

## 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:**低功耗有损网络路由协议(RPL)由于负载不均衡导致节点能耗失衡。为此,提出一种 RPL 多路径数据传输机制。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。结合无线链路质量、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度量,设计一种数据流量分配度量标准,基于该度量标准提出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。仿真结果表明,相对 RPL、ELT-RPL 机制,该机制能够最大化地实现负载与节点能耗均衡,延长网络生存时间并提高路由可靠性。

**关键词:**低功耗有损网络路由协议;数据传输;多路径;度量标准;流量分配

**中文引用格式:**刘东东,李勇,徐栋,等. 一种负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制[J]. 计算机工程,2019,45(1): 67-72,77.

**英文引用格式:**LIU Dongdong,LI Yong,XU Dong,et al. A load balanced RPL multipath data transmission mechanism[J]. Computer Engineering,2019,45(1):67-72,77.

## A Load Balanced RPL Multipath Data Transmission Mechanism

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

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

**[Abstract]** Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL) results in unbalanced energy consumption due to unbalanced load. To solve this problem, a RPL multipath data transmission mechanism is proposed. In the process of network topology construction, the optimal multi-parent node set of each node is selected according to the data transmission cost. Combining with wireless link quality, node residual energy, node cache occupancy rate and the number of relay nodes, a data flow allocation metric is proposed. Based on this metric, a flow allocation strategy is proposed to maximize the load balance of the network to obtain the optimal data transmission scheme. Simulation results show that compared with RPL and ELT-RPL, this mechanism can maximize load balance and node energy consumption balance, prolong network lifetime and improve routing reliability.

**[Key words]** Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL); data transmission; multipath; routing metric; flow allocation

**DOI:**10.19678/j.issn.1000-3428.0049281

### 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>成为人们关注的热点。LLN 被广泛应用于军事侦查、环境监测、工业控制、智能家居、医疗保健等领域。LLN 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,针对 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)提出一种基于 IPv6 的低功耗有损网络路由协议(Routing Protocol for LLN,RPL)<sup>[2-4]</sup>。

RPL 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转发,这将导致其构建的路径过于单一,在数据传输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,但过程中需要重新运行程序检测与建立路径,效率较低,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(IRT\_16R72);重庆市科委项目(CSTC2012jjA40044,CSTC2013yykfA40010)。

**作者简介:**刘东东(1990—),男,硕士研究生,主研方向为低功耗有损网络路由协议;李 勇,高级工程师;徐 栋,阮持光、鲁亚凯、刘江兵,硕士研究生。

**收稿日期:**2017-11-13 **修回日期:**2018-01-11 **E-mail:**617640557@qq.com

为解决单路径路由策略的局限性问题,研究人员提出多路径路由策略<sup>[7]</sup>。多路径路由策略允许节点同时选择多个父节点并行传输数据,这能够提高网络的可靠性并减少拥塞。因此,设计合理的多路径数据转发方案使数据在各个路径上有效传输具有重要意义。

本文提出一种多路径数据转发方案。该方案基于多度量选择最优父节点集,建立多度量的流量分配标准,根据路由权重将流量进行均衡分配,以实现负载均衡并延长网络生命时间。

## 1 相关工作

目前,工业和学术领域对 RPL 路由协议的研究已取得大量成果<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 2 种路由度量标准:传输跳数<sup>[10]</sup>和期望传输次数<sup>[11]</sup>。考虑到这 2 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>等也相继被选择作为路由度量。

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 路由协议引起了人们的关注。文献[14]提出基于 RPL 的 3 种多路径技术,即快速本地修复 FLR 技术、能量负载均衡 ELB 和 ELB-FLR 技术。这些技术可以提高能效,延长网络寿命,但是并没有提高网络吞吐量。文献[15]提出一种临时多路径的 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。文献[16]在多路径的基础上,提出一种按路径权重对数据流量进行并行传输的方案,其核心设计思想是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。文献[17-18]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,其结合流量分配策略使每个节点的能耗相同,使得每条路径上的瓶颈节点能耗降低,从而达到延长网络生存时间的目的。文献[19]提出一种能量有效的 RPL 多路径数据分发机制,建立一种符合实际场景的节点能量消耗模型,根据能量离散程度判定网络中节点的能量均衡程度,从而有效地均衡网络中节点的能耗。文献[20]提出避免拥塞的多路径路由协议 CA-RPL,其能够提高路由的可靠性并减少网络中的延迟。CA-RPL 提出一种新的路由度量 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。文献[6]设计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 值<sup>[2]</sup>从备选父节点中选出最优路由,并且存储一条

备用路由。当链路和邻居节点出现故障后选择路径时,可以直接使用备用路径,从而有效提高数据包接收成功率,减少端到端时延。

然而,上述研究仍存在以下不足:

1) 不确定如何为源节点选择最优父节点集,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) 只降低了每条路径上瓶颈节点的能耗,不能有效实现负载均衡,从而不能提升网络的性能。

3) 当拥塞发生后,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,从而影响网络性能。

4) 在流量分配时,考虑的度量过于单一,没有提出基于多种度量的流量分配标准。

为解决上述 LLN 中基于 RPL 路由协议的多路径数据传输方案中存在的问题,本文提出一种基于负载均衡的 RPL 多路径数据传输机制 (Load Balance-based Multipath Data 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

为便于后续分析和论述,本文给出如下定义:

**定义 1**(缠绕多路径<sup>[16]</sup>) 在图 1 所示的网络模型中,中继节点 B、C、E、F 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,路径之间可以存在重叠部分。

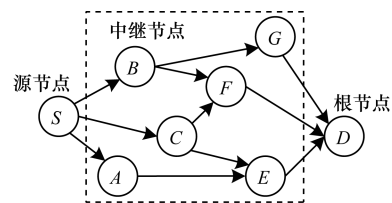


图 1 LB-RPL 网络模型

**定义 2**(多父节点集 (Multiple Parent Set, MPS))

在网络拓扑的构建过程中,一个节点的备选父节点集为多父节点集。在图 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,一个节点的备选父节点的所有节点集为最大多父节点集,即含有的集合元素最多的多父节点集。在图 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)) 将一个数据包经由各个多父节点集 MPS 传输到根节点的代价最小值所对应的多父节点集,称为最优多父节点集。

**定义5(路径权重)** 在网络拓扑构建完成后,每一条路径上被分配的数据流量比例称为路径权重,其计算公式如下:

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

其中, $l(i,j)$ 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, $metric(l(i,j))$ 表示节点*i*与节点*j*之间的路由度量值, $l(i,P_k)$ 表示节点*i*与最优父节点集中节点*P<sub>k</sub>*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,从而最大化网络负载均衡并有效延长网络的生存时间。

LB-RPL网络模型中的节点分为3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的数据包<sup>[21]</sup>,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。

### 3 LB-RPL 数据传输机制

本文提出的LB-RPL数据传输机制包含3种策略:

1) 选择多父节点集时,在考虑期望重传次数的情况下,又考虑节点的期望寿命,从而可以最大延长网络的寿命;在计算传输代价的过程中,联合无线链路质量和因缓存而丢包的概率,可以有效控制网络拥塞,从而提升数据包接收成功率;最后,在考虑多种度量的情况下,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,该标准有效结合无线链路质量、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,可以有效反映各种度量对路由权重的影响,从而准确评价各个路径的具体性能情况,有助于对数据进行均衡分配,从而实现最优的负载均衡。

3) 提出一种流量分配度量标准,根据各路径权重占总路径权重的比率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调整,从而最大化负载均衡并提升网络的整体性能。

#### 3.1 最优多父节点集选择

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*利用其邻居节点,周期性地广播面向目的地的有向无循环图信息对象(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>:

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

其中, $T_g(j)$ 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*单位时间内将总的数据流量成功传输到最大父节点集 $MMPS(j)$ 所需要的平均次数 $TC_j$ :

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

其中, $ETX(j, MMPS(j))$ 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:

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

其中, $p_{jl}$ 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*将单位时间内总的数据流量成功传输到其最大多父节点集中的传输时间*t*:

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

其中, $Data\_rate$ 表示节点*j*的数据传输速率。

4) 计算节点*j*将单位时间内总的数据流量成功传输到其最大多父节点集中的能耗速率 $EC_R$ :

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

其中, $P_{tx}(j)$ 表示节点*j*的数据传输功率。

5) 根据式(7)计算节点*j*的期望寿命:

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

其中, $E_{res}(j)$ 表示节点*j*的当前剩余能量。

**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。

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

其中, $|MMPS(i)|$ 表示节点*i*的最大多父节点集中节点的数量。

**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。

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

其中,  $C_{j \rightarrow \text{root}}$  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  $i$  根据式(10)分别计算其通过每一个备选父节点, 将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, 数据传输代价越小, 备选父节点的优先级越高。此处假设计算得知  $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_{|MPS(i)|}$ 。

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

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

其中,  $p_j^b$  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]得到由节点缓存队列和服务率引起的丢包率, 其计算如式(12)所示。

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

其中,  $\lambda$  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,  $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_{|MPS(i)|}$ 。

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

**步骤8** 节点  $i$  根据式(11)和式(13)分别计算源节点的一个数据包经由各个多父节点集成功传输到根节点的端到端总传输代价, 如式(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

首先根据最优多父节点集选择策略选出每个节

点的最优多父节点集, 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多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, 从而能够实现最大化负载均衡。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  $i$  的最优多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  $i$  的最优多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, 从而避免节点  $i$  为高负载的备选父节点分配较多的数据流量。缓存占用率计算公式如下:

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

其中,  $\text{current\_buffer\_occupancy}_j$ 、 $\text{buffer\_size}$  分别表示节点的当前缓存占用大小和最大缓存空间, 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  $i$  的最优多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** 在网络拓扑初始化后, 最优多父节点集  $CPS(i)$  中每个节点将其期望寿命、缓存占用率大小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  $i$  接收到其最优多父节点集  $C_j$  中所有节点广播的 DIO 消息后, 计算其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:

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

其中,  $CN_k$  表示节点  $j$  的子节点个数,  $\text{Rank}$  表示节点  $j$  的网络深度。

### 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分配, 其主要目的在于最大化网络负载均衡, 从而有效降低网络中节点的能耗。多路径数据流量分配策略如图2所示。其中, 节点间无线链路上的数字表示数据流量分配度量的标准值。

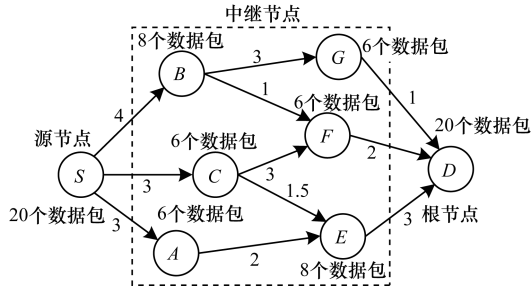


图 2 多路径数据流量分配示意图

在图 2 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  $metric(l(S, A)) = 3, metric(l(S, B)) = 3, metric(l(S, C)) = 3$ ,且源节点需要发送的总数据流量(数据包个数)为 20,则无线链路  $l(S, A)$  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,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  $E$  分配  $6 + 6 \times [1.5 / (3 + 1.5)] = 8$  个数据包,节点  $G$  分配  $8 \times [3 / (3 + 1)] = 6$  个数据包。

由于数据传输过程中,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,可以有效降低网络发生拥塞的概率,增大网络吞吐量并均衡节点能耗,从而使得网络各方面的性能均有所提升。

### 4 实验结果与分析

使用 OPNET14.5 软件对本文方案进行建模和仿真,分别从数据包投递率、网络生存时间、平均端到端时延和根节点平均吞吐量 4 个性能指标,将本文 LB-RPL 算法与 RPL 算法、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

为评估 LB-RPL 算法相对于 RPL 算法、ELT-RPL 算法的优越性,在  $200\text{ m} \times 200\text{ m}$  的正方形区域内,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,节点随机分布,且其无线信道采用阴影衰落模型,每组仿真进行 6 次,仿真主要参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数名	参数值
网络场景面积/ $\text{m}^2$	200 × 200
数据包传输速率/ $(\text{pkt} \cdot \text{s}^{-1})$	2
节点数量	10、20、30、40、50、60
节点初始化能量/J	15
节点通信半径/m	30
仿真周期/s	3 600
数据包大小/Byte	127
MAC 层协议	IEEE 802.15.4
信道阴影衰落因子	1.98

#### 4.2 算法性能分析

3 种算法的数据包投递率对比情况如图 3 所示。由图 3 可以看出,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,这增加了数据包丢失的概率。同时可以看出,LB-RPL 算法的数据包投递率明显高于 RPL 算法和 ELT-RPL 算法,分析其原因主要有以下 2 点:

1) LB-RPL 算法通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑,能够有效降低数据包的丢包率。

2) LB-RPL 算法在计算数据流量分配度量标准的过程中有效地结合多种度量,并通过多路径数据流量分配策略来实现负载均衡,从而极大地降低了数据包的丢包率。

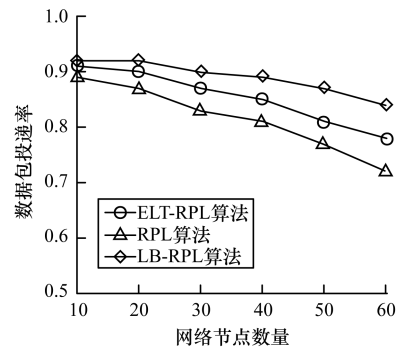


图 3 3 种算法数据包投递率比较

3 种算法的网络生存时间对比情况如图 4 所示。由图 4 可以看出,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有效地实现了负载均衡,从而避免了因单路径导致的负载不均衡问题;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,使源节点的数据流量分配更合理,这能够最大化均衡负载,并有效延长网络生存时间。

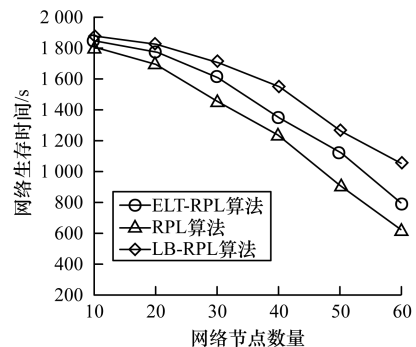


图 4 3 种算法网络生存时间比较

3种算法的平均端到端时延对比情况如图5所示。由图5可以看出,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。分析其原因主要有以下3点:

1) LB-RPL算法通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑,能够有效降低数据包的丢包率,从而减少数据包重传次数。

2) 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,这可以有效降低数据包排队等待时延。

3) LB-RPL算法通过多路径数据流量分配策略使得源节点网络中的流量分配更加合理,从而降低了网络中的平均端到端时延。

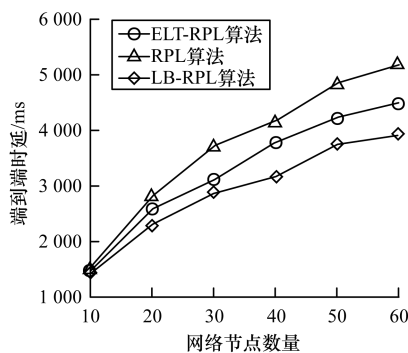


图5 3种算法平均端到端时延比较

3种算法的根节点平均吞吐量对比情况如图6所示。由图6可以看出,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。分析其原因主要在于, LB-RPL算法通过最优多父节点集选择机制构建网络拓扑,能够有效降低数据包的丢包率,同时, 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,故其根节点平均吞吐量优于ELT-RPL算法和RPL算法。

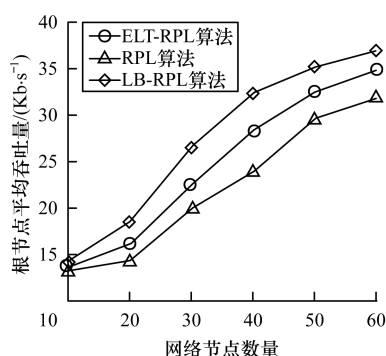


图6 3种算法根节点平均吞吐量比较

## 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RPL多路径数据传输机制LB-RPL。在网络拓扑初始化构建过程中提出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多父节点集。然后提出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。在此基础上,提出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算法能够最大化地实现负载均衡,延长网络生存时间并提高路由可靠性。下一步将在规模更大、环境更复杂的场景中对本文LB-RPL算法的传输性能进行进一步研究。

## 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] THUBERT P, WINTER T, BRANDTA, et al. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks [C]// Proceedings of International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 853-861.
- [3] VAEEEUR J P, KIM M, PISTER K, et al. Routing metrics used for path calculation in low-power and lossy networks [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://www.heise.de/netze/rfc/rfcs/rfc6551.shtml>.
- [4] 姚玉坤, 刘江兵, 任智, 等. 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]// Proceedings of International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [6] WANG Z, ZHANG L, ZHENG Z, et al. An optimized RPL protocol for wireless sensor networks [C]// Proceedings of International Conference on Cloud Computing and Security. Berlin, Germany: Springer, 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]// Proceedings of International Conference on Advanced Technologies for Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 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, PAK 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 [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6552/>.
- [11] GNAWALI O, LEVIS P. The minimum rank with hysteresis objective function [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc6719/>.

(下转第77页)

- software defined networking for industrial control networks [C]//Proceedings of the 10th International Conference on Information, Communications and Signal Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016: 1-5.
- [5] ZHAO J, QU H, ZHAO J, et al. Towards controller placement problem for software-defined network using affinity propagation [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(14): 928-929.
- [6] CANINI M, KUZNETSOV P, LEVIN D, et al. A distributed and robust SDN control plane for transactional network updates [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 190-198.
- [7] HELLER B, SHERWOOD R, MCKEOWN N. The controller placement problem [J]. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 2012, 42(4): 473-478.
- [8] DIXIT A A, HAO F, MUKHERJEE S, et al. *ElastiCon*: an elastic distributed SDN controller [C]//Proceedings of the 10th ACM/IEEE Symposium on Architectures for Networking and Communications Systems. New York, USA: ACM Press, 2017: 17-28.
- [9] BARI M F, ROY A R, CHOWDHURY S R, et al. Dynamic controller provisioning in software defined networks [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Network and Service Management. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 18-25.
- [10] SALLAHI A, ST-HILAIRE M. Expansion model for the controller placement problem in software defined networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 21(2): 274-277.
- [11] YEGANEH S H, GANJALI Y. *Beehive*: simple distributed programming in software-defined networks [C]//Proceedings of the Symposium on SDN Research. New York, USA: ACM Press, 2016.
- [12] 王丽霞, 曲桦, 赵季红, 等. 软件定义网络中应用二值粒子群优化的控制器部署策略 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(6): 67-71.
- [13] XIAO P, QU W, QI H, et al. The SDN controller placement problem for WAN [C]//Proceedings of International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 220-224.
- [14] BOSE S, MUKHERJEE A, MADHULIKA, et al. Parallel image segmentation using multi-threading and K-means algorithm [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1-5.
- [15] KANG S H, SANDBERG B, YIP A M. A regularized K-means and multiphase scale segmentation [J]. *Inverse Problems and Imaging*, 2017, 5(2): 407-429.
- [16] 谢娟英, 高红超. 基于统计相关性与 K-means 的区分基因子集选择算法 [J]. *软件学报*, 2014(9): 2050-2075.

编辑 赵辉

(上接第72页)

- [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]//Proceedings of International Conference on Computer and Communication Engineering. Washington D. C., USA: IEEE Press, 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]. *IEEE Wireless Communications*, 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]//Proceedings of Asia Pacific Conference on Wireless and Mobile. Washington D. C., USA: IEEE Press, 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 [EB/OL]. [2017-10-20]. <http://www.docin.com/p-766814646.html>.
- [17] IOVA O, THEOLEYRE F, NOEL T. Exploiting multiple parents in RPL to improve both the network lifetime and its stability [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 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 [EB/OL]. [2017-10-20]. <https://www.hindawi.com/journals/js/2016/8128651/>.
- [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]//Proceedings of Consumer Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2015: 779-784.
- [23] BHAT U N. An introduction to queueing theory modeling and analysis in applications [M]. Basel, Switzerland: Birkhauser Press, 2008.

编辑 吴云芳