

基于拓扑控制的卫星网络路由优化

齐小刚¹, 马久龙¹, 刘立芳²

(1. 西安电子科技大学数学与统计学院, 陕西 西安 710126; 2. 西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071)

摘 要: 综合考虑低轨道和静止轨道卫星网络各自的优势, 建立一种适合空间组网的双层卫星网络模型, 提出一种基于拓扑控制的路由算法 (TCRA)。此模型使用了虚拟节点策略和卫星分组的思想, 将每个低轨道卫星的覆盖区作为网络的虚拟节点。此网络考虑了极区对卫星足印区划分的影响, 使上层的管理卫星能够准确获得下层卫星的拓扑。通过利用这个改进的虚拟节点策略, 网络中产生的时间片在数量、长度和其他方面都明显优于其他网络模型。基于此网络拓扑, 静止轨道卫星为低轨道卫星计算路由, 低轨道卫星负责转发数据。仿真表明, 基于提出的网络拓扑的路由在平均端到端时延、分组丢失率方面明显小于其他算法。

关键词: 卫星网络; 拓扑; 路由; 时间片

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018020

Routing optimization based on topology control in satellite network

QI Xiaogang¹, MA Jiulong¹, LIU Lifang²

1. School of Mathematics and Statistics, Xidian University, Xi'an 710126, China

2. School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China

Abstract: A new double-layer satellite network model for space networking was established and a routing algorithm based on topology control (TCRA) was proposed considering the advantages of low earth orbit and stationary earth orbit satellite networks. This model used virtual node strategy and satellite grouping idea, which regarded the coverage area of each low earth orbit satellite as a virtual node. The network took into account the influence of the polar area on the division of the satellite footprints, such that the upper management satellites can accurately acquire the topology of the lower satellites. Using the improved virtual node strategy, the time slices were superior to other network models in quantity, length and other aspects. Based on the network topology, stationary earth orbit satellites calculate routing for low earth orbit satellites, while low earth orbit satellites were responsible for forwarding data. The simulation results show that the routing algorithm is superior to other algorithms in average end-to-end delay and packet loss rate.

Key words: satellite network, topology, routing, time slices

1 引言

空间信息网络是为了获取、传输和处理海量空

间信息与数据而构建的网络系统, 它在通信、导航、授时、定位、监测等方面承担着重要的角色^[1]。卫

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.61572435, No.61472305, No.61473222); 陕西省自然科学基金资助项目 (No.2015JZ002, No.2015JM6311); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LZ16F020001); 宁波市自然科学基金资助项目 (No.2016A610035); 空间测控通信创新探索基金资助项目 (No.KJCK1608)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.61572435, No.61472305, No.61473222), The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No.2015JZ002, No.2015JM6311), The Natural Science Foundation of Zhejiang Province (No.LZ16F020001), The Natural Science Foundation of Ningbo (No.2016A610035), AeroSpace T.T.&C. Innovation Program (No.KJCK1608)

星网络一般作为空间信息网络的骨干网, 它的网络性能在一定程度上影响着空间信息的整体性能。卫星网络近年来以它广泛的覆盖范围、广播能力和高带宽的服务水平吸引着越来越多人的注意, 它必将成为未来在任何时候、任何地点以较低代价实现全球信息传输和获取的桥梁, 也是下一代互联网不可或缺的重要组成部分^[2,3]。按照卫星距离地面的高度, 卫星轨道可以分为静止轨道 (GEO, geostationary earth orbit)、中轨道 (MEO, medium earth orbit) 和低轨道 (LEO, low earth orbit)。GEO 卫星位于地球赤道上空大约 36 000 km, 它与地球保持相对静止, 较大的距离使 GEO 卫星对地面覆盖范围较大, 一个 GEO 卫星大约可以覆盖整个地球表面的 40%, 只需要 3 颗 GEO 卫星就可以近似覆盖整个地球表面^[4]。但也正是 GEO 卫星距离地面较大的距离导致卫星与地面终端通信时会产生较大的传播时延。相反, LEO 卫星距离地面较近, 覆盖范围较小, 它一般位于地球表面上空 500~1 500 km, 轨道周期较小^[5]。因此, LEO 卫星网络中, 卫星节点运动较快, 网络拓扑频繁改变, 地面终端需要间隔性地和接入卫星进行星地链路切换。但是, LEO 与地面距离较短, 因此, 它与地面终端具有较短的传播时延。由此可见, 单独使用 LEO 卫星星座和 GEO 卫星星座进行空间组网都不能充分发挥其本身的优势。本文兼顾了 GEO 卫星星座和 LEO 卫星星座的优势, 建立了由 LEO 卫星星座和 GEO 卫星星座组成的双层卫星网络模型, 在这个模型中, 充分利用了 GEO 卫星覆盖范围大和 LEO 卫星适合实时传输信息的特点。

卫星节点的不断运动使传统的路由方案不能直接应用在卫星网络中, 路由设计成了卫星网络的一个难题, 解决卫星网络路由问题的切入点是如何处理由于节点运动导致的网络时变拓扑。

尽管卫星持续运动, 但这种运动是周期性的, 而且卫星网络中的节点和链路一般具有良好的对称性。为了设计性能优越的路由, 不少学者对卫星网络的拓扑和路由进行了分析和研究。文献[6]提出的虚拟节点策略可以很好地处理卫星节点的运动, 它的思想是将地球表面划分为若干个逻辑区域, 假定逻辑区域相对地球表面固定不动, 每个逻辑区域与一颗上空离它最近的卫星绑定, 每当一个卫星离开一个逻辑区域时, 就由下一个到来的卫星 (继承卫星) 继续接替其位置。对于结构规则简单的卫星

网络拓扑, 虚拟节点策略能够屏蔽卫星的移动性, 利用这种方法设计路由时, 只需考虑固连在地面上的逻辑区域, 而不需要考虑移动的卫星节点。文献[7]基于虚拟节点, 深入探讨了地面终端与卫星之间的切换问题, 提出了多状态虚拟网络模型和地面终端与卫星节点之间的链路切换的相关算法, 它使一个地面区域可以同时被多个卫星服务。文献[8]充分利用了极轨星座的网格拓扑特征和源节点与目的节点的相对位置来设计路由, 它减小了路由计算的复杂性, 但却没有考虑 LEO 卫星节点和链路的抗毁性。虚拟节点策略能够有效地处理卫星节点的移动性, 但是这些文献都是针对简单规则的 LEO 卫星星座, 而且现有的基于虚拟节点的路由都是以极轨道星座为模型, 很难被扩展到一般倾斜 LEO 卫星星座。此外, 多层卫星网络中上层卫星对下层卫星复杂覆盖关系导致虚拟节点策略无法完全在多层卫星网络中使用。

处理卫星网络时变拓扑问题的另外一个典型方法是虚拟拓扑策略。它的思想是将卫星网络的系统周期划分为若干个离散的虚拟时间片, 在每个较小的时间片内, 网络的拓扑被视为固定不变的, 于是可以根据这些离散的时间片来设计路由^[9,10]。文献[11]提出了一种基于动态检测的路由算法, 实质上, 它是典型的基于虚拟拓扑策略的路由算法, 是对时间虚拟化路由方案的改进。它通过对卫星发送队列内数据分组个数的周期性检测以及回复确认来判断链路是否可以正常通信, 同时, 它能够对链路的突发状况及时感知并做出相应的调整。文献[12]基于虚拟拓扑方法解决了多个卫星给地面站下载数据过程中时间接触窗口不能充分被利用的问题。虚拟拓扑策略的优点是可以利用卫星网络具有周期性将网络的时间片和离散拓扑预先计算出来, 然而虚拟拓扑策略中的大量时间片可能要求大量的存储空间, 在设计路由时, 需要考虑路由信息的存储问题。

此外, 卫星分组和组管理的思想在多层卫星网络路由设计中被广泛使用。文献[13]基于卫星分组的方法, 将虚拟节点的方法应用在多层网络的最下层, 下层能与上层管理卫星直接通信的 LEO 卫星形成一个分组, 它能够实现较小的端到端时延。但是网络产生了大量的离散时间片, 这些数量庞大的时间片对星上设备提出了较高的要求, 从而造成了巨大的存储开销。文献[14,15]通过合并时间片的方法在一定程度上

降低了时间片的数量。另外，文献[16]也是基于卫星分组来设计路由，它使用了由 LEO 卫星星座和 MEO 卫星星座组成的双层网络模型，使流量在 2 层网络上分布，解决了卫星网络流量 congestion 的问题。可惜的是，这些方法都存在的一个共同缺陷是 MEO 层卫星获得的 LEO 层拓扑信息可能不是准确的。卫星分组的思想是每当有一个新成员加入一个管理卫星的分组，或每当一个旧的卫星离开当前管理卫星的分组时，则认为网络产生了一个新的时间片，即网络拓扑的改变是以管理卫星的成员变化为标志的。然而，由于 LEO 层是近极轨道星座，在极区 LEO 层内相邻轨道间的星间链路临时的打开和关闭行为会导致网络拓扑的临时改变，因此，这些方法可能并不能获得 LEO 层的真实的拓扑。

为了解决卫星网络的拓扑时变性问题，本文通过改进虚拟节点策略，考虑了极区边界对卫星分组的影响，从而使上层卫星可以精确地获得下层卫星的拓扑，这将给多层网络路由设计带来方便。通过这种方法，网络拓扑得到了较大的改善，网络产生了较小数量的均匀的时间片，它能进一步提高网络路由的性能，仿真结果说明了其优越性。

2 网络模型和相关定义

2.1 实际网络模型

由 LEO 卫星星座和 GEO 卫星星座组成的双层

卫星网络模如图 1 所示。GEO 卫星星座是由 3 个 GEO 卫星等间隔分布在赤道上空形成的，轨道平面与赤道平面重合。LEO 卫星星座是稍加修改铱星系统所得到的，铱星系统是一个典型的 LEO 卫星星座，已经被广泛使用^[17]。本文中的 LEO 星座是由 72 个 LEO 卫星组成的，这些卫星均匀分布在 6 个极轨道平面上，每个轨道平面上均匀分布 12 个 LEO 卫星，星座的其他参数和铱星系统参数相同。网络中的节点和链路有以下几种，如图 2 所示。

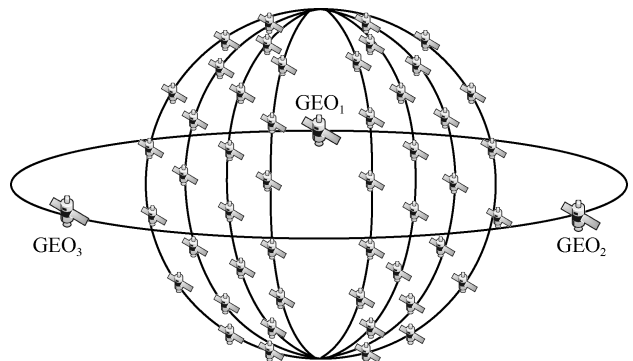


图 1 实际的双层卫星网络模型

节点有地面节点集 $TS = \{T | T \text{ 是地面节点}\}$ ，LEO 节点集 $LS = \{L | L \text{ 是 LEO 卫星}\}$ 以及 GEO 节点集 $GS = \{G | G \text{ 是 GEO 卫星}\}$ 。链路包含以下 4 种。1) 星际链路，它是指 LEO 卫星和 GEO 卫星之间的链路，记为 LGL 。一个 LEO 卫星可以和 GEO 卫星通

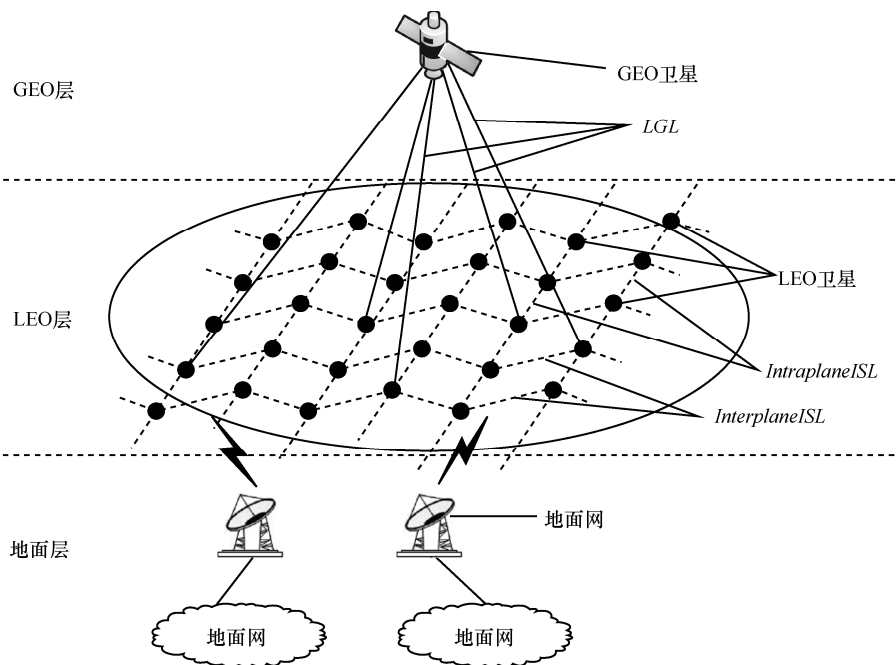


图 2 网络节点类型和链路类型

信当且仅当该 LEO 卫星在 GEO 卫星的覆盖区内。

2) 轨内星间链路, 它是指同一轨道平面内相邻 2 个卫星节点之间的链路, 记为 *IntraplaneISL*。由此可知, LEO 层的每个轨道具有和卫星等数量的 *IntraplaneISL*, 而 GEO 层只存在 3 条 *IntraplaneISL*。

3) 轨间星间链路, 它是指相邻轨道上相邻卫星之间的链路, 记为 *InterplaneISL*。值得注意的是, LEO 层的第一个轨道和最后一个轨道上的卫星运动方向相反, 这些卫星之间建立链路会有较高的代价, 因此, 本文假定这些卫星之间不存在 *InterplaneISL*。另外, 在高纬度地区也不存在 *InterplaneISL*, 这是因为卫星节点运动的相对角速度较大, 天线的指向跟踪不能满足需求。显然, GEO 层没有 *InterplaneISL*。

4) 星地链路, 它是地面终端与卫星之间的通信链路, 记为 *GSL*。一个地面终端可以和某一卫星通信, 当且仅当该地面终端在该卫星的最小仰角覆盖范围内。

2.2 相关定义

基于上述的双层卫星网络模型, 为了方便分析网络拓扑以及描述路由方案, 需要定义以下几个概念。在某一特定的时刻, 所有能与某个卫星直接通信的地面节点组成的集合称为该卫星在此时的覆盖单元。在某一特定时刻, LEO 层的所有卫星的覆盖单元组成的集合叫作 LEO 层的覆盖集合。当地理上的本初子午线和 LEO 层第一个轨道平面共面且该轨道上第一个卫星位于赤道正上空时, 称此时 LEO 层卫星的位置为标准位置。称 LEO 层在标准位置时的覆盖集合为标准覆盖集合, 相应的覆盖单元称为标准覆盖单元。显然, 在任意时刻, 任意一个 LEO 卫星下方都存在唯一一个标准覆盖单元, 但并不一定是它自己的标准覆盖单元。地球球心和某卫星所连直线与地球球面的交点称为卫星的星下点。显然, 一个 LEO 卫星的星下点属于它自身的覆盖单元。

如果 2 个卫星满足以下条件之一, 则称 2 个 LEO 卫星的覆盖单元之间存在星下链路。1) 这 2 个 LEO 卫星之间存在轨间星间链路且这 2 个 LEO 卫星的星下点所在的覆盖单元都没有跨越极区边界。2) 这 2 个 LEO 卫星之间存在轨内星间链路。

VLSN 指的是一个图 $G(t) = (V, E(t))$, 其中, V 是覆盖单元的集合, $E(t)$ 是 t 时刻星下链路的集合。称 LEO 层处于标准位置时的 VLSN 为标准 VLSN, 记为 NVLSN。

在本文使用的双层卫星网络模型中, LEO 层对

应的标准 VLSN 如图 3 所示, 图 3 相应的尺寸为角距离。其中, 极区边界纬度设为 80° , 其原因在第 3 节中详述。在图 3 中, 每一条竖线代表一个 LEO 卫星轨道, 卫星轨道上的每个小圆点代表一个 LEO 卫星节点。以卫星节点为圆心, 以角距离 30° 为半径的圆代表一个标准覆盖单元。在轨道 1、轨道 3 和轨道 5 上分别有 2 个卫星位于赤道正上方, 这 2 个卫星分别是相应轨道上的第一个卫星和第七个卫星, 在轨道 2、轨道 4 和轨道 6 上, 分别与轨道 1、轨道 3 和轨道 5 的第一个卫星直接相连的卫星, 是相应轨道上的第一个卫星。

在某一时刻, 如果一个 LEO 卫星在某个 GEO 卫星的满足最小仰角的足印区内, 则称这个 LEO 卫星下方的那个标准覆盖单元为该 GEO 卫星的一个组成员。显然, 一个 GEO 卫星有许多组成员。称 GEO 卫星的所有组成员组成的集合为 GEO 卫星的组成员集, 称该 GEO 卫星为其组成员或组成员集的组管理者。值得注意的是, 这里的组成员和组管理者的概念和一般文献中的概念有所不同。

2.3 虚拟网络模型

虚拟的 3 层卫星网络系统指的是由地面节点、LEO 层的标准覆盖集合和 GEO 层卫星以及它们之间的链路组成的网络系统, 记为 VTLGN。

VTLGN 被定义为一个图 $G = (V, E)$, 其中, $V = \{v | v \in (TS \cup GS) \text{ 或 } v \text{ 是标准覆盖单元}\}$, $E = \{e | e \text{ 是星下链路, 或 } LGL, \text{ 或 } GSL\}$ 。

本文建立的 VTLGN 模型在多方面表现出了其他单层和多层卫星网络不具有的优势。

3 VTLGN 的拓扑分析

下面, 基于此 3 层卫星网络模型 VTLGN 进行相关拓扑分析。

定理 1 设 $G = (V, E)$ 是 VTLGN 系统, $S_{\text{GEO}} \in GS \subseteq V$, $S \in V$, 且 S 是一个标准覆盖单元, 则 S_{GEO} 的组成员集在任何时刻都是唯一确定的, S 的组管理者是哪一个 GEO 卫星在任何时刻也是被唯一确定的。

证明 根据组成员的定义可知, 组成员的本质是标准覆盖单元, 注意到 GEO 卫星相对地面静止。由此可知, 任意一个 GEO 卫星 S_{GEO} 和它的任意一个组成员在任何时刻保持相对静止, 也即任意一个标准覆盖单元 S 和组管理卫星在任何时刻保持相对静止。因此, 一个特定的标准覆盖单元的组管理者是哪一个

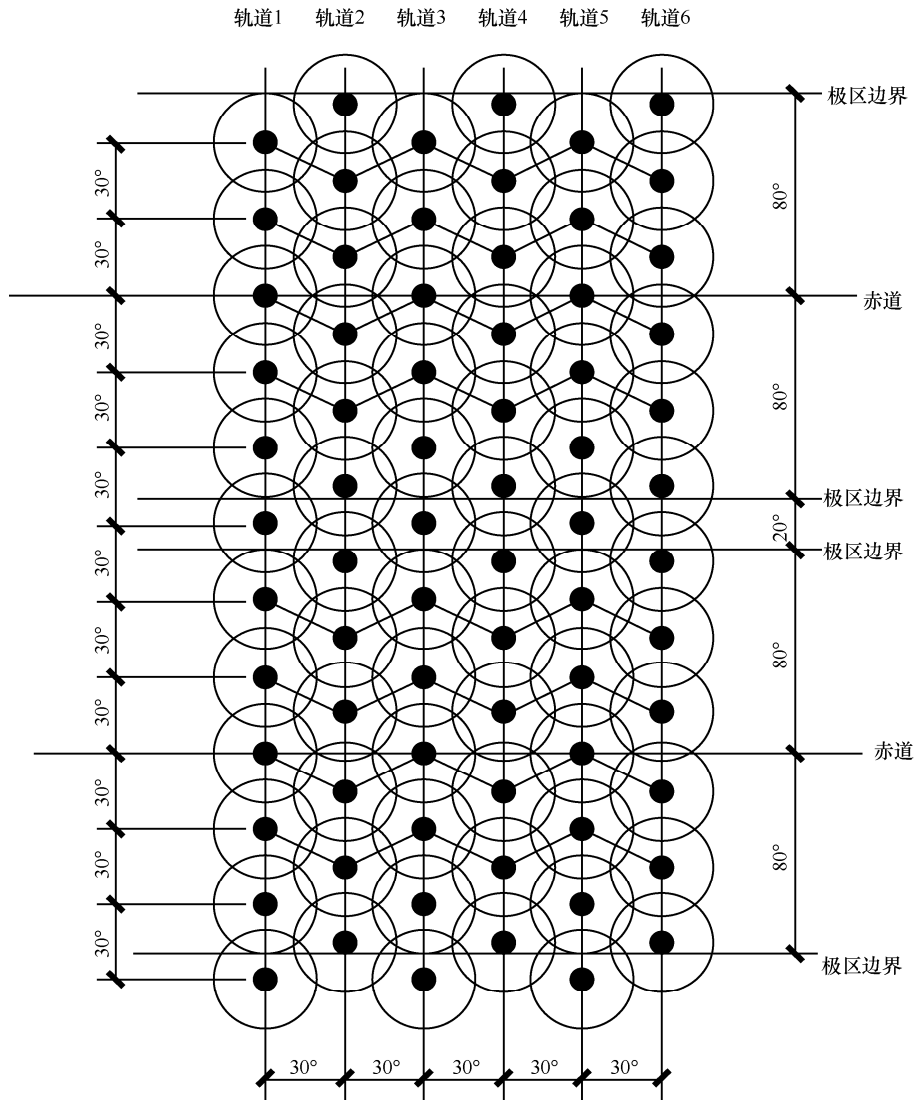


图 3 标准 VLSN 的说明

GEO 卫星在任何时刻是唯一确定的，一个特定的 GEO 卫星有哪些组成员在任何时刻也是唯一确定的。证毕。

定理 1 的意义在于揭示了如何利用 VTLGN 来屏蔽卫星网络实际物理卫星节点的移动性，如果将 VTLGN 中的标准覆盖单元视作虚拟节点策略中的虚拟节点，则卫星网络的移动性被完全屏蔽，设计路由时只需考虑固定在地面上的标准覆盖单元，而不需顾及实际运动的卫星节点。

如图 4 所示，设任意一个 LEO 卫星与任意一个 GEO 卫星之间的半中心角为 ϕ ，则当且仅当 $\phi \leq \phi_0$ ，

$$\phi_0 = \frac{\pi}{2} - \varepsilon_0 - \arcsin\left(\frac{R_E + h_{LEO} \cos \varepsilon_0}{R_E + h_{GEO}}\right)$$

时，该 LEO 卫星在该 GEO 卫星的足印区，其中， R_E 为地球半径，

h_{LEO} 为 LEO 卫星高度， h_{GEO} 为 GEO 卫星高度， ε_0 为 LEO 对 GEO 的最小仰角。

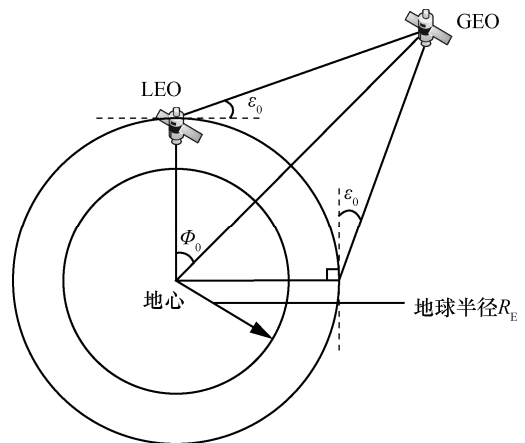


图 4 GEO 对 LEO 的覆盖计算示意

为使问题简单, 当 LEO 层卫星处于标准位置时, 使 GEO 卫星 G_1 、 G_2 和 G_3 分别位于地球赤道 0 经度线、东经 120° 和西经 120° 的位置, 取 LEO 卫星对 GEO 卫星的最小仰角为 $\varepsilon_0 = 10^\circ$, 则在标准位置时, G_1 的足印区内的 LEO 卫星有 $S_{1,1}$ 、 $S_{1,2}$ 、 $S_{1,3}$ 、 $S_{1,12}$ 、 $S_{1,11}$ 、 $S_{2,1}$ 、 $S_{2,2}$ 、 $S_{2,12}$ 、 $S_{2,11}$ 、 $S_{3,1}$ 、 $S_{5,7}$ 、 $S_{6,5}$ 、 $S_{6,6}$ 、 $S_{6,7}$ 、 $S_{6,8}$ 。其中, $S_{i,j}$ 表示第 i 个轨道平面上第 j 个卫星。类似地, 可以得到 G_2 和 G_3 在标准位置时足印区卫星情况。通过使用 STK 仿真分析, 能够得到与上面计算一致的结果, 仿真得到的标准位置覆盖如图 5 所示。

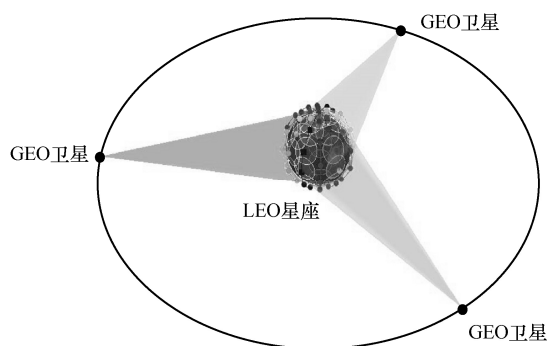


图 5 GEO 对 LEO 的覆盖

当没有失效的卫星节点时, 由定理 1 可知 VTLGN 被模型化为静态网络, 即卫星节点的移动性被屏蔽, 因此, 网络在设计路由时不存在时间片的概念。然而, 卫星网络工作在极其复杂的空间环境中, 甚至可能遭受其他攻击。因此, 当卫星节点失效时, 卫星网络应该具有能够维持一定性能的能力。下面分析网络存在失效的卫星节点的情形下的拓扑。

定理 2 在 VTLGN 中, 当有失效的 LEO 卫星节点时, 能够精确反映网络拓扑的时间片最大数量与 LEO 层每个轨道平面上卫星的数量相等且时间片的长度均匀的。

证明 由于每个 GEO 卫星与其组成员相对静止, 即不存在链路切换, 故只需考虑 LEO 层拓扑。记一个 LEO 卫星从当前位置移动下一个相邻卫星的位置所需时间为 Δt , 由卫星运动的同步性, 有 $\Delta t = \frac{T}{m}$, 其中, T 为 LEO 卫星的轨道周期, m 为一个轨道上卫星的数量。最糟糕的情况是每当一个失效的卫星节点移动至下一个位置时, 相当于下一个位置对应的标准覆盖单元失效, 现在将整个 LEO 卫

星层的系统周期 T 离散划分为 $[0, \Delta t)$, $[\Delta t, 2\Delta t)$, \dots , $[(m-1)\Delta t, m\Delta t)$ 这 m 个长度相等的时间片, 即使在有 LEO 卫星节点失效的情形下, 在每个时间片内, 网络的拓扑依然可被视为静态拓扑, 即这 m 个长度相等的离散时间片即能反映整个 LEO 层的网络拓扑。

证毕。

综上所述, 普通的卫星分组策略并不能精确描述 LEO 层内的拓扑, 如图 6 所示, 在某一时刻 LEO 卫星 S_{11} 和 LEO 卫星 S_{21} 之间存在轨间星间链路, 随着卫星运动, 在一个微小时间间隔 t_1 后, 卫星 S_{21} 运动至极区内, 此时, 卫星 S_{11} 和卫星 S_{21} 之间的轨间星间链路不再存在。但是如果在这个微小的时间间隔 t_1 内, 卫星 S_{11} 和卫星 S_{21} 始终处于同一个管理卫星的分组内, 则此时管理卫星并不能获得卫星 S_{11} 和卫星 S_{21} 之间链路的变化情况。卫星移出极区的情况与之类似。

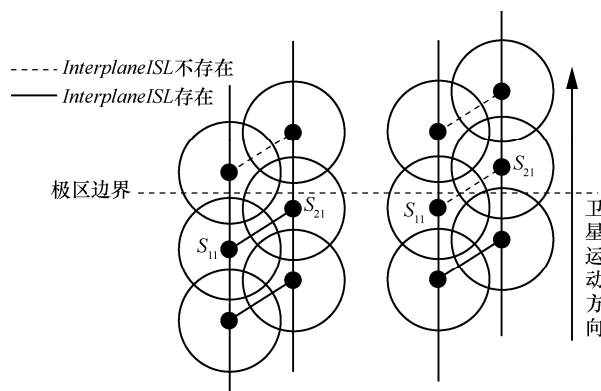


图 6 极区对 LEO 层拓扑的影响

本文所提 VTLGN 可以完美解决上述问题, 由于 LEO 层卫星节点被理想化为被固定在地球的标准覆盖单元, 它不随卫星移动而改变。因此, 只要某个标准覆盖单元受极区影响, 则它与任何标准覆盖单元之间不存在轨间星间链路。如图 7 所示, 只要 LEO 卫星 S_{21} 的部分足印区进入到极区, 就视为卫星 S_{11} 和卫星 S_{21} 之间的实际星间链路不再存在。当然, 这样处理的一个后果是 LEO 层轨间星间链路数量的下降, 但是这个缺点和卫星网络动态拓扑造成巨大的路由开销相比, 这样的处理是合适的, 而且只要适当提高极区边界的纬度值, 星间链路数量的微小下降并不会明显影响整个网络的性能, 所以这个问题是很容易被解决的。

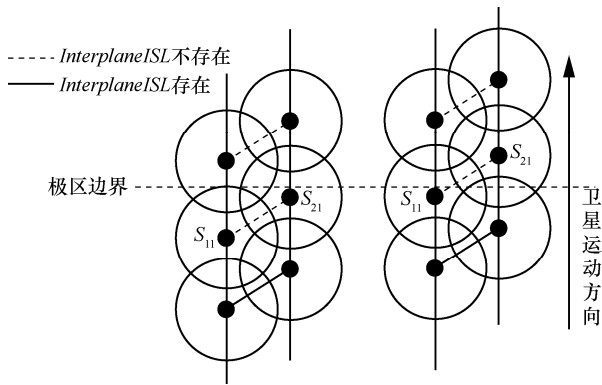


图 7 极区对 LEO 层拓扑影响的处理方式

4 路由算法

在本文构建的网络中存在 2 种卫星节点，即 LEO 卫星节点和 GEO 卫星节点，这 2 种卫星节点轨道高度的不同，在路由过程中扮演的角色也不相同。LEO 卫星主要是测量与其相邻的其他 LEO 卫星之间的时延以及实现路由过程中数据的中转，而 GEO 卫星的功能是为 LEO 卫星计算路由表。

现在以一个 LEO 卫星 S_{LEO} 和它的组管理者 S_{GEO} 卫星之间的信息交互过程来说明这 2 种卫星的主要功能。在一个时间片的开始时刻，卫星 S_{LEO} 测量它的输出链路上的时延信息，然后，将此时延信息报告给它的组管理者 S_{GEO} ，在这个过程中， S_{GEO} 的其他组成员也在向 S_{GEO} 报告它们测量到的时延信息，并且其他 2 个 GEO 卫星也在收集它们组成员报告给它们的时延信息。当 S_{GEO} 卫星收集到它的所有组成员报告来的时延信息后， S_{GEO} 卫星将通过 GEO 层的轨内星间链路与其他 2 个 GEO 卫星交换各自收集到的时延信息。信息交换完成后，每个 GEO 卫星获得了全网络的拓扑信息，于是每个 GEO 卫星开始为它的每个组成员利用 Dijkstra 算法计算路由表，计算完成后，将路由表分发给相应的组成员。当 S_{GEO} 将路由表分发给 S_{LEO} 后， S_{LEO} 可以根据收到的路由表进行数据转发。

即使在有 LEO 卫星失效的情况下，根据定理 2，网络中时间片的数量最多和每个轨道上卫星数量相同。每个时间片，GEO 卫星都会根据收集到的 LEO 的相关信息进行路由计算。尽管 LEO 卫星和 GEO 卫星、GEO 卫星和 GEO 卫星之间的信息交互会有时延，但是任意一个 LEO 卫星在任意时刻想要转发数据时，它都会按 GEO 发给它的最新的路由表进行转发，这不会造成额外时延的增加。另外，

在 VTLGN 中时间片很少，因此，卫星之间的这种信息交互不会对网络产生较大额外开销。

具体的路由过程主要分为以下几步。

步骤 1 在每一个时间片的开始时刻，每个 LEO 卫星不断在其输出链路上测量相应的时延，它是传输时延、传播时延和队列时延的总和，该 LEO 卫星收集到它与相邻卫星之间的时延信息后，在每个时间片周期 Δt 内将此时延信息报告给它所在的组成员集的组管理者。

本文不仅仅考虑链路上传播时延，还将链路的队列时延考虑在内进行路由计算。链路传播时延可以根据星间链路的长度得到，而排队时延随网络负载动态变化，可以通过在网络节点的端口处测量得到，如果一个数据分组在 t_1 时刻进入一个队列，则从 t_1 时刻到 t_2 时刻的一段时间内，平均队列时延可被计算为 $T_q(t_1) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{n(t)L}{C} dt$ ，其中， L 为队列中数据分组的平均大小， $n(t)$ 为 t 时刻队列中数据分组的数量， C 为 LEO 层轨内星间链路或轨间星间链路的容量。

步骤 2 组管理者收到所有组成员报告来的时延信息后，为了获得 LEO 层的全部拓扑信息，会形成一个时延报表，准备和其他组管理者交换时延报表信息。

步骤 3 在 GEO 层，每个组管理者卫星与其相邻的 2 个组管理者卫星交换各自收集到的 LEO 层信息。

步骤 4 每个组管理者卫星收集到全网的信息后按照 Dijkstra 算法为它的组成员计算路由，并将计算得到的路由表下发给它的组成员卫星。

步骤 5 LEO 卫星收到它的组管理者下发的路由表后，通过查找路由表将数据分组转发至下一跳。

可见，路由的计算是由上层的 GEO 卫星完成的，LEO 卫星承担了数据转发的功能，GEO 卫星按照收到的时延信息根据 Dijkstra 算法计算路由，因此，真实的路由计算的时间复杂度为 $O(n^2)$ 。

不同于以往分组策略的是，在 VTLGN 中，对失效的 LEO 卫星节点处理方式不同，上面的路由方法能够有效处理 LEO 节点失效的情形。当没有 LEO 卫星失效时，由定理 1 可以知道，网络拓扑是静态的，GEO 卫星可以在任意时刻为 LEO 卫星计算路由。当有若干失效的 LEO 卫星时，根据定理 2，

GEO 依然可以在每个时间片周期 Δt 内对 LEO 卫星进行路由计算和优化。

在 VTLGN 模型下的路由算法，网络中的时间片数量较其他网络模型非常少，这能够大大减小星上的存储开销。另外，在其他模型下，在极区附近，LEO 层的部分卫星之间的链路会临时断开，该信息若不被上层的 GEO 卫星所获得，则 LEO 层卫星获得的路由路径可能是不可靠的，这会导致数据的部分丢失。而在本文提出的 VTLGN 模型下，考虑了极区对足印区划分的影响，能够保证数据分组的可靠传输，如图 6 和图 7 所示，该路由算法也考虑了队列时延的影响。

5 性能评估

5.1 拓扑评估

本文提出的 VTLGN 网络模型旨在处理卫星网络由于节点移动引起的拓扑时变性的问题，它在时间片的长度和数量上都明显优于其他网络拓扑模型。为了说明该网络模型的优越性，本文将有关结果和其他经典的单层和多层卫星网络拓扑模型进行了对比。值得注意的是，对于其他星座模型，本文假定没有任何卫星失效；而对于 VLSN 和 VTLGN，本文假定有部分卫星失效，LEO 卫星失效率在不超过 20% 时，仿真结果完全相同。

单层卫星星座主要包括 Walker 星座和极轨星座，Walker 星座中时间片的分布情况主要和相位因子有关，而极轨星座的时间片分布情况只与极区边界纬度值有关^[18]。表 1 中列出了几种典型的单层星座组成的卫星网络拓扑时间片的分布情况，这些数值是各个星座在自身的一个完整的周期内通过计算或仿真得到的。从表中可以看出，标准 VLSN 的时间片的数量最小且时间片是均匀的，它的拓扑明显优于 Celestri、Iridium 和 Telidesic 星座系统。

表 1 单层卫星网络拓扑性能的对比

星座模型	时间片数量	时间片最大长度/s	时间片最小长度/s
标准 VLSN	12	500	500
Celestri	252	49.54 或 29.34	6.64 或 26.84
Iridium	44	213.93	60.01
Telidesic	48	133.77	105.78

对于一般的多层卫星网络，除了 LEO 层拓扑的变化外，层与层之间的链路也对时间片的分布产

生影响，综上，卫星分组方法中产生了大量不均匀的时间片。表 2 总结了几种典型的多层星座中拓扑时间片的分布情况，为了合理对比，表 2 取了相同的时间周期 24 h，可以发现，VTLGN 非常适合卫星网络组网，它不但能够产生数量较小的时间片，而且即使是在卫星节点失效的情况下，它依然能够保证所产生的时间片的均匀性，这为多层卫星网络路由的设计提供了方便。

表 2 多层卫星网络拓扑性能的对比

星座模型	时间片数量	时间片平均长度/s	时间片均匀程度
VTLGN	173	500	均匀
Tr	644	133.77	不均匀
合并前 Tr	5340	16.16	较不均匀
LMSN	644	133.77	不均匀
合并前 LMSN	3776	22.81	很不均匀

5.2 路由评估

本文使用网络模拟器 NS2.35 在 Linux 环境下搭建了卫星网络的仿真环境，对本文提出的路由算法进行了性能评估。对于所有的轨内星间链路、轨间星间链路、星际链路和星地链路，链路带宽都设置为 25 Mbit/s，队列长度设置为 50 个数据分组的大小，仿真中设置每个数据分组的平均大小为 1 000 B。为了使数据流更加符合实际情况，本文在地球表面随机布置了 600 个源节点和 600 个目的节点，并在这 600 对源节点和目的节点之间分别建立了数据流作为背景流量，假设每个源节点在发送数据和不发送数据这 2 种状态之间交替，它们的分布服从 Pareto 分布，该分布比指数分布更加接近实际的网络数据流量统计。在仿真中，设置发送数据的区间和不发送数据的区间分布的平均时间均为 200 ms，Pareto 分布的形状参数设置为 1.2。为了比较本文基于 VTLGN 下的路由算法 TCRA 和 DSP、DRA 算法的性能，本文选取了 6 对源节点和目的节点进行了相关数值的测量，主要包括平均端到端时延和分组丢失率。

图 8 说明了 DRA、DSP 和 TCRA 这 3 种路由算法的平均端到端时延随着数据发送速率的变化情况。可以看出，在不同发送速率下，TCRA 算法具有更小的平均端到端时延，这是因为 DRA 算法和 DSP 算法在源节点和目的节点之间选路时仅仅是以路径的传播时延作为路径优先的度量；而在 TCRA 中，GEO 卫星收集到的组成员 LEO 信息综合了传播时延和链路上的数据分组排队情况。

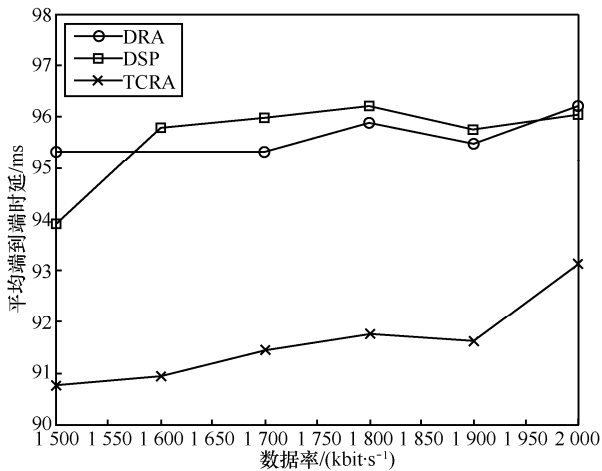


图 8 平均端到端时延随数据发送率的变化

图 9 反映了网络的分组丢失率随着数据发送率的变化关系，随着源节点数据分组发送速率的增加，DRA、DSP 和 TCRA 这 3 种路由算法的分组丢失率都呈现上升趋势，然而当固定发送速率时，TCRA 算法比 DRA 算法和 DSP 算法具有更低的分组丢失率，其原因和 TCR 具有较小的端到端时延类似。

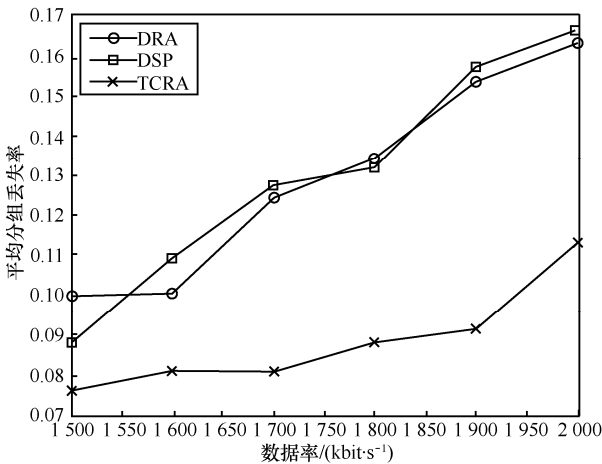


图 9 分组丢失率随数据发送率的变化

在本文构建的 VTLGN 中，能够有效处理 LEO 卫星节点失效的问题。图 10 说明了 TCRA 算法平均端到端时延随 LEO 层卫星失效率的变化情况。DRA 算法和 DSP 算法中一旦 LEO 卫星失效，时延急剧增加，而对于 TCRA 算法，尽管随着失效的 LEO 卫星数量的增加，平均端到端时延在增加，但是数据依然可以被正常传输。这是因为在 TCRA 算法中，考虑了 LEO 卫星失效的情形，即使在有失效的卫星节点的情况下，数据分组始终能够按照最短路径被路由。

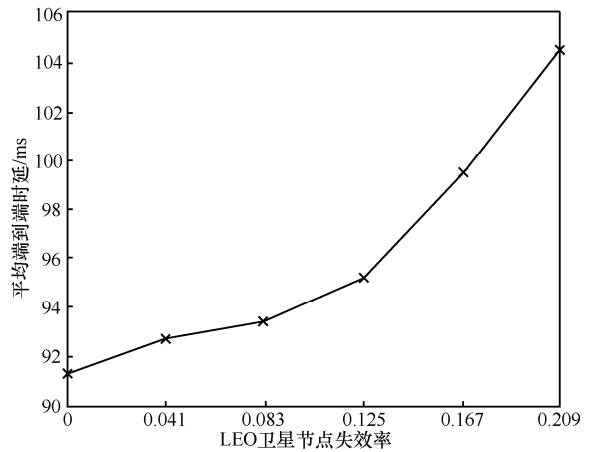


图 10 在 TCRA 算法中，平均端到端时延随 LEO 卫星失效率的变化

6 结束语

在卫星网络中，单独利用 LEO 和 GEO 星座进行空间组网都不能充分发挥各个星座独自优势，此外，卫星节点的周期性运动造成了网络的拓扑时变性，给设计高性能的路由技术带来了困难。为此，本文基于 LEO 和 GEO 星座建立了一种新的网络模型，在此模型中，同时考虑了 LEO 和 GEO 卫星的优势，并将虚拟节点策略和卫星分组的方法改进后应用于此模型。通过理论和数值分析，说明了该网络比其他多层卫星网络模型更具优势。此外，在基于此模型的路由算法中，GEO 卫星计算路由，LEO 卫星转发数据，即使是在卫星节点失效的情况下，也会大大减小存储开销并提高其他路由性能，仿真验证了路由算法的有效性，从而说明了该模型和算法适用于空间信息网络的组网。

参考文献：

- [1] 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):711-715.
LI D Y, SHEN X, GONG J Y, et al. On construction of China's space information network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(6):711-715.
- [2] LIU X, YAN X, JIANG Z, et al. A low-complexity routing algorithm based on load balancing for LEO satellite networks[C]//The 82nd Vehicular Technology Conference (VTC Fall). 2015: 1-5.
- [3] FENG X, YANG M, GUO Q. A novel distributed routing algorithm based on data-driven in GEO/LEO hybrid satellite network[C]//2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). 2015: 1-5.
- [4] WU Z, HU G, JIN F, et al. A novel routing design in the IP-based GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2017, 35(3): 179-199.

- [5] WU Z, JIN F, LUO J, et al. A graph-based satellite handover framework for LEO satellite communication networks[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1547-1550.
- [6] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), 2001, 9(2): 137-147.
- [7] KORÇAK Ö, ALAGÖZ F. Virtual topology dynamics and handover mechanisms in earth-fixed LEO satellite systems[J]. Computer Networks, 2009, 53(9): 1497-1511.
- [8] LIU X, JIANG Z, LIU C, et al. A low-complexity probabilistic routing algorithm for polar orbits satellite constellation networks[C]//2015 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2015: 1-5.
- [9] QI W, HOU W, GUO L, et al. A unified routing framework for integrated space/air information networks[J]. IEEE Access, 2016, 4: 7084-7103.
- [10] HE F, LIU Q, LYU T, et al. Delay-bounded and minimal transmission broadcast in LEO satellite networks[C]// 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). 2016: 1-7.
- [11] TAN H, ZHU L. A novel routing algorithm based on virtual topology snapshot in LEO satellite networks[C]//2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering (CSE). 2014: 357-361.
- [12] JIA X, LV T, HE F, et al. Collaborative data downloading by using inter-satellite links in LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1523-1532.
- [13] CHEN C, EKICI E. A routing protocol for hierarchical LEO/MEO satellite IP networks[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 507-521.
- [14] LONG F, XIONG N, VASILAKOS A V, et al. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(6): 1657-1673.
- [15] ZHOU Y, SUN F, ZHANG B. A novel QoS routing protocol for LEO and MEO satellite networks[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2007, 25(6): 603-617.
- [16] LIU Y, XU W, TANG F, et al. An improved multi-path routing algorithm for hybrid LEO-MEO satellite networks[C]//Trustcom/BigDataSE/ISPA. 2016: 1101-1105.
- [17] PRATT S R, RAINES R A, FOSSA C E, et al. An operational and performance overview of the IRIDIUM low earth orbit satellite system[J]. IEEE Communications Surveys, 1999, 2(2):2-10.
- [18] WANG J, LI L, ZHOU M. Topological dynamics characterization for LEO satellite networks[J]. Computer Networks, 2007, 51(1): 43-53.

[作者简介]



齐小刚 (1973-), 男, 陕西宝鸡人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为网络优化与算法设计、系统建模与故障诊断。



马久龙 (1991-), 男, 陕西延安人, 西安电子科技大学硕士生, 主要研究方向为空间信息网络和卫星网络。



刘立芳 (1972-), 女, 甘肃兰州人, 博士, 西安电子科技大学教授, 主要研究方向为数据处理与智能计算。