

软件定义卫星网络中基于业务调度的混合路由算法

王朝炜, 杜嘉楠*, 王 程, 王卫东

(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

摘要: 为了解决低轨卫星网络高动态拓扑、大数据传输量、多信令开销的问题, 满足全球覆盖和海量移动用户日益增长的需求, 在研究不同业务性能指标体系的基础上, 构建了高低轨卫星协同的软件定义卫星网络架构及虚拟拓扑模型; 设计了综合考虑业务到达率和等待时长的优先级赋值函数, 并提出一种基于业务感知与调度的联合星间路由算法, 该算法包括针对高 QoS 需求业务的低复杂度轨道内优先转发路由算法和针对低 QoS 需求业务的链路加权路由算法. 仿真结果表明, 所提算法在平均端到端时延、丢包率和吞吐量等方面比传统算法均有显著的改善.

关键词: 软件定义网络; 卫星路由; 业务感知路由; 服务质量; 虚拟节点

基金项目: 国家自然科学基金(No.61971054)

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2024)05-1506-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20221090

A Hybrid Routing Based on Traffic Scheduling in Double-Layer Software Defined Satellite Networks

WANG Chao-wei, DU Jia-nan*, WANG Cheng, WANG Wei-dong

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: In order to solve the problems of high dynamic topology, large data transmission, multi-signaling cost of low-orbit satellite network, and to meet the growing demand of global coverage and massive number of mobile users, the software defined satellite network architecture and virtual topology model of high orbit and low orbit satellite collaboration are built on the basis of quality of services (QoS) of different traffic in operational performance index systems. A priority assignment function considering both traffic arrival rate and wait time is designed, and a joint inter-satellite routing algorithm based on traffic-aware and traffic scheduling is proposed. The algorithm includes a low-complexity intra-orbit priority forwarding routing algorithm for high QoS requirement services and a link weighted routing algorithm for low QoS requirement services. Simulation results show that the performance of the proposed algorithm is significantly better than that of the traditional algorithm in average end-to-end delay, packet loss rate and throughput.

Key words: software defined network (SDN); satellite routing; traffic-aware routing; quality of service (QoS); virtual nodes

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61970154)

1 引言

随着全球卫星互联网的加速建设, 卫星物联网迎来了大规模应用和迭代发展. 卫星组网可以实现对全球通信的连续覆盖, 例如轨道高度约为 780 km 的铱星系统是摩托罗拉公司建立的首个全球商业化的低轨卫星 (Low Earth Orbit, LEO) 移动通信系统. 美国太空探索技术公司低轨卫星网络星链 (Starlink) 是一种大型卫星互联网系统, 计划在 2019 年至 2024 年间在太空搭建

由 1.2 万颗卫星组成的“星链”网络提供互联网服务, 目前已经发射超过 2 000 颗卫星, 其中 1 700 颗卫星进入运营状态, 并已在全球多个区域提供互联网卫星接入. 星间链路按照卫星所在轨道可分为同类型轨道、卫星间的星间链路和不同类型轨道卫星间的星间链路. 除了按照回归道划分以外, 还可以按照工作频率划分为微波链路 (Ka 频段)、毫米波链路 (部分 Ka 频段和 Q/V 频段等)、太赫兹链路 (太赫兹频段) 和激光链路等.

卫星通信网络具有高度动态、网络拓扑不确定和

流量分布不均的特点^[1],并且卫星平台的发射功率、存储和星上处理能力有限,传统的路由算法无法满足星间路由的需要^[2,3].在卫星通信中,信号处理和加密解密等部分相关技术是相同的,但在卫星通信中,其覆盖方式、传输方式与卫星发射器有关.而地面网络和无线网络中的协议在卫星网络中不适用,并且无线自组网具有变化的拓扑结构,网络中的节点的任意移动导致网络的拓扑结构发生变化.因此,对卫星网络路由存在两个方面的问题:(1)传统的地面网络路由算法不能直接应用于卫星网络环境;(2)随着通信业务的增加,传统卫星网络中任意一对卫星节点间的业务流量到达时间不确定,星间链路容易出现拥塞.因此,有必要研究一种既能保证通信服务质量(Quality of Service, QoS)又兼顾流量负载均衡的路由算法.

针对卫星网络,文献[4]提出了一种基于负载均衡的低复杂度路由算法(Low-Complexity Routing Algorithm, LCRA),根据源节点和目的节点的位置,通过分布式计算得到数据传输路径;该算法没有通过迭代计算最短路径,降低了算法的计算复杂度.状态感知和负载均衡路由算法(State-Aware and Load-Balanced, SALB)^[5]是一种基于状态感知和负载均衡的路由算法,它通过定量估计链路状态和动态调整队列时延来实现负载均衡,并优先选择链路权值小的链路进行数据传输.文献[6]以卫星节点的剩余能量作为路由选择的因素之一,基于节点的剩余能量和队列延迟计算链路权重,根据链路权重进行路由选择,以满足不同业务的服务质量和实现整个网络的负载平衡.文献[7]为非同步轨道 N GEO 卫星 IP 网络提出了一种基于交通信号灯的智能路由策略,该信号灯用于指示当前卫星节点和下一卫星节点的拥塞状态,根据中间节点各信号灯的实时颜色动态调整路由,得到最优传输路径.文献[8]针对 LEO 卫星网络在多跳转发数据包时流量分布不均的情况,提出了一种基于不完全信息的最优收益路由联盟博弈算法.网络中各节点协同联盟邻居节点,共同决策数据包当前转发的最优路径,从而分配和平衡节点间流量负载.

单层的卫星网络难以满足地球上大量用户日益增长的通信服务需求,由低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)、中轨卫星(Medium Earth Orbit, MEO)和高轨卫星(Global Earth Orbit, GEO,)组成的多层卫星通信网络逐渐发展起来^[9].

针对双层卫星网络,文献[10]基于命名数据网络体系结构,提出一种多层卫星网络分布式路由算法.该算法根据链路切换的周期性和可预知性,采用时变图为建模工具,设计一个能自适应稠密和稀疏场景的路由算法,动态地计算时间相关的最快路径并将其附加为源路

由信息.文献[11]提出一种基于双层量子卫星网络的路由算法,该算法采用 RKA(Routing and Key Allocation)算法选择卫星网络路由,如果通信双方只需访问一颗卫星,则不需要计算卫星间路由,反之则采用 Dijkstra 算法计算源节点和目的节点之间的最短路径.

文献[12]提出了一种基于扩展链路状态的负载均衡路由算法,通过设计一种自适应拥塞阈值设置机制,更好地适应业务负载的变化.该算法不仅保持了路径集的最优性,而且降低了链路的拥塞概率,能够更好地适应业务负荷的变化.同时,链路拥塞状态通知机制和重路由机制,保证以最小的开销获取链路状态的及时性.文献[13]提出了一种基于密度的网络划分算法,将卫星地面网络分为一系列大小不同的块,以分摊数据交付成本.为了部署缓存卫星,分析链路连通性,文献[13]还提出了近似最小覆盖顶点集算法.该算法降低了不同网络条件下的平均传播延迟和网络负载,在连续时间变化下具有更好的稳定性和自适应性.

此外,还有一些研究将软件定义网络(Software Defined Network, SDN)与传统卫星网络相结合,采用一颗或几颗卫星作为控制器(或控制平面),来提高网络管理的效率和灵活性^[14,15].SDN 网络的核心思想是将数据平面和控制平面分离,从而显著简化网络管理^[16,17].SDN 网络结构分为三层:应用层、控制层和基础设施层.其中应用层支持各种网络用户应用;控制层根据应用的需要通过北向接口协调整个网络;同时控制基础设施层通过南向接口转发数据;基础架构层又称数据平面,通过南向接口接收控制器发出的指令.文献[18]在基于软件定义网络的三层卫星通信网络模型的基础上,提出了一种自适应路由算法(Adaptive Routing Algorithm, ARA),以维持最短的卫星通信链路,有效减少了链路距离和通信延迟,实现自适应路径规划.文献[19]提出了一种基于 SDN 的 LEO/GEO 网络模型的路由感知算法(QoS-aware Routing Algorithm, QoSRA),该算法在业务传输过程中结合了加权轮询和优先队列算法.文献[20]提出了一种基于邻居卫星负载状态感知的分布式路由算法,该算法根据邻居卫星的负载状态进行负载均衡和路由判决,能很好地适应其他极轨或近极轨星座.文献[21]考虑了每个业务数据包的 QoS 要求,提出一种 Sway 算法,并提出了一种基于 Yen's 的 k 最短路径的贪婪方法,根据网络交换机的流表计算路由路径.文献[22]提出了基于虚拟节点拓扑动态资源的多 QoS 约束路由算法,该算法根据虚拟节点的交换状态、缓存、剩余带宽、链路延迟和网络拓扑结构,建立了虚拟节点的动态资源映射模型;并采用蚁群算法建立多 QoS 约束计算模型,来满足一段时间内每个连接请求的 QoS 约束.

综上所述,目前关于卫星互联网的研究中,对路由算法的设计较少直接考虑星间链路质量对信息传输的影响,在网络覆盖率较高的时候,相距较远的源节点和目的节点间会更容易受到传播时延的影响,不利于提高服务的QoS;同时,网络中通信传输的业务种类日益增多,且不同服务的QoS需求也各不相同,传统的单一QoS路由算法难以满足多业务定制化QoS需求.因此,本文提出了一种双层卫星网络,将GEO卫星看作控制平面,LEO卫星节点作为数据平面.根据网络中数据流量特点,我们将业务分为两类:QoS需求较高的业务和QoS需求较低的业务.在进行路由转发前,我们针对两类业务各自的特点提出了一种队列调度算法,综合考虑两种业务流量优先级和队列到达率,对业务优先级进行排序,来保证不同业务流量的QoS.对于QoS需求较高的业务,我们提出了一种轨道内优先转发的低复杂度路由算法,优先选择同轨道内的卫星节点作为数据转发的下一跳节点,然后再进行邻轨之间的数据传输.该算法可以有效降低算法的计算复杂度和时延.对于QoS需求较低的业务,我们提出了一种考虑链路余量、时延和剩余带宽的链路加权算法,保证该类业务在信道资源受限的条件下找到最优路径.在卫星网络中,两种算法针对不同的业务自适应切换,形成了一种新型的混合路由方案,能够在保证一定公平性的条件下提升卫星网络性能.

2 系统模型

在本文中,卫星网络拓扑模型由66颗LEO类铱星座和3颗GEO卫星组成.在LEO卫星星座中,66颗卫星分布在6根轨道上,每根轨道上有11颗卫星,轨道高度为780 km,轨道倾角为 86.4° .每颗卫星都有四条星间链路(极区和反向缝附近的卫星除外).卫星在穿越极区时,相邻轨道间的卫星的相对运动方向会发生变化,轨道间的星间链路会断开,因此位于极区附近的卫星只有两条同轨的星间链路.当卫星位于反向缝两侧时,反向缝两侧的卫星的相对运动方向相反,因此只有3条星间链路.每颗GEO卫星的轨道高度是35 786 km,轨道倾角是 0° .我们将控制器部署在3颗GEO卫星上,每个GEO卫星都可以实时监测该卫星覆盖下的LEO卫星的状态,GEO卫星之间通过星间链路共享LEO卫星信息,具有全局的网络视图,并计算出相应的路由表.GEO卫星将流表下发给它监控范围内的LEO卫星,LEO卫星作为数据平面,根据流表中的转发规则,进行数据转发.基于SDN的GEO/LEO卫星网络拓扑结构如图1所示.

由于GEO和LEO卫星的相对移动速度较快,为屏蔽卫星间的动态特性,我们将卫星运动周期进行切片,

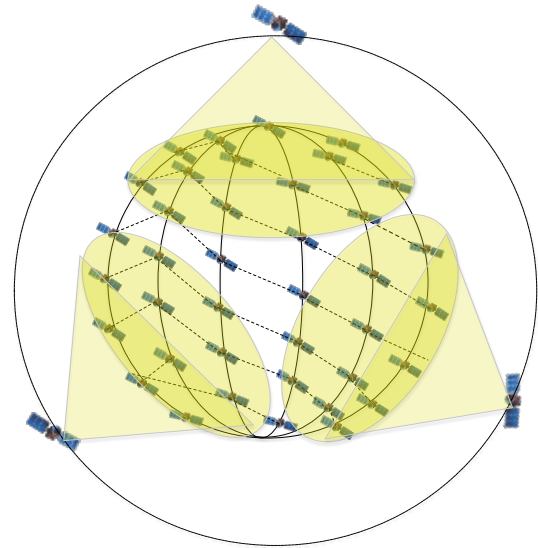


图1 卫星网络拓扑图

在每个切片中采用虚拟拓扑方法^[21,23]对一个时间切片内网络模型的路由进行分析研究.

3 算法设计

在本文中,我们提出了一种基于业务调度的混合业务感知路由算法,该方案结合了队列的优先级和不同业务的到达率对QoS需求较高的业务和QoS需求较低的业务进行调度.我们使用第3.2节中提出的轨道内优先转发的低复杂度路由算法对前者进行路由传输;此外,针对后者提出了第3.3节中基于链路状态的加权路由算法.在本节中,我们将详细描述队列调度算法和路由算法.

3.1 业务调度算法

卫星网络为用户提供具有特定QoS需求的业务,常见的QoS指标包括最小带宽、最大延迟、最大时延抖动(延迟的最大变化)或与数据传输相关的一些其他成本.根据业务流量QoS的特点,我们一般将其大致分为两大类:QoS需求较高的业务和QoS需求较低的业务^[24].对于QoS需求较高的业务,我们考虑时延和带宽,即对时延和带宽需求较高的业务,比如在线语音、在线视频、音频流、视频流和其他双向业务.这类业务的QoS特点是追求低时延和高可靠性,但允许一定程度的时延抖动并且数据量较小,在某些条件下对信道具有独占性.QoS需求较低的业务对时延和带宽需求均不高,在传输过程中不考虑较高的业务传输质量,尽力而为进行传输.业务类型描述如表1所示.

表1 业务类型

类型	业务描述
高QoS需求业务	语音、信号、控制等双向通信及网页浏览、邮件等
低QoS需求业务	视频流/音频流及大文件传输

在系统模型中,每个卫星将接收到的数据按照其业务类型放到不同的队列当中进行调度传输.一般来说,在传统的队列调度算法中,对于低时延或者高带宽等对 QoS 要求较高的业务,该类业务所在的队列在进行调度时会被赋予较高优先级进行传输,保证该类业务的传输质量.文献[20]采用优先队列(Priority Queue, PQ)和加权轮询调度(Weighted Round Robin, WRR)相结合的队列调度算法,该算法为对时延要求较高的业务所在的队列设置较高的优先级,优先此队列进行调度传输,满足其时延较低的要求.在对带宽要求较高的业务和单项传输的业务所在的队列之间采用 WRR 调度策略,为单项传输的业务保证了带宽分配的相对公平性,既能保证高优先级业务的 QoS 要求,又能防止低优先级业务由于权值过低而长时间不被调度处理.但是,在实际的卫星网络中,由于接入卫星的业务类型是随机的,并且随机接入要传输的业务数量也不确定,此时,高 QoS 需求业务和低 QoS 需求业务在传输过程中的公平性就需要权衡考虑.比如,当卫星同时接收到这两类业务时,一般来说,我们会优先高 QoS 需求业务的传输;但是,此时的高 QoS 需求业务的业务量要远远小于低 QoS 需求业务并且后者的等待时间过长,导致后者的传输可靠性就会剧烈下降,这将极大影响卫星系统总体传输性能和低 QoS 需求业务调度的公平性.

因此,为保证各类业务在时延、带宽和公平性等关键 QoS 指标的平衡,我们基于文献[25]中的工作,根据队列中数据包的排队时延和带宽占用情况定义高 QoS 需求和低 QoS 需求消息队列的优先级,用来描述各队列业务的综合 QoS 指标,则每个队列优先级由式(1)表示:

$$P_i = \alpha \frac{T_i}{T_{\text{QoS}} + T_{\text{NQoS}}} + \beta \frac{B_i}{B_{\text{total}}} \quad (1)$$

其中, P_i 代表了高 QoS 需求、低 QoS 需求业务的优先级 ($i = \text{QoS}, \text{NQoS}$); T_{QoS} 和 T_{NQoS} 代表了高 QoS 需求、低 QoS 需求业务队列中的排队时长; B_i 代表了高 QoS 需求业务、低 QoS 需求业务所需的带宽; B_{total} 代表了信道总带宽; α 和 β 是分别与排队时长和带宽相关的影响因子,它们的值可根据上一个时隙的排队时长 $\frac{T_{i-1}}{T_{\text{QoS}} + T_{\text{NQoS}}}$ 和链路带宽 $\frac{B_{i-1}}{B_{\text{total}}}$ 动态调整,且满足 $\alpha + \beta = 1$.

为衡量业务调度的公平性,在进行队列调度的过程中,综合考虑队列到达率进行调度,我们定义每个队列的调度量如式(2)所示:

$$\text{Sch}_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} * R_i \quad (2)$$

其中, Sch_i 代表调度量; R_i 代表高 QoS 需求业务、低 QoS 需求业务的到达率 ($i = \text{QoS}, \text{NQoS}$).

得到每个队列的调度量后进行比较,调度量值较大的队列中的数据优先进行传输,图2为业务调度及算法选择流程图.

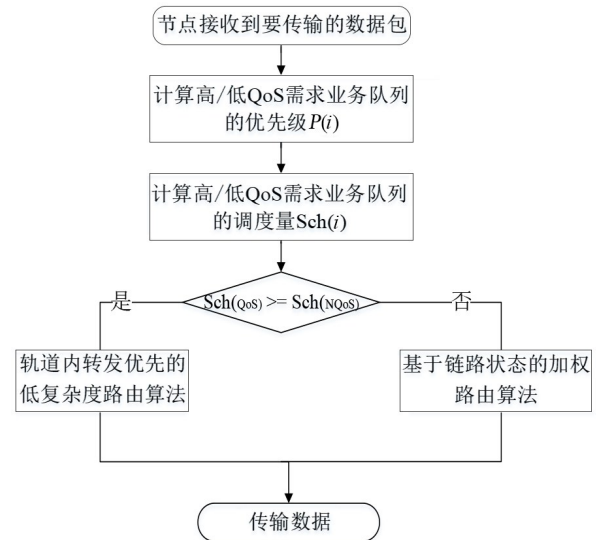


图2 业务调度及算法选择流程图

3.2 轨道内优先转发的低复杂度路由算法

由于卫星运动速度快和卫星拓扑的动态特性,轨道内链路的稳定性优于轨道间链路,因此,在该算法中,针对高 QoS 需求业务,我们制定了一个路由转发原则,即数据包先在轨道内的星间链路中垂直转发,然后再向相邻轨道间水平转发到目的节点.基于此转发思想,可以简化路由的计算复杂度.

我们使用 $\langle i, j \rangle$ 来表示网状卫星网络拓扑中的逻辑地址,如图3所示.其中 i 表示的是第 i 个轨道, j 表示的是第 i 个轨道上标号为 j 的卫星.我们用 $\langle S_i, S_j \rangle$ 和 $\langle D_i, D_j \rangle$ 表示源卫星节点和目的卫星节点的逻辑地址.我们假设 $j = 1, 6, 11$ 的卫星位于高纬度地区(极区).本节的路由算法是根据源节点和目的节点的相对位置来进行描述的,即考虑源节点和目的节点是否在同一半球以及是否在极区的情况进行分析.

(1) 源卫星节点和目的卫星节点在同一根轨道上,但不在同一水平面,即 $S_i = D_i, S_j \neq D_j$.

当源卫星节点和目的卫星节点在同一半球,并且 $S_j > D_j$ 时,数据包在不同半球的转发方向不同.如果源、目的节点都在西半球时,数据包垂直向上转发;如果源、目的节点都在东半球时,数据包垂直向下转发.

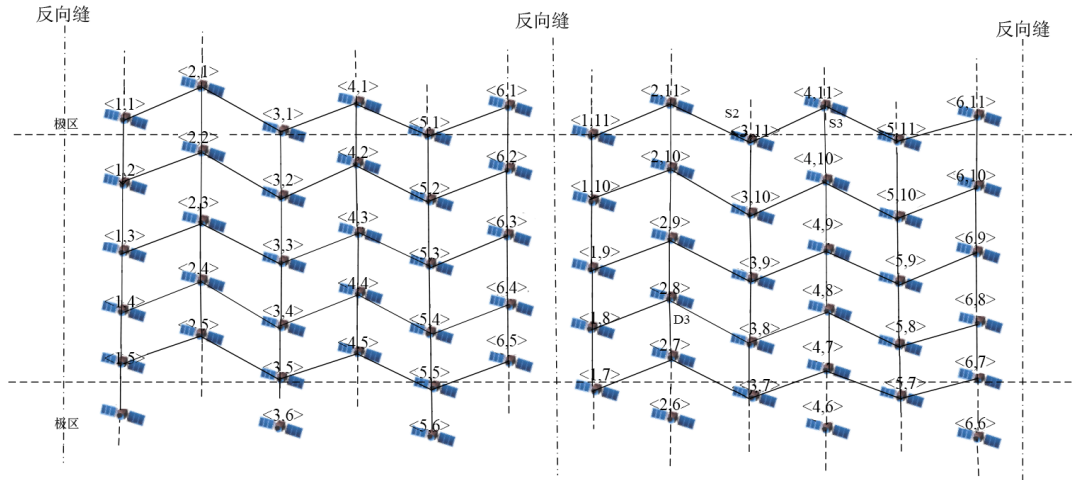


图3 虚拟节点拓扑图

当源卫星节点和目的卫星节点不在同一半球, $S_j > D_j$ 时, 从源节点发出的数据包垂直向上传输, 直到到达目的节点, $S_j < D_j$ 时, 数据包垂直向下传输。

(2) 源卫星节点和目的卫星节点不在同一根轨道上, 但在同一水平面, 即 $S_i \neq D_i, S_j = D_j$ 。

当源节点和目的节点均位于同一个半球, 卫星节点是否位于极区有 2 种情况:

① 当源节点和目的节点都不在极区时, 报文转发规则由两个节点的相对位置决定。当 $S_j > D_j$ 时, 数据包沿着轨道平面水平向左转发到目的节点; 当 $S_j < D_j$ 时, 数据包沿着轨道平面水平向右转发到目的节点。

② 当源节点和目的节点都在极区时, 根据网络拓扑的逻辑地址, 源节点和目的节点的位置分为三种情况: $S_j = D_j = 1$, $S_j = D_j = 11$ 和 $S_j = D_j = 6$ 。在这三种情况中, 其中前两种情况的路由计算方法相同: 数据包首先垂直向下转发穿过极区, 然后沿轨道平面水平转发到目的节点之外一跳的节点处, 再向上转发到目的节点。当 $S_j = D_j = 6$ 时, 根据源、目的节点是否在同一半球进行分类讨论。当源、目的节点都在同一半球时, 数据包首先垂直向下转发。当源节点在东半球、目的节点在西半球时, 数据包先沿着当前轨道向下传输, 然后水平传输至目的节点; 当源节点在西半球、目的节点在东半球时, 数据包传输方向与上一种情况相反。

(3) 源卫星节点和目的卫星节点既不在同一轨道上, 也不在同一水平面, $S_i \neq D_i, S_j \neq D_j$ 。

在这种情况下, 我们根据源节点和目的节点是否在同一半球以及是否在极区对节点路由进行分类。

① 当源节点和目的节点在同一半球时, 有 3 种情况:

(a) 当源节点和目的节点在同一半球时, 数据包首先垂直移出极区, 然后沿着轨道面水平传输至目的节

点所在的轨道上, 最后垂直传输至目的节点。

(b) 源节点和目的节点都在极区, 如果源节点在极区, 则数据包沿当前轨道垂直离开极区, 直到与目的在同一轨道平面上, 再水平移动到目的节点。在这种情况下, 当 $S_j = 11$ 或 $S_j = 6$ 时, 数据包向着 S_j 减小的方向垂直传输直至 $S_j = D_j$ 后, 再向着目的卫星节点的方向进行水平传输。当 $S_j = 1$ 时, 数据包向着 S_j 增大的方向垂直传输。当目的卫星节点在极区、源卫星节点在极区外时, 数据包先沿着当前轨道垂直移动到和目的卫星节点同一水平面处的节点, 再水平移动到距目的卫星节点一跳的极区外节点后, 垂直移动到目的卫星节点。在这种情况下, 当 $D_j = 11$ 或 $D_j = 6$ 时, 数据包先沿着当前轨道 S_j 增大的方向, 垂直移动到距离目的卫星节点外一跳的节点的同水平面处, 再水平移动到距目的卫星节点一跳的极区外节点处后, 垂直移动到目的卫星节点。当 $D_j = 1$ 时, 数据包移动的情况和上一种情况相反, 先沿着 S_j 减小的方向进行传输。

(c) 源卫星节点和目的卫星节点都不在极区时, 数据包先沿着轨道垂直移动到和目的卫星节点同一水平面的节点处, 再水平移动到目的节点。

② 当源节点和目的节点在不同半球时, 根据两个节点的相对位置, 我们将其分为 3 种情况:

(a) 当源节点和目的节点都在极区时, 数据包首先垂直穿过极区, 然后沿着轨道面水平传输至目的节点。满足这种情况的节点有六种情况: $S_j = 11, D_j = 1$; $S_j = 11, D_j = 6$; $S_j = 6, D_j = 1$; $S_j = 1, D_j = 6$; $S_j = 1, D_j = 6$; $S_j = 6, D_j = 11$ 。

(b) 源节点和目的节点有一个在极区, 当源节点在极区时, 数据包首先穿过极区, 然后根据源节点和目的节点的相对位置进行传输。当 $|S_j - D_j| > 5$ 时, 数据包穿过北极进行传输, 此时满足情况的节点是 $S_j = 1$ 或 $D_j =$

11;当 $|S_j - D_j| < 5$ 时,数据包穿过南极进行传输,此时满足情况的节点是 $S_j=6$ 或 $D_j=6$.

(c)当源节点和目的节点都不在极区时,数据包直接根据节点间的相对位置进行传输.其节点的相对位置和路由计算与情况2相同.

3.3 基于链路状态的加权路由算法

对于低QoS需求业务,在进行数据包路由由下一跳选择时,采用基于链路状态的加权路由算法进行判断.

在设计低轨通信卫星星座时,链路频率资源稀缺受限,星间链路之间可用的微波频率资源固定且有限,难以同时满足多个大规模星座的宽带星间链路使用.另外,由于低轨卫星的相对位置始终在变化,数据在卫星星座中被多次传输,信号的延时明显增加,大大降低了卫星网络在延时方面的优势.此外,星间链路在工作时,同轨道面的卫星建立的星间链路相对稳定,异轨道面的卫星建立的星间链路较不稳定,要考虑链路距离、星间链路相互干扰等链路质量问题.因此,为保证对服务质量要求较低的业务数据包的可靠传输,我们为每条链路定义一个权重因子,该权重因子由数据包传输时延、链路带宽和链路余量三个因素共同决定^[26].

我们假设每颗卫星通信链路的带宽都是相同且有限的.由于高QoS需求业务的优先级一般要高于低QoS需求业务,因此在队列调度转发的时候会优先占用信道资源;另外,用于后者传输的带宽将受到限制,因此网络总体QoS会受到影响.

本文中,我们使用K频段进行通信,该频段具有通信容量大、抗干扰能力强、星间传输无雨衰,以及符合国际电联频率划分要求等特点,是当前星间链路的研究重点^[27].为保证业务传输的质量,我们计算了链路余量.卫星通信余量是指星间通信时,经过信道衰减后的信号到达接收方时,信号强度和噪声比能够满足信息正确检测的容限的富余程度.链路余量的计算^[28]如式(3)所示:

$$M = \left[\frac{C}{N} \right] - \left[\frac{C}{N} \right]_{th} \quad (3)$$

其中, M 为链路余量; $[C/N]$ 为链路载噪比; $[C/N]_{th}$ 为接收机的门限载噪比.

计算理论 $[C/N]_{th}$ 值,载波功率和噪声温度之比如式(4)所示:

$$\left[\frac{C}{N} \right]_{th} = \left[\frac{E_b}{n_0} \right] + 10 \lg k + 10 \lg R_b \quad (4)$$

其中, E_b/n_0 为单位码元的信噪比; k 为波尔兹曼常数; R_b 为信道传输码速率.

由于所有通信链路在对地静止卫星轨道之间和低轨卫星轨道之间进行,所涉及的星间链路仅涉及

空对空的传输,在考虑卫星通信系统间的干扰时,一般采用自由空间传输模型,也就是自由空间传播损耗.假设自由空间传输损耗为 L_{fs} 可以由式(5)计算:

$$L_{fs} = 20 \lg \left(\frac{4\pi d_u}{\lambda_u} \right) \quad (5)$$

其中, d_u 为星间链路的长度, λ_u 为载波波长.

计算实际 $[C/N]$ 值如式(6)所示:

$$\left[\frac{C}{N} \right] = [\text{EIRP}] + \left[\frac{G}{T} \right] - [L_{fs}] - [L_r] \quad (6)$$

其中,EIRP为等效全向发射功率; L_r 为天线损耗和馈线损耗; G 为天线增益; T 为天线噪声温度.

然后,我们将数据包的时延、链路的剩余带宽和链路余量进行综合考虑,定义每个星间链路的权重值如式(7)所示,来描述下一跳节点的链路选择.

$$w_i = \varepsilon B_i + \eta M_i + \zeta D_i \quad (7)$$

其中, B_i 代表第 i 颗卫星的剩余带宽; M_i 代表第 i 颗卫星的链路余量; D_i 代表第 i 颗卫星的端到端时延; w_i 代表了第 i 颗卫星的链路权重; η 和 ζ 是各自的影响因子,它们的值可由穷举寻优法^[29]确定.每个参数值都在 $(0, 1)$ 的个数为100、步长为0.01的有限集中进行遍历,选取最适合的参数组合,在寻优过程中,每个参数之间没有耦合关系,可同时进行计算;通过穷举遍历,找到一组在当前时隙下局部最优的参数组合;三者之和满足 $\varepsilon + \eta + \zeta = 1$.

当对QoS要求较低的业务转发时,由于每颗卫星都具有最少两条通信链路(位于极区的卫星有两条通信链路,位于反向缝附近的卫星具有三条通信链路,其余卫星均有四条通信链路),数据包转发时在进行下一跳选择时,会选择链路权值最大的链路所连接的卫星节点作为下一跳进行传输,保证该类业务的可靠传输.

本文所提路由算法的整体流程图如图4所示.

4 仿真分析

我们使用卫星工具包(Satellite Tool Kit, STK)和Python来验证所提出的路由算法.根据系统模型,利用STK建立了多层卫星网络,然后生成伽马分布的业务流,随机生成队列到达率.由STK可知,星间链路的距离,实际 $[C/N]$ 值和门限 $[C/N]_{th}$ 值是周期性变化的^[28].另外,我们以Dijkstra算法和LCRA^[4]算法为对比算法,从端到端时延、丢包率和吞吐量等性能参数方面对几种方法的性能进行分析.其中LCRA算法根据源节点和目的节点的位置,通过分布式计算得到数据传输路径;Dijkstra算法通过迭代计算的方式得到数据传输的最短路径.星座参数和仿真参数如表2所示.

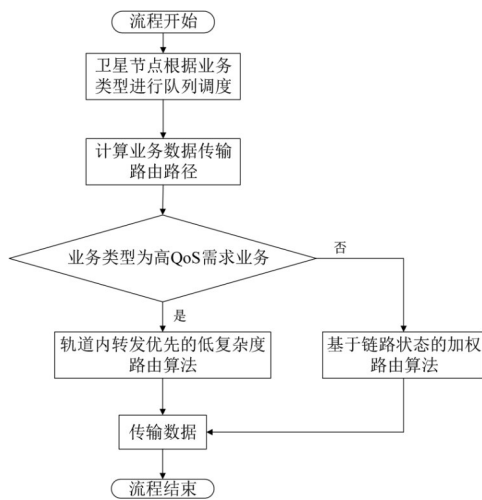


图4 算法总体流程图

表2 星座和仿真关键参数

参数	值
星间链路频率	24.5 GHz
卫星发射功率	500 W
卫星EIRP密度	4 dBW/MHz
发射天线增益	10 dB
天线/馈线损耗	2 dB
仿真次数	100
星间链路带宽	2 000 MHz
业务流量数	0~210
GEO轨道数	1
LEO轨道数	6
每根GEO轨道上的卫星数	3
每根LEO轨道上的卫星数	11
GEO轨道高度	35 786 km
LEO轨道高度	780 km
GEO轨道倾角	0°
LEO轨道倾角	86.4°
GEO卫星的星间链路数	2
LEO卫星的星间链路数 (除极区和反向缝附近)	4

4.1 开销分析

本文中,我们使用Mininet进行建模,分析网络的开销.在传统的Dijkstra算法和LCRA算法中,整个卫星网络的开销主要来自生成检测网络状态信息的探测包,并且随着卫星节点数量和网络泛洪^[23]而增加.然而,在本文提出的算法中,网络的数据平面和控制平面是相互分开的.在LEO卫星星座中,卫星节点自身不需要了解局部的网络状态信息,而是由控制器来对全局拓扑进行管理.控制器和LEO卫星节点之间的开销主要是对流表的操作,包括流表的请求、发送和更

新.这意味着面向SDN的路由算法比传统路由算法的开销更小,可靠性更高.我们只比较一个时间段T内的网络开销,而不考虑下一个时间段流表更新的开销.如图5所示,基于SDN的路由算法即本文提出算法,传统路由算法指不引入SDN的路由算法,如Dijkstra算法和LCRA算法等;根据图示结果,本文提出的基于SDN的路由算法的开销低于传统的路由算法.

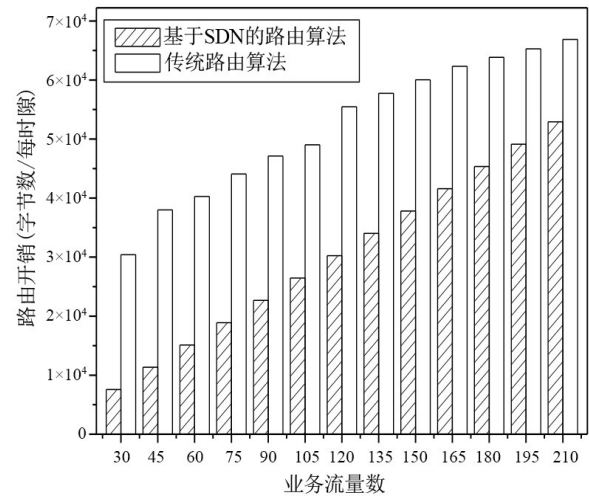


图5 不同业务流量下的路由开销比较

4.2 QoS分析

图6、图7和图8分别展示了在LEO卫星网络中,不同业务流量数下的平均端到端时延、丢包率和吞吐量的性能.

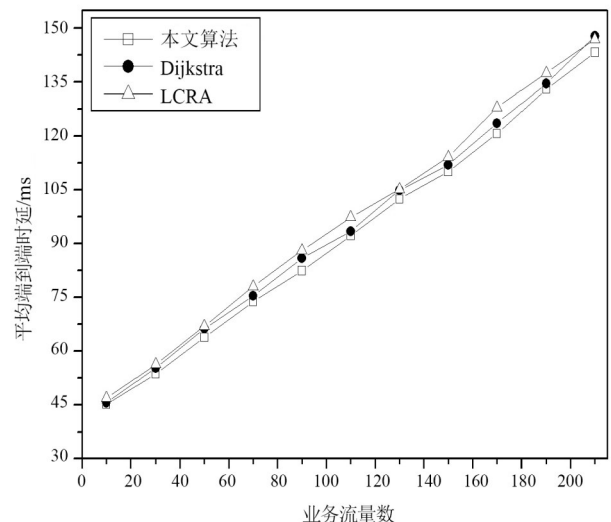


图6 不同业务流量下的平均端到端时延性能比较

如图6所示,所提路由算法的平均端到端时延低于Dijkstra算法和LCRA算法,这是因为我们使用低复杂度的路由算法来计算高QoS需求业务流量的路由路

径. 该算法和Dijkstra算法相比降低了计算迭代的复杂度,减少了路由决策时间,并且整个网络的平均端到端时延的值随着流量数的增加呈线性增加的趋势. 而Dijkstra算法和LCRA算法进行比较时可以看出,LCRA算法的平均端到端延迟的值要略高于Dijkstra算法,这与参考文献[4]的仿真结论是相符合的.

卫星网络中丢包率与流量的关系如图7所示. 在卫星网络负载较轻的情况下,三种算法的丢包率相差不大. 但是当网络负载过大时,丢包率会急剧增加,特别是Dijkstra和LCRA算法更甚. 我们所提算法的丢包率性能优于LCRA和Dijkstra算法,这是因为在对低QoS需求业务进行路由转发的时候,会优先选择链路性能较好的链路进行传输,从而减少数据包的丢失,在不同数量的流量下具有更低的丢包率.

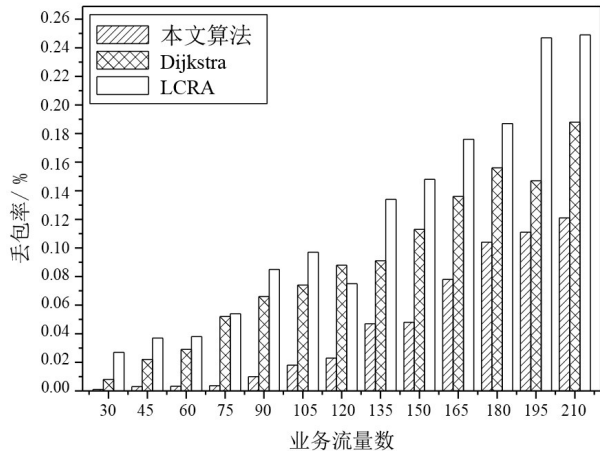


图7 不同业务流量下的丢包率性能比较

吞吐量是衡量卫星网络QoS中的一个重要指标,指单位时间内成功地传送数据的数量. 本文吞吐量计算方式如式(8)所示:

$$\text{Thr} = \frac{N(\text{Packet}_{\text{all}} - \text{Packet}_{\text{loss}})}{T} \quad (8)$$

其中, Thr代表吞吐量; $\text{Packet}_{\text{all}}$ 代表当前网络传输的数据包量; $\text{Packet}_{\text{loss}}$ 代表传输过程中丢弃的数据包数; N 代表当前的数据包的大小; T 代表当前的仿真时间.

与Dijkstra算法和LCRA算法相比,从图8可以看出,本文算法的吞吐量高于Dijkstra算法和LCRA算法,且吞吐量随着业务流量的增加而增加;但当网络负载过大时,Dijkstra和LCRA的吞吐量曲线从业务流量数为165时开始增长趋缓,这是因为所提算法针对不同类型业务的特点进行路由路径规划,从而提高了网络中信道资源的利用率,降低了链路拥塞和丢包率,既保证了不同种类业务流量的传输,也提高了整个网络的吞吐量.

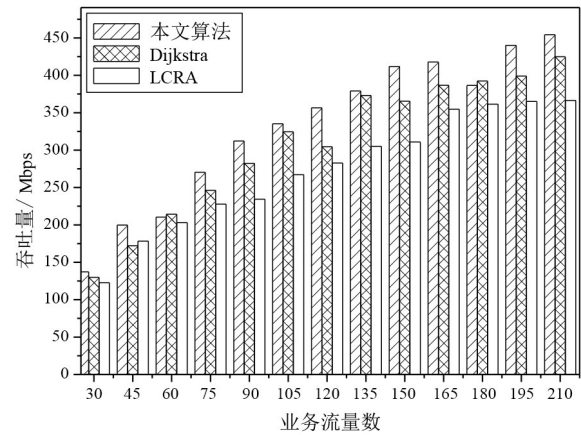


图8 不同业务流量下的吞吐量性能比较

5 结束语

本文提出了一种面向软件定义卫星网络的业务感知和调度联合路由算法,该算法优先考虑业务队列调度,并根据业务的QoS特点进行路由选择. 对于时延/带宽需求较高的业务,我们采用轨道内优先的低复杂度路由算法,减少网络中的计算复杂度并获取最优路径;对于低QoS需求业务,我们采用基于链路状态的加权算法尽可能保证其他业务的传输. 仿真结果表明,该算法降低了卫星网络的端到端时延和拥塞率,提高了网络带宽的利用率和吞吐量,能够满足不同种类业务的QoS要求.

参考文献

- [1] ZHANG L, YAN F, ZHANG Y Y, et al. A routing algorithm based on link state information for LEO satellite networks[C]//2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE, 2020: 1-6.
- [2] LIU H Y, SUN F C, YANG Z A, et al. A novel distributed routing algorithm for LEO satellite network[C]//2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering. Piscataway: IEEE, 2012: 37-40.
- [3] BOERO L, MARCHESE M, PATRONE F. The impact of delay in software-defined integrated terrestrial-satellite networks[J]. China Communications, 2018, 15(8): 11-21. (in Chinese)
- [4] LIU X M, YAN X M, JIANG Z Q, et al. A low-complexity routing algorithm based on load balancing for LEO satellite networks[C]//2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall). Piscataway: IEEE, 2015: 1-5.
- [5] LI X, TANG F L, CHEN L, et al. A state-aware and load-balanced routing model for LEO satellite networks[C]//GLOBECOM 2017 - 2017 IEEE Global Communications

- Conference. Piscataway: IEEE, 2017: 1-6.
- [6] HAO L C, REN P Y, DU Q H. Satellite QoS routing algorithm based on energy aware and load balancing[C]//2020 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE, 2020: 685-690.
- [7] SONG G H, CHAO M Y, YANG B W, et al. TLR: A traffic-light-based intelligent routing strategy for N GEO satellite IP networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(6): 3380-3393.
- [8] 魏松杰, 王佳贺, 刘沛龙, 等. LEO星座中基于不完全信息的路由联盟博弈策略[J]. 电子学报, 2020, 48(10): 1923-1927.
- WEI S J, WANG J H, LIU P L, et al. Applying collaborative game strategy for incomplete-information based routing in LEO constellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(10): 1923-1927. (in Chinese)
- [9] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: A classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [10] 刘迪, 黄传河, 陈希, 等. 基于NDN的多层卫星网络分布式动态路由方法[J]. 电子学报, 2017, 45(11): 2769-2778.
- LIU D, HUANG C H, CHEN X, et al. Distributed dynamic routing method for multi-layered satellite networks based on named data networking[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(11): 2769-2778. (in Chinese)
- [11] HUANG D H, ZHAO Y L, YANG T C, et al. Quantum key distribution over double-layer quantum satellite networks[J]. IEEE Access, 2020, 8: 16087-16098.
- [12] DONG C Y, XU X, LIU A J, et al. Load balancing routing algorithm based on extended link states in LEO constellation network[J]. China Communications, 2022, 19(2): 247-260.
- [13] JIANG D D, WANG F, LV Z H, et al. QoE-aware efficient content distribution scheme for satellite-terrestrial networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2023, 22(1): 443-458.
- [14] RAFIQUE W, QI L Y, YAQOOB I, et al. Complementing IoT services through software defined networking and edge computing: A comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(3): 1761-1804.
- [15] CASAS-VELASCO D M, RENDON O M C, FONSECA N L S DA. Intelligent routing based on reinforcement learning for software-defined networking[J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2021, 18(1): 870-881.
- [16] XU S, WANG X W, HUANG M. Software-defined next-generation satellite networks: Architecture, challenges, and solutions[J]. IEEE Access, 2018, 6: 4027-4041.
- [17] HU F, HAO Q, BAO K. A survey on software-defined network and openflow: From concept to implementation [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2181-2206.
- [18] WANG F, JIANG D D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks[J]. China Communications, 2019, 16(7): 195-206.
- [19] ZHANG J Z, DING R, LIU J, et al. QoSRA: A QoS-aware routing algorithm for software defined satellite networks[C]//2021 2nd Information Communication Technologies Conference (ICTC). Piscataway: IEEE, 2021: 165-171.
- [20] 杨明川, 薛冠昌, 李清毅. 基于邻居卫星负载状态的低轨卫星分布式路由算法[J]. 通信学报, 2021, 42(8): 43-51.
- YANG M C, XUE G C, LI Q Y. Neighbor satellite load based low orbit satellite distributed routing algorithm[J]. Journal on Communications, 2021, 42(8): 43-51. (in Chinese)
- [21] SAHA N, BERA S, MISRA S. Sway: Traffic-aware QoS routing in software-defined IoT[J]. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing, 2021, 9(1): 390-401.
- [22] ZHANG M, GAO L, HUANG J W, et al. Hybrid pricing for mobile collaborative Internet access[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2019, 27(3): 986-999.
- [23] ZHU Y H, QIAN L, DING L H, et al. Software defined routing algorithm in LEO satellite networks[C]//2017 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICs). Piscataway: IEEE, 2017: 257-262.
- [24] 董超颖, 续欣, 罗新华, 等. 支持QoS的低轨卫星星座网络重路由方法[J]. 通信技术, 2021, 54(8): 1903-1909.
- DONG C Y, XU X, LUO X H, et al. Rerouting method supporting QoS in LEO constellation network[J]. Communications Technology, 2021, 54(8): 1903-1909. (in Chinese)
- [25] 姜楠. 软件定义网络下基于业务分类的服务质量保障策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- JIANG N. Research on Service Quality Assurance Strategy Based on Service Classification in Software Defined Network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

- [26] 张路, 燕锋, 章跃跃, 等. 基于星间链路状态的低轨卫星网络路由算法[J]. 上海航天(中英文), 2021, 38(4): 92-100.
ZHANG L, YAN F, ZHANG Y Y, et al. LEO satellite routing algorithm based on inter-satellite link state information[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2021, 38(4): 92-100. (in Chinese)
- [27] 韩锐, 杨夏青, 石会鹏, 等. COMPASS 系统与 CTDRS 系统 Ka 频段星间链路干扰仿真研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 33-37.
HAN R, YANG X Q, SHI H P, et al. Simulation of interference between COMPASS and CTDRS systems with inter-satellite in Ka band[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2017, 37(2): 33-37. (in Chinese)
- [28] 王倩, 王祖林, 何善宝, 等. 动态星间链路分析及其 STK/Matlab 实现[J]. 电讯技术, 2010, 50(9): 19-23.
WANG Q, WANG Z L, HE S B, et al. Dynamic inter-satellite link analysis and its STK/Matlab implementation[J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(9): 19-23. (in Chinese)
- [29] 徐娟. 基于 stacking 集成与超参数优化的发电功率预测方法[D]. 南昌: 华东交通大学, 2022.
XU J. Generation Power Forecasting Method Based on Stacking Integration and Hyperparameter Optimization [D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2022. (in Chinese)



王程 男, 1992 年出生, 广西桂林人. 现为北京邮电大学副教授, 硕士生导师. 主要研究方向为空地通信组网路由策略、物理层关键技术研究.

E-mail: wangcheng@bupt.edu.cn



王卫东 男, 1967 年出生, 内蒙古包头人. 现为北京邮电大学教授, 博士生导师. 主要研究方向为卫星移动通信、5G/6G 移动通信、天地一体化、空天地海一体化等.

E-mail: wangweidong@bupt.edu.cn

作者简介



王朝炜 男, 1982 年出生, 陕西西安人. 现为北京邮电大学副教授, 博士生导师. 主要研究方向为 5G 移动通信技术. 中国电子学会会员编号: E190015827S.

E-mail: wangchaowei@bupt.edu.cn



杜嘉楠 女, 1997 年出生, 山西大同人. 现为北京邮电大学硕士研究生. 主要研究方向为卫星路由.

E-mail: dujianan@bupt.edu.cn