

# 基于流量预测的物联网卫星节点动态缓存分配路由策略

王卫东, 王程, 王慧文, 徐玘  
(北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876)

**摘要:** 针对低轨物联网卫星系统的路由问题, 提出了基于流量预测的物联网卫星节点动态缓存分配路由策略。首先, 分析低轨卫星覆盖区域内业务分布的时空特性, 提出了端到端流量预测方法。然后, 根据流量预测结果, 提出了动态缓存分配路由策略。卫星节点通过对星间链路的流量负载进行周期性监测, 动态分配与邻居节点间各条星间链路的缓存资源, 分为初始化和系统运行 2 个阶段。同时, 提出了节点拥塞时的业务分流及数据分组转发策略, 通过比较排队时延和转发时延的大小, 决定数据分组是否需要重路由。仿真结果表明, 所提路由策略有效地降低了分组丢失率及平均端到端时延, 改善了业务在全网的分布情况。

**关键词:** 低轨卫星; 路由; 缓存分配; 物联网

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020038

## Dynamic cache allocation routing strategy of Internet of things satellite node based on traffic prediction

WANG Weidong, WANG Cheng, WANG Huiwen, XU Pin

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

**Abstract:** Aiming at the routing problem of low earth orbit (LEO) Internet of things (IoT) satellite systems, a dynamic cache allocation routing strategy based on traffic prediction for IoT satellite nodes was proposed. Firstly, the space-time characteristics of traffic distribution in the LEO coverage area were analyzed, and an end-to-end traffic prediction model was proposed. Then, according to the traffic prediction result, a dynamic cache allocation routing strategy was proposed. The satellite node periodically monitored the traffic load of the inter-satellite link, dynamically allocated the cache resources of each inter-satellite link between the neighboring nodes. The cache allocation process was divided into two phases, initialization and system operation. At the same time, the traffic offload and packet forwarding strategy when the node was congested was proposed. By comparing the queuing delay and the forwarding delay, it was determined whether the data packet needs to be rerouted. The simulation results show that the proposed routing strategy effectively reduces the packet loss rate and average end-to-end delay, and improves the traffic distribution in the whole network.

**Key words:** low earth orbit satellite, routing, cache allocation, Internet of things

### 1 引言

随着智慧城市、环境监测、智慧医疗等领域的迅速发展, 物联网逐渐改变了人们的生活方式。通

过设计合适的协议栈与信息通信技术, 含有不同节点类型与数据类型的异构网络可以被集成在统一的物联网架构中<sup>[1]</sup>。这种集成使网络中各种智能设备可以与物联网网络交换数据, 为私人用户、商业

收稿日期: 2019-10-21; 修回日期: 2019-12-27

通信作者: 王程, wangcheng@bupt.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2017YFC0804400, No.2017YFC0804405); 国家自然科学基金资助项目 (No.61801033)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2017YFC0804400, No.2017YFC0804405), The National Natural Science Foundation of China (No.61801033)

用户等提供高价值的服务。因此,物联网得以高效利用的前提是网络中的节点可以在任何时间、任何地点访问其他节点、与其他节点进行通信或控制其他节点完成某些任务,即物联网是全球覆盖的随遇接入网络。

虽然我国地面通信网络发展迅速,但难以覆盖诸如沙漠、森林、海洋等特殊环境。卫星网络得益于其全球无缝的立体覆盖能力,成为我国未来物联网架构的重要组成部分,也是使物联网具备全球覆盖能力的唯一可行方法。在地面网络无法提供覆盖的区域,卫星网络可以在各种环境下提供持续的通信连接;在地面网络已经覆盖的区域,卫星网络可以在无线基础设施被破坏的突发情况下提供可靠的冗余连接。

在卫星物联网建设中,低轨(LEO, low earth orbit)卫星相比于高轨(GEO, geostationary earth orbit)卫星具有较大优势。低轨卫星的往返时延小于 100 ms,而高轨卫星往返时延约为 600 ms<sup>[2]</sup>。得益于低轨卫星相对较短的传播距离,其信号的传播损失较小,利于物联网终端的小型化低功耗设计。此外,由于高轨卫星与地球同步,终端和高轨卫星之间的位置相对静止,其星地通信链路受地形限制严重,当终端与卫星的视线中存在障碍物时,通信质量急剧下降。与此相比,低轨卫星与终端之间是相对运动的,即使终端位于障碍物附近也可存在通信窗口。因此,国内外均以低轨卫星物联网作为重要战略建设目标。根据行业分析师关于卫星物联网 M2M (machine to machine) 的报告表明,2017 年卫星 M2M 的市场份额达到 17 亿美元。Machina Research 机构预测,2025 年世界范围内的物联网连接规模将超过 270 亿<sup>[3]</sup>。

国外已有多个支持物联网业务的低轨卫星系统,如铱星(Iridium)、全球星(Globalstar)、全球观测卫星(ARGOS)、轨道通信卫星(Orbcom)等系统。此外,加拿大 Helios Wire 公司、美国开普勒通信公司(Kepler Communications)、澳大利亚舰队空间技术公司(Fleet Space Technologies)、以色列天空全球公司(Sky and Space Global)等也提出了待建设的卫星空间物联网计划。以上已建成和待建设的国外卫星物联网系统将覆盖 L、S、Ku 等频段<sup>[4]</sup>。

与国外相比,国内的低轨卫星物联网系统启动较晚,“鸿雁系统”和“行云系统”已在建设,但尚未正式建成投入使用。由于启动较晚,我国的卫

星物联网系统在频率资源上十分紧张,难以为物联网系统获取专用的频率资源,卫星节点往往需要兼容宽带互联网接入、物联网等应用服务。因此,我国卫星物联网系统必然是低速业务与高速业务、时延敏感业务与时延非敏感业务共存的场景。此外,与国外卫星系统可全球布站相比,我国卫星系统的信关站一般分布在国土境内,为保证数据的及时传输,需要星间链路以实现数据的星间路由。因此,如何利用星间链路提供的连通性设计合理的路由策略,成为卫星物联网系统能否高效、及时传输数据的关键问题。

在设计卫星网络的路由策略时,需要考虑以下几方面因素的影响。首先,卫星节点的缓存、处理能力有限,要求路由策略不能具有过高的复杂性。其次,星间链路状态变化频繁,无论是星间链路误码率过高导致的链路中断、星间相对运动导致的链路中断与重连或是卫星节点的失效,均将使网络拓扑处于非稳定的状态,要求路由策略具备在变化拓扑下的自适应重路由能力,同时需要考虑重建路由需要的信令开销和处理开销。最后,卫星网络覆盖区域内的流量负载是非均匀的,地域和时区的差异导致流量负载具有时变特性,覆盖极地区和海洋的卫星与覆盖发达国家的卫星可能具有较高的负载差异,要求路由策略考虑流量覆盖特性,有效分流业务,避免节点拥塞。

综上所述,卫星物联网系统的路由策略设计需考虑网络拓扑状态、时变流量等因素。本文提出了一种基于流量预测的物联网卫星节点动态缓存分配路由策略。首先,综合考虑地面节点的流量以及其他卫星流入的流量,提出卫星节点间时变流量的预测方法,可对任意 2 个卫星节点之间的潜在流量进行预测;其次,基于流量预测结果,提出卫星节点与其邻居节点之间的缓存队列长度分配方法,并在网络运行过程中自适应调整;再次,给出卫星节点发生拥塞时的业务分流及数据分组转发策略;最后,基于 NS3 仿真软件完成仿真与评估工作。

## 2 相关工作

在低轨卫星网络路由策略研究中,最初的路由策略是面向连接的<sup>[5]</sup>。随着 TCP/IP 及网络的发展,非面向连接的路由受到了更广泛的关注。许多卫星网络路由策略集中在如何屏蔽低轨卫星网络的动

态性，并以最小端到端时延为目标寻找最优路径，例如基于虚拟节点的数据报路由策略<sup>[6-7]</sup>、基于虚拟拓扑的最短路径路由策略<sup>[8-9]</sup>等。这种路由策略的优势在于，当网络中的业务流量不超过负荷，即不发生节点拥塞时，可以获得近似最优的端到端时延。但是，当业务流量超过负荷时，网络层的分组丢失率将急剧增加，传输期间也将存在很大的排队时延。由于大部分地球被海洋所覆盖，并且赤道周围的人口更密集，这使地面业务流量呈现明显的非均匀分布状态。当应用以上路由策略时，某些卫星节点将严重拥塞，而另一些卫星节点始终处于空闲状态，无法充分利用全网资源。

为了使星间链路得到更平均的利用，替代链路路由（ALR, alternate link routing）策略采用备用替代链路的思想，提出了基于源节点的备用替代链路转发策略和基于所有节点的备用替代链路转发策略<sup>[10]</sup>。ALR 可以通过备用替代链路的路由，有效地处理流量负载并显著降低星间链路的峰值负载情况。为了进一步考虑业务流量对路由策略的影响，业务分类（TCD, traffic class dependent）策略将业务流量分为以下 3 个类别：A 类需要低端到端时延，B 类需要高吞吐量，C 类没有特殊需求<sup>[11]</sup>。TCD 路由策略能够根据业务流量的类别针对性地对选路进行优化，进而满足各业务类别的需求。但是，ALR 和 TCD 策略均需要在每次计算路由路径时提前更新全网拓扑状态，一方面这将导致大量的信令开销，另一方面在时变的卫星网络中难以获得准确的全网拓扑状态。因此，ALR 和 TCD 策略在实际网络中的有效性受限。

为更实际地获得全网拓扑状态，紧凑型显式多路径路由（CEMR, compact explicit multi-path routing）策略周期性地基于轨道代言人收集和交换每个节点的预期排队时延<sup>[12]</sup>。CEMR 根据全网拓扑状态生成 2 条到目的节点的不相交路径，实现对业务流量的分流。但是，基于轨道代言人收集到的预期排队时延是滞后的，无法完全代表实际情况，当临近拥塞的节点被包含在路由路径中时，该节点可能在传输中产生拥塞，从而导致分组丢失率和传输时延的严重恶化。

受地面 Ad-Hoc 路由策略的影响，研究者提出了位置辅助按需路由（LAOR, location assisted on-demand routing）策略<sup>[13]</sup>。LAOR 的目标是以最小的信令开销实现端到端时延的降低。在 LAOR

中，每个源节点和目的节点组成一对，单独进行路径发现过程。但是，当业务请求频率较高时，LAOR 策略将有较大的信令开销。为改善 LAOR 策略在高业务请求频率下的信令开销，基于代理的负载均衡路由（ALBR, agent-based load balancing routing）策略定义了 2 种类型的代理，即移动代理和固定代理，每个卫星节点在运行周期中同时部署以上 2 种代理<sup>[14]</sup>。移动代理的作用为发现源节点和目的节点之间的可用路径，在迁移期间移动代理通过与其他卫星节点上固定代理的交互，收集全网状态信息。固定代理的作用为根据移动代理收集到的信息计算路由，每个卫星节点只部署一个固定代理。但是，在移动代理探索源节点和目的节点之间的可用路径时，将在网络中引入额外的流量负载和信令开销。此外，尽管 LAOR 和 ALBR 可以收集全网状态信息，但由于卫星节点间传播时延较长，2 种策略均无法准确地获得网络的实际状态。

为避免全网状态更新不及时导致数据分组在路由至下一跳节点时因拥塞而产生分组丢失，显式负载均衡（ELB, explicit load balancing）路由策略中提出了相邻卫星节点间的拥塞状态交互方案，以避免选择处于拥塞状态的下一跳节点<sup>[15]</sup>。在 ELB 中，即将拥塞的卫星会向其邻居节点发送警告信令，通知自身将发生拥塞。邻居节点在收到警告信令后，将搜索不包含该颗拥塞卫星的替代路径，并更新路由表。当卫星已经处于拥塞状态时，向其邻居节点发送业务速率降低请求，请求其邻居节点降低对自身的数据转发比率。此时，一部分下一跳是拥塞卫星的数据分组将沿其他路径转发，进而使拥塞卫星得以恢复至正常状态。但是，ELB 仅将拥塞通知发送给一跳邻居，因此路由路径中的多个上游卫星节点不能迅速分散业务流量。基于优先级的自适应路由（PAR, priority-based adaptive routing）策略提出了一种基于链路历史利用率和缓存状态的优先级路径选择机制，当有数据分组需要被转发时，节点倾向于选择利用率低的星间链路。在 PAR 策略中，卫星节点不需要与其他节点交互业务状态信息，降低了信令开销。但是，由于链路的历史状态并不一定反映下一跳节点的实际状态，因此 PAR 策略有概率将数据分组转发至严重拥塞的卫星节点<sup>[16]</sup>。基于交通灯的路由（TLR, traffic light based routing）策略对 ELB 路由策略的思想进行了扩展，引入了交通灯以指示拥塞状态，并同时考虑了当前

卫星和下一跳卫星的状态。当数据分组按预先计算的路由路径传输时,将根据任何中间节点处的交通灯颜色对路径进行调整<sup>[17]</sup>。此外,TLR 引入了公共等待队列的概念,并对轨道代言人方案进行了改进,当某个目的节点的所有下一跳节点均拥塞时,待转发数据分组将被暂时缓存在公共等待队列中。但是,由于缺乏全网状态信息,TLR 策略只能将流量迁移到相邻的轻负载卫星节点,而无法将流量分散到整个网络。此外,ELB 与 TLR 策略难以处理相邻节点均拥塞的级联拥塞场景。

由以上分析可以看出,现有路由策略在选路时一般基于当前卫星节点和邻居卫星节点的局部业务负载情况,信令交互的范围也局限于当前卫星节点和邻居卫星节点。这虽然降低了信令开销,但缺少对全局状态的考虑,使路由策略的选路结果难以保证全局的最优性。当业务流量呈现高动态变化特点时,现有路由策略将会出现频繁的信令交互和路由重计算。此外,现有路由方案仅当拥塞即将发生时才执行负载均衡,没有利用到卫星网络的一些先验信息,而且其星间链路的缓存长度是确定值,并没有根据业务流量状态对星间链路的缓存长度进行动态调整。因此,为了克服以上缺陷,本文首先提出了卫星物联网系统中的流量预测方法,其次提出了基于流量预测的动态缓存分配路由策略。

### 3 卫星物联网系统架构和流量预测方法

#### 3.1 卫星物联网系统架构

本文将低轨卫星网络建模为  $G=(V,E)$ , 其中  $V$  代表卫星节点的集合,  $E$  代表星间链路的集合。低轨卫星网络的星座模型参考铱星星座,总卫星个数  $S=MN$ , 其中  $M$  为轨道面个数,  $N$  为每轨道面包含的卫星个数。每颗卫星最多可建立 4 条星间链路,其中 2 条星间链路与异轨道面间卫星通信,另外 2 条星间链路与同轨道面内卫星通信。此外,每颗卫星节点提供覆盖地面的波束,并服务波束覆盖范围内物联网终端。图 1 给出了卫星节点与同轨卫星节点、异轨卫星节点之间的星间链路,以及卫星节点与地面终端之间的星地链路示意。卫星节点将对每条星间链路分配缓存队列,用以临时存储通过该条星间链路发往下一跳卫星节点的数据分组。

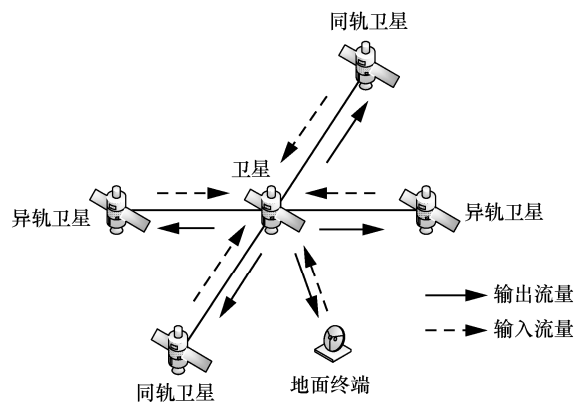


图 1 星间及星地链路示意

由图 1 可知,每颗卫星节点的输入流量为来自邻居卫星的流量以及来自地面终端的流量,输出流量为流向邻居卫星的流量以及流向地面终端的流量。卫星节点的流量状况将直接影响为星间链路分配的缓存队列长度,进而影响路由策略的端到端时延、分组丢失率等性能指标。因此,分析低轨卫星物联网系统中的流量分布特性,对于设计路由方案具有意义。

由于每颗卫星对其覆盖范围内的物联网终端提供服务,因此两颗卫星节点之间的潜在流量和各自覆盖范围内的流量需求直接相关。此外,低轨卫星节点的覆盖范围随时间变化,且覆盖范围内的流量密度同样随时间变化,即卫星节点之间的潜在流量是时间的函数。受益于低轨卫星轨道的周期性,卫星节点在覆盖区域上的变化是周期性可预测的。因此,本文在分析卫星节点间流量特性时,采用虚拟卫星节点策略屏蔽卫星节点的运动性,即假设地面区域由一组位置不变的虚拟卫星节点覆盖<sup>[18]</sup>。在任意时刻,每颗虚拟卫星节点由离其最近的真实物理卫星节点代表。当真实物理卫星节点移出虚拟卫星节点的覆盖范围时,其业务负载信息和路由表将传递给即将接替虚拟卫星节点覆盖范围的继承卫星。由于物理卫星节点的运行轨道是可预测的,因此虚拟卫星节点与物理卫星节点之间的映射关系也是周期性的,可以提前进行计算。

参考文献[19]中的方法,本文在图 2 中将地球表面划分为 288 块区域,并给出每块区域内的节点个数。图 2 中,数字的单位是  $10^6$  个节点,并假设每  $10^6$  个节点的业务流量需求为 1 Mbit/s。由于大部分业务流量将通过地面通信网络设施分发,因此本文假设通过卫星网络转发的流量比例为 5%。图 3 中给出了节点业务流量随时间的变化函数。由图 3



预测思路为：遍历邻居节点集，计算各个邻居节点到其他节点的流量，并基于最短路径算法得出各个邻居节点到其他节点  $V_j$  的最短路径。如果最短路径中包含本节点  $V_i$ ，即表示邻居节点的流量将经过本节点  $V_i$ ，该流量的目的节点为  $V_j$ 。此时，需要更新本节点  $V_i$  到目的节点  $V_j$  的流量  $J_{ij}$ ，在更新时应比较邻居节点流入的流量是否大于星间链路容量  $B$ 。采用最短路径算法预测下一跳节点的原因在于，当网络初始化运行时，各卫星节点均处于轻负载状态，此时最短路径算法得出的下一跳节点符合端到端时延最小化的需求。邻居卫星节点流入的业务流量预测流程如算法 1 所示。

**算法 1** 邻居卫星节点流入的业务流量预测流程  
for  $i = 1$ : 邻居节点个数

根据式(3)计算邻居节点  $V_{neigh}$  到其他节点  $V_j$  的流量；

基于最短路径算法，得出  $V_{neigh}$  到其他节点  $V_j$  的最短路径；

if  $V_{neigh}$  到其他节点  $V_j$  的最短路径中的下一跳节点为  $V_i$ ；

if  $J_{neighj} < B$

$$J_{ij} = J_{ij} + J_{neighj};$$

else

$$J_{ij} = J_{ij} + B;$$

end if

end if

end for

由此，本文得到了网络初始状态下任意 2 个卫星节点  $V_i$  与  $V_j$  之间业务流量  $J_{ij}$  的预测方法，该方法包含地面节点业务流量和邻居卫星节点流入的业务流量两部分。

#### 4 基于流量预测的动态缓存分配路由策略

本文提出的基于流量预测的动态缓存分配路由策略的基本思想是，在初始化阶段，各节点根据网络初始运行阶段的流量预测结果，基于最短路径算法计算得出各条星间链路将输出的流量，并根据各条星间链路的流量比例分配缓存；在系统运行阶段，根据实际流量状况更新各条星间链路输出流量，并基于该更新后的流量比例调整缓存分配。

#### 4.1 初始化阶段

在该阶段网络中，各卫星节点均处于轻负载状态，不会出现拥塞的状况。因此，各卫星节点在转发数据分组时可基于最短路径算法计算出路由路径。以卫星节点  $V_i$  为例，基于第 3 节的流量预测方法可以得出，该节点发往其他节点  $V_j$  的业务流量由地面节点业务流量和邻居卫星节点流入的业务流量两部分组成，表示为  $J_{ij}$ 。由此，可以得到  $V_i$  到其他所有  $V_j$  ( $V_j \in V, j \neq i$ ) 的业务流量  $J_{ij}$ ，这些业务流量将从  $V_i$  的 4 条星间链路转发给邻居卫星节点，转发流量大小为  $J_{ij}^k$  ( $k=1,2,3,4$ )，其中  $k=1,2$  表示同轨道面内上下 2 条星间链路， $k=3,4$  表示异轨道面间左右 2 条星间链路， $J_{ij}^k$  的计算流程如算法 2 所示。

**算法 2** 星间链路流出的业务流量计算流程

对于卫星节点  $V_i$ ，将  $J_{ij}^k$  初始化为 0，

$k = 1, 2, 3, 4$ ；

for  $j = 1:S$  ( $S = MN$ ),  $j \neq i$

if  $J_{ij} \neq 0$

基于最短路径算法，计算  $J_{ij}$  将从哪条星间链路转发至下一跳邻居卫星节点，得到星间链路的编号  $k$ ；

$$J_{ij}^k = J_{ij}^k + J_{ij};$$

end if

end for

在得到  $J_{ij}^k$  后，即可将  $V_i$  在 4 条星间链路上的总流量  $J_i^k$  表示为

$$J_i^k = \sum_{j=1, j \neq i}^{MN} J_{ij}^k \quad (4)$$

将卫星节点  $V_i$  的总缓存资源定义为  $Q$ ，则 4 条星间链路分配的缓存资源  $Q_k$  ( $k=1,2,3,4$ ) 可表示为

$$Q_k = Q \frac{J_i^k}{\sum_{k=1}^4 J_i^k} \quad (5)$$

由此可见， $\sum_{k=1}^4 Q_k = Q$ ，即 4 条星间链路分配的缓存资源  $Q_k$  总和为总缓存资源  $Q$ 。

#### 4.2 系统运行阶段

在系统运行阶段，卫星节点  $V_i$  周期性地监测 4 条星间链路的流量输出情况，设监测周期为  $t_s$ 。假设在最后一个监测周期，即  $(t-t_s, t)$  内，星间链路

的输出流量为  $J_{i \text{ inst}}^k$ ，而  $(0, t - t_\delta)$  时间内的平均输出流量为  $J_{i \text{ oldavg}}^k$ ，本文将使用式(6)来更新输出流量。

$$J_{i \text{ newavg}}^k = (1 - \alpha)J_{i \text{ oldavg}}^k + \alpha J_{i \text{ inst}}^k \quad (6)$$

其中， $\alpha$  为遗忘因子， $0 < \alpha < 1$ 。

输出流量应该是一个长期平均值，且应避免在流量短和轻微时急剧下降。因此，当  $\alpha$  过小时，输出流量的变化将非常缓慢，难以代表长期平均值，进而影响缓存资源分配的效率；当  $\alpha$  过大时，输出流量的变化将跟随短期流量波动而变化，难以实现对流量的准确预测。本文参考文献[20]的方法，采用式(7)计算  $\alpha$ 。

$$\alpha = \begin{cases} \max \left\{ \frac{J_{i \text{ inst}}^k}{J_{i \text{ oldavg}}^k} \alpha_1, \alpha_0 \right\}, & J_{i \text{ inst}}^k < J_{i \text{ oldavg}}^k \\ \min \left\{ \frac{J_{i \text{ inst}}^k - J_{i \text{ oldavg}}^k}{J_{i \text{ oldavg}}^k}, \alpha_2 \right\}, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中， $\alpha_0 = 0.025$ ， $\alpha_1 = 0.15$ ， $\alpha_2 = 0.35$ 。

除流量监测外，卫星节点  $V_i$  周期性地监测 4 条星间链路的队列使用状况，监测周期同样为  $t_\delta$ 。将每个监测周期中得到的星间链路缓存队列占用率定义为  $Q_k^r$ ，并预设 2 个门限值  $Q_k^\alpha$  和  $Q_k^\beta$ 。当  $Q_k^r \leq Q_k^\alpha$  时，将星间链路的状态定义为空闲；当  $Q_k^\alpha < Q_k^r \leq Q_k^\beta$  时，将星间链路的状态定义为正常；当  $Q_k^r > Q_k^\beta$  时，将星间链路的状态定义为拥塞。为了避免缓存队列出现分组丢失现象， $Q_k^\beta$  的值应满足

$$Q_k^\beta Q_k + \frac{(J_{i \text{ newavg}}^k - B)(t_\delta + t_d)}{P_{\text{avg}}} \leq Q_k \quad (8)$$

其中， $t_d$  为星间链路的单跳传播时延， $P_{\text{avg}}$  为数据分组大小。由式(8)可得

$$Q_k^\beta = 1 - \frac{(J_{i \text{ newavg}}^k - B)(t_\delta + t_d)}{Q_k P_{\text{avg}}} \quad (9)$$

$Q_k^\alpha$  的值应保证在重新进入拥塞状态前有足够时间来重新计算路由路径，假设最短路径算法计算路由路径的耗时为  $t_{\text{DSP}}$ ，则  $Q_k^\alpha$  的值应满足

$$Q_k^\alpha Q_k + \frac{(J_{i \text{ newavg}}^k - B)t_{\text{DSP}}}{P_{\text{avg}}} \leq Q_k^\beta Q_k \quad (10)$$

将式(9)代入式(10)可得

$$Q_k^\alpha = 1 - \frac{(J_{i \text{ newavg}}^k - B)(t_\delta + t_d + t_{\text{DSP}})}{Q_k P_{\text{avg}}} \quad (11)$$

由此可见，当  $J_{i \text{ newavg}}^k$  确定后，即可计算得出  $Q_k^\alpha$  及  $Q_k^\beta$ 。在本文中，卫星节点  $V_i$  将根据每个监测周期  $t_\delta$  内 4 条缓存队列的状态来动态调整缓存分配。以链路  $k$  为例，当前监测周期内其缓存队列占用率为  $Q_k^r$ ，队列总长度为  $Q_k$ 。若该链路处于空闲状态，则将其缓存队列长度调整至  $Q_{k \text{ new}} = Q_k - \frac{(Q_k - Q_k^r Q_k)}{2}$ ，由此链路释放出的缓存资源为  $Q_{k \text{ free}} = Q_k - Q_{k \text{ new}} = \frac{(Q_k - Q_k^r Q_k)}{2}$ ；若该链路处于正常状态或拥塞状态，则该链路释放出的缓存资源为  $Q_{k \text{ free}} = 0$ 。遍历所有星间链路得到释放的总缓存资源为  $Q_{\text{sumfree}} = \sum_{k=1}^4 Q_{k \text{ free}}$ ，此时卫星节点  $V_i$  将把  $Q_{\text{sumfree}}$  按缓存资源需求比例  $Q_{k \text{ need}}$  分配给各条拥塞的链路。本文提出的动态缓存分配策略如算法 3 所示。

### 算法 3 星间链路动态缓存分配策略

对于卫星节点  $V_i$ ，遍历 4 条星间链路

for  $k = 1:4$

计算  $Q_k^r$ ；

if  $Q_k^r \leq Q_k^\alpha$ ，链路处于空闲状态

计算得出该链路可释放的缓存资源

$$Q_{k \text{ free}} = Q_k - Q_{k \text{ new}} = \frac{Q_k - Q_k^r Q_k}{2}；$$

else if  $Q_k^\alpha < Q_k^r \leq Q_k^\beta$ ，链路处于正常状态

$$Q_{k \text{ free}} = 0；$$

else if  $Q_k^r > Q_k^\beta$ ，链路处于拥塞状态。

$Q_{k \text{ free}} = 0$ ，暂存  $Q_k^r$  的值，并将该链路放入拥塞链路集中；

end if

end for

计算得出空闲链路释放的总缓存资源

$$Q_{\text{sumfree}} = \sum_{k=1}^4 Q_{k \text{ free}}；$$

遍历拥塞链路集中的链路，计算得出各条拥塞

链路的缓存资源需求比例  $Q_{k \text{ need}} = \frac{Q_k^r}{\sum Q_k^r}$ ，并将

$Q_{k \text{ need}} Q_{\text{sumfree}}$  的缓存资源分配给该条拥塞链路。

### 4.3 业务分流及数据分组转发策略

本文采用业务分流策略<sup>[15,20]</sup>，当卫星节点  $V_i$  发现链路  $k$  处于拥塞状态时，该节点应根据转发数据分组中包含的上一跳节点地址信息，向相应的邻居

节点发送业务分流请求，邻居节点原定向该拥塞节点发送业务量的  $(1-\chi)\%$  经由其他卫星转发，以此来缓解卫星节点  $V_i$  的拥塞状态。当卫星节点  $V_i$  的业务分流请求发送至邻居节点时，其链路  $k$  的队列占用率应为

$$Q_k^r = \min \left( Q_k^\beta Q_k + \frac{(J_{i \text{ newavg}}^k - C)t_d}{P_{\text{avg}}}, Q_k \right) \quad (12)$$

为保证该拥塞链路能在  $t_\theta$  时间内及时恢复至正常状态，那么该条链路在分流之后的业务流量应满足

$$B - J_{i \chi}^k = \frac{P_{\text{avg}}(Q_k^r - Q_k^\alpha Q_k)}{t_\theta} \quad (13)$$

其中， $J_{i \chi}^k$  为邻居节点发往本节点的新业务流量。由此可得

$$J_{i \chi}^k = B - \frac{P_{\text{avg}}(Q_k^r - Q_k^\alpha Q_k)}{t_\theta} \quad (14)$$

因此，邻居节点的业务转发比例为  $\chi = \frac{J_{i \chi}^k}{J_{i \text{ newavg}}^k}$ 。此外，本文采用的数据分组转发策略思想为：根据数据分组的下一跳节点判断该数据分组的排队时延，若排队时延小于重路由带来的额外时延，则将该数据分组置于缓存队列中进行排队；若排队时延大于重路由后的排队时延与额外跳数带来的额外时延之和，则对该数据分组进行重路由，即更换传输路径。该数据分组转发策略如图 4 所示。源节点与目的节点间原定的传输路径为实现路径，其时延为  $t_1 + t_d$ ，更换路径后的时延为  $t_2 + t_3 + t_4 + 3t_d$ ，其中  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 、 $t_4$  分别为各节点在路由方向上的排队时延， $t_d$  为星间链路传输时延。源节点通过轨道代言人分发的网络状态信息，判断排队时延  $t_1 + t_d$  与换路时延  $t_2 + t_3 + t_4 + 3t_d$  的大小，决定数据分组是否要更换传输路径。

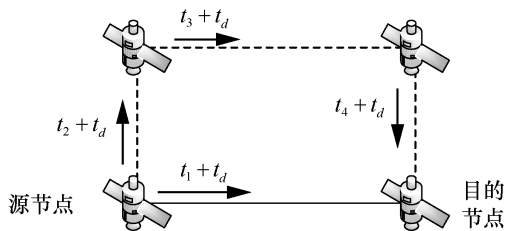


图 4 数据分组转发策略

## 5 仿真与评估

本节基于 NS3 仿真软件对所提路由策略的性能进行仿真。NS3 软件是一款面向网络系统的离散时间仿真软件，在路由策略的仿真评估中得到较多应用。本文在仿真中采用铱星系统的网络结构，低轨卫星轨道高度为 780 km，轨道面个数为 6 个，每轨道面有 11 颗卫星。每颗卫星与同轨道面内上下 2 颗卫星及异轨道面间左右 2 颗卫星建立星间链路，反向缝两侧的卫星不建立异轨道面间星间链路。在仿真中，将南北纬  $70^\circ \sim 90^\circ$  的区域设定为极区，由于该区域内的卫星相对运行速度大，在该区域内关闭异轨道面间星间链路。星间链路容量设定为 25 Mbit/s，星地链路容量设定为 100 Mbit/s。单跳星间链路时延  $t_d$  设定为 15 ms。在卫星网络中，假设物联网数据基于 IP 传输，数据分组大小  $P_{\text{avg}}$  设定为 1 KB。将监测周期  $t_s$  设定为 30 ms， $t_\theta$  设定为 200 ms，基于最短路径的重路由计算时间  $t_{\text{DSP}}$  设定为 10 ms，卫星总缓存队列长度  $Q$  设定为 400 个数据分组的大小。在仿真中采用轨道代言人策略<sup>[12]</sup>，每个轨道代言人每 30 s 收集链路状态与排队时延信息，即每个卫星节点每 30 s 刷新一次路由表。

在业务生成方面，本文在图 2 中每小块区域的中心设置一个地面终端，共 288 个终端。为了更好地模拟兼具长期可预测特性和短期不可预测特性的物联网流量，仿真中将每个终端的业务流设置为服从 Pareto 分布的 on-off 流，形状参数为 1.2，平均激活和等待时间设置为 200 ms。每对终端之间的业务流量根据式(3)计算。仿真持续时间为 24 h，次数为 20 次，取 20 次的平均值作为最终的仿真结果。本文选择基于最短路径的 ELB<sup>[15]</sup>和 TLR<sup>[17]</sup>路由策略作为性能对比方案。由于本文假设卫星总缓存队列长度  $Q$  为 400 个数据分组的大小，因此在 TLR 中为每条星间链路固定分配 75 个数据分组大小的缓存队列，并设置 100 个数据分组大小的公共缓存队列；在 ELB 中为每条星间链路固定分配 100 个数据分组大小的缓存队列；而在本文策略中星间链路的缓存队列长度动态调整。具体参数设置如表 1 所示。

本文从分组丢失率、平均端到端时延、每个卫星节点的平均队列占用度以及业务分布系数 4 个方面来对比本文策略与 ELB、TLR 的性能。

表 1 仿真参数设置

参数类型	参数名称	值
通用系统参数	轨道高度/km	780
	极区纬度阈值	70°
	路由表刷新周期/s	30
	星间链路容量 $B/(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	25
	星地链路容量 $(\text{Mbit}\cdot\text{s}^{-1})$	100
	数据分组长度 $P_{\text{avg}}/\text{KB}$	1
	单跳星间链路时延 $t_d/\text{ms}$	15
	基于最短路径的路由重计算	10
基于流量预测的动态缓存分配路由策略	时间 $t_{\text{DSP}}/\text{ms}$	
	$\alpha_0$	0.002 5
	$\alpha_1$	0.15
	$\alpha_2$	0.35
	总缓存队列长度 $Q$	400 个数据分组
	监测周期 $t_{\delta}/\text{ms}$	30
	TLR	各星间链路缓存队列长度
公共缓冲队列长度		100 个数据分组
公共缓冲队列监测周期/ms		30
最大等待时间/ms		90
ELB	各星间队列缓存队列长度	100 个数据分组

图 5 给出了 3 种策略在不同总业务流量下的分组丢失率性能。由图 5 可以看出，本文提出的动态缓存分配路由策略成功地降低了分组丢失概率。TLR 策略引入了交通灯以指示拥塞状态，因此获得了优于 ELB 的分组丢失率，在 TLR 中卫星节点可以动态地规划路径以避免拥塞情况下的分组丢失事件，该策略在清流量负载下表现良好，但随着流量负载的增加而迅速恶化。但是，TLR 无法主动调整队列缓存，且基于最短路径算法计算路径，当在最短路径中累计过多流量时，难以避免因为缓存长度不够导致的分组丢失事件。本文提出的动态缓存分配策略的分组丢失率性能优于 TLR，其原因在于该策略可根据流量负载比例调整缓存队列长度，使星间链路能提供更多的空间缓存高流量负载情况下的数据分组。在图 5 中，当总业务流量偏高时，分组丢失率将显著增大，其原因在于链路中需要传输的数据分组超过了星间链路容量，导致网络中多个节点出现拥塞状况，难以通过路由。

图 6 给出了 3 种策略在不同总业务流量下的平均端到端时延性能。由图 6 可以看出，本文提出的动态缓存分配路由策略改善了数据分组的平均端到端时

延。ELB、TLR 和本文策略的核心思想均是在发生拥塞时重路由由数据分组，即将数据分组分流至不包括拥塞节点的路径上进行传输。但是，本文提出的动态缓存分配路由策略的优势在于，在数据分组的换路时延大于排队时延的情况下，通过缓存队列的分配提供足够的缓存空间；在数据分组的换路时延小于排队时延的情况下，通过更换路由路径避免排队时延的严重恶化。因此，虽然 3 种策略的端到端时延均随业务负载的提升而增大，但本文提出的动态缓存分配路由策略具有最优的平均端到端时延性能。

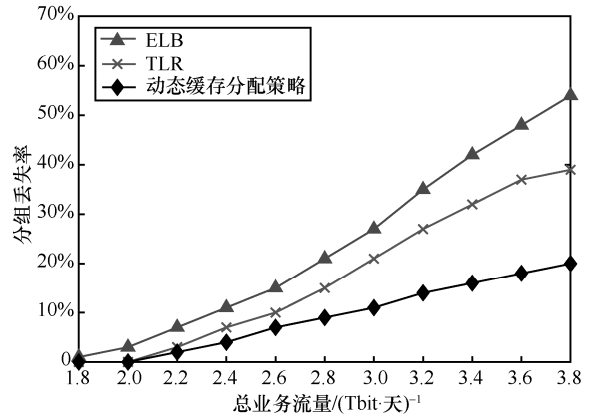


图 5 分组丢失率

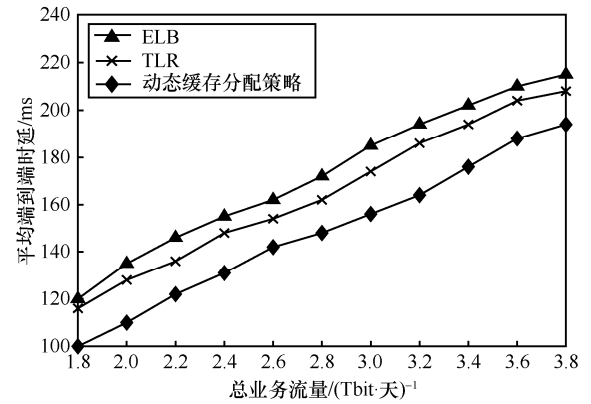


图 6 平均端到端时延

图 7 给出了所有卫星节点在业务流量负载为 3.8 Tbit/天条件下的平均队列占用度。由图 7 可以看出，本文所提动态缓存分配策略具有最低的队列占用度，降低了拥塞状况的发生概率。图 8 给出了 3 种策略在不同总业务流量下的业务分布系数性能。业务分布系数定义为

$$f = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (15)$$

其中,  $n$  表示星间链路的数量,  $x_i$  表示在第  $i$  条星间链路上传输的数据分组个数.  $f$  的范围为 0~1, 更高的业务分布系数表示更均匀的全网业务分布情况. 由图 8 可以看出, 本文所提动态缓存分配策略的业务分布情况略优于 TLR, 但随着业务负载的增加, 业务分布的改善比例升高. 其原因在于, 当业务负载较高时, 本文所提策略可以更好地平衡数据分组的排队和换路, 从而获得更高的业务分布系数.

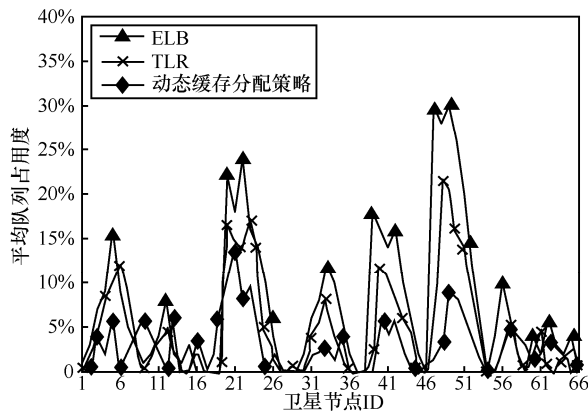


图7 节点平均队列占用度

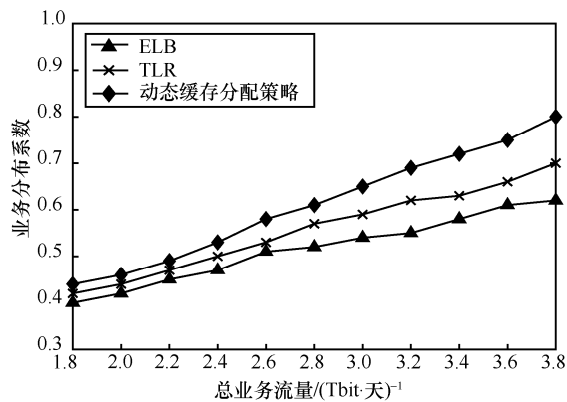


图8 业务分布系数

## 6 结束语

本文针对低轨卫星物联网系统的数据分组路由问题进行研究, 分析了低轨卫星系统在提供全球覆盖能力时, 各覆盖区域地面业务流量的时空分布特性, 进而提出了端到端流量预测方法. 在该预测方法的基础上, 本文提出了基于流量负载的动态缓存分配路由策略, 将系统分为初始化和系统运行 2 个阶段, 在初始化阶段给出卫星节点之间的端到端流量预测方法, 在系统运行阶段给出端到端

流量更新方法, 并基于该端到端流量动态分配卫星节点 4 条星间链路占用的缓存资源. 此外, 本文给出了当卫星节点出现拥塞状况时的业务分流及数据分组转发策略, 旨在避免因链路拥塞导致的分组丢失事件. 仿真结果表明, 本文所提策略可以改善分组丢失率、端到端时延、节点平均队列占用度和业务分布系数, 在卫星物联网系统中具有一定的应用前景.

## 参考文献:

- [1] STANKOVIC J A. Research directions for the Internet of things[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2014, 1(1): 3-9.
- [2] SANCTIS M D, CIANCE E, ARANITI G, et al. Satellite communications supporting Internet of remote things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(1): 113-123.
- [3] Satellite machine-to-machine (M2M) services—global strategic business report[R]. Global Industry Analysis Incorporated, 2012.
- [4] 沈俊, 高卫斌, 张更新. 低轨卫星物联网的发展背景、业务特点和技术挑战[J]. 电信科学, 2019, 35(5): 113-119.  
SHEN J, GAO W B, ZHANG G X. Developing background, service characteristics and challenges of LEO IoT[J]. Telecommunications Science, 2019, 35(5): 113-119.
- [5] RUIZ 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.
- [6] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. Datagram routing algorithm for LEO satellite networks[C]//IEEE INFOCOM. 2000: 500-508.
- [7] EKICI E, AKYILDIZ I F, BENDER M D. A distributed routing algorithm for datagram traffic in LEO satellite networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2001, 9(2): 137-147.
- [8] LI X, LI G, ZHANG S. Routing space Internet based on Dijkstra's algorithm[C]//International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing. 2010: 118-121.
- [9] MOHORCIC M, SVIGELJ A, KANDUS G, et al. Performance evaluation of adaptive routing algorithms in packet-switched intersatellite link networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2002, 20(2): 97-120.
- [10] MOHORCIC M, WERNER M, SVIGELJ A, et al. Alternate link routing for traffic engineering in packet-oriented ISL networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(5): 463-480.
- [11] MOHORCIC M, SVIGELJ A, KANDUS G. Traffic class dependent routing in ISL networks[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, 40(4): 1160-1172.
- [12] BAI J J, LU X C, LU Z X, et al. Compact explicit multi-path routing for LEO satellite networks[C]//High Performance Switching and Routing. 2005: 386-390.
- [13] KARAPANTAZIS S, PAPAPETROU E, PAVLIDOU F N. On-demand routing in LEO satellite systems[C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2007: 26-31.
- [14] WU Z F, HU G Y, JIN F L, et al. Agent-based dynamic routing in the packet-switched LEO satellite networks[C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP). 2015: 1-6.
- [15] TALEB T, MASHIMO D, JAMALIPOUR A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking,

2009, 17(1): 281-293.

- [16] KORCAK O, ALAGOZ F, JAMALIPOUR A. Priority-based adaptive routing in N GEO satellite networks[J]. International Journal of Communications Systems, 2007, 20(3): 313-333.
- [17] SONG G, CHAO M, YANG B, 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.
- [18] LU Y, SUN F C, ZHAO Y J. Virtual topology for LEO satellite networks based on earth-fixed footprint mode[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(2): 357-360.
- [19] YANG Y, XU M W, WANG D, et al. Towards energy-efficient routing in satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3869-3886.
- [20] LIU Z L, LI J S, WANG Y R, et al. HGL: a hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of things through satellite networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2017, 13(3): 1-16.

#### [作者简介]



王卫东（1967-），男，内蒙古包头人，博士，北京邮电大学教授、博士生导师，主要研究方向为卫星通信、移动通信、物联网等。



王程（1992-），男，黑龙江哈尔滨人，博士，北京邮电大学讲师，主要研究方向为卫星通信、智能路由、物联网等。



王慧文（1995-），男，黑龙江鸡西人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为卫星路由、网络编程等。



徐玼（1995-），女，江苏宜兴人，北京邮电大学硕士生，主要研究方向为卫星通信、Linux 路由实现等。