

面向低轨卫星网络的动态虚拟化分布式移动性管理方法研究

朱洪涛, 郭 庆

(哈尔滨工业大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘 要: 随着5G的商用, 卫星通信与地面5G的融合已成为业界研究的一个重点方向。低轨卫星网络能够覆盖全球, 实现任何时间、任何地点与任何人通信, 是地面蜂窝网络的有效补充和扩展, 尤其是OneWeb、Starlink等低轨卫星互联网星座的推进部署, 加速了低轨卫星网络的发展。但是由于低轨卫星具有高动态性, 其网络拓扑变化速度快, 由此引发的网络管理问题成为低轨卫星应用的难点, 而移动性管理又是其中的关键技术, 如何构建适用于高动态低轨卫星网络的移动性管理机制是一个亟待解决的问题。基于地面分布式网关和卫星代理簇的思想, 提出动态虚拟化分布式移动性管理模型, 主要解决传统移动性管理的扩展性差、单点失效等问题, 同时利用卫星组建虚拟网关解决在地面上建立卫星地面站困难的问题。

关键词: 低轨道卫星; 分布式网关; 虚拟化网关; 移动性管理

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200111

Research on Dynamic Virtualization Distributed Mobility Management Method for LEO Satellite Network

ZHU Hongtao, GUO Qing

School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China

Abstract: With the commercialization of 5G, the integration of satellite communication and ground 5G has become a key research direction in the industry. Low earth orbit satellite network can cover the whole world and communicate with anyone at any time and anywhere. It is an effective supplement and expansion of terrestrial cellular network. Especially, the deployment of low earth orbit (LEO) internet constellation such as OneWeb and Starlink accelerates the development of LEO satellite network. However, due to the high dynamic of LEO satellite and the fast change of its network topology, the network management problem caused by it has become the difficulty of LEO satellite application, and mobility management is one of the key technologies. How to build a mobility management mechanism suitable for high dynamic LEO satellite network is an urgent problem to be solved. Based on the idea of ground distributed gateway and satellite agent cluster, the dynamic virtualization distributed mobility management (DV-DMM) model was proposed, which was mainly used to solve the problems of poor scalability and single point failure of traditional mobility management. At the same time, it used satellite to build virtual gateway to solve the problem of building satellite ground station on the ground.

Key Words: LEO satellite, distributed gateway, virtualization gateway, mobility management

1 引言

2019年9月, 第三代合作伙伴计划(the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)在R15中提出了支持非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN)的新无线电(New Radio, NR)研究, 研究中定义了NTN的部署场景, 包括卫星网络和空中网络, 在R16中又进一步强化了卫星接入等方面的功能, 而且未来的网络必将是

天地融合的一体化网络^[1-2], 卫星网络在其中扮演着重要的角色^[3]。卫星通信系统与5G相互融合, 取长补短, 共同形成海陆空无缝全球综合通信网络, 可以满足各种业务的需求, 这是未来通信发展的一个重要方向。

随着商业卫星技术的成熟和运载火箭二次回收技术的发展, 低轨卫星星座得到迅速发展。目前针对卫星网络的移动性管理问题, 许多学者和专家进行了相关研

收稿日期: 2020-08-15; 修回日期: 2020-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61671183, No.61771163)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.61671183, No.61771163)

究。文献[4]比较了MIPv6和PMIPv6在低轨卫星网络中的性能,在切换时延、切换阻塞概率和分组丢失方面进行了比较,结果表明,在LEO网络中,通信链路的链接条件、动态LEO卫星网络拓扑和用户流量等因素都会对移动性管理产生重大影响,PMIPv6在切换等待时间、切换阻塞概率和数据分组丢失方面优于MIPv6。文献[5]比较了MIPv6和FMIPv6在低轨卫星网络中的切换性能,并提出了一个综合的分析模型,对LEO卫星网络中的MIPv6和FMIPv6性能给出了理论分析,从切换时延、丢包和转发成本等方面对它们进行深度性能分析。文献[6]针对LEO移动卫星系统中相关切换业务提出了一个简单的分析框架,对具有相关服务时间的LEO-MSS中的新服务和移交服务进行了有效的性能评估。文献[7]在低轨卫星网络中启用SDN控制器,提供了一种流量模型,该模型根据时间和用户的地理位置考虑了用户需求,并且提出了一个ILP来解决LEO星座中的动态控制器放置问题,同时将平均流量建立时间最小化,仿真结果证明了动态方法提供的性能优于静态方法。但是文献[7]没有分析应用SDN控制器后对卫星的载荷能力要求,没有分析引入SDN控制器后对网络的时延影响。文献[8]提出了一种基于虚拟代理域(VAD)的移动性管理机制,解决了用户频繁切换导致的严重移动性管理负担和较大的切换时延问题。该方法采用分布式移动性管理机制的架构来支持虚拟代理区间的信息共享,从而降低了单颗卫星的性能要求,并提高了系统可扩展性,但是该方案仍然基于MIPv6方案,不能有效解决单点失效和路由优化的问题。文献[9]采用陆地网关分布式的移动性管理方案,利用分布式的特点,能够有效降低网络信令开销和时延,但是该方法要求建立地面网关,对终端的位置进行统一管理注册,因此在海洋或者其他国家地域不能建立地面网关的地方不完全适用。

2 DV-DMM移动性管理架构

针对LEO网络的动态拓扑特点和受到地理因素、政治因素等影响卫星建立地面站困难等特点,本文借鉴了文献[8]和文献[9]的移动性管理思想,提出了一种动态虚拟化分布式移动性管理架构。在该架构中,地面站结合卫星群组成的动态虚拟地面站采用基于网络的移动性支持方法,利用星上的处理能力和星间链路,支持虚拟地面站内卫星信息共享,实现终端的分布式位置管理,能够提供有效的位置查询服务。该架构不仅解决了集中式位置管理方法中次优路由、单点失效等问题,增强了网络的可扩展性和稳健性,同时也降低了网络对地面站位置和数量的要求,提升了移动性管理的性能。

2.1 系统模型

DV-DMM系统架构如图1所示,在此DV-DMM模型中,按照地理位置和业务需求将全球划分为10个位置区,其中有8个位置区建立了地面站,2个位置区由于地理位置等原因,无法建立地面站。由卫星群形成了2个虚拟网关,这里由于卫星组网的灵活性,可根据业务需要在全局任意位置形成虚拟网关,协助全球组网。移动卫星终端通过卫星波束接入卫星网络,终端以唯一的固定身份标识接入卫星,这里以ID和数字组合的方式标识终端,终端根据卫星网络前缀(Satellite Network Prefix, SNP)生成地址,如SNP1:ID1,同时接入卫星会向终端所在位置区的网关进行信息注册与绑定。这里分为两种情况:一种是终端所在的位置区有地面网关,则接入卫星会通过星间链路,将终端的位置信息发送到地面网关处,然后地面网关再通过星间链路将信息进行全局同步;另一种是终端所在的位置区为虚拟网关,组成网关的卫星群随卫星拓扑的改变而发生变化,此时终端通过接入卫星将信息注册到虚拟网关的卫星群,再通过此卫星群将信息同步给其他地面网关。当终端发起通信时,会通过接入卫星连接地面网关或者虚拟网关,查询对方的位置,进而完成通信链路的连接。

2.2 移动性管理机制

(1) 虚拟网关的管理机制

在本文构建的动态虚拟化分布式移动性管理架构中,全球被划分为多个位置区,在一些位置区采用虚拟网关,这些虚拟网关由若干个卫星覆盖组成,这些接入卫星协同工作,支持卫星群内信息共享,共同管理这个位置区的终端。T1时刻系统位置管理如图2所示。T1时刻,在位置区3中,虚拟网关的范围如地面虚线所示,在这个范围内的卫星共同组成位置区3的虚拟位置移动锚点VLMA3,其中包括卫星1、2、6、7。由于卫星在不断运动,如图3所示,在T2时刻,组成VLMA3的卫星群发生改变,卫星1和卫星6移出了虚拟区,而卫星3和卫星8新加入位置区,故VLMA3将移除旧的卫星,添加新的卫星,同时将信息同步给新的卫星,以此维持该虚拟位置移动锚点的功能。

(2) 终端位置管理机制

本文主要研究移动性管理中的位置管理机制,因为位置管理时时刻刻都在发生,不同的位置管理方法对整个网络的信令开销影响较大。本文先采用归属信息同步方法,即当终端接入卫星网络时,只将其所属的本地移动锚点或者虚拟本地移动锚点信息同步给其他网关或者虚拟网关,而不会同步其所接入卫星的具体信息,终端

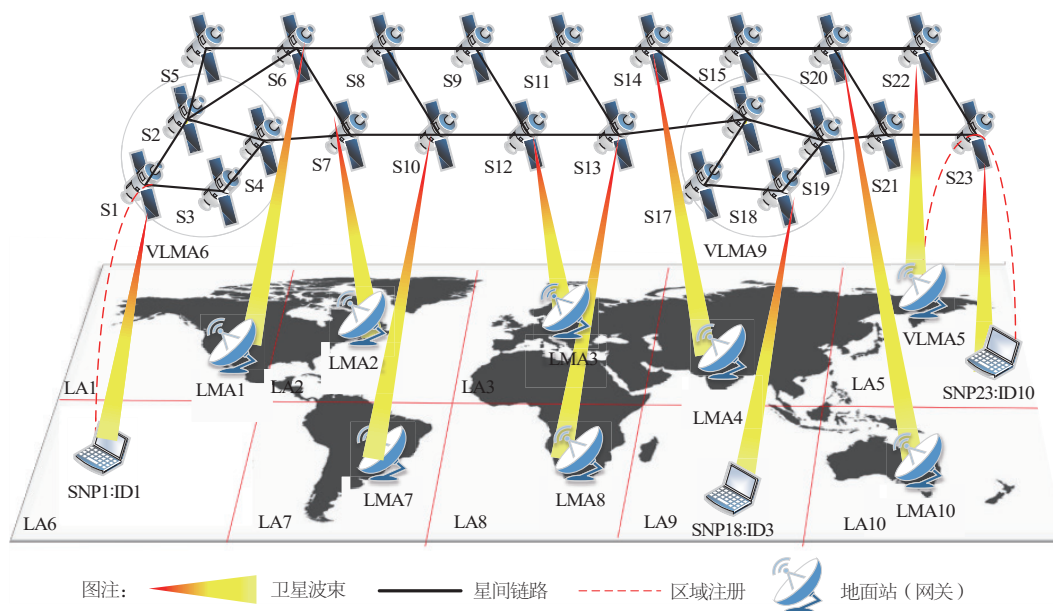


图1 DV-DMM系统架构

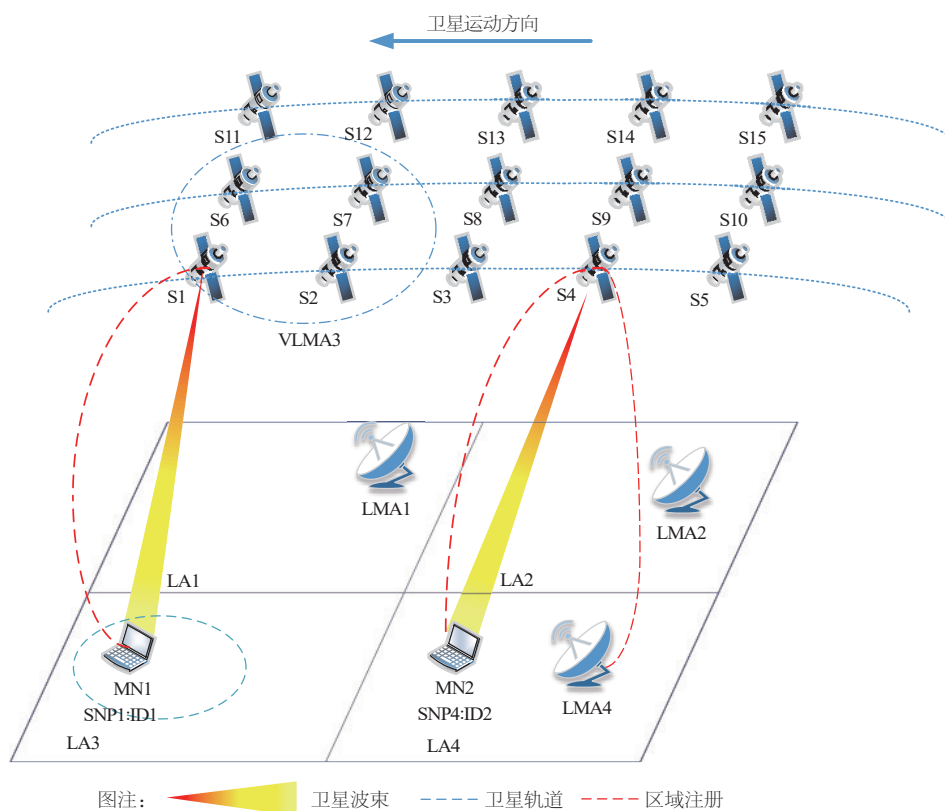


图2 T1时刻系统位置管理示意

在同一位置区内发生切换时,无须向其他网关进行信息同步,只需要在本地网关进行信息共享,当终端移出当前位置区时,除了要在新的网关绑定自己的位置信息,还要将其归属信息同步给其他网关。

本文提出的DV-DMM管理方案,在位置管理时主要分为以下两种情况:情况一,终端在位置区内进行切换;情况二,终端在位置区之间进行切换。如图2所示,在T1时刻,MN1接入卫星1,并生成地址SNP1:ID1,由

于其接入卫星恰好是组成虚拟网关的卫星群，故卫星1直接注册该终端的位置信息，并把此信息同步给整个虚拟网关。MN2的接入卫星为卫星4，MN2所在的位置区为LA4，此时卫星4给MN2配置地址SNP4:ID2，同时将其位置信息绑定到本地网关LMA4。在T2时刻，如图3所示，MN1在位置区1内移动，符合情况一，这时MN1的接入卫星变为卫星3，此时的配置地址变为SNP3:ID1，由于终端没有移出位置区，故位置信息只需要在虚拟本地移动锚点中更新，不需要进行全局信息更新。在T2时刻，MN2由于自身移动，移动到了位置区2，符合情况二，此时接入卫星为S5，配置终端地址为SNP5:ID2，由于终端的位置区发生改变，因此除了在本地图关中注册信息外，还要将其所属网关的信息同步给其他网关，完成终端的位置管理。

(3) 终端位置查询机制

在位置管理中，本文提出的DV-DMM架构还支持位置查询功能。如图3所示，当终端CN向MN2发起通信请求时，CN的报文中仅仅含有源终端及目的终端的接口标识信息，当报文到达接入卫星S13时，发现卫星S13中并没有MN2的位置缓存信息，此时卫星S13可以发起对MN2的位置查询。首先卫星S13将查询指令发送给本地网关LMA1，LMA1检查本地缓存，如果有MN2的精确位

置，则返回相应的位置信息，否则LMA1将指令重新定向到包含MN2精确位置信息的网关LMA2中，然后由LMA2对卫星S13发起的位置查询进行响应，返回MN2的当前位置信息SNP5:ID2，随后完成通信双方的通信连接。

3 DV-DMM网络信令开销分析

本节主要对DV-DMM网络架构中的控制开销进行理论分析，在DV-DMM架构中，网络的控制开销主要是位置管理开销，本文采用的开销计算方式为：控制信令的报文大小与该报文经过的链路数（跳数）的乘积为发出一次信令所需要的开销，这里为了便于分析和计算，假设报文大小为固定值，设为 B ，在 Δt 时间内，由于卫星运动造成的终端切换次数可由式（1）计算：

$$N_{HO} = \int_t^{t+\Delta t} D_{sat} \cdot \rho \cdot V_{sat} dt \quad (1)$$

其中， D_{sat} 为卫星的覆盖区域直径， ρ 为终端在覆盖区域内的分布密度， V_{sat} 为卫星的运动速度。

在DV-DMM架构中，由于采用了分布式的移动性管理方法，其位置管理开销主要包括两部分：一是终端所在的位置区不变，其通过接入卫星向所在网关进行位置信息注册；二是当终端移出位置区，不仅要在新的网关注册位

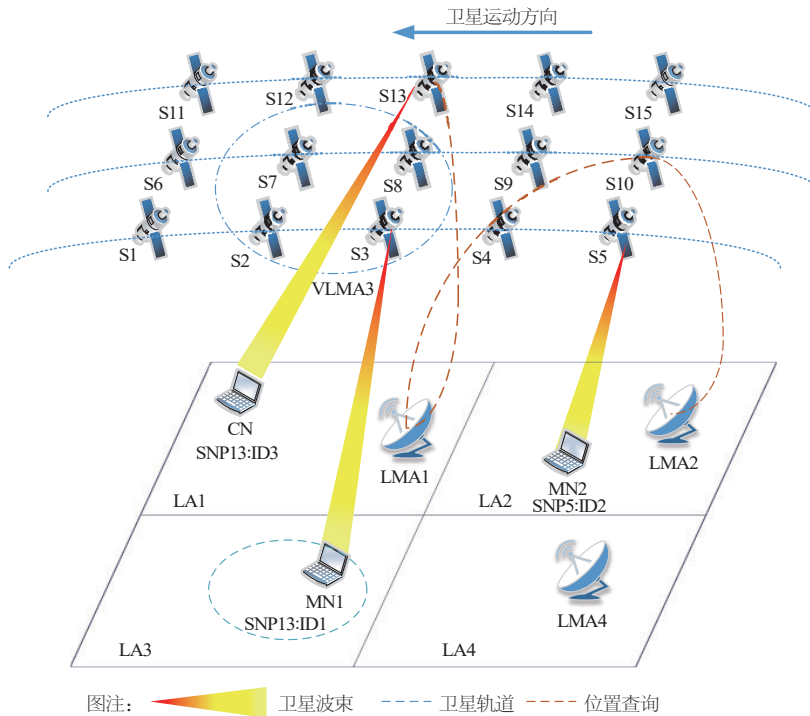


图3 T2时刻系统位置管理示意

置,同时还要将其位置同步更新给网络中的其他网关,对于虚拟网关来说,还需要在内部的卫星群中进行信息共享,故其位置管理开销 C_{DV-DMM} 可由式(2)表示:

$$C_{DV-DMM} = N_{HO} B [H(S_i, LMA_k) + 1] + P_{LA} N_{HO} B \sum_{j=1, j \neq k}^{N_{LMA}} H(LMA_k, LMA_j) + P_{vir} \cdot N_{vir} \cdot B \cdot \bar{H} \quad (2)$$

其中, $H(S_i, LMA_k)$ 表示终端的接入卫星到其地面网关的跳数, P_{LA} 表示终端切换位置区的概率, $H(LMA_k, LMA_j)$ 表示位置区 k 到位置区 j 所需的跳数。式(2)中第一项为终端在原位置区中由于卫星移动而产生的位置更新开销;第二项为终端移出原位置区切换到新的位置区时,进行全局更新时的位置开销;第三项为终端所在的网关为虚拟网关时产生的额外信令开销。其中 P_{vir} 为终端所在网关为虚拟网关的概率, $N_{vir} \cdot B \cdot \bar{H}$ 为虚拟网关自身信息更新的开销。这里位置区切换概率 P_{LA} 可由式(3)表示:

$$P_{LA} = \Delta t \cdot \frac{V_{MN}}{D_{LA}} \quad (3)$$

其中, V_{MN} 为终端的运动速度, D_{LA} 为位置区的直径。

这里将DV-DMM的位置管理开销和MIPv6的位置开销进行比较,在MIPv6中,其管理开销包括MN到卫星的注册报文,以及卫星到其家乡代理网关的报文,其开销 C_{MIPv6} 可用式(4)表示:

$$C_{MIPv6} = N_{HO} \cdot B \cdot [H(S_i, HA) + 1] \quad (4)$$

其中, $H(S_i, HA)$ 为终端接入卫星到其家乡代理网关的跳数。

通过对比DV-DMM和MIPv6两者位置管理的理论开销表达式,可以发现,对于DV-DMM方案来说,管理开销表达式中第一项中的 $H(S_i, LMA_k)$ 为终端接入卫星到其地面网关的跳数,比MIPv6方案中 $H(S_i, HA)$ 的跳数要小得多,而且在同一位置区的绑定更新时刻都在发生。对于低轨卫星来说,卫星的覆盖区域更小,切换的频率更加频繁,故在这项开销上,DV-DMM方案要比MIPv6方案小得多。至于DV-DMM方案开销的第二项,由于终端的移动速度相对较慢,对于几百甚至上千千米的位置区来说,移动端移出位置区的概率很小,故第二项开销在位置管理中所占比例很小。综合分析,DV-DMM方案在位置管理开销方面较MIPv6有着很大的优势。

4 仿真分析

4.1 移动模型构建

为了构建DV-DMM架构模型,首先需要对网络中的各个节点进行建模,重点是对卫星的移动性进行建

模,本文仿真的星座为低轨卫星星座,卫星轨道高度为600 km。为了简化分析,本文根据卫星星座的特点做出以下假设:

(1) 所有卫星具有相同的轨道高度,且卫星的轨道间隔平行分布;

(2) 每个轨道上的卫星都均匀分布在轨道上,假设每个轨道的周长相等,即每个轨道卫星数量相同;

(3) 将椭圆形的卫星波束区简化为正方形区域,且卫星的覆盖区域能将地面无缝覆盖且不重叠;

(4) 仿真区域为矩形,模拟地球按照经度的展开图,卫星只在纬度方向运动,且卫星在东西半球的运动方向相反,且在经纬度上具有和地球一样的特征,即加入卫星在东半球向北纬的高纬度方向运动,则运动到北纬90°后,卫星会出现在西半球,由北纬90°向低纬度运动;

(5) 将移动终端的运动方向简化为4个,分别是向北纬纬度增大的方向、向南纬纬度增大的方向、向东经经度增大的方向、向西经经度增大的方向,这4个方向分别对应y轴和x轴的增大、减小方向;

(6) 移动终端均匀分布在卫星的覆盖区内。

具体移动模型如图4所示,模型以经纬度为轴建立直角坐标系。

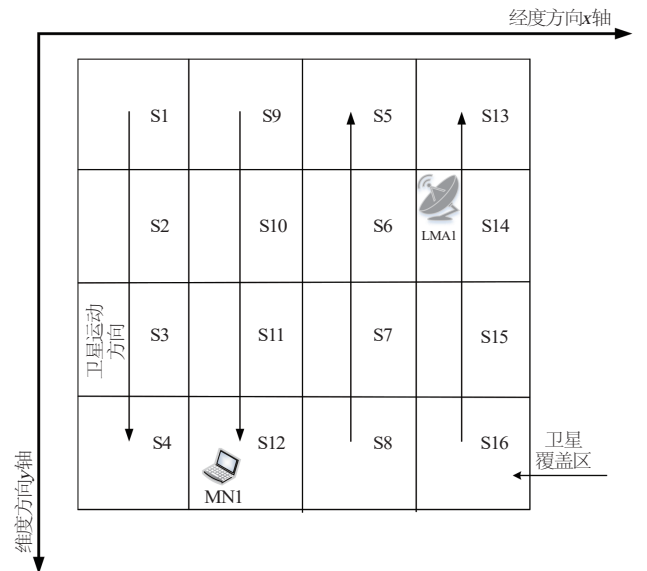


图4 移动模型示意

4.2 仿真结果及分析

依据上述的模型搭建仿真环境,卫星轨道高度为600 km,共有720颗卫星,具体仿真参数设置见表1。

表1 仿真参数设置

参数名称	参数值
位置区直径 D_{LA}	4 500 km
卫星覆盖直径 D_{sat}	600 km
网关有效接收直径 D_{LMA}	1 500 km
仿真区域长度 L	28 800 km
仿真区域宽度	9 000 km
终端分布密度 ρ	0.000 02/km ²
卫星轨道数	24个
每个轨道卫星数	30个
卫星高度 H_{sat}	600 km
卫星运行速度 V_{sat}	7.56 km/s
终端运行速度 V_{MN}	0.3 km/s
运动终端所占比例 m	50%
控制报文大小 B	40 B
呼叫到达率 λ	1次/s
通话保持时间 μ	79 s
仿真时间 T	395 s

为了充分体现移动性对网络架构的影响,本文假定50%的终端速度为300 m/s,其余终端的速度忽略不计,仿真终端数量超过5 000个,终端随机均匀分布,网关等距分布,降低其位置分布对仿真结果的影响。

图5展示了两种方案总的位置管理开销的仿真结果,可以看出随着网关数量的增加,MIPv6方案的位置管理开销基本不变,因为在MIPv6方案中,位置管理开销只与终端位置和家乡代理位置有关。而DV-DMM方案随着网关数量增加,星间链路开销先减小而后增加,这是因为随着网关数量增多,终端距离其所属网关的位置将会变短,其注册位置时信令开销将会减少。但是当网关数量超过一定数量时,位置区变小,终端跨位置区的概率增加,导致全局更新开销增加。可以看出,DV-DMM在位置管理开销上要低于MIPv6方案,随着网关数量增多,优势将更加明显,而且在DV-DMM方案中,存在最优网关数量,进一步减小系统的信令开销。

图6展示了两种方案位置查询开销的仿真结果,可以看出DV-DMM的位置查询开销明显低于MIPv6的位置管理开销,且随着网关数量增多,优势将更加明显。这是因为随着网关数量增多,DV-DMM方案在查询终端位置时,如果不能在本地网关查到目的终端的精确位置,则通过位置重新定向,也会在距离其最近的网关查到其精确位置,且随着网关数量的增多,终端相对网关的位置将会减少,因此其查询位置所需的跳数较少。而在MIPv6方案中,源终端发出的位置查询报文,要先发送给家乡

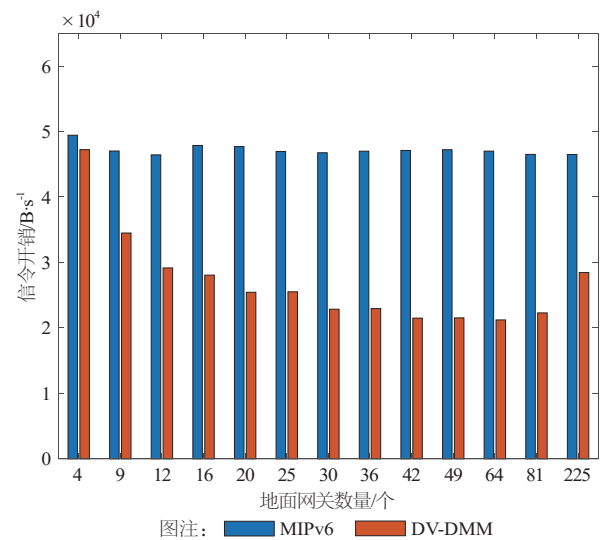


图5 MIPv6和DV-DMM方案位置管理开销对比

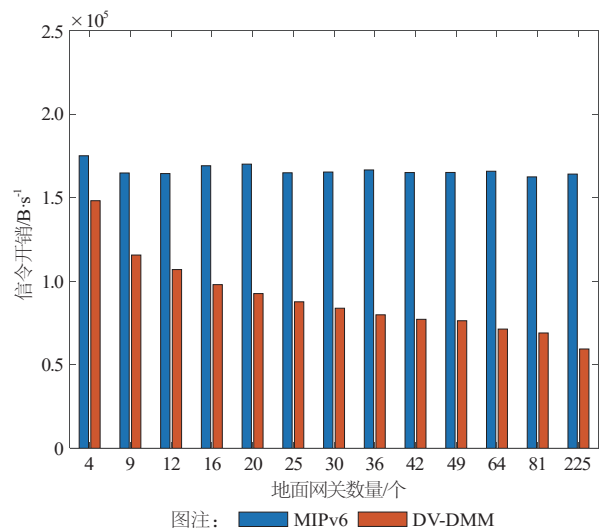


图6 MIPv6和DV-DMM方案位置查询开销对比

代理HA,然后才能知道目的终端的精确位置信息,所需跳数较多,且家乡代理与终端的相对位置和网关数量无关,相比之下,DV-DMM方案更具优势。

图7展示了两种方案的查询时延和传输时延的仿真结果,这里定义位置查询时延为从源终端接入卫星发出信令开始到接收到目的终端的精确位置信息的时间间隔,而传输时延为从源终端发出通信请求开始到目的终端接收到请求的时间间隔,两种方式都只考虑传输的时延,不考虑处理时延。从图7中可以看出,在MIPv6方案中,位置查询时延和传输时延随着网关数量的增加基本没有改变,而在DV-DMM方案中,位置查询时延和传输时延都比MIPv6方案有所下降,且随着网关数量的增加,时延

有所降低。这是因为随着网关数量增多,源终端中网关的距离更近,所需的时延更小。

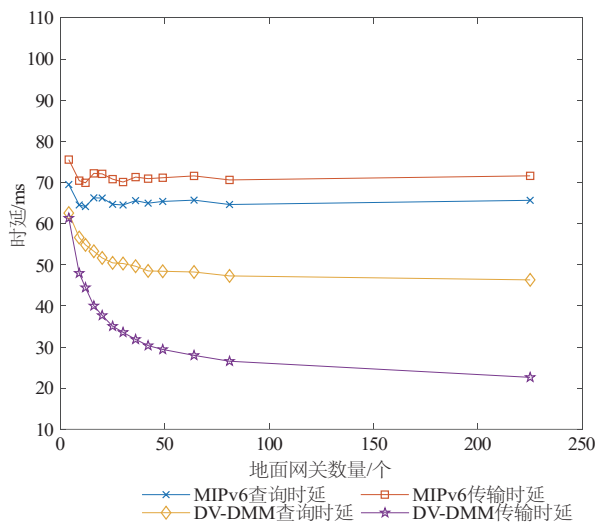


图7 MIPv6和DV-DMM方案查询时延及传输时延对比

通过上述仿真对比分析可知, DV-DMM方案采用的分布式管理方法,使其位置管理的信令开销更小,时延更低,且随着网关数量的增加, DV-DMM架构的整体性能有所提升。

5 结束语

本文借鉴了分布式移动性管理的思想,结合低轨卫星网络的特点提出了一种动态虚拟化分布式移动性管理方法,该方案采用分布式地面网关,在某些不方便建站的位置区,采用卫星群组成虚拟网关,与地面网关一起对网络进行移动性管理。本文对DV-DMM架构的网络开销和时延进行了详细的理论分析,对比传统MIPv6方案, DV-DMM方案在降低信令开销方面具有很大优势。同时本文建立了相应的系统仿真模型,结果表明,随着网关数量的增加,网络的信令开销在降低,且存在一个最优化的网关数量,能够减小系统的信令开销。

参考文献:

- [1] 张乃通,赵康健,刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报,2015, 10(3): 223-230.
ZHANG N T, ZHAO K L, LIU G L. Thoughts on the construction of my country's "Heaven and earth integration information network" [J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015,10(3):223-230.
- [2] 李德仁,沈欣,龚健雅,等. 论我国空间信息网络的构建[J]. 武汉

大学学报信息科学版,2015,40(6): 711-766.

- LI D R, CHEN X, GONG J Y, et al. On the construction of my country's spatial information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015,40(6): 711-766.
- [3] 贺达健. 低轨卫星网络移动性管理技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学. 2016.
HE D J. Research on mobility management technology of LEO satellite network[D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2016.
- [4] HE D, YOU P, YONG S. Comparative handover performance analysis of MIPv6 and PMIPv6 in LEO satellite networks[C]// 2016 Sixth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). 2016.
- [5] SU G, YOU P, YONG S. Comparative handover performance analysis of MIPv6 and FMIPv6 in LEO satellite networks[C]//2017 International Conference on Network and Information Systems for Computers (ICNISC). 2017.
- [6] MUSUMPUKA R, WALINGO T M, SMITH J M. Performance analysis of correlated handover service in LEO mobile satellite systems[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(11):2213-2216.
- [7] PAPA A, COLA T D, KELLERER W, et al. Dynamic SDN controller placement in a LEO constellation satellite network[C]//2018 IEEE Global Communications Conference: Selected Areas in Communications: Satellite and Space Communications (Globecom2018 SAC SSC). IEEE, 2018.
- [8] ZHANG X, SHI K, ZHANG S, et al. Virtual agent clustering based mobility management over the satellite networks[J]. IEEE Access, 2019 (99):1-1.
- [9] HAN W, WANG B, FENG Z, et al. Exploring the gateway-based distributed location management schemes in LEO satellite networks[J]. Icc Transactions on Communications, 2018, 101(3): 825-834..

[作者简介]



朱洪涛 (1994-), 男, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要研究方向为卫星通信和卫星网络移动性管理。



郭庆 (1964-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 哈尔滨工业大学电子与信息工程学院院长、教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和宽带多媒体通信。