

中轨卫星星座系统容量分析

王雅慧, 况鸿凤, 朱立东

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731)

摘要: 为分析给定卫星星座通信系统的容量, 依据不同地区时差导致的通信流量差异, 建立关于时间的通信流量模型。以覆盖全球的中轨卫星星座通信系统为例, 采用负载均衡路由算法, 针对单星到多星的业务类型, 分析卫星一个回归周期内不同时间切片下的星座系统容量, 并探究星间链路容量约束对系统容量的影响。通过建立卫星流量的时间模型, 容量分析的结果更加符合实际; 与卫星等流量模型仿真对比, 印证基于时间的流量模型的合理性和有效性; 应用离散化的时间片, 降低容量计算的复杂度。

关键词: 卫星系统容量; 流量模型; 负载均衡路由算法

中图分类号: TP927+.23

文献标识码: A

Capacity analysis of the MEO satellite constellation

WANG Ya-hui, KUANG Hong-feng, ZHU Li-dong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Aiming to calculate the system capacity of a given satellite constellation, a time-varying traffic model based on varying traffic with varying time zone was proposed. Focusing on a MEO satellite constellation with global coverage, using a load balanced routing algorithm, the system capacity in different time slices was analyzed and the effect of inter-satellite link (ISL) capacity on the system capacity was investigated. The time-varying traffic model makes analysis more reliable and effective via comparison with equal traffic model. Application of time slices reduces complexity of calculation.

Key words: capacity of satellite communication system, traffic model, load balanced routing algorithm

1 引言

随着卫星通信的发展以及卫星通信系统中用户的增多, 为了使有限的资源最大化利用, 在设计一个卫星通信系统时正确分析其容量十分关键。利用软件平台 Opnet 等可以仿真得到星座系统的容量, 但这类方法复杂度较高, 而且没有考虑到星下节点流量随时间变化的特点。考虑到这一点, 本文提出了通过建立流量模型和划分时间片的方法来估算卫星系统容量, 既降低了计算的复杂度, 又通过建立节点的流量模型提高了系统容量估算的准确度。

2 卫星流量模型

卫星星座系统的总容量为系统单位时间内可成功传输的流量之和, 包括星间流量和星内流量。由于任意时刻各卫星覆盖的地面节点所在时区不同, 因此, 各卫星产生的输入/输出流量不同。为了分析给定时刻卫星星座的系统总容量, 需要知道该时刻各卫星覆盖的地面节点的上行输入流量, 即卫星的流量模型。

图 1 为某城域网中某端口一天中流量随时间的变化^[1]。

收稿日期: 2017-09-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2012AA01A502); 装备预研领域基金资助项目 (No.61405180503); 四川省科技支撑计划基金资助项目 (No.2014GZX004)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No.2012AA01A502), Equipment Pre-inquiry Program (No.61405180503), Science and Technology Support Plan of Sichuan Province (No.2014GZX004)

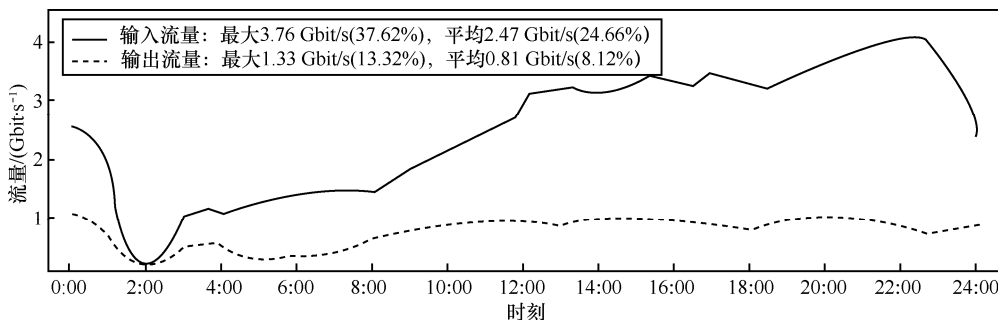


图 1 某地面城域网流量随时间变化

虽然缺乏卫星传输网流量随时间变化的模型，但可以认为卫星传输网和地面局域网的输入/输出流量随时间变化的趋势大致相同。为了描述这一相同趋势，本文认为卫星传输网中任意两时刻的输入流量的比值等于地面局域网中对应两时刻的输入流量比。

对于给定的时刻，各卫星的输入流量由自身覆盖的地面节点所处时区的当地时刻决定，因此，只需找到卫星传输网一天 24 小时的输入/输出流量比例，即可建立卫星流量的时间模型。考虑准实时通信的卫星系统，即有流量输入基本都会有相应的输出，故在图 1 中输入流量和输出流量随时间变化的趋势大体相同，因此，可以认为卫星输入和输出流量的时间模型相同，本文只建立卫星输入流量的时间模型。

取图 1 中的输入流量图线，以小时为单位，取每个小时内流量的均值作为该小时内的流量，各小时的流量比例作为卫星流量的比例，同时假设流量最大时刻的流量比例为 1，其余各个时刻依次按比例取值，得到的流量模型如图 2 所示。

3 负载均衡路由算法

路由算法在路由协议中具有重要的作用，采用

什么样的路由算法往往决定了最终的寻径结果，在选择路由算法时主要考虑最优化、简洁性、坚固性、快速收敛和灵活性 5 个目标。

路由算法^[2]按照种类可以分为静态和动态、单路和多路、平等和分级、源路由和透明路由、域内和域间、链路状态和距离向向量等。其中，链路状态算法又叫最短路径算法，最短路径算法是图论研究中一个经典的算法，目的是在图中寻找 2 点之间的最短距离。最短路问题同样适用于路由算法，最著名的最短路径路由算法有 2 个：Bellman-Ford 算法和 Dijkstra 算法。本次仿真中采用的是 Dijkstra 算法。

Dijkstra 算法的条件是需要知道整个网络拓扑和各个链路的长度，如果将长度已知的链路和时延对应起来，就相当于求任意 2 个星下点之间的时延^[3]。

下面以一个网络结构为例来讨论该算法，即查找从源节点开始到其他节点的最短路径。网络结构由节点和路径构成，其中，节点之间的距离即为路径长度已知。设起始节点为 1，设 $R(x)$ 为节点 1 到某个节点 x 的距离，即节点 1 沿路径到节点 x 所经过的路径长度和。又令 $l(i, j)$ 为节点 i 到节点 j 的距离，整个算法过程如下。

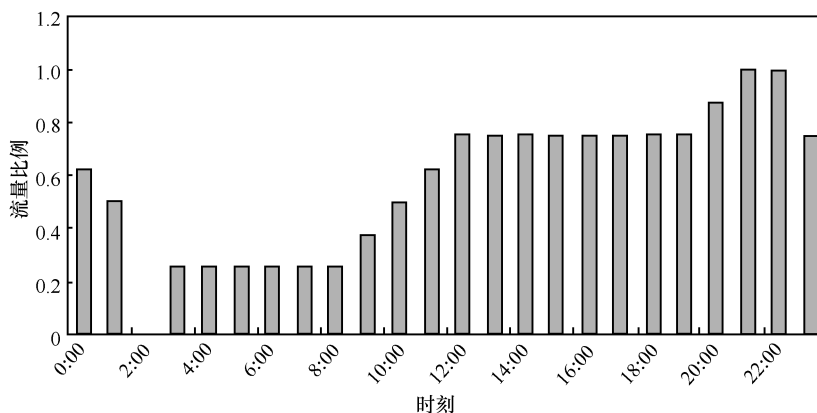


图 2 卫星流量的时间模型

1) 初始化

令 N 表示网络节点的集合, 先令 $N=\{1\}$ 。对所有不在 N 中的节点 x 有

$$R(x) = \begin{cases} l(1, x), & \text{节点 } x \text{ 与节点 } 1 \text{ 直接相连} \\ \infty, & \text{节点 } x \text{ 与节点 } 1 \text{ 不直接相连} \end{cases}$$

2) 寻找一个不在 N 中的节点 y , 其 $R(y)$ 值为最小, 把 y 加入 N 中。然后对所有不在 N 中的节点 x , 用 $[R(x), R(y) + l(x, y)]$ 中的最小值去更新原有的 $R(x)$ 值, 即 $R(x) \leftarrow \text{Min}[R(x), R(y) + l(x, y)]$

3) 重复步骤 2), 直到所有的网络节点都在 N 中为止。

以上为最短路径的算法步骤, 除此之外, 卫星通信系统的星上网络部分经常因为网络流量分布不均匀造成局部链路拥塞、数据分组被丢弃等问题, 而且常常会出现局部星间链路拥塞的同时, 其余星间链路轻载或空闲的情况, 这些问题对通信质量造成了一定的影响。为了解决这类问题, 可以采用负载均衡路由算法^[4], 中心思想即当链路发生拥塞的时候将流量分发到其他方向的链路上。

流量均衡的方法就是通过特定的手段将卫星网络中传输的流量平衡在其余空闲的星间链路上, 从而使流量不会过多地堆积在某一部分的星间链路上。其中有一些路由算法是包含流量均衡的思想的。路由算法中的流量均衡思想主要用于解决数据对接入卫星产生的传输压力, 实际上也可以看作在路由之前就对流量进行了一次均衡处理, 使卫星沿多条不同路径发送数据, 而非如最短路径算法中的一条固定路径。

负载均衡意味着各卫星会优先选择数据量少的卫星节点转发数据, 卫星节点发送或转发数据量的多少可以由相关联星间链路的流量等效衡量。初始状态下, 各条链路流量为 0, 此时星间链路距离是导致传输时延的主要因素, 故当下节点对以距离为边权依最短路径传输数据; 自此星间链路流量不为 0, 我们认为星间链路流量负载对源节点造成的传输时延远大于星间链路距离导致的传输时延, 故边权更新为星间链路已传输的流量, 搜索最短路。设星座系统中卫星数量为 n , 每颗卫星有 k 条星间链路, 星地上行/下行容量约束为 $cap_sat earth$, 星间链路容量约束为 cap_ISL 。负载均衡的算法流程如图 3 所示。

为了模拟星座系统中所有卫星之间互传数据(包括自身), 由于各卫星所在时区不同, 纯粹随机地或平均地产生各卫星节点对的传输数据量就有失

合理性, 于是, 每颗卫星按模型流量比例分配自身的上行流量给各卫星, 产生 n^2 个卫星原宿节点对以及相应的待传数据量。由于基于时间的流量模型打破了系统传输数据的对称性, 传统路由算法的路径收敛判定标准^[5]就不再适用。对于每个卫星原宿节点对, 可供选择的传输路径有 k 条(每颗卫星有 k 条星间链路), 且算法中每次选路, 源节点都最大限度地传数据, 因此, k 次循环选路后系统的容量基本趋于稳定, 算法中每对节点采取 $k+1$ 次选路。

4 中轨星座拓扑切片下的系统容量仿真

4.1 系统参数

全球覆盖的中轨卫星星座参数如表 1 所示。

参数	值
轨道高度	8 068 km
轨道倾角	45°
轨道面数量	2
每个轨道面卫星数	4
卫星总数	8
星间链路条数	24 (每颗卫星同轨间 2 条, 异轨间 1 条)
星地上行/下行容量约束	900 Gbit/s
星间链路容量约束	400 Gbit/s
单星覆盖率	100%
双星平均覆盖率	63%
三星平均覆盖率	11%

仿真时, 应用卫星通信流量的时间模型, 依模型流量比例产生每颗卫星的上行流量。为了避免流量高峰时段的上行流量超过星地容量约束, 假设图 2 的流量比例中最大者对应的实际输入流量为星地容量上限, 其余时刻的实际输入流量依比例取得, 得到表 2。

时刻	流量 / (Gbit·s ⁻¹)	时刻	流量 / (Gbit·s ⁻¹)	时刻	流量 / (Gbit·s ⁻¹)
0:00	562.5	8:00	225.0	16:00	675.0
1:00	450.0	9:00	337.5	17:00	675.0
2:00	0	10:00	450.0	18:00	675.0
3:00	225.0	11:00	562.5	19:00	675.0
4:00	225.0	12:00	675.0	20:00	787.5
5:00	225.0	13:00	675.0	21:00	900.0
6:00	225.0	14:00	675.0	22:00	900.0
7:00	225.0	15:00	675.0	23:00	675.0

该中轨星座回归周期为 24 h。通过 STK 仿真软件可以观察到, 卫星在 1 h 内拓扑结构虽然会发生

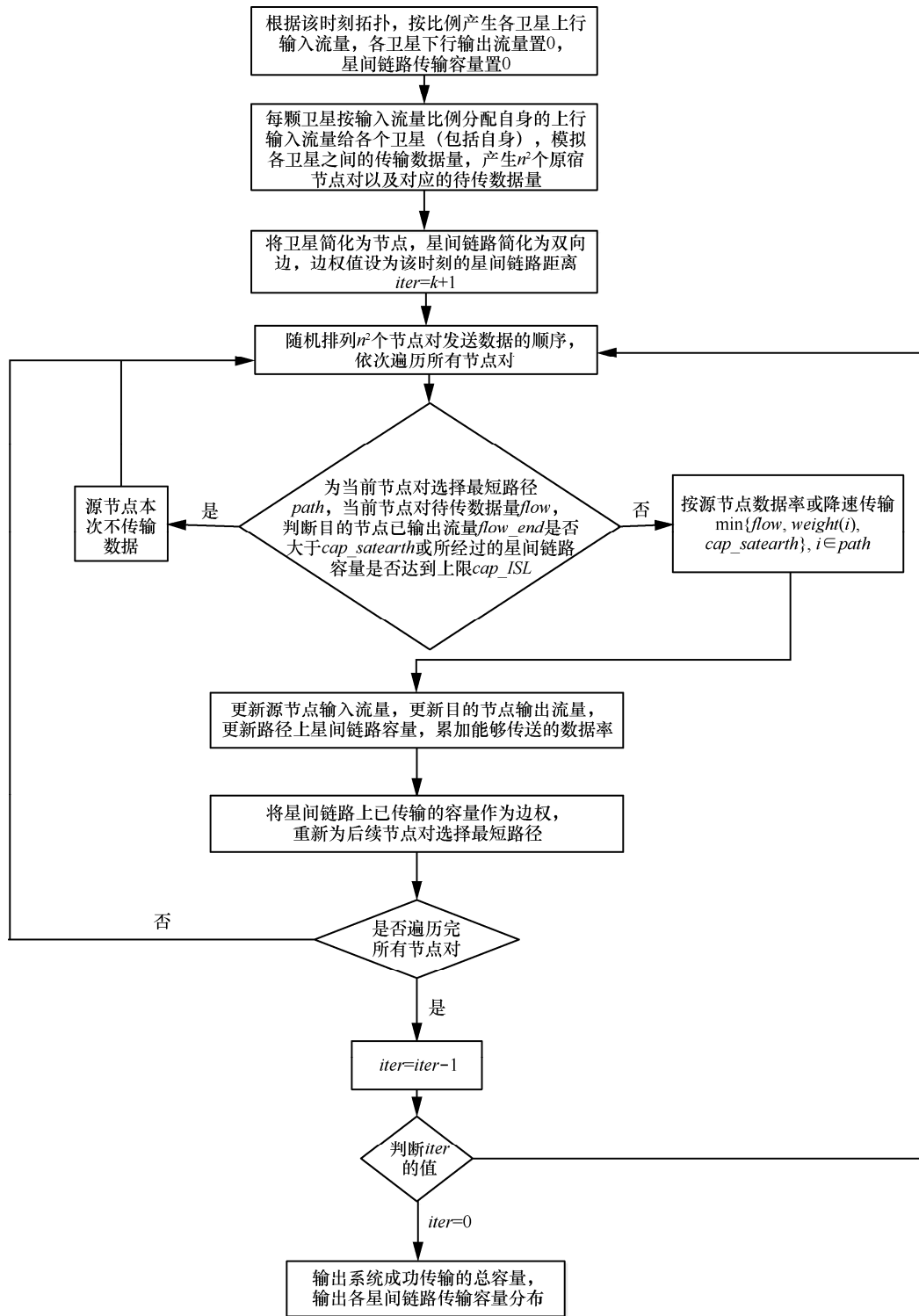


图 3 负载均衡算法流程

改变, 但其覆盖的地面节点基本没有发生变化, 当卫星运行时间超过 1 h 后, 卫星所覆盖的地面节点会发生切换, 因此, 本次仿真中的时间片划分以 1 h 为单位。仿真中分别对 24 个时间片下的卫星拓扑

统计卫星星间链路长度、各卫星输入流量, 并产生各原宿卫星对之间传输的数据量。随机取某一时刻的卫星拓扑结构及星间链路表示如图 4 所示, 每个时刻下的星地上行输入流量统计如表 3 所示。

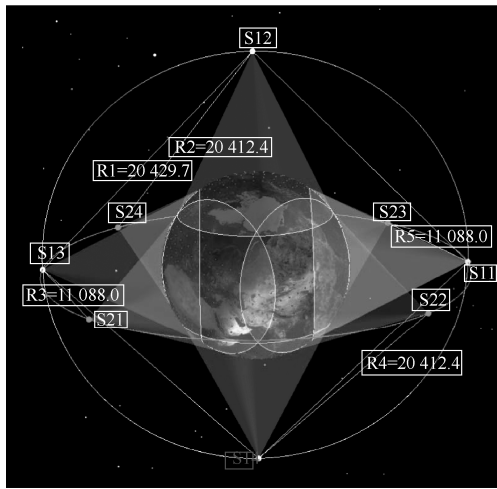


图 4 某时刻下的中轨卫星拓扑结构关系

表 3 中轨系统下每个时刻下的卫星星地上行输入流量/(Gbit·s⁻¹)

时刻	卫星 1	卫星 2	卫星 3	卫星 4	卫星 5	卫星 6	卫星 7	卫星 8
0:00	675	450	0	675	337.5	0	900	225
1:00	675	225	675	675	675	787.5	0	337.5
2:00	225	450	675	675	0	450	225	675
3:00	450	675	675	562.5	562.5	225	675	675
4:00	675	787.5	450	225	225	675	675	562.5
5:00	675	450	225	675	562.5	675	675	225
6:00	450	225	675	675	675	900	225	450
7:00	225	675	675	562.5	900	0	225	675
8:00	562.5	675	900	225	0	225	675	675
9:00	675	900	225	450	225	675	675	450
10:00	900	0	225	675	675	675	562.5	225
11:00	450	225	675	675	675	675	225	562.5
12:00	225	675	675	562.5	900	225	227.5	675
13:00	675	675	562.5	225	225	225	675	787.5
14:00	675	675	225	562.5	225	675	675	225
15:00	900	225	450	675	675	675	450	225
16:00	0	225	675	900	675	562.5	225	675
17:00	225	675	675	450	675	225	562.5	675
18:00	675	675	450	225	225	450	675	900
19:00	675	562.5	225	675	337.5	675	787.5	0
20:00	787.5	225	450	675	675	675	0	225
21:00	225	675	675	900	675	450	225	675
22:00	225	675	900	0	562.5	225	675	675
23:00	675	675	0	225	225	562.5	675	675

4.2 容量仿真结果

基于第一节建立的卫星流量模型，本节仿真得到 24 个时间片下卫星传输网的总容量，如图 5 所示。在星地容量约束为 900 Gbit/s 和星间链路容量

约束为 400 Gbit/s 条件下，本卫星星座的平均总容量为 4 010.1 Gbit/s。同时仿真得到 24 个时间片下的平均星间链路容量，本卫星星座系统共有 24 条星间链路，平均星间链路容量如图 6 所示。

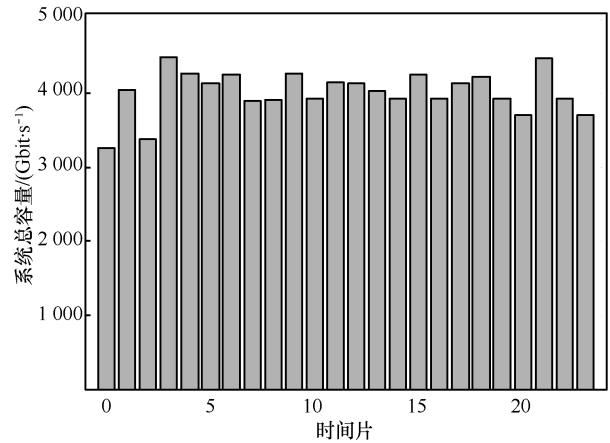


图 5 24 个时间片下的卫星传输网系统总容量

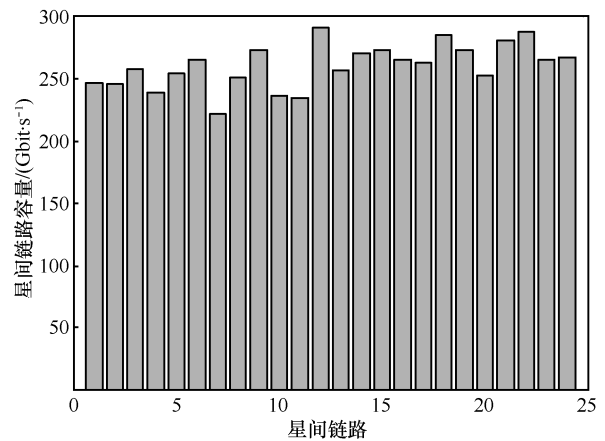


图 6 各条星间链路流量分布

为了验证本文选取的负载均衡路由算法的有效性，本文仿真了最短路径路由算法的卫星传输网总容量和平均星间链路容量，如图 7 和图 8 所示，得到本卫星星座的平均总容量为 3 606.2 Gbit/s。与最短路径路由算法比较可以看出，采用本文的负载均衡算法使卫星系统的总容量大大提高，且卫星星间链路的容量也更加均衡，减少了拥堵。

4.3 探究中轨星间链路容量约束对系统容量的影响

由于不同的星间链路容量约束会对系统总容量产生影响，星地容量约束固定为 900 Gbit/s 时，为了探究星间链路容量约束对系统总容量的影响，仿真中随机选取了 12 个时间片，采用本文的负载均衡路由算法，绘制了每个时间片下系统容量随星间链路容量约束的变化图线，如图 9 所示。

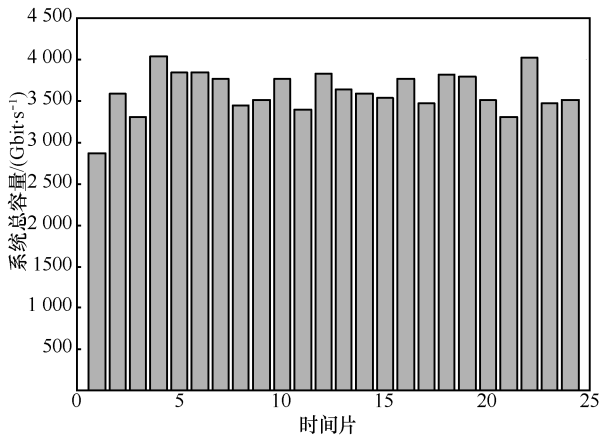


图 7 最短路径路由算法下, 24 个时间片下的卫星传输网系统总容量

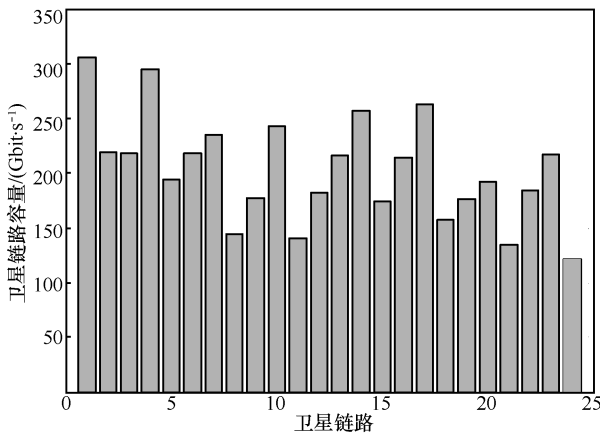


图 8 最短路径路由算法下, 各条星间链路流量分布

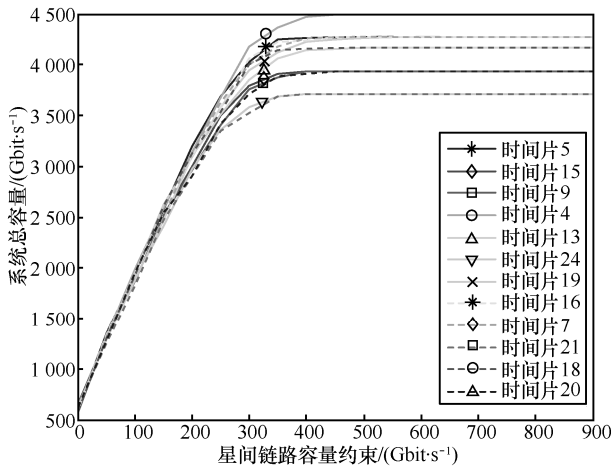


图 9 中轨星间链路约束对系统容量的影响

由图 9 可以看出, 每个时间片下的系统总容量随星间链路约束变化的趋势大致相同, 当星间链路约束大于 400 Gbit/s 时, 系统容量趋于稳定, 此时星间链路容量约束不会对系统总容量的增长造成瓶颈。

4.4 不同流量模型下的容量比较

为了比较不同卫星网络场景下的算法适应性,

本文将上述基于时间的流量模型的仿真结果与所有卫星等流量模型的仿真结果进行对比。所有卫星等流量模型即认为任一时间片下, 各卫星的输入流量相同, 该模型为传统容量计算模型, 较为理想。同样仿真了卫星传输网容量及星间链路容量分布, 如图 10 和图 11 所示。

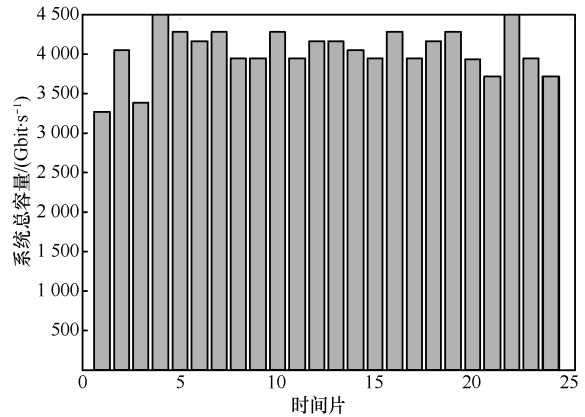


图 10 卫星等流量模型下, 24 个时间片下的卫星传输网系统总容量

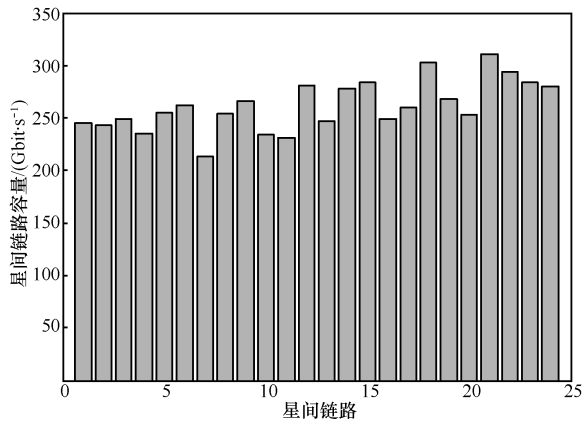


图 11 卫星等流量模型下, 各条星间链路流量分布

卫星等流量模型下, 24 个时间片下卫星传输网的平均容量为 4 029.8 Gbit/s, 星间链路流量分布方差为 527, 而基于时间的流量模型下平均容量为 4 010.1 Gbit/s, 星间链路流量分布方差为 313。使用基于时间的流量模型, 系统容量的计算更符合实际, 且星间链路的流量分布更均衡, 拥堵概率更小; 由于卫星拓扑为对称结构, 等流量模型下对称的流量输入必然会导致更大的系统总容量, 而系统平均总容量只降低了 0.4%, 充分印证了基于时间的流量模型的合理性和有效性。

5 结束语

本文考虑覆盖全球的中轨卫星星座通信系统,

依据不同地区时差不同导致的通信流量差异,建立了卫星通信流量的时间模型,对一个卫星回归周期进行时间切片,采用负载均衡的路由算法,仿真得到每个时间片下的系统总容量,较为实际地分析出给定卫星星座的系统容量随着时间的变化趋势,并得到一个回归周期内的平均系统容量,以及平均星间链路容量分布;与基本的最短路径路由算法进行仿真对比,说明了本文采用的负载均衡路由算法在提升系统总容量和均衡各星间链路流量分布方面有显著优势;并与卫星等流量模型对比,印证了基于时间的流量模型的合理性和有效性,为星座系统性能分析提供了依据。但是对于大型卫星星座,本文中的仿真方法需进行复杂的数据统计,工作量会增加。

参考文献:

- [1] 梁立京. IP 城域网出口流量预测方法[J]. 电信技术, 2014, 1(10): 115-119.
LIANG L J. Traffic prediction of IP metropolitan area network[J]. Telecommunications Technology, 2014, 1(10):115-119.
- [2] 张中亚. 通信卫星上信息交换技术[J]. 航天器工程, 2003, 12(1): 6-11.
ZHANG Z Y. Information exchange technology of satellite communication[J]. Spacecraft Engineering, 2003,12(1):6-11.
- [3] 罗雪山, 李健杰, 易先清, 等. 下一代 LEO 卫星网络路由策略分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2011,12(2):72-75.
LUO X S, LI J J, YI X Q, et al. Routing strategy analysis of the next generation LEO satellite network[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011,12(2):72-75.
- [4] 王汝传. 卫星通信网络路由技术及其模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010:7-15.
- WANG R C. Routing technology and simulation on satellite communication network[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2010:7-15.
- [5] LOUIS J, IPPOLITO J. 孙宝升, 译. 卫星通信系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012:2-15.
LOUIS J, IPPOLITO J. Satellite communication systems engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012:2-15.

作者简介:



王雅慧 (1992-), 女, 河北石家庄人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星系统容量。



况鸿凤 (1992-), 女, 重庆人, 电子科技大学硕士生, 主要研究方向为卫星路由算法。



朱立东 (1968-), 男, 四川邻水人, 博士, 电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为卫星通信、信号处理、信道建模与仿真、资源管理等。