

大型低轨星座网络规划方法与仿真分析

刘立祥, 刘帅军

(中国科学院软件研究所, 北京 100190)

摘要: 得益于全球覆盖、高吞吐量和低时延等优势, 大型低轨星座网络已成为了全球发展的热点。然而, 大型低轨星座网络规划方法及仿真建模分析尚未得到深入研究。重点解决如下两个问题: 如何评估给定的大型低轨星座网络、如何设计或优化星座网络。建立了用以评估大型低轨星座网络性能的3个关键指标, 即网络覆盖率、系统吞吐量、业务往返时延。以此关键指标为设计优化目标, 对卫星星座部署、关口站部署和无线资源管理进行分析和设计, 并搭建用于大型低轨星座网络的集成网络评估和规划仿真平台, 以验证所提出的网络规划方案。仿真结果表明, 所设计的网络规划仿真平台可以支持对大型低轨星座网络的评估和规划。

关键词: LEO卫星星座网络; 性能评估; 网络规划; 仿真平台

中图分类号: TN927+.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200212

Network Planning Method and Simulation Analysis for Large-Scale Low Earth Orbit Satellite Constellation Networks

LIU Lixiang, LIU Shuaijun

Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: Thanks to the advantages of global coverage, high capacity and low latency, the large-scale LEO satellite constellation networks has become a hot spot for global development. However, planning methods and simulation modeling research for LS-LEOSCN has not been well studied. This paper focused on the following two issues, namely how to evaluate a given LS-LEOSCN, and how to design or optimize a constellation network. Three key indicators for evaluating the performance of LS-LEOSCN were established, namely network coverage (CT), system throughput (ST) and round-trip time (RTT). Further, the satellite constellation deployment (SCD), gateway station deployment (GSD) were analyzed and designed in the integrated network evaluation and planning (NEaP) platform for LS-LEOSCN. The simulation results showed that the designed NEaP platform could support the development of LS-LEOSCN evaluation and planning.

Keywords: LEO satellite constellation network, performance evaluation, network planning, platform implementation

1 引言

随着低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信网络和星上处理 (On-Board Processing, OBP) 技术的飞速发展, 由更大规模数量的LEO卫星 (例如一网、星链) 组成新一代大型LEO卫星星座网络 (Large-Scale LEO Satellite Constellation Networks, LS-LEOSCN) 已经出现并成为发展趋势^[1-2]。与对地静止地球轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 卫星或传统LEO卫星星座 (例如Iridium、Globalstar) 系统相比, LS-LEOSCN

具有更先进的OBP功能、更高阶的调制方案、更低的制造和发射成本, 但是规模的急剧增加带来了性能评估和网络规划方面的棘手问题。

低轨星座网络性能评估与优化技术已在很多相关参考文献^[3-7]中进行了研究。现有多数工作都集中在具体某些技术或算法上, 例如动态缓存^[3]、信道^[4]、功率^[5]、波束^[6]资源分配, 切换^[7]、路由^[8]等算法, 评估的指标则包括频谱效率、服务时延和系统吞吐量, 但是缺少用于评估和规划大型低轨星座网络LS-LEOSCN的一体化平

台,即并非用以验证某个技术或算法的单一用途。针对此问题,本文从网络覆盖、系统吞吐量和往返时延3个方面分析了系统性能,并在集成的网络评估与规划仿真平台(LEO satellite systems Network Evaluation and Planning platform, LEO-NEaP)中实现了包括卫星星座设计、资源管理和关口站部署等在内的关键模块集成。最后,通过一些示例仿真表明所设计的LEO-NEaP平台的有效性。

2 系统模型

2.1 LEO卫星星座场景描述

对于LS-LEOSCN,分别以 T 、 P 、 S 表示LEO卫星的数量、轨道面的数量和每轨道面内LEO卫星的数量。LS-LEOSCN的架构如图1所示。

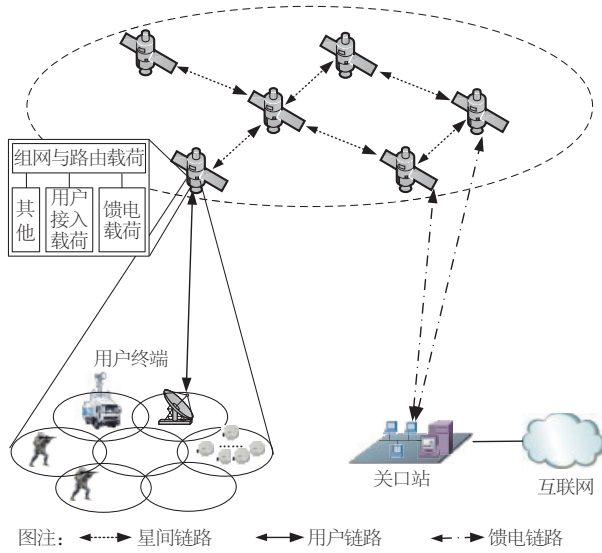


图1 LS-LEOSCN的架构示意

LEO卫星同时充当路由器和接入点功能,即通过用户接入载荷完成对多用户的无线接入;通过组网与路由载荷完成业务数据的星间/星地路由。

对于每颗卫星,通常会在覆盖范围内产生多个波束以实现空分增益,这已被证明在提高性能方面非常有效^[9-11]。每个卫星的波束数表示为 N_B ,卫星与用户终端的无线链路记为用户链接(User Link, UL)。同时,卫星间存在的链路记为星间链路(Inter-Satellite Link, ISL),而卫星与关口站之间的链路为馈电链路(Feeder Link, FL)。根据业务服务模式的不同,将链路分为前向链路和反向链路。其中,前向链路是指从关口站(Gateway Station, GS)到用户终端(User Terminal, UT)的链路,而反向链路是指从UT到GS的链路。

低轨卫星在轨的高速运动带来了星地频繁切换及网

络拓扑动态变化,而低轨卫星随时间的动态性由卫星轨道六根数确定,如式(1)所示

$$OE_s = \{a, e, i, W, w, m\} \quad (1)$$

其中 a 是半长轴, e 是离心率, i 是轨道倾角, W 是右旋升交点赤经(Right Ascension of Ascending Node, RAAN), w 是近地点幅角, m 是平近点角。

考虑到现有的LS-LEOSCN大多为圆形轨道,卫星节点的位置可以用星下点(Sub-Satellite Point, SSP)的纬度与经度、卫星轨道高度和瞬时方向来表示,如式(2)所示

$$LLAR_s = \{\text{Lat}, \text{Lon}, \text{Alt}, \text{dir}\} \quad (2)$$

其中,Lat和Lon是卫星下点的纬度和经度,Alt是轨道高度,而dir是即时移动方向。

2.2 网络覆盖性

网络覆盖性用以评估给定大型低轨星座网络LS-LEOSCN在目标区域的覆盖性能。不失一般性,可将目标区域表示为 $\mathcal{G}$,定义为一组满足目标范围的经纬度坐标点的集合,即,对于地面终端(GT) $g_k = \{\phi_k, \lambda_k\}$,如果GT g_k 在目标区域,则有 $g_k \in \mathcal{G}$;否则,它可以表示为 $g_k \notin \mathcal{G}$ 。大型低轨星座网络对目标区域的覆盖与否,则需进一步考虑各卫星对地波束的配置。对于卫星圆波束而言,描述为波束空间指向、波束宽度,对于其他诸如高椭圆波束、赋形波束等类型则可通过其他方式定义,此处不具体讨论。卫星 i 波束 j 的空间指向记为 $\mathbf{v}_{i,j}^{\text{beam}}$,表征了该空间指向的方位角和俯仰角,即 $\mathbf{v}_{i,j}^{\text{beam}} = \{\theta_{i,j}^A, \theta_{i,j}^E\}$ 。

此时,对于终端GT g_k 而言,波束 $b_{i,j}$ 指向该终端的空间向量记为 $\mathbf{v}_{i,k}^{s2g} = \{\theta_{i,k}^A, \theta_{i,k}^E\}$ 。此时,可以将波束 $b_{i,j}$ 的卫星 s_i 与GT g_k 的偏轴角计算为式(3)

$$\theta_{i,j,k} = \langle \mathbf{v}_{i,j}^{\text{beam}}, \mathbf{v}_{i,k}^{s2g} \rangle \quad (3)$$

其中,运算符 $\langle a, b \rangle$ 表示向量 a 和 b 之间的夹角。

因此,表示GT g_k 是否被给定波束 $b_{i,j}$ 覆盖的指标 $c_{i,j,k}$ 可以表示为式(4)

$$c_{i,j,k} = \begin{cases} 1, & \text{if } \theta_{i,j,k} \leq \frac{\theta_{i,j}^{\text{BW}}}{2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\theta_{i,j}^{\text{BW}}$ 是波束 $b_{i,j}$ 的波束宽度。

关于星座对目标区域的覆盖性,主要通过如下两个关键指标进行评估。

覆盖重数(coverage times, CT):定义为同时可覆盖给定GT的卫星/波束的数量。给定目标终端GT的覆盖重数CT可以计算为式(5)

$$CT_k = \sum_i \sum_j c_{i,j,k} \quad (5)$$

覆盖开销因子（Coverage Cost Factor, CCF）：定义为大型低轨星座网络提供的覆盖面积与目标覆盖面积之比。显然，CCF的理想值是1，即所有星座所提供的覆盖面积正好覆盖了目标区域。实际上由于低轨卫星相对运动等原因，此理想值不可达。如何最小化该覆盖开销因子CCF，则是设计空间段星座构型式需考虑的重要因素。

例如，当目标区域是全球覆盖时，CCF可以表示为式(6)

$$CCF = \frac{T \cdot 2 \cdot \pi \cdot (1 - \cos \psi) \cdot R_E^2}{4 \cdot \pi \cdot R_E^2} = \frac{T \cdot (1 - \cos \psi)}{2} \quad (6)$$

其中， R_E 是地球半径， ψ 是每个LEO卫星提供的覆盖范围的地心角， ψ 由轨道高度和最小仰角确定。

2.3 网络吞吐量

作为面向全球服务的大型低轨星座网络，如何为潜在用户提供按需的接入和传输服务，是影响系统收益的重要因素。大型低轨星座网络吞吐量主要取决于两个方面，即“供给侧——网络能提供的容量”“需求侧——市场（或用户）所需求的带宽”。

本节首先介绍供给侧网络容量、需求侧业务需求量，进而介绍基于网络图最大流算法的网络吞吐量评估机制。

(1) 对于供给侧而言，网络所能提供的容量需考虑两点：一是系统工作体制（取决于纯透明转发，还是采用了星上路由交换）；二是链路能力（用户链路、星间链路、馈电链路传输速率）。

系统工作体制的差异决定了整个网络工作模式及业务流处理机制的不同，在没有星间链路情况下，卫星更多的是仅作为中继服务模式，即站-星-端的业务流模式；在有星间链路情况下，此时系统则通过星上路由交换处理提供服务。整网所能提供的容量（以前向链路为例，可理解为从用户终端从网络中接收的数据速率）为所有关口站的输出，同样等于所有用户终端的输入。这两种工作体制下网络所能提供的容量分析方法略有不同，流程如图2所示。

由图2可看出，对于透明转发卫星系统，用户终端从网络获取服务只能通过一跳的关口站；换言之，没有关口站部署的地方，即便有卫星也是无法提供服务的。相比而言，星上路由交换体制则不需要全球布设关口站，这是因为其可通过星间链路的星间/星地路由实现面向全球的互联网服务。至于网络所能提供的容量，则可理解为关口站处流量入口的总传输速率（ T_{IN} ），同样也等于所有用户终端流量出口的总传输速率（ T_{OUT} ）。显

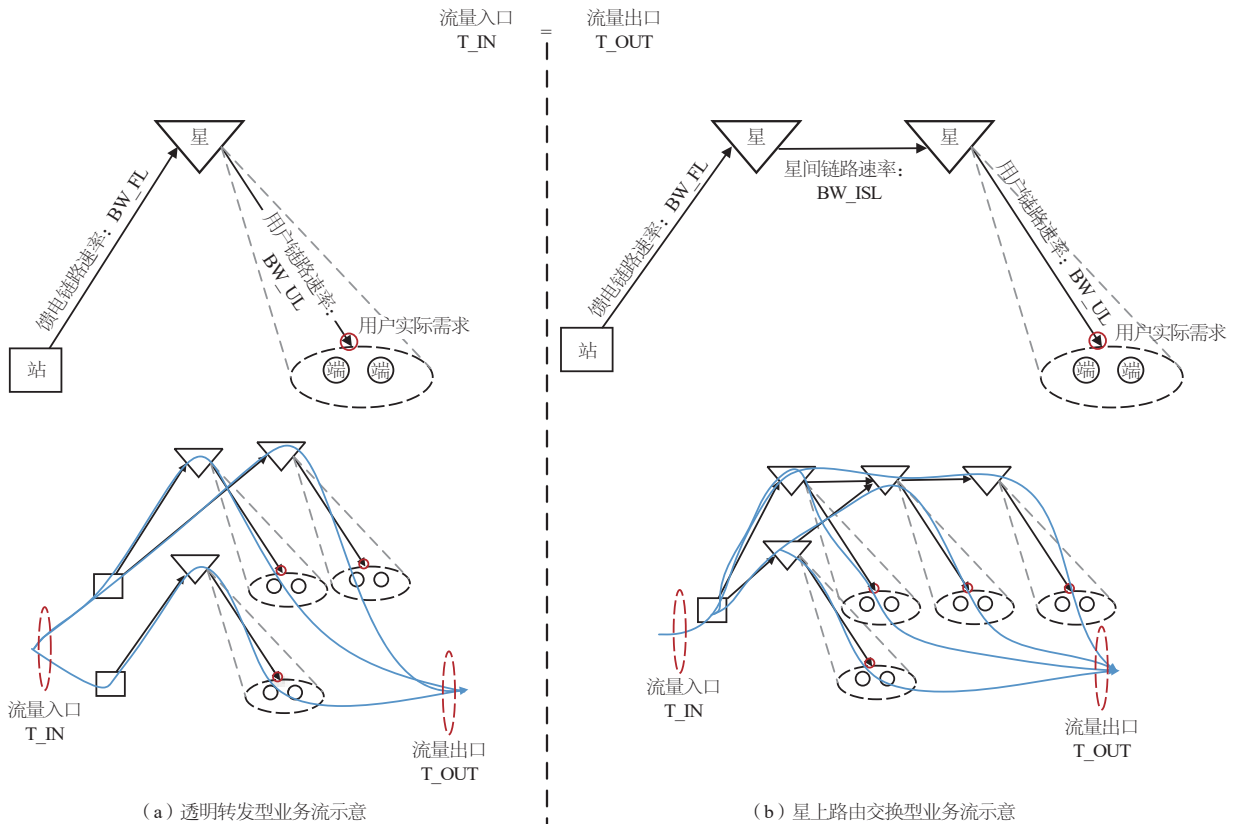


图2 不同体制低轨星座网络吞吐量分析示意

然,网络容量的大小严重依赖于工作体制、用户/星间/馈电路能力。

(2) 对于需求侧而言,则需要知道目标覆盖区域潜在的业务需求。业务需求的建模更多地需要考虑人口分布、经济发展、当地通信设施普及率、卫星通信渗透率等因素。基于全球人口分布的业务需求模型,详细过程可见参考文献[12]及参考文献[17]。

(3) 基于图论最大流仿真建模机制。

以下进一步给出低轨卫星星座网络容量的计算方法。对于星座而言,在无星间链路ISLs情况下,星座容量则可由所有单颗卫星容量累加得到;而在有星间链路情况下,则需考虑星间链路对整网容量的影响。以下分别讨论无星间链路及有星间链路的情况。

1) 情况1: 无星间链路

在无星间链路的情况下,单星容量为各波束容量之和,而各波束可达容量为用户链路、馈电路和业务能力三者的最小值。卫星星座网络容量则是对所有单星容量的累加,可由式(7)表示

$$C_{\text{tot}} = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \min(C_{s_m, b_n}^{\text{UL}}, C_{s_m, b_n}^{\text{FL}}, D_{s_m, b_n}) \quad (7)$$

其中, C_{s_m, b_n}^{UL} 与 C_{s_m, b_n}^{FL} 分别为卫星 s_m 波束 b_n 在用户侧UL与馈电侧FL的容量, D_{s_m, b_n} 为该卫星波束覆盖范围内的业务需求。

2) 情况2: 有星间链路

在有星间链路存在的情况下,考虑到星间链路ISL的存在会使得各星与各站的隶属关系不再是单纯的一一映射,且星座容量与星间路由策略、星间传输调度策略相关,需基于图论中最小代价最大流的方法进行建模与求解。

点: 图中节点包括3类: 卫星、用户、馈电站。

边: 将无线链路容量定义为边容量,链路时延定义为边的代价。星地链路传输速率与频率、带宽、天线、传播损耗、传输体制等有关。

基于上述对点和边的建模,实现了对低轨星座网络图的建模,进一步可通过网络最小代价最大流方法进行求解,即式(8)所示

$$ST = f_{\text{maxFlow}}(D_{s_m, b_n}, \text{ULs, FLs, ISLs}) \quad (8)$$

其中, f_{MaxFlow} 表示计算给定图的最大流量的函数。

3 NEaP平台的设计与实现

3.1 LEO-NEaP的体系结构

LEO-NEaP平台的架构如图3所示。LEO-NEaP中考虑了主要的场景参数,包括卫星、GS、UE及业务等模

型。通过对网络架构及业务需求等场景的构建,进一步结合卫星轨道动力学推进计算卫星LLAR(纬度-经度-高度-变化)位置,结合链路频率、带宽、雨衰等特性计算链路预算。最后,输出网络和业务的覆盖性、容量、时延等性能指标。

如图3所示,LEO-NEaP主要可分为3个部分,即场景输入、评估/规划、性能指标。

3.2 SCD: 卫星星座设计

卫星星座设计应根据目标覆盖范围和业务需求分布进行。低轨星座主要有两种星座构型,即Walker星座^[15-16]和(近)极轨星座。Walker星座的典型示例是Globalstar和Starlink第一阶段1 584颗星的子星座,而极轨星座的典型示例包括Iridium和OneWeb。

星座设计目标是在满足目标覆盖区域、最大化匹配业务需求的情况下,最小化星座建设的规模。极轨星座的优势在于全球覆盖,而大多数LEO卫星则在极少有人或业务需求的极地地区移动。相反,具有中等倾斜度的Walker星座可在中低纬度地区提供最佳覆盖。例如,Starlink采用了具有倾斜度1 584颗LEO卫星的步行者星座,可为全球大多数人口所在的35°~55°纬度提供最佳覆盖。

3.3 GSD: 网关节部署

就系统吞吐量和服务时延而言,网关节的部署对于LS-LEOSCN非常重要。在GSD中研究了许多元启发式算法(例如遗传算法GA或模拟退火算法SA)。相比于上述全局探索式算法,如何采用一种更为简单而有效的方法,成为了目前研究的一个方向。通过分析不同关口站部署对系统吞吐量增益的影响,参考文献[17]设计基于边际收益最大化的迭代贪婪关口站部署方法,即IGSD-MRM。其主要思想是选择在每次迭代中使边际收益最大化的GS,而每次边际收益计算时则考虑业务量需求、卫星星座以及用户/馈电/卫星间链路可达容量,即2.3节所述方法。

4 仿真结果与分析

以下首先描述网络规划的仿真结果与分析,分别对空间段星座设计、地面段关口站部署设计两个方面进行仿真示例和分析;进而,基于此网络规划仿真结果,对所选择网络架构下的系统性能进行评估,包括网络覆盖性、系统吞吐量和业务往返时延。

4.1 网络规划仿真结果与分析

4.1.1 空间段星座设计SCD

考虑待部署卫星星座的规模为500~1 000颗,而卫星

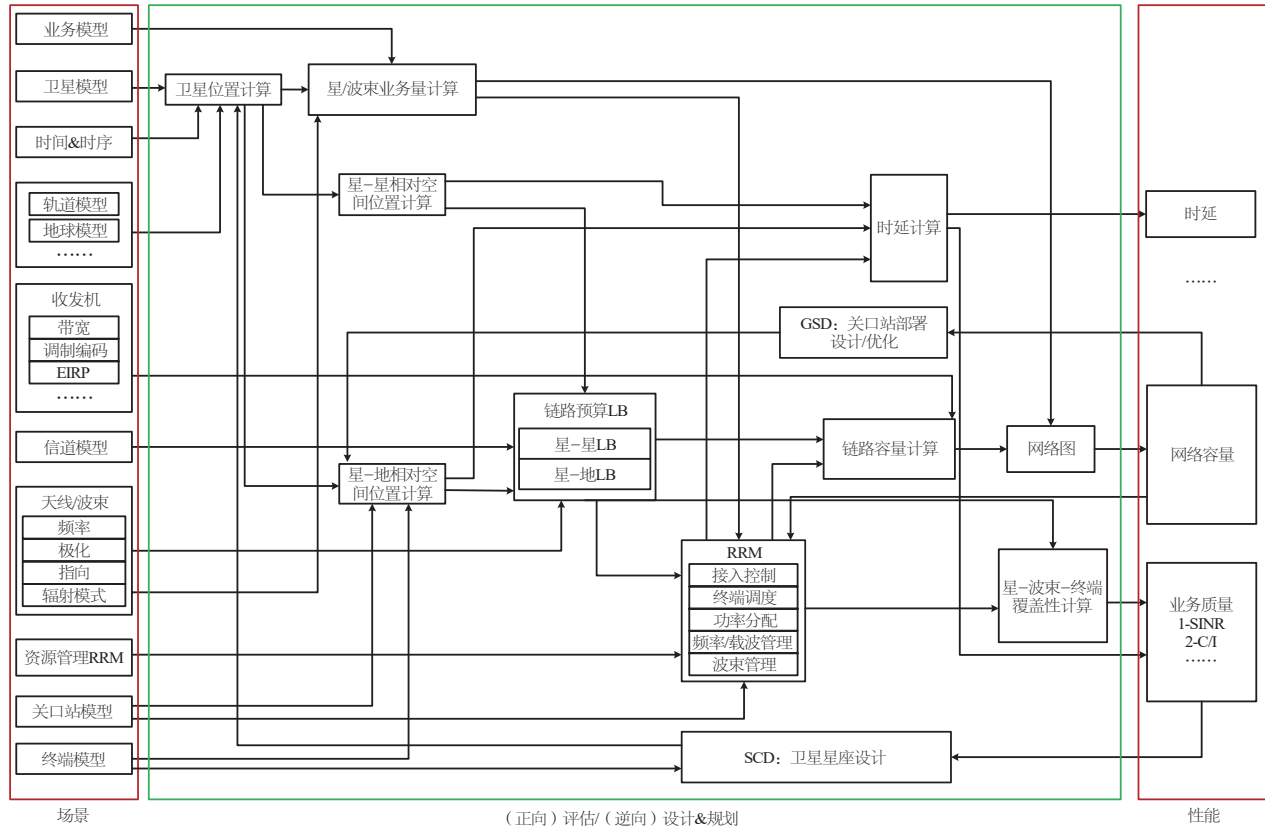


图3 LEO-NEaP仿真系统架构

轨道高度在500~1 500 km，轨道倾角为 86° ，支持终端的最小仰角为 40° 。通过3.2节星座设计方法与NEaP仿真平台，可行和最优星座设计结果如图4所示。

从图4可以看出，总共有650个可用星座设计方案，如图中蓝色x表示；而最佳星座结构的数目是105个，如红色矩形表示。此处，最佳星座定义为CCF小于2的SCD，即 $CCF_{sd} < 2$ 。从图4可看出，随着轨道高度的增加，所需的卫星数量减少，这是因为卫星轨道高度越高其对地覆盖视场越大，相应地所需卫星数量也越少。

4.1.2 地面段设计GSD

候选关口站的位置及主要仿真配置见参考文献[19]，仿真分析了关口站部署的位置及关口站配置馈电天线数与系统吞吐量的变化关系。更为详细的仿真结果与分析见参考文献[19]。此处，给出系统吞吐量随关口站馈电天线数的变化关系如图5所示。

由图5可看出，低轨星座容量随着馈电天线数的增加而增加，且该增长趋势在馈电天线数较小时更为明显。如馈电天线数由2副增长至4副时，网络容量由536.6 Gbit/s增长为1 090.0 Gbit/s，即馈电天线数增长100%情况下容量增长了103.3%；馈电天线数由10副增长到20副时，网络

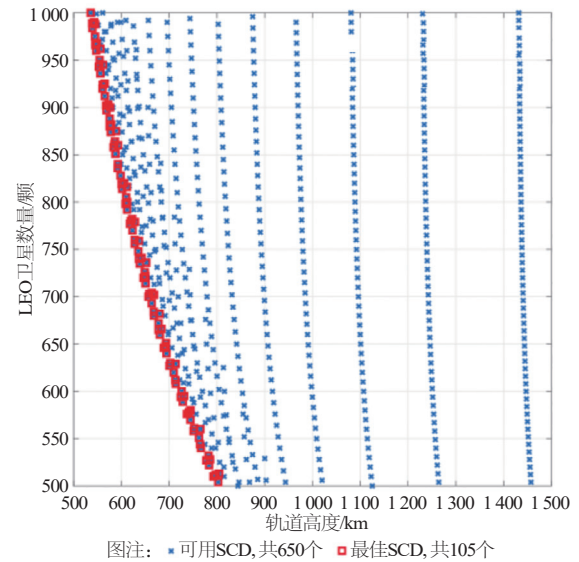


图4 卫星星座设计仿真结果

平均容量仅由1.61 Tbit/s增长到1.78 Tbit/s，相比而言仅提升10.6%。

4.2 性能评估仿真结果与分析

基于SCD，本文选择以648颗LEO卫星为主要方案的

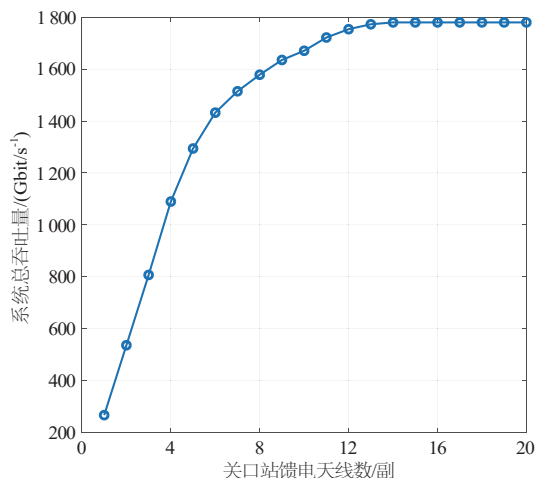


图5 系统吞吐量随关口站馈电天线数的变化

卫星星座。为了评估系统吞吐量和RTT,应指定GS和流量需求。在这里,假设在全球范围内部署网网站,并根据2020年的世界人口对业务需求进行建模。主要仿真参数总结见表1。

表1 仿真参数设置

参数名称	参数设置
LEO卫星星座	OneWeb
卫星数量/颗	$M=648$
轨道面个数/个	$N_o=18$
轨道面内卫星数量/颗	$N_p=36$
轨道高度/km	$h=1\ 200$
轨道倾角	$i=87^\circ$
终端通信最小仰角	40°
馈电站通信最小仰角	10°
馈电链路传输速率/(Gbit/s ⁻¹)	21
用户链路传输速率/(Gbit/s ⁻¹)	20
星间链路传输速率/(Gbit/s ⁻¹)	1
馈电站个数/个	$J=7$
馈电站可连接卫星数量/颗	$K=[1\sim 20]$
星间链路ISLs	无
传输体制	DVB-S2X ^[14]
全球业务量分布	基于全球人口分布,人均1 Mbit/s+1%激活率
仿真分析步长/min	1
仿真分析周期/h	24
经纬度颗粒度/°	1

4.2.1 覆盖性

极地星座网络在高纬度地区的覆盖要比低纬度地区的覆盖更好。LS-LEOSCN覆盖分析结果如图6所示。

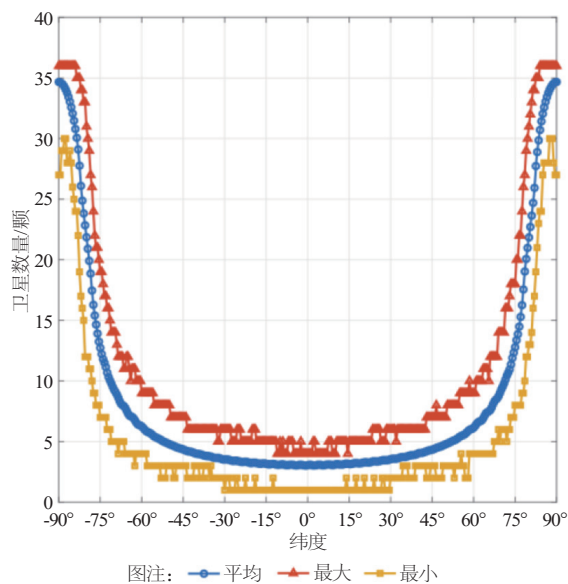


图6 LS-LEOSCN覆盖分析结果

从图6可以看出,CT随纬度而变化。南/北极的CT可以接近35,也就是说,地球站可以同时被35颗卫星覆盖。全球任何地区的覆盖重数不得少于4,即 $CT \geq 4$ 。极轨道星座在南北极等高纬度区域覆盖重叠严重,而极区区域人口等业务需求却非常少,此时可通过动态波束关闭方法,实现在满足全球覆盖的情况下降低波束功率等资源开销^[6]。

4.2.2 系统吞吐量

系统吞吐量随时间变化仿真结果如图7所示。可以看出,ST在1 650~2 100 Gbit/s之间变化。平均系统吞吐量为 $ST=1\ 780.4$ Gbit/s。系统吞吐量主要受馈线链接的限制,并随时间变化。

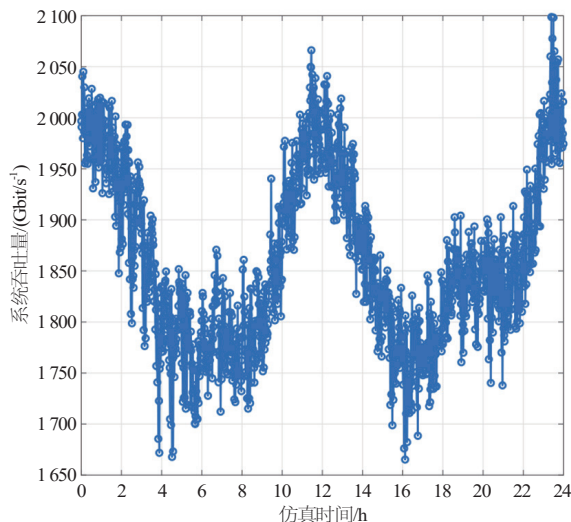


图7 网络容量随时间变化仿真结果

由于每个卫星的传输带宽受到限制，每个卫星的最大带宽不超过20 Gbit/s。

4.2.3 往返时延RTT

借助卫星间链路（ISL），无须在全球范围内部署GS就可以实现全球服务。但是，靠近GS区域的RTT较低。全球UT对任何GS的RTT如图8所示。

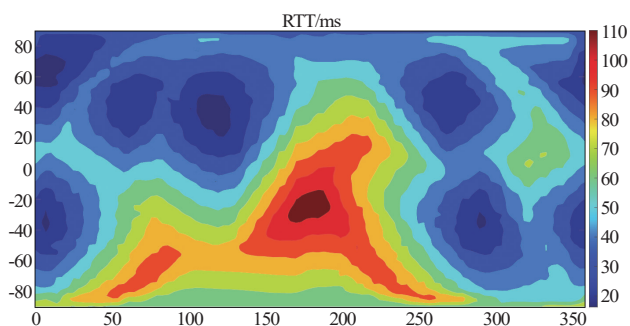


图8 全球UT对任何GS的RTT

从图8可以看出，RTT在110 ms以内。对于部署了GS的UT，RTT可以减少到20 ms。可以预见，通过在全球范围内部署更多的GS，可以进一步降低RTT。

参考文献：

- [1] FOUST J. SpaceX's space-internet woes: despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12,000 satellites in 2019[J]. IEEE Spectrum, 2019, 56(1): 50-51.
- [2] PULTAROVA T. Telecommunications—Space tycoons go head to head over mega satellite network[J]. Engineering Technology, 2015, 10(2): 20.
- [3] LIU S, XU X, WANG Y, et al. Distributed caching based on matching game in LEO satellite constellation networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 300-303.
- [4] LIU S, XU X, WANG Y. Deep reinforcement learning based dynamic channel allocation algorithm in multibeam satellite systems[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15733-15742.
- [5] LIU S, FAN Y, HU Y, et al. AG-DPA: assignment game-based dynamic power allocation in multibeam satellite systems[J]. Int J Satell Commun Network. 2020, 38: 74-83.
- [6] LIU S J. Dynamic beam closure algorithm for LEO satellite constellation[J]. Journal of Communications, 2020, 41(4): 190-196.
- [7] LIU G, GOU D Y, WU S Q. The study on handover in the LEO satellite constellations[J]. Journal of China Institute of Communications, 2004(4): 151-159.
- [8] DONG C Y, XU X. New method of LEO constellation[J]. Computer Science, 2019: 1-10.
- [9] MOON S, YUN S, YOM I, et al. Phased array shaped-beam satellite antenna with boosted-beam control[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(12): 7633-7636.
- [10] CI C, WANG X. Precoding design for energy efficiency of multibeam satellite communications[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 22(9): 1826-1829.
- [11] COCCO G, DE COLA T, ANGELONE M, et al. Radio resource management optimization of flexible satellite payloads for DVB-S2 Systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2018, 64(2): 266-280.
- [12] DEI PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019.
- [13] DEI PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E. Ground segment architectures for large LEO constellations with feeder links in EHF-bands[C]//2018 IEEE Aerospace Conference. [S.l.: s.n.], 2018: 1-14.
- [14] Digital Video Broadcasting (DVB). Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting: Part2: DVB-SE extensions (DBVS2X)[Z]. 2014.
- [15] WALKER J G. Some circular orbit patterns providing continuous whole earth coverage[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 1971, 24: 369-384.
- [16] BALLARD A H. Rosette constellations of earth satellites [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1980(5): 656-673.
- [17] LIU S, WU T, HU Y, et al. Throughput evaluation and ground station planning for LEO satellite constellation networks[C]//2019 SINC. [S.l.: s.n.], 2019.

[作者简介]



刘立祥（1973—），男，博士，中国科学院软件研究所研究员，主要研究方向为新型网络技术、天地一体化组网技术等，先后主持了多项“863”卫星组网相关课题，“973”信息栅格研究项目、中国科学院支撑技术项目和自然科学基金项目，在国内外重要学术期刊和会议上发表论文60余篇，出版《天地一体化网络》专著一部。



刘帅军（1988—），男，博士，中国科学院软件研究所助理研究员，主要研究方向为卫星通信、低轨星座网络、卫星5G融合。