

# 一种负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制

刘东东, 李勇, 徐栋, 阮持光, 鲁亚凯, 刘江兵

(重庆邮电大学 移动通信技术重点实验室, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对低功耗有损网络路由协议(Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks, RPL)中由于负载不均衡导致节点能耗不均衡的问题, 提出一种负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制(Load Balance-based Multi-Path Data Packet Transmission Mechanism for RPL, LB-RPL)。该机制包含三种策略: 首先, 在网络拓扑构建过程中依据数据传输代价选出每个节点的最优多父节点集; 其次, 提出一种数据流量分配度量标准, 其有效地结合了无线链路质量、节点剩余能量、节点缓存占用率以及中继节点的子节点数量等多种度量; 最后, 基于流量分配度量标准, 提出一种能够最大化均衡网络负载的流量分配策略, 以获得最优数据传输方案。理论分析和仿真结果表明, LB-RPL 能够最大化地实现负载均衡, 有效地均衡了节点能耗、延长了网络生存时间和提高了路由可靠性。

**关键词:** 低功耗有损网络路由协议; 负载均衡; 多路径; 度量标准; 流量分配

## A load balance-based multi-path data transmission mechanism for RPL

LIU Dongdong, LI Yong, XU Dong, RUAN Chiguang, LU Yakai, LIU Jiangbing

(Chongqing Key Lab of Mobile Communication Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**【Abstract】** To deal with the problems that the routing protocol for low power and lossy networks(RPL) makes the energy consumption of node unbalanced on account of the load unbalanced, a load balance-based multi-path data packet transmission mechanism for RPL(LB-RPL) was proposed. This mechanism contains three strategies. Firstly, it selects the optimal multiple parent set for each node according to the cost of data packet transmission in the process of network topology construction. Secondly, it proposes a metric for traffic flow distribution, which combine with the wireless link quality, the residual energy of a node, the buffer occupancy rate and the number of sub-nodes of the relay node effectively. Finally, based on the metric, a traffic allocation strategy which can make the load balanced maximally is proposed to obtain the optimal data transmission scheme. Theoretical analysis and simulation results show that LB-RPL can make the load balanced maximally, balance node energy consumption, prolong network lifetime and improves routing reliability effectively.

**【Key words】** routing protocol for low power and lossy networks(RPL); load balance; multi-path; routing metric; traffic allocation

## 0 概述

近年来, 随着物联网技术的快速发展, 低功耗有损网络(Low Power and Lossy Networks, LLN)<sup>[1]</sup>成为备受人们关注的研究热点。LLN 具有广泛的应用场景, 譬如军事侦查、环境监测、工业控制、智能家居、医疗保健、城市交通和楼宇智能化等领域。LLN 是由大量的无线传感器节点组成, 这些节点的存储能力、处理能力和能量均受限, 且节点之间的无线链路具有有损特性和不稳定性, 因此基于 LLN 的上述特征及其广泛的应用前景, 国际互联网工程

任务组(the Internet Engineering Task Force, IETF)提出了一种基于 IPv6 的低功耗有损网络路由协议(IPv6 Routing Protocol for LLN, RPL)<sup>[2][3][4]</sup>。

RPL 路由协议是一种单路径路由协议<sup>[5]</sup>, 节点只能选择备选父节点中的一个最优父节点进行数据的转发, 这将导致构建的路径过于单一, 在传输数据的过程中不能有效地均衡网络负载, 从而不利于数据的传输且严重影响网络各方面的性能。当路径遭遇故障后, RPL 使用本地修复算法进行修复, 但过程需要重新运行程序检测和建立路径, 效率不高, 能源损失严重<sup>[6]</sup>。

**基金项目:** 长江学者和创新团队发展计划资金项目 (IRT\_16R72); 重庆市科委项目(CSTC2012jjA40044, cstc2013yykfA40010);

**作者简介:** 刘东东(1990-), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 低功耗有损网络路由协议; 李勇(1970-), 男, 重庆人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 无线自组织网络路由; 徐栋(1991-), 男, 湖北人, 硕士研究生, 主要研究方向: 预编码与干扰对齐技术; 阮持光(1992-), 男, 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 蜂窝网络下的 D2D 用户的资源分配; 鲁亚凯(1990-), 男, 河南人, 硕士研究生, 主要研究方向: OTA 双通道升级; 刘江兵(1989-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线自组织网络路由。

Email:617640557@qq.com

为了应对单路径路由策略的局限性,研究人员提出了多路径路由策略<sup>[7]</sup>。多路径路由策略允许节点同时选择多个父节点将数据并行传输,提高了网络的可靠性,并减少了拥塞。如何设计合理的多路径数据转发方案使得数据在各个路径上进行有效地传输是一个需要解决的问题。

本文提出了一种多路径的数据转发方案,此方案基于多度量选择最优父节点集,建立了多度量的流量分配标准,根据路由权重将流量进行均衡的分配,可以有效地实现负载均衡,从而可以有效地延长网络生命时间,减少端到端时延等。

## 1 相关工作

随着工业界和学术界对 RPL 路由协议的深入研究,目前已取得大量研究成果<sup>[8][9]</sup>。在基于 RPL 路由协议的网络拓扑构建过程中,IETF 提出了两种路由度量标准:传输跳数<sup>[10]</sup>和期望传输次数<sup>[11]</sup>。考虑到上述两种路由度量标准存在的局限性,节点剩余能量<sup>[12]</sup>和节点缓存占用<sup>[13]</sup>等也相继被作为路由度量的选择。

由于单路径数据传输的 RPL 路由协议存在负载均衡的缺陷,多路径数据传输的 RPL 路由协议逐渐引起了人们的关注。Sheng<sup>[14]</sup>等作者提出了基于 RPL 的三种多路径技术,即快速本地修复 FLR,能量负载均衡 ELB 和 ELB-FLR。这项工作可以提高能效和网络寿命,但是并没有提高吞吐量性能。Lodhi 等<sup>[15]</sup>提出了一种临时多路径的 RPL 数据传输机制,主要用于缓解网络拥塞。当中继节点检测到其最优父节点发生网络拥塞后,选择一个备选父节点进行数据分流,从而达到缓解网络拥塞的目的。张宗杰等<sup>[16]</sup>在多路径的基础上提出了一种对数据流量进行按路径权重的并行传输方案,其核心思想为根据链路质量的不同和节点在单位时间内接收到的数据包数量动态的调整链路上的数据流量分配,从而达到均衡网络负载的目的。Iova 等<sup>[17][18]</sup>提出以节点期望寿命作为路由度量标准的多路径 RPL 路由协议,并结合流量分配策略旨在使每个节点的能耗相同,使得每条路径上的瓶颈节点的能耗降低,从而达到延长网络生存时间的目的。朱立才等<sup>[19]</sup>提出了一种能量有效的 RPL 多路径数据分发机制,建立了一种符合实际场景的节点能量消耗模型,根据能量离散程度度量判定网络中节点的能量均衡程度,从

而有效地均衡了网络中节点的能耗。Tang<sup>[20]</sup>等提出了拥塞避免的多路径路由协议 CA-RPL,旨在提高路由的可靠性并减少网络中的延迟。CA-RPL 提出了一种新的路由度量 (DELAY ROOT)。在 CA-RPL 中,节点向已经醒来的父节点发送分组,而不是等待首选父节点被唤醒。CA-RPL 在不同路径上调度数据以避免拥塞并减少网络中的延迟。Wang<sup>[6]</sup>等设计了一个多路径方案来提高容错能力,节点根据生命周期指标 (LCI) 和 Rank<sup>[2]</sup>值从备选父节点中选出最优路由,并且存储一条备用路由。当在链路和邻居节点故障之后选择路径时,可以直接使用备用路径,从而可以有效地提高数据包接收成功率,减少端到端时延等。

然而,上述研究存在以下的不足:(1)如何为源节点选择最优父节点集目前还未深入研究,并且在网络拓扑的构建过程中考虑的度量比较单一,无法有效地实现负载均衡。(2)只是通过降低每条路径上瓶颈节点的能耗,不能有效的实现负载均衡,从而不能有效地提升网络的性能。(3)当拥塞发生后,通过选用备选父节点进行数据分流或选择备用次优路径,只能暂时解决拥塞问题,并且会增加控制包的数量,影响网络性能。(4)流量的分配中,考虑的度量过于单一,没有给出基于多种度量的流量分配标准。

为了解决上述 LLN 中基于 RPL 路由协议的多路径数据传输方案中所存在的不足,本文提出了一种基于负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制(Load Balance-based Multi-path Data Packet Transmission Mechanism for RPL, LB-RPL),并对其性能进行理论分析和数值验证。

## 2 网络模型

为了便于后续的分析 and 论述,本文给出如下几个定义:

**定义 1** 缠绕多路径<sup>[16]</sup>: 如图 1 中网络模型中的中继节点 B,C,F,E 可以被多条路径共享,即一个中继节点不仅可以拥有多个子节点,也可以拥有多个父节点,即路径之间存在重叠部分。

**定义 2** 多父节点集(Multiple Parent Set, MPS): 在网络拓扑的构建过程中符合作为一个节点的备选父节点的集合。如图 1 中,假设源节点 S 的所有备

选父节点为中继节点 A,B,C,则源节点 S 的多父节点集为 A,B,C 组成的集合[A,B,C], [A,C], [A,B], [B,C]。

**定义 3** 最大多父节点集(Maximum Multiple Parent Set, MMPS): 在多父节点集 MPS 中, 符合作为一个节点的备选父节点的所有节点的集合, 即含有的集合元素最多的多父节点集。如图 1 中, 源节点 S 的最大多父节点集为[A,B,C]。

**定义 4** 最优多父节点集(Optimal Multiple Parent Set, OMPS): 表示节点将一个数据包经由各个多父节点集 MPS 成功到根节点的传输代价的最小值所对应的多父节点集。

**定义 5** 路径权重: 表示在网络拓扑构建完成后每一条路径上被分配的数据流量的比例, 其计算公式如式(1)所示。

$$W(l(i, j)) = \frac{\text{metric}(l(i, j))}{\sum_{k=1}^{|OMPS(i)|} \text{metric}(l(i, P_k))} \quad (1)$$

式中  $\text{metric}(l(i, j))$  表示节点  $i$  与节点  $j$  之间的路由度量值,  $l(i, j)$  表示节点  $i$  与其最优多父节点集中的节点  $j$  之间的无线链路,  $l(i, P_k)$  表示节点  $i$  与最优父节点集中节点  $P_k$  之间的无线链路,  $|OMPS(i)|$  表示节点  $i$  的最优多父节点集中的节点个数。

以图 1 所示的网络拓扑为例, 本文从网络的可靠性出发, 在网络拓扑的构建过程中, 根据最优父节点集缠绕多路径, 依据路由权重实现对数据流量的并行传输, 从而最大化地实现网络负载均衡和有效地延长网络的生存时间等。

网络模型中的节点分为三种类型: 源节点、中继节点和根节点。通常, 源节点只负责发送自身产生数据包<sup>[21]</sup>, 而中继节点负责发送自身产生的数据包并转发子节点发送的数据包, 根节点实现数据包的汇聚过程。如图 1 所示, S 为源节点, 矩形虚线框内的所有节点均为中继节点, D 为根节点。

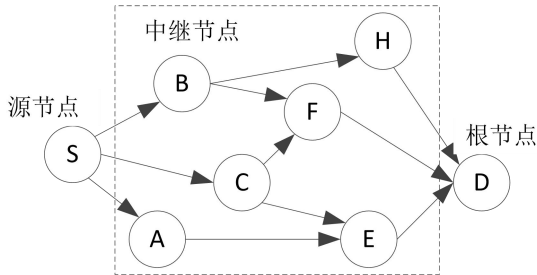


图 1 LB-RPL 网络模型图

### 3 负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制

本文提出的负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制 LB-RPL 包含三种策略: (1)多父节点集的选择过程中, 在考虑期望重传次数的情况下, 又考虑了节点的期望寿命, 从而可以最大延长网络的寿命; 在计算传输代价的过程中, 联合了无线链路质量和因缓存而丢包的概率, 可以有效的控制网络拥塞等, 从而增加数据包接收成功率; 最后, 考虑多种度量情况下, 计算源节点到根节点的传输代价, 选出每个节点的最优多父节点集; (2)建立新的数据流量分配度量标准, 其有效地结合了无线链路质量、节点剩余能量、节点缓存占用率以及中继节点的子节点数量等多种度量, 可以有效地反映各种度量对路由权重的影响, 从而准确地评价各个路径的具体的性能情况, 有助于对数据均衡分配, 从而实现最优的负载均衡; (3)提出一种流量分配度量标准, 根据各个路径权重占总路径权重的比率, 根据比率的大小分发不同数量的数据包, 比重的大小会根据路由拓扑的变化动态的调整, 从而最大化的实现负载均衡, 提升网络的整体性能。

#### 3.1 最优多父节点集的选择

最优多父节点集的选择是指在网络拓扑构建过程中, 分别计算源节点的数据包经由各个多父节点集成功传输到根节点的传输代价。传输代价越小, 则多父节点集的优先级就越高, 将优先级最高的多父节点集作为源节点的最优多父节点集。以节点  $i$  为例, 其最优多父节点集的判定步骤如下:

**步骤 1** 节点  $i$  通过利用其邻居节点周期性广播的面向目的地的有向无循环图信息对象消息 (Destination Oriented Directed Acyclic Graph Information Object, DIO)<sup>[4]</sup> 获得其最大多父节点集中各个备选父节点的期望寿命 (Expected Life Time, ELT)<sup>[17]</sup>, 以备选父节点  $j(j \in MMPS(i))$  为例, ELT 计算方法如下。

(1) 计算节点  $j$  单位时间内需要传输的数据流量<sup>[4]</sup>。

$$T_j = T_g(j) + \sum_{n \in \text{Children}(j)} T_n \quad (2)$$

式中,  $T_g(j)$  表示节点  $j$  的数据包产生速率,  $T_n$  表示节点  $j$  的子节点  $n$  的数据包发送速率。

(2) 计算节点  $j$  将单位时间内总的流量成功传输到最大父节点集  $MMPS(j)$  所需要传输的平均次数  $TC_j$ 。

$$TC_j = T_j \times ETX(j, MMPS(j)) \quad (3)$$

式中,  $ETX(j, MMPS(j))$  表示节点  $j$  将一个数据包成功传输到其最大多父节点集需要传输的平均次数, 根据文献[22]中计算节点成功传输到簇父节点集中至少一个节点的传输代价, 得到  $ETX(j, MMPS(j))$  计算公式如下:

$$ETX(j, MMPS(j)) = \frac{1}{1 - \prod_{l \in MMPS(j)} (1 - p_{jl})} \quad (4)$$

式中,  $p_{jl}$  表示节点  $j$  与其最大多父节点集中节点  $l$  之间的无线链路质量。

(3) 计算节点  $j$  将单位时间内总的流量成功传输到其最大多父节点集传输时间  $t$ 。式中,  $Data\_rate$  表示节点  $j$  的数据传输速率。

$$t = \frac{T_j \times ETX(j, MMPS(j))}{Data\_rate} \quad (5)$$

(4) 计算节点  $j$  将单位时间内总的流量成功传输到其最大多父节点集的能耗速率  $EC_R$ 。式中,  $P_{tx}(j)$  表示节点  $j$  的数据传输功率。

$$EC_R = \frac{T_j \times ETX(j, MMPS(j))}{Data\_rate} \times P_{tx}(j) \quad (6)$$

(5) 根据公式(7)计算节点  $j$  的期望寿命。式中,  $E_{res}(j)$  表示节点  $j$  的当前剩余能量。

$$ELT(j) = \frac{E_{res}(j)}{T_j \times ETX(j, MMPS(j)) \times P_{tx}(j)} \times Data\_rate \quad (7)$$

**步骤 2** 计算节点  $i$  的备选父节点  $j$  的期望寿命在最大多父节点集  $MMPS(i)$  中所占的比重大小。式中,  $|MMPS(i)|$  表示节点  $i$  的最大多父节点集中节点的数量。

$$K_j = \frac{ELT(j)}{\sum_{k=1}^{|MMPS(i)|} ELT(P_k)} \quad (8)$$

**步骤 3** 计算节点  $i$  的备选父节点  $j$  的期望寿命因子系数  $\varphi_j$ ,  $\varphi_j$  为节点期望寿命权重的倒数。

$$\varphi_j = \frac{1}{K_j} \quad (9)$$

**步骤 4** 计算节点  $i$  的一个数据包经由备选父节点  $j$  成功传输到根节点的传输代价。

$$C_i = \frac{1}{p_{ij}} + C_{j \rightarrow root} \times \varphi_j \quad (10)$$

式中,  $C_{j \rightarrow root}$  表示备选父节点  $j$  的一个数据包成

功传输到根节点的传输代价。

**步骤 5** 节点  $i$  根据公式(10)分别计算其通过每一个备选父节点的一个数据包成功传输到根节点的传输代价, 依据传输代价的大小对备选父节点的优先级进行排序, 即数据传输代价越小, 备选父节点的优先级越高。假设计算得知  $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_{|MMPS(i)|}$ 。

**步骤 6** 根据公式(4)中计算传输代价的方法, 然后结合因缓存而发生丢包的概率  $p_j^b$ , 得到计算节点  $i$  的一个数据包成功传输到其各个多父节点集的传输代价。

$$C_{i, MPS(i)} = \frac{1}{1 - \prod_{j \in MPS(i)} (1 - p_{ij}) (1 - p_j^b)} \quad (11)$$

式中,  $p_j^b$  表示多父节点集中节点  $j$  因缓存而发生丢包的概率, 根据文献[23]得到节点缓存队列和服务率引起的丢包率, 其计算如公式(12)所示。

$$p_i^b = \begin{cases} \frac{1}{K+1} & \rho = \frac{\lambda}{\mu} = 1 \\ \frac{\rho^K (1-\rho)}{1-\rho^{(K+1)}} & \rho = \frac{\lambda}{\mu} \neq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $\lambda$  表示数据包的到达率,  $\mu$  表示数据包的服务率,  $K$  表示节点的缓存大小。

**步骤 7** 根据文献[22]剩余路径代价的计算公式, 结合期望寿命因子系数, 因缓存而发生丢包的概率  $p_j^b$ , 分别计算节点  $i$  的各个多父节点集的一个数据包成功传输到根节点的传输代价, 其中  $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_{|MMPS(i)|}$ 。

$$RC_{MPS(i)} = \frac{C_1 p_{i1} (1 - p_1^b) \varphi_1}{1 - \prod_{j \in MPS(i)} (1 - p_{ij}) p_j^b} + \frac{\sum_{i=2}^{|MPS(i)|} C_i p_{ij} (1 - p_j^b) \varphi_j \prod_{k=1}^{|MPS(i)|-1} (1 - p_{ik}) p_k^b}{1 - \prod_{j \in MPS(i)} (1 - p_{ij}) p_j^b} \quad (13)$$

**步骤 8** 节点  $i$  据公式(11)和(13)分别计算源节点的一个数据包经由各个父节点集成功传输到根节点的端到端总传输代价, 如公式(14)所示。

$$CMPS_{i, MPS(i)} = C_{i, MPS(i)} + RC_{i, MPS(i)} \quad (14)$$

**步骤 9** 节点  $i$  最终选择端到端总传输代价最小值所对应的多父节点集作为其最优多父节点集。至此, 节点  $i$  的最优多父节点集选择过程结束。

### 3.2 数据流量分配度量标准

首先根据最优父节点集选择策略选出每个节点的最优父节点集,从而完成网络拓扑的初始化构建,然后根据流量分配标准计算出源节点和中继节点与其最优父节点集中每个节点之间的数据流量分配度量标准值。数据流量分配度量标准值有效地结合了无线链路质量、节点剩余能量、节点缓存占用率以及中继节点的子节点数量等多种度量,从而最大化地实现负载均衡。以节点*i*为例,其流量分配度量标准值的具体计算步骤如下。

**步骤 1** 在网络拓扑构建过程中,节点*i*的最优父节点集中的每个节点根据当前剩余能量计算出其期望寿命。

**步骤 2** 在网络拓扑构建过程中,节点*i*的最优父节点集中的每个节点分别根据各自的缓存占用大小计算缓存占用率,从而有利于避免节点*i*为高负载的备选父节点分配较多的数据流量。

$$\gamma_{j \in OMPS(i)} = \frac{\text{current\_buffer\_occupancy}_j}{\text{buffer\_size}} \quad (15)$$

式中,  $\text{current\_buffer\_occupancy}_j$ ,  $\text{max\_buffer}$  分别表示节点的当前缓存占用大小,最大缓存空间,网络中每个节点的最大缓存空间相同。

**步骤 3** 在网络拓扑构建过程中,节点*i*的最优父节点集中的每个节点分别统计其子节点发回的目的地通告消息 (Destination Advertisement Object, DAO)<sup>[4]</sup>的数量,即可获得当前处于连接状态的子节点数量,从而有利于避免节点*i*为子节点数量较多的父节点分配较多的数据流量。

**步骤 4** 在网络拓初始化过后,最优多父节点集  $OMPS(i)$  中每个节点将其期望寿命、缓存占用率以及其子节点的数量等相关信息添加到 DIO 消息的选项部分中,并将携带上述信息的 DIO 信息广播出去。

**步骤 5** 节点*i*根据接收到其最优多父节点集  $OMPS(i)$  中所有节点广播的 DIO 消息后计算与最优多父节点集中每个节点之间的数据流量分配标准值。

$$\text{Metric}(l(i, j)) = p_{ij} \times \frac{ELT_j}{CN_j \times Rank \times \gamma_j} \quad (16)$$

式中,  $CN_j$  表示节点*j*的子节点个数,  $Rank$  表示节点*j*的网络深度值。

### 3.3 多路径数据流量分配策略

网络拓扑构建完成后,依据数据流量分配度量

标准值的大小进行多路径数据流量的分配,其主要目的在于最大化地实现网络负载均衡,从而有效地均衡网络中节点的能耗。多路径数据流量分配策略用图2进行具体说明。

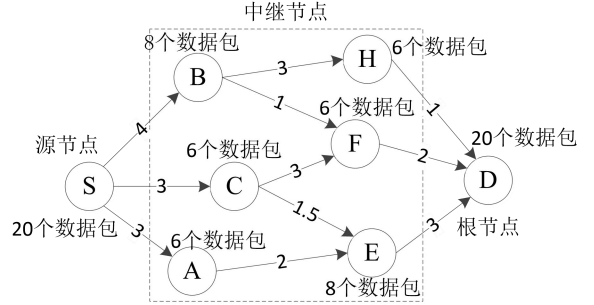


图2 多路径数据流量分配示意图

假设通过最优多父节点集选择策略构建的网络拓扑如图2所示,其中节点间无线链路上的数字表示为数据流量分配度量标准值。图中,源节点*S*的最优多父节点集为  $OMPS(S) = \{A, B, C\}$ , 通过计算得知  $\text{metric}(l(S, A)) = 3$ 、 $\text{metric}(l(S, B)) = 3$  和  $\text{metric}(l(S, C)) = 3$ , 且源节点需要发送的总的数据流量(数据包个数)为20,那么无线链路  $l(S, A)$  上分配  $20 \times [3 / (3 + 4 + 3)] = 6$  个数据包、无线链路  $l(S, B)$  上分配  $20 \times [4 / (3 + 4 + 3)] = 8$  个数据包和无线链路  $l(S, C)$  上分配  $20 \times [3 / (3 + 4 + 3)] = 6$  个数据包。同理,节点*F*分配  $8 \times [1 / (3 + 1)] + 6 \times [3 / (3 + 1.5)] = 6$  个数据包、节点*E*分别  $6 + 6 \times [1.5 / (3 + 1.5)] = 8$  个数据包和节点*H*分配  $8 \times [3 / (3 + 1)] = 6$  个数据包。

由于在数据传输的过程中,在保证网络可靠性的前提下,源节点通过其最优多父节点集并结合多路径数据流量分配策略将数据包传输到根节点,可以有效地降低网络发生拥塞的概率、增大网络吞吐量和均衡节点能耗,使得网络各方面的性能均有所提升。

## 4 实验及结果分析

本文使用 OPNET14.5 软件对提出的方案进行建模和仿真, LB-RPL 算法分别从数据包投递率、网络生存时间、平均端到端传输时延和根节点平均吞吐量四个性能指标与 RPL 算法和 ELT-RPL<sup>[17]</sup>算法进行性能比较和分析。

### 4.1 仿真环境及参数设置

为了评估 LB-RPL 算法相对于 RPL 算法和 ELT-RPL 算法的优越性,在 200m\*200m 的正方形区



域范围内构建节点数分别为 10、20、30、40、50 和 60 的静态低功耗有损网络，节点是随机分布的，且其无线信道采用阴影衰落模型，每个仿真实验做 6 次，仿真主要参数设置如表 1 所示。

表1 主要仿真参数设置

参数名	参数值
网络场景面积	200m×200m
数据包传输速率	2pkt/s
节点数量	10、20、30、40、50、60
节点初始化能量	15 J
节点通信半径	30 m
仿真周期	3600 s
数据包大小	127 bytes
MAC 层协议	IEEE 802.15.4
信道阴影衰落因子	1.98

## 4.2 仿真结果分析

从图 3 中可以发现，随着网络中节点数量的增加，RPL 算法、ELT-RPL 算法和 LB-RPL 算法的数据包投递率(Packet Delivery Rate, PDR)均呈下降趋势，其主要原因在于随着网络规模的扩大，数据包传输到根节点的距离会相对增大，增加了数据包丢失的概率。同时可以发现，LB-RPL 算法的 PDR 明显高于 RPL 算法和 ELT-RPL 算法，分析其原因主要有以下两点：(1)在网络拓扑初始化的过程中，LB-RPL 算法通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑，能够有效地降低数据包的丢包率；(2)在计算数据流量分配度量标准的过程中将多种度量有效地结合，并通过多路径数据流量分配策略能够有效地实现负载均衡，极大地降低了数据包的丢包率。

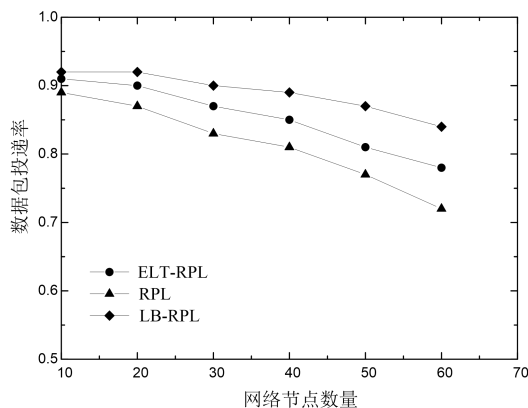


图3 数据包投递率比较

图 4 表明 RPL 算法、ELT-RPL 算法和 LB-RPL 算法的网络生存时间均随着网络规模的扩大而降低，但 LB-RPL 算法的网络生存时间明显高于 RPL

算法和 ELT-RPL 算法。相对于 RPL 算法，LB-RPL 算法通过多路径数据流量分配策略能够有效地实现负载均衡，从而避免了因单路径导致的负载不均衡。相对于 ELT-RPL 算法，LB-RPL 算法通过最优多父节点集选择机制、数据流量分配度量标准和多路径数据流量分配策略的结合，使得源节点的数据流量分配更加合理，能够最大化地均衡负载，从而有效地延长了网络生存时间。

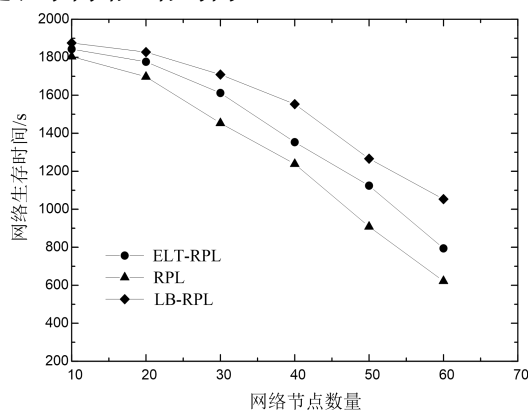


图4 网络生存时间比较

由图 5 可知，随着网络中节点数量的增加，LB-RPL 算法的平均端到端时延均低于 RPL 算法和 ELT-RPL 算法。分析其主要原因有以下三点：首先，LB-RPL 算法通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑，能够有效地降低数据包的丢包率，从而减少了数据包重传次数；其次，LB-RPL 算法在计算数据流量分配度量标准值时结合了多种度量，尤其是节点的缓存占用率，可以有效地降低数据包排队等待时延；最后，LB-RPL 算法通过多路径数据流量分配策略使得源节点的数据流量分配更加合理，从而降低了数据平均端到端时延。

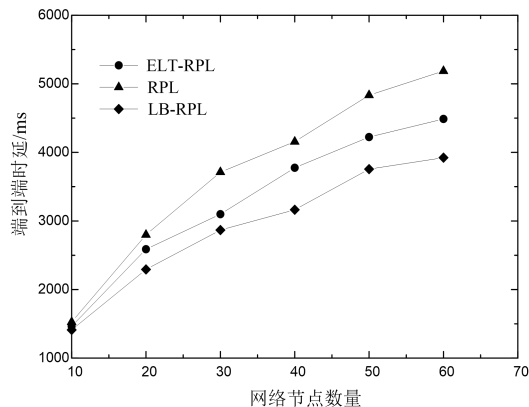


图5 平均端到端时延比较

由图 6 可知，随着网络中节点数量的增加，LB-RPL 算法，ELT-RPL 算法和 RPL 算法的根节点

的平均吞吐量均逐渐增加,其中 LB-RPL 算法的根节点平均吞吐量明显高于 RPL 算法和 ELT-RPL 算法。分析其主要原因在于 LB-RPL 算法在网络拓扑的构建过程中通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑,能够有效地降低数据包的丢包率;其次, LB-RPL 算法在计算数据流量分配度量标准值时考虑了节点的缓存占用率,降低了数据包的排队时延,故 LB-RPL 算法的根节点平均吞吐量优于 LB-RPL 和 RPL 算法。

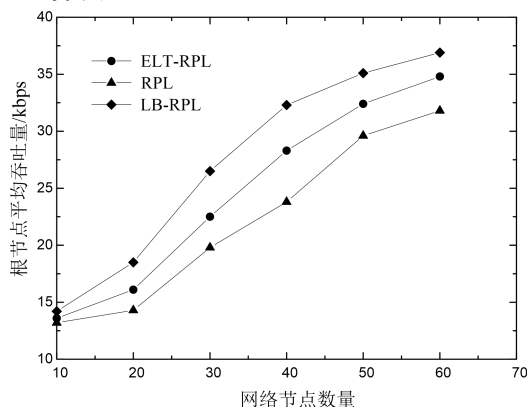


图6 根节点平均吞吐量比较

## 5 结束语

本文针对 LLN 的相关特点以及在 LLN 中由于负载不均衡导致节点能耗不均衡的问题,提出一种基于负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制 (LB-RPL)。LB-RPL 首先在网络拓扑初始化构建过程中提出了一种最优多父节点集选择策略,即通过源节点的一个数据包经由各个父节点集成功传输到根节点的传输代价选择最优父节点集;其次提出了一种数据流量分配度量标准,在计算数据流量分配度量标准值时综合考虑多种路由度量信息;最后基于流量分配度量标准提出了一种多路径数据流量分配策略。理论分析和仿真结果表明, LB-RPL 能够最大化地实现负载均衡,有效地均衡了节点能耗、延长了网络生存时间和提高了路由可靠性。未来要在规模更大,环境更加复杂的场景中,对本路由算法进行进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] Iova O, Picco P, Istomin T, et al. RPL: The Routing Standard for the Internet of Things... Or Is It?[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(12): 16-22.
- [2] Winter T, Thubert P, Brandt A, et al. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks (RPL)[S]. RFC 6550, IETF, 2012.
- [3] Vaeceur J P, Kim M, Pister K, et al. Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks[S]. RFC 6551, IETF, 2012.
- [4] 姚玉坤,刘江兵,任智,李小勇,李娟.集中式网络拥塞控制的高效 RPL 路由协议[J]. 系统工程与电子技术, 2017, 39(12): 2810-2816
- [5] Quynh T N, Manh N L, Nguyen K N. Multipath RPL protocols for greenhouse environment monitoring system based on Internet of Things[C]//International Conference on Electrical Engineering/ electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. IEEE, 2015:1-6.
- [6] Wang Z, Zhang L, Zheng Z, et al. An Optimized RPL Protocol for Wireless Sensor Networks[C]// International Conference on Cloud Computing and Security. Springer, Cham, 2017:422-429
- [7] Quan L, Ngo-Quynh T, Magedanz T. RPL-based multipath Routing Protocols for Internet of Things on Wireless Sensor Networks[C]// International Conference on Advanced Technologies for Communications. IEEE, 2015:424-429.
- [8] Zhao M, Ho I W H, Chong P H J. An Energy-Efficient Region-Based RPL Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2016, 3(6): 1319-1333.
- [9] Kim H S, Kim H, Paek J, et al. Load balancing under heavy traffic in rpl routing protocol for low power and lossy networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(4): 964-979.
- [10] Thubert P. Objective function zero for the routing protocol for low-power and lossy networks[S]. RFC 6552, IETF, 2012.
- [11] Gnawali O, Levis P. The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function[S]. RFC 6719, IETF, 2012.
- [12] Hassan A, Alshomrani S, Altalhi A, et al. Improved routing metrics for energy constrained interconnected devices in low-power and lossy networks[J]. Journal of Communications and Networks, 2016, 18(3): 327-332.
- [13] Awad A M A, Rahim R, Hashim A H A. Queue Backlog as a Node Metric for RPL Protocol[C]//International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCC), 2016: 246-250.

- 
- [14] Sheng Z, Yang S, Yu Y, et al. A survey on the ietf protocol suite for the internet of things: standards, challenges, and opportunities[J].Wireless Communications IEEE, 2013, 20(6):91-98.
- [15] Lodhi M A, Rehman A, Khan M M, et al. Multiple path RPL for low power lossy networks[C]//Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile (APWiMob), 2015: 279-284.
- [16] 张宗杰, 刘彤, 马晶源, 等.无线传感器网络 RPL 路由协议优化[J].中国科技论文在线,2014(8):1-9.
- [17] Iova O, Theoleyre F, Noel T. Exploiting multiple parents in RPL to improve both the network lifetime and its stability[C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), 2015: 610-616.
- [18] Iova O, Theoleyre F, Noel T. Using multiparent routing in RPL to increase the stability and the lifetime of the network[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 29: 45-62.
- [19] 朱立才, 王汝传, 杨浩, 等.一种能量有效的 RPL 多路径数据分发机制[J].北京邮电大学学报, 2016, 39(6):1-6.
- [20] Tang W, Ma X, Huang J, et al. Toward Improved RPL: A Congestion Avoidance Multipath Routing Protocol with Time Factor for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Sensors,2016:1-11.
- [21] 姚玉坤,杨及开.低功耗有损网络中的能量均衡高效路由协议[J].计算机工程,2016,42(11):8-14.
- [22] Zhao M, Shwe H Y, Chong P H J. Cluster-parent based RPL for Low-Power and Lossy Networks in building environment[C]// Consumer Communications and NETWORKING Conference. IEEE, 2015:779-784.
- [23] Bhat U N. An Introduction to Queueing Theory Modeling and Analysis in Applications[M]. Basel: Birkhauser Press, 2008:29-68.