

LEO卫星网络中基于分布式路由算法的流量均衡策略

段思睿¹, 刘元安², 胡鹤飞¹, 李 虎¹

(1. 北京邮电大学电子工程学院 北京 海淀区 100876; 2. 北京邮电大学安全生产智能监控北京市重点实验室 北京 海淀区 100876)

【摘要】LEO卫星网络因覆盖于地球表面的球面结构,高纬度地区轨道间链路较短,导致网络流量分布不均匀的现象。该文以分布式路由算法为基础,提出了基于横向转发权限和横向转发率两种应用于LEO卫星网络的全网流量均衡分布优化策略。前者能够对特定区域的流量进行调整,可作为流量实时调整策略;后者能够控制全局网络的流量分布情况,适用于网络流量分布的整体优化。通过仿真,验证了两种流量均衡策略能够使网络流量分布情况按照一定的均衡特点进行调整,从而实现网络流量优化的目的。

关键词 流量均衡; LEO; 路由算法; 卫星通信系统

中图分类号 TP393

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.03.010

Load Balancing Strategies Based on a Distributed Routing in LEO Satellite Networks

DUAN Si-rui¹, LIU Yuan-an², HU He-fei¹, and LI Hu¹

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876;

2. Key Laboratory for Intelligent Production Monitoring System, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract In low earth orbit(LEO) satellite networks, the length of inter-satellite links in high latitude regions are relatively shorter due to the spherical surface of the earth, this results in unbalanced traffic load distribution. In this paper, two load balancing strategies for distributed routing algorithms are proposed based on the horizontal transmitting priority and horizontal transmitting probability. The load balancing strategy based on the horizontal transmitting priority can be used as a real time strategy for its ability of flexibly adjusting the traffic load in a specific district. The horizontal transmitting probability based load balancing strategy is able to adjust the load distribution of the whole network, thus it can be used as a global optimization method. The simulation results prove that both of the strategies are capable of balancing the traffic load in LEO satellite networks.

Key words load balancing; LEO; routing algorithm; satellite communication systems

LEO卫星网络具有全球覆盖特性,其各网络节点具有在轨信息处理、转发的能力。伴随着高带宽的星间链路ISL(inter satellite link)应用,卫星网络能够满足各种数据业务的需求,必将在下一代互联网(next generation Internet, NGI)的发展中占有重要地位^[1-2]。

LEO卫星网络的流量分布具有不均匀特性,大量流量负载会集中在高纬度区域^[2-5]。产生这种现象的主要原因是,地球表面的弧度使高纬度区域相邻卫星间的距离近,在低纬度区域的距离远。而以最短路径为优化目标的卫星网络路由算法,会侧重于选择高纬度的星间链路,从而导致大量的数据流量会集中在高纬度区域。因此,应用于LEO卫星网络

中的路由算法,除了寻找最短路径外,还必须考虑网络流量的均衡问题。

应用于卫星网络的路由算法主要采用集中式路由和分布式路由两种思想^[6-14]。分布式路由算法是在掌握网络结构及周期性变化特性的基础上,对单节点设计的路由策略。各个网络节点仅需要了解本节点或者邻节点的网络信息,路由信息交互较少。网络节点利用地址信息对转发的每一个包单独计算其下一跳节点,避免了大量的存储开销。文献[4]根据分布式思想,提出了一种应用于节点的精确负载均衡(explicit load balancing, ELB)策略。当节点出现链路数据拥塞时,对相邻节点发出通知,邻节点选择次优路径避免数据发送到拥塞链路。但该策略仅能

收稿日期: 2013-03-21; 修回日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61272518,61170275); 国家重大科技专项(2012ZX0303001-004)

作者简介: 段思睿(1986-),男,博士生,主要从事空天网络方面的研究。

解决局部区域的流量阻塞问题,不能对全局网络的流量分布进行优化和控制。文献[10-12]基于分布式思想提出了一种逻辑地址的概念,各在轨卫星根据自身位置选择独立的路由策略即可。

为了更加合理灵活地解决LEO卫星网络的流量均衡问题,本文提出了两种基于分布式路由算法的流量均衡策略。首先对LEO卫星网络结构进行了分析,根据网络结构的特点,提出基于横向转发优先级的分布式路由算法,再以此路由算法为基础,提出了两种均衡流量分布的优化策略。通过系统仿真,验证了两种流量均衡策略对网络流量分布产生的不同影响效果。

1 分布式路由算法

本文提出的基于横向转发优先级(horizontal transmitting priority, HTP)的分布式路由算法充分考虑了星座结构的特点,相较于其他分布式路由算法,具有更低的计算复杂度。文献[12]对该路由算法做出了前期的理论探索。下面对算法的实现方式进行介绍。

1.1 极轨道星座模型

极轨道星座模型广泛应用于各种LEO卫星系统^[11-12],它由 N 个轨道面组成,每个轨道面中均匀分布了 M 颗卫星,所有的轨道面相对于地球的赤道面的倾角是相同的,并且 N 个轨道面与赤道平面的交点是均匀分布在赤道平面的,其角距为 $360^\circ/2N$ 。

在相关研究中,将极轨道星座的网络结构等效为一种类似于曼哈顿街区的网状网络结构^[10-12],如图1所示,节点匀速由上至下运动,代表卫星从北向南,再从南向北(下半部分)的运动。在顶端和中部,代表极地区域,轨道间链路不能建立。

为了体现轨道间链路的不等长特性,定义横向转发优先级参数。HTP表示相对区域内横向链路(轨道间链路)长度与全网内横向链路长度的比较关系。横向链路长度越短,其HTP值越高。考虑到卫星在圆形轨道下的对称排列, $\{HTP|0 \leq HTP \leq M/2 - 1\}$,其中,0表示该区域不存在横向链路。链路的长短直接影响卫星网络中数据传输的延迟。HTP值是网络节点决定下一跳路径的决定因素,因为在需要横向传输数据的情况下,选择HTP值越高(链路长度越短)的横向链路,其传输的延迟越小。

通过计算,即使卫星在同一区域内的上半部分和下半部分,HTP值也不相同(由于轨道内卫星数和区域数相等,根据对称性,同轨道上的卫星会同时处于其对应区域的上半或下半区域中)。将各区域内

等分为两个子区域(在本文中,每个子区域纵向宽度为 15°),则全网内的HTP值如表1所示。

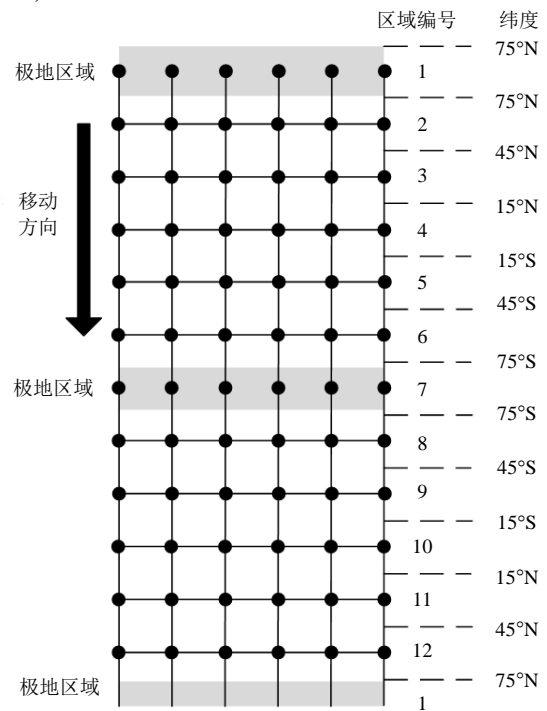


图1 LEO卫星网络结构图

表1 HTP分布值

上半区域编号	HTP值	下半区域编号	HTP值
1	0	1	0
2	4	2	5
3	2	3	3
4	1	4	1
5	3	5	2
6	5	6	4
7	0	7	0
8	4	8	5
9	2	9	3
10	1	10	1
11	3	11	2
12	5	12	4

1.2 分布式路由算法

分布式路由算法的主要特点是网络节点不会收集全网的状态信息,仅仅根据自身节点对网络结构的判断,决定数据包的下一跳节点。

为实现分布式路由算法,首先需要将全网节点赋予一个唯一的地址,如图2所示。

设网络中存在一个初始状态,用 $\langle n, m \rangle$ 表示某节点的地址,其中, n 为轨道面序号, m 为同轨道面内节点的序号。节点地址在网络中固定,不会因为卫星的运动而改变。目的节点所在的区域为:

$$p_D = (p_C + m_D - m_C) \bmod M \quad (1)$$

式中, p_D 表示目的节点区域; p_C 表示当前节点所在区域。

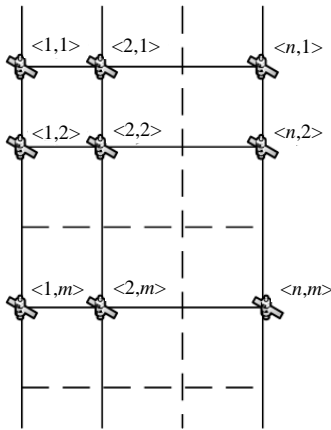


图2 节点地址分配

在上述地址分配方式的基础上, 分布式路由算法由确立方向和查询HTP值两个步骤组成。

1) 确立方向。当前节点 $\langle n_C, m_C \rangle$ 收到发往目的节点 $\langle n_D, m_D \rangle$ 的数据包时, 首先计算目的节点所在的方向, 以保证数据包能以最短条数到达目的节点。设 d_n 和 d_m 分别表示当前节点与目的节点在水平方向和垂直方向上的距离, 则:

$$d_n = n_D - n_C \quad (2)$$

$$d_m = (m_D - m_C) \bmod M \quad (3)$$

按照图3所示的方向确立关系图, 当前节点可以得到通往目的节点的一条或者两条(横纵向各一条)备选方向。

	$d_n < 0$	$d_n = 0$	$d_n > 0$
$M/2 < d_m < M$	← ↑	↑	↑ →
$d_m = 0$	←	当前卫星	→
$0 < d_m \leq M/2$	← ↓	↓	↓ →

图3 方向确立关系图

2) 查询HTP。若通过确立方向, 得到横向及纵向两条备选方向, 则以当前节点为起点, 按纵向方向, 查询当前节点与目的节点之间所有区域的HTP值。如果当前节点已处于最高HTP值区域, 则将数据包发往横向邻节点, 反之发往纵向的邻节点。

如果只存在一条备选方向, 则将数据直接发往该方向的邻节点。特殊的, 若源节点与目的节点同处于HTP=0的区域, 需要在纵向两个邻节点内, 选择HTP值较高的作为下一跳节点。

2 流量均衡策略

LEO卫星网络由于其网络结构的特殊性, 流量分布是不均匀的^[2-5]。根据文献[3]的仿真分析, 如全网络中的每一个网络节点都对其他节点发送等量数据, 网络内在横向上的流量会大量集中于高纬度区域。

本节在前文介绍的分布式路由算法的基础上, 提出了两种流量均衡策略, 对LEO卫星网络中的流量分配不均匀情况进行优化。

2.1 链路流量

为分析整个网络链路流量特性, 首先需要对链路流量计算方式进行定义:

1) $G = \{V, E\}$, 表示LEO卫星网络连接图;

2) $V = \{v_1, v_2, \dots, v_{M \times N}\}$, 表示网络中的所有节点, 共 $M \times N$ 个;

3) $e = (v_i, v_j)$, 表示相邻节点 v_i 、 v_j 之间的连接链路, 共 $M(2N-1)$ 条边;

4) $w_{od} \in W$, 表示网络中每一个源的节点对 v_o 、 v_d (origin-destination, OD), 共 $MN(MN-1)$ 对;

5) $P(w_{od}) = \{e_1, e_2, \dots, e_k, e_{k-1}, e_k\}$, 是一组边序列, 表示OD对间的连接路径;

$$\delta_{e_{ij}}^{P(w_{od})} = \begin{cases} 1 & e_k \in P(w_{od}) \\ 0 & e_k \notin P(w_{od}) \end{cases}, \text{链路包含函数,}$$

若链路属于在路径中等于1, 反之为0。

设每一个节点对其他节点发送等量数据量 B , 则每条链路上传输的流量为:

$$C(e_k) = \sum_{k=1}^K B \delta_{e_k}^{P(w_{od})} \quad (4)$$

2.2 基于HTP的流量均衡策略

在分布式路由算法中, HTP值的高低决定了数据流量的走向。因此合理修改HTP值, 能调整网络横向流量的分布情况。针对图4中的场景, 有3个源节点 a_1 、 a_2 、 a_3 位于HTP=1的区域, 它们共同的目的节点 c_4 位于HTP=3区域。每个源节点同时对目的节点发送数据量 B , 根据式(4), 则 $C(c_1c_2) = B$ 、 $C(c_2c_3) = 2B$ 、 $C(c_3c_4) = 3B$ 。

所有的横向流量都集中于HTP=3的区域内, 而在其他区域没有横向流量分布。在OD对数量增加时, 大量流量会集中在高HTP区域, 而低HTP区域只有少量流量分布。这是导致LEO卫星网络横向流量分布不均匀的原因。

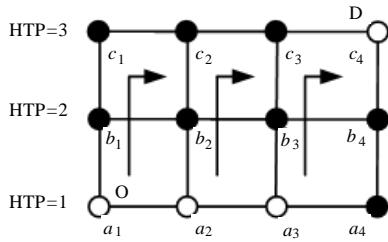


图4 传输场景一

考虑到HTP值对于网络流量的影响，当高HTP区域的流量达到一定程度时，对网络的HTP值进行适当修改，可以分散高HTP区域的流量。如将图4所示场景改为图5的场景。

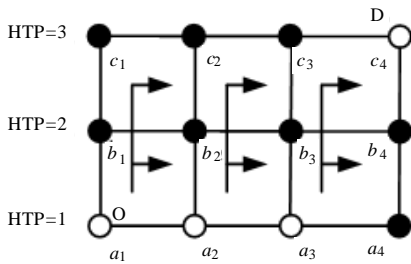


图5 传输场景二

将HTP=3区域改为HTP=2后，OD路径中会出现2个最高HTP=2的区域，此时在路由策略第二步中，加入如下规则：

若当前节点与目的节点间存在n个HTP最高值时，节点有1/n的概率将数据包横向转发。

按照改变的HTP场景和路由策略，重新计算各链路的流量分布： $C(c_1c_2) = C(b_1b_2) = B/2$ ， $C(c_2c_3) = C(b_2b_3) = B$ ， $C(c_3c_4) = C(b_3b_4) = 3/2B$ 。

横向链路流量均匀地分配到两条最高HTP的区域内。这种均衡策略能够迅速缓解高HTP区域流量集中的问题。

2.3 基于横向转发率的流量均衡策略

针对如图6所示的传输场景， a_1 节点为源节点， c_N 节点为目的节点，发送数据量为B。

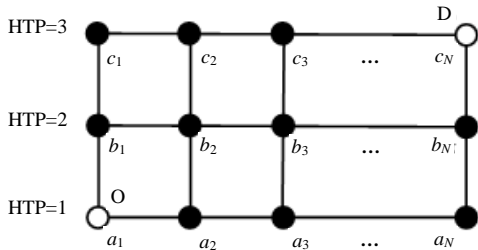


图6 传输场景三

若按照前文介绍的分布式路由策略，所有横向流量都会集中在HTP=3区域，而其他区域无横向流量。

为了实现横向流量的合理分布，定义参数横向转发率k，其中 $\{k|0 \leq k \leq 1\}$ ，k表示节点在非最高HTP区域内横向转移数据包的概率。以场景三中的

第一条为例，根据数学期望计算， $C(a_1b_1) = (1-k)B$ ， $C(a_1a_2) = kB$ 。利用归纳法，可以得到各HTP区域内部横向流量的分布情况：

$$C(a_{n,n+1}) = k^n B \quad (5)$$

$$C(b_{n,n+1}) = n(1-k)k^n B \quad (6)$$

$$C(c_{n,n+1}) = n(N-n+1)(1-k)^2 k^{n-1} B \quad (7)$$

由式(5)~式(7)可以得到各横向区域的总流量分布为：

$$C_{HTP=1} = \sum_{n=1}^{N-1} C(a_{n,n+1}) = \sum_{n=1}^{N-1} k^n B \quad (8)$$

$$C_{HTP=2} = \sum_{n=1}^{N-1} C(b_{n,n+1}) = \sum_{n=1}^{N-1} n(1-k)k^n B \quad (9)$$

$$C_{HTP=3} = \sum_{n=1}^{N-1} C(c_{n,n+1}) = \sum_{n=1}^{N-1} n(N-n+1)(1-k)^2 k^{n-1} B \quad (10)$$

取N=6(其他N值方法类似)，利用Matlab，计算得到k的变化与各HTP区域横向流量归一化占用率的关系如图7所示。

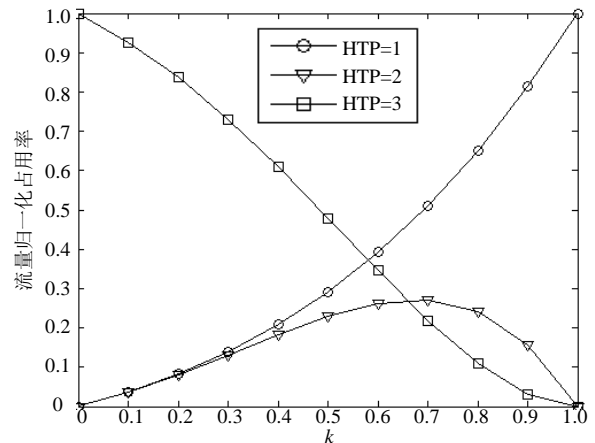


图7 各HTP区域横向流量归一化占用率

其中归一化占用率计算方式是：

$$\text{Occupy}(C_{HTP=i}) = \frac{C_{HTP=i}}{C_{HTP=1} + C_{HTP=2} + C_{HTP=3}} \quad (11)$$

3 仿真及结果分析

本节将对路由算法和两种流量均衡策略的有效性进行仿真验证。仿真中LEO卫星星座采用72/6/0:1375km:90°的星座参数，极地区域设定为纬度高于75°地区。

3.1 基于HTP的流量均衡策略

为了在流量均衡的仿真中引入对比，首先计算在正常情况下网络流量的分布情况。

在仿真中，截取卫星在区域内上下半区域的两个静态网络场景，网络中的每一个节点都对其他节点发送10 kb的数据，利用式(6)的计算方式，得到每

条链路上的数据流量; 然后累计每个区域中的横向链路的流量, 得到图8的结果。图中上下半区域划分的HTP值如表1所示。根据图中上下半区域流量分配的两条曲线可以看到, 由于最短路径的变化导致HTP值的微小变化, 反应在全局网络中, 产生了高纬度区域的横向数据量波动情况: 在第2和第8区域, 当卫星处于上半区域时, 横向网络流量很低, 但当卫星到达下半区域时, 网络流量突然增大; 而在第6和第12区域的情况则刚好相反。这种波动变换随着卫星的移动是持续存在的, 且数据总量变化剧烈, 对网络的稳定度而言会产生巨大影响。为了消除这种波动现象, 可采用表2中均衡化的HTP分布值, 其流量分布如图8中的均衡分布曲线。均衡化的HTP值忽视了上下半区域的概念, 因此高纬度区域的总流量不会因节点处于上下半区域而剧烈地波动。这种方式虽然会让部分OD对没有采用最短路径, 牺牲了个别路径的延迟, 但保证了网络环境中流量分布的持续稳定。

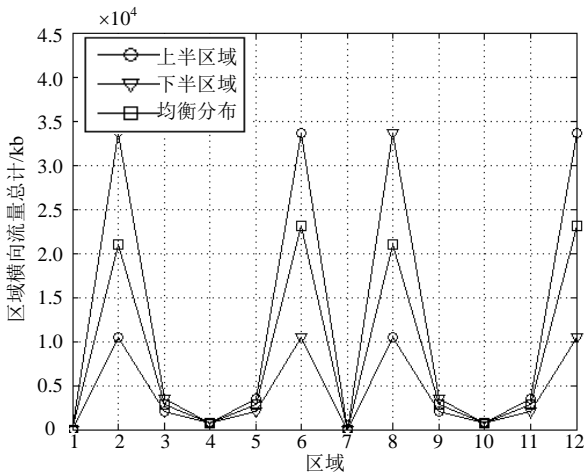


图8 正常情况下网络流量分布图

表2 均衡化HTP分布值

区域编号	HTP值	区域编号	HTP值
1	0	7	0
2	3	8	3
3	2	9	2
4	1	10	1
5	2	11	2
6	3	12	3

为验证修改HTP值对缓解高纬度区域的大流量现象的影响, 建立3组HTP分布值, 如表3所示。其中第一组采用均衡化的HTP值作为流量参照; 第二组降低了某一个高纬度区域(区域2)的HTP值; 第三组将全网内的高纬度HTP值降低。

3组环境中各区域横向网络流量分布对比如图9

所示。根据第一组与第二组数据对比, 可以看到降低HTP值可以明显消减横向网络流量, 区域2中第二组流量相较于第一组显著降低, 但是会增加其他最高HTP区域的最大流量(如区域6,12的第二组流量大于第一组流量); 从第三组曲线可以发现, 在全局网络中降低最高HTP值, 可以均衡地将网络流量分布在等HTP值的多个区域内部。这个仿真结果与2.2节的分析结果是吻合的。

表3 3组HTP值对比

区域编号	HTP值		
	第一组	第二组	第三组
1	0	0	0
2	3	2	2
3	2	2	2
4	1	1	1
5	2	2	2
6	3	3	2
7	0	0	0
8	3	3	2
9	2	2	2
10	1	1	1
11	2	2	2
12	3	3	2

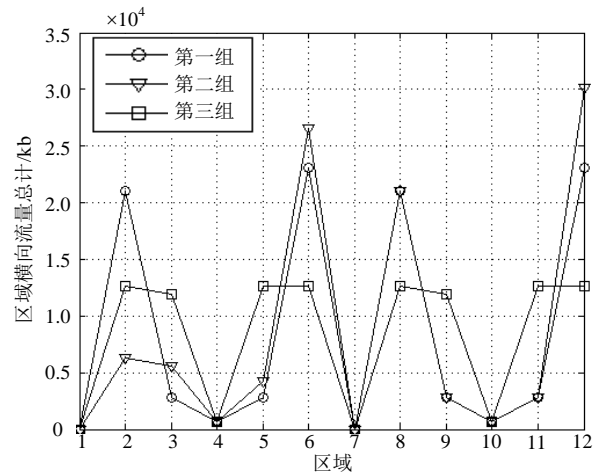


图9 不同HTP下网络流量分布对比

利用HTP值对网络流量的分布调整的结果是明显而迅速的, 但这种调整只能将最大流量均匀分散到等高的HTP区域, 而高纬度区域横向链路延迟短的优势就无法体现。

3.2 基于转发率的流量均衡策略

仿真环境与上一组实验的参数相同, 以表2的均衡化HTP分布值为基础, 网络中的每一个节点对其他节点发送10 kb的数据, 验证多组转发概率k值对流量分布的影响。

基于转发概率的流量分布图如图10所示, 从数据结果可以看到, 转发概率k的改变对各HTP区域的分布存在影响。当k=0时, 等同于无均衡的情况, 作

为均衡策略的对比参照；随着 k 值的增大，即 $k=0.15$ 和 $k=0.35$ 时，高HTP区域的流量聚集的趋势逐渐降低，仍然维持了最大的比例，而低HTP区域值的流量渐增；当 $k=0.55$ 时，各区域分布的流量接近相等。仿真结果与2.3节中对流量分布的分析结果吻合。

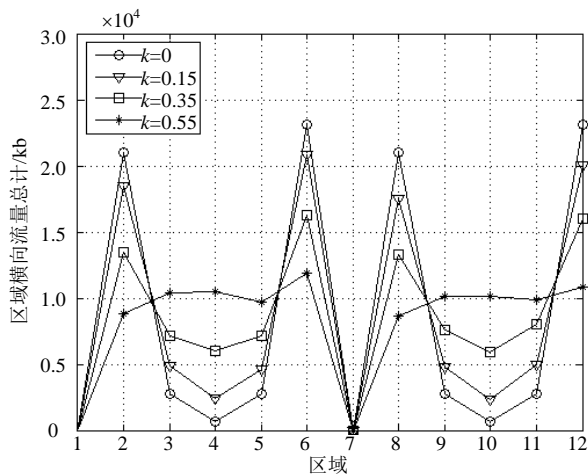


图10 基于转发概率的流量分布图

4 结论

本文提出两种应用于LEO卫星网络的分布式路由算法的全网流量均衡策略。通过系统仿真，验证了基于HTP的流量均衡策略对LEO卫星网络中高纬度区域的大流量现象有明显的消减特性，但只能将流量平均分配到相等的HTP值区域；而基于横向转发概率的流量均衡策略对网络流量分布可以全局性的调整，即减少了最高HTP值区域的总流量，又保证了该区域尽可能地占有大比例的流量，使路由算法尽量保持最短路径。前者适合实时地对单一区域的流量调制，应对局部的流量阻塞问题；而后者能适用于全网络范围内的整体优化。

参考文献

[1] DEL RE E, PIERUCCI L. Next-generation mobile satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 150-159.

[2] FRANCK L, MARL G. Static and adaptive routing in ISL networks from a constellation perspective[J]. Int J Satell Commun, 2002(20): 455-475.

[3] WERNER M, FRINGS J, WAUQUIEZ F, et al. Topological design, routing and capacity dimensioning for ISL networks in broadband LEO satellite systems[J]. Int J Satell Commun, 2002, 20(6): 455-475.

[4] PAN Yan-hui, WANG Tao, LI Hua. Research on load balancing method of LEO satellite network routing[J]. Computer Engineering, 2011, 37(8): 4-6.

[5] TARIK T, DAISUKE M, ABBAS J, et al. Explicit load balancing technique for NGEOSatellite IP networks with on-board processing capability[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2009, 17(1): 281-293.

[6] TONG Rui-xia, ZHU Xiong-feng. A load balancing strategy based on the combination static and dynamic[C]//2010 2nd International Workshop on Database Technology and Applications (DBTA). [S.l.]: IEEE, 2010.

[7] NISHIYAMA H, KUDOH D, KATO N, et al. Load balancing and QoS provisioning based on congestion prediction for GEO/LEO hybrid satellite networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1998-2007.

[8] GAO Zi-he, GUO Qing, NA Zhen-yu. Novel optimized routing algorithm for LEO satellite IP networks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6): 917-925.

[9] HONG S C, BYOUNG W K, CHANG G L, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1998, 47(30): 1037-1048.

[10] KICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A multicast routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Trans Networking, 2002, 10(2): 183-192.

[11] YANG De-nian, LIAO Wan-jiun. On multicast routing using rectilinear steiner trees for LEO satellite networks[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(4): 2560-2659.

[12] DUAN Si-ru, LIU Yua-nan, HU He-fei, et al. An orbital plane based distributed routing algorithm for LEO satellite networks[J]. Journal of Computational Information Systems, 2013, 9(4): 1279-1287.

[13] TUO Yan-jun, LIU Yun, LI Yan. Design and analyses of LEO/MEO constellation networking[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(1): 50-54.

[14] JIANG Wen-juan, ZONG Peng. QoS routing algorithm based on traffic classification in LEO satellite networks [C]//2011 Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN). [S.l.]: IEEE, 2011.

[15] PRATT S R, RAINS 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): 2-10.

[16] AKYILDIZ I F, EKICI E, BENDER M D. MLRS: a novel routing algorithm for multilayered satellite IP networks[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2002, 10(3): 411-423.