

大规模低轨卫星网络移动性管理方案

Large-Scale Low Earth Orbit Satellite Network Mobility Management Scheme

吴琦/WU Qi, 郭孟泽/GUO Mengze, 朱立东/ZHU Lidong

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 中国 成都 611731)

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)



摘要:为了在寻呼时能够快速准确地找到通信对端的接入卫星,需要对卫星网络的用户终端进行有效的移动性管理。提出了一种改进的动态虚拟化移动性管理方案。对于无法修建地面站的位置区,采用基于地面用户密度的自适应生成虚拟网关方法,可减少用户位置管理开销,并可实现大规模星座下的移动性管理。

关键词:低轨卫星;移动性管理;动态虚拟化;虚拟网关;位置管理

Abstract: In order to accurately find the access satellite of the communication peer during the process of paging, effective mobility management of user terminals connected in the satellite network is required. An improved dynamic virtualized mobility management scheme is proposed. For location areas where ground stations cannot be built, a method of adaptively generating virtual gateways based on ground user density is proposed to reduce user location management overhead, and finally achieve large-scale constellation simulation of mobility management solutions.

Keywords: Low Earth Orbit satellite; mobility management; dynamic virtualization; virtual gateway; location management

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210927.2329.004.html>

网络出版日期: 2021-09-28

收稿日期: 2021-08-19

低轨卫星网络^[1]主要包括空间段、地面段和用户段,其中空间段主要由低轨卫星组成。目前,以铱星系统与LeoSat星座为代表的低轨卫星系统,在星座设计中均采用了星间链路和星上处理技术。这使得卫星星座拥有独立组网和路由能力。未来低轨卫星星座也将继续采用这些技术,以使得卫星星座不仅具备为地

面终端之间、终端与地面站之间提供通信链路的能力,还拥有完成地面用户接入、业务传送等功能。地面段主要包括地面控制中心、指令站(跟踪、遥测),以及网络控制中心3个部分,可实现系统运维。用户段主要包括各类地面终端用户,如车载终端、舰载终端和卫星电话等。本文中,我们主要将地面用户段划分为高速移动终端和非高速移动终端。其中,高速移动终端在位置区覆盖卫星进行切换的同时,也可能产生越区切换。

文献[2]指出低轨卫星具有时延短、路径损耗小和对功率要求低的优点,同时低轨卫星通信系统可以采用简单、低功率的地面终端和设备。然而,相比于中轨卫星和高轨卫星,单颗低轨卫星的覆盖范围比较有限,需要大规模星座才能实现全球覆盖。OneWeb通信系统就是这类星座的代表。它是由720颗运行在轨道高度为1 200 km的卫星构成的低轨卫星星座,星间通信依靠地面信关站完成。本文中的大规模低轨卫星网络移动

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1803102);
国家自然科学基金(61871422)

性管理方法主要应用于720颗存在星间链路的低轨卫星星座。

1 低轨卫星网络动态虚拟化分布式移动性管理

1.1 低轨卫星网络移动性管理研究现状

地面网络中的移动性管理方式主要为集中式管理^[3],即采用本地代理来实现对终端的管理,同时终端每次发起位置更新时都要向本地代理传输消息。如果直接将这种地面网络的集中式移动性管理方法应用在低轨卫星网络场景中,就会出现以下两个问题:

(1)终端频繁切换接入卫星^[4-5]而产生的大量报文消息,会经过星间链路和本地网络传递给本地代理。这将使得卫星星间链路和本地网络负载过高。这种负载会随着终端数量的增加而继续增大,容易导致网络瘫痪。

(2)当终端距离本地代理较远时,信令的传输时延会增大。这种时延会影响终端的切换,进而影响整个网络的性能。

因此,有必要针对低轨卫星网络的特点,将低轨卫星移动速度快、网络拓扑变化快等因素进行结合考虑^[6],寻找一种不同于传统地面网络集中式管理的移动性管理方法。文献[7]提出的动态虚拟化分布式移动性管理(DV-DMM)是一种适用于大规模低轨卫星网络的分布式移动性管理架构。对于分布式地面站建站困难的区域,如海洋、沙漠等,文献[7]提出利用低轨卫星群组成动态虚拟网关,即存在星间链路的相邻几颗卫星共同组成虚拟网关,对地面终端发送的位置更新信息进行网关内信息同步。虚拟网关将在无法布设地面

网关的地区发挥与地面网关相同的作用,例如存储、转发、路由等。通过和传统的基于互联网协议(IP)的移动IP第6版(MIPv6)移动性管理方法进行开销对比,DV-DMM模型的移动性管理开销优于MIPv6方案。

1.2 动态虚拟化分布式移动性管理方案

本文中我们使用和DV-DMM相似的移动性管理架构,并按照经纬度来划分位置区。每个位置区所占经度范围为 12° ,纬度范围为 15° ,这样全球一共被划分为360个位置区。以此为最小单元,若有由于地理或政治因素无法建设地面站的位置区,则由覆盖该位置区的卫星群来构成虚拟网关^[7]以协助组网。

低轨卫星分布式移动性管理系统模型如图1所示。在该模型中,我们从360个位置区中选取6个位置区。其中,LA3(LA指位置区)区域由于受到地理因素等限制无法建立地面网关。此时位于该位置区的卫星S5、S6、S7、S8会组成虚拟网关卫星群,同时S7将成为位于该位置区内

MN2(MN指终端)的接入卫星。

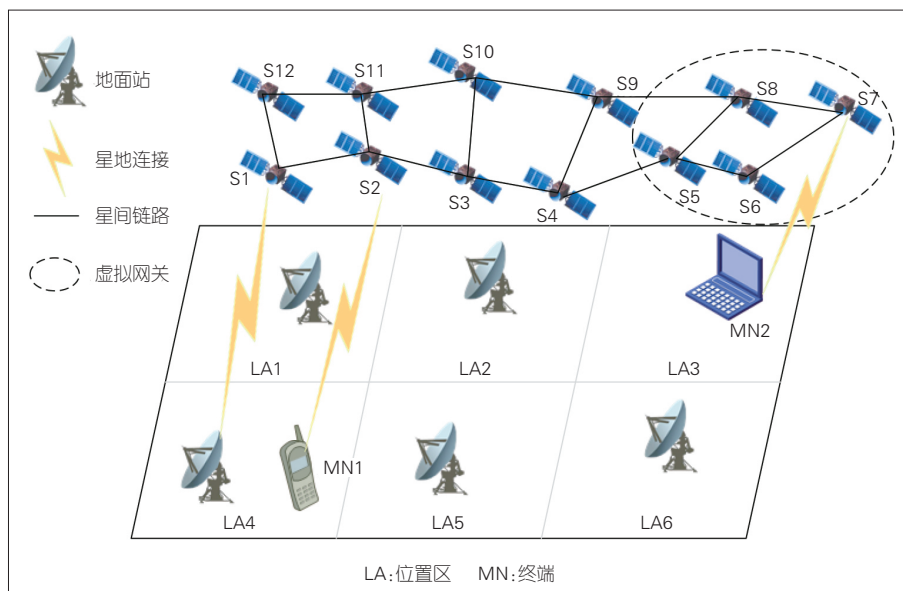
在本模型中,假设地面站与地面站之间、终端与地面站之间均不通过地面链路进行通信,所有的通信都由低轨卫星来完成。

终端向位置区所在的网关进行信息注册时存在两种情况:

(1)如果终端位置区所在的网关为地面站,那么在终端进行位置信息注册时,终端的接入卫星会通过星间链路将终端的位置信息发送给终端所在位置区的网关,以完成信息的注册。随后网关再通过星间链路将终端的位置信息并发送给其他网关,以完成信息的全局同步。

(2)如果终端所在位置区网关为虚拟网关,则终端的接入卫星与相邻的几颗卫星共同组成当前位置区的虚拟网关。接入卫星在收到终端的位置信息时,会首先在虚拟网关内向其他卫星同步终端位置信息,再通过星间链路发送到全局其他网关。

发送给其他网关的全局同步信息仅包含终端当前所属的位置区网关,而不包含终端当前的接入卫星。这是因为低轨卫星网络中终端切换



▲图1 低轨卫星分布式移动性管理系统模型

十分频繁。如果每次切换时接入卫星都进行全局更新,信令传输开销就会变得很大。因此,为了降低开销,每次终端切换接入卫星时,仅需要通知本地网关,并在本地网关内更新接入的卫星信息。

当终端 MN1 向终端 MN2 发起通信请求时,发送的请求报文中只包含源终端和目的终端的标识信息。报文首先由 MN1 发送给 MN1 的接入卫星 S2。S2 收到报文后会在本地缓存中寻找 MN2 的标识信息。如果 S2 本地有 MN2 的标识信息,就说明 MN2 的接入卫星也是 S2。这时 MN1 与 MN2 可以经由 S2 直接建立通信连接。如果 S2 本地查询不到 MN2 的标识信息,S2 就会将位置查询报文发给当前位置区 LA4 的地面站。随后,LA4 的地面站将查询本地缓存有无 MN2 的标识信息。如果有,则说明 MN2 也位于 LA4 中。这时 MN1 与 MN2 可通过 LA4 的地面站建立通信连接。由于终端在注册时已经将其所属位置区

网关进行全局同步,因此任何一个网关处都存储有 MN2 的所属位置区网关信息。如果 MN2 不在 LA4 中,则 LA4 的网关就会将位置查询报文发给 MN2 所在位置区的网关,以完成通信连接。通信对端位置查询流程图如图 2 所示。

2 DV-DMM 及其改进模型位置管理开销分析

文献[7]在动态虚拟化方案中提出了虚拟网关的概念。当用户所在地区可以建立地面网关时,地面网关将承担终端位置区信息的存储工作。当地面终端需要向另一个终端发起通信时,该终端将首先查询自身的接入卫星中是否存在另一终端的转交地址,如有则直接通过接入卫星转发信息,如无则通过接入卫星向自身位置区地面站寻求另一终端转交地址实现通信过程。当用户所在位置区因地理位置或地缘政治因素不能修建地面站时,覆盖位置区的卫星将组

合为虚拟网关,以代替地面网关的相关功能。

当地面终端由于覆盖区卫星运动而发生位置更新时,该方案只需要将位置更新信息在虚拟网关之间进行局部更新即可。当地面用户发生越区切换时,位置更新信息需要通过接入卫星广播到全球网关(包括所有地面网关和虚拟网关),而这将带来极大的位置更新开销。

本节在文献[7]提出的动态虚拟化分布式移动性管理方案基础之上,进一步推导了该方案中全球虚拟网关服从均匀分布(即所有虚拟网关均由相同数目的卫星通过星间链路组成)时系统的位置更新开销表达式,并结合地面终端密度进一步改进虚拟网关的分配策略,并给出了虚拟网关服从非均匀分布时系统的位置更新开销表达式。

2.1 均匀虚拟网关 DV-DMM 系统位置管理开销分析

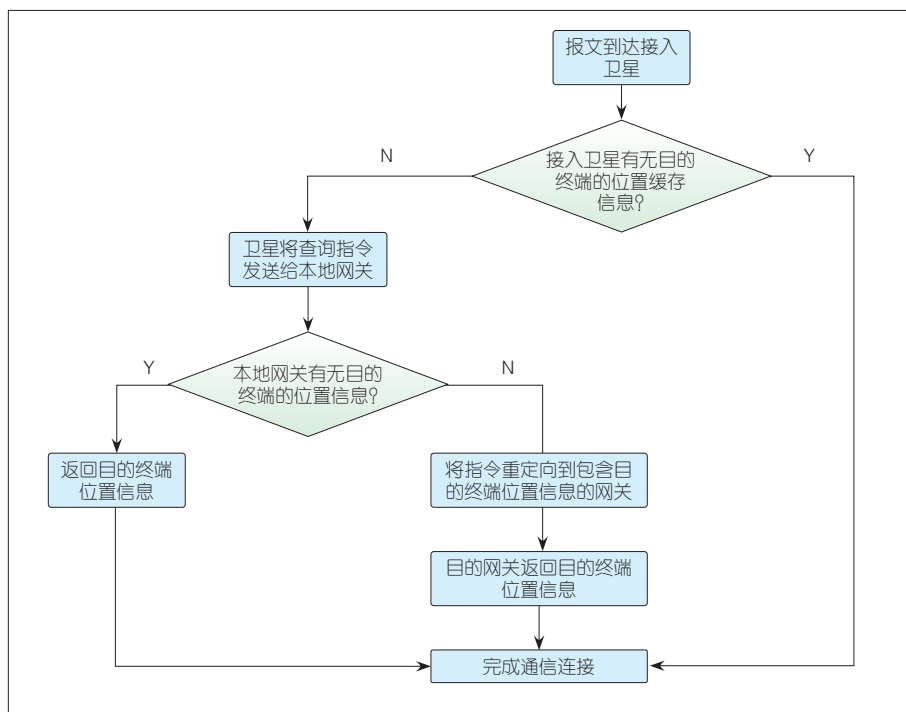
我们将位置管理信令开销定义为报文大小和报文跳数的乘积,并假设报文大小为固定值 B 。

位置管理信令开销 C_{total} 包括终端切换接入卫星时通知本地网关的开销 C_{sat} 和切换位置区时由本地网关发起的向其他网关进行信息全局同步的开销 C_{la} 。当地面终端所在位置区对应的网关为地面网关或者虚拟网关时,开销分析均可按以下方式展开。

单位时间内由于低轨卫星运动而造成的终端切换接入卫星的次数 N_{acc} 可由式(1)计算:

$$N_{\text{acc}} = \int_t^{t+dt} 2R \cdot V_{\text{sat}} \cdot \rho dt, \quad (1)$$

其中, R 表示卫星圆形覆盖区的半径, V_{sat} 表示卫星移动速度, ρ 表示地面用户密度,相关示意如图 3 所示。因此,



▲图2 位置查询流程图

由卫星运动导致的终端切换接入卫星的开销 C_{sat} 可由式(2)表示:

$$C_{\text{sat}} = N_{\text{acc}} \cdot B \cdot \{(1 - P_{\text{vir}}) \cdot [H(S_i, LA_k) + 1] + P_{\text{vir}} \cdot (H_{\text{vir}} + 1)\}, \quad (2)$$

其中, $H(S_i, LA_k)$ 表示当终端所在位置区网关为地面网关时, 从MN的接入卫星 S_i 到终端所在位置区网关 LA_k 的跳数, 通常取值为1。该跳数加1表示将从MN到 S_i 的1跳也考虑在内。 P_{vir} 表示MN所在网关是虚拟网关的概率。如果MN所在网关是虚拟网关, 则还需要考虑虚拟网关内部信息同步的开销。 H_{vir} 表示该虚拟网关内部信息同步所需要的跳数, 该值与组成虚拟网关的卫星数量有关。 P_{vir} 可由式(3)计算:

$$P_{\text{vir}} = \frac{N_{\text{vir}}}{N_{\text{LA}}}, \quad (3)$$

其中, N_{vir} 为系统中虚拟网关数量。 N_{LA} 为系统中的网关总数量, 包含虚拟网关数量和地面网关数量。

当MN切换位置区时, 除了式(2)中的开销之外, 系统还需要向其他网关进行信息同步。此时额外开销 C_{la} 可由式(4)计算:

$$C_{\text{la}} = P_{\text{la}} \cdot N_{\text{acc}} \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N_{\text{LA}}} H(LA_k, LA_j) + \sum_{n=1}^{N_{\text{vir}}} H_{\text{vir}_n} \right], \quad (4)$$

其中, $H(LA_k, LA_j)$ 表示从位置区 k 的网关 LA_k 到位置区 j 的网关 LA_j 的跳数, H_{vir_n} 表示第 n 个虚拟网关内部信息同步需要的跳数, P_{la} 表示终端切换位置区的概率。式(4)中中括号的第1项是由MN所在网关 LA_k 向全局其他网关发送位置更新消息的信令开销, 第2项是系统内的虚拟网关在接收到 LA_k 发送的位置更新消息后, 再进行虚拟网关内部信息同步的开销。

本系统总的位置管理开销可由式(5)表示:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{sat}} + C_{\text{la}} = N_{\text{acc}} \cdot B \cdot \{(1 - P_{\text{vir}}) \cdot [H(S_i, LA_k) + 1] + P_{\text{vir}} \cdot (H_{\text{vir}} + 1)\} + P_{\text{la}} \cdot N_{\text{acc}} \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N_{\text{LA}}} H(LA_k, LA_j) + \sum_{n=1}^{N_{\text{vir}}} H_{\text{vir}_n} \right]. \quad (5)$$

2.2 自适应调整位置区虚拟网关规模算法

当全球虚拟网关服从均匀分布时, 地面终端密度分布不同将导致不同地区对应的虚拟网关所承载的业务量不同。2.1节并未考虑到这一点。为使得系统能够稳定运行, 所有

虚拟网关中的卫星数目都应相同, 而且数值不能过大, 否则高终端密度地区的虚拟网关将无法及时进行全部业务的接入和内部广播操作。这种均匀划分方式只能将全球大部分卫星划分为多个小规模虚拟网关, 对于降低虚拟网关间的位置更新广播跳数是不

利的。

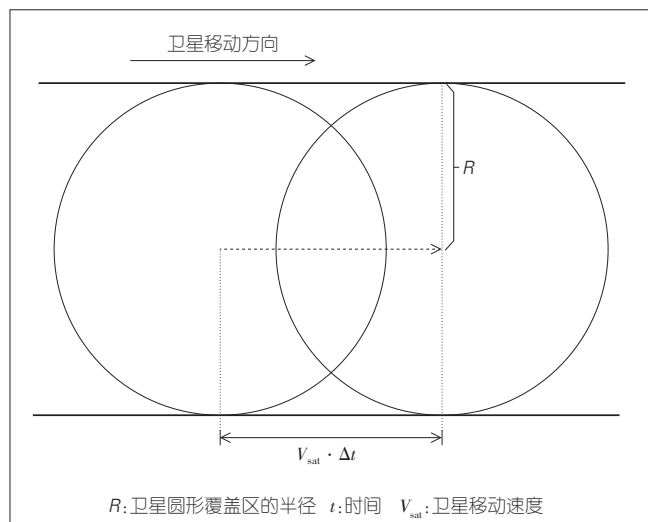
参考文献[8]将地球表面按照国家地理位置、用户分布密度、是否热点地区等条件合理划分成不同的管理区, 并对不同的管理区进行分簇管理, 实现了对不同用户密度位置区进行差异化、细粒度的管理。

基于以上分析, 本节提出了一种基于地面用户密度划分位置区的方法。为不同位置区分配不同大小的虚拟网关, 可进一步降低全球虚拟网关数目, 进而减少由地面终端发生越区切换引起的位置更新开销。

1.2节中提到, 全球一共被划分为360个位置区。在这些位置区的基础上, 本文参照地球人口密度对位置区进行着色并用符号进行标记。其中, 颜色越深的地方表示相应的位置区终端密度越大(符号数越大)。360个位置区的着色结果分布如图4所示。

图4中, 我们采用4种颜色, 每种颜色对应①、②、③、④中的一个数字符号。颜色由浅至深(数字符号由小到大)代表了地面终端密度由低到高。假设这4种颜色代表的终端密度为 ρ_1 、 ρ_2 、 ρ_3 、 ρ_4 , 并满足 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ 。图4中中间白色方格区域近似为中国, 按照现有方式可在中国境内布设地面站, 暂时不需要构建虚拟网关。终端密度 ρ_4 对应的区域近似为西亚、南欧和北非, ρ_3 对应的区域近似为南美、北美和北欧等地区, ρ_2 对应的区域为其他陆地地区, ρ_1 对应的区域为海洋。

对于终端密度高的地区, 如果覆盖区的虚拟网关中的卫星数量较多, 虚拟网关覆盖的面积将增多。这是因为卫星在单位时间内需要接收更多终端的位置更新。一次位置更新将对应一次虚拟网关内部的信息广播过程。对于较大规模的虚拟网关



▲图3 按照地面用户密度对地球重新分区结果图

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
2	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
3	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	④	⑤	⑥
4	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	②	②	②
5	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	④	④	④	④	④						②	②	②
6	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	②	②	②	②	②	②	②	④	④	④	④	④						②	②	②
7	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	②	②	②	②	②	②	②	④	④	④	④	④						②	②	②
8	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	④	④	④	④	④						②	②	②
9	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②
10	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②
11	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
12	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	②

▲图4 按照地面用户密度对地球重新分区结果图

而言,这种开销是巨大的。此时应该选择较小规模的虚拟网关。同理,对于终端密度低的地区,可以在网关承载能力之内选择更大的虚拟网关。此时虚拟网关所覆盖的范围更大。当将此范围作为当前终端所在位置区时,地面位置区相较于起初以经纬度划分的位置区而言有所增大。这降低了该地区用户发生越区切换的概率。虽然这些地区用户密度较小,但是每一次越区切换所对应的全局广播开销十分庞大。因此,减少越区切换发生的次数对于系统整体优化有重要作用。

本文中我们将虚拟网关的最小单元设置为由4颗卫星连接而成的卫星群。终端密度高的地区将采用这样的虚拟网关单元。对于用户密度较低的区域,每颗卫星均向外部延伸1颗卫星,可以分别形成由8颗卫星和16颗卫星连接而成的卫星群。更进一步地,在16颗卫星组成的卫星群外部选择8颗卫星各自向外延伸1颗卫星,可以形成24颗卫星组成的卫星群。因此,对于目前划分的4种地面终端密度 $\rho_4, \rho_3, \rho_2, \rho_1$,虚拟网关可以依次扩充为每组4、8、16、24颗卫星。不同终端密度地面区将采用不同规模的虚拟网关,即地面终端密度为

$\rho_4, \rho_3, \rho_2, \rho_1$ 的位置区分别采用规模为4、8、16、24颗卫星的虚拟网关加以管理。需要说明的是,某一密度的地面区可能需要采取多组虚拟网关才能实现这一地面区的全部覆盖。

2.3 非均匀虚拟网关 DV-DMM 系统位置更新开销分析

本节提出了根据地面终端密度自适应调整覆盖区虚拟网关大小的思路。终端密度较大的地区,由于虚拟网关承载能力有限,可选择较小的虚拟网关,反之选择较大的虚拟网关。下面我们对这种算法中位置管理产生的开销加以分析。

当终端所在位置区网关为地面网关时,具体分析过程可参考2.1节。这里我们仅分析终端所在位置区网关为虚拟网关的情况。

由低轨卫星运动而造成的终端切换接入卫星的次数 $N_{acc,i}$ 表达式为:

$$N_{acc,i} = \int_t^{t+dt} 2R \cdot V_{sat} \cdot \rho_i dt, \quad (6)$$

其中, R 表示卫星圆形覆盖区的半径, V_{sat} 表示卫星移动速度, $\rho_i, i=1,2,3,4$ 表示地面用户密度。

$$P'_{vir} = \frac{N'_{vir}}{N'_{LA}} = \frac{N'_{vir}}{N'_{vir} + N_{gro}}, \quad (7)$$

其中, N_{gro} 为原地面网关的数目。随着虚拟网关数目的减少,虚拟网关出现的概率将会降低。具体而言,如果全球所有不能布设地面站的地理区域都采取均匀布设虚拟网关的方式,则考虑到虚拟网关的承载能力有限,全球的虚拟网关规模均为最小单元(即4颗卫星)。当全球地区均按照用户终端密度自适应地改变虚拟网关的大小时,终端密度高的地方依旧维持由4颗卫星组成的最小虚拟网关单元,终端密度低的地方会扩大虚拟网关的规模,同时会相应地减少虚拟网关的数目。在整体星座中卫星数量一定的情况下,这种方式可以降低虚拟网关出现的概率 P'_{vir} 。

因此,由卫星运动而导致的终端切换接入卫星的开销 C_{sat} 可由式(8)表示:

$$C_{sat} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot N_{acc,i} \cdot B \cdot P'_{vir} \cdot (\overline{H}_{vir} + 1) + N_{acc} \cdot B \cdot (1 - P'_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_i) + 1], \quad (8)$$

其中,等号右边的第1项和第2项分别表示终端处于虚拟网关下和中国境内的开销, $\overline{H}_{vir}$ 为所有虚拟网关内部广播跳数的加权平均值。当MN切换位置区时,除了式(8)中的局部开销之外,还需要向其他网关进行信息

同步。此时开销 C_{la} 可由式(9)计算:

$$C_{la} = P_{la} \cdot \left[\sum_{i=1}^4 P_i \cdot P'_{vir} \cdot N_{acc,i} + (1 - P'_{vir}) \cdot N_{acc} \right] \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N'_{LA}} H(LA_k, LA_j)' + \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n} \right], \quad (9)$$

其中, P_i 为中国境外终端在密度为 ρ_i 位置区的概率。当 $N_{acc,i}$ 与 N_{acc} 相等时, 式(9)与式(4)本质上是一样的。

根据地面终端密度确定虚拟网关大小将会引起卫星星座中虚拟网关占比 P'_{vir} 发生变化。式(8)和式(9)中系统总网关数目 N'_{LA} 和虚拟网关数目 N'_{vir} 均会减小, $H(LA_k, LA_j)'$ 因为全局网关数目的减少也会减小, 但每个虚拟网关内部的局部更新开销 $H'_{vir,n}$ 会相应增大。

综上所述, 系统总体开销为:

$$C_{total} = C_{sat} + C_{la} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot B \cdot \{ [N_{acc,i} \cdot P'_{vir} \cdot (\overline{H}_{vir} + 1)] + N_{acc} \cdot B \cdot (1 - P'_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_j) + 1] + P_{la} \cdot \left[\sum_{i=1}^4 P_i \cdot P'_{vir} \cdot N_{acc,i} + (1 - P'_{vir}) \cdot N_{acc} \right] \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N'_{LA}} H(LA_k, LA_j)' + \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n} \right] \}. \quad (10)$$

2.4 虚拟网关开销

由于地球的自转和低轨卫星的高速移动性, 覆盖同一位置区的卫星是不断变化的。虚拟网关本身可以被视为与地面位置区一一映射关系。虚拟网关的规模和位置仅与地面终端分布密度有关, 同时虚拟网关内部存在卫星的接入与接出。

按照现有方式, 在虚拟网关中, 当有新的卫星进入时, 旧的卫星将从当前网关中被移除。对于旧卫星的移出, 系统需要在向虚拟网关内部其他卫星广播移出信息。新接入的卫星需要向当前虚拟网关内的全部卫

星广播自身进入虚拟网关的消息, 以便于新的用户位置更新信息不用传递给已经移出网关的卫星, 就可以正常传递给有新接入的卫星。因此, 这样的一次移入移出对应的全球系统开销可以表示为:

$$C_{vir} = 2 \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n}. \quad (11)$$

3 系统仿真分析

3.1 仿真基本参数设置

本文中的仿真工具为 MATLAB2021a 推出的卫星通信工具箱。我们采用极轨星座(每轨 24 颗卫星, 共 30 条轨道)。基本仿真参数如表 1 所示。

每个单元格为经度 12° 、纬度 15° 的方格区域。卫星轨道分为 30 轨, 右旋升交点赤经以 6° 为间隔在 $0 \sim 180^\circ$ 内均匀取值, 真近点角以 15° 为间隔在 $0 \sim 360^\circ$ 内均匀取值。为了体现相位差异, 轨道编号为奇数的真近点角从 $[7.5, 22.5, 37.5, \dots, 352.5]$ 中取值, 轨道编号为偶数的卫星真近点角从 $[0, 15, 30, \dots, 345]$ 中取值。星座仿真如图 5 所示。

图 5 中外部红色点为 720 颗卫星, 地球表面圆圈为每颗卫星覆盖面。每颗卫星可以与同轨道相邻两颗卫星以及相邻轨道上的两颗卫星

建立星间链路。紫色线表示异轨之间的星间链路建立情况, 分布不均匀的蓝色点表示地球表面添加的移动终端。

利用仿真工具并结合图 4 中地面终端密度所获得的地面终端分布如图 6 所示。

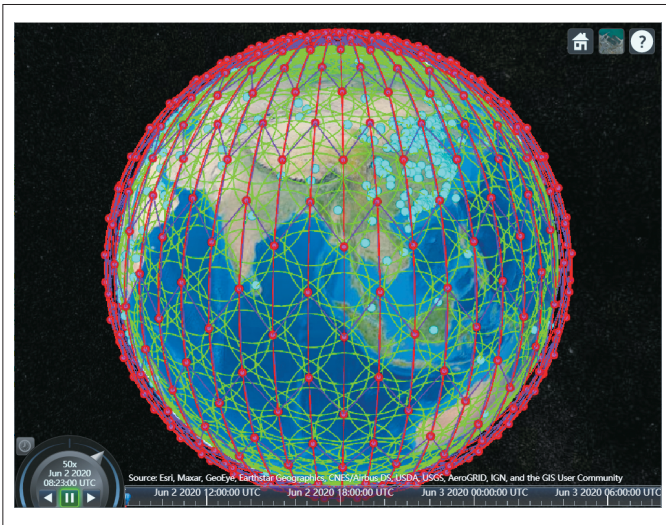
3.2 开销公式所需参数求解

本仿真规定, 所有地面终端接入卫星的规则为按时序排队。地面终端将与第 1 个接入的卫星保持连接, 直至卫星离开地面终端位置区, 此时再接入下一颗卫星。通过统计不同经纬度地区地面终端在 24 h 内接入卫星的次数, 可以计算出图 4 中不同密度地区的用户接入次数平均值 $N_{acc,i}$ 。根据图 4, 我们可以将全局 680 颗低轨卫星分成规模分别为 4、8、16、24 的 4 种虚拟网关。其余 40 颗卫星处于中国国境上方, 不需要构成虚拟网关。虚拟网关规模、数目、 $N_{acc,i}$ 等参数值如表 2 所示。其中, 虚拟网关内部广播跳数 $H'_{vir,n}$ 可根据虚拟网关规模以及卫星之间的连接情况建立邻接矩阵。利用 Dijkstra^[9] 算法可计算出从虚拟网关边界上任意一点到整个虚拟网关进行广播所需的平均跳数。

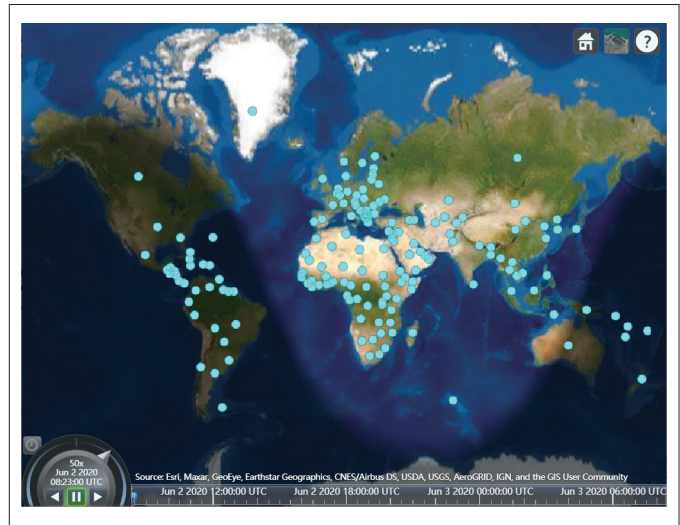
非均匀分布时, 虚拟网关总数目为 51 个, 共包含 680 颗卫星; 均匀分

▼表1 星座仿真基本参数表

基本参数	具体参数值
卫星数目	720
轨道高度/km	343.164
覆盖直径/km	2 400
偏心率	0
轨道倾角/ $^\circ$	90
右旋升交点赤经/ $^\circ$	$[0, 6, 12, 18, \dots, 168, 174]$
真近点角/ $^\circ$	$[0, 15, 30, \dots, 345]$ 或 $[7.5, 22.5, 37.5, \dots, 352.5]$
仿真时间/h	24
地面终端密度(每单元格)	$\rho_1 = 0.0583, \rho_2 = 0.2653, \rho_3 = 0.5333, \rho_4 = 2.7500$
发送数据包大小/V bit	40
终端发生越区切换概率	0.2



▲图5 卫星星座仿真图



▲图6 地面终端分布

布时,680颗卫星以4颗卫星为一组来划分虚拟网关,此时虚拟网关总数为170个。假设中国境内的地面网关数目为10个,则非均匀分布时虚拟网关出现概率为 $P'_{\text{vir}} = 0.83$,均匀分布时虚拟网关出现概率 $P_{\text{vir}} = 0.94$ 。均匀分布时, N_{acc} 取表2中 $N_{\text{acc},i}$ 的加权平均值。

$$N_{\text{acc}} = \left(\sum_{i=1}^4 V_i \cdot N_i \cdot N_{\text{acc},i} \right) / 680 = 338.15 \quad (12)$$

根据图4可建立非均匀规模的虚拟网关(虚拟网关总数为51)和均匀规模的虚拟网关(虚拟网关总数为170)之间的邻接矩阵。此时,非均匀规模时网关到网关之间的平均跳数为 $\overline{H(LA_k, LA_j)} = 199.6$,均匀规模时的平均跳数为 $\overline{H(LA_k, LA_j)} = 974.8$ 。可以看出,非均匀规模虚拟网关的全局更新跳数远小于均匀规模虚拟网关的跳数。由表2可知,虚拟网关非

均匀时规模较大的虚拟网关内部更新跳数也将增大。

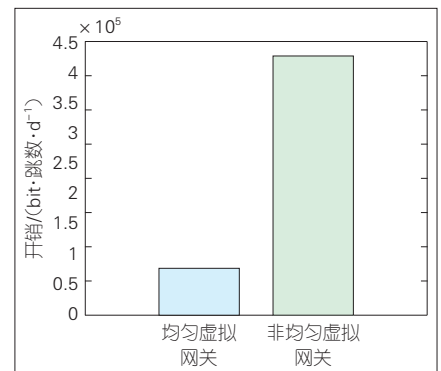
3.3 位置更新开销仿真

根据前述参数仿真两种情况下的位置更新开销,分别为虚拟网关为均匀分布时的位置更新开销和根据地面终端密度自适应调整虚拟网关规模方案的位置更新开销。

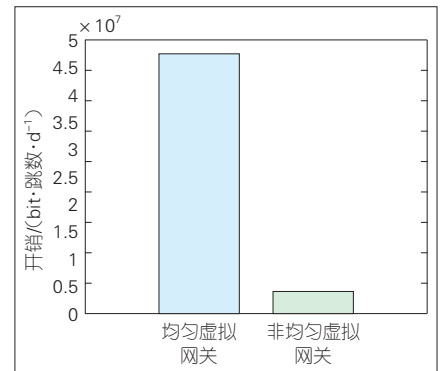
均匀虚拟网关系统和非均匀虚拟网关系统因卫星运动而发生的位置管理开销如图7所示。均匀虚拟网关系统和非均匀虚拟网关系统因地面终端发生越区切换而产生的位置更新开销如图8所示。

图7中,对于非均匀虚拟网关系统,由于引入了更大的虚拟网关,此时每次因卫星运动而产生的虚拟网关内部更新开销占主要部分。因此,非均匀虚拟网关系统在卫星移动时将产生更大的信令开销,性能表现不如均匀分布虚拟网关系统。图8中,

当非均匀虚拟网关系统引入更大的虚拟网关之后,系统中整体网关的数量变少。相比于均匀虚拟网关系统中的170个虚拟网关,非均匀虚拟网关中仅有51个虚拟网关。这大幅降低了全局更新的开销。因此,用户越区切换造成的位置更新开销更小。



▲图7 卫星移动造成的位置更新开销



▲图8 用户越区切换造成的位置更新开销

▼表2 全球虚拟网关参数

虚拟网关规模	虚拟网关数目	$N_{\text{acc},i}$	虚拟网关内部广播跳数 $H'_{\text{vir},n}$	虚拟网关对应出现概率 P_i
4	10	2 565.9	4	0.06
8	15	485.4	14	0.18
16	14	238.1	42.3	0.33
24	12	54.6	83	0.42

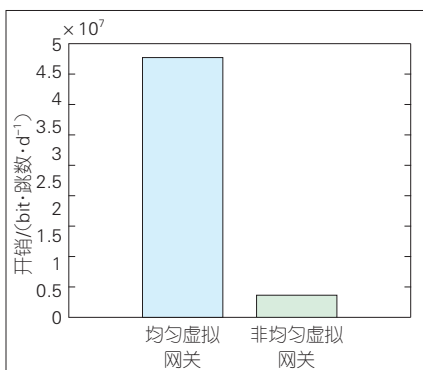
将两种位置更新开销相加可计算系统总开销,如图9所示。采取本文提出的依据地面用户密度自适应调整虚拟网关规模的方法将产生更小的位置更新开销。

4 结束语

本文对 DV-DMM 系统在移动性管理方面的位置管理开销进行了进一步探索,提出了一种根据地面终端密度自适应调整虚拟网关规模的算法,并比较了均匀分布虚拟网关系统与非均匀分布虚拟网关系统在用户因卫星运动和越区切换而发生位置更新的性能开销。仿真结果表明,非均匀分布虚拟网关系统位置管理中的位置更新信令开销要小于非均匀虚拟网关系统。

参考文献

- [1] 王学华, 朱立东. 低轨卫星通信系统地面核心网设计与仿真 [J]. 空间电子技术, 2010, 7(2): 119-123
- [2] 况鸿凤. 低轨大星座系统路由策略研究 [D]. 成



▲图9 均匀分布虚拟网关系统与非均匀分布虚拟网关系统开销对比

- 都: 电子科技大学, 2018
- [3] 冀志斌. 卫星网络移动性管理协议 S-MIPv [J]. 无线电工程, 2015, 45(10): 11-15
- [4] 贺达健, 游鹏, 雍少为. LEO 卫星通信网络的移动性管理 [J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(3): 1-14
- [5] Ji S, SHENG M, ZHOU D, et al. Flexible and distributed mobility management for integrated terrestrial-satellite networks: challenges, architectures, and approaches [J]. IEEE network, 2021, 35(4): 73-81. DOI: 10.1109/MNET.011.2100070
- [6] 张竹. IP/LEO 卫星网络中的移动性管理技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013
- [7] 朱洪涛. 低轨卫星网络分布式移动性管理方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
- [8] 丁煜. 低时延低轨卫星移动性管理技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020
- [9] JIANG J, HUANG H, LIAO J, et al. Extending Dijkstra's shortest path algorithm for soft-

ware defined networking [C]//16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium. Hsinchu, China: IEEE, 2014: 1-4. DOI: 10.1109/APNOMS.2014.6996609

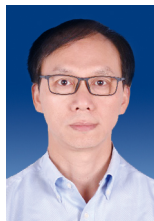
作者简介



吴琦, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究方向为卫星通信智能抗干扰。



郭孟泽, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究方向为卫星通信。



朱立东, 电子科技大学教授; 主要研究方向为卫星通信; 发表论文 200 余篇。

←上接第 22 页

- LEYC F E, 等. Telesat, One Web 及 Space X 三个全球宽带低轨卫星星座系统的技术对比 [J]. 卫星与网络, 2019, (7): 48-61
- [5] ITU. Radio Regulations [M]. Geneva: ITU, 2020
- [6] ITU. Reference FSS earth-station radiation patterns for use in interference assessment involving non-GSO satellites in frequency bands between 10.7 GHz and 30 GHz [R]. Geneva: ITU, 2001
- [7] ITU. Analytical method for estimating interference between non-geostationary mobile satellite feeder links and geostationary fixed satellite networks operating co-frequency and codirectionally: ITU-R S.1324 [S]. 1997
- [8] 周傲松. 涉及非静止通信卫星星座的干扰计算方法 [J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(3): 65-69. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-758X.2001.03.012
- [9] 周傲松, 陈道明. 非静止轨道卫星网络间下行数据传输同频干扰的分析方法 [J]. 通信学报, 2000, 21(3): 32-37. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-436X.2000.03.006
- [10] 李睿, 赵洪利, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络同频干扰的分析与仿真 [J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 280-285. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6124.2005.04.007
- [11] 李睿, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络中同频干扰问题的分析与仿真 [J]. 电讯技术, 2008, 48(8): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893X.2008.08.002

- [12] 新瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(9): 833-840. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.038
- [13] FORTES J M P, SAMPAIO-NETO R. An analytical method for assessing interference in an environment involving NGSO satellite networks[C]//SBT/IEEE International Telecommunications Symposium. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 1998: 5-9. DOI: 10.1109/ITS.1998.713082
- [14] 刘全, 葛新, 李健十, 等. 非静止轨道宽带通信星座频率轨道资源全球态势综述(上) [J]. 卫星与网络, 2020, (21): 66-69

作者简介



刘子威, 南京邮电大学讲师、硕士生导师; 主要研究领域为卫星通信、卫星物联网、多用户检测与信号处理技术; 先后主持国家自然科学基金项目 1 项、国家级面上项目 1 项、参与国家级项目 4 项; 发表论文章 10 余篇。



李嘉颖, 中国人民解放军军事科学院系统工程研究院工程师; 主要研究方向为卫星系统设计。



张更新, 南京邮电大学教授、博士生导师, 卫星通信研究所所长; 主要研究领域为卫星通信、卫星物联网、频谱感知等; 先后主持多项国家“863”计划、“973”计划、国家自然科学基金重点项目、国家科技重大专项等项目; 发表论文章数十篇, 获授权专利 10 余项。