

# 链路状态感知的低轨卫星网络路由机制

刘 洵, 谢金森, 陈双武

(中国科学技术大学, 合肥 230021)

**摘要:** 低轨卫星的空间组网能够突破地形限制, 实现全天候、高带宽、低时延、广覆盖的数据通信, 弥补地面通信系统的不足, 使通信服务全球化成为可能。但是, 卫星节点的快速移动和能量受限使得空间链路面临高动态、不可靠、间歇性等问题。同时接入用户的分布不均容易导致卫星网络出现重载节点和局部拥塞的情况, 这对空间组网和数据传输提出了新的挑战。传统的静态卫星组网模式可靠性差, 可伸缩性低, 难以适应空间动态组网的需求。针对低轨卫星网络拓扑变化快的特点, 提出链路状态感知的路由机制, 在降低卫星能耗的同时减轻网络的局部拥塞, 使用树莓派搭建半实物仿真平台, 并在该平台上进行实验, 验证了该机制的有效性。

**关键词:** 卫星网络; 拥塞控制; 能量控制; 路由算法

中图分类号: TN914

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2020) 02-0033-08

## Link Quality Aware Routing Scheme in LEO Satellite Network

LIU Xun, XIE Jinsen, CHEN Shuangwu

(University of Science and Technology of China, Hefei 230021, China)

**Abstract:** The low earth orbit (LEO) satellite network has emerged as a promising approach for global data communication thanks to its global seamless coverage, low latency and high bandwidth, which complements the existing terrestrial network. However, there are still many problems such as the high dynamic topology, intermittent inter-satellite link, unreliability, due to the high mobility and limited energy of the satellite. Meanwhile, the non-uniform distribution of the end users may lead to the unbalanced load and link congestion. These problems challenge the data transmission in LEO satellite network. The traditional static routing scheme is unreliable and inflexible to meet future needs for global broadband data access and mobile communication. In this paper, we proposed a link quality aware routing scheme to address the inherent dynamics of LEO satellite network, by jointly considering the link congestion and the energy consumption of satellites. We also conducted an experiment to validate our scheme by simulating multiple LEO satellites with several Raspberry pis.

**Key words:** Satellite networks; Congestion control; Energy control; Routing scheme

### 0 引言

近年来, 随着通信技术的成熟与发展, 卫星网络逐渐受到业界的关注。卫星网络利用卫星作为中继节点转发数据, 在地面站之间进行通信。

与地面网络相比, 卫星网络具有全天候、高带宽、覆盖范围广、不受地形限制等优点。高效的卫星网络路由方案对提高卫星网络传输的时效性和可靠性有着重要的意义。与其他类型的卫星网络相比, 低轨卫星网络既具有传输损耗小、通信延迟

收稿日期: 2019-09-06; 修订日期: 2019-10-20

作者简介: 刘洵 (1997-), 男, 硕士在读, 主要研究方向为计算机网络。E-mail: abliuxun@mail.ustc.edu.cn

低、功耗低等优点,也存在拓扑变化快、卫星节点的计算能力和功率受限和易出现拥塞等特点。因此,设计高效的低轨卫星网络路由机制具有一定的挑战性。

现有研究大多关注卫星网络拓扑结构的动态变化,提出了基于系统周期分割思想和覆盖区域分割思想,将卫星网络结构由动态转化为静态,再在静态结构下设计协议进行路由的方法。其中系统周期分割思想根据卫星网络的周期性,将卫星系统周期划分为多个时间片<sup>[1]</sup>,只要时间片足够小,就可看作卫星网络拓扑结构在同一时间片内是不变的。于是卫星网络就被视为周期性重复的一系列拓扑快照<sup>[2-3]</sup>,卫星网络路由计算也就转化成了多个静态虚拟拓扑下的路由计算问题。基于系统周期分割思想的卫星网络,卫星不需要实时计算,协议开销较小。但是系统周期分割思想需要大量的空间存储拓扑快照<sup>[4]</sup>,并且对流量变化、链路拥塞及故障等实时情况的适应性较差<sup>[5-6]</sup>。覆盖区域划分思想将地球表面规则地划分为不同的区域,给每个节点赋予不同的固定逻辑地址<sup>[1]</sup>。在覆盖区域划分思想下,逻辑节点的位置固定且排列规则,当前很多研究工作将集中控制与覆盖区域思想相结合,实现流量传输的最优控制<sup>[7]</sup>。但是覆盖区域分割思想需要卫星拓扑结构非常规则,一旦某个卫星节点出现故障,网络拓扑规则性被破坏,就会导致卫星网络性能大打折扣<sup>[8]</sup>。另外,在覆盖区域分割思想下,卫星节点需要实时进行路由计算,对卫星星上处理能力要求高<sup>[9]</sup>。

针对传统卫星网络路由机制存在可扩展性低,对星上处理能力要求高等缺点,本文提出链路状态感知的低轨卫星路由机制。该机制可以解决卫星网络易出现拥塞的问题,同时兼顾低轨卫星能量和计算能力的限制,并具备较高的可拓展性。

## 1 机制原理

### 1.1 系统模型

考虑卫星网络中存在  $M$  个卫星节点,表示为  $M = \{1, 2, \dots, M\}$ 。其中,节点  $i$  剩余能量为  $B_i$ ,用  $B = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$  表示卫星节点剩余能量的集合;卫星节点  $i$  的接收队列长度用  $L_i$  表示,它反映了节点  $i$  处链路的拥塞程度。

感知驱动路由机制由路由学习和路由决策两个部分组成。路由学习部分通过 SRLM (Satellite

Routing Learning Message, 卫星路由学习报文) 的广播实现,其中源节点的信息包括卫星 ID、剩余能量、接收队列长度等。在感知驱动路由机制中,每个卫星节点都会周期性地广播 SRLM 报文,并转发来自其他节点的 SRLM 报文。SRLM 报文的广播使得节点信息在全网范围内传输。节点接收到新的来自其他节点的 SRLM 报文时,根据报文内容更新本地路由表。路由决策是指节点依据当前的路由信息对数据包进行路由。

#### 1.1.1 路由学习

路由学习过程指节点通过 SRLM 报文感知链路质量、邻居节点的接收队列长度和剩余能量信息的过程。其中,邻居节点的接收队列长度和剩余能量可通过邻居节点生成的学习包获得。而链路质量 ( $TQ$ ) 则通过 SRLM 报文的丢包率计算得到,下面主要介绍  $TQ$  值的计算过程。

##### (1) 单跳 $TQ$ 值的计算

为了计算  $TQ$  值,先引入  $RQ$  和  $EQ$  两个变量。假设中  $A$  和  $B$  是网络中的一对邻居节点。其中,  $RQ_{AB}$  表示过去  $T$  时间段内节点  $A$  收到上一跳节点和源节点都为  $B$  的 SRLM 报文的数量 (图 1);  $EQ_{AB}$  表示过去  $T$  时间段内节点  $A$  上一跳为  $B$  且上上一跳为  $A$  本身的 SRLM 报文的数量 (图 2)。定义  $TQ_{AB} = EQ_{AB} / RQ_{AB}$ , 它反映了节点  $A$  至节点  $B$  的链路质量的好坏 (图 3)。为方便表示,将  $RQ_{AB}$  简写为  $RQ$ , 将  $EQ_{AB}$  简写为  $EQ$ , 将  $TQ_{AB}$  简写为  $TQ$ 。



图 1  $RQ$  值的计算

Fig. 1 Calculation of  $RQ$



图 2  $EQ$  值的计算

Fig. 2 Calculation of  $EQ$



图 3 单跳  $TQ$  值的计算

Fig. 3 Calculation of single-hop  $TQ$

假设由节点  $A$  至节点  $B$  的链路丢包率为  $p$ ，由节点  $B$  至节点  $A$  的链路丢包率为  $q$ ，其中  $p, q \in [0, 1]$ 。 $A, B$  节点在之前  $T$  时段内发送的学习包数量为  $N$ ，则通过式 (1) 和式 (2) 可以得到  $RQ$  和  $EQ$  的数学期望

$$E[RQ] = (1 - q)N \quad (1)$$

$$E[EQ] = (1 - p)(1 - q)N \quad (2)$$

$$E[TQ] = \frac{(1 - q)N}{(1 - p)(1 - q)N} = 1 - p \quad (3)$$

结合图 1 和图 2 可以发现，节点  $A$  至节点  $B$  的传输链路质量可以表示为  $EQ/RQ$ ，即  $TQ$  的定义。注意到  $RQ$  和  $EQ$  相互独立（因为它们表示的是由不同节点生成的 SRLM 报文），故将式 (2) 除以式 (1) 可以得到  $TQ$  数学期望式 (3)。由式 (3) 可以发现， $TQ$  的数学期望与  $p$  成反相关，且两者之和为 1。这符合定义中  $TQ$  表示由  $A$  向  $B$  的链路中数据包传输成功的概率的描述。因此，可以写出  $TQ$  的计算公式

$$TQ = \min\{EQ/RQ, 1\} \quad (4)$$

式 (4) 表示  $TQ$  为  $EQ/RQ$  和 1 的最小值。由于  $TQ$  表示节点  $A$  到  $B$  数据包传输的成功率，所以  $TQ \in [0, 1]$ 。而在实际计算中由于  $RQ$  和  $EQ$  相互独立，可能出现某时刻  $RQ$  比  $EQ$  大的情况，因此在式 (4) 中加上了  $TQ$  值不大于 1 的限制条件。

### (2) 路径 $TQ$ 值的计算

在 1.1.1 (1) 节给出了单跳链路的  $TQ$  值计算公式，卫星节点进行路径决策时需要从本节点到目的节点之间的路径  $TQ$  值。设数据包从节点  $A_0$  发送至节点  $A_n$ ，按顺序经过节点  $A_0, A_1, \dots, A_n$ 。由于各链路质量相互独立，所以路径  $TQ$  可表示为各跳链路  $TQ$  的乘积。

$$TQ_{0,n} = \prod_{i=1}^n TQ_{i-1,i} \quad (5)$$

在感知驱动路由机制中，SRLM 报文包含从当前节点到源节点的  $TQ$  值，SRLM 报文在每次转发后都会对该值进行更新。如图 4 所示，各跳链路质量为  $TQ_{CB} = 0.9$ ， $TQ_{BA} = 0.8$ 。当 SRLM 报文从节点  $A$  到达节点  $B$  时，更新  $TQ$  值为 0.9；由节点  $B$  转发到达节点  $C$  时，更新  $TQ_{CA} = TQ_{CB} \times TQ_{BA} = 0.72$ 。

### 1.1.2 路由决策

在保证数据传输质量的情况下，为了减少卫星节点能量消耗并改善卫星网络局部拥塞的情况，链路状态感知路由机制通过对链路质量、拥塞情

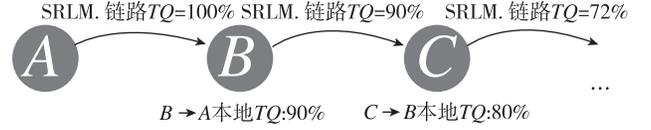


图 4 路径  $TQ$  值的计算

Fig. 4 Calculation of path  $TQ$

况以及剩余能量进行权衡选择下一跳节点。当从卫星节点  $m$  发送数据包至卫星节点  $n$  时，卫星节点通过式 (6)、式 (7) 进行路由决策

$$\widehat{TQ}(k) = \alpha \frac{TQ_{mk} TQ_{kn}}{TQ_{\max}} - \beta \frac{L_{mk}}{L_{\max}} + \gamma \frac{B_{mk}}{B_{\max}} \quad (6)$$

$$k \in n_m, \alpha, \beta, \gamma \geq 0$$

$$n_{\text{best}} = \arg \max_k \widehat{TQ}(k), k \in n_m \quad (7)$$

式 (6) 左侧  $\widehat{TQ}(k)$  是将链路质量、拥塞情况和剩余能量权衡之后得到的一个值，其值越大，选择邻居节点  $k$  作为下一跳节点的效果越好。式 (6) 右侧  $\alpha, \beta$  和  $\gamma$  分别为链路质量、拥塞程度和节点能量的权重因子。权重因子代表路由决策对于对应项的重视程度，例如若  $\alpha$  相比  $\beta$  和  $\gamma$  较大，说明路由决策更重视链路质量。式 (6) 等式右侧第 1 项是对链路质量的归一化，分子  $TQ_{mk} TQ_{kn}$  代表经过邻居节点  $k$  的路径的最优  $TQ$  值；第 2 项和第 3 项分别是对邻居节点接收队列长度和节点剩余能量的归一化。式 (6) 可以解释为：卫星节点在对数据包进行路由确定下一跳时不仅考虑路径  $TQ$  值确保较高的传输质量，同时也要考虑下一跳节点的接收队列长度以及剩余能量，避免拥塞出现并防止节点能量消耗过快。使用式 (6) 计算各邻居节点的  $\widehat{TQ}$  后，卫星节点通过式 (7) 选择  $\widehat{TQ}$  最大的邻居节点作为最优下一跳进行数据传输。

## 2 系统实现

感知驱动路由机制的实现由数据包转发模块和路由学习模块组成，路由学习模块通过 SRLM 包的广播感知网络状态并更新路由表，数据包转发模块通过查找路由表确定下一跳节点。其中数据包转发流程较为简单，根据路由学习模块更新的路由表将数据包发送至对应的下一跳节点。本节主要介绍路由学习模块。

路由学习模块通过广播 SRLM 包感知网络信息，SRLM 包中包含了有关源节点和数据包自身的信息，在正式阐述路由学习模块前，先介绍几个重要的量：1) TTL (Time To Live)：表示 SR-

LM 报文的剩余存活时间，在模型中定义为剩余可转发次数。当 SRLM 报文生成时，TTL 被赋值为 TTL\_MAX，即设定的最大转发次数，此后每经过一次转发，TTL 的值减 1。当 TTL 等于 0 时，该 SRLM 包会被丢弃。设定最大转发次数是为了防止网络中 SRLM 包数量过多，从而导致冗余；  
 2) 源节点 ID: 源节点 ID 表示生成该 SRLM 包的卫星节点 ID；  
 3) 路径 TQ 值: 从源节点至当前所在卫星节点的路径 TQ 值。

路由学习模块分为 SRLM 包的发送和接收两个部分，发送部分较为简单，节点周期性的生成 SRLM 包并广播。此处重点介绍 SRLM 包的接收处理部分。路由学习流程如图 5 所示，首先，检查源节点是否为本节点且 TTL=TTL\_MAX-2，若是则说明这是本节点产生并经邻居节点回传的 SR-

LM 报文，则根据报文信息更新本节点单跳 EQ 值后丢弃该 SRLM 报文。其次，检查上一跳节点是否为源节点且 TTL=TTL\_MAX-1，若是则说明这是由源节点直接传过来的 SRLM 报文，则根据报文信息更新本节点单跳 EQ 值、TQ 值、L 值和 B 值。然后，根据 SRLM 报文信息更新路径 TQ 值并根据式 (7) 计算  $\widehat{TQ}$  值，若当前  $\widehat{TQ}$  值优于对应源节点的最优路径的  $\widehat{TQ}$  值，且 TQ 值高于阈值 TQ\_MIN，则更新最优  $\widehat{TQ}$  值及对应的最优路由下一跳，其中确保 TQ 高于 TQ\_MIN 是确保该路径可以到达目的节点。若该 SRLM 报文来自于最优 TQ 路由，则广播转发该 SRLM 报文给所有邻居节点，否则丢弃该 SRLM 报文，这是因为转发 SRLM 报文中的路径 TQ 值必须是最优的。

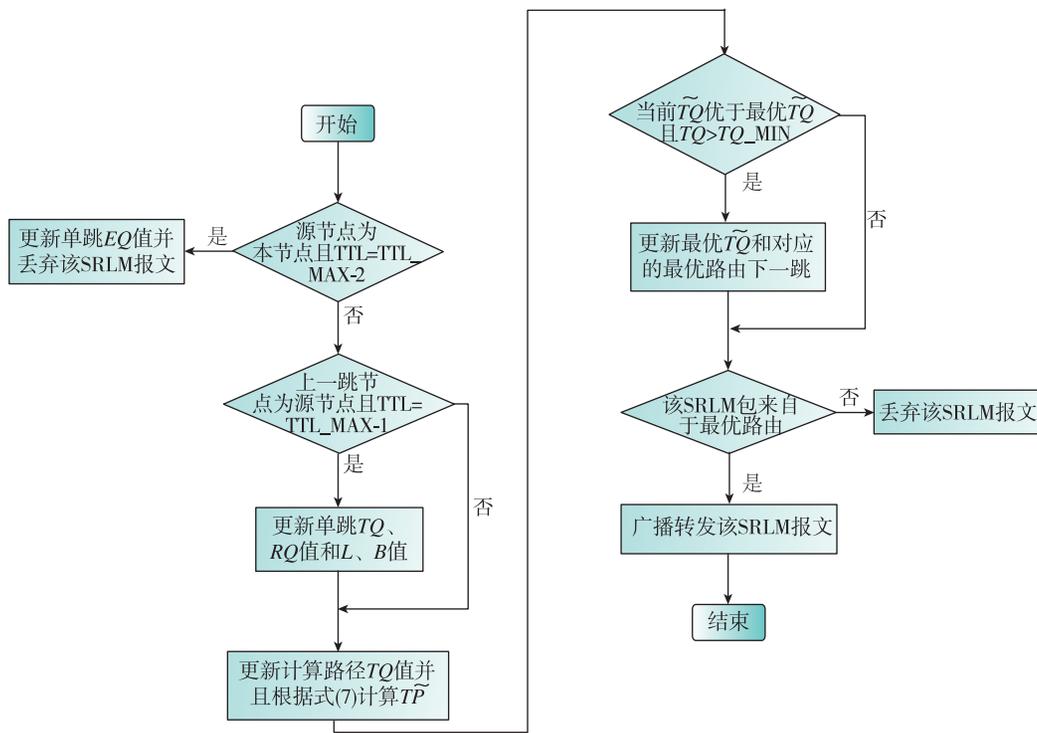


图 5 SRLM 报文处理流程

Fig. 5 Process of SRLM

### 3 实验验证

#### 3.1 半实物仿真平台搭建

本文实验由两个部分组成，第一部分是搭建半实物仿真平台，第二部分是在该仿真平台上验证链路状态感知路由机制的有效性。其中，半实

物仿真平台分为控制器和树莓派节点两个部分，见图 6。PC 作为控制器，下发控制报文至各树莓派节点，模拟真实环境中丢包率等参数，树莓派作为卫星节点，根据控制器的指令执行相应的动作，并定时上传网络信息（链路状态等）至控制器。

### 3.2 实验参数设计

仿真实验的目的是验证感知驱动路由机制的可行性与有效性。本文首先利用仿真平台搭建一个拓扑简单的网络。如图 7 所示, 节点  $M$  为源节点, 节点  $E$  为目的节点,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为中继节点。在该网络中, 节点  $M$  可以通过 3 条路径将数据包发送至  $N$ 。为了表达方便, 本文使用  $XAY$  形式表达路径, 其中  $X$  是源节点,  $A$  是中继节点,  $Y$  是目的节点。3 条路径的  $TQ$  值见图 7, 链路  $MAN$  质量最好, 链路  $MBN$  其次,  $MCN$  最差。



图 6 半实物仿真平台

Fig. 6 Hardware platform for simulation

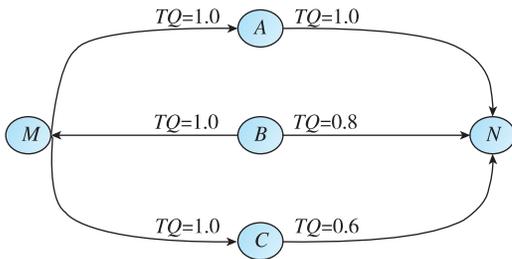


图 7 仿真实验网络拓扑

Fig. 7 Network topology of the experiment

仿真节点的能量设置如下: 假设源节点  $M$  和目的节点  $N$  具有无穷多的能量, 这两个节点的能量储备并不影响实验结果。中继节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别具有 100000、200000、200000 单位能量, 其中每单位能量可以发送 2048bytes 的数据。为保证卫星其余功能的正常执行, 节点需预留一定能量, 因此实验中设计当节点能量低于 20000 单位时就不再具备数据传输功能。另外, 在实验中, 设置要传输的数据大小为 16MB, 设置源节点  $M$  和中继节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的发送速率为 600kbps, 设置中

节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的接收速率为 200kbps, 目的节点  $N$  的接收速率为 3Mbps。以上关于发送速率和接收速率的设置是为了模拟链路拥塞: 若数据仅仅通过一条或两条路径传输, 源节点和中继节点之间的链路就会出现拥塞, 只有 3 条链路都被利用, 源节点和中继节点之间的链路才不会成为瓶颈。设置目的节点  $N$  接收速率为 5Mbps 是为了保证中继节点和目的节点之间的链路通畅。

注意  $MTQ$  的计算公式 (6), 其中右式有 3 个权重参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ , 在仿真实验中只需要测量其中的两个量。由图 6 可知, 已经固定了链路质量, 所以在仿真实验中  $\alpha$  是固定的。于是, 将式 (6) 改写为式 (8)。实验中分别改变参数  $\beta$  和  $\gamma$ , 观察并分析它们对卫星网络的影响。

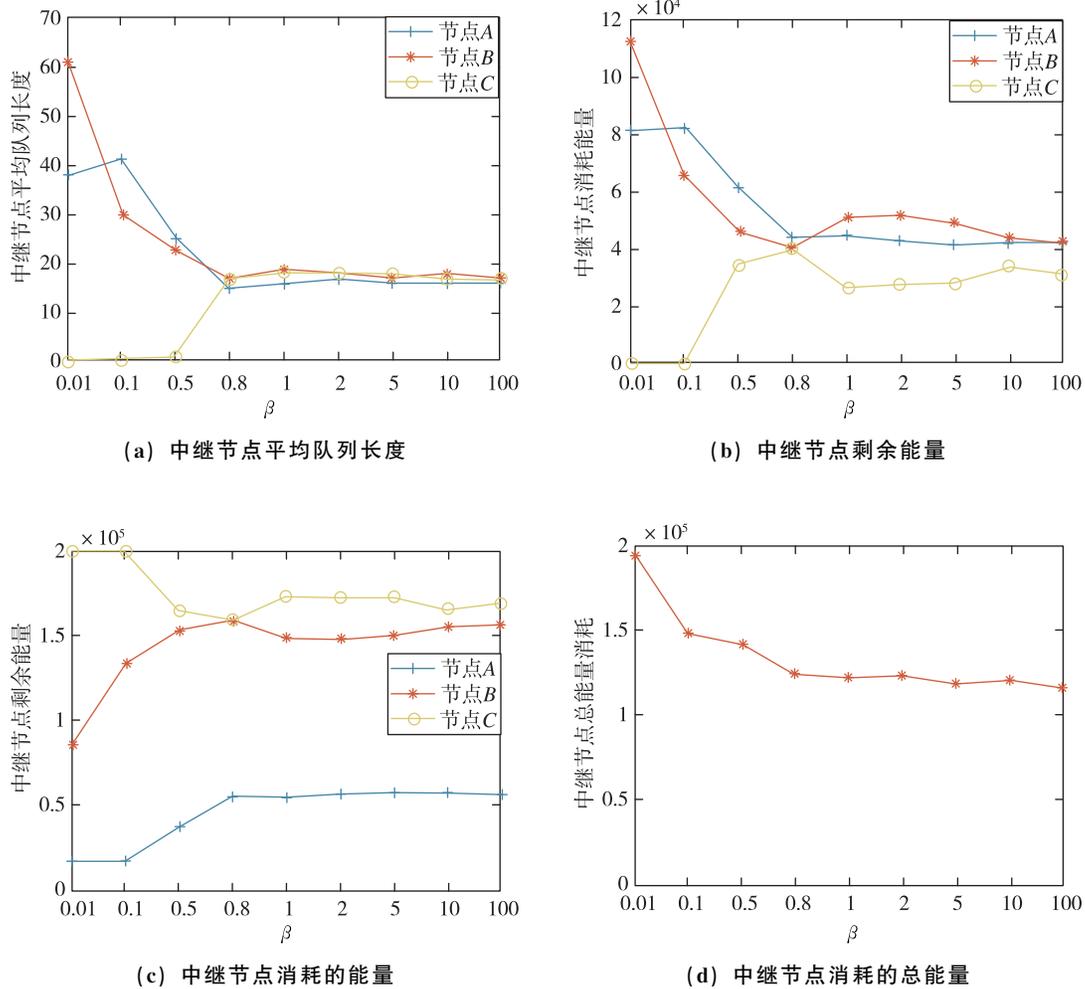
$$\widehat{TQ}(k) = \frac{TQ_{mk} TQ_{kn}}{TQ_{\max}} - \beta \frac{L_{mk}}{L_{\max}} + \gamma \frac{B_{mk}}{B_{\max}} \quad (8)$$

$$k \in n_m, \alpha, \beta, \gamma \geq 0$$

### 3.3 实验结果分析

#### 3.3.1 对 $\beta$ 的分析

通过固定  $\gamma = 0.01$ , 改变  $\beta$  的值并观察网络状态, 从而得到图 8 的实验结果, 这相当于忽略卫星节点剩余能量对于路由决策的影响。随着  $\beta$  值的增大, 中继节点  $A$ 、 $B$ 、 $C$  的接收队列长度逐渐趋于相同, 如图 8 (a) 所示。其原因是当链路拥塞情况所占的比重较大时, 源节点的路由决策趋于使各邻居节点接收队列长度 ( $L$ ) 一致, 导致链路的使用时间趋于相同, 如图 8 (c) 所示, 各节点消耗的能量趋于一致。由图 8 (b) 可以看出, 由于忽略了节点剩余能量的影响, 节点  $A$  的剩余能量一直维持在较低水平。另外, 随着  $\beta$  的增加, 中继节点总消耗的能量逐渐降低, 最后维持在一个较低的水平。 $\beta$  较高时 (如  $\beta = 10$ ) 和只考虑  $TQ$  值 ( $\beta = 0.01$ ) 的情况相比, 总的能量消耗大约降低了 35%, 如图 8 (d) 所示。这是由于在  $\beta$  较低的时候, 数据包的传输仅仅利用了链路质量较好的 1~2 条链路, 造成了链路拥塞。发生拥塞时节点数据包后重传消耗了大量的能量, 这使得能量消耗较大。在  $\beta$  较高时, 由于对 3 条链路的均衡使用 (3 个中间节点的接收队列长度相近), 基本没有拥塞情况的出现, 减少了数据包的重传次数, 使总能量消耗降低。

图8 固定  $\gamma$ , 改变  $\beta$  的实验结果Fig. 8 The results of experiments if fix  $\gamma$  and change  $\beta$ 

### 3.3.2 对 $\gamma$ 的分析

通过固定  $\beta=0.01$ , 改变  $\gamma$  的值观察网络状态得到图 9 的实验结果, 这相当于忽略卫星节点剩余能量对路由决策的影响。 $\gamma$  代表了卫星节点剩余能量在路由决策中的权重。由图 9 (a) 可以看出, 随着  $\gamma$  的增大, 源节点 M 倾向于使用那些中继节点能量更为充足的链路, 当  $\gamma$  较大时, 数据甚至没有通过链路 MAN 传输, 如图 9 (c) 所示。这种倾向也可以通过图 9 (b) 说明, 随着  $\gamma$  增大, 中继节点的剩余能量逐渐趋于一致。由图 8 (d) 可以看出, 随着  $\gamma$  增大, 数据传输消耗的总能量同样随之减少。这是由于在  $\gamma$  较大时, 源节点倾向于交替使用 MBN、MCN 两条能量较为充裕链路。图 9 (d) 相对于图 8 (d) 传输数据要花费更多能量也可以根据链路的使用时间解释: 在图 9 (d) 中  $\gamma$  较大时, 只有 MBN、MCN 两条链路被使用,

而在图 8 (d) 中  $\beta$  较大时, 3 条链路均被使用。

### 3.3.3 $\beta$ 和 $\gamma$ 对传输速率的影响

通过图 8 (a) 和图 9 (a) 观察到, 随着  $\beta$  和  $\gamma$  的增大, 链路中的数据传输时间逐渐下降, 最后趋于一个稳定状态。下降部分可以用之前对  $\gamma$  的分析部分中的链路的使用时间解释: 在初始阶段,  $\beta$ 、 $\gamma$  非常小, 此时源节点 M 只使用链路质量较高的链路 MAN 传输数据。由于源节点 M 的发送速率超过中间节点 A 的接收速率, 所以链路中发生拥塞, 数据传输速率较低。随着  $\beta$ 、 $\gamma$  的增加, 源节点 M 不再单一选择链路 MAN 传输数据, 而是通过多条链路传输, 拥塞程度降低, 传输速率变大。 $\beta$ 、 $\gamma$  的增加都会使得传输速率变大, 但是两者原理不同。前者倾向于使 3 个中间节点的接收队列长度接近, 后者则使得 3 个中间节点的剩余能量接近。

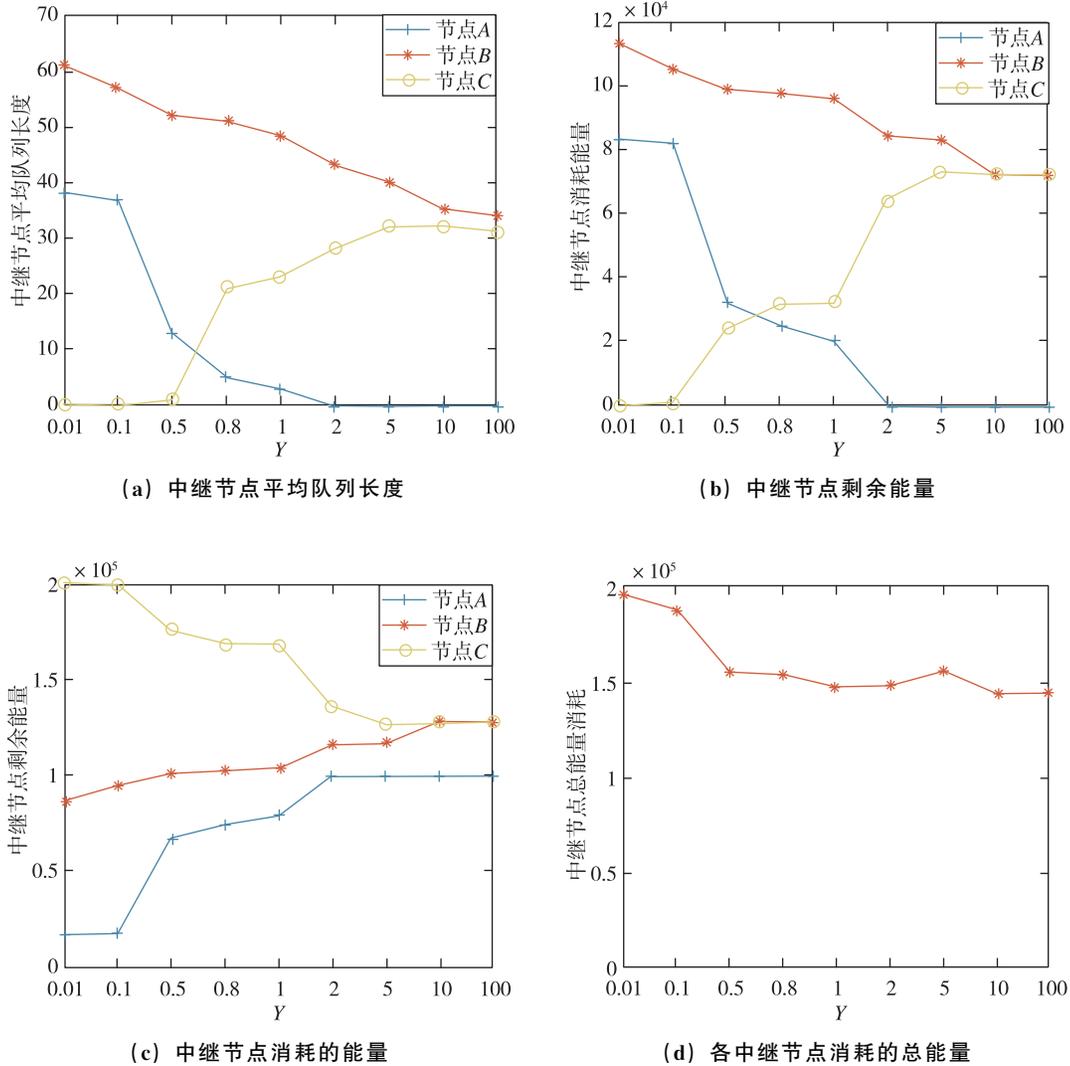


图 9 固定  $\beta$ , 改变  $\gamma$  的实验结果

Fig. 9 The results of experiments if fix  $\gamma$  and change  $\beta$

另外, 还可以对比图 10 中两条曲线观察到在传输时间的稳定部分,  $\beta$  较大且  $\gamma = 0.01$  的传输时间比  $\gamma$  较大且  $\beta = 0.01$  的传输时间短很多。原因是前者使用 3 条链路传输数据, 而后者只是用了 2 条, 所以前者速率要比后者快。并且可以从图 8 (d)、图 9 (d) 中发现, 后者的能量消耗比前者大, 这是后者没有利用链路质量较好的 MAN 路径, 导致丢包率较高, 这也是传输时间更长的原因。

### 3.4 实验总结

在实验中, 通过改变权重参数  $\beta$  和  $\gamma$  的值, 观察其对传输速率以及网络节点状态的影响。发现随着  $\beta$  的增加, 节点在路由决策时倾向于使得各有效传输链路上邻居节点的接收队列长度相同。而在  $\gamma$  增大时, 节点在路由决策时倾向于使得各有效

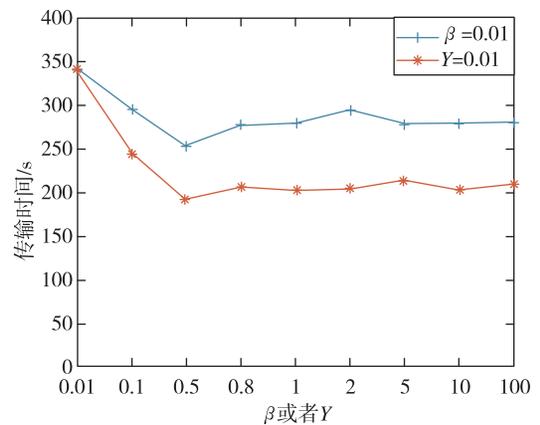


图 10 传输时间随  $\beta$  和  $\gamma$  的变化

Fig. 10 The variation of transmission time over  $\beta$  and  $\gamma$

传输链路上的邻居节点剩余能量相同。这验证了感知驱动路由机制的可行性与有效性, 如果希望

减少网络中拥塞的出现, 可以选取较大的 $\beta$ 值, 若更重视对卫星能量的控制, 可以选取较大的 $\gamma$ 值。

#### 4 结论

本文提出了链路状态感知的卫星路由机制, 卫星节点通过感知链路的传输质量、邻居节点的队列长度和能量进行路由决策。与传统卫星路由机制相比, 路由学习使得链路状态感知的卫星路由机制具有更高的可扩展性。本文使用树莓派搭建半实物仿真平台, 并在平台上进行实验。实验结果表明, 链路状态感知的路由机制可以有效地降低拥塞程度并控制卫星节点的能量, 防止节点能量过低, 延长卫星网络的使用时间。

#### 参考文献

- [1] 王丹丹. 空间因特网的路由算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2010.
- [2] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas In Communications, 1997, 15(8): 1636-1648.
- [3] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. FSA-based link assignment and routing in low-earth orbit satellite networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1998, 47(3): 1037-1048.
- [4] Huang J, Su Y, Huang L, et al. An optimized snapshot division strategy for satellite network in GNSS [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2406-2409.
- [5] Zhang W, Dong Q. A satellite network fault detection method [C]. 2010 Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, IEEE, 2010: 548-551.
- [6] Li S, Tang F. Load-balanced cooperative transmission in MEO-LEO satellite network [C]. 2018 IEEE 32<sup>nd</sup> International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA), IEEE, 2018: 564-571.
- [7] Li T, Zhou H, Luo H, et al. Using SDN and NFV to implement satellite communication networks [C]. 2016 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA), IEEE, 2016: 131-134.
- [8] Chang H S, Kim B W, Lee C G, et al. Topological design and routing for low-earth orbit satellite networks [C]. Proceedings of GLOBECOM'95, IEEE, 1995, 1: 529-535.
- [9] Guo A, Zhao C, Xu F, et al. LEO satellite routing algorithm in software defined space terrestrial integrated network [C]. 2017 17<sup>th</sup> International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), IEEE, 2017: 1-6.
- [10] 路遥. 无线多跳网络信息交换协议的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.

引用格式: 刘洵, 谢金森, 陈双武. 链路状态感知的低轨卫星网络路由机制[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(2): 33-40.

Citation: Liu X, Xie J S, Chen S W. Link quality aware routing scheme in LEO satellite network [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(2): 33-40.