

# LEO 卫星网络中的一种分布式路由算法

任洪波

(浙江大学计算机学院 杭州 310027)

**摘要** 在 LEO 卫星网络中,由于卫星高速运动导致的网络拓扑变化和不同卫星覆盖域内流量的非规整性给设计其特殊路由算法带来很大挑战。结合卫星网络的固有特点,本文提出一种基于路径信息压缩的分布式路由算法 CPDR (Compressed Path Information based Distributed Routing)。该算法使用分布式分层链路状态收集策略和简洁的路径信息编码机制,能够在不引入额外信令开销基础之上提供多路径路由能力,实现卫星网络中的流量负载平衡、优化网络带宽应用、提高星际链路利用率。

**关键词** 卫星网络,路由算法,链路状态,路径信息压缩

## A Distributed Routing Algorithm for LEO Networks

REN Hong-Bo

(Computer Science Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Due to high-speed movement of satellites around the earth and temporal variation of traffic intensity in certain regions, the dynamic topology of LEO satellite networks and variable traffic load in different satellite coverage areas pose special requirements to routing in ISL segment of network. Considering inherent characteristic of LEO satellite networks, a compressed path information based distributed routing algorithm is proposed in this paper. The algorithm can support multi-path routing capability without introducing additional signal overhead by using a distributed hierarchical link state collection policy and a compact path information coding scheme, so as to realize traffic load balancing and optimize utilization of costly spatial network resources.

**Keywords** Satellite network, Routing algorithm, Link state, Path information coding

## 1 引言

卫星网络在全球数据通信中正变得越来越重要。卫星网络不仅能够提供全球覆盖,具有连续的高带宽性能,而且还支持灵活和可扩展的网络配置<sup>[1]</sup>。当前,全球有一半以上的区域不能通过地面网络覆盖,通过使用卫星接口,在本地构建的网络可以很方便地与世界其他地方实现互联,并且卫星网络也可以作为地面网络的一个可选备份。

构建低地球轨道(LEO)卫星网络的一个技术挑战是开发特殊的路由算法<sup>[2,3]</sup>。主要原因体现在两个方面:第一,受太空自然环境的影响,LEO 卫星上设备的处理能力和存储容量都受到大大限制,而且卫星一旦发射就很难进行硬件升级;第二,由于 LEO 卫星的高速运动,导致卫星网络的拓扑结构快速动态变化,因此,这就使得所研究的路由算法应该具有使用较小的通信开销和处理能力计算出最优路径,并能够适应网络拓扑结构动态变化等特点,保证一定的服务质量。

本文结合 LEO 卫星网络的固有特点,提出了一种基于路径信息压缩的分布式路由算法 CPDR。CPDR 算法引入了显示源路由和全局路径信息编码的思想,通过使用分时模型和简洁的链路状态收集策略在星上建立近似实时的网络链路状态数据库,源端卫星根据链路状态数据库使用  $K$  路最短路径算法<sup>[4]</sup> 计算到目的端卫星的多条路径并对路径序列进行压缩编码,路径上中间节点卫星仅需依据路径信息编码实现分组转发。CPDR 算法能够在不引入额外信令开销基础之上提供多路径路由能力,同时实现了卫星网络中的流量负载平衡,提

高了星际链路利用率。

## 2 LEO 卫星网络体系结构

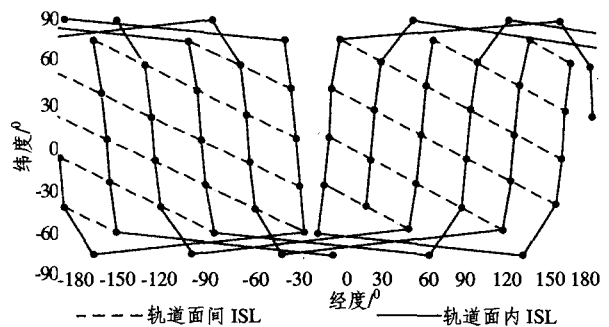


图 1 依系统卫星连接关系示意图

本文采用类似于依系统<sup>[5,6]</sup>的极地星座作为参考网络模型,图 1 给出了类似于依系统的 LEO 卫星网络中卫星连接关系示意图。图中,轨道面之间以  $30^\circ$  的角距离均匀分布且仅在南北极上空交错,各轨道面之上卫星按照  $32.7^\circ$  的角距离均匀分布。采用卫星逻辑位置的概念表示各卫星的地址,即任意一颗卫星都可以用二元组  $\langle P, S \rangle$  表示,其中  $P$  是轨道编号,取值范围是  $0 \sim 5$ ,  $S$  是卫星编号,取值范围是  $0 \sim 10$ 。不在缝隙两侧的卫星可以建立 4 条星际链路(ISL),分别与同轨道面和相邻轨道面的两颗邻居卫星相连;而缝隙两侧卫星因天线对准和跟踪技术限制,仅能建立 3 条 ISL,分别与同轨道面的两颗及同处于缝隙同侧的相邻轨道面的一颗邻居卫星相连。轨

道内 ISL 长度固定并能够始终维持连接关系,轨道间 ISL 则只能在极地区域边界(通常定义为南北纬 70°)以外建立,其长度和通断关系随链路两端卫星的物理位置变化而变化,当卫星向极地区域飞行时,其长度逐渐减小。

### 3 相关定义

#### 定义 1 虚拟拓扑图

根据卫星网络运转的周期,采用分时方法把运转周期  $T$  划分为  $n$  个时间片  $\Delta t$ 。在每个  $\Delta t$  内,卫星网络可以被看作一个静态的加权无向图  $\langle G_k = (V, E) \rangle$ ,  $V$  为所有卫星节点集合,  $E$  为所有星际链路集合,权值由链路传输时延和节点队列时延共同决定。称该图为卫星网络虚拟拓扑图。只要  $\Delta t$  取得足够小,可以假设星际链路长度和通断关系的改变仅在每个  $\Delta t$  的开始时刻  $t_0, t_1, \dots$  或  $t_n$  发生,因此动态的卫星网络拓扑被离散化为一组静态网络拓扑。显然,在任意时刻,卫星网络的当前时间都可以映射到一个系统周期的某个时间片  $\Delta t$  内。我们把网络状态从一个时间片转换至其后续时间片的行为称为时间片切换。

#### 定义 2 队列时延

用单个时间片内的队列时延平均值来描述流量变化情况,通过检测出口队列的分组数量计算期望的队列时延。设某分组在时刻  $t$  进入给定出口队列,则其期望的队列时延  $T_{exp}$  为

$$T_{exp}(t) = n(t) \times \frac{L_{av}}{C} \quad (1)$$

其中  $L_{av}$  为队列中的平均分组长,  $C$  是链路容量,  $n(t)$  是在时刻  $t$  时队列中分组的数量。设某时间片在  $t_s$  时刻开始,则分组在该时间片内的期望平均队列时延可以按下式计算:

$$T_{exp-av} = \frac{1}{\Delta t} \times \int_{t_s}^{t_s+\Delta t} n(t) \times \frac{L_{av}}{C} \times dt \quad (2)$$

#### 定义 3 链路代价度量

用星际链路长度和星上流量负载大小作为链路代价度量的因子<sup>[7]</sup>,其中星际链路长度变化用传输时延  $T_p$  来描述,而网络中流量负载的变化用链路的出口队列时延表示,考虑到时延的可加性,链路代价度量  $L_{cost}$  可以表示为传输时延和队列平均时延之和:

$$L_{cost} = T_p + T_{exp-av} \quad (3)$$

### 4 基于路径信息压缩的分布式路由算法

CPDR 算法分为两部分:网络链路状态数据库建立阶段和路径计算及压缩编码阶段。根据星座运行参数,通过使用分时模型和简洁的链路状态收集策略在星上建立实时的网络链路状态数据库。随后源端卫星根据链路状态数据库使用  $K$  路最短路径算法计算到目的端卫星的多条路径并对路径序列进行压缩编码,路径上中间卫星只需根据路径信息编码进行分组转发。

#### 4.1 网络链路状态数据库建立

在计算路由之前,各节点必须获知网络的全局状态信息,因此节点之间需要交换  $L_{cost}$  信息。文[8,9]中提出了一种分层的链路状态收集策略,通过定义轨道发言人和链路状态报告,首先由轨道发言人收集本轨道内所有卫星的链路状态报告并进行聚合,而后各发言人之间通过轨道间星际链路交换本轨道的链路状态报告,生成全网的链路状态数据库,最后由轨道发言人沿轨道内星际链路分发给同轨道上其他卫星。具

体过程可参见文[8,9]。

#### 4.2 路径计算和压缩编码

根据链路状态信息,在每个时间片内,源端卫星可以使用任何多路径路由算法计算到其它卫星节点的多路径,如  $K$  路-最短路径算法。所有节点必须使用同一多路径算法并且参数相同,同时运行 Dijkstra 最短路径算法计算缺省最短路径。

在给定时间片  $\Delta t$  内的加权无向图  $\langle G_k = (V, E) \rangle$  中,用  $P_j$  表示源端卫星  $i$  与目的端卫星  $j$  之间的多跳路径,假设该路径经过  $1, 2, \dots, m$  共  $m$  个中间节点,于是  $P_j$  可以唯一地表示为  $[S_i, l_1, S_1, l_2, S_2, \dots, l_m, S_j]$  的节点和路径组合序列。在传统的源路由机制中,分组需要在其头部携带此序列,显然将大大增加网络的信令开销。如果各节点都遵循某种机制对上述序列进行编码,同时编码具有较短长度并且能够保证其唯一性,则只需在分组头中携带经过压缩的路径编码信息即可实现低代价的多路径源路由。

为保证编码的绝对唯一性和简单性,使所有节点按照同一规范对其接口进行索引编码,这里我们采用 3 位对 LEO 卫星的星际链路进行编码(单颗卫星最多存在 4 条星际链路,从 1 开始编码,001、010、011、100,用 000 表示缺省路径)。如果自源端卫星开始发送分组至目的端卫星受到该分组的转发过程能够在一个时间片内完成,则中间节点在收到分组时只需根据自己的接口索引编码转发该分组。如图 2 所示,所有节点的 4 条 ISL 按照顺时针方向编码,箭头所指方向为某时刻一分组从源端卫星  $s$  到目的端卫星  $e$  所经历的链路,称编码后的索引序列为路径 ID。

从源端卫星发送分组时,路径 ID 为 001010001010001,最右面 3 位表示分组应该被转发至索引为 1 的接口(即到达邻居卫星  $a$  的接口),于是分组被转发至卫星  $a$ ,右移路径 ID 最右 3 位。路径上的后续节点按照同样的操作,直至分组被转发至节点  $e$ 。显然,如果以上操作能够在一个时间片内完成,源端卫星计算的路径 ID 不会因为链路状态信息的改变而改变。但是,如果分组在没有被传送到目的端卫星之前,卫星进行了时间片切换,则中间卫星需要进行路径有效性检查。

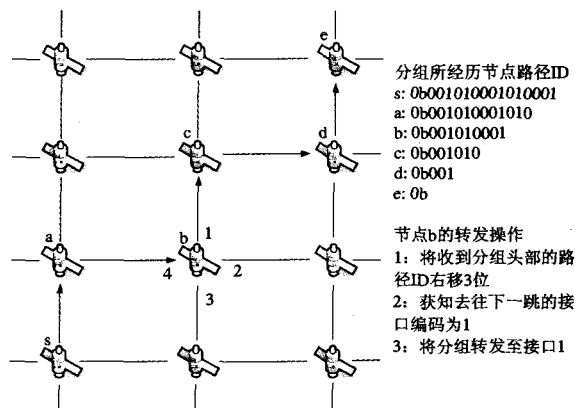


图 2 接口索引编码和数据转发示意图

#### 4.3 路径有效性检查

在路径 ID 最前面增加 1 位表示分组在到达目的端卫星之前是否经历了时间片切换,如图 3 所示,称该为位切换指示域。路径上的卫星根据切换指示域的值判断分组的 ID 是否仍有效。

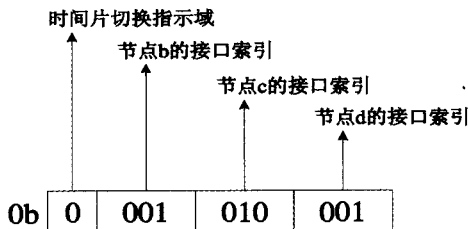


图3 增加切换指示域的路径 ID

切换指示域默认值设为 0, 在收到一个分组时, 中间卫星节点将在执行路径 ID 偏移操作前判断切换指示域是否被置 1, 如果是, 则将该分组的路径 ID 置为全 0, 并把该分组转发至缺省最短路径。如果切换指示域为 0, 则分组在到达本节点前没有经历过时间片切换, 此时需要判断分组被送达到下一跳之前是否会经历时间片切换。如果不会, 则按照正常的转发操作转发该分组。算法具体过程如下:

分组被转发至下一跳以前有两种经历时间片切换的可能: 该分组被送出当前节点前发生时间片切换和该分组从当前节点发送后在到达下一跳的路径上发生了时间片切换。针对第一种情况, 算法计算分组期望的队列时延, 如果该值超过当前时刻  $t$  到下次时间片切换的剩余时间 ( $T_R$ ), 则表明分组会在排队期间经历时间片切换。因此, 当前节点将该分组路径 ID 置全 0 并将其发送至缺省最短路径所指下一跳。对于第二种情况, 算法根据路径 ID 最右 3 位指示的接口计算到达下一跳的传输时延, 如果排队时延和传输时延之和超过了当前时刻距离下次时间片切换的剩余时间, 则表明分组在到下一跳的途中将会经历时间片切换。当前节点将切换指示域置 1, 但仍按照路径 ID 指示的接口转发该分组, 而将相关处理交给下一跳完成。

总之, 路径 ID 有效性验证的主要目的是判断分组在转发过程中算法是否会因时间片切换导致的链路状态不一致而产生环路。由于时间片长度一般为 30 秒~60 秒, 因此, 绝大部分分组会在一个时间片内完成从源到目的端卫星的传送, 节点不会因为验证路径 ID 有效性而降低其转发性能。

## 5 性能评价

通过算法复杂性分析和仿真实验评价 CPDR 算法的性能。

### 5.1 算法复杂性分析

算法的复杂性主要考虑端卫星计算多路径和路径 ID 有效性验证的代价。用  $n$  表示网络中卫星节点的数目, 计算源路由的复杂性为  $n \times C(k)$ ,  $C(k)$  为  $k$  路最短路径算法的计算复杂性。路径 ID 有效性验证与网络中节点数目无关, 其操作主要是比较和偏移运算, 其复杂性为  $O(1)$ 。因此, 算法的计算复杂性主要是在源端卫星运行  $k$  路最短路径算法的计算代价, 显然这在具有较少节点数目的卫星网络中是可以接受的。

算法需在星上存储以下内容: 链路状态数据库、多路径路由表和星际链路编码索引表, 其中链路状态数据库的大小为  $O(n^2)$ , 多路径路由表大小为  $k \times O(n)$ , 其中  $k$  为路径的数目, 而星际链路编码索引表大小仅为  $O(1)$ 。与其他星上路由算法相比, 我们的算法仅增加了星际链路编码索引表, 而由于每颗卫星最多仅有 4 条星际链路, 因此星际链路编码索引表所需空间开销可以忽略。因此, 新的算法并没有增加空间复杂性, 与其他星上路由算法是基本相等的。

## 5.2 仿真实验

Henderson 等最早扩展了 ns2, 增加了卫星网络模型, 使其能够支持极地 LEO 卫星网络、同步轨道卫星网络以及混合的卫星网络<sup>[6,10,11]</sup>。我们在此基础上实现了 CPDR 算法, 对其进行模拟, 并且与集中式最短路径算法和最小跳数算法进行比较。

仿真的网络模型采用第 2 节介绍的依星网络。地面终端与卫星间采用异步切换模式, 即各个终端间隔性(每 10s)地检查其服务卫星是否满足仰角要求。极地区域定义为南北纬  $70^\circ$ 。在高于纬度  $70^\circ$  的区域, 轨道面间 ISL 断开。由于没有越缝 ISL, 我们不考虑卫星间的链路切换问题。UDL 和 ISL 的带宽都配置为 100Mbit/s, 链路出口队列缓冲为 3Mbyte。设所有实验中平均发送的分组长度为 1000 字节, 链路容量即是 12500 分组/s, 而链路的出口队列缓冲大小为 3000 分组。

实验 1: 选取两个固定地面终端节点对, 分别位于哈尔滨(东经  $104.06^\circ$ , 北纬  $30.67^\circ$ ) 和乌鲁木齐(东经  $87.68^\circ$ , 北纬  $43.77^\circ$ )。每隔 60s, 配置位于哈尔滨的终端向位于乌鲁木齐的终端发送 ping, 并记录该 ping 所经历的单向时延, 总的模拟时间为 86400s (一个地球自转周期)。模拟结果如下:

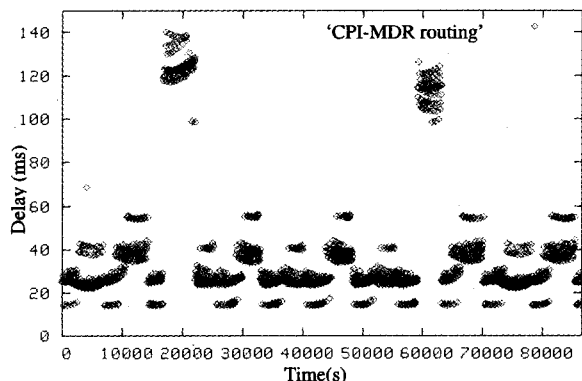


图4 CPDR 算法模拟结果

单向时延在 20000s 和 62000s 附近经历了两个高峰, 原因是在这两个时间段内, 依系统星座本身存在的缝隙正好跨越两个地面终端之间, 使得越缝分组必须绕过越缝, 从而导致较大的传输时延。

为检测网络负载较大时的性能, 引进背景流量, 使网络中有足够多的其他数据在传输, 并仅取链路出口队列缓冲大小为 100 个分组, 使要考察的分组发生拥塞和丢包的概率增加。我们选择背景总量为随时间离散增加, 模拟表明 CPDR 算法的丢包率为 0.2312%, 而集中式路由由算法的丢包率为 0.3896%, 而且随着背景流量的不断增加, CPDR 算法的丢包率性能更加明显优于集中式路由, 同时端到端时延性能也在一定范围内相对有所提高, 优于集中式路由。

实验 2(与最小跳数算法的比较): 每 2s 随机在地球表面选取两个终端, 并由它们发 ping, 记录该 ping 报文所经历的单向时延, 总的模拟时间为 20000s, 即测量 10000 个不同终端节点对之间的时延变化情况。图 5 给出了 CPDR 算法与最小跳数算法相比的单向时延平均差别和最大差别。

由图 5 可知 CPDR 算法和最小跳算法平均单向时延性能相当, 但最大值在 17ms 左右。这主要因为低纬度区域的轨道面间 ISL 比高纬度区域的轨道面间 ISL 长度相比大得多(0~2000km), 因此随着数据源和目的终端位置变化, 尽管路径

(下转第 94 页)

Angeles, CA, November 2003. 171~180

- 16 van Hoesel L, Havinga P. A lightweight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks [C]. In: 1st Int Workshop on Networked Sensing Systems (INSS 2004), Tokyo, Japan, June 2004
- 17 Kulkarni S, Arumugam M. TDMA service for sensor networks [C]. In: 24th Int Conf. on Distributed Computing Systems (IC-DCS04), ADSN Workshop, Tokyo, Japan, March 2004. 604~609
- 18 Datta S. RMAC: a randomized adaptive medium access control algorithm for sensor networks [C]. In: Proc. of SANPA'04, Boston, USA, Aug. 2004
- 19 Rhee I, Warrier A, Aia M, et al. Z-MAC: a Hybrid MAC for Wireless Sensor Networks [C]. In: ACM Sensys, 2005
- 20 Suh Changsu, Ko Young-Bae. A Traffic Aware, Energy Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. In: IEEE 2005 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS'05), May 2005
- 21 Liu Bao Hua, Bulusu N, Pham H et al. CSMAC: A Novel DS-CDMA Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. Accepted by IEEE GLOBECOM Wireless Ad hoc and Sensor Networks, Dallas Texas, 2004
- 22 Lu G, Krishnamachari B, Raghavendra C. An adaptive energy-efficient and low-latency MAC for data gathering in sensor networks. In: Int Workshop on Algorithms for Wireless, Mobile, Ad Hoc and Sensor Networks (WMAN), Santa Fe, NM, April 2004
- 23 van Hoesel L, Nieberg T, Kip H, et al. Advantages of a TDMA based, energy-efficient, self-organizing MAC protocol for WSNs [C]. In: IEEE VTC 2004 Spring, Milan, Italy, May 2004
- 24 Kulkarni S, Arumugam M. TDMA service for sensor networks [C]. In: 24th Int Conf. on Distributed Computing Systems (IC-DCS04), ADSN workshop, Tokyo, Japan, March 2004. 604~609
- 25 Langendoen K, Halkes G. Energy-efficient Medium Access Control [M]. In: Embedded Systems Handbook, CRC press, August 2005
- 26 Ye W, Heidemann J, Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C]. In: Proc. of 21st Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM). vol3. June 2002. 567~576
- 27 Cali F, Conti M, Gregori E. IEEE802. 11 Protocol: Design and Performance Evaluation of an Adaptive Backoff Mechanism [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18 (9): 1774~1786
- 28 Demirkol I, Ersoy C, Alagoz F. MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: a Survey [J]. Accepted to IEEE Communications Magazine, 2005
- 29 Zhang Shen, Datta A. A Directional-Antenna Based MAC Protocol for Wireless Sensor Networks [C]. In: Proc. of ICCSA, 2005. 686~695
- 30 Cui S, Goldsmith AJ, Bahai A. Energy-efficiency of MIMO and Cooperative MIMO in Sensor Networks [J]. IEEE Journal on Selected. Areas of Communications, 2004, 22(6)

(上接第 51 页)

跳数相同,但经过较低纬度轨道面间 ISL 的路径要比经过高纬度轨道面间 ISL 的路径所具有的时延大很多,从而出现少数峰值。

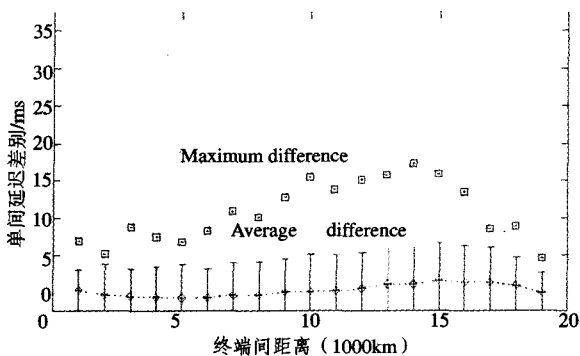


图 5 随机节点对单向时延比较

总体上来看,CPDR 算法在网络负载较小时的时延性能略优于基于最小跳的路由机制,但低于集中式最短路径算法;但当网络负载较大时,CPDR 算法的避免拥塞和丢包的性能要优于集中式最短路径算法和最小跳算法,同时端到端时延性能也在一定范围内相对提高,将优于集中式最短路径算法。

**结束语** 针对 LEO 卫星网络中拓扑高度动态变化、流量非规整性和星上资源受限的特点,本文提出了一种基于路径信息压缩的多路径分布式路由算法。由于链路代价度量不仅受传输时延影响,而且通过期望的队列时延反映流量负载的变化,因此 CPDR 算法具有拓扑自适应和流量自适应能力,它将能够大大提高网络的整体吞吐量和网络链路利用率,降低出现由于流量变化而引起拥塞的概率。其次,算法采用路径信息压缩,一方面简化了数据分组的转发,同时又可避免引入额外控制开销。端卫星所使用的多路径路由算法与压缩编

码机制相互独立,数据源可以控制流量如何映射到各路径上,从而可以实现全网范围内的流量工程目标。通过仿真实验显示,CPDR 算法在平均时延和路由成功率方面均优于单路径路由算法。无论从当前建设我国卫星网络的实际情况来看,还是从应用于已有卫星网络的角度来看,提出的 CPDR 算法都是一种实用的卫星网络路由算法,具有良好的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Hu Y, Li V O K. Satellite-based internet: A tutorial. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(3): 154~162
- 2 孙利民, 卢泽新, 吴志美. LEO 卫星网络的路由技术. 计算机学报, 2004, 27(5): 659~667
- 3 Wood L, Clerget A, Andrikopoulos I. IP Routing Issues in Satellite Constellation Networks. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69~92
- 4 Eppstein D. Finding the k shortest paths. In: Proceedings of 35th IEEE Symposium on Foundations on Computer Science, 1994. 154~165
- 5 Charles E F. System Design Consideration for the Development of Iridium World Air Services. In: IEEE 18th Digital Avionics Systems Conference, Atlanta, Georgia, 1999. 61~68
- 6 Henderson T R, Katz R H. Network Simulation for LEO Satellite Networks. In: Proceeding of 18th International Communication Satellite Systems Conference, Oakland, Apr. 2000
- 7 Kandus G, Svigelj A, Mohorcic M. The impact of different scheduling policies on traffic class dependent routing in inter-satellite link networks. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2004, 22: 533~546
- 8 Bai JianJun, Lu Xicheng, Lu Zixin, Peng Wei. A distributed hierarchical routing protocol for non-GEO satellite networks. In: Proceedings of International Conference on Parallel Processing Workshops (ICCPW'04), Montreal, Canada, 2004. 148~155
- 9 白建军, 卢锡城, 卢泽新. 一种 LEO 卫星网络路由协议 S-LSRP. 见: 第九届全国青年通信学术会议论文集, 重庆, 2004
- 10 肖洪亮, 白建军, 卢泽新. 基于 ns2 的 LEO 卫星网络路由算法模拟. 2005 星座卫星通信系统论坛, 南京, May 2005
- 11 Henderson T. Networking over next-generation satellite system: [Ph. D. dissertation]. University of California, Berkeley, 1999