

基于时间演进图的 LEO 星间切换实时预测及更新方法

胡欣¹, 宋航宇¹, 刘帅军¹, 李秀华¹, 王卫东¹, 汪春霆²

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 2. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘要: 为了解决低轨 (LEO, low earth orbit) 卫星时变拓扑以及用户运动交织带来的切换效率较低的问题, 提出一种基于时间演进图 (TEG, time evolving graph) 的星间实时切换预测框架和最短路径动态更新算法。根据终端运动情况, 从时间和空间这 2 个维度动态更新切换预测结果。所提方法适用于多种切换策略, 具有较高的灵活性。仿真结果显示, 所提方法可以有效地提高预测的准确性, 同时避免不必要的切换。

关键词: LEO 卫星网络; 星间切换; 时间演进图; 最短路径动态更新算法

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018166

Real-time prediction and updating method for LEO satellite handover based on time evolving graph

HU Xin¹, SONG Hangyu¹, LIU Shuaijun¹, LI Xiuhua¹, WANG Weidong¹, WANG Chunting²

1. School of Telecommunication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

2. The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: In order to solve the problem of low handover efficiency raised by the intertwined impacts of time-varying topology of LEO satellites and terminal movement, a real-time satellite handover prediction framework based on time evolving graph and a shortest path dynamic updating method was proposed. This framework dynamically updated the handover prediction results from the temporal and spatial dimensions according to the terminal movement. The simulation results show that the framework can effectively improve the accuracy of the forecast and avoid the unnecessary handover.

Key words: LEO satellite network, satellite handover, time evolving graph, shortest path dynamic updating method

1 引言

卫星网络具有全球覆盖、移动性和可扩展性等优点, 可以随时随地提供全球高效的广播和多播服务。经过几十年的快速发展, 卫星通信系统已成为现代通信系统最重要的部分之一^[1]。相比于地球同步轨道 (GEO, geostationary earth orbit) 卫星和中轨 (MEO, medium earth orbit) 卫星通信系统而言, LEO 卫星具有较小的通信时延和传输损耗, 多颗 LEO 卫星组成的星座可实现全球即时通信。因此, LEO

卫星通信系统被视为最有发展前景的卫星通信系统。然而, 由于 LEO 卫星星位于低轨, 相对地面具有较高的移动速度, 其在地球表面的波束覆盖范围变化很快, 一颗 LEO 卫星在指定区域内的覆盖时长仅为几分钟^[2]。

为了确保实时通信, 地面终端需在 LEO 卫星的波束之间以及卫星与卫星间频繁切换。目前, 许多研究机构及研究学者等对波束间的切换问题已开展大量研究工作。文献[3]考虑了相邻卫星波束的服务时间相关性, 提出了一个简单的分析框架, 用

收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2018-07-09

通信作者: 宋航宇, shy0815@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.91438114)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.91438114)

于在具有相关服务时间的低轨卫星系统中新呼叫和切换呼叫进行性能评估。文献[4]提出了一种基于扩展六边形覆盖模式的多波束覆盖方案，并给出了切换率的闭式表达式，得出了最优的波束形状参数。与波束间切换研究相比，目前关于星间切换的问题亟需开展深入研究，因此本文重点研究星间切换。关于星间切换，在基于仰角的 LEO 星间切换方面，文献[5-6]提出了硬切换和混合信道自适应切换方案。针对仰角、通信时长和空闲信道数的策略选择问题，文献[7]提出了基于动态多普勒切换优先级方法来评估不同卫星的切换策略（最长服务时间策略、最大仰角策略和基于空闲信道数策略）。在此基础上，文献[8]深入分析了 LEO 卫星星座覆盖时间特点，并首次提出了 LEO 卫星预期切换次数下限。文献[9]对上述卫星切换工作进行了总结，提出了一种基于静态图的 LEO 星座切换预测架构和方法，将切换过程建模为有向图中的最短路径问题，可适用于多种不同切换策略，且在终端静止情况下具有很好的切换预测效果。

现有研究^[3-9]均假设 LEO 卫星通信链路稳定，却忽略了终端运动对切换造成的影响。然而，中、高速移动终端的运动可能会改变通信链路状态，使用静态分析方法对其切换进行研究会造成切换失败或额外增加切换次数，切换效率较低。为保证 LEO 场景下通信的连续性并避免乒乓效应，本文综合考虑了终端运动速度、卫星链路状态、卫星网络状态等因素，首先分析了终端运动速度对星间切换的影响，并将星间切换过程建模为求解 TEG^[10-11]的每个子图中从起始节点到终止节点的最短路径问题，根据 TEG 中子图之间的演进情况，从时间和空间这 2 个维度动态更新切换结果，提高切换预测结果的准确性。

2 LEO 星座通信场景及切换预测建模

2.1 LEO 星座通信场景描述

LEO 星座与地面终端通信场景示意如图 1 所示。根据终端移动速度不同，可将终端定义为低速移动终端（如行人）、中速移动终端（如汽车）和高速移动终端（如高铁、飞机）。

终端用户通话时长 t 定义为服从均值为 T 的指数分布^[12]，概率密度函数式为

$$P(t) = \frac{1}{T} \exp\left(-\frac{1}{T}t\right) \quad (1)$$

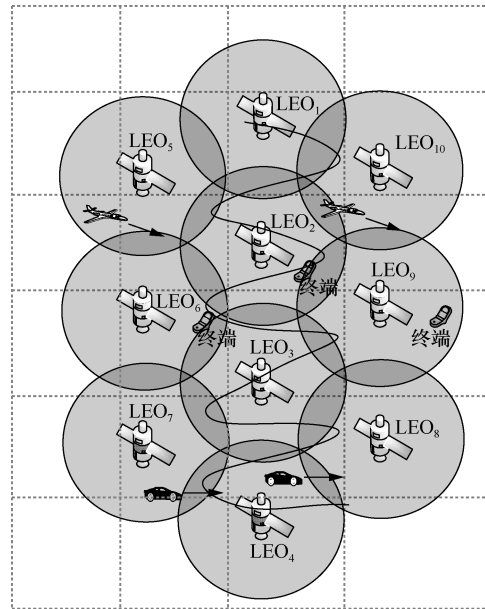


图 1 LEO 星座与地面终端通信场景示意

在通话时长 t 内，利用高斯-马尔可夫 (GM, Gauss-Markov) 模型^[13]对终端运动行为建模，如式(2)和式(3)所示。

$$s_n = \alpha s_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{s} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}s_{x_{n-1}} \quad (2)$$

$$d_n = \alpha d_{n-1} + (1 - \alpha)\bar{d} + \sqrt{(1 - \alpha^2)}d_{x_{n-1}} \quad (3)$$

其中， s_n 和 d_n 分别为第 n 个时隙终端的速度和方向， s_{n-1} 和 d_{n-1} 分别为第 $n-1$ 个时隙终端的速度和方向； α ($0 \leq \alpha \leq 1$) 为调节速度和方向的随机性参数，取值范围为(0,1)； \bar{s} 和 \bar{d} 分别为一定时间段内终端运动速度和方向的平均值； $s_{x_{n-1}}$ 和 $d_{x_{n-1}}$ 分别为服从高斯分布的随机变量。第 n 个时隙，终端对应的位置可以利用式(4)和式(5)得到。

$$x_n = x_{n-1} + s_{n-1}t \cos d_{n-1} \quad (4)$$

$$y_n = y_{n-1} + s_{n-1}t \sin d_{n-1} \quad (5)$$

其中， x_n 、 y_n 为第 n 个时隙终端的位置坐标； x_{n-1} 、 y_{n-1} 为第 $n-1$ 个时隙终端的位置； s_{n-1} 、 d_{n-1} 分别为第 $n-1$ 个时隙终端的速度和方向。

在 LEO 卫星与终端正常建立连接后，卫星与终端连接关系如图 2 所示。其中， O 为地心地固坐标系 (ECEF, earth-centered earth-fixed) 下的地心， R_e 为地球半径， h 为卫星对应的轨道高度。定义 $\gamma(t)$ 、 $\gamma(t_0)$ 与 $\psi(t)$ 分别为 T 到 p 对应的地心角、 T 到 p' 对应的地心角和 p 到 p' 对应的地心角（弧度制）。定义 t_0 时刻对应最大仰角 θ_{\max} ， $\theta(t)$ 为 t 时

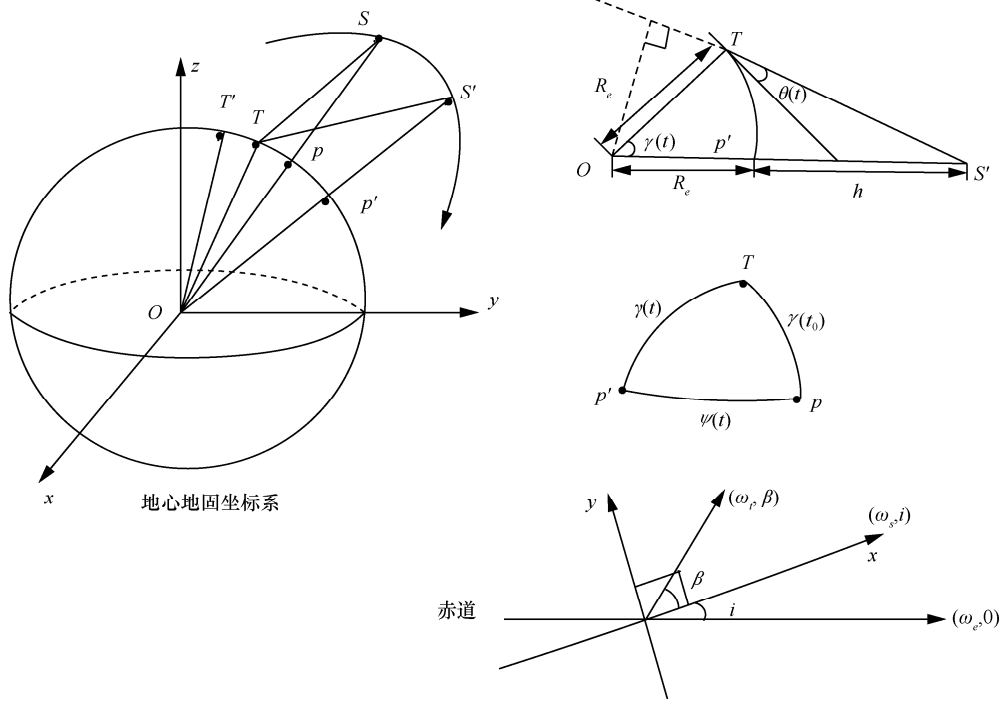


图 2 单颗卫星与终端连接关系

刻终端对应的仰角。 T 、 S 与 p 分别为 t_0 时刻的终端位置、卫星位置以及卫星对应的星下点位置； T' 、 S' 与 p' 分别为 t 时刻的终端位置、卫星位置以及卫星的星下点位置。

由图 2 可知，在三角形 OTS' 中，有

$$\gamma(t) + \theta(t) = \arccos\left(\frac{R_e}{R_e + h} \cos \theta(t)\right) \quad (6)$$

在直角球面三角形 Tpp' 中，有

$$\cos \gamma(t) = \cos \psi(t) \cos \gamma(t_0) \quad (7)$$

定义卫星与终端的可视时长为最大观测仰角到最小观测仰角时长的 2 倍， γ_{\max} 为终端到星下点最大地心角，对应地面最小仰角 θ_{\min} ，则卫星对终端覆盖时长 t_c 为

$$t_c = \frac{2}{\omega} \psi(t) = \frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \gamma(t_0)}\right) \quad (8)$$

根据图 2 以卫星运动方向为 x 轴建立的坐标系，可以计算出式(8)中的 ω 为

$$\begin{aligned} \omega &= \left| \omega_s \vec{x} - (\omega_e \cos i_0 \vec{x} + \omega_e \sin i_0 \vec{y}) - (\omega_t \cos \beta \vec{x} + \omega_t \sin \beta \vec{y}) \right| \\ &= \sqrt{(\omega_s - \omega_e \cos i_0 - \omega_t \cos \beta)^2 + (\omega_e \sin i_0 + \omega_t \sin \beta)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中， ω 为地心地固坐标系下卫星相对于终端的角

速度， ω_s 为地心惯性坐标系 (ECI, earth-centered inertial) 下卫星角速度，即其星下点在 ECI 下的角速度， ω_e 为 ECI 下地球自转角速度， ω_t 为 ECI 下终端运动角速度， i_0 为轨道面倾角， β 为终端运动与卫星运动方向夹角。

终端在地面随机分布，其到星下点对应的地心角 $\gamma(t_0)$ 服从 $U(0 \sim \gamma_{\max})$ 均匀分布， $\gamma(t_0)$ 概率密度函数 $f_{\gamma(t_0)}(\gamma(t_0))$ 为^[5]

$$f_{\gamma(t_0)}(\gamma(t_0)) = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{\max}}, & 0 \leq \gamma(t_0) < \gamma_{\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(8)和式(10)可得，覆盖时间 t_c 累积分布函数为

$$\begin{aligned} F_{t_c}(t_c) &= P\left(\frac{2}{\omega} \arccos\left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \gamma(t_0)}\right) \leq t\right) \\ &= P\left(\gamma(t_0) \leq \arccos\left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \frac{\omega t_c}{2}}\right)\right) \\ &= 1 - \frac{1}{\gamma_{\max}} \arccos\left(\frac{\cos \gamma_{\max}}{\cos \frac{\omega t_c}{2}}\right), \quad 0 < t_c \leq T_m \end{aligned} \quad (11)$$

其中, T_m 为卫星对终端的最大覆盖时间, 对应 $\gamma(t_0) = 0$, 根据式(8)得 $T_m = \frac{2\gamma_{\max}}{\omega}$, 根据式(11)得覆盖时间 t_c 概率密度函数为其分布函数的导数, 即

$$f_{t_c}(t_c) = \begin{cases} \frac{\omega \cos \gamma_{\max} \tan\left(\frac{\omega t_c}{2}\right)}{2\gamma_{\max} \sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega t_c}{2}\right) - \cos^2 \gamma_{\max}}}, & 0 < t_c \leq \frac{2\gamma_{\max}}{\omega} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

通过式(12)可得, 终端在不同运动速度下单颗卫星对其平均覆盖时长 $E(t_c)$ 为

$$E(t_c) = \int_0^{\frac{2\gamma_{\max}}{\omega}} \frac{t_c \omega \cos \gamma_{\max} \tan\left(\frac{\omega t_c}{2}\right)}{2\gamma_{\max} \sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega t_c}{2}\right) - \cos^2 \gamma_{\max}}} dt_c \quad (13)$$

令 $\frac{\omega t_c}{2} = \lambda$, 将式(13)化简得

$$E(t_c) = \frac{2 \cos \gamma_{\max}}{\omega \gamma_{\max}} \int_0^{\gamma_{\max}} \frac{\lambda \tan \lambda}{\sqrt{\cos^2 \lambda - \cos^2 \gamma_{\max}}} d\lambda \quad (14)$$

本文只考虑星间切换, 没有涉及波束间切换的问题, 因此, 本文只推导了单颗卫星对终端的覆盖时长。对于多波束卫星, 每个波束对终端的覆盖时长的推导方式和单颗卫星的推导方式相同。

2.2 切换预测建模

利用 TEG 对运动终端星间切换预测进行建模, 将终端在当前时刻的星间切换等效为求解 TEG 的单个子图中从起始节点到终止节点的最短路径, 并计算更新时间 Δt 完成相应子图的更新。TEG 模型如图 3 所示。时间演进图由 k 个子图组成, 即 $G = \{G^1, G^2, \dots, G^k\}$, 对应 k 个时隙, 每个时隙对应一个子图, 其中, $G^i = (V^i, A^i, \omega^i)$ 为第 i 个时隙的有向图, 有向图在每个时隙 Δt 内状态不变, 时隙更新过程可根据切换策略或卫星链路状态更新 TEG 权值、增减节点数量。

1) 节点集 $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n, v_{n+1}\}$ 为终端在通话时长内对应的所有覆盖终端的卫星节点, 根据终端运动模型预测终端在每一时隙的位置, 通过查找卫星星历可以提前得到通话时长内所有的覆盖卫星节点。每个卫星节点对应的服务时长定义为 $Tv_i = [Tvb_i, Tve_i]$ 。

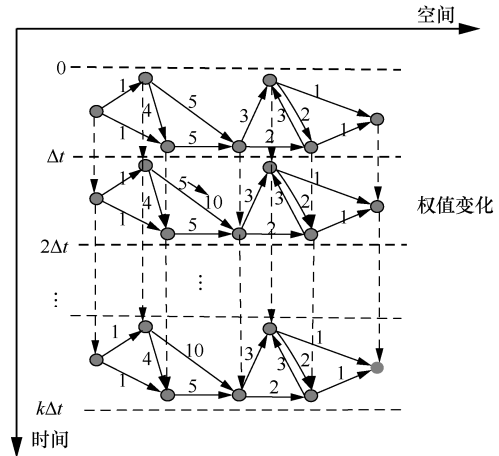


图 3 LEO 星座动态时变网络切换预测模型

2) 弧集 $A = \{A_{(1,1)}, A_{(1,2)}, \dots, A_{(n,n)}\}$ 为节点间连接状况。当 $Tvb_j < Tve_i < Tve_j$ 时, 定义有向弧从节点 i 指向节点 j ; 当 $Tvb_j < Tvb_i < Tve_j$ 时, 定义有向弧从节点 j 指向节点 i 。

3) 权重集 $\omega = \{\omega_{(1,1)}, \omega_{(1,2)}, \dots, \omega_{(n,n)}\}$ 为有向弧权重, 不同切换准则对应不同的权值设置方式。LEO 常采用以下 3 种切换准则: 最长服务时间准则、最大仰角准则和基于空闲信道数准则。基于最长服务时间准则将弧 $A_{(i,j)}$ 的权重定义为 $\omega(i,j) = \frac{T_{\max}}{Tve_j - Tve_i}$, 即服务时间长的卫星权重小。基于最大仰角准则将弧 $A_{(i,j)}$ 的权重定义为 $\omega_{(i,j)} = \frac{1}{EL_j}$, EL_j 为卫星与终端的仰角, 即仰角大的卫星权重小。基于空闲信道数准则将弧 $A_{(i,j)}$ 的权重设置为 $\omega_{(i,j)} = \frac{1}{m_j}$, m_j 为卫星的空闲信道数, 即空闲信道多的卫星权重小。本文 3.2 节对应的最短路径更新算法会根据弧上的权重来求解最短路径, 不同切换准则对应的终端的切换路径不同。采用不同的权重设置方式, 本文的切换预测模型可以适用于多种切换策略, 具有较高的灵活性。

3 切换预测实时更新

3.1 动态更新时间

在图 3 所示的 LEO 星座动态时变网络切换预测模型的基础上, 根据终端运动速度, 从时间维度计算 TEG 每个时隙的时长 Δt , 通过动态调整 Δt 实现拓扑图的更新。本文对 Δt 的计算模型

定义为

$$\Delta t = \tau E(t_c)_{\min} \quad (15)$$

其中, τ 为调节参数, 取值范围为 $0 < \tau \leq 1$, 根据实际情况进行设置。当卫星链路和网络状况较好时, 可将 τ 设置得大一些, 避免更新过于频繁增加计算复杂度; 当卫星链路和网络状况不稳定时, 可将 τ 设置得小一些, 避免更新不及时影响切换预测准确度。 $E(t_c)_{\min}$ 为终端在不同运动速度下对应的单颗卫星对其平均覆盖时长的下限值, 切换预测更新时间不能超过 $E(t_c)_{\min}$, 当终端运动方向与卫星运动方向相反, 即 $\beta = 180^\circ$ 时, 为卫星对终端覆盖时长的下限, 将式(9)中的 β 取 180° , 代入式(13)即可求出单颗卫星对终端平均覆盖时长的下限值 $E(t_c)_{\min}$ 。根据式(13), 当终端运动速度越快时, $E(t_c)_{\min}$ 越小, 此时能以较快的速度更新拓扑图, 避免出现因用户运动速度快、拓扑图更新不及时而造成对切换的预测不准确。

3.2 最短路径动态更新算法

由于终端的运动会造成卫星覆盖时长和卫星仰角的变化, 卫星的空闲信道数等也会随时间变化, 因此 TEG 中弧的权重也会动态变化。每个时隙更新时需从空间的维度重新进行权重和最优策略评估, 完成对切换的预测更新。为降低空间维度的计算复杂度, 本文提出了适用于多边权重动态变化的最短路径实时更新算法, 仅更新每个子图的最短路径树 (SPT, shortest path tree) 中受影响的节点, 即可有效提高计算效率。

本文算法需要经过预处理、入队操作、出队操作、节点更新这 4 个步骤。在本文的动态更新算法中, 原最短路径树如图 4 的粗线所示, 当弧上权重改变时, 定义队列 M 用来确定最大可能受影响的节点的集合。图 5 中用虚线圈出了最短路径受影响的节点, 圈外的节点的最短路径不受影响^[14]。

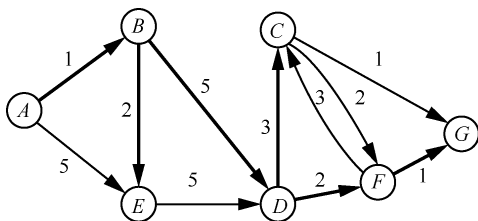


图 4 原子图中的最短路径树

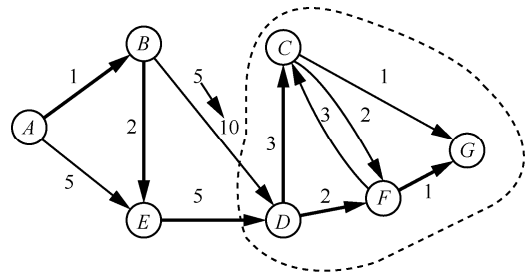


图 5 更新后的最短路径树

为了方便描述, 引入以下符号。

- 1) 定义 $G^i = (V^i, A^i, \omega^i)$ 为 TEG 中第 i 个时隙的子图, 其中, V 是图中节点的集合, A 是连接弧的集合, ω 是连接弧的权重。
- 2) 对于有向连接弧 $a: i \rightarrow j$, $S(a)$ 为弧 a 的源节点, $E(a)$ 为弧 a 的目的节点。
- 3) $S(G^k) \in V$ 为图中的根节点, 定义节点集 N , 包含所有需要更新的节点 $Source_part\{N\} = \{a | S(a) \in N, E(a) \notin N\}$ 和 $End_part\{N\} = \{a | E(a) \in N, S(a) \notin N\}$ 。
- 4) 定义 $P(i)$ 为节点 i 的父节点, $D(i)$ 为最短路径树中从根节点到节点 i 的最短路径。
- 5) 定义 $group_1$ 和 $group_2$, 在某一时刻有多条弧的权值变化时, 将所有权值减小的弧加入 $group_1$, 将所有权值增大的弧加入 $group_2$ 。
- 6) 定义 $des(i)$ 为节点 i 以及其在 SPT 中的所有子孙节点的集合。

在第 k 个时隙, 当弧上权值发生变化时, 对于节点 $v \in M$, $M.v.inc$ 为节点 v 的最短路径的最小增量值。如图 5 所示, D 节点的原父节点为 B 节点, 当 $B \rightarrow D$ 的权重由 5 变为 10, 若 D 节点的父节点为 B , 最短路径增加值为 5; 若 D 节点的父节点为 E , 则最短路径增加值为 2, 因此 $M.D.inc=2$ 。 $\omega'(a) = \omega^k(a)$ 为弧 a 的新权重。 $d = D(i) + \omega'(a) - D(j)$, d 为到节点 j 的最短路径经过弧 a 时增加的值。

弧集 Q 用来动态记录每条可更新 SPT 的变化弧以及增量信息。弧集 Q 中的每一个元素表示为 $\{a, min_inc\}$, 其中, min_inc 表示当最短路径经过弧 a 时, $E(a)$ 的最短路径的增加值。当弧 a 的权值发生变化时, 判断弧 a 的终止节点 $E(a)$ 是否在队列 Q 里。当终止节点 $E(a)$ 不在 Q 队列时, 执行入队函数 $enqueue(Q, \{a, min_inc\})$; 否则当新元素 $\{a, min_inc\}$ 的 min_inc 比 Q 中已经存在的元素小

时，用新元素替代旧元素，如图 5 中 $Q = \{a: E \rightarrow D, 2\}$ 的增量小于 $Q = \{a: B \rightarrow D, 5\}$ ，要用 $Q = \{a: E \rightarrow D, 2\}$ 代替 $Q = \{a: B \rightarrow D, 5\}$ 。出队函数 $Extract(Q)$ 将选择出具有最小 min_inc 的元素，并将其从 Q 中删除，当 Q 为空时，算法结束，得到更新后的最短路径树，如图 5 的粗线所示。算法 1 的伪代码具体如下。

算法 1 多边权值变化的动态最短路径更新算法

输入 $G = \{G^1, G^2, \dots, G^k\}$ // 时间演进图

初始化: $G^1 = (V^1, A^1, \omega^1) \rightarrow SPT$ // 根据初始时隙的图生成最短路径树

步骤 1 当子图 G^k 中一些弧上的权重值从 $\omega^1(a)$ 变成了 $\omega^k(a)$

$\forall a: i \rightarrow j$

情况 1 $\omega^k(a) < \omega^1(a)$ 且 $D(i) + \omega^k(a) < D(j)$,

则执行步骤 2;

情况 2 $\omega^k(a) > \omega^1(a)$ 且 $a \in SPT$, 则执行步骤 3

步骤 2 /*对于弧上权值减小的情况*/

for $\forall a: i \rightarrow j \in group_1, S(a) \in des(j)$

//对于每个节点 $E(a)$ 选择最短路径的最小增加值

$min_inc = D(S(a)) + \omega^1(a) - D(E(a))$

if $min_inc < 0$

$enqueue(Q, \{a, min_inc\})$

end if

end for

执行步骤 4

步骤 3 /*对于弧上权值增加的情况*/

for $\forall a: i \rightarrow j \in group_2$

$M \leftarrow j, M.j.inc = d, enqueue(Q, \{a, d\}),$

for $\forall v \in des(j)$

from $\forall a, E(a) = v \ \& \ S(a) \notin des(j)$

$min_inc = D(S(a)) + \omega^1(a) - D(E(a))$

if $min_inc < M.v.inc$ $enqueue(Q, \{a, min_inc\}),$

$M.v.inc = min_inc$

end if

for $\forall k$ // k 是 SPT 中 v 的直接子孙节点

$M \leftarrow k, M.k.inc = M.v.inc$

end for

end for

end for

执行步骤 4

步骤 4 /*执行出队操作*/

while $Q \neq \emptyset$

$\{a, min_inc\} \leftarrow Extract(Q), P(E(a)) = S(a),$

if $min_inc < M.E(a).inc$ (or 0) then

$M.E(a).inc = min_inc, enqueue(Q, \{a, min_inc\})$

end if

end while

3.3 算法复杂度分析

将本文算法与传统 Dijkstra 算法进行比较。定义 N 为图中总节点数， n 为算法更新的总节点数，当更新节点数相对于整个网络节点数量较小时 ($N \gg n$)，传统 Dijkstra 算法需要重新计算所有节点的最短路径，会导致大量不必要的重复计算，本文的动态更新算法可以有效降低计算的复杂度，减少冗余的更新。传统 Dijkstra 算法与本文算法的算法复杂度对比如表 1 所示。

表 1 算法复杂度对比

算法	总节点数	受影响节点数	算法复杂度
传统 Dijkstra 算法	N	n	$O(N^2)$
本文算法	N	n	$O(n^2)$

4 仿真结果

4.1 仿真参数设置

仿真参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真参数设置

参数名称	参数设置
星座类型	全球星座
卫星个数 T	48
轨道面个数 P	8
轨道面内卫星个数 S	6
轨道高度 h/km	1 414
轨道倾角 i	52°
终端通信最小仰角	10°
终端个数	1 000
终端速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0~1 000

4.2 仿真结果分析

本文采用最长覆盖时间切换准则进行仿真，主要关注切换预测的准确性、切换失败率和不必要的切换率这 3 个指标。

1) 本文的 TEG 模型采取动态时隙设置方式更新 TEG 子图, 在式(9)中, 取 $\beta = 180^\circ$, 根据式(10)在 $0 \sim \gamma_{\max}$ 内随机选取 10 000 个可视时间段, 代入式(13), 仿真得出单颗卫星对不同速度的终端平均覆盖时长的下限值 $E(t_c)_{\min}$, 如图 6 所示。根据图 6 的仿真结果以及式(14)可得不同运动速度下终端切换预测的动态更新时间。

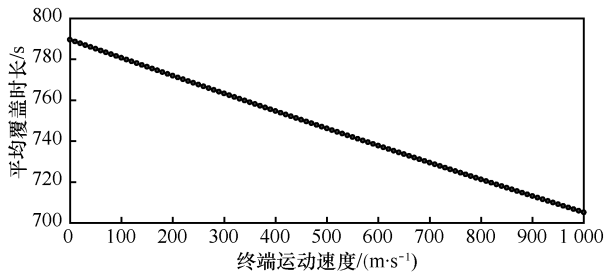


图 6 单颗卫星对终端覆盖时长下限值

2) 切换预测准确性: 基于最长覆盖时间切换准则, 将终端位置设在北京 ($40^\circ\text{N}, 116^\circ\text{E}$), 终端的运动速度和方向服从式(2)和式(3)的 GM 模型, 通话时长为 30 min。图 7~图 10 分别为终端速度平均值取 0 m/s、100 m/s、300 m/s、500 m/s 时仿真得出的全球星座对终端的覆盖特性, 表 3~表 6 为对应的切换预测结果。在上述场景下, 将本文 TEG 框架与文献[9]静态图方法的切换预测结果进行对比。在仿真开始时刻, 当终端的接入星为卫星 23 时, 对比图 7 和图 9, 文献[9]的预测结果将导致切换失败。在仿真开始时刻, 当终端的接入星为卫星 12 时, 对比图 8 和图 10, 文献[9]将导致不必要的切换。通过对比可以看出, 当终端运动速度较大时, 文献[9]忽略了终端的运动, 导致其切换预测的结果不准确。本文通过对终端运动进行建模, 并基于 TEG 框架动态更新切换预测结果, 提升了切换预测的准确性。

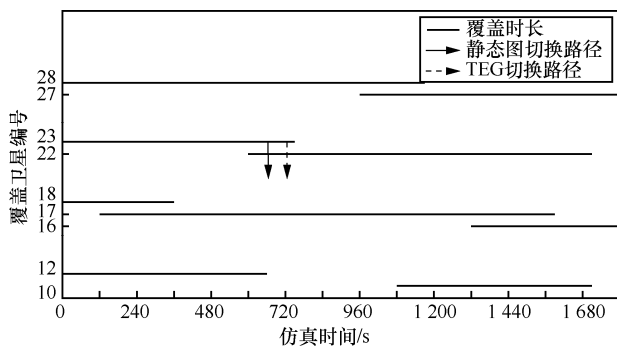


图 7 终端静止时的覆盖特性

表 3 终端静止时的切换预测结果对比

算法	切换路径
文献[9]算法	卫星 23→卫星 22
本文算法	卫星 23→卫星 22

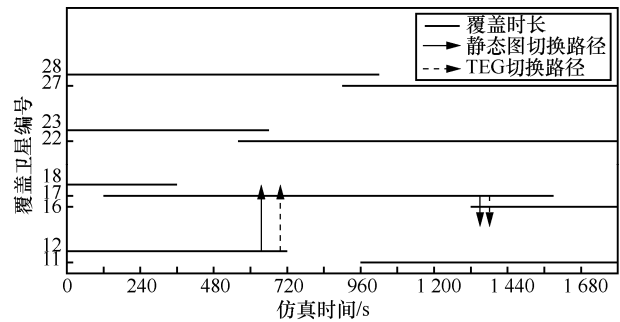


图 8 终端为 100 m/s 时的覆盖特性

表 4 终端为 100 m/s 时的切换预测结果对比

算法	切换路径
文献[9]算法	卫星 12→卫星 17→卫星 16
本文算法	卫星 12→卫星 17→卫星 16

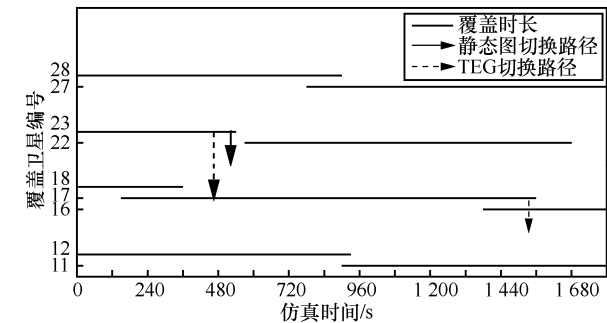


图 9 终端为 300 m/s 时的覆盖特性

表 5 终端为 300 m/s 时的切换预测结果对比

算法	切换路径
文献[9]算法	卫星 23→卫星 22
本文算法	卫星 23→卫星 17→卫星 16

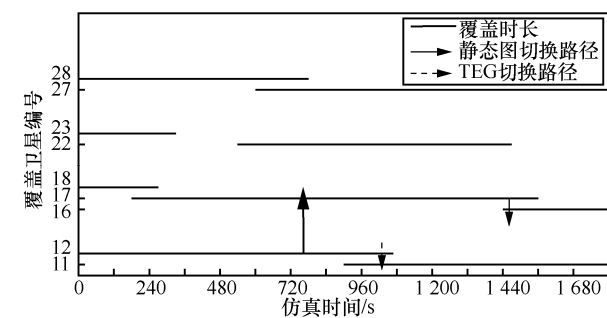


图 10 终端为 500 m/s 时的覆盖特性

表 6 终端为 500 m/s 时的切换预测结果对比

算法	切换路径
文献[9]算法	卫星 12→卫星 17→卫星 16
本文算法	卫星 12→卫星 11

3) 切换效率: 切换失败率和不必要的切换率越高, 则切换效率越低。为评估本文提出的 TEG 方法的切换效率, 选取 1 000 个随机分布终端, 终端通话时长为 20 min, 终端按照式(2)和式(3)用 GM 模型对终端运动行为进行建模, 得到其速度大小和运动方向。

图 11 为终端在不同速度下, 采用文献[9]中静态图预测方法与本文 TEG 预测方法的切换失败率对比。图 11 中横坐标为终端运动速度的平均值, 纵坐标为切换失败率。从图 11 可以看出, 2 种切换预测方法的切换失败率都随终端的速度增大而增大, 但本文的切换失败率要远小于文献[9], 如终端速度为 300 m/s 时, 文献[9]方法的切换失败率为 67%, 本文算法的切换失败率仅为 23%。

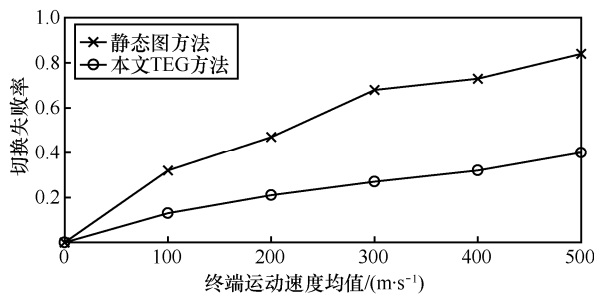


图 11 切换失败率

图 12 为终端在不同速度下, 采用文献[9]中静态图预测方法与本文 TEG 预测方法的不必要的切换率对比。图 12 中横坐标为终端运动速度的平均值, 纵坐标为不必要的切换率。从图 12 可以看出, 2 种切换预测方法的不必要切换率都随终端的速度增大而增大, 但本文的不必要切换率要远小于文献[9], 并且终端速度越大, 本文算法的优势越明显, 如终端速度为 500 m/s 时, 文献[9]方法的不必要切换率为 13.9%, 本文算法的不必要切换率仅为 4.1%。本文采取动态更新预测结果, 根据图 6 和式(14)对不同运动速度的终端设置不同的时隙时长, 再对切换预测结果进行动态更新。而文献[9]中静态图忽略了终端的运动, 因此切换失败率和不必要切换率明显高于本文算法。通过对比可以看出, 本文的切换预测方法的切换效率相比于静态图有很大程度的提升。

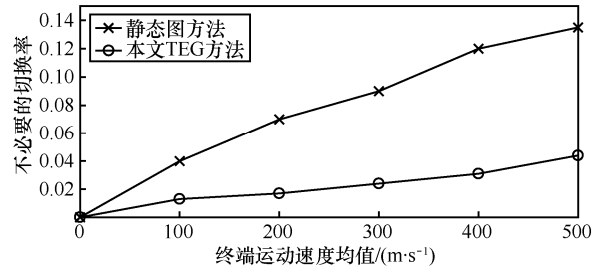


图 12 不必要的切换率

5 结束语

星间切换问题是卫星移动通信中需要解决的关键问题, 本文重点考虑了终端运动对星间切换的影响, 并分析了单颗卫星对运动终端的覆盖时长。通过分析得出, 当终端运动速度较高时, 其将对切换预测结果产生较大影响。因此本文采用 GM 模型对终端运动进行建模, 采用 TEG 模型对运动终端的星间切换进行建模分析, 并提出一种最短路径动态更新算法来动态更新切换预测结果。仿真结果表明, 本文的切换预测方法相较于静态图预测方法可以更准确地得到终端在不同运动速度下的切换路径, 有效减少切换失败率和不必要的切换率。

参考文献:

- [1] LI T, ZHOU H, LUO H, et al. SAT-FLOW: multi-strategy flow table management for software defined satellite networks[J]. IEEE Access, 2017, PP(99): 1.
- [2] RAHMAN M, WALINGO T, TAKAWIRA F. Adaptive handover scheme for LEO satellite communication system[C]//IEEE Africon. 2015: 1-5.
- [3] 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.
- [4] CHEN Y, FANG B, ZHANG S, et al. Satellite multi-beam coverage analysis for handover rate reduction[C]//The 2014 Sixth International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). 2014: 1-6.
- [5] GKIZELI M, TAFAZOLLI R, EVANS B. Modeling handover in mobile satellite diversity based systems[C]//Vehicular Technology Conference. 2001: 131-135.
- [6] GKIZELI M, TAFAZOLLI R, EVANS B G. Hybrid channel adaptive handover scheme for non-GEO satellite diversity based systems[J]. IEEE Communications Letters, 2001, 5(7): 284-286.
- [7] PAPANETROU E, KARAPANTAZIS S, DIMITRIADIS G, et al. Satellite handover techniques for LEO networks[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2010, 22(2):

231-245.

- [8] SEYEDI Y, SAFAVI S M. On the analysis of random coverage time in mobile LEO satellite communications[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(5): 612-615.
- [9] 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.
- [10] WANG Y, ZHANG G, JIANG Z, et al. A novel routing algorithm design of time evolving graph based on pairing heap for MEO satellite network[C]// Vehicular Technology Conference. 2014: 1-5.
- [11] LIU R, SHENG M, LUI K S, et al. An analytical framework for resource-limited small satellite networks[C]// IEEE Communications Letters. 2016: 388-391.
- [12] 李广侠, 郦苏丹, 冯少栋. 切换保留信道与新呼叫排队相结合的 LEO 星座通信系统信道分配方案研究[J]. 通信学报, 2006, 27(9): 135-140.
- LI G X, LI S D, FENG S D. Channel assigning scheme study in LEO constellation communication system combining handover reserving strategy and new call queuing[J]. Journal on Communications, 2006, 27(9): 135-140.
- [13] ZHU X, LI M, XIA W, et al. A novel handoff algorithm for hierarchical cellular networks[J]. China Communications, 2016, 13(8): 136-147.
- [14] XIAO B, CAO J, SHAO Z, et al. An efficient algorithm for dynamic shortest path tree update in network routing[J]. Journal of Communications & Networks, 2012, 9(4): 499-510.

[作者简介]



胡欣 (1985-), 男, 湖北襄阳人, 博士, 北京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智能信号处理、空间和地面信息集成以及航空航天电子信息综合等。

宋航宇 (1994-), 女, 河南洛阳人, 北京邮电大学硕士生, 主要研究方向为卫星移动通信、无线资源管理等。

刘帅军 (1988-), 男, 河北邢台人, 北京邮电大学博士生, 主要研究方向为卫星移动通信、机器学习和动态资源管理等。

李秀华 (1964-), 女, 天津人, 博士, 北京邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为物联网、纳米材料在电子及通信领域应用的研究等。

王卫东 (1967-), 男, 内蒙古包头人, 博士, 北京邮电大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、无线资源管理、物联网和信号处理等。

汪春霆 (1965-), 男, 江西南昌人, 博士, 中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信。