

天地一体化信息网络中无状态地址自动配置 与重复地址检测机制研究

陈雅正, 李贺武

(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中具有高度动态性的低轨卫星导致地面用户设备在低轨卫星之间不断切换, 使得低轨卫星接入用户所获取的IP地址不断改变, 难以稳定。对天地一体化信息网络中无状态地址自动配置进行研究, 针对低轨卫星星座中地面设备不断切换低轨卫星的场景, 提出一种IPv6无状态地址自动配置与重复地址检测机制, 通过引入地面位置信息和卫星轨道信息缩小重复地址检测的范围, 从而有效降低重复地址检测的信令开销。

关键词: 天地一体化信息网络; IPv6; 无状态地址配置; 重复地址检测

中图分类号: TP393.4

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021017

Research on Stateless Address Auto-Configuration and Duplicate Address Detection in Space-Integrated-Ground Information Network

CHEN Yazheng, LI Hewu

Institute for Network Sciences and Cyberspace, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: LEO (Low Earth Orbit) satellites with high mobility in space-integrated-ground information network cause ground user terminals change connected satellites continuously, so user terminals can't keep stable IPv6 addresses. SLAAC (Stateless Address Auto-Configuration) in space-integrated-ground information network to provide stable IPv6 addresses was investigated, and an effective SLAAC and DAD (Duplicate Address Detection) mechanism was proposed. Aiming at the scenario where the ground equipment in the LEO satellite constellation constantly switches the LEO satellites, an IPv6 stateless address automatic configuration and duplicate address detection mechanism was proposed. The scope of duplicate address detection was reduced by introducing ground position information and satellite orbit information, thereby effectively reduced signaling overhead for duplicate address detection.

Keywords: space-integrated-ground information network, IPv6, SLAAC, DAD

1 引言

随着空间网络的发展, 加快建设天地一体化信息网络, 通过天地网络配合实现全球覆盖是我国信息网络的发展重点^[1]。天地一体化信息网络是以地面网络为基础、以空间网络为延伸, 覆盖太空、空中、陆地、海洋等自然空间, 为天基、空基、路基、海基等各类用户的活动提供信息保障的基础设施^[2]。为了实现互联网、移动通信网和空间网络等的互联互通以及支持互联网业务, 星上路由器和卫星网络用户终端需要支持互联网相关协议。

低轨卫星星座可以实现全球范围内的低时延通信^[3],

并且随着航天技术的不断进步, 成本逐渐降低。近年来低轨卫星星座组网正逐渐成为学术界和工业界的研究热点^[4-5], 多个公司先后提出各自的低轨卫星星座方案, 通过空间网络向地面用户提供宽带接入服务, 如SpaceX Starlink、Amazon Kuiper、Telesat、虹云和鸿雁等。

低轨卫星相对于地面的高速移动导致卫星和地面用户终端间的星地连接关系频繁发生变化, 具有高度动态性^[6]。对低轨卫星组网以及地面IP路由技术的适应性进行分析, 证明地面IP路由技术在适应低轨卫星星座的过程中仍面临动态性带来的挑战。低轨卫星由于轨道高度

较低,一般在500 km以上,2 000 km以下。根据开普勒定律,低轨卫星的运行周期在小时级别,且运行速度极快,地面用户与低轨卫星之间的可视时间很短,每颗卫星的最大可视时间在数分钟级别。在低轨卫星星座中,所有地面用户终端与低轨卫星之间的连接关系频繁切换,导致与低轨卫星的网络接口绑定的IPv6地址面临着不可避免的频繁更新。

互联网中IPv6的地址自动配置主要通过动态主机配置协议版本6(Dynamic Host Configuration Protocol version 6, DHCPv6)和无状态地址自动配置(Stateless Address Auto-Configuration, SLAAC)完成。DHCPv6的地址分配时间一般在小时级别,且可以通过用户设备的续约延长可用时间。但在低轨卫星星座中,地址更新时间将达到数分钟级别,严重降低IP地址的可用时间并带来频繁的地址更新开销。由于有状态的地址配置难以避免低轨卫星带来的星地连接关系频繁切换导致的地址更新,本文主要针对天地一体化信息网络中无状态地址配置面临的问题进行研究。

无状态地址配置在低轨卫星星座中面临着与地面截然不同的情景。由于低轨卫星的高速移动,地面用户设备面临着星地连接关系的频繁切换,将接收不同卫星上路由器发送的路由器宣告(Router Advertisement, RA)报文,用户设备地址将不断发生改变。有相关研究^[7-9]基于地理位置地址进行IP地址分配以保持地址不变,但将导致多颗卫星会同时对多个地面区域的地址分配进行管理,使得重复地址检测需在不同卫星路由器之间进行^[10]。在地理位置信息之外引入轨道信息,用于解决低轨卫星对用户进行移动性管理时面对多个地理区域的最后一跳不确定性导致的大量开销问题,并未针对地址配置过程中的开销进行分析并给出具体设计。随着低轨卫星星座的发展,当大量用户通过低轨卫星星座接入互联网时,为了维护用户设备IPv6地址的稳定性,在所有卫星间进行重复地址检测将大大浪费星间和星地链路带宽资源,限制卫星星座能支持的用户容量,并对性能有限的低轨卫星造成严重的负担,降低低轨卫星的使用寿命。

针对以上问题,本文提出一种天地一体化信息网络中的无状态地址自动配置及其重复地址检测机制,主要贡献有两点:提出一种高效且稳定的基于低轨卫星对地面主机进行IPv6无状态地址自动配置的机制;引入地面位置信息和卫星轨道信息以缩小重复地址检测的范围,有效降低重复地址检测的等待时间和信令开销。

2 研究背景

2.1 IPv6及其地址配置

全球IPv6具有庞大的128位地址空间,有效解决了

IPv4面临的地址空间短缺问题。网络节点在使用IPv6接入互联网时,需要首先配置唯一的IPv6全球单播地址。大规模网络节点的IPv6地址配置主要通过自动配置方式实现,IPv6地址自动配置方式一般分为有状态地址自动配置和无状态地址自动配置。

DHCPv6属于IPv6的有状态地址配置。DHCPv6服务器负责管理子网内网络节点的IPv6地址分配和回收,保证不同节点分配的地址彼此不同。由于低轨卫星相对地面用户的高度动态性,星上DHCPv6服务器将面临大量地面用户终端的频繁接入和断开事件,导致用户终端的IPv6地址频繁切换,不能保持用户网络设备的IPv6地址不变,因此不能维持长时间稳定的端到端连接。

在IPv6无状态地址自动配置中,路由器通过周期性的RA提供可用网络地址段的地址前缀信息,由网络节点各自负责生成地址后缀并结合前缀信息来产生可用地址段内的IPv6地址,再各自进行重复地址检测来保证地址的唯一性。网络设备生成地址后缀的常用方式有EUI-64、保护隐私的随机生成方法等。生成的IPv6地址在使用前必须进行重复地址检测,确保不存在地址冲突。

2.2 SLAAC的重复地址检测

IPv6无状态地址配置依靠网络设备生成IPv6地址,由于不保证地址的唯一性,因此需要网络设备负责对自己生成的地址进行重复地址检测。重复地址检测是通过发送组播的邻居请求报文(Neighbor Solicitation, NS)来实现的。组播是一种一对多的通信方式,允许将一台主机发送的数据通过路由器和交换机复制到多个加入此组播组的主机。

网络主机生成的IPv6地址在未完成重复地址检测时不可用于网络接口的地址配置。网络设备对该地址进行重复地址检测,首先将该地址设为tentative状态,且该设备首先需要加入所有节点组播地址和待检测地址的请求节点组播地址,以保证可以收到其他已经使用该地址或是同时在对该地址进行重复地址检测的节点发出的邻居宣告(Neighbor Advertisement, NA)。

网络主机随后发送DupAddrDetectTransmits个NS报文,每个NS之间发送间隔RetransTimer(单位为ms)。在Linux操作系统中,这两个参数可以根据需要进行调整,缺省值分别为1个和1 000 ms。NS报文中的目标地址为待检测地址,其IPv6目的地址为目标地址的请求节点组播地址(Solicited-Node Multicast Address),IPv6源地址为未指定地址(::/128)。路由器接收到NS报文后将转发给组播地址对应组内的其他主机。

网络主机接收到NS报文后会检查自己的地址是否为

报文中的待检测地址,如果相同则会发送NA报文,其中目标地址为自己所用的IPv6地址,目的地址为目标地址的请求节点组播地址。此外,如果网络主机在进行重复地址检测的过程中即IPv6地址处于tentative状态时收到其他主机发来的该地址的NS检测报文,说明两者同时生成了相同地址,此时两者都不能使用该地址。

用户设备在收到NA报文后如果其中的目标地址是自己的tentative状态的地址,则说明存在重复地址,该地址将不能使用。如果等待特定时间后没有收到NA消息表示地址存在冲突,则说明不存在重复地址,可将该地址设为可用状态。

无状态地址配置与重复地址检测信令交互如图1所示。

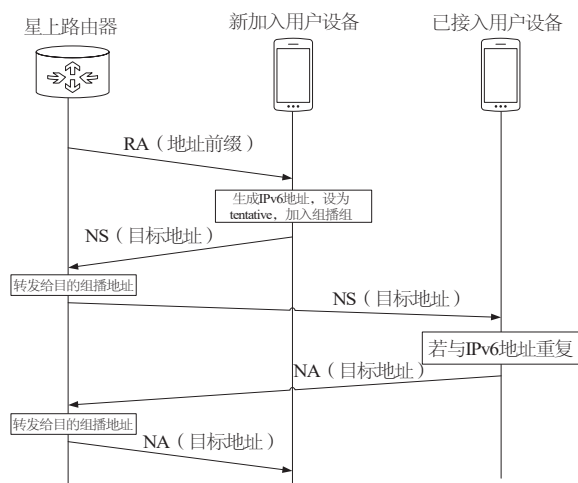


图1 无状态地址配置与重复地址检测信令交互

2.3 重复地址检测相关研究

重复地址检测面临的问题主要有较长的检测时间和不可忽视的检测开销。传统的重复地址检测 (Duplicate Address Detection, DAD) 由于偏保守的检测策略,导致网络主机在完成检测前不能使用生成的IPv6地址,需要等待较长的时间,因此参考文献[11]中提出了乐观的重复地址检测 (Optimistic Duplicate Address Detection, ODAD), 引入一个额外的Optimistic状态,允许主机在完成对候选地址的检测前暂时使用该地址。ODAD能降低重复地址检测的时间开销,但没有降低重复地址检测的开销。

在移动自组织网络 (Mobile Ad-Hoc Network, MANET) 这种动态的无线网络中,由于节点的移动和变化的网络拓扑导致的地址重配置和网络结构的变化会带来大量重复地址检测请求。低轨卫星星座网络同样具有高度动态的节点和网络拓扑,可以借鉴MANET中相关工

作的部分思想。为了提升重复地址检测的效率,参考文献[12]针对MANET提出了被动的重复地址检测方法,通过检测其他报文的序号、局部性质和邻居域等信息来检测重复地址,而非主动发送检测报文,降低重复地址检测开销的同时牺牲准确性。参考文献[13]提出了一种轻量级的被动重复地址检测机制,把待检测值分为更短的局部键值附带在控制消息里,检测时通过比较局部键值进行检测,这种方法降低了传输开销但也引入了检测结果的不确定性。为了解决节点的移动问题,参考文献[14]则使用四叉树这一数据结构,通过对网络节点所属的整个地理区域,按照四叉树结构进行网格划分,构造层次化的拓扑结构,并用四叉树中递归定义的网格编号替代位置信息来表示地理区域,减少信息表示所占空间,并通过在每个地理区域内进行重复地址检测来缩小检测范围。这种方法以一定的编码方式来降低地址信息占用的位数,可以基于地理区域信息降低重复地址检测的范围,但并未利用低轨卫星规律性和周期性的移动规律,且未考虑卫星节点的移动对地面用户地址的影响。

3 无状态地址配置及重复地址检测架构设计

3.1 网络场景

低轨卫星星座中的无状态地址分配网络场景如图2所示。

低轨卫星星座由多个轨道组成。地面用户终端在可见范围内各自选择合适的低轨卫星连接,并会由于卫星移出视线范围不得不切换连接到新的低轨卫星。在地面用户终端进行基于地理位置信息的无状态地址自动配置的过程中,服务同一区域内所有卫星下的用户设备使用同一网段的IPv6地址,因此需要跨不同卫星对各用户设备IPv6地址进行重复地址检测,带来了额外的检测时延和信令交互开销。

本文的基本思想是同时利用地理位置信息和卫星轨道编号信息进行用户终端设备的地址自动配置和重复地址检测,减少重复地址检测面临的不确定性,进而提高重复地址检测效率并降低信令开销。

3.2 低轨卫星网络的地面用户接入和地址生成

用户终端可通过内置的定位模块从定位系统 (如北斗、GPS等) 获得自身地理位置信息 (location)。卫星特征信息可用于区分每颗卫星的身份,如每颗卫星的编号信息,卫星所在轨道编号和路由协议中的路由器ID等信息。星上路由器下发的RA报文消息中可通过扩展项携带地址前缀与相关卫星特征信息。本文利用卫星移动规律选用轨道信息用于地址配置和重复地址检测机制中。

用户设备与低轨卫星路由器建立物理连接后,需要

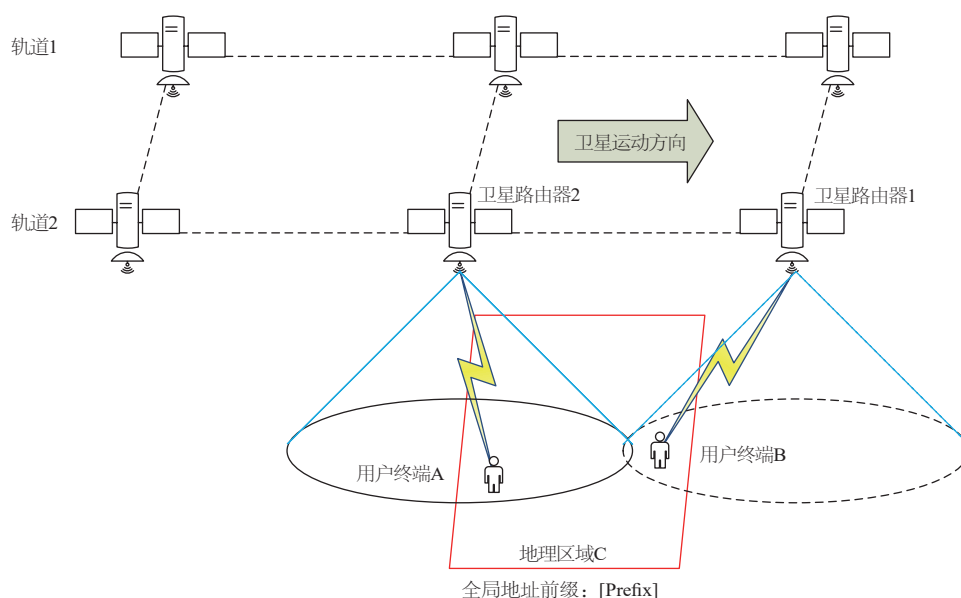


图2 低轨卫星星座中的无状态地址分配网络场景

首先通过邻居发现协议获得链路层地址。用户设备接入卫星路由器时分为两种情况，即已获得IPv6地址的用户设备与未获得IPv6地址的用户设备。

当用户设备首次接入低轨卫星且尚未通过星上路由器获得可用的IPv6地址时，用户设备通过当前接入卫星进行无状态地址配置获得表1格式的IPv6地址。由于用户设备生成的IPv6地址具有用户的地理位置属性与当前卫星轨道信息，因此重复地址检测只需在同一区域内，通过同一轨道的卫星分配地址的用户设备间进行。

若用户设备接入低轨卫星时已经获得IPv6地址，即该用户设备已经和分配地址的低轨卫星断开连接并切换到当前卫星，则需通过邻居发现协议向当前卫星路由器宣告自己的IPv6地址和链路地址，由卫星路由器按照位置信息location添加该设备地址到对应列表中。

本文针对天地一体化信息网络的低轨卫星星座提出一种新的IPv6地址生成方式和重复地址检测机制，如图3所示。用户设备可以通过自身携带的定位模块获得自身地理位置信息。用户设备可以根据预先设定或动态配置的地理区域划分及编码方式确定自身所在地理区域的编号，用于生成IPv6地址中的位置字段location。

低轨卫星的星上路由器提供无状态的地址配置服务，周期性地向地面用户终端发送扩展的RA报文。地面用户终端在没有收到扩展的RA报文时可以主动发送路由器请求（Router Solicitation, RS）报文，请求路由器立刻回复扩展的RA报文。扩展的RA报文中除提供地址前缀信息外，还

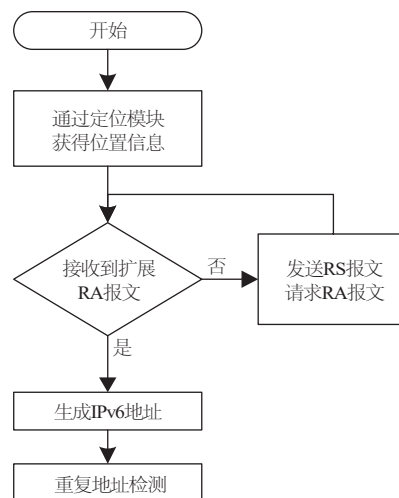


图3 基于地理位置信息和卫星轨道信息的IPv6地址生成方式和重复地址检测机制

提供额外的卫星所在轨道信息 orbit，用于让用户终端设备区分自己接入并获得IPv6地址的星上路由器所在轨道。

用户终端获得完整的网络地址前缀信息prefix、卫星轨道信息orbit后，结合自身的位置信息location以及接口地址 interface id，即可生成完整的128位IPv6全球单播地址。网络地址前缀prefix可采用64位，与地面互联网保持一致。位置信息location字段根据所需的地理区域的精度可以采用不同的位数。卫星轨道字段orbit可根据卫星星

座设计参数确定范围。接口地址interface id部分可以采用哈希算法将用户主机的MAC地址映射到剩余的位数。

3.3 无状态地址配置中优化的重复地址检测

IPv6无状态地址配置及重复地址检测信令交互如图4所示。

由于不同子网的网络地址段不同，地面网络中SLAAC可以仅在子网的链路上进行查重。在低轨卫星星座中，由于卫星与用户设备的连接关系不断切换，为了保持用户地址的唯一性，需要在高速移动的低轨卫星上进行重复地址检测。其检测范围对应地理区域上方变化的卫星集合，往往包含多个相邻轨道的卫星，且在大型低轨卫星星座中，同一地区上空同时存在南向和北向轨道，所需星间链路的跳数远远大于同向运行的两颗低轨卫星，将产生大量的信令开销，影响系统的可扩展性。本文在地理区域信息的基础上引入卫星轨道信息，对地址配置和重复地址检测机制进行优化，以降低问题规模，达到降低重复地址检测复杂度的目标。

用户主机在生成完整的IPv6全球单播地址后，开始重

复地址检测，首先将该地址设为tentative状态，随后设置倒计时等待是否收到重复地址消息。用户设备首先需加入所有地址和待检测地址的组播地址的组播组，以保证可以收到其他设备的检测回复报文。随后用户设备构造并发送组播的NS报文给卫星路由器进行重复地址检测，其中目标地址为待检测地址，IPv6源地址为未指定地址::/128，IPv6目的地址为待检测地址的请求节点组播地址。

对收到的NS报文低轨卫星的星上路由器将根据目标地址中的位置信息和卫星轨道信息进行处理，对同一轨道内服务同一地理区域的卫星及地理区域内的用户主机转发组播检测报文，可以避免其他轨道卫星的不必要检测，降低报文数量，减少星间和星地链路带宽浪费。

地面的其他用户主机在收到卫星的星上路由器转发的检测报文后，检查其中的目标地址是否与自己所生成

表1 基于地理位置的天地一体化信息网络IPv6地址

N bit/s	M bit/s	L bit/s	$128-N-M-L$ bit/s
global routing prefix	location	orbit ID	interface ID

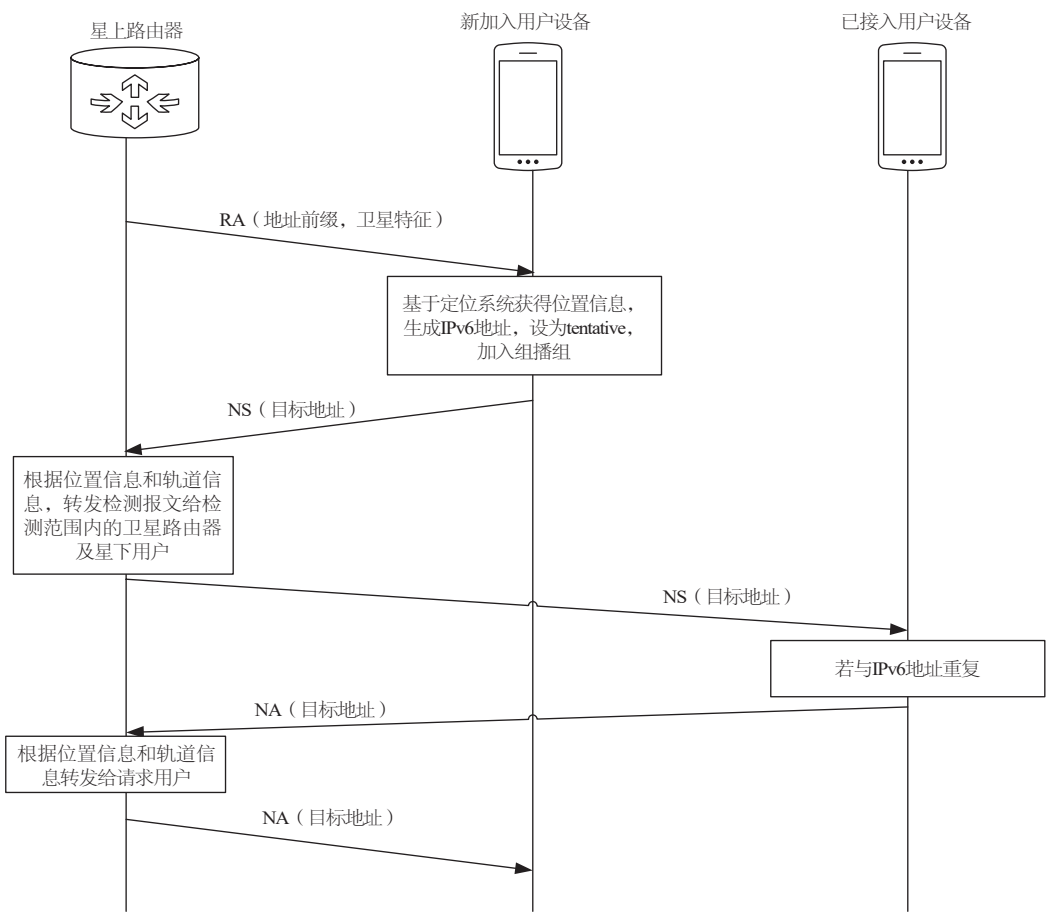


图4 IPv6无状态地址配置及重复地址检测信令交互

或使用的地址相同，如果相同则说明存在重复地址，需要返回NA报文告知原用户主机。如果该主机的地址处于检测未完成的状态（如tentative和optimistic状态），则不能使用该地址以避免潜在的地址冲突。

为了通过卫星轨道信息降低邻居请求NS报文的不必要转发，降低对带宽的不必要占用，卫星路由器采用以下过程处理接收到的NS报文。卫星路由器在收到用户设备发送的NS报文后检测其中的位置字段location是否属于自己的服务范围，如不属于则无须进行处理，如属于则转发给同轨道内其他未收到该报文的相邻卫星，直至卫星不服务于待检测地址所属地理区域。随后卫星路由器将该组播检测报文转发到该地区内的星下设备。通过给IPv6地址赋予更多的语义，增加IPv6地址的灵活性，从而达到降低重复地址检测的报文信令开销的目的。

4 性能验证

本文基于StarPerf低轨卫星仿真平台^[15]进行实验验证。StarPerf是一个基于STK和Python实现的低轨卫星星座仿真平台，可以基于低轨卫星星座的轨道参数生成一定时间周期内低轨卫星的位置，得到低轨卫星与地面节点间的距离和时延数据。实验所采用的低轨卫星星座方案为Starlink第一阶段，卫星分布在24个轨道平面上，每个轨道平面上有66颗卫星，共计1 584颗卫星。实验选取的地面区域是中心位于北京（北纬39.3°，东经116.3°）且边长为经度10°和纬度10°的区域，为了不失一般性，选取500 s作为实验持续时间。对地球表面的该区域按照经纬度坐标系进行均匀划分后，对每个坐标按照不同的用户密度生成一定数量的用户，并使各用户相互独立地随机接入该区域上方的一颗卫星。随后，仿真实验模拟所有用户随时间变化在区域上方可见卫星中的切换过程以及随机加入的用户的地址配置和重复地址检测过程，并统计该过程中进行地址更新和重复地址检测的信令开销。

为了降低不同方向轨道间用户进行重复地址检测的信令开销，本文方案在包含轨道信息地址格式的基础上，引入了地面设备的轨道切换管理策略。首次接入卫星时，用户设备可随机选择距离最近、信号最优的卫星接入。随着低轨卫星逐渐移动，当服务范围无法覆盖用户设备时，用户设备需要在同向运动的可服务卫星中选择距离最近的后继卫星，避免切换到异向运动但距离更近的轨道导致地址频繁切换。

在卫星星座仿真中，通过低轨卫星的轨道高度、地面天线仰角和覆盖范围半径可以得到地面终端距离可用低轨卫星的最远距离，进而筛选出同时服务于当前区域

的低轨卫星集合。本文通过StarPerf在Starlink第一阶段的星座中为低轨卫星与相邻的4颗卫星建立了星间链路，并在每个时间段内更新其链路时延，可以得到重复地址检测过程中在待检测卫星集合内的报文传输所需时延。

本文以传统的SLAAC应用于低轨卫星星座为基准，并与基于地理位置信息的SLAAC（记为LocSLAAC）和同时基于地理位置和卫星轨道信息的SLAAC（记为LocOrbSLAAC）中的重复地址检测信令开销进行了仿真实验验证。图5显示了不同方案在同一地理区域内不同用户规模下，所有用户在低轨卫星星座中进行地址配置及重复地址检测所产生的信令开销。本文考虑的重复地址检测的信令开销是指，在所有卫星用户设备生成地址后发起重复地址检测的过程中，所有用户设备及所有星上路由器发出的报文数量总和。SLAAC方式下地址的平均可用时间的平均值约为124 s，中位数仅为47 s，远远小于地面IP地址自动配置中小时级别的有效时间。在一定用户规模下，SLAAC方案将随着时间推移不断面临大量地址更新和重复地址检测请求，导致在本文有限的仿真时间内开销低于LocSLAAC。基于地理位置信息的IP地址无状态自动配置，当用户设备没有改变所在的地理区域时无须切换地址，但进行重复地址检测需要在服务当前地理区域的卫星集合中进行，导致大量的重复地址检测信令开销。在LocOrbSLAAC引入轨道信息对检测范围进行限制后，可以有效减少重复地址检测涉及的卫星数量，因而相比LocSLAAC可以显著降低重复地址检测的信令开销。

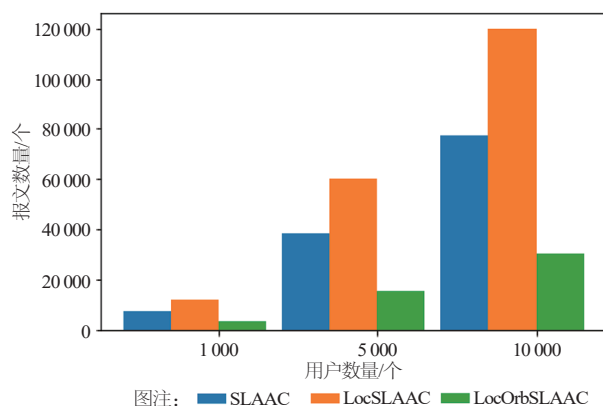


图5 低轨卫星星座内所有用户重复地址检测的信令开销

理论分析和仿真结果均证明，LocOrbSLAAC方案可以在高度动态的低轨卫星星座中将重复地址检测的信令开销显著降低，信令开销在地区内用户数量达到10 000个时可降低74%。

参考文献：

- [1] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 1-16.
WU W. Survey on the development of space-integrated-ground information network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 1-16.
- [2] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化信息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. Research progress and trends of space-integrated-ground information network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14): 95-106.
- [3] HANDLEY M. Delay is not an option: Low latency routing in space[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 85-91.
- [4] BHATTACHERJEE D, AQEEL W, BOZKURT I N, et al. Gearing up for the 21st century space race[C]//Proceedings of the 17th ACM Workshop on Hot Topics in Networks. New York: ACM Press, 2018: 113-119.
- [5] 刘立祥. 天地一体化信息网络[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
LIU L X. Space-integrated-ground information network[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [6] 何辞, 张亚生, 孙晨华, 等. 低轨星座组网及地面IP路由技术适应性分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 36-41.
HE C, ZHANG Y S, SUN C H, et al. Analysis on low-earth-orbit constellation networking and adaptability of ground IP routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 36-41.
- [7] ZHENG G, WANG N, TAFAZOLLI R, et al. Geosynchronous network grid addressing for integrated space-terrestrial networks[C]//2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols. Piscataway: IEEE Press, 2020: 6.
- [8] HENDERSON T R, KATZ R H. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks[C]//Globecom'00-IEEE. Global Telecommunications Conference. Conference Record (Cat. No.00CH37137). Piscataway: IEEE Press, 2000: 1119-1123.
- [9] EKICI E, AKYILDIZ I, BENDER M. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001(9): 137-147.
- [10] TSUNODA H, OHTA K, KATO N, et al. Geographical and orbital information based mobility management to overcome last-hop ambiguity over IP/LEO satellite networks[C]//2006 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2006.
- [11] MOORE N. Optimistic duplicate address detection (DAD) for IPv6: RFC 4429[S]. 2006.
- [12] WENIGER K. Passive duplicate address detection in mobile ad-hoc networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(3): 507-519.
- [13] OKADA H, AKIMA K, MASE K. An overhead reduction strategy for weak duplicate address detection in mobile ad-hoc networks[C]//2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010.
- [14] TSENG K, WANG T. Overhead reduction for duplicate address detection in VANET[C]//2013 International Conference on Parallel and Distributed Systems. Piscataway: IEEE Press, 2013.
- [15] LAI Z, LI H, LI J. STARPERF: Characterizing network performance for emerging mega-constellations[C]//2020 IEEE 28th International Conference on Network Protocols (ICNP). Piscataway: IEEE Press, 2020.

[作者简介]



陈雅正 (1997-), 男, 清华大学硕士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络、网络体系结构。



李贺武 (1974-), 男, 博士, 清华大学副研究员, 主要研究方向为无线移动网络、天地一体化信息网络。