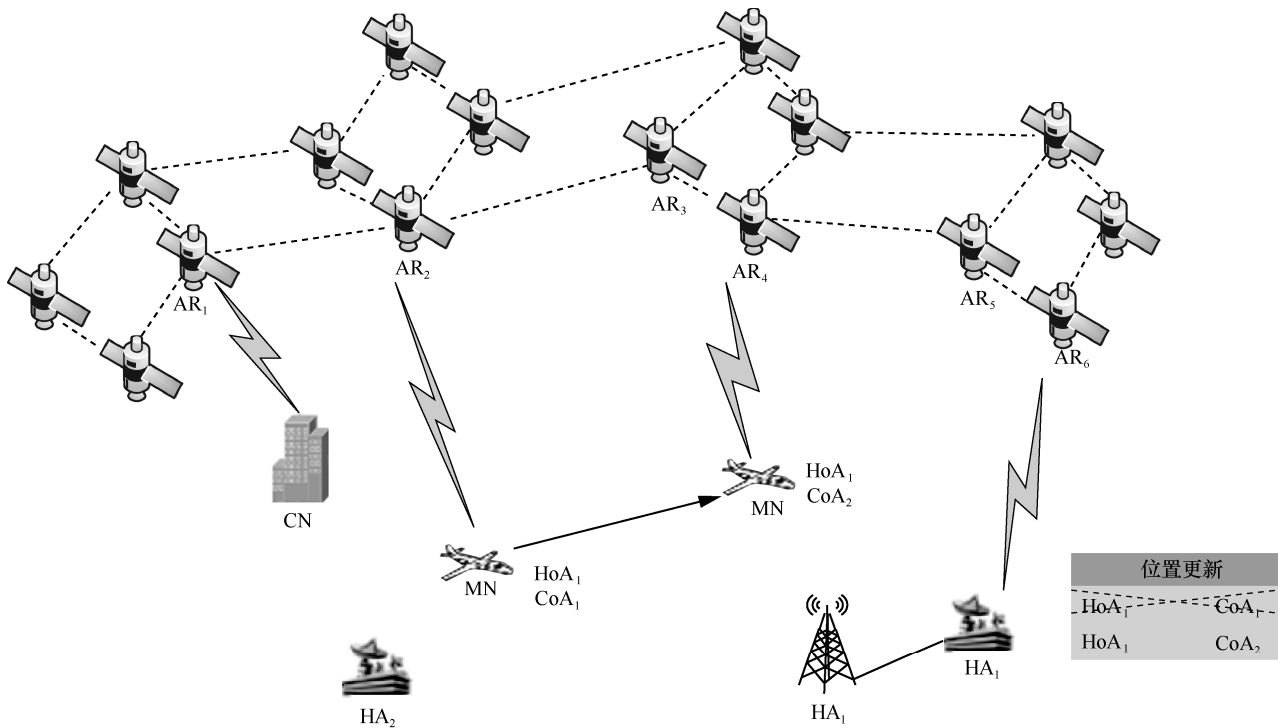


图 4 传统星地网络业务切换流程

基于 SDN 的星地 DMM 设计方案如图 5 所示。图 5 中的方案包括 2 个功能实体。

1) 卫星移动锚点 (SMA, satellite mobility anchor) 在卫星节点部署, 主要功能是支持卫星在切换过程中保证终端的接入和数据的转发。如果切换是本地化过程, 邻间节点 SMA 可以动态地建立无缝切换链路。

2) 位置移动锚点 (LMA, location mobility anchor) 在地面网关部署, 主要功能是支持位置管理和数据转发。位置管理需要完成网关之间的同步功能和 OpenFlow 协议。

在该场景中, 当 MN 接入到 SMA<sub>2</sub> 时, 最近的网关为 LMA<sub>2</sub>, 所以 LMA<sub>2</sub> 将被作为家乡地址来注册, LMA<sub>2</sub> 将存储 MN 的位置信息发送至控制器, 与此同时, 位置信息将会同步更新到其余网关, 来降低管理开销。当 CN 请求与 MN 建立链路时, 数据将会被转发至最近的网关数量 LMA<sub>3</sub>, 此时, LMA<sub>3</sub> 可以将 MN 的实际地址转发至 LMA<sub>2</sub>, 形成隧道机制。通过 SDN 控制器对 LMA 进行管理, 当

移动节点移动并发生切换管理时, SDN 控制器同步更新所有 LMA 表项, 使移动节点总能在最近的 LMA 进行数据接收。

### 4 系统性能分析

切换是移动管理方案中最核心的部分, 发生在移动节点越过覆盖边界的时候。为了能够详细评估切换时系统的特征, 简单起见, 假设覆盖边界是直线, 并且移动节点的遵循均匀分布。长度为  $L$  的覆盖边界在时间段  $\Delta t$  内以速度  $V_{sat}$  从一个方向移动到另外一个方向。将覆盖区域密度表示为  $D$ , 如图 6 所示, 边界交叉事件的发生率  $R$  可以通过式(1)表示。

$$R = V_{sat}LD \tag{1}$$

在之前的卫星网络移动管理研究中, 通常都是继承电信网的研究。其中, 铱星系统的架构设计参考了 GSM 通信系统, 管理成本被计算为生成的控制消息大小与传递消息所需的跳数的乘积<sup>[7]</sup>。为了更清楚地分析, 本文假设  $D_L$  为时刻  $t$  覆盖边界内的

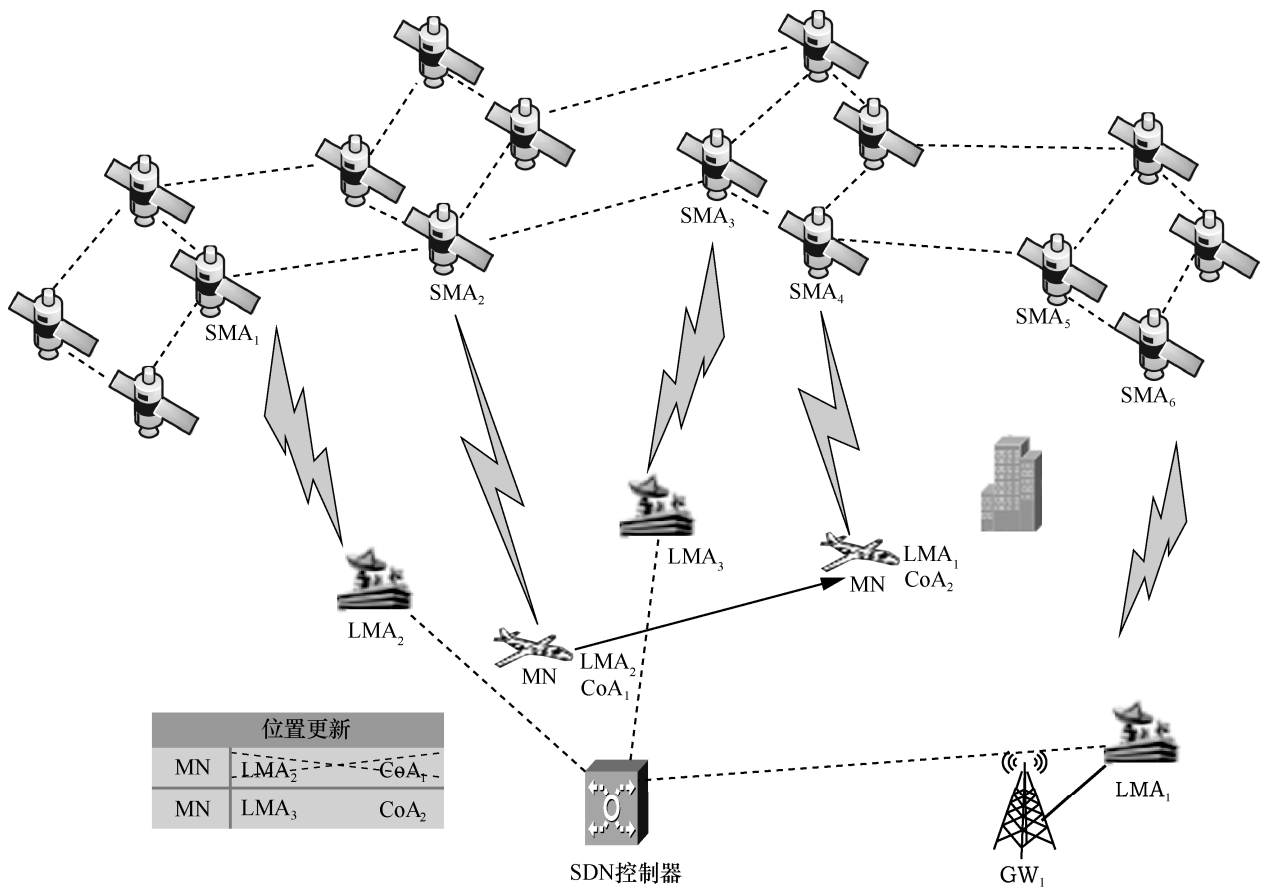


图 5 SDN-DMM 星地网络部署

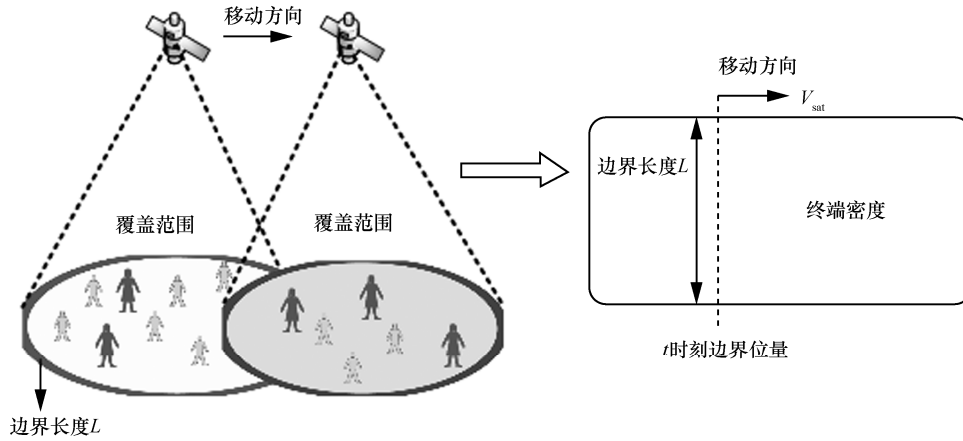


图 6 卫星移动切换模型

终端线性密度，在单位时间内卫星和 AR 之间的切换发生率由  $R_{HO}$  表示<sup>[8]</sup>，本文有

$$R_{HO} = V_{sat} L \int_{V_{sat}(t-\Delta t)}^{V_{sat}t} D_L dt \quad (2)$$

其中， $D$  表示单个 AR 范围内卫星密度， $L$  表示卫星覆盖直径范围， $V_{sat}$  为卫星的近似移动速度。

简单起见，本文将数据分组的大小固定为  $M$ ，在传统的基于 MIPv6 卫星网络中，管理开销包括从移动卫星到 AR 的注册过程和 AR 到相关家乡代理注册过程，用  $H(AR_i, HA)$  表示  $AR_i$  与 HA 之间的跳数，因此 MIPv6 的管理开销可以使用  $B_{MIPv6}$  表示为

$$B_{MIPv6} = R_{HO} M [H(AR_i, HA) + 1] \quad (3)$$

在基于分布式移动管理的卫星切换方案中，管理开销包括 MN 向卫星的注册开销和卫星到最近的 LMA 的注册开销。全局的 LMA 也需要统计在内。本文使用  $B_{DMM}$  来表示系统总开销，可得式(4)为

$$B_{DMM} = R_{HO} M [H(AR_i, LMA_{NEAR}) + 1] + \Delta t \frac{V_{mn}}{d} R_{HO} \sum_{j=1}^{N_{LMA}} H(LMA_i, LMA_j) \quad (4)$$

在本文设计的 SDN-DMM 卫星和星地网络方案，可以保证  $H(AR_i, HA)$  始终为最优路径跳数，同时实现卫星与 AR 之间的平滑切换。为了能够进行直观的对比，本文引入传统 LEO 卫星网络基本特征数值，将 LMA 统一分布在地球表面，假定  $d=9\ 000\text{ km}$ ， $V_{mn}=80\text{ km/s}$ ， $V_{sat}=27\ 000\text{ km/h}$ ， $H(AR_i, HA)=15$ ， $D=0.001\ 9$ ，数值取自 Walker 系统，计算得出，MIPv6 方案的管理开销每跳为 11.6 KB，DMM 方案的管理

开销每跳为 10.2 KB，SDN-DMM 方案的管理开销每跳为 6.9 KB，相比于传统 MIPv6 减少了 41% 的管理开销。

### 5 方案仿真分析

本文使用 STK 仿真软件构建上述提出的卫星组网设计方案，卫星软件工具包 (STK, satellite tool kit)，是由美国 AGI 公司开发的一款在航天工业领域应用的商业化分析软件，能够提供图标以及文本形式的结果分析<sup>[9]</sup>。

为了简单描述，本文设计的卫星组网方案为由 1 颗 GEO 卫星和 16 颗 Walker 卫星星座组成。

通过对于卫星覆盖状况的仿真，对网络开销进行模拟，网络负载强度在 100~250 之间逐渐加强，得出在该网络负载情况下的管理开销占比，本文将通过对 SDN-DMM 方案分别、MIPv6 方案和 DMM 方案进行对比，仿真结果如图 7 所示。

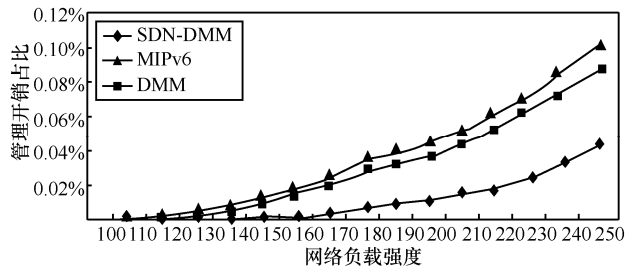


图 7 卫星网络管理开销对比

仿真结果显示，SDN-DMM 相比于传统的卫星 MIPv6 方案和卫星 DMM 方案有着明显的优势，由 SDN 控制器对各移动锚点的流表进行管理 with 重构，实现卫星网络移动切换管理的优化。

## 6 结束语

本文提出的一种基于 SDN 的卫星分布式移动管理方案 SDN-DMM, 旨在为卫星网络移动管理研究提供一种可行方案, 首先, 本文介绍了应用于卫星网络的 SDN 架构, 然后, 对 SDN-DMM 模型进行了详细描述, 并通过地面移动终端的应用场景来进行对方案的说明, 最后通过 STK 和程序对 SDN-DMM 与传统移动管理模式进行对比, 结果显示, SDN-DMM 能够有效地降低管理开销, 具有更好的系统性能, 可以作为以后研究工作的基础与参考。

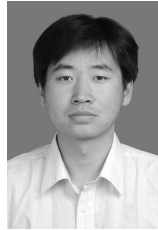
### 参考文献:

- [1] 王汝传. 卫星通信网路由技术及其模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.  
WANG R C. Routing technology and simulation of satellite communication network[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2010.
- [2] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 52(4): 1289-1306, 2006.
- [3] CHAN H A, YOKOTA H, XIE J, et al. Distributed and dynamic mobility management in mobile internet: current approaches and issues[J]. Journal of Communications, 2011, 6(1): 4-15.
- [4] BERTIN P, BONJOUR S, BONNIN J. Distributed or centralized mobility[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, (GLOBECOM 2009). 2009.
- [5] LIEBSCH M, SEITE P, KARAGIANNIS G, et al. Distributed mobility management-framework & analysis[C]//IEEE International Conference on Communications Workshops. 2013.
- [6] VALTULINA L, KARIMZADEH M, KARAGIANNIS G, et al. Performance evaluation of a SDN/OpenFlow-based distributed mobility Management (DMM) approach in virtualized LTE systems, 2014 IEEE

Globecom Workshops, Austin, TX, 2014.

- [7] ZHANG X, CASTELLANOS J G, CAMPBELL A T. P-MIP: paging extensions for mobile IP[J]. Mobile Networks and Applications, 2002.
- [8] TSUNODA H, OHTA K, KATO N, et al. Supporting IP/LEO satellite networks by handover-independent IP mobility management[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(2): 300-307.
- [9] STK user's manual version 4.2.1[M]//Network: Analytical Graphics INC(AGI),2000.

### 作者简介:



**李恒智** (1983-), 男, 河北秦皇岛人, 河北对外经贸职业学院讲师, 主要研究方向为网络技术研究。



**王春锋** (1966-), 男, 陕西富平人, 博士, 钱学森空间技术实验室副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为卫星网络技术研究。

**王为众** (1991-), 男, 河南开封人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为天地一体化网络、卫星通信港设计。

**张杰** (1972-), 男, 河南开封人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代智能光网络、空天地一体化网络、光与无线网络融合等。