

低轨巨型星座网络容量评估与分析

杨华果¹, 陈全¹, 杨自鹏², 张群², 吴帅³, 杨磊¹

(1. 国防科技大学空天科学学院, 长沙 410073;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

3. 军事科学院, 北京 100091)

摘要: 低轨卫星网络可以提供广覆盖、低时延、大容量的通信服务和随遇接入的网络服务, 可有效弥补地面通信网络和高轨卫星网络的不足。近年来“星链”“一网”等星座项目推动了低轨巨型星座的飞速发展。卫星网络容量是网络性能评价的重要指标, 传统方法计算复杂度高、耗时长, 且计算开销随网络节点数迅速增加, 在巨型星座网络评估中产生巨大计算开销。面向低轨巨型星座网络容量评估问题, 提出了一种基于最大流的网络容量评估方法, 与传统方法相比计算复杂度和计算耗时大大降低。以“星链”星座为例, 分析了星座构型、星间链路拓扑连接方式、链路容量及用户需求量对巨型星座网络容量的影响。仿真分析结果对未来低轨巨型星座网络建设具有指导意义。

关键词: 低轨卫星网络; 网络容量; 最大流; 星链

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 06-0024-07

Capacity Evaluation and Analysis of LEO Mega-Constellation Network

YANG Huaguo¹, CHEN Quan¹, YANG Zipeng², ZHANG Qun², WU Shuai³, YANG Lei¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China;

3. Academy of Military Sciences, Beijing 100091, China)

Abstract: LEO satellite network can provide wide-area coverage, low latency, high capacity communication services and random access network services, which can effectively compensate for the limitations of terrestrial network and high-orbit satellite network. In recent years, the constellation projects such as Starlink and OneWeb have accelerated the development of LEO mega-constellations. Satellite network capacity is an important index of network performance evaluation. However, traditional simulation methods have high computational complexity and time consumption, and the computational cost increases rapidly with the number of network nodes, resulting in huge computational costs in the evaluation of mega-constellation network. Aiming at the capacity evaluation of LEO mega-constellation network, an evaluation method of LEO satellite network based on the maximum flow is proposed, which greatly reduces the computational complexity and time consumption compared with traditional methods. Take Starlink as an example to simulate and analyze the influence of constellation configuration, topological connection mode of

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-10-30

基金项目: 大学科研计划 (ZK22-02)

作者简介: 杨华果 (2000-), 女, 硕士, 主要研究方向为卫星网络。

通信作者简介: 杨磊 (1979-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为卫星网络和集群网络等。

inter-satellite links, link capacity and user demand on the capacity of LEO mega-constellation network. The simulation results are of guiding significance for the future construction of LEO mega-constellation network.

Key words: LEO satellite network; Network capacity; Maximum flow; Starlink

0 引言

近年来, 卫星通信在民生等各领域发挥了重要作用。低轨卫星间可以通过建立星间链路形成卫星组网, 低轨卫星网络可以提供广覆盖、低时延、大容量的通信服务和随遇接入的网络服务, 且具有链路损耗少、成本低、布设不受影响等优点^[1-3], 可提供不依赖地面网络的通信服务, 有效弥补地面通信网络和高轨卫星网络的不足。

随着卫星通信技术的发展, 发射成本逐渐降低, 市场需求量不断扩大, 低轨卫星网络向着巨型星座发展。近年来, “星链” (Starlink)、“一网” (OneWeb) 和“柯伊伯” (Kuiper) 等星座项目推动了低轨巨型星座的飞速发展^[4]。本文研究的主要对象为低轨巨型星座网络, 其网络通信图如图 1 所示, 包含地面网络和卫星星座网络。地面网络由分布在各地的信关站和用户终端组成, 卫星星座网络通过星间链路相连。

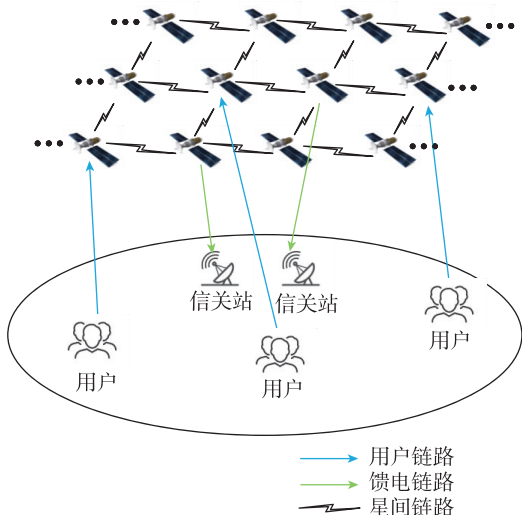


图 1 低轨卫星网络通信图

Fig. 1 LEO satellite network communication

在低轨卫星网络的设计和建设中, 卫星网络容量是网络性能评价的重要指标, 反映网络的最大服务能力, 可以为提高网络效率、设计高效的网络协议提供依据^[5]。网络容量可定义为星间链路单位时间内传输的最大数据量, 即网络能够承载流量的最大值。现有的卫星网络容量分析常采

用仿真分析法、建模优化法和数值分析法^[6]。文献 [7] 利用空间网络仿真平台分析了不同路由策略下的网络吞吐量。文献 [8] 建模了卫星通信系统最大化信道有效容量的功率分配问题, 文献 [9] 建立了网络容量模型, 并利用改进后的分布式遗传算法得出卫星网络容量上限。当前已有的方法应用于巨型星座仿真时大多计算复杂度高, 耗时长, 特别是利用网络仿真平台的方法对计算机硬件要求较高, 且计算开销随网络节点数增大而迅速增加, 在巨型星座网络评估中将产生巨大的计算开销。巨型星座规模的扩张不仅提升了系统容量, 也增加了系统复杂度和性能评估难度。

因此, 本文提出一种基于最大流的网络容量评估方法, 通过求解最大流来替代网络路由仿真, 从而有效减小巨型星座网络容量评估的复杂度与计算开销。最后基于“星链”星座, 进一步研究了星座构型、星间链路拓扑连接方式、链路容量及用户需求对巨型星座网络容量的影响。

1 基于最大流的低轨卫星网络容量评估模型

本文主要采用求解最大流的方法代替网络仿真来进行网络容量的评估。在给定网络规模下以最大流方法计算求解网络容量, 分析网络容量与星座构型、星间链路拓扑连接方式及链路容量的关系。卫星之间通过建立星间链路来实现连通和通信, 每颗卫星可建立 2 条、3 条、4 条或 6 条星间链路。星地下行链路的流量远大于星地上行链路, 因此星地链路主要考虑下行链路。在进行仿真建模时, 根据先验知识, 综合考虑地面信关站的布局、链路容量及功率分配等参数对网络容量的影响, 设定各参数值。

1.1 卫星网络模型

卫星星座作为卫星网络研究的模型基础, 决定着卫星网络的整个体系架构^[10]。假设采用 Walker-Delta 星座构型, 其构型如图 2 所示, 轨道面个数为 N_1 , 每个轨道面上的卫星数量为 N_2 。整个星座是均匀对称的, 且不存在反向缝。基于图论方法, 在卫星星座中, 可将每颗卫星抽象为图的一个节点, 相邻节点之间通过全双工链路实

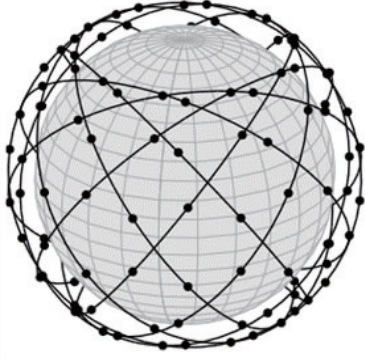


图2 低轨卫星网络星座构型图

Fig. 2 LEO satellite network constellation

现通信, 这种链路即为星间链路 ISL (Inter-Satellite Link)^[11], 将星间链路抽象为图的边。依据相邻两节点是否在相同轨道面内, 将星间链路分为轨内星间链路 (intra-plane ISL) 和轨间星间链路 (inter-plane ISL)^[12]。

卫星节点集为

$$S = \{ \mathbf{a} = (a_1, a_2) \mid 0 \leq a_1 \leq N_1 - 1, (1) \\ 0 \leq a_2 \leq N_2 - 1 \}$$

其中, 节点 \mathbf{a} 代表位于第 a_1 轨道上的第 a_2 颗卫星。链路集为

$$E_1 = \left\{ \begin{array}{l} (\mathbf{a}, \mathbf{b}) \mid \mathbf{b} = (b_1, b_2), \\ \mathbf{b} = ((a_1 \pm 1) \bmod N_1, a_2) \\ \text{或 } (a_1, (a_2 \pm 1) \bmod N_2) \end{array} \right\} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{b} = ((a_1 \pm 1) \bmod N_1, a_2)$ 时, 链路 (\mathbf{a}, \mathbf{b}) 代表相邻轨道上第 a_2 颗卫星间的链路; $\mathbf{b} = (a_1, (a_2 \pm 1) \bmod N_2)$ 时, 链路 (\mathbf{a}, \mathbf{b}) 代表同一轨道上相邻卫星间的链路。网络中的每颗卫星在水平和垂直方向上各有 2 个相邻节点, 每颗卫星均采用一星四链的连接方式^[13], 网络的局部拓扑如图 3 所示。

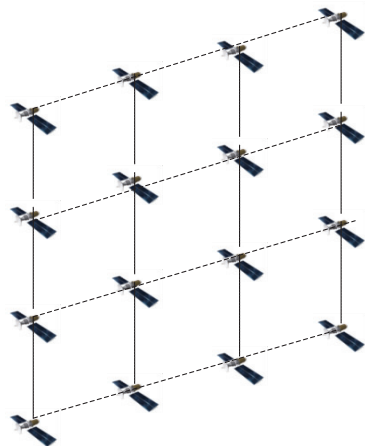


图3 卫星网络局部拓扑

Fig. 3 Satellite network partial topology

1.2 最大流算法原理

最大流问题是研究在给定条件下如何使网络流量达到最大值的组合优化问题^[14], 其实质就是求解从源点到达汇点的流量最大值^[15]。求解最大流能够为大规模网络的计算研究提供基础, 其中一种经典的解法为增载轨算法^[16]。

在给定网络中进行流量传输时每条链路的容量是固定值, 当流量开始分配后, 每条链路上的剩余容量都会随之改变。如果在从源节点到汇节点的一条链路中的每条边都存在非零的剩余流量, 则将该条链路称为增广链。该条链上还能增加的流量由所有边中最小的剩余容量决定。增载轨算法就是在具有剩余容量的网络中沿可行路径增广流值, 直至网络中不存在增广链时累加达到的可行流就是整个网络容量的最大值。

增广链的正确选择有利于提高计算效率, 在进行增广链确定时需要首先确定一条从源节点到汇节点的通路, 且该条链路每条边均具有剩余容量, 然后对每个节点进行搜索, 确定所有能到达的下一节点, 直至得到包含所有节点的树, 最终确定一条增广链。

在容量网络 $G = (V, A, c)$ 中, 将从源点 s 到汇点 t 的非负函数 f_{st} 定义为可行流, 假如 f_{st} 满足以下条件^[17]

$$\sum_j f(i, j) - \sum_j f(j, i) = \begin{cases} f_{st}, i = s \\ 0, i \neq s, t \\ -f_{st}, i = t \end{cases}$$

$$0 \leq f(i, j) \leq c(i, j), \forall (i, j) \in A(G) \quad (3)$$

则 f_{st} 成为容量网络 $G = (V, A, c)$ 的全部可行流之一, 当该流值为所有流中的最大值时则成为最大流, 记为 f_{\max} 。

1.3 基于最大流的网络容量评估模型

本文主要是通过求解源节点到汇节点的最大流来估算整个低轨卫星网络的网络容量。将所有卫星节点记为 S 集, 网络源节点 source 记为 s , 网络的汇节点 sink 记为 t 。每条边 (u, v) 的流量记为 $f(u, v)$, 每条边流量的最大值即为容量, 记为 $c(u, v)$, 且 $c = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{B(T)}{T}$ 。其中 $B(T)$ 是时间 T 内汇节点接收的总数据量。最大流问题就是求解从源点到达汇点的流量最大值, 在通信网络中即为从源节点到汇节点的最大数据传输速率。在最大流问题中, 应满足 $f(u, v) \leq c(u, v)$, 且

除了 source 节点和 sink 节点外的任意节点， $\sum f_{in}(u, v) = \sum f_{out}(u, v)$ 。

在实际运行过程中，星下用户密度不均且需求量不一致，会导致数据流量不一致，且不会一直保持饱和状态^[6]，因此将所有用户虚拟为一个源节点，所有信关站虚拟为一个汇节点。源节点与所有卫星相连，汇节点与距离每个信关站最近的两颗卫星相连。由于卫星一直处于高速运动中，网络拓扑和网络容量都会随之产生动态变化，在仿真中可将卫星运行周期划分为多个时间片，假设在各时间片中网络拓扑为静态，分别求解各时间片的最大流，计算平均值作为最终的网络容量。

卫星网络最大流的模型示意图如图 4 所示。

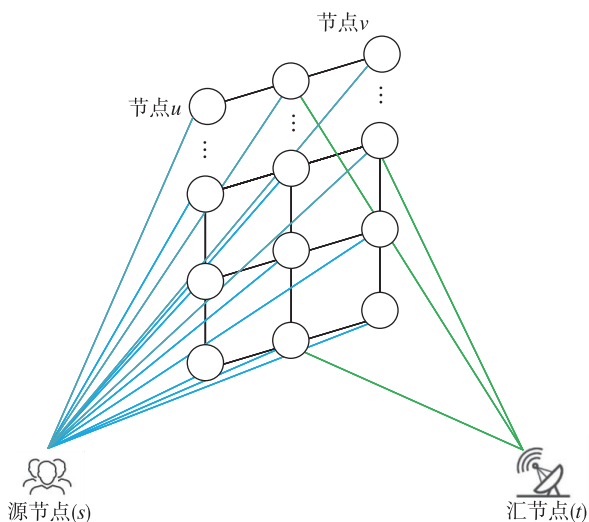


图 4 卫星网络最大流模型示意图

Fig. 4 Maximum flow model of satellite network

2 仿真算例

根据前文分析，以“星链”550 km 轨道层星座的规模为例，进行具体仿真实验。在给定的网络规模下计算求解该网络的最大流。最后，分析网络容量与星座构型、星间链路拓扑连接方式及链路容量的关系。

2.1 网络容量求解

以“星链”550 km 轨道层星座为基础研究对象，星座包含 72 个轨道面，且每个轨道面上有 22 颗在轨卫星。在计算网络容量时综合考虑星地连接约束、链路拓扑动态变化、链路容量约束。地面采用全球分布的 30 个信关站布局，仿真场景设置参考已有文献^[18]。星座结构决定卫星间的相邻关系、

星间链路数量和网络拓扑的变化方式^[19-20]。在求解网络容量中，首先要获取低轨卫星星座的星座构型及其余各项参数，之后对每颗卫星进行编号，每颗卫星的所在位置与网络节点一一对应。将卫星运行周期按照链路特性及运动规律划分为多个时间片，在各时间片中将网络拓扑视为静态。确定星间链路连接方式后生成邻接矩阵，对矩阵进行赋值。若两颗卫星间有连接则矩阵中对应数值为 1，否则为 0。然后为每颗卫星计算用户流量输入，并确定卫星与信关站的连接状态。最后，对各时间片分别求解最大流，将各时间片下的最大流值求平均即为该卫星网络的网络容量。本文讨论的方法均是对一个时间片进行仿真验证，实际仿真过程中将仿真时间片设置为 30 s，共仿真 12 h，最后计算各时间片的网络容量平均值。

贪婪算法是通过组合局部最优解来构建全局最优解，在优化问题和网络分析等领域被广泛应用。为验证本文方法的正确性和有效性，本文首先采用了贪婪算法求解网络容量，并以“星链”550 km 轨道层星座为研究对象，涵盖了 72 个轨道面，且每个轨道面上有 22 颗在轨卫星，每颗卫星均建立 4 条星间链路。该算法计算复杂度为 $O(n^2)$ ，其中 n 是输入规模，即总节点数。最大流算法的计算复杂度为 $O(mf)$ ，其中 m 是图的边数， f 是最大流的值。在本文设定的仿真规模条件下，最大流算法具有更低的计算复杂度。采用贪婪算法对网络进行仿真时，得到的计算数据与最大流算法的输出相同，验证了该算法的正确性和有效性，但是，贪婪算法的平均运行时间远大于最大流算法的平均运行时间，说明所提方法在巨型星座场景下的计算效率更高。两种算法的性能比较如图 5 所示。

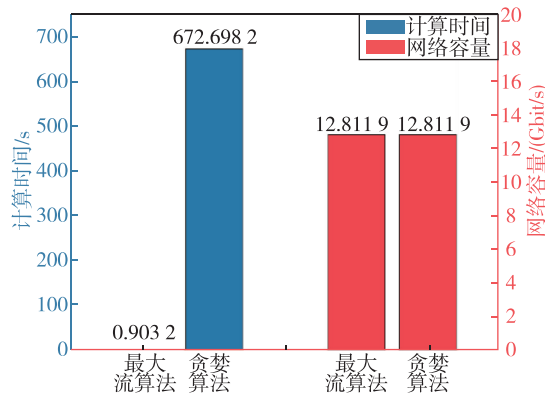


图 5 两种算法的性能比较

Fig. 5 Performance comparison of two algorithms

2.2 不同星座构型下的仿真分析

“星链”550 km 轨道层星座共有 1 584 颗卫星，假设每颗卫星均建立 4 条星间链路，即与其同轨前后和异轨左右的 4 颗相邻卫星建立星间链路。其中，每条轨道面上的第 1 颗卫星同第 N_2 颗卫星建链，第一轨道面的卫星同第 N_1 轨道面的卫星建链，形成无缝的均匀对称网络。假设每条星间链路容量为 100 Mbit/s，用户需求总量为 20 Gbit/s，信关站容量为 2 Gbit/s。在保持星座卫星总数不变的情况下，改变轨道面数 N_1 和每轨卫星数 N_2 ，得到不同的星座构型。不同星座构型下仿真得到的网络容量结果如表 1 所示。

表 1 不同星座构型下的网络容量

Tab. 1 Network capacity of different constellation configurations

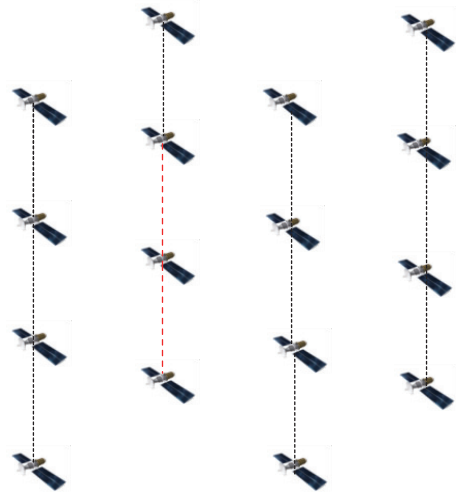
轨道数目/个	单轨卫星数/颗	网络容量/ (Gbit/s)
24	66	13.572 4
36	44	13.773 1
48	33	12.333 3
72	22	12.811 9

由表 1 的仿真结果可知，在给定的星座规模中通过改变轨道数目和单轨卫星数可设计不同的星座构型，而不同配置的星座构型会导致网络性能的不同。仿真结果表明，当 N_1 与 N_2 相差值最小 ($N_1=36$, $N_2=44$) 时，网络容量达到最大。其成因可能是 N_1 与 N_2 更接近，星座的 Mesh 状拓扑均匀对称性更强，网络连接效率更高，导致更大的网络容量。

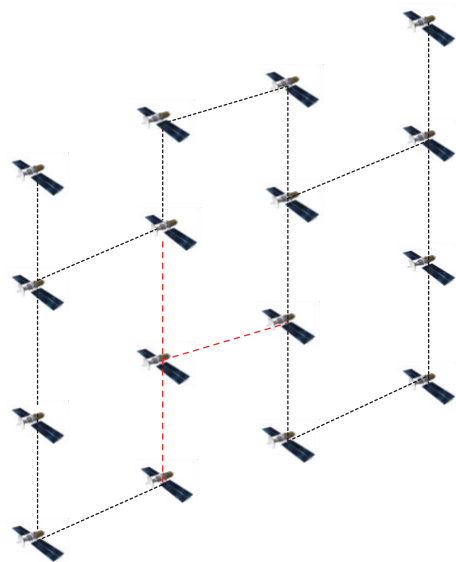
2.3 不同星间链路拓扑连接下的仿真分析

在给定期规模的卫星网络中不同的拓扑连接方式将导致网络性能的不同。星座包含 72 个轨道面，且每个轨道面上有 22 颗在轨卫星，通过连接星间链路建立对称的网络。假设每条星间链路容量为 100 Mbit/s，信关站容量为 2 Gbit/s。本文选用的建链方式包括一星两链 (2-ISL)、一星三链 (3-ISL)、一星四链 (4-ISL) 和一星六链 (6-ISL)。不同的建链方式如图 6 所示，仿真得到的网络容量结果如表 2 所示。

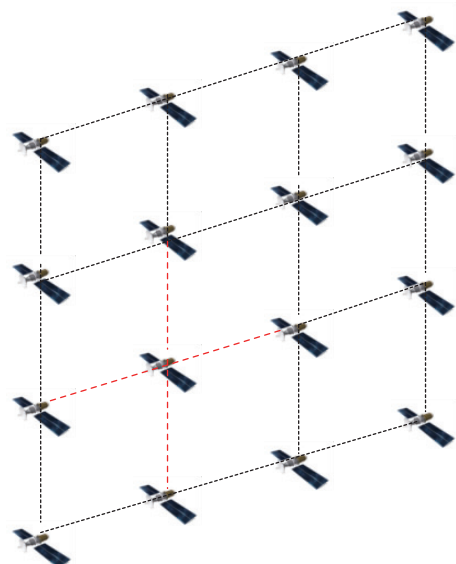
由表 2 的仿真结果可以看出，在给定卫星数目和构型的星座内，卫星间建立的链路数目越多，网络容量越大。星间链路的增加可提升网络连接性，由于星间链路数目增加，同一时间单颗卫星可承载的数据量也增加，进而导致网络容量增



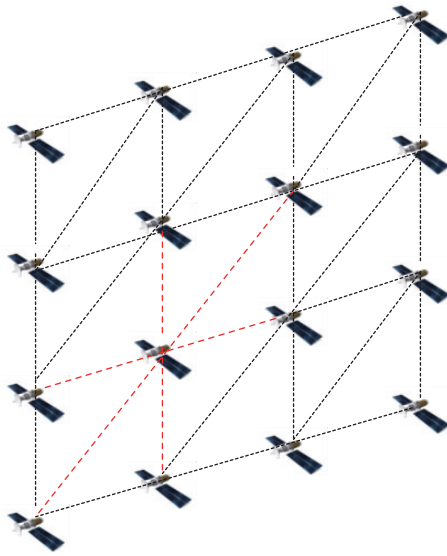
(a) 一星两链



(b) 一星三链



(c) 一星四链



(d) 一星六链

图 6 不同星间链路的拓扑示意图

Fig. 6 Topological diagrams of different inter-satellite links

表 2 不同星间链路拓扑连接下的网络容量

Tab. 2 Network capacity of different inter-satellite link topology connections

星间链路条数	网络容量/ (Gbit/s)
2-ISL	6.556 9
3-ISL	8.659 1
4-ISL	12.811 9
6-ISL	18.036 2

大。考虑到星上体积功率受限以及星间通信终端的资源占用，单星可建立的星间链路数目也受限制，目前常见的构型一般采用 3~4ISL 构型。

2.4 不同链路容量参数下仿真分析

卫星网络系统中不同链路的容量差异也影响着整个网络的传输效率及网络容量。以“星链”星座 550 km 轨道层为研究对象，共有 72 个轨道面，且每个轨道面上都有 22 颗卫星。假设每颗卫星均采用一星四链的连接方式，用户需求总量为 100 Gbit/s。改变星间链路容量，得到不同星间链路容量下的平均网络容量，如表 3 所示。

由表 3 的仿真结果可以看出，在卫星网络规模及星座构型确定的场景下，网络容量随星间链路容量的增加而增加，但当星间链路容量增加到一定值时，网络容量趋于平稳，不再增加。其原因是，卫星承载的流量来自其自身覆盖域内的业务量和周边卫星经星间链路转发的业务量。当星间

表 3 不同星间链路容量下的网络容量

Tab. 3 Network capacity of different inter-satellite link capacities

用户需求总量/ (Gbit/s)	星间链路容量/ (Gbit/s)	星地链路容量/ (Gbit/s)	网络容量/ (Gbit/s)
100	0.05	1	19.906 1
100	0.10	1	31.006 1
100	0.15	1	41.906 9
100	0.20	1	52.372 4
100	0.25	1	57.754 3
100	0.30	1	58.000 0
100	0.35	1	58.000 0

链路容量较小时，星上流量受限于星间链路容量，将随着星间链路容量增加而增加，从而增加系统容量。当星间链路足够大时，星上业务量超出星地链路容量，限制了星上业务的星地传输，从而使系统容量不再随着星间链路容量增加而增加。

仿真中保持其他链路容量不变，改变用户需求总量，得到不同用户需求总量下的网络吞吐量结果，如表 4 所示。

表 4 不同用户需求总量下的网络吞吐量

Tab. 4 Network throughput of different total user requirements

用户需求总量/ (Gbit/s)	星间链路容量/ (Gbit/s)	星地链路容量/ (Gbit/s)	网络吞吐量/ (Gbit/s)
20	0.15	4	20.000 0
30	0.15	4	30.000 0
40	0.15	4	36.623 7
50	0.15	4	37.529 7
60	0.15	4	38.435 6
70	0.15	4	39.341 5
80	0.15	4	40.247 4

由表 4 的仿真结果可以看出，在卫星规模及星座构型确定的场景下，用户需求总量也将影响整个网络的吞吐量。当用户需求总量较少时，全部用户业务需求都可转发至信关站，此时网络吞吐量与用户需求量相等，随着用户需求量增长而快速增长。当用户需求总量较大时，受限于星间链路容量和星地链路容量，无法将所有数据下传至汇节点，此时网络吞吐量小于用户需求总量，且两者差值逐渐增大，网络吞吐量逐渐增大至星间链路/星地链路确定的网络容量上限。在本算例中，限制网络容量的主要参数为星间链路容量。

3 总结

本文研究了采用最大流算法求解低轨卫星网络容量,以“星链”星座为例,分别分析了在给定规模下不同的星座构型、星间建链数与链路容量参数对网络容量的影响。与传统网络容量评估方法相比,计算复杂度更低,计算耗时更短。根据仿真结果可知,网络容量与星间建链数和星间链路容量呈正相关。此外,网络容量还受星座构型和用户需求总量等参数的影响。在设计通信网络时可以考虑增加星间链路数,以提高整个网络效率。

参考文献

- [1] 陈全,杨磊,郭剑鸣,等.低轨巨型星座网络:组网技术与研究现状[J].通信学报,2022,43(5):177-189.
- [2] 刘佳.低轨宽带卫星通信产业发展及前景分析[J].中国新通信,2021,23(1):108-110.
- [3] 孙建亮,崔国刚,周英庆.发展我国低轨卫星通信星座系统的思考[J].通信技术,2020,53(9):2224-2227.
- [4] 张有志.低轨通信卫星星座的建设与构想[J].计算机与网络,2020,46(17):70-73.
- [5] 张成博.多层卫星网络中基于星际链路选择的网络容量分析方法研究与仿真实现[D].沈阳:东北大学,2014.
- [6] 毕媛媛.低轨卫星网络的容量分析[D].西安:西安电子科技大学,2021.
- [7] Xiao Y L, Zhang T, Shi D Y, et al. A LEO satellite network capacity model for topology and routing algorithm analysis[C]//Proceedings of 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Limassol, Cyprus. IEEE Press, 2018: 1431-1436.
- [8] Vassaki S, Panagopoulos A D, Constantinou P. Effective capacity and optimal power allocation for mobile satellite systems and services[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(1): 60-63.
- [9] 徐双,王兴伟,黄敏,等.一种卫星网络容量智能分析方法[J].计算机学报,2017,40(7):1572-1582.
- [10] 陈欢欢.双层卫星网络结构设计和星间路由协议研究[D].西安:西安电子科技大学,2017.
- [11] 张路.中低轨卫星通信网络路由算法研究[D].南京:东南大学,2021.
- [12] 朱润涛.基于流量预测的卫星网络负载均衡路由关键技术研究[D].北京:北京邮电大学,2017.
- [13] Chen Q, Yang L, Guo J M, et al. Optimal gateway placement for minimizing inter-satellite link usage in LEO mega-constellation networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(22): 22682-22694.
- [14] 陈晓旭,吴恒,吴悦文,等.基于最小费用最大流的大规模资源调度方法[J].软件学报,2017,28(3):598-610.
- [15] Li X, Chen Q, Yang L, et al. A method for performance evaluation of the low earth orbit satellite networks[C]//International Conference on Wireless and Satellite Systems. Cham: Springer, 2021: 271-281.
- [16] Goldberg A V, Tarjan R E. Efficient maximum flow algorithms[J]. Communications of the ACM, 2014, 57(8): 82-89.
- [17] 赵礼峰,邵丽萍.求解最大流问题的算法[J].计算机工程与设计,2019,40(8):2224-2227,2241.
- [18] 陈全.面向低轨巨型星座的星地一体化网络关键技术研究[D].长沙:国防科技大学,2021.
- [19] Lo M W. Satellite-constellation design[J]. Computing in Science & Engineering, 1999, 1(1): 58-67.
- [20] James R W, Wiley J L. Space mission analysis and design[M]. 3rd Edition. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999.

引用格式:杨华果,陈全,杨自鹏,等.低轨巨型星座网络容量评估与分析[J].宇航总体技术,2023,7(6):24-30.

Citation: Yang H G, Chen Q, Yang Z P, et al. Capacity evaluation and analysis of LEO mega-constellation network [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023,7(6):24-30.