

基于负载均衡的大规模低轨卫星互联网路由算法

汪伊婕¹, 赵伟², 成飞¹, 陈文³, 曹岸杰^{1,3}

(1.上海卫星工程研究所, 上海 201100;

2.航天系统部, 北京 100000;

3.上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 不断扩大的市场需求掀起大规模低轨星座部署的热潮, 低轨星座凭借大带宽、低时延、连续覆盖的特点为全球用户提供宽带互联网服务。针对网络负载不均的情况下产生的拥塞丢包问题, 提出一种基于负载均衡的自适应大规模低轨卫星间路由算法, 该算法根据小区域探测获得的信息对候选卫星进行方向、等级划分, 按照不同划分结果进行权重值计算, 最终选取等级最高且权重值最小的下一跳节点, 逐跳进行相同步骤直到数据到达目的卫星节点, 最终形成低时延路径, 全网实现低丢包率数据传输。通过仿真实验与经典算法以及现有大规模低轨卫星路由算法进行比较, 发现该路由算法可有效提高低轨大规模卫星通信网络的路由性能, 为用户提供高质量服务。

关键词: 卫星互联网; 负载均衡; 路由性能

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2022004

Large Scale LEO Satellite Internet Routing Algorithm Based on Load Balancing

WANG Yijie¹, ZHAO Wei², CHENG Fei¹, CHEN Wen³, CAO Anjie^{1,3}

1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201100

2. Aerospace Systems Department, Beijing 100000

3. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240

Abstract: The expanding market demand has set off an upsurge of large-scale LEO constellation deployment. With the characteristics of large bandwidth, low delay and continuous coverage, it provides broadband internet services for users all over the world. Aiming at the problem of congestion and packet loss caused by uneven network load, an adaptive large-scale LEO inter satellite routing algorithm based on load balancing was proposed. The algorithm divided the direction and level of candidate satellites according to the information obtained from small area detection, calculated the weight value according to different partition results, and selected the next hop node with the highest level and the lowest weight value, carry out the same steps hop by hop until the data reaches the destination satellite node, finally formed a low delay path to realized low packet loss rate data transmission in the whole network. Through the simulation experiment, compared with the classical algorithm and the existing large-scale LEO satellite routing algorithm, the routing algorithm could effectively improved the routing performance of LEO large-scale satellite communication network and provided high-quality services for users.

Keywords: satellite internet, load balancing, routing performance

0 引言

随着通信需求的急剧增加, 大规模低轨星座因容量大、覆盖广、成本低、时延小、应用广等特点成为卫星

通信研究的热点^[1], “星链”^[2]、OneWeb^[3]、Telesat^[4]、LeoSat^[5]等大规模星座相继出现。同时发展大规模低轨星座系统需要突破一系列关键技术, 作为卫星通信网络的

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-03-01

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2020YFB1807700)

Foundation Item: The National Key R&D Program (No.2020YFB1807700)

关键问题——星间路由,具有决定数据传输好坏和效率高低的作用,星间路由的性能越好,用户体验的服务质量越高^[6]。随着卫星星座逐渐规模发展,设计卫星路由的难度显著增大^[7]。对于大规模低轨星座网络路由技术存在以下挑战:网络拓扑变化更复杂,从而导致路由计算的难度大大增加;低轨卫星的星载设备各个方面均受到严格限制,如功率、重量、尺寸、计算资源和存储资源,星上既不能进行大规模的实时计算,也不能存储大量路由信息;低轨星座周期性运行过程中,网络承载的流量在空间和时间上均存在不均性,容易造成网络拥塞进而导致数据丢失;卫星网络的损坏概率随着卫星节点增多而增加,从而导致网络整体稳定性降低^[8]。

一些学者已对星间路由进行一些研究,其中包括基于分段路由的业务返回路由算法^[9]。它根据起始节点和目的节点的相对位置动态划分轻载区和重载区,在轻载区采用快照路由算法,在重载区采用以拥塞指数定义的最小权重路径作为路由规则。该算法的仿真结果表明,在平均丢包率、平均相对吞吐量、最大链路利用率和平均时延等方面,随着重载区的增加,负载均衡性能得到显著提高,但网络开销也随着重载区的增加而增加。一种选择性拆分负载均衡策略^[10]通过降低节点的重用频率来优化寻径过程,进而解决低纬低轨网络的链路拥塞问题。它将拥塞节点的流量转移到相邻节点,减轻邻居节点的负担,减少对计算资源和信令交互的需求,有效抑制分流后新拥塞链路的数量,但当整个网络处于重负载情况时,无法减轻拥塞节点的相邻节点的负担,容易造成网络拥塞。基于横向传输优先级的流量均衡策略^[11]对低轨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横向传输优先级

值区域,适合实时对单一区域进行流量调制,而无法对全网范围进行整体优化,具有局部性。

本文提出一种基于负载均衡的大规模低轨卫星互联网路由算法。该算法根据数据包当前节点周围一跳区域探测获得的路由方向、传播时延、占用带宽、卫星负载和链路状态权重因素等信息对候选卫星进行方向、等级划分,不同划分结果采用不同权重因素,并对其分配不同权重比例,确定权重最小的下一跳节点。该算法属于分布式动态算法,计算量小,且所需的存储空间和网络开销小,同时可有效对网络进行负载均衡,减少网络丢包率。

1 网络模型

卫星星座网络模型是路由算法仿真的基础^[12]。本文采用“星链”一期的卫星构型,星座轨道数为72条,每条轨道均匀分布22颗卫星,轨道倾角 53° ,轨道高度为550 km^[13],设置星上具备处理能力,存在星间链路。在卫星星座中,定义每个卫星编号为SatXXYY, X符号表示轨道号, Y符号表示每轨的卫星号^[14]。每个卫星拥有4条星间链路,其中包括两条轨间链路和两条轨内链路,轨内链路设为相邻连接,轨间链路设为相邻轨道同卫星号相邻连接^[15]。由于该星座的相位因子在网上没有相关资料,并且相位因子的不同影响第一条轨道和最后一条轨道的连接情况。取3种星间距离种类——Sat0101-Sat0201、Sat7201-Sat0101和Sat7222-Sat0101,分析其在不同相位因子下不同星间距离的变化,结果如图1(a)所示,从图中可以看出所有种类的星间距离随相位因子的增大而增大。当相位因子为1时,所有种类的星间距离最小且Sat0101-Sat0201和Sat7222-Sat0101的星间距离相等,分析该两种星间距离随卫星运行一周内的变化,结果如图1(b)和图1(c)所示。

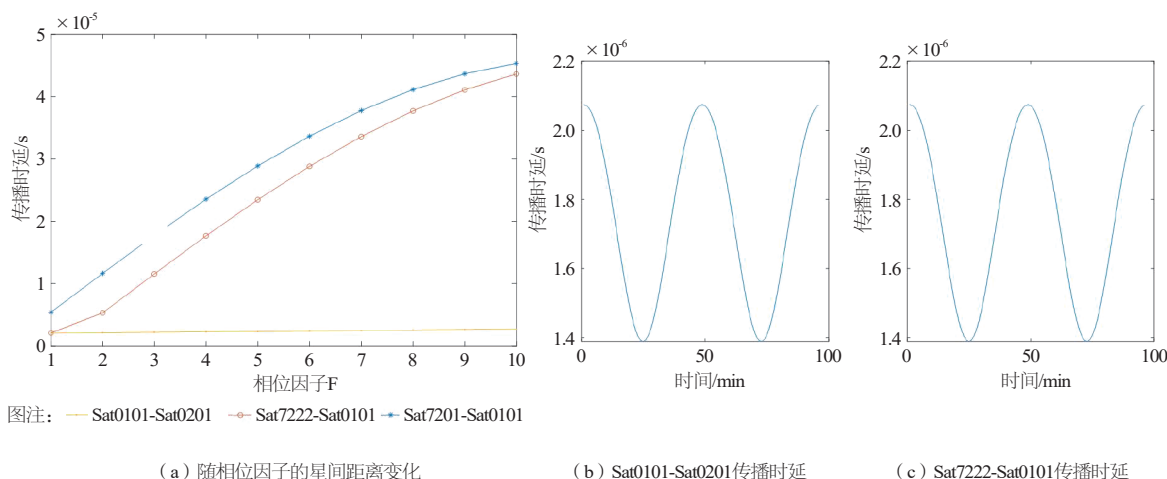


图1 星间传播时延变化

由图1(b)、图1(c)可以看出,星间传播时延随时间呈正弦变化趋势,最后一条轨道与第一条轨道链路连接的轨内卫星号相差1时与其他同轨内卫星号的轨间链路距离变化规律一样,因此星座参数中的相位因子取1,除第一条轨道与最后一条轨道的轨内卫星号相差1之外,其他轨间连接选择相同轨内卫星号。这样网络拓扑连接更规则,且在卫星运行期间,通过STK软件^[16]计算得到轨内相邻卫星的俯仰角、方位角保持不变,轨间相邻卫星的俯仰角每秒变化范围为 $[-0.077\ 49^\circ, 0.077\ 488^\circ]$,方位角每秒变化范围为 $[-0.001\ 04^\circ, 0.001\ 042\ 8^\circ]$,卫星设计能力能达到其变化要求,因此整个网络拓扑连接可保持不变。

2 路由算法及性能分析

静态路由算法不需要进行星上计算,网络开销小^[17],但所需的存储空间随着星座规模的增大而增大,同时对网络负载变化不能进行自适应调整,既造成数据路由性能不佳也造成资源浪费。因此对于低轨大规模星座网络来说,应选择动态路由算法在星上进行最优路径选择的计算^[18]。

2.1 最小动态权重路由算法

2.1.1 区域探测

动态路由算法一般采取全网泛洪方式收集网络状态信息进而计算出数据路由的最优路径,这会造成巨大的网络开销浪费^[19],尤其鉴于低轨巨型星座的规模和星上有限的设备能力,整个星座网络泛洪没有必要。在最小动态权重(Minimum Dynamic Weight, MDW)路由算法运行中确定数据包当前所在卫星节点的轨道号和轨内卫星号后,周期性探测至连续相邻一跳卫星节点的状态信息,实现区域性的信息获取,节约网络资源。区域探测周期的选取直接影响路由算法的整体性能,若选取不当会导致数据包路由的路径不是最优路径或者造成星上资源的浪费。本文星座的星间链路连接不断开且保持不变,在选取区域探测周期时主要考虑获取的信息能尽可能体现实时情况,其中星间传播时延最大为轨内相邻星间传播时延 t_s ,为6.573 3 ms,星上处理时延 t_p 为5 ms,所以探测周期 T_i 计算方式为

$$T_i = 2 \times \max(t_s) + 2 \times \max(t_p) \quad (1)$$

卫星网络中每颗卫星将信息探测请求发送至一跳区域范围内的卫星,如图2所示,箭头方向表示信息传输方向。探测区域内的卫星收到信息探测请求后反馈轨道号、轨内卫星号、位置坐标、卫星负载信息以及该卫星到下一跳卫星的可通信链路数量信息。

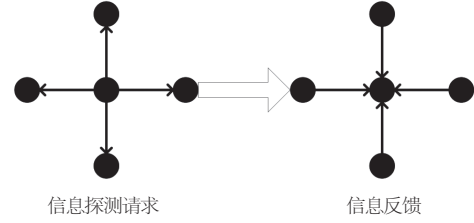


图2 信息探测具体流程示意

2.1.2 方向划分

设置数据在源节点a到目的节点b的传输路径上正处于当前节点c,将4条通信链路连接的4个卫星节点作为候选集合 $d\{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ 。本文忽略卫星的运行方向(由南向北到由北向南变化),以自身为参考点,将4条链路方向命名为上 d_2 、下 d_4 、左 d_1 、右 d_3 ,具体如图3所示。

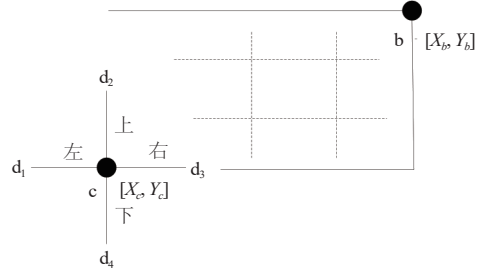


图3 矩形区域示意

当节点接收到数据包时,根据目的节点的位置可划分最小跳数集合区域,首先设当前节点的位置为 $[X_c, Y_c]$,目的节点位置为 $[X_d, Y_d]$,取

$$D_x = X_d - X_c \quad (2)$$

$$D_y = Y_d - Y_c \quad (3)$$

由于该卫星网络的纵向、横向链路都是连通的,所以最小跳数集合随着 D_x 、 D_y 的变化具有不同的轨道范围和轨内卫星号范围,最小跳数区域的轨道范围的计算方式为

$$\Delta X_{\text{最小跳数区域}} = \begin{cases} [\min(X_c, X_d), \max(X_c, X_d)], & |D_x| \leq 36 \\ [1, \min(X_c, X_d)] \cup [\max(X_c, X_d), 72], & |D_x| > 36 \end{cases} \quad (4)$$

最小跳数区域的轨内卫星号范围 ΔY 根据 ΔX 的不同具有不同的取值范围,因为第一条轨道和最后一条轨道拓扑连接的轨内卫星号相差1,当 ΔX 不包括第一条轨道和最后一条轨道时计算方式为

$$\Delta Y_{\text{最小跳数区域}} = \begin{cases} [\min(Y_c, Y_d), \max(Y_c, Y_d)], & |D_y| \leq 11 \\ [1, \min(Y_c, Y_d)] \cup [\max(Y_c, Y_d), 22], & |D_y| > 11 \end{cases} \quad (5)$$

当 ΔX 包括第一条轨道和最后一条轨道时计算方式为

$$\Delta Y_{\text{最小跳数区域}} = \begin{cases} [\min(Y_c, Y_d), \max(Y_c, Y_d) - 1] \\ \cup [\min(Y_c, Y_d) + 1, \max(Y_c, Y_d)], & |D_y| \leq 11 \\ ([1, \min(Y_c, Y_d)] \cup [\max(Y_c, Y_d) - 1, 22]) \\ \cup ([1, \min(Y_c, Y_d) + 1] \cup [\max(Y_c, Y_d), 22]), & |D_y| > 11 \end{cases} \quad (6)$$

2.1.3 等级划分

当当前节点与目的节点处于同一条轨道时，最小跳数集合区域为一条线；当当前节点与目的节点不处于同一条轨道时，最小跳数集合区域为一个矩形区域。根据最小跳数区域的形状大小确定候选卫星的分类方法，以下为具体分类情况。

(1) 矩形区域

若最小跳数区域为矩形区域则将候选卫星分为两个等级，第一等级是矩形区域内的候选卫星，第二等级是非矩形区域内的候选卫星。优先考虑矩形区域内候选卫星，因为矩形区域内的候选卫星可以使得路由时延尽可能小，但若矩形区域内候选卫星不可达则需要绕路处理非矩形区域内的候选卫星；若所有候选卫星都不可达则表明此时的数据流量已超过网络的负载能力，将造成丢包现象。

(2) 同轨区域

若最小跳数区域为同轨区域则将候选卫星分为3个等级。第一等级是同轨区域内的候选卫星；第二等级是非同轨区域内且与同轨区域内的候选卫星方向相同的候选卫星；第三等级是非同轨区域内且与同轨区域内的候选卫星方向相反的候选卫星。其分类原则的依据是绕路代价，选取第二等级候选卫星需要绕路至少2跳，选取第三等级候选卫星则需要绕路至少4跳，绕路不仅增加传播时延而且增加每个卫星节点的处理时延，所以当同轨区域内的候选卫星不可达时按照等级顺序筛选下一跳卫星节点。

2.1.4 权重计算

MDW路由算法是寻找权重最小的下一跳候选卫星，涉及路由方向、传播时延、占用带宽、卫星负载和链路状态权重因素。根据不同分类等级，为卫星赋予不同的权重因素比重，具体权重因素如下。

(1) 路由方向权重

当最小跳数区域为矩形区域时，第一等级候选卫星采用路由方向权重，轨间距离随纬度增加而减小，需在考虑最小跳数的前提下尽可能寻找最短距离。当目的卫星节点纬度的绝对值大于当前卫星节点纬度的绝对值时，纬度方向上处在矩形区域内的候选卫星权重为1/2，非纬度方向上且处在矩形区域内的候选卫星权重为1；当目的卫星节点纬度的绝对值小于当前卫星节点纬度的绝对值时，非纬度方向上处在矩形区域内的候选卫星权重为1/2，纬度方向上且处在矩形区域内的候选卫星权重为1。考虑路由方向权重是为了当处于矩形区域的下一跳卫星节点可选时，确保数据包路由时延最小。

(2) 传播时延权重

数据包以光速在星间链路上进行传播，利用当前节点和候选节点的84坐标计算出星间距离，进而得出传播时延。非矩形区域第一等级的候选卫星采用传播时延权重，并对时延进行归一化，最终转换为传播时延权重。

(3) 占用带宽权重

当数据包处于当前节点时，根据最新得到的当前网络状态获取链路带宽占用情况，无论最小跳数区域为何种形状均采用带宽权重，但会根据不同等级进行归一化，最终转换为占用带宽权重；若出现链路拥塞情况则设置该权重值为无穷大。

(4) 卫星负载权重

卫星负载决定数据包到达下一跳时等待被处理的排队时间。当数据包处于当前节点时，根据最近得到的当前网络状态获取候选卫星节点的负载情况，无论最小跳数区域为何种形状均采用带宽权重，但会根据不同等级进行归一化，最终转换为卫星负载权重；若出现满载情况则设置该权重值为无穷大。

(5) 链路状态权重

卫星链路状态体现下一跳卫星集合d的链路状态，如图4所示，其中虚线代表链路状态。考虑候选卫星链路状态作为权重因素的原因是防止数据包进入“卫星陷阱”。若不考虑该卫星链路权重， d_2 因权重值最小将作为数据包下一跳卫星节点，但数据包路由至 d_2 后才发现3条链路均拥塞最终造成丢包现象，所以考虑卫星链路权重可以在一定程度上减少丢包的产生。

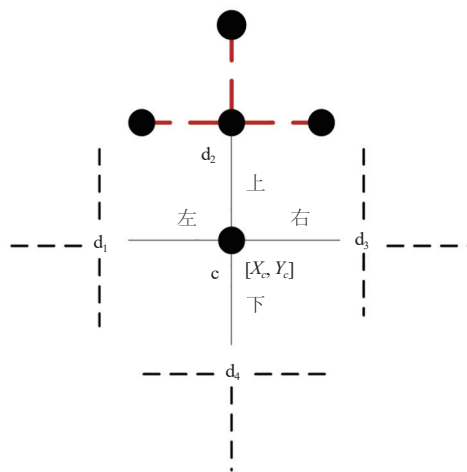


图4 “卫星陷阱”图

若d卫星节点存在3条拥塞链路，则表明数据包路由至该卫星后没有下一跳卫星节点选择；若存在两条拥塞链路，则表明该卫星存在较高的拥塞风险；若存在低于两条拥塞链路则表明该卫星状态相对空闲，具体取值如式（7）所示，其中num表示d卫星节点的拥塞链路数量。

$$\text{链路状态权重} = \begin{cases} \infty, \text{ num} = 3 \\ \frac{\text{num}}{3} \times W_{\text{nbmax}}, \text{ num} < 3 \end{cases} \quad (7)$$

综上所述，可以得出不同分类以及不同等级的候选卫星选取不同的权重因素，其中矩形区域的第一等级候选卫星选取路由方向、占用带宽、卫星负载、链路状态权重因素，矩形区域的第二等级、同轨区域候选卫星选取传播时延、占用带宽、卫星负载、链路状态权重因素。

对不同等级候选卫星赋予权重分配比例最终得到该卫星的总权重，其中路由方向权重确保路由路径方向的正确性，但如果向目的卫星节点方向的卫星存在链路或节点满载情况，则需要绕路路由以确保数据包的不丢失且应选取时延小的可达下一跳卫星，即传播时延、链路带宽、卫星负载和卫星状态权重在总权重中体现出来。因此权重分配比例的取值决定MDW路由算法性能，具有十分重要的作用。

2.1.5 动态流程

数据开始传输时，判断数据包是否到达目的卫星节点，若不是目的卫星节点则判断数据包所在的当前卫星与目的卫星节点的最小跳数区域形状；形状为矩形区域则根据周期探测得到的信息逐级计算卫星总权重，选取等级最高、权重值最小且不为无穷大的下一跳候选卫星；整个路由过程逐跳进行相同步骤，直到数据传输完成。图5为MDW路由算法的整个流程，其中j的初始值为1，i为候选卫星等级划分的最高级。

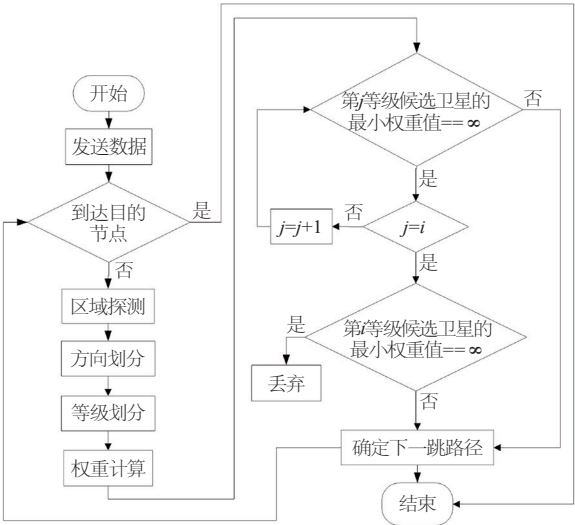


图5 MDW路由算法流程

2.2 仿真性能分析

2.2.1 仿真场景设置

本文将时延、丢包率和吞吐量作为路由性能指标，时延由处理时延、排队时延和传播时延组成，丢包率为丢失的数据包数量占发送数据包数量的比值，吞吐量表示数据包成功被传输的数量，体现网络整体处理能力^[20]。仿真场景中单星能力参数：星间链路为4条^[21]，数据包大小为1 kB，单条星间链路速率为5 Mbit/s，单星处理单个数据包的时延为5 ms，单星处理能力为5 Mbit/s，单星最大缓存为10 MB，仿真时长为2 min。另外本文仿真选取北京、上海、中国香港地区、成都、哈尔滨、乌鲁木齐、墨尔本、东京、巴黎、金沙萨、纽约11个城市互相通信的场景。

每个城市根据人口数量和经济^[22]两个因素来确定卫星接入需求量，人口稠密且经济发达的地区对网络需求相对较多。根据城市的人口数量和经济情况划分不同等级，且根据以上两因素确定城市接入卫星需求等级，设置最大接入卫星需求等级为10级。接入卫星需求等级见表1。由于本文讨论星间路由算法，所以将其数据包路由

表1 接入卫星需求等级

城市	接入卫星需求等级	对应数据包产生速率/Mbit·s ⁻¹
北京	6级	8.4
上海	6级	8.4
中国香港地区	3.5级	4.9
成都	4级	5.6
哈尔滨	3级	4.2
乌鲁木齐	1.5级	2.1
墨尔本	3级	4.2
东京	6级	8.4
巴黎	6级	8.4
金萨沙	3级	4.2
纽约	7级	9.8

表2 不同权重分配比例的平均时延

权重分配比例	数据包的平均时延/s (6 Mbit/s数据包产生速率)	数据包的平均时延/s (6 Mbit/s数据包产生速率)
[0.3,0.2,0.4,0.1]	0.145 0	0.145 1
[0.4,0.2,0.3,0.1]	0.144 6	0.144 7
[0.3,0.2,0.3,0.2]	0.144 8	0.144 9
[0.4,0.1,0.4,0.1]	0.144 8	0.144 9
[0.5,0.1,0.3,0.1]	0.144 6	0.141 9
[0.3,0.1,0.5,0.1]	0.145 1	0.145 2
[0.1,0.1,0.7,0.1]	0.145 6	0.145 8
[0.7,0.1,0.1,0.1]	0.145 4	0.145 2

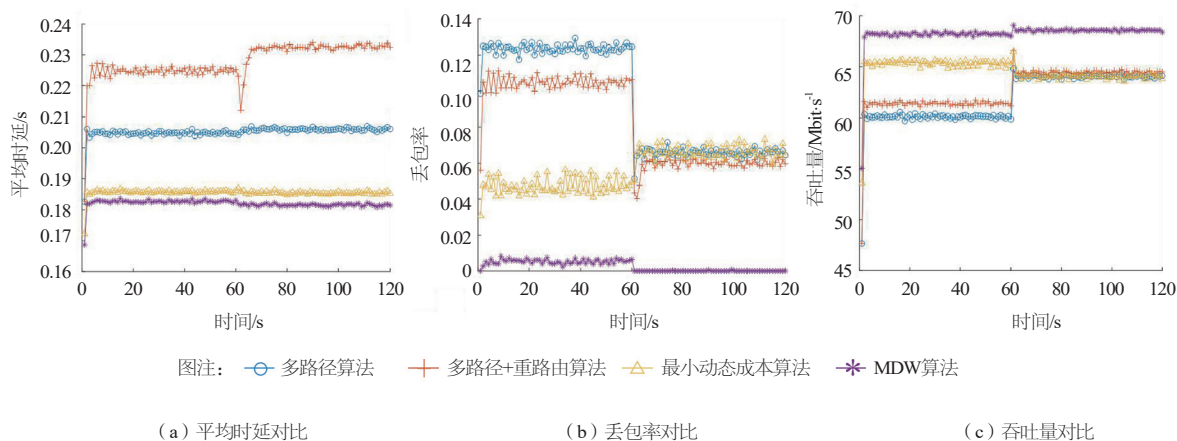


图6 路由指标对比

的起始、目的城市映射到距其距离最短的卫星,将映射的卫星作为数据包开始路由的源、目的节点^[23]。

2.2.2 仿真结果分析

选取点对点即北京到纽约的数据传输,在不同数据包产生速率的条件下仿真得到不同权重分配比例的路由到目的节点的数据包平均时延,其中数据包选取第1分钟内1 s产生的数据包个数。不同权重分配比例仿真得到的平均时延见表2,其中权重比例分配包含路由方向、占用带宽、卫星负载、卫星链路权重因素或者传播时延、占用带宽、卫星负载、链路状态权重因素两种组合。

由表2可以看出当数据包产生速率为5 Mbit/s时,权重分配比例为[0.4,0.2,0.3,0.1]和[0.5,0.1,0.3,0.1]的数据包路由平均时延最小。当数据包产生速率为6 Mbit/s,大于链路带宽时,权重分配比例为[0.5,0.1,0.3,0.1]的数据包路由平均时延最小,但产生丢包率为0.022 7;平均时延次小的权重分配比例为[0.4,0.2,0.3,0.1]且丢包率为0。所以本文选取路由综合性最佳的权重分配比例[0.4,0.2,0.3,0.1]。

本文采用多径路由算法^[24]、多径+重路由算法^[25]、最小动态成本算法^[26]进行仿真对比分析,设置好仿真参数并通过软件对上述算法进行仿真,对比分析全球通信仿真结果。源卫星节点选取全部城市每分钟与其具有映射关系的卫星,目的卫星节点随机选取除源城市之外的城市每分钟与其具有映射关系的卫星。在仿真时间内,源卫星节点根据热点程度分别以表2中相应的数据包产生速率进行数据传输,实现数据包在卫星节点间的持续发送,统计每秒内成功到达目的卫星节点的数据包的平均时延、丢包率和吞吐量变化,仿真结果如图6所示。

通过图6所展示的内容得到仿真时间内不同路由算法的分析,具体如下。

(1) MDW路由算法在整个仿真时间内的平均时延均小于对比算法,因为MDW路由算法中考虑的路由方向、传播时延和卫星负载权重因素与传播时延和排队时延因素有关,且权重比重大,因此形成牺牲少量传播时延从而减小排队时延的低时延路径。

(2) MDW路由算法在整个仿真时间内的丢包率和吞吐量均优于对比算法,因为在MDW路由算法中,虽然周期探测的信息存在不是当时真实卫星网络状态的情况,但计算权重时,大多数链路拥塞、节点满载的下一跳候选卫星的总权重值都能计算为无穷大,不会被下一跳路由考虑,从而MDW路由算法的丢包率小于对比算法,吞吐量大于对比算法。

3 结束语

在低轨卫星网络中,负载均衡路由算法对于提高低轨大规模卫星网络性能和避免由流量分布不均匀而导致的链路拥塞具有重要意义。本文根据低轨大规模卫星网络通信的需求以及静态路由算法的不足提出一种负载均衡自适应算法,该算法充分利用网络负载的情况使数据包尽快到达目的节点,从而实现负载均衡,可有效提高低轨大规模卫星通信网络的路由性能和环境适应性,为我国低轨大规模卫星通信网络建设提供参考。

参考文献:

- [1] 李贺武, 吴茜, 徐格, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14): 95-106.
- LI H W, WU Q, XU K, et al. Progress and tendency of space and earth integrated network[J]. Science & Technology Review, 2016,

- 34(14): 95-106.
- [2] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链计划卫星网络资料申报情况分析[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(1): 60-68.
- YANG W H, HUA G L, FENG Y, et al. Analysis of the starlink satellite network filing application[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(1): 60-68.
- [3] OneWeb CEO neil masterson talks telcos and terminals[J]. Satellite Today, 2021.
- [4] Québec's CloudOps will build Telesat LightSpeed's cloud network[J]. Satellite Today, 2021.
- [5] Former LeoSat CEO mark rigolle lands at German LEO constellation startup[J]. Satellite Today, 2020.
- [6] 邢强. 低轨巨型星座的建设及其影响分析[J]. 中国航天, 2019(12): 43-47.
- XING Q. Analysis on construction and influence of large-scale LEO constellation[J]. Aerospace China, 2019(12): 43-47.
- [7] RUIZ DE AZÚA J A, CALVERAS A, CAMPS A. Internet of satellites (IoSat): analysis of network models and routing protocol requirements[J]. IEEE Access, 2018, 6: 20390-20411.
- [8] WANG Z H, LI J Z, CHEN H Q, et al. A novel divergence measure-based routing algorithm in large-scale satellite networks[J]. IET Communications, 2021, 15(5): 708-722.
- [9] LIU W, TAO Y, LIU L. Load-balancing routing algorithm based on segment routing for traffic return in LEO satellite networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 112044-112053.
- [10] 周雅. 低轨星座网络中的星间负载均衡路由算法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- ZHOU Y. Research on inter-satellite load balancing routing algorithm in low orbit constellation network[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [11] 段思睿, 刘元安, 胡鹤飞, 等. LEO卫星网络中基于分布式路由算法的流量均衡策略[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(3): 375-380.
- DUAN S R, LIU Y A, HU H F, et al. Load balancing strategies based on a distributed routing in LEO satellite networks[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(3): 375-380.
- [12] 刘立祥, 刘帅军. 大型低轨星座网络规划方法与仿真分析[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 87-93.
- LIU L X, LIU S J. Network planning method and simulation analysis for large-scale low earth orbit satellite constellation networks[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(2): 87-93.
- [13] 吴超, 谢伟. “星链”计划未来发展分析[J]. 国际太空, 2020(6): 13-17.
- WU C, XIE W. Analysis of the future development of the "Star Chain" plan[J]. Space International, 2020(6): 13-17.
- [14] LIU J, LUO R Z, HUANG T, et al. A load balancing routing strategy for LEO satellite network[J]. IEEE Access, 2020, 8: 155136-155144.
- [15] 况鸿凤. 低轨大星座系统路由策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- KUANG H F. Research on routing strategy for large scale satellite constellation with low earth orbit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [16] 杜耀珂. 基于STK的卫星实时视景仿真系统设计[J]. 空间控制技术与应用, 2009, 35(2): 60-64.
- DU Y K. Design of STK-based realtime visualization simulation system for satellites[J]. Aerospace Control and Application, 2009, 35(2): 60-64.
- [17] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks[C]//Proceedings of Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Piscataway: IEEE Press, 2000: 500-508.
- [18] LI J, LU H C, XUE K P, et al. Temporal netgrid model-based dynamic routing in large-scale small satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 6009-6021.
- [19] 刘姜旺. 低轨卫星网络高效路由关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2020.
- LIU J W. Research on key technologies of efficient routing in low-orbit satellite network[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [20] 蔡婷婷. LEO卫星通信网络路由协议研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- CAI T T. Research on routing protocol of LEO satellite communication network[D]. Xi'an: Xidian University, 2018.
- [21] 张悦. 低轨卫星网络路由算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- ZHANG Y. Research on routing algorithm of low orbit satellite network[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [22] 司文. 世界经济指标[J]. 国际研究参考, 2018(5): 58-60.
- SI W. World economic index[J]. International Study Reference, 2018(5): 58-60.
- [23] 曹素芝, 孙雪, 王厚鹏, 等. 星地融合网络智能路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2021, 2(2): 11-19.
- CAO S Z, SUN X, WANG H P, et al. Review of intelligent routing technology in integrated satellite-ground network[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(2): 11-19.
- [24] 焦媛媛, 田丰, 石神, 等. 基于多径的低轨卫星网络路由拥塞控制策略[J]. 电子设计工程, 2018, 26(18): 113-117, 122.

JIAO Y Y, TIAN F, SHI S, et al. Multipath routing based congestion control strategy for LEO satellite networks[J]. Electronic Design Engineering, 2018, 26(18): 113-117, 122.

- [25] 黄光昊. 低轨卫星物联网的路由算法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.

HUANG G H. Research on routing strategy of LEO satellite Internet of Things[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.

- [26] 朱晓攀. 大规模低轨宽带卫星网络路由关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020.

ZHU X P. Research on key routing technologies of large-scale low earth orbit broadband satellite network[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2020.

[作者简介]



汪伊婕 (1997-), 女, 上海卫星工程研究所硕士生, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信技术。



赵伟 (1981-), 男, 航天系统部工程师, 主要研究方向为空间电磁环境监测、战场环境感知信息网络、卫星通信技术。



成飞 (1980-), 男, 上海卫星工程研究所研究员, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信技术。



陈文 (1967-), 男, 博士, 上海交通大学教授, 主要研究方向为绿色移动多址接入异构网络。



曹岸杰 (1989-), 男, 博士, 上海卫星工程研究所高级工程师, 主要研究方向为气象卫星有效载荷、遥感数据应用和图像识别。