

基于星间链路状态的低轨卫星网络路由算法

张路¹, 燕锋¹, 章跃跃², 夏玮玮¹, 谢晔², 石云堦², 沈连丰¹

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏南京 210096; 2. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109)

摘要: 低轨卫星通信网络可以提供全球覆盖的低延迟服务, 但是低轨卫星网络拓扑的频繁变化给路由设计带来了挑战。针对低轨卫星通信网络拓扑快速变化的问题, 提出一种基于星间链路状态的路由算法, 在卫星的实际坐标和相对位置关系的基础上, 建立了逻辑拓扑结构, 并计算路由跳数、传输方向和优先级, 进而确定路由路径。针对链路故障问题, 实时检测链路状态, 并利用链路状态信息进行路由修正。在 NS3 仿真软件中进行仿真验证, 结果表明: 与传统星间路由算法相比, 该算法实施简单, 并能有效降低链路故障的影响, 使丢包率降低 20%, 传输时延约为 200 ms。

关键词: 卫星通信; 链路状态; 路由算法; 低轨卫星; NS3 仿真

中图分类号: TN 927.2

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2021.04.013

LEO Satellite Routing Algorithm Based on Inter-Satellite Link State Information

ZHANG Lu¹, YAN Feng¹, ZHANG Yueyue², XIA Weiwei¹, XIE Ye²,

SHI Yunchi², SHEN Lianfeng¹

(1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Low earth orbit (LEO) satellite communication network can provide low latency services with global coverage. However, the frequent changes of the network topology bring great challenges to design efficient routing algorithms. In order to solve the problem of rapid dynamic topology changes of LEO satellite communication network, a routing algorithm based on the inter-satellite link state information is proposed. In the algorithm, the actual physical coordinates and relative positions of satellites are used to establish the logical topology, and the hop count, transmission direction, and priority of transmission are calculated. Then, the initial routing path is determined. In addition, the routing algorithm uses real-time detected link state information to forward data in link failure scenarios. The algorithm is verified by NS3 simulator. The simulation results show that compared with the traditional inter-satellite routing algorithm, the algorithm is simple to implement, can effectively reduce the impact of link failure, and reduce the packet loss rate by 20%. The transmission delay obtained by the simulation is about 200 ms.

Key words: satellite communication; link state; routing algorithm; low earth orbit (LEO) satellite; NS3 simulation

0 引言

天地一体化信息网络^[1-3]是由天基骨干网、天基接入网和地基节点网组成, 以传统地面移动网络为基础, 以卫星、航天器等组成的天基网络为主, 可以

为海陆空各类用户提供时空连续、高可靠通信服务的信息网络。作为天地一体化信息网络的重要组成部分, 卫星网络通过星间链路和组网技术为全球范围内的用户提供通信服务, 可以弥补地面网络在

收稿日期: 2020-12-01; 修回日期: 2021-03-10

基金项目: 上海航天科技创新基金(SAST2018-099)

作者简介: 张路(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信网络中的路由算法等。

通信作者: 燕锋(1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为天地一体化网络、卫星通信网络等。

覆盖范围和全天候移动接入服务等方面的缺陷。

卫星网络中,与中轨(Medium Earth Orbit, MEO)和地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星相比,低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星具有发射成本低、传输时延小和传输能量损耗低等特性,并且可以通过卫星组网的方式实现全球覆盖。国外SpaceX公司提出的“星链”计划将搭建由约1.2万颗卫星组成的全球宽带卫星星座。此外,中国航天科技集团公司提出的“鸿雁”计划^[3],预计将由300颗LEO卫星组成,可提供全时段、全天候的通信服务。同时,中国航天科工集团提出的“虹云工程”^[3]计划发射156颗卫星,旨在构建覆盖全球的低轨宽带卫星通信系统。

为了更好地利用卫星网络构建天地一体化网络,不仅要解决卫星高速运动带来的网络拓扑快速变化的问题,还要在大规模的卫星星座网络中选择合适的路由^[4-11]。目前,根据应对卫星网络拓扑结构动态变化的方法,路由算法主要分为两种^[4]:一种是集中式路由^[5-7],此种路由利用卫星轨道的周期性划分多个时间片,由地面站计算每个时间片内静态拓扑的路由,其余卫星节点只需要存储路由表,不需要进行实时计算,但是这种方法很难应对链路拥塞和卫星故障等突发情况;另一种是分布式路由^[8-9],此种路由没有中心节点,由星座中的每颗卫星实时计算路由,可以应对突发状况,但是这种路由方法对卫星的处理能力要求高,且单颗卫星较难获取全局网络拓扑信息。

在虚拟拓扑结构和链路状态信息的基础上,刘永健等^[9]提出了一种分布式的路由算法,利用低轨卫星网络的周期性和可预测性,计算出静态拓扑的序列,并根据节点的实时链路状态,更新节点的动态路由表,但此种路由方法既需要存储静态序列,又需要动态获取链路状态,路由算法过于复杂。潘恬等^[10]提出了一种轨道预测最短路优先(Orbit Prediction Shortest Path First, OPSPF)的路由算法,利用LEO卫星星座的规律性,并进行周期性路由计算,同时以按需方式处理链路故障引起的拓扑不规则变化,虽然路由收敛快,但是在丢包率和端到端时延方面性能较差。

针对其他路由算法难以应对卫星突发故障及易出现网络拥塞等问题,本文提出了一种基于星间链路状态信息的路由算法。该算法在链路状态检

测阶段,周期性获取链路状态信息,并在本地记录12条星间链路状态信息;在路由计算阶段,利用卫星之间的相对位置关系,计算初始路由路径;在路由修正阶段,查本地链路状态表,对初始路由路径进行修正。与其他路由算法相比,本文中的路由算法复杂度低,并能有效应对网络拥塞和卫星故障等问题,具有较好的鲁棒性。

1 系统模型

1.1 信息网络模型

如图1所示,本文采用的天地一体化信息网络模型由地面网络和低轨卫星星座网络构成,地面网络由分布在全球的地面站和终端节点组成,低轨卫星星座网络由LEO卫星组网构成,LEO卫星间存在星间链路,LEO卫星与地面站之间存在馈电链路,LEO卫星与终端节点之间存在用户链路。为提供全时段、全天候的通信服务,需要保证地面站或终端节点在任意时刻至少被一颗LEO卫星覆盖。同时,因单颗卫星为某个地面站提供服务的时间有限,需要采用距离最短、时延最小和持续时间最长等路由切换策略以保证持续的通信服务。

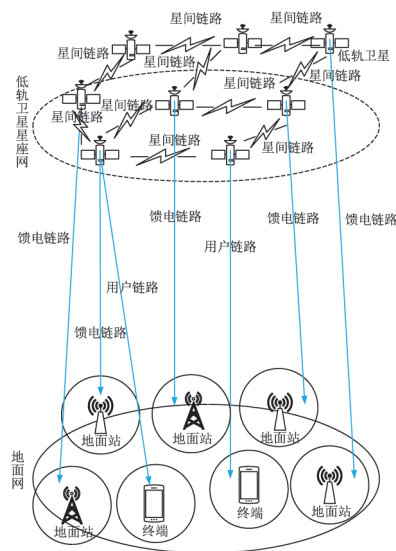


图1 信息网络模型

Fig.1 Information network model

1.2 低轨卫星星座网络

本文采用的极轨道低轨卫星星座作为信息网络中的天基网络,如图2所示,低轨卫星星座网络由

M 个轨道面组成,每个轨道面均匀分布着 N 颗卫星,每颗卫星一般有 4 个邻居卫星。初始时刻,根据卫星所在轨道面和水平面,为卫星设置逻辑地址 (i, j) ,表示第 i 平面的第 j 颗卫星。极轨道模型中存在

一条反向缝,反向缝两侧卫星的运动方向相反,且卫星高速运动,难以建立稳定的星间链路。此外,在卫星经过极地地区时,卫星运动速度快,难以建立长时间稳定的星间链路。

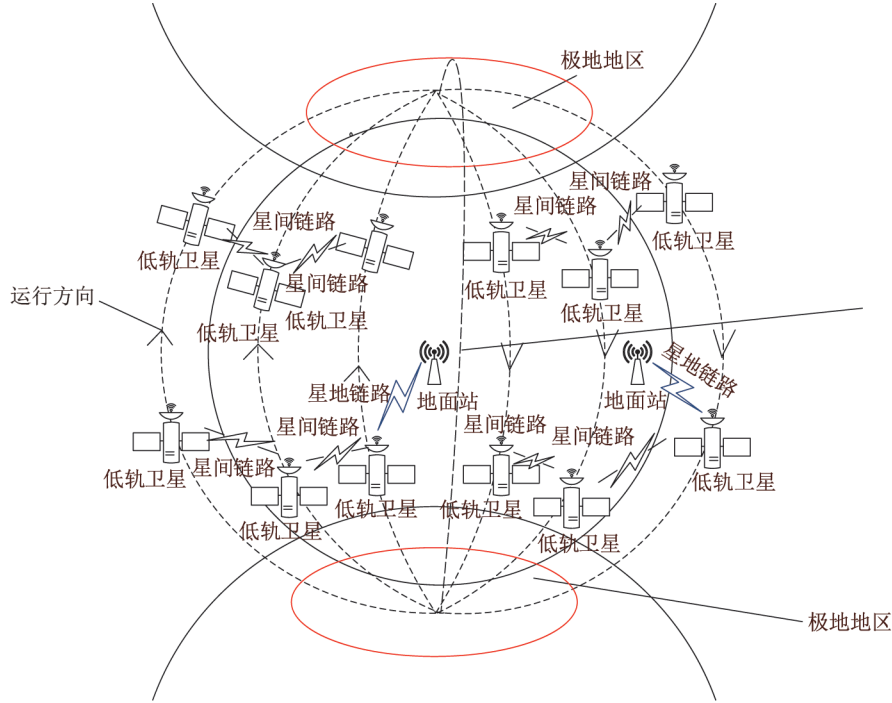


图2 极轨道星座模型

Fig.2 Polar orbit constellation model

1.3 通信链路

本文考虑的场景中,通信链路主要有星间链路、馈电链路和用户链路。

星间链路是指卫星之间的通信链路,主要分为轨道内链路和轨道间链路。轨道内链路长度仅与地球半径、轨道高度和轨道内卫星数目有关,系统中这 3 个参数均相同,故轨道内链路长度一样;轨道间链路长度与地球半径、轨道高度、轨道个数和卫星所在纬度有关,故纬度越高,轨道间链路长度越短。卫星间的信道模型可以使用自由空间传播模型。

用户链路是指用户终端到卫星之间的通信链路。馈电链路是指卫星和地面站之间的链路。用户链路和馈电链路需要考虑自由空间损耗^[12-14]、雨水吸收造成的雨衰^[13]、大气散射造成的损耗^[12-14]、电离层和极化损耗带来的影响。由于自由空间损耗一般占星地链路衰减的 90% 以上,为简化模型,考

虑用近似值来表示雨衰和大气衰减等的影响。

考虑自由空间传播模型,接收信号的功率 P_R 为

$$P_R = P_T G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

式中: P_T 为发射天线功率; G_T 为发射天线增益; G_R 为接收天线的增益; d 为传输距离; λ 为通信的波长。

自由空间传播模型为

$$L_f = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_u}{\lambda_u} \right) = 32.45 + 20 \lg d_u + 20 \lg f_u \quad (2)$$

式中: f_u 为信号频率; d_u 为传输距离; λ_u 为信号波长。

卫星通信中,衡量通信链路质量的信噪比可以表示为载噪比 $[C/N]$,链路余量^[14]可用于判断通信链路是否满足通信要求,只要链路余量大于 0,则该通信链路满足要求。链路余量计算公式为

$$M = \left[\frac{C}{N} \right] - \left[\frac{C}{N} \right]_{th} \quad (3)$$

式中: $[C/N]$ 为链路总载噪比; $[C/N]_{th}$ 为接收机的

门限载噪比。

2 路由算法

本文提出的基于星间链路状态的路由算法分为链路状态检测、路由计算及路由修正阶段,路由流程如图 3 所示。

首先,根据故障链路数目设置链路检测周期,

周期性获取星间链路状态,并在本地链路状态表中动态维护 12 条链路的状态。当有路由请求时,根据源卫星和目的卫星间相对位置,确定路由跳数、传输方向和轨道间数据转发时机,并为数据包计算初始路由路径。然后,路径中的卫星根据本地链路状态表,对初始路由路径进行改正,并进行数据转发。

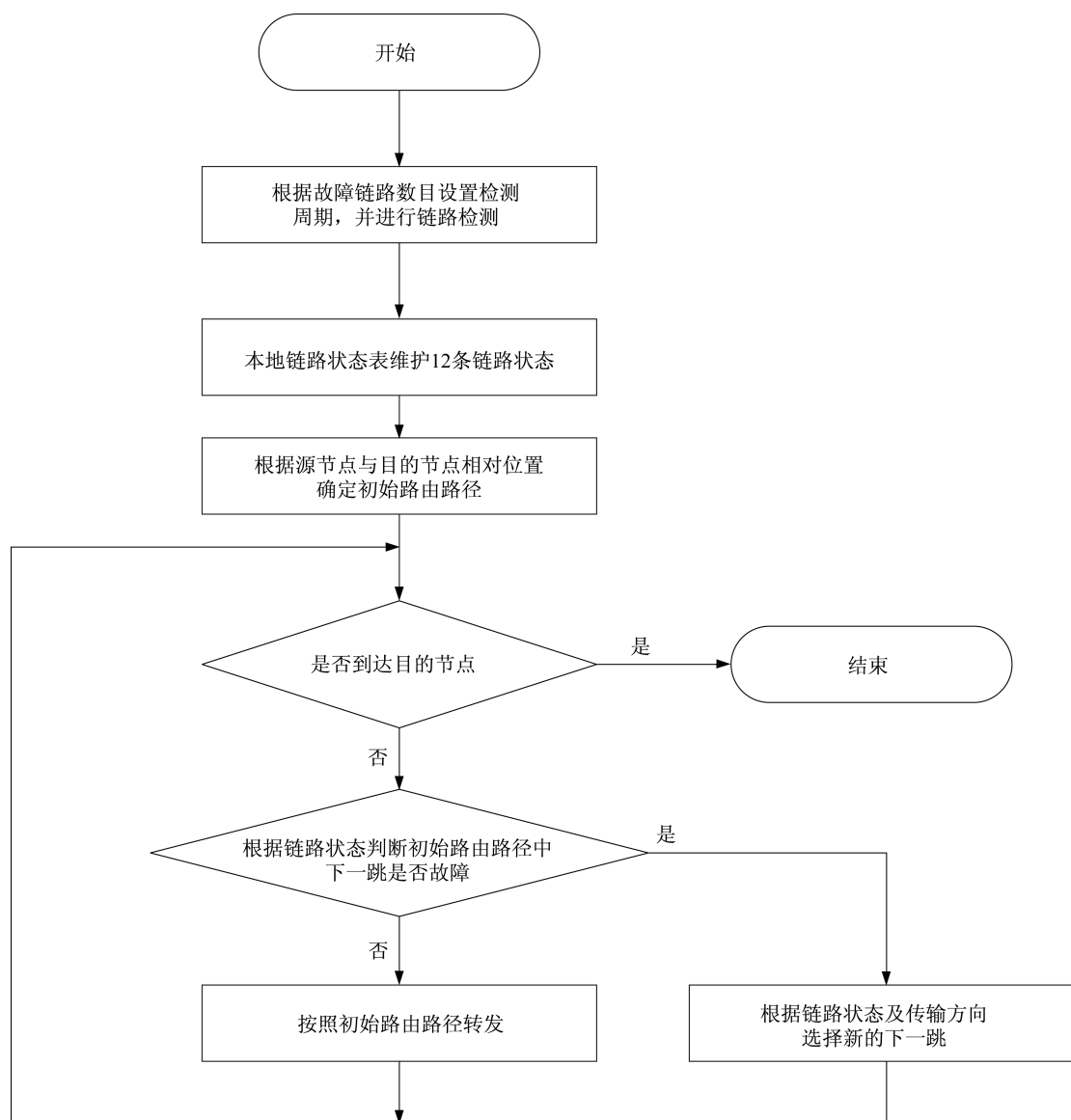


图 3 路由算法流程图

Fig.3 Flow chart of the routing algorithm

2.1 链路状态检测

首先,根据 LEO 卫星运行周期计算拓扑变化周期,设 LEO 卫星绕地周期为 T ,设单轨道内有 N 颗

卫星,记 T/N 为拓扑变化周期 T_h ,即最多经过 T_h 时间将有一颗新卫星进入极地地区,进而卫星网络逻辑拓扑发生变化。

考虑到网络中故障链路数目不固定,存在故障

链路较多和故障链路较少的时刻,本文根据网络中故障链路数目设置发送 hello 包的检测周期 T_d ,共有 3 种级别,分别为 T_h 、 $T_h/2$ 和 $T_h/3$,正常情况下,检测周期 T_d 设置为 $T_h/2$ 。当故障链路数超过一定阈值时,设置检测周期 T_d 为 $T_h/3$,可以更快发现链路故障;当故障链路数低于一定值时,不需要频繁进行链路检测,设置检测周期 T_d 为 T_h ,可以减少发送 hello 包的开销。如果在检测周期 T_d 内,没有收到邻居卫星的 hello 包,则认为与该卫星的链路故障,并周期性检测链路是否恢复。

在卫星网络中,每颗卫星按照检测周期 T_d 周期性检测与 4 个邻居间的链路状态,并把上述 4 条链路状态在自身轨道面和相邻轨道面进行广播。同时,每颗卫星在本地链路状态表中动态维护如图 4 所示的 12 条链路的状态,状态包括正常和故障。

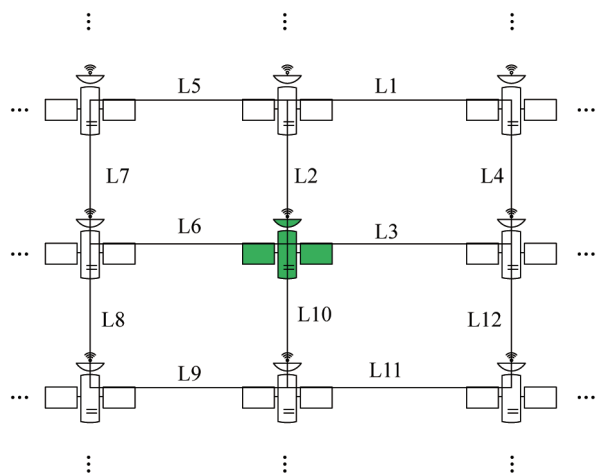


图 4 12 条星间链路

Fig.4 12 inter-satellite links

2.2 路由计算

在路由算法中,选择距离地面源节点最近的卫星作为源卫星(S_i, S_j),选择距离地面目的节点最近的卫星作为目的卫星(D_i, D_j),根据逻辑地址间的关系,可以获取路由跳数、传输方向及传输时机。路由计算包括以下步骤:

步骤 1 确定轨道间路由跳数为 $|S_i - D_i|$ 和轨道内路由跳数为 $\min\{|S_j - D_j|, N - |S_j - D_j|\}$ 。

步骤 2 根据 4 个邻居的逻辑地址与自身逻辑地址间的大小关系,确定轨道间传输方向和轨道内传输方向。如邻居能使轨道间跳数减小,则该方向为轨道间传输方向;如邻居能使轨道内跳数减小,

则该方向为轨道内传输方向。

步骤 3 判断轨道间传输的时机:1) 如果在同一轨道面内,只需要进行轨道内数据传输;2) 根据轨道间链路长度,选择最短的链路进行轨道间数据传输;3) 如果源卫星和目的卫星均位于极地地区,因极地区域无法进行轨道间数据传输,需将数据包通过距离极地最近的卫星中继;4) 如果源卫星和目的卫星中有且仅有一颗位于极地地区,在最接近极地区域且存在轨道间链路的卫星进行轨道间数据传输。

步骤 4 根据路由跳数、传输方向和轨道间传输时机可确定初始路由路径。

2.3 路由修正

路由修正阶段,根据路由计算得到的传输方向,确定链路状态表中需要用的 4 条链路状态,并利用传输方向和链路状态进行路由修正。路由修正包括以下步骤:

步骤 1 当前卫星到路由路径中的下一跳卫星之间的链路正常,则按照初始路由转发数据。

步骤 2 根据本地链路状态表中在传输方向上的 4 条链路的故障情况,选择下一跳路由。1) 如果当前要进行轨道内数据传输,且故障,则先进行一次轨道间数据传输;2) 如果当前要进行轨道间数据传输,且故障,则先进行一次轨道内数据传输;3) 如果当前需进行轨道内数据传输,下一跳为轨道间数据传输,且该轨道间链路故障,则在当前节点进行轨道间数据传输;4) 如果当前需进行轨道间数据传输,下一跳为轨道内数据传输,且该轨道内链路故障,则在当前节点进行轨道内数据传输。

步骤 3 如果源卫星和目的卫星在同一水平面或同一轨道面内,且存在链路故障,则必须利用邻居水平面或邻居轨道面进行中继。

星间链路故障场景的例子如图 5 所示,源卫星为 (1,1),目的卫星为 (5,5)。路由初始化阶段,通过卫星节点间的逻辑地址关系,得出需要进行的轨道间路由跳数为 4,轨道内路由跳数为 4,轨道间传输方向为右,轨道内传输方向为上,因靠近极地地区轨道间链路较短,所以优先通过 (1,5) 所在的平面进行轨道间数据传输,初始路由路径为 (1,1)→(1,2)→(1,3)→(1,4)→(1,5)→(2,5)→(3,5)→(4,5)→(5,5)。路由修正阶段中,因链路 a 故障,满

足路由修正步骤 2 中的条件 1), 选择先进行一次轨道间数据传输, 下一跳卫星为 (2, 1), 然后可进行轨道内数据传输, 到达卫星 (2, 4); 因链路 c 故障, 满足

路由修正步骤 2 中的条件 3), 进行轨道间数据传输到 (3, 4); 再根据路由计算阶段的传输方向及轨道间传输时机, 进行路由, 最终到达目的卫星。

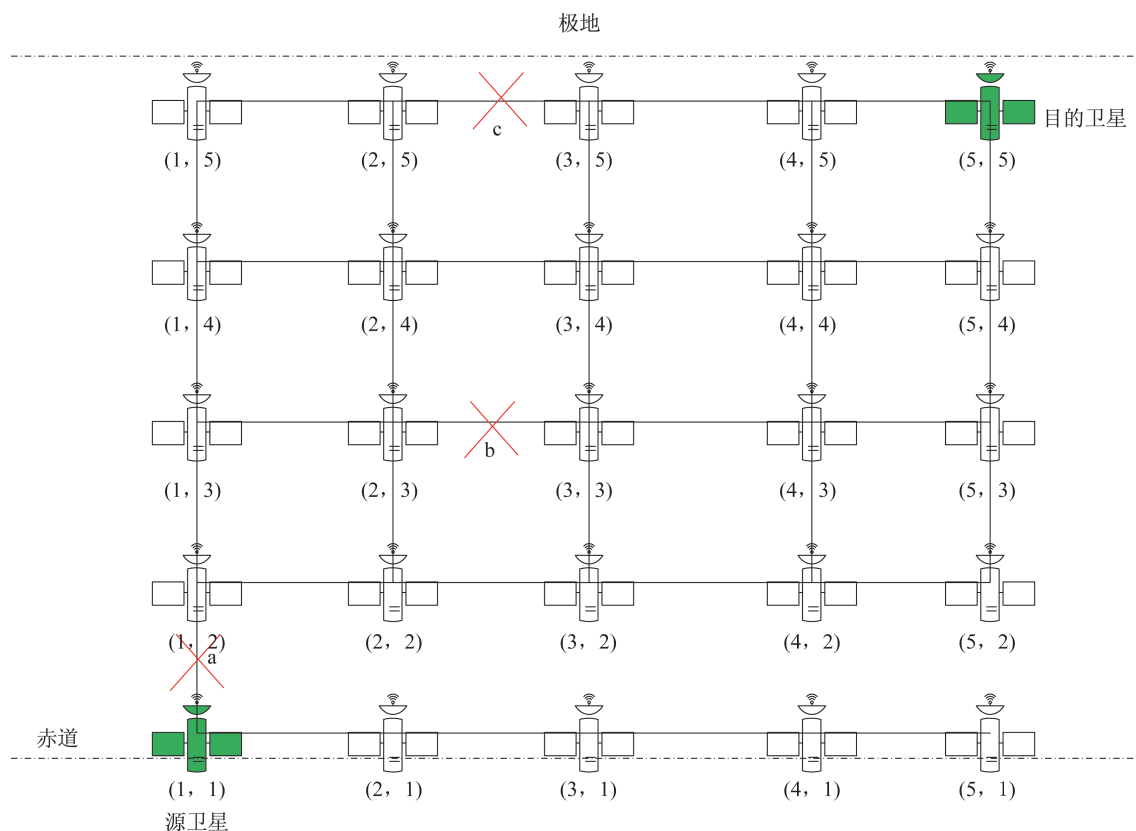


图 5 星间链路故障场景

Fig.5 Inter-satellite link failure scenario

2.4 复杂性分析

路由算法分为链路状态检测、路由计算和路由修正阶段。在链路状态检测阶段, 卫星需要将 4 个邻居之间的链路状态周期性广播给自身所在轨道面和相邻轨道面的卫星, 复杂度为 $O(N)$; 在路由计算阶段, 根据源卫星与目的卫星间的逻辑地址关系确定路由跳数和传输方向为常数操作, 确定轨道间数据转发时机需要比较轨道间链路长度, 复杂度为 $O(N)$, 根据路由跳数、传输方向和轨道间数据转发时机确定路由路径为常数操作; 路由修正阶段, 根据本地链路状态表进行路由修正的操作次数与路径中卫星个数有关, 复杂度为 $O(N)$ 。

3 仿真及结果分析

本文基于 STK 和 NS3 对路由算法进行仿真,

根据轨道参数递推轨道^[15], 同时, 利用 STK 搭建 LEO 卫星网络模型, 在 STK 中可仿真链路的保持时间。此外, 通过 Matlab 与 STK 互联接口, 可以输出 TLE 格式轨道数据, 再将 TLE 数据转换格式为 NS3 可读入的数据, 输入到 NS3 进行性能仿真。

3.1 仿真参数

考虑到覆盖全球的通信范围要求, 本文设计一种极轨道星座模型, 如图 6 所示。该模型中有 12 个轨道面, 每个轨道面有 12 颗卫星, 共计 144 颗卫星组成。此模型中的卫星切换频率和星间链路长度可以满足通信质量要求, 同时该模型中卫星与相邻的 4 个邻居始终满足可视性原则^[16]。仿真采用的星座模型参数见表 1。

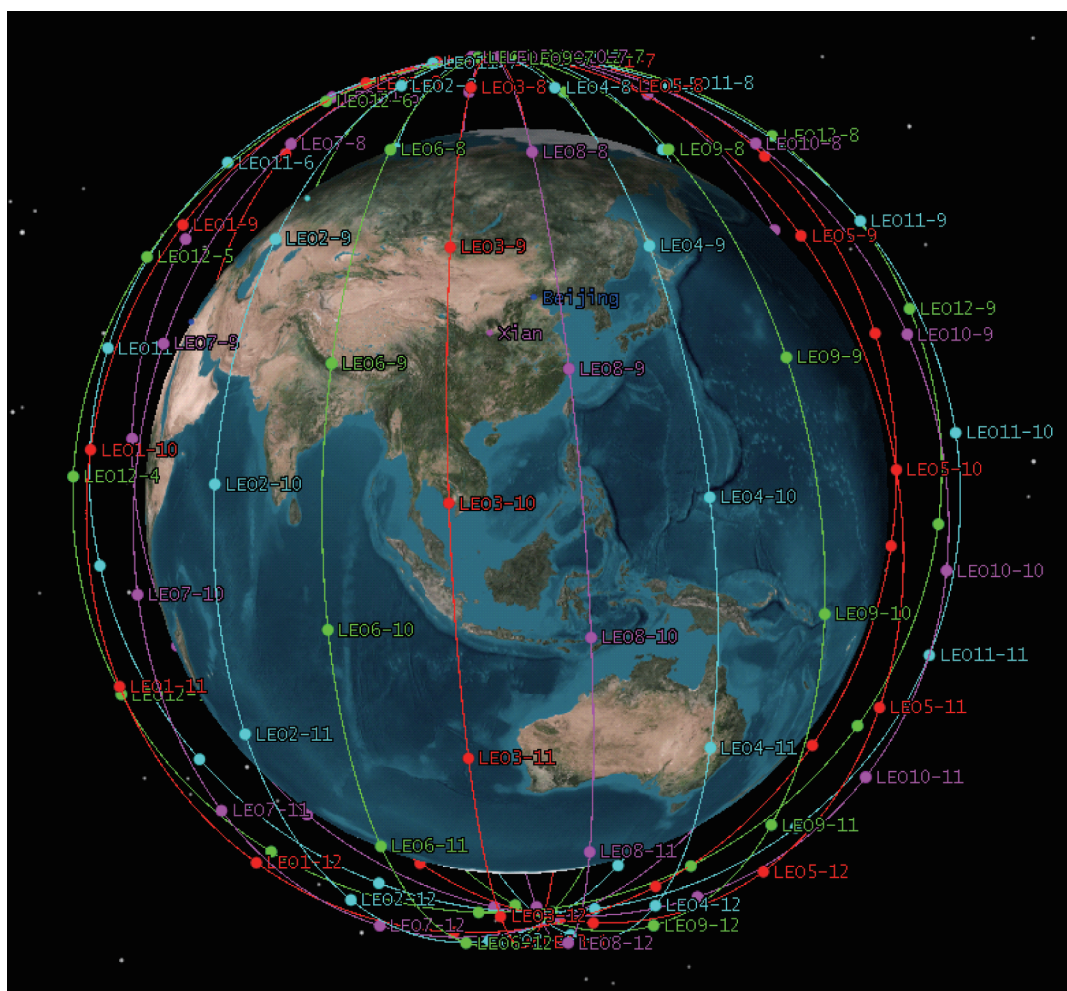


图 6 STK 中 144 颗卫星星座模型

Fig.6 144 satellites constellation model in STK

表 1 星座模型参数

Tab.1 Constellation model parameters

LEO 极轨道星座参数	数值
轨道面数	12
轨道面内卫星数	12
轨道倾角/(°)	86.5
轨道高度/km	1 200

3.2 结果分析

第 8 个轨道面的卫星与北京地面站之间的馈电链路切换情况如图 7 所示,实线部分为当前时间该链路可为北京站提供通信服务。由图 7 可知,本文采用的 144 颗卫星星座模型可以很好地为地面站提供全时段、全天候的通信服务,同时卫星与地面站间的馈电链路可以保持 20 min 以上,满足服务要求。

不同路由跳数下的平均时延随仿真时间变化的

趋势如图 8 所示。随仿真时间的增加,本文提出的路由算法在不同路由跳数情况下都趋向于平稳,其中路由平均跳数为 5 时,平均时延接近 190 ms,路由平均时延在百毫秒级别。同时,随路由平均跳数增加,平均时延增加的幅度较小。在 800 s 时,路由平均跳数为 5 时的时延比路由平均跳数为 3 时高 30 ms 左右,其原因为路由平均跳数为 5 时,需要多进行两次路由转发,传输的距离更远,传输时延更高。

3 种路由的丢包率随仿真时间的变化趋势如图 9 所示。由图 9 知,本文提出的路由算法的丢包率最小,在仿真时间为 900 s 时,与基于虚拟拓扑的路由相比较,丢包率降低了 20%。其原因为路由计算过程中,本文提出的路由算法利用链路状态表存储的 12 条星间链路状态信息,可以修正路由路径,有效规避故障链路,缓解了链路故障导致的数据包丢失问题。

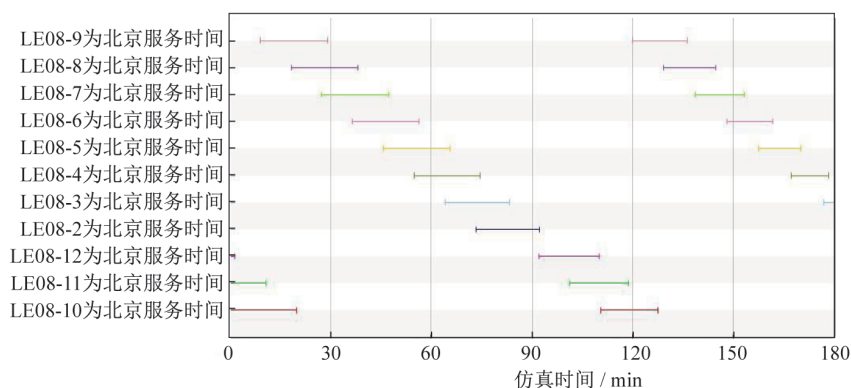


图 7 卫星与地面站间的链路服务时间

Fig.7 Service time of links between satellite and ground station

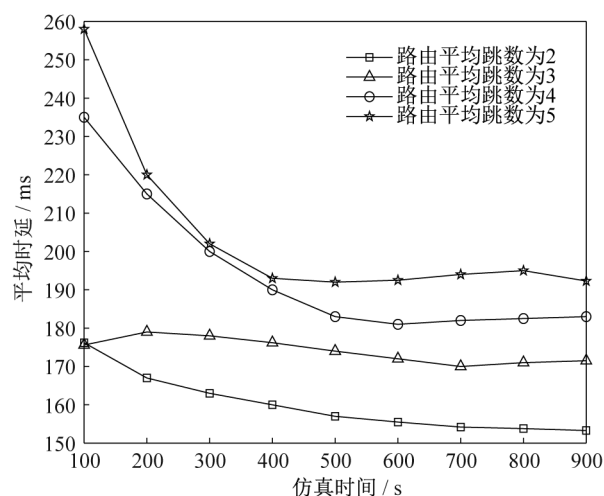


图 8 不同路由跳数下的平均时延比较

Fig.8 Comparison of the average delay in different routing hops

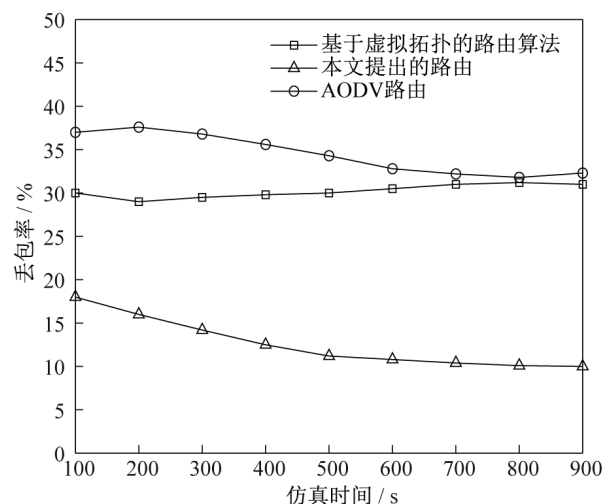


图 9 不同路由的丢包率比较

Fig.9 Comparison of the packet loss rate for three routing algorithms

4 结束语

本文研究了基于链路状态信息的星间路由设计问题,在链路故障检测阶段,根据当前网络中故障链路数目,设置3种级别的检测周期,周期性获取链路状态信息并存储到本地链路状态表中。在路由计算阶段,根据源节点和目的节点的相对位置,计算初始路由路径。在路由修正阶段,查本地链路状态表,采用路由修正策略,选择合适下一跳。仿真结果表明:该算法可降低卫星通信中数据包的丢包率,并以较低时延进行路由转发。但本文考虑的是单层卫星系统下的星间路由设计,没有考虑多层卫星网络的设计,而多层卫星网络可以更好地满足多媒体服务要求,因此,后续研究将考虑研究多层卫星网络下的路由问题。

参考文献

- [1] 梁浩,陈福才,季新生,等.天地一体化信息网络发展与拟态技术应用构想[J].中国科学:信息科学,2019,49(7):799-818.
- [2] 李贺武,吴茜,徐恪,等.天地一体化网络研究进展与趋势[J].科技导报,2016,34(14):95-106.
- [3] 李健.天地一体化信息网络中的星间路由与星地协同传输机制研究[D].合肥:中国科学技术大学,2020.
- [4] 张悦.低轨卫星网络路由算法研究[D].西安:西安电子科技大学,2019.
- [5] JIANG W J, ZONG P. An improved connection-oriented routing in LEO satellite networks[C]// 2010 WASE International Conference on Information Engineering. New York: USA: IEEE Computer Society, 2010: 296-299.
- [6] TAN H C, ZHU L D. A novel routing algorithm based on virtual topology snapshot in LEO satellite networks

- [C]// 2014 IEEE 17th International Conference on Computational Science and Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 357-361.
- [7] LU Y, ZHAO Y J, SUN F C, et al. Dynamic fault-tolerant routing based on FSA for LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Computers, 2013, 62(10):1945-1958.
- [8] LIU H Y, SUN F C, YANG Z A, et al. A novel distributed routing algorithm for LEO satellite network [C]//2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. New York: USA: IEEE Computer Society, 2012: 37-40.
- [9] LIU Y J, LIU C Y. Distributed dynamic routing algorithm for satellite constellation [C]// 2018 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Amsterdam: Elsevier, 2018: 300-304.
- [10] PAN T, HUANG T, LI X C, et al. OPSPF: orbit prediction shortest path first routing for resilient LEO satellite networks [C]// 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Washington D. C., USA: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [11] CHEN M, ZHANG R Y, PU F L, et al. Fast updating routing table method based on chord algorithm in distributed satellite network[J]. 上海航天(中英文), 2020, 37(增刊1):96-104.
- [12] 李云,周旋,刘期烈,等. 卫星通信链路性能分析[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(12):78-82.
- [13] MANDEEP J S, HUI O W, ABDULLAH M, et al. Modified ITU-R rain attenuation model for equatorial climate [C]// 2011 IEEE International Conference on Space Science and Communication. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 89-92.
- [14] 张甜甜,陈龙,袁卫文,等. Ka 波段数字信道化体制宽带通信卫星链路预算[J]. 上海航天, 2017, 34(6): 50-57.
- [15] 温渊,白沐炎,易灵,等. 低轨卫星高精度轨道递推算法研究[J]. 上海航天, 2019, 36(增刊2):14-17, 29.
- [16] 罗大成,刘岩,刘延飞,等. 星间链路技术的研究现状与发展趋势[J]. 电讯技术, 2014, 54(7):1016-1024.

欢迎关注本刊微信公众号

为了加强《上海航天(中英文)》数字化、网络化建设以及信息化管理,扩大刊物宣传力度,本刊现已开通微信公众平台。关注微信公众号后,读者可查阅期刊发表论文,进行文章检索;作者可随时查询自己稿件的处理状态,了解期刊最新发展动态;编辑部能更便捷地加强编者、作者和读者之间的交流,促进学术沟通,创建学术共同体,扩大《上海航天(中英文)》期刊的学术影响力。

