

基于区域划分的 LEO 卫星星座 QoS 路由算法*

李 澎¹, 赵 祥², 胡剑平¹, 魏乐乐², 张 冰²

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076

2 西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对 LEO 卫星网络中由于流量分布不均导致的拥塞问题, 以及多种通信业务带来的 QoS 保障问题, 提出了基于区域划分的多业务 QoS 路由算法 (MSR-RP)。算法考虑了信关站有限分布造成的漏斗流量问题, 一方面通过划分动态区域, 减少区域节点数量, 降低了算法整体计算复杂度; 另一方面, 在轻负载区域采用最短路径算法计算路由, 重负载区域采用多目标遗传算法计算路由, 保障不同业务 QoS 并实现负载均衡。对 MSR-RP 路由算法进行了仿真建模和实现, 在设计的仿真场景中, 对业务流分类 (TCD) 算法与 MSR-RP 算法进行性能对比分析。结果表明, MSR-RP 算法在提供 QoS 保障的同时, 具有良好的负载均衡性能, 网络吞吐量有较大提升。随着全局业务量的增大, 其网络平均时延、丢包率低于 TCD 算法。

关键词: 低轨道卫星星座; 路由算法; QoS; 区域划分; 负载均衡

中图分类号: V474.2

文献标识码: A

文章编号: CN11-1780(2022)02-0017-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210824001

引用格式: 李澎, 赵祥, 胡剑平, 等. 基于区域划分的 LEO 卫星星座 QoS 路由算法[J]. 遥测遥控, 2022, 43(2): 17-24.

QoS routing algorithm for LEO satellite constellation based on region partition

LI Peng¹, ZHAO Xiang², HU Jianping¹, WEI Lele², ZHANG Bing²

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Aiming at the congestion problem caused by the uneven global traffic distribution in the LEO satellite network and the QoS guarantee problem caused by multiple communication services, a Multi-Service QoS Routing Algorithm based on Region Partition (MSR-RP), which considering the problem of funnel traffic caused by the limited distribution of gateways, is proposed in this paper. On the one hand, it reduces the number of regional nodes by dividing the dynamic area and lowers the overall calculation complexity of the algorithm; on the other hand, it uses the shortest path algorithm to calculate the route in the light-load region, and uses a multi-objective genetic algorithm to calculate the route in the heavy-load region. Through these two methods, the QoS of different traffic is assured and load balancing is achieved. The simulation and implementation of the MSR-RP routing algorithm, the designing of simulation scenarios, and the comparison of the performance of the TCD algorithm with the MSR-RP algorithm are also demonstrated. The results show that the MSR-RP algorithm has good load balancing performance while providing QoS guarantee, and the network throughput has been improved. With the increase of the overall traffic volume, the proposed algorithm has lower average network delay and packet loss rate than the TCD algorithm.

Key words: LEO satellite constellation; Routing algorithm; QoS; Region partition; Load balancing

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210824001

Citation: LI Peng, ZHAO Xiang, HU Jianping, et al. QoS routing algorithm for LEO satellite constellation based on region partition[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(2): 17-24.

引 言

随着天地一体化网络技术和多媒体业务的发展, 低轨道 LEO (Low Earth Orbit) 卫星网络因其业务传播时延短、建设成本低, 成为研究的重点^[1]。许多 LEO 卫星系统在地面上不同区域建有信关站, 用于

*基金项目: 科技部十三五重点研发课题 (2016YFB0500903)

收稿日期: 2021-08-24 收修改稿日期: 2021-12-01

业务就近下地,从而达到提升网络容量的目的。但是,由于全球用户流量分布不均,卫星业务就近下地的方式将在信关站处形成漏斗形流量,引发链路拥塞问题,影响用户的服务质量 QoS(Quality of Service)。加之,卫星网络需要支持多种业务类型,传统路由的单约束条件也不再能够满足多种用户 QoS 需求。因此,设计满足用户多种不同业务需求的卫星 QoS 路由算法至关重要。

针对 LEO 卫星网络 QoS 路由问题,国内外许多学者进行了较为深入的研究。例如, Mohorcic M 等提出业务流分类算法 TCD(Traffic Class Dependent)^[2]。Karapantazis S 等人在 LAOR 算法的基础上提出多业务按需路由算法 MOR(Multiservice On-demand Routing)^[3]。龙飞等提出了一种以端到端时延、时延抖动、链路利用率和带宽为 QoS 指标的路由算法^[4]。饶元等提出一种多路径路由算法 MPIR(Multipath Inter-satellite Link(ISL) Routing)^[5]。但这些算法均未考虑信关站漏斗型流量的问题,同时无法兼顾提高业务 QoS 保障、缓解网络拥塞以及减少计算复杂度的三方面需求。

本文针对以上问题和特定的 LEO 卫星网络模型,提出一种基于区域划分的多业务 QoS 路由算法 MSR-RP(Multi-Service QoS Routing Algorithm based on Region Partition)。该算法考虑了信关站有限分布造成的漏斗流量问题,一方面通过划分动态区域,减少区域节点数量,降低了算法整体计算复杂度;另一方面,在轻负载区域采用最短路径算法计算路由,重负载区域采用多目标遗传算法计算路由,保障不同业务 QoS 并实现负载均衡。最后,对 MSR-RP 路由算法进行建模与仿真实现,设计不同的仿真场景,测试路由算法的性能指标并与 TCD 算法进行对比分析。仿真结果表明,MSR-RP 算法在为各类业务提供不同的 QoS 保障的同时,具有星上应用简单、负载均衡性能良好的特点,并提高了网络吞吐量。随着全局业务量的增大,其网络平均时延、丢包率低于 TCD 算法。

1 MSR-RP 算法

1.1 算法总体设计框架

针对 LEO 卫星网络业务数据通过信关站下地形成的漏斗形流量造成的网络拥塞问题,本文将 LEO 卫星网络动态划分为轻负载区域和重负载区域,并采用集中式路由算法,根据虚拟拓扑策略划分时间片,控制中心根据时间片分别为轻负载区域和重负载区域卫星节点计算路由,并上注至各个卫星,如图 1 所示。控制中心在计算轻负载区域卫星路由时使用最短路径算法;控制中心在计算重负载区域路由时,以最大化网络吞吐量和最大化负载均衡指数为目标,将不同业务的 QoS 指标作为约束条件,使用遗传算法计算各类业务路由,实现负载均衡的同时为多种业务提供 QoS 保障;最后,通过采用 PQ 多队列调度机制对业务进行分类调度,保证高优先级业务优先转发,更好地保证了高优先级业务的服务质量。

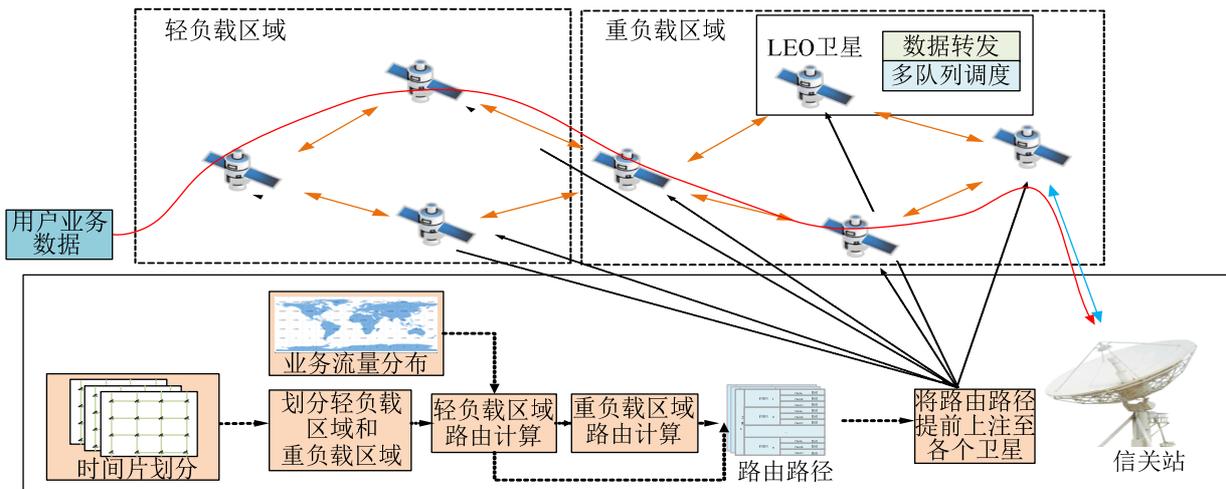


图 1 MSR-RP 算法总体设计框架

Fig. 1 Overall design framework of MSR-RP algorithm

在该算法中,卫星节点只需要根据控制中心上注的路由表进行数据分组的构造与转发,无需计算路

由,减轻星上计算复杂度。算法设计主要涵盖以下四个方面:动态区域划分、轻负载区域路由计算、重负载区域路由计算和多队列调度机制,在第2节会分别对其进行详细介绍。

1.2 算法整体流程

- ① 将LEO卫星网络运行周期划分为不同时间片,计算各个时间片对应的卫星网络虚拟拓扑;
- ② 根据各个时间片中信关站区域的位置关系将LEO卫星网络划分为重负载区域和轻负载区域,重负载区域的节点包含卫星节点和信关站节点,轻负载区域节点只有卫星节点;
- ③ 控制中心按照2.3节计算方式计算各个时间片轻负载区域卫星节点路由;按照2.4节计算方式计算重负载区域卫星节点各业务路由;
- ④ 控制中心以时间片为单位,提前将路由上注至各个卫星节点;
- ⑤ 各个卫星节点按照时间片切换路由表;
- ⑥ 卫星将数据分组发往各个发送队列缓存,等待队列调度发送。

2 算法实现机制

2.1 业务分类

随着多媒体业务的发展,网络中传输的业务类型也复杂多样,不同类型的业务具有不同的QoS需求,针对网络中可能存在的业务类型,本文将网络常见流量分为表1中的三类。

根据思科2016~2021年网络流量预测报告^[6],目前网络中Class A类流量大约占总流量的19%,Class B类流量大约占72%,Class C类流量大约占7%。本文设定网络中三种流量比例 $w_A:w_B:w_C=2:7:1$ 。

本文将Class A和Class B类业务的QoS指标分别定义为以下约束:

- ① 端到端时延约束 D_{\max} :

$$D_{p(s,d)} \leq D_{\max} \quad (1)$$

上式中, $D_{p(s,d)}$ 表示从源节点 s 到目的节点 d 可用路径的端到端传播时延。

- ② 最小传输带宽约束 B_{\min} :

$$B_{p(s,d)} = \min\{B(e), e \in p(s,d)\} \geq B_{\min} \quad (2)$$

上式中, $B_{p(s,d)}$ 表示从源节点 s 到目的节点 d 的路径的最大传输带宽。 $B(e)$ 表示链路 e 的剩余带宽。

2.2 动态区域划分

针对卫星业务通过境内信关站下地的情况,文献[7]提出将卫星网络划分为轻负载区域和重负载区域,并使用Dijkstra算法分别计算路由以实现更好的负载均衡。本文采用类似的思想,重负载区域指覆盖信关站区域上空的若干卫星节点构成的空间区域,其他卫星节点构成的区域为轻负载区域。

如图2所示,黑色虚线框表示信关站上空区域,红色框为重负载流量区域,红色框以外区域为轻负载区域,绿色三角形为可能的信关站分布情况。当卫星网络流量需要经过信关站下地时,轻负载区域的流量会在重负载区域汇聚,然后经过信关站头顶星下地。

2.3 轻负载区域路由计算

轻负载区域业务流量汇聚效应小,不易发生拥塞,因此无论何种业务类型均使用相同的路径转发至重负载区域边缘节点卫星,后由重负载区域进行区分业务的路由。

轻负载区域路由计算根据星间链路长度为代价,采用最短路径算法获得源端到目的端的最短路由。当路径计算完成后,需要对每颗卫星的路由进行裁剪处

表1 业务流量分类

Table 1 Traffic classification

类别	特点	举例	优先级
Class A	时延敏感型业务	交互式实时应用(如交互式视频)	最高
Class B	带宽敏感型业务	视频点播和大文件分发	较高
Class C	尽力交付型业务	浏览网页和电子邮件	低



图2 区域划分

Fig. 2 Region partition

理, 只需要保存从源卫星出发到重负载区域边沿卫星节点的部分路径作为相应卫星的路由即可。数据分组转发至重负载区域边沿卫星节点后会按照业务类型重新选择传输路径。

2.4 重负载区域路由计算

重负载区域需要承载自身覆盖区域以及轻负载区域的流量。重负载区域路由计算为多目标优化问题, 使用遗传算法, 以最大化网络吞吐量和最大化负载均衡指数为目标设计适应度函数, 将不同业务的 QoS 指标作为约束条件, 统一计算重负载区域每颗卫星不同类型业务的路由。

算法优化的目标为最大化网络吞吐量和最大化网络负载均衡因子, 分别见式 (3) 和式 (4)。遗传算法的适应度评价函数见式 (5)。

$$\max C = \sum_{s_k \in H} w_A r_A^{s_k} R^{s_k} + \sum_{s_k \in H} w_B r_B^{s_k} R^{s_k} + \sum_{s_k \in H} w_C r_C^{s_k} R^{s_k} \quad (3)$$

$$\max f_{FL} = \frac{\left(\sum_{l_{i,j} \in L_{FL}} B_{i,j} \right)^2}{M \sum_{l_{i,j} \in L_{FL}} (B_{i,j})^2} \quad (4)$$

$$f = \alpha C + \beta f_{FL} \quad (5)$$

式 (3) 表明, 网络中的吞吐量为三类业务的轻负载和重负载区域的加和, w_A 、 w_B 、 w_C 分别为三类业务的权重, $r_A^{s_k}$ 、 $r_B^{s_k}$ 、 $r_C^{s_k}$ 分别为三类业务的接收率, R^{s_k} 为源卫星 H 的总业务流量, H 为重负载区域卫星集合; 式 (4) 中 $B_{i,j}$ 为星际链路 $l_{i,j}$ 的实际剩余带宽, L_{FL} 为星地链路集合, M 为信关站集合; 式 (5) 中 α 、 β 为权重系数, 且满足 $\alpha + \beta = 1$ 。

上述数学模型为多目标优化模型, 本文采用遗传算法求其全局最优解, 使网络具有最大吞吐量和较好负载均衡的同时, 可以满足各种业务的 QoS 需求。为了更好地描述算法, 首先对以下关键概念进行定义:

① 个体编码: 本文遗传算法的输出为重负载区域每颗卫星传输 A、B 和 C 三类业务的路由路径, 因此, 以每类业务到达信关站的路径作为基因, 每个个体染色体由重负载区域所有卫星传输 Class A、Class B 和 Class C 类业务的路由路径三部分组成, 染色体长度 $len = X \times Y \times 3$, 其中 X 、 Y 分别为重负载区域包含的轨道数和同轨卫星数。编码方式如图 3 所示。

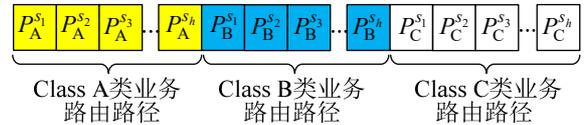


图 3 个体编码

Fig. 3 Individual code

② 交叉操作: 交叉是以交叉概率 p_c 把两个亲代个体的部分结构替换重组生成新的两个新个体的操作。本文采用奇数代单点交叉和偶数代多点交叉的混合交叉方式, 提高算法的搜索能力。

③ 变异规则: 以变异概率 p_m 对部分个体进行变异操作, 可以为种群引入新的个体, 扩展新的算法搜索空间, 保持种群多样性, 避免陷入局部最优。由于本文个体基因为数据传输路径, 因此需要保证经过变异操作后的路径仍为完整通路。

④ 选择操作: 选择操作的目的是将优化的个体直接遗传到子代种群。本文采用精英保留和锦标赛选择相结合的选择策略, 联合亲代种群和中间种群进行筛选得到子代种群。

重负载区域卫星路由计算采用遗传算法, 具体流程如图 4 所示。

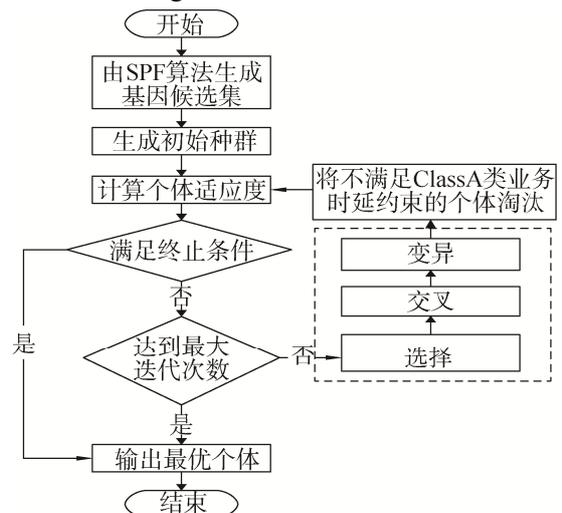


图 4 重负载区域路由计算流程

Fig. 4 The process of heavy-load area routing calculation

① 根据 SPF 算法获得每颗卫星到达各个信关站的最短路径和与最短路径不相交的次短路径，作为基因候选集；

② 构造初始种群。根据①中获得的基因候选集，每个个体随机为每颗重负载区域卫星的每类业务选择一条到达信关站的路径，按照个体编码规则组成个体，不同的 J 个个体组成初始种群；

③ 根据式 (5) 计算个体适应度。判断当前种群是否满足终止条件（当连续 Q 代的最优个体没有改变时，结束算法），若满足，结束算法，否则执行④；

④ 若达到最大迭代次数，输出最优个体，结束算法，否则执行⑤；

⑤ 使用选择规则选择保留的个体，生成下一代种群；

⑥ 使用交叉规则对当前种群中的个体进行交叉操作；

⑦ 使用变异规则对当前种群中的个体进行变异操作；

⑧ 为了保证满足 Class A 类业务时延约束，在计算个体适应度之前将当前种群中不满足 Class A 类业务时延约束的个体淘汰，以保证 Class A 类业务的 QoS 需求；

⑨ 执行③。

2.5 多队列调度机制

多队列调度机制指使用优先级调度多队列调度机制，确保高优先级业务优先发送，更好地保障高优先级业务 QoS 需求。本文使用 PQ (Priority Queuing) 多队列调度机制，设计队列模型由三部分构成：分类器、FIFO 缓冲队列和调度器。

分类器通过提取数据分组中的标记字段获得数据分组的类型，放入不同的 FIFO 缓冲队列等待调度器调度，若 FIFO 缓冲队列已满，则丢弃数据分组；FIFO 缓冲队列主要是临时存储各类业务数据分组调度器调度，本文针对 Class A、Class B 和 Class C 类业务设置三个 FIFO 缓冲队列；调度器负责对缓冲队列中的数据分组进行严格优先级调度。

3 算法仿真与实现

目前主流的网络仿真软件有 NS2、QualNet 和 OPNET 等。本文研究采用 STK^[8]和 OPNET^[9]联合仿真的方式进行卫星网络的建模和对 MSR-RP 算法的仿真实现。

3.1 网络层

本文中所研究的网络层模型，包括 1 个控制节点 controller、4 个地面信关站节点 (S1、S2、S3 和 S4) 和 72 个 LEO 卫星节点，如图 5 (a) 所示。

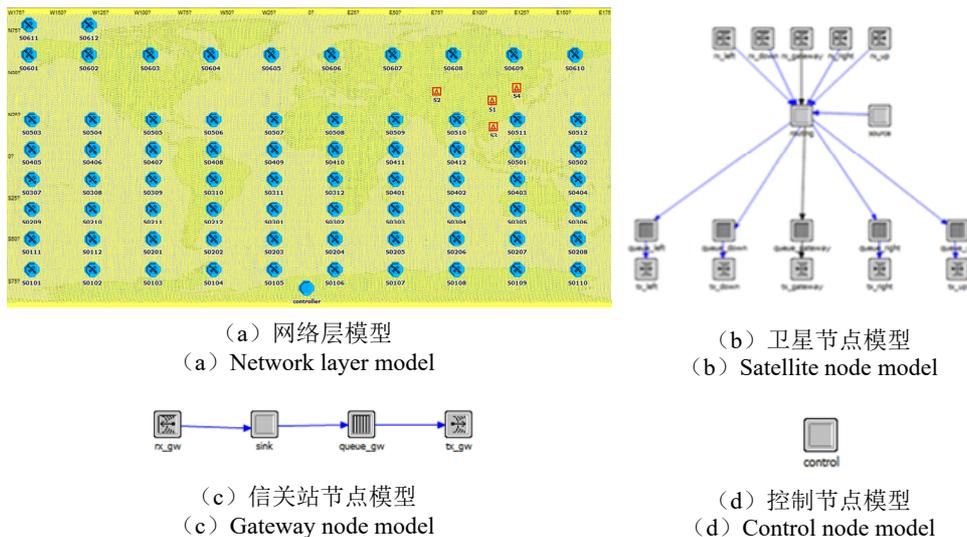


图 5 网络层与节点层模型

Fig. 5 Network and Node layer model

3.2 节点层

由图 5(a) 的网络层模型可知, 网络中共有三种不同类型的网络节点, 其对应三种不同的节点模型。下面就三种不同的节点模型分别进行介绍。

① 卫星节点模型

卫星节点模型用于模拟卫星网络中卫星的运动以及产生、发送和接收数据分组等功能。本文研究中卫星节点的节点层模型如图 5(b) 所示, 包括 source、routing、5 对无线收发机和 5 个发送队列模块构成。

② 信关站节点模型

信关站节点用于接收卫星网络中的下地数据, 由 sink、queue_gw 和一对收发机构成, 如图 5(c) 所示。

③ 控制节点模型

控制节点 controller 的作用是模拟控制中心的路由上注功能, 由 control 模块构成, 如图 5(d) 所示。

4 算法性能分析

通过设计仿真场景, 对 TCD 算法和 MSR-RP 算法在平均时延、丢包率、吞吐量和星地链路负载均衡指数方面进行对比, 评价 MSR-RP 整体路由性能, 进一步验证 MSR-RP 算法的有效性和正确性。

4.1 平均时延

网络平均时延指对网络数据分组从源节点到目的节点的时延平均值, 计算方法如式(6)所示。

$$D_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{Num}} D_i}{\text{Num}} \quad (6)$$

其中, D_{avg} 为网络平均时延, Num 为网络中传输成功的数据分组总数, D_i 为网络中传输的第 i 个数据分组从源节点到信关站节点传输的总时延, 该时延包括数据分组的排队时延和传播时延。

图 6 为 TCD 算法和 MSR-RP 算法三类业务平均时延随着全局业务量的变化情况。由图可知, 各类业务的平均时延随着全局业务量的增加而增加, 这主要是由于排队时延的增加导致的。同时, Class A 类业务为时延敏感型业务, 执行 PQ 队列调度的时候优先级最高, 两种算法均能为其始终保持着较低的平均时延, 满足其 QoS 需求。但是 MSR-RP 算法 Class A 类业务的平均时延略大于 TCD 算法, 这是由于重负载区域在计算 Class A 类业务路径时, 以不增加其原有路径跳数为变异原则, 尽可能为 Class A 类业务选择最短传输路径, 因此 MSR-RP 算法中部分卫星节点的 Class A 类业务不是以最短路径进行传输, 所以其平均时延略高于使用最短路径传输 Class A 类业务的 TCD 算法。对于 Class B 类业务, 虽然 TCD 算法使用最大剩余带宽的路径传输该类业务, 但是该策略会导致输出路径跳数远大于最短路径的跳数, 同时由于使用分布式计算, 各节点计算时采用相同的带宽拓扑, 输出路径仍会造成大量节点的 Class B 类业务流量汇聚到相同的传输路径上, 造成部分链路拥塞, 增加时延。而 MSR-RP 算法在轻负载区域使用最短路径算法, 重负载区域使用遗传算法计算重负载区域全局最优解, 合理分配流量, 提高了链路利用率, 减少了网络拥塞, 因此对 Class B 类业务的传输时延也具有一定的保证。Class C 类业务具有最低的优先级, 因此其平均时延大于高优先级业务。

4.2 丢包率

丢包率指网络在传输过程中数据分组丢失的个数占传输数据分组总数的比值, 丢包率的计算如式(7)所示。

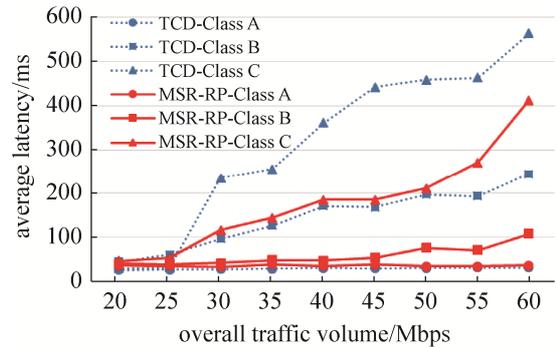


图 6 三类业务平均时延

Fig. 6 Average latency of three types of services

$$LR = \frac{N_{\text{send}} - N_{\text{recv}}}{N_{\text{send}}} \times 100\% \quad (7)$$

其中, LR 为丢包率, N_{send} 为网络中总的分组发送数量, N_{recv} 为网络中节点实际收到的数据分组数量。

图 7 为 TCD 算法和 MSR-RP 算法三类业务丢包率随着全局业务量的变化情况。由图可知, TCD 算法和 MSR-RP 算法的 Class A 类业务的丢包率一直维持较低的水平, 这是由于两者均采用 PQ 多队列调度, Class A 类业务具有最高的优先级, 会被优先发送, 更好地保障了其 QoS 需求。随着全局业务量的增加, Class B 和 Class C 类业务的丢包率也随之增加, 但是由于 MSR-RP 算法具有更好的负载均衡能力, 因此其 Class B 类业务的丢包率始终小于 TCD 算法。Class C 类业务由于其没有 QoS 需求, 因此其丢包率远远大于 Class A 和 Class B 类业务。

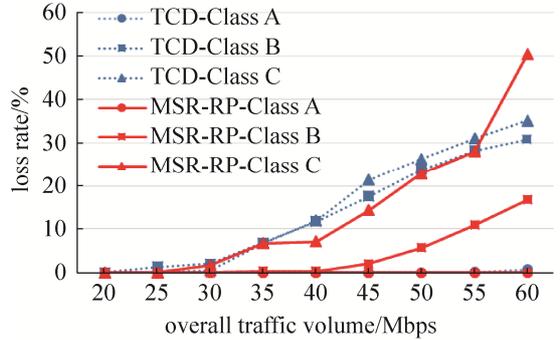


图 7 三类业务丢包率

Fig. 7 Packet loss rate of three types of services

4.3 吞吐量

吞吐量指网络在没有丢包的情况下能够传输的最大业务速率, 以比特每秒为单位, 吞吐量的计算如式 (8) 所示。

$$C = \frac{N_{\text{recv}} \times L_{\text{pkt}}}{T} \quad (8)$$

其中, C 为吞吐量, N_{recv} 为时间 T 内网络中成功接收的数据分组数量, L_{pkt} 为传输数据分组的长度, T 为仿真时间。

图 8 为 TCD 算法和 MSR-RP 算法三类业务吞吐量随全局业务量变化情况, 由图可知, Class A 和 Class B 类业务的吞吐量随全局业务量的增长而增加。由于本文中三类业务的权重比例为 2:7:1, 因此在全局业务量比较小的时候, 两种算法三类业务的吞吐量比例均接近 2:7:1。但是随着全局业务量的增加, MSR-RP 算法为了更好地满足 Class B 类业务的 QoS 需求, 重负载区域路由在计算时将更多的带宽资源分配给了 Class B 类业务, 从而 Class C 类业务的吞吐量随着全局业务量的增加而有所降低。与 TCD 算法相比, MSR-RP 算法更好地保障了 Class B 类业务的服务质量。

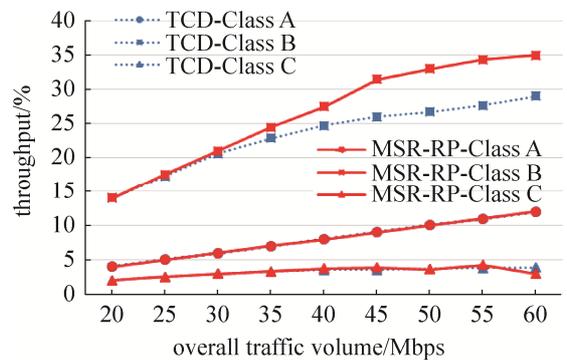


图 8 三类业务吞吐量

Fig. 8 Throughput of three types of services

5 结束语

本文对 LEO 卫星星座 QoS 路由问题进行研究, 针对 LEO 卫星网络通过信关站就近下地的漏斗形流量产生的网络拥塞问题, 提出了一种基于区域划分的多业务 QoS 路由算法 MSR-RP, 并使用 STK 和 OPNET 仿真软件对该算法进行仿真实现。设计仿真场景, 通过 MSR-RP 算法与 TCD 算法进行平均时延、丢包率和吞吐量方面的对比, 分析和评估了 MSR-RP 算法的性能。结果表明, MSR-RP 算法在实现良好的网络负载均衡, 提升网络吞吐量的同时, 可以为 Class A 类业务保持较低的传输时延, 为 Class B 类业务提供尽可能大的服务带宽, 保障了不同业务的 QoS 需求。

MSR-RP 算法能够有效地运行在本文特定的 LEO 卫星星座网络上, 对于其他极轨或近极轨 LEO 星座网络, 该算法的设计思想也具有一定的适应性。

参考文献

- [1] 宋奕辰, 徐小涛, 宋文婷. 国内外卫星移动通信系统发展现状综述[J]. 电信快报: 网络与通信, 2019(8): 37–41.
- [2] MOHORCIC M, SVIGELJ A, KANDUS G. Traffic class dependent routing in ISL networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2004, 40(4): 1160–1172.
- [3] KARAPANTAZIS S, PAPAPETROU E, PAVLIDOU F N. Multiservice on-demand routing in LEO satellite networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(1): 107–112.
- [4] LONG Fei, XIONG Naixue, VASILAKOS A V, et al. A sustainable heuristic QoS routing algorithm for pervasive multi-layered satellite wireless networks[J]. Wireless Networks, 2010, 16(6): 1657–1673.
- [5] YUAN R, WANG R. Multi-path QoS routing using genetic algorithm for LEO satellite networks[J]. Chinese Journal of Electronics, 2011, 27(1): 35–40.
- [6] VN Index. Cisco visual networking index: forecast and methodology 2016–2021[Z/OL].(2019-08-04). <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>.
- [7] LIU Wei, TAO Ying, LIU Liang. Load-balancing routing algorithm based on segment routing for traffic return in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 112044–112053.
- [8] 杨颖, 王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

[作者简介]

- 李 澎 1985 年生, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星星间通信与组网和高码率数据传输。
赵 祥 1996 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星组网路由技术。
胡剑平 1970 年生, 研究员, 主要研究方向为卫星通信与组网。
魏乐乐 1997 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星组网路由技术。
张 冰 1970 年生, 教授, 主要研究方向为网络与交换, 卫星组网技术。

(本文编辑: 杨秀丽)