

# LLN 中基于混合式的网络拥塞控制路由算法

王华华 周远文 刘江兵

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

**摘要** 由于低功耗有损网络(Low Power and Lossy Networks, LLN)中现有网络拥塞控制路由算法无法高效地对当前网络拥塞进行缓解,因此提出一种基于混合式的网络拥塞控制路由算法(Hybrid-based Network Congestion Control Routing Algorithm, HNCRA)。该算法主要包含 3 个创新点。首先,为了有效地降低网络拥塞的发生概率,在组网过程中,每个节点依据其备选父节点的负载状态进行父节点的选择;其次,为了避免网络拥塞节点的子节点在更换数据传输路径时选择处于重负载状态的备选父节点作为新的父节点,在网络拓扑维护过程中每个节点实时通告自身负载状态;最后,为了能够高效地缓解当前的网络拥塞,结合数据分流思想和更换数据传输路径的方式进行网络拥塞控制。仿真结果表明,与 LLN 中现有网络拥塞控制路由算法相比, HNCRA 算法能够有效地提升网络各方面的性能,其中网络拥塞的发生概率降低了 19.89%, 汇聚节点的平均吞吐量增加了 11.35%, 网络的平均寿命延长了 9.75%。

**关键词** 低功耗有损网络, 路由算法, 网络拥塞控制, 混合式

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.06.015

## Hybrid-based Network Congestion Control Routing Algorithm for LLN

WANG Hua-hua ZHOU Yuan-wen LIU Jiang-bing

(Key Laboratory of Mobile Communications Technology of Chongqing, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract** Because the existing network congestion control routing algorithms in low power and lossy networks (LLN) cannot alleviate the current network congestion effectively, this paper proposed a hybrid-based network congestion control routing algorithm (HNCRA). This algorithm mainly contains three innovations. Firstly, to reduce the probability of network congestion effectively, each node selects the parent node according to the load state of its alternative parent node in the process of network construction. Secondly, to avoid the problem that the child node of network congestion node selects the alternative parent node with a heavy traffic state as the new parent node when changing the data transmission path, each node notifies its own load status in real time during the maintenance process of the network topology. Finally, for alleviating the current network congestion effectively, network congestion control is conducted by combining the idea of data flow and the way of replacing the data transmission paths. The simulation results show that HNCRA algorithm can improve the performance of all aspects of the network effectively compared with the existing network congestion control routing algorithm in LLN. Specifically, the network congestion probability is decreased by 19.89%, the average throughput of sink node is increased by 11.35%, and the network lifetime is extended by 9.75%.

**Keywords** Low power and lossy networks (LLN), Routing algorithm, Network congestion control, Hybrid

## 1 引言

随着物联网(Internet of Things, IOT)<sup>[1-2]</sup>技术和通信技术<sup>[3]</sup>的迅猛发展,无线传感器节点根据不同应用需求所构建的低功耗有损网络(Low Power and Lossy Networks, LLN)<sup>[4-6]</sup>由于采用基于标准化 IPv6 的开放性架构,而拥有较好的互操作性和灵活性,可以用于连接大规模以及超大规模网络。因此,LLN 可被广泛地应用于各种领域,如城市交通、

现代化农业、工业控制、环境监测以及智能电网等。

由互联网工程任务组织(Internet Engineering Task Force, IETF)提出的 LLN 路由协议(Routing Protocol for LLN, RPL)<sup>[7]</sup>是一种网络拓扑结构呈树形的路由协议。由于 LLN 中各个无线传感器节点之间的无线链路具有不稳定性 and 有损性以及各个节点的处理能力和缓存空间均受到一定限制,因而一旦遇到突发紧急情况,比如火灾、化工厂有毒气体的泄漏等灾害,需要传输大量连续数据流时极易导致网络拥

收到日期:2018-04-24 返修日期:2018-07-18 本文受国家科技重大专项(2017ZX03001021-004)资助。

王华华(1982-),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为物理层开发、无线传感网络, E-mail: 353948595@qq.com (通信作者);周远文(1991-),男,硕士生,主要研究方向为低功耗有损网络;刘江兵(1989-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

塞,从而导致丢包率急剧上升、节点能耗速率增大以及网络吞吐量下降。针对上述问题,本文提出了一种基于混合式的网络拥塞控制路由算法(Hybrid-based Network Congestion Control Routing Algorithm, HNCCRA)。该算法包含3种改进策略:最优父节点选择策略、网络拥塞状态通告策略和混合式网络拥塞缓解策略。

## 2 相关工作

当前,网络拥塞控制常采用两种方法:1)调整源节点的数据包发送速率;2)调整网络拥塞节点的部分子节点的数据传输路径。

Wan等<sup>[8]</sup>通过队列长度和无线信道负载检测网络拥塞,当检测到网络发生拥塞时,所有数据包传输速率超过预设的网络拥塞阈值的源节点均需等待根节点的响应。如果在一定时间内,源节点未接收到来自根节点的确认消息,则降低数据包的传输速率。Deshpande等<sup>[9]</sup>利用节点队列利用率的大小反映网络拥塞程度。一旦节点的队列利用率远高于预设的网络拥塞阈值,则添加网络拥塞比特位,并通过排队论调整源节点的数据包发送速率。Jin等<sup>[10]</sup>解决了异构无线传感器网络中的数据包发送速率控制和资源分配问题。网络中的每个节点(根节点除外)根据其自身的容量聚合代价和成功传输一个数据包到根节点的能耗调节发包速率,并根据节点的容量和根节点反馈的数据流所消耗的能量不断地更新节点的发包速率。虽然通过调整源节点发包速率的方式能够在一定程度上达到缓解当前网络拥塞的目的,但是会严重影响网络吞吐量。

Kim等<sup>[11]</sup>在网络拓扑结构创建的过程中着重考虑节点的队列利用率,同时当检测到网络中的节点发生拥塞时,通过对溪流计时器(Trickle timer)<sup>[12]</sup>重置进行改进,使得网络拥塞节点的子节点以一定概率进行数据传输路径的更换。Ma等<sup>[13]</sup>针对无线个人局域网提出了一种基于博弈论的网络拥塞控制(Game Theory based Network Congestion Control, GTNCC)路由协议。在该协议中,网络拥塞节点的子节点在进行数据传输路径更换时引入了博弈论的策略,即利用博弈论的思想判断是否需要与其当前处于网络拥塞状态的父节点继续维持连接状态。同时,该协议在增加少量控制开销的情况下能够避免网络震荡现象的出现。姚玉坤等<sup>[14]</sup>提出了一种基于多维度量结合的集中式网络拥塞控制(Centralized Network Congestion Control based on Multi-metrics Combination, CNCCMC)路由协议。该协议在网络拓扑构建过程中有效地结合了多种路由度量,譬如剩余能量、无线链路质量、缓存占用率和节点当前子节点数量;同时采用集中式的方式对当前网络拥塞进行缓解,并对网络震荡现象提出了相应的解决方案。

综上所述,LLN中现有网络拥塞控制路由算法存在以下3个方面的不足:1)节点在选择最优父节点时未考虑其备选父节点的负载增速,一旦当前缓存队列利用率较低但负载增速较快的备选父节点被选为节点的最优父节点,将导致网络发生拥塞的概率急剧上升。2)在数据传输的过程中,当检测到节点发生网络拥塞时,网络拥塞节点的子节点在进行数据传输路径更换时往往仅考虑其备选父节点当前是否处于网络拥塞状态,并未考虑其备选父节点的负载状态,一旦当前未处

于网络拥塞状态但负载增速较快的备选父节点被网络拥塞节点的子节点选为新的父节点,将会迅速引发新的网络拥塞,进而产生网络震荡现象。3)在缓解网络拥塞的过程中,仅采用调整源节点的数据包传输速率的方式会造成网络吞吐量急剧下降;仅采用改变网络拥塞节点子节点的数据传输路径的方式将会导致数据的传输代价增大,这主要是由于先前网络拥塞节点的子节点的全部数据均将由传输代价非最低的备选父节点转发至汇聚节点。

## 3 网络模型

图1为HNCCAR算法的网络拓扑结构示意图,其中包括1个汇聚节点、 $n$ 个中继节点和 $m$ 个叶子节点。此外,汇聚节点作为整个网络拓扑结构创建的发起者,对其下游节点传输的数据流量进行汇聚;中继节点的主要作用在于对叶子节点向汇聚节点传输的数据流量进行转发,以及对其覆盖范围内的数据流量进行收集;叶子节点的主要作用在于仅对其所覆盖范围内的数据流量进行收集。

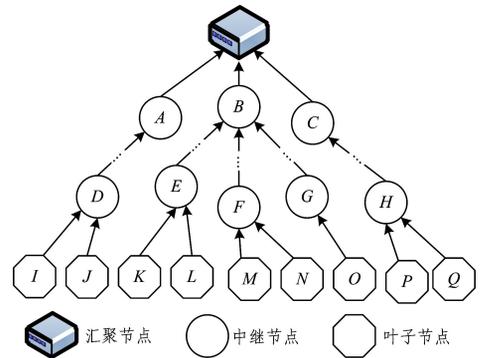


图1 网络拓扑模型图

Fig. 1 Model of network topology

## 4 HNCCRA 算法

本文所提出的HNCCRA算法作出了如下改进:1)为了有效降低网络拥塞的发生概率,提出一种最优父节点选择策略,在组网过程中节点不仅考虑其备选父节点当前缓存队列的利用率,而且考虑了其备选父节点的负载增速情况;2)为了避免网络拥塞节点的子节点选择即将处于拥塞状态的备选父节点作为新的父节点,提出一种网络拥塞状态通告策略,在网络拓扑维护过程中每个节点实时通告自身拥塞状态;3)为了高效、快速地对当前网络拥塞进行缓解,提出一种混合式网络拥塞缓解策略,有效结合数据分流和数据传输路径更换两种方式进行网络拥塞控制。

### 4.1 最优父节点选择策略

最优父节点选择策略的核心思想为在网络拓扑结构的构建过程中,节点在选择最优父节点时应充分考虑其备选父节点当前的负载状态,譬如节点当前缓存队列的利用率以及节点欲发生网络拥塞的大致时间间隔。考虑上述这两个因素,将会有效地避免负载较重的节点被其邻居节点选作当前最优父节点。以节点 $n$ 为例,最优父节点选择策略的具体步骤如下。

步骤1 计算节点 $n$ 的备选父节点 $n_p(i)$ 当前的缓存队列利用率,如式(1)所示:

$$Q(n_p(i)) = \frac{C_{\text{current\_buffer\_occupancy}}(n_p(i))}{C_{\text{max\_buffer}}(n_p(i))} \quad (1)$$

其中,  $C_{\text{current\_buffer\_occupancy}}(n_p(i))$  表示节点  $n$  的备选父节点  $n_p(i)$  当前缓存队列被占用的大小,  $C_{\text{max\_buffer}}(n_p(i))$  表示节点  $n$  的备选父节点  $n_p(i)$  缓存队列空间的最大值且网络中除根节点外每个节点的缓存队列空间的最大值均保持一致。

步骤 2 判断节点  $n$  的备选父节点  $n_p(i)$  在单位时间内发送的数据包个数是否小于接收到的数据包个数。如果节点在单位时间内发送的数据包个数小于接收到的数据包个数, 则根据式(2)计算节点欲发生网络拥塞的大致时间间隔; 反之, 进入步骤 4。

$$T_c(n_p(i)) = \frac{\alpha C_{\text{max\_buffer}}(n_p(i))}{R_s - (R_r + R_c)} \quad (2)$$

其中,  $\alpha$  表示网络拥塞阈值, 由于在仿真验证过程中, 当节点的队列利用率超过 0.7 时其丢包率会急剧上升, 表明当前节点处于网络拥塞状态, 因此  $\alpha$  的取值为 0.7;  $R_s$  表示节点  $n$  的数据包传输速率;  $R_r$  表示节点  $n$  的子节点的数据包传输速率;  $R_c$  表示节点  $n$  自身产生的数据包速率。

步骤 3 节点  $n$  的备选父节点  $n_p(i)$  将计算出的当前缓存队列利用率以及欲发生网络拥塞的大致时间间隔添加到周期性广播的面向目的地的有向无环图 (Destination Oriented Directed Acyclic Graph, DODAG) 信息对象 (DODAG Information Object, DIO) 控制消息的选项字段中。

步骤 4 节点  $n$  接收到其备选父节点  $n_p(i)$  广播的 DIO 控制消息后, 从该 DIO 控制消息的选项字段中读取取出备选父节点  $n_p(i)$  的缓存队列利用率以及欲发生网络拥塞的大致时间间隔, 并计算节点的备选父节点在备选父节点集中欲发生网络拥塞时间间隔所占的权重大小, 如式(3)所示:

$$\tau(n, n_p(i)) = \frac{T_c(n_p(i))}{\sum_{k=1}^j T_c(n_p(k))} \quad (3)$$

其中,  $T_c(n_p(i))$  表示备选父节点  $n_p(i)$  欲发生网络拥塞的大致时间,  $\sum_{k=1}^j T_c(n_p(k))$  表示节点  $n$  的所有备选父节点欲发生网络拥塞时间的总和。

步骤 5 计算节点  $n$  与其备选父节点  $n_p(i)$  之间的路由度量值, 如式(4)所示:

$$O(n, n_p(i)) = h(n) + 1 + ETX(n, n_p(i)) + Q(n_p(i)) + \frac{1}{\tau(n, n_p(i))} \quad (4)$$

其中,  $h(n)$  表示节点  $n$  与汇聚节点之间的传输跳数;  $ETX(n, n_p(i))$  表示节点成功传输一个数据包到达其备选父节点  $n_p(i)$  所需要传输的平均次数。

步骤 6 节点  $n$  选择与其备选父节点之间路由度量值最小的备选父节点作为当前最优父节点。

## 4.2 节点负载状态通告策略

当检测到网络发生拥塞时, 通常由网络拥塞节点将当前网络拥塞状态添加到 DIO 控制消息中, 并通过广播该 DIO 控制消息将网络拥塞状态通告给其子节点或邻居节点。然而, 当前未处于网络拥塞状态但负载较重的节点无法及时被其邻居节点所获知。因此, 一旦网络拥塞节点的子节点在进行数据传输路径更换时选择此类备选父节点作为新的父节点, 那

么将会迅速引发新的网络拥塞, 进而产生网络震荡现象, 从而对网络各方面的性能产生严重影响。

为了使网络中各个节点及时获知彼此间的负载状态, 需要各个节点将自身当前的负载状态通告给其邻居节点。节点负载状态通告策略的具体过程如下。

在网络拓扑初始化创建完成后, 每个节点 (叶子节点除外) 在周期性地发送 DIO 控制消息进行拓扑维护前, 首先需要检测自身当前缓存队列利用率是否超过预设的网络拥塞阈值。如果检测到其当前缓存队列利用率超过网络拥塞阈值, 则表明当前节点处于网络拥塞状态, 于是将 DIO 控制消息保留字段中的第一位设置为网络拥塞字段<sup>[14]</sup>。当该字段的值为 1 时, 表明当前节点处于网络拥塞状态; 当该字段的值为 0 时, 表明当前节点未处于网络拥塞状态。当检测到节点处于网络拥塞时, 通过需周期性广播的 DIO 控制消息将其网络拥塞状态通告给其子节点和邻居节点, 其子节点接收到上述 DIO 控制消息后, 将其父节点的网络拥塞状态同样通过周期性广播的 DIO 控制消息通告给其所有的备选父节点; 若检测到当前缓存队列利用率小于网络拥塞阈值, 则表明当前节点未处于网络拥塞状态。随后, 判断节点的数据包接收速率和传输速率的大小, 如果节点的数据包接收速率小于传输速率, 则计算节点欲发生网络拥塞的大致时间间隔。其计算式如下:

$$T_c' = \frac{\alpha C_{\text{max\_buffer}}(n_p(i)) - C_{\text{current\_buffer\_occupancy}}(n_p(i))}{R_s - (R_r + R_c)} \quad (5)$$

将计算得到的值添加到 DIO 控制消息主体的选项字段中, 通过周期性广播的 DIO 控制消息将其当前负载状态通告给其子节点或邻居节点。其子节点接收到该 DIO 控制消息后, 同样将其父节点的负载状态通告给其所有备选父节点。如果节点的数据包接收速率小于传输速率, 则表明当前节点处于轻负载状态, 那么该节点利用周期性广播的 DIO 控制消息的保留字段将其轻负载状态通告给其子节点和邻居节点, 其子节点接收到该 DIO 控制消息后重复上述操作。

## 4.3 混合式网络拥塞缓解策略

当检测到网络发生拥塞时, 需要高效快速地对当前网络拥塞进行缓解, 混合式网络拥塞缓解策略的核心思想在于, 网络拥塞节点根据其子节点的备选父节点的当前负载状态, 除了将其子节点的数据传输路径进行更换外, 还采用数据分流的方式将两种方式进行有效的结合。混合式网络拥塞缓解策略的具体操作步骤如下。

步骤 1 在网络拓扑初始化创建完成后, 每个中继节点均存储其子节点备选父节点的网络拥塞状态和负载状态。

步骤 2 每个中继节点周期性地检测自身是否发生网络拥塞。如果检测出当前未发生网络拥塞, 则等待下一次检测; 反之, 进入步骤 3。

步骤 3 网络拥塞节点根据其当前子节点备选父节点的网络拥塞状态和负载状态决定需要进行数据传输路径更换的子节点。

步骤 4 网络拥塞节点预估除去满足数据传输路径更换条件的子节点后是否能够解除当前网络拥塞状态。如果能解除当前网络拥塞状态, 则进入步骤 5; 反之, 进入步骤 7。

步骤5 将满足数据传输路径更换条件的子节点添加到DIO控制消息的选项字段中,并向其子节点组播该DIO控制消息。

步骤6 其子节点接收到上述DIO控制消息后判断选项字段是否包含其信息。如果包含其信息,该子节点对当前数据传输路径进行更换,从备选父节点中选出一个新的父节点;反之,该子节点继续与其当前父节点保持连接状态。

步骤7 将不满足数据传输路径更换条件的子节点的数据流量进行分流传输预处理,直至能够解除当前网络拥塞状态为止。

步骤8 将满足数据传输路径更换条件的子节点以及需要进行数据分流的节点和流量分配比例添加到DIO控制消息的选项字段中,并向其子节点组播该DIO控制消息。

步骤9 其子节点接收到上述DIO控制消息后判断选项字段是否包含其信息。如果不包含其信息,则该子节点继续与当前父节点保持连接状态;反之,对当前数据传输路径需要进行更换的子节点以及对需要进行数据流量分流的子节点进行处理。

## 5 模拟与性能评估

为了验证HNCCAR算法的性能,本文采用OPNET Modeler 14.5仿真软件对GTNCC路由协议<sup>[13]</sup>、CNCCMC路由协议<sup>[14]</sup>以及本文所提HNCCRA算法进行模拟仿真,并对其各方面的网络性能进行比较和分析。

### 5.1 仿真环境

在400m×400m的正方形区域内分别构建不同网络规模大小的模拟仿真场景,其中,网络规模大小分别为20,40,60,80和100,节点的通信半径为45m,仿真时间为3600s。为了确保网络场景的稳定性,网络中所有节点均采用静态或准静态模型。此外,在仿真实验的过程中,将节点的缓存空间大小设置为10packet,以保证网络拥塞现象的出现,这主要是为了模拟实际场景中的网络拥塞,另一方面其也满足低功耗有损网络中的节点在存储空间受到一定限制后的特征。在仿真过程中使用到的其他主要参数的设置如表1所列。

表1 其他主要仿真参数的设置

Table 1 Setting of other main simulation parameters

参数名	参数值
负载类型,发包速率/(pkt/s)	CBR,1~4
数据包大小/bytes	1024
MAC协议	IEEE,802.15.4
节点初始能量/J	9
节点最大发射功率/mW	60
发送单位比特数据能耗/(nJ/bit)	65
信道阴影衰落因子	2

### 5.2 仿真性能指标

#### 1) 网络拥塞发生概率

网络拥塞发生概率是指处于网络拥塞状态的节点数量与总的节点数量的比值,其公式如式(6)所示:

$$P_c = \frac{N_c}{N_t} \quad (6)$$

其中, $N_c$ 表示网络中发生网络拥塞节点的数量, $N_t$ 表示网络

中节点数量的总和。

#### 2) 网络平均寿命

网络平均寿命是指网络初始化开始到能量耗尽的节点数量占网络中所有节点数量总和的10%时所耗费的时间,如式(7)所示:

$$t_l = t_d - t_s \quad (7)$$

其中, $t_d$ 表示网络中能量耗尽的节点数量为网络中所有节点数量的10%时的时刻, $t_s$ 表示网络拓扑初始化创建完成的时刻。

#### 3) 汇聚节点的平均吞吐量

汇聚节点平均吞吐量是指在单位时间内汇聚节点接收到的数据包的个数,如式(8)所示:

$$S_{avg} = \sum_{l=1}^R \frac{Qd_l}{t_l} \quad (8)$$

其中, $d_l$ 表示叶子节点 $l$ 需要传输到汇聚节点的数据包数量, $Q$ 表示每个数据包的大小, $t_l$ 表示叶子节点 $l$ 成功传输 $d_l$ 个数据包到汇聚节点的端到端时延总和, $R$ 表示叶子节点的数量。

## 5.3 仿真结果分析

### 5.3.1 网络拥塞的发生概率

如图2所示,随着网络中节点数量的增加,GTNCC路由协议、CNCCMC路由协议与HNCCRA算法中的网络拥塞发生概率均逐渐增大,但是,HNCCRA算法中网络拥塞发生的概率低于GTNCC路由协议与CNCCMC路由协议,至少降低了19.89%。其主要原因在于:HNCCRA算法在构建网络拓扑结构的过程中不仅考虑了节点当前队列的利用率,而且考虑了节点欲发生网络拥塞的时间,在避免选择重负载节点作为最优父节点的同时还能够避免选择负载增速较快的节点作为最优父节点,较好地均衡了网络中节点的负载。

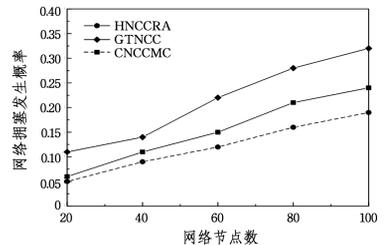


图2 网络拥塞发生概率的对比

Fig. 2 Probability comparison of network congestion

### 5.3.2 汇聚节点的平均吞吐量还同时

图3表明,随着网络规模的扩大,与GTNCC路由协议和CNCCMC路由协议相比,HNCCRA算法的汇聚节点的平均吞吐量更高,至少提高了11.35%。其主要原因在于:首先,由于汇聚节点的平均吞吐量与数据包端到端传输时延紧密相关,也即数据包端到端传输时延越小,汇聚节点的平均吞吐量就相对越高,而HNCCRA算法在构建网络拓扑结构的过程中不仅考虑了节点当前队列利用率,还考虑了节点欲发生网络拥塞的时间,因此使得其平均端到端时延比CNCCMC路由协议和GTNCC路由协议低;其次,在网络拓扑结构的创建过程中,HNCCRA算法综合考虑了节点当前队列利用率和节点欲发生网络拥塞的时间,能够降低网络拥塞现象出现的

概率,从而使得网络中节点的丢包率显著降低;最后,在数据传输过程中,当检测到出现网络拥塞时,HNCCRA 算法结合数据分流思想和更换数据传输路径的方式进行网络拥塞控制,能够快速地缓解当前的网络拥塞,从而使得丢失的数据包的数量明显减少。

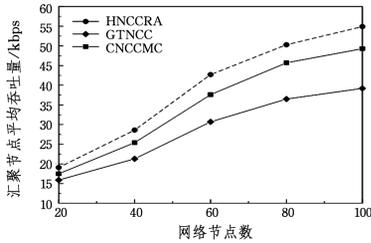


图 3 汇聚节点平均吞吐量的对比

Fig. 3 Comparison of average throughput of sink node

### 5.3.3 网络平均寿命

图 4 表明,随着网络中节点数量的增加,CNCCMC 路由协议、GTNCC 路由协议与 HNCCRA 算法的网络平均寿命均逐渐降低,但是,HNCCRA 算法的网络平均寿命更高长,至少延长了 9.75%。其原因主要有以下两点:1)在 HNCCRA 算法中,在创建网络拓扑结构时不仅考虑了节点当前队列利用率,还考虑了节点欲发生网络拥塞的时间,能够避免重负载节点的产生,从而在避免选择重负载节点作为最优父节点的同时还能够避免选择负载增速较快的节点作为最优父节点,进而均衡了节点的能耗速率;2)当检测到网络拥塞现象时,该算法结合数据分流思想和更换数据传输路径的方式进行网络拥塞控制,能够快速地缓解当前网络拥塞,从而能够在一定程度上降低网络拥塞节点的能耗。

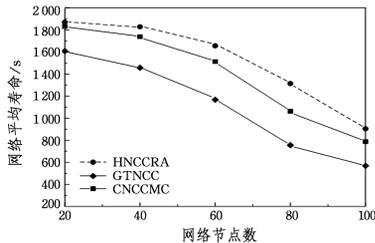


图 4 网络平均寿命的对比

Fig. 4 Comparison of average lifetime of network

**结束语** 本文针对 LLN 中现有网络拥塞控制路由算法无法高效地对当前网络拥塞进行缓解等问题,提出一种基于混合式的网络拥塞控制路由算法——HNCCRA。首先,为了有效地降低网络拥塞发生概率,在 HNCCRA 算法的组网过程中,每个节点依据其备选父节点的负载状态进行父节点的选择;其次,为了避免网络拥塞节点的子节点在更换数据传输路径时选择即将处于拥塞状态的备选父节点作为新的父节点,在 HNCCRA 算法维护网络拓扑的过程中,每个节点实时通告自身负载状态;最后,为了能够高效地对当前网络拥塞进行缓解,HNCCRA 算法结合数据分流思想和更换数据传输路径的方式进行网络拥塞控制。仿真结果表明,HNCCRA 算法能够有效地提升网络各方面的性能。

### 参考文献

[1] CHEN H M, SHI H L, LI M, et al. Service Middleware for

Internet of Things: Challenges and Approaches [J]. Chinese Journal of Computers, 2017, 40(8): 1725-1749. (in Chinese)

陈海明, 石海龙, 李勳, 等. 物联网服务中间件: 挑战与研究进展 [J]. 计算机学报, 2017, 40(8): 1725-1749.

[2] RIZZI M, FERRARI P, FLAMMINI A, et al. Evaluation of the IoT LoRaWAN Solution for Distributed Measurement Applications [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3340-3349.

[3] KHALFI B, HAMDADOU B, GUIZANI M. Extracting and Exploiting Inherent Sparsity for Efficient IoT Support in 5G: Challenges and Potential Solutions [J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(5): 68-73.

[4] KIM H S, KIM H, LEE M S, et al. A measurement study of TCP over RPL in low-power and lossy networks [J]. Journal of Communications and Networks, 2015, 17(6): 647-655.

[5] PAEK J. Fast and Adaptive Mesh Access Control in Low-Power and Lossy Networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2015, 2(5): 435-444.

[6] LIU X, SHENG Z, YIN C, et al. Performance analysis of Routing Protocol for Low power and Lossy Networks (RPL) in large scale networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 4(6): 2172-2185.

[7] WINTER T, THUBERT P, BRANDT A, et al. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and lossy networks; RFC 6550 [S]. IETF, 2012: 1-157.

[8] WAN C Y, EISENMAN S B, CAMPBELL A T. Energy-efficient congestion detection and avoidance in sensor networks [J]. ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN), 2011, 7(4): 1-32.

[9] DESHPANDE V S, CHAVAN P P, WADHAI V M, et al. Congestion control in Wireless Sensor Networks by using Differed Reporting Rate [C] // Proceedings of the 2012 2nd World Congress on Information and Communication Technologies (WICT), Trivandrum; IEEE Press, 2012: 209-213.

[10] JIN J, PALANISWAMI M, KRISHNAMACHARI B. Rate control for heterogeneous wireless sensor networks: characterization, algorithms and performance [J]. Computer Networks, 2012, 56(17): 3783-3794.

[11] 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.

[12] DJAMAA B, RICHARDSON M. Optimizing the Trickle Algorithm [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(5): 819-822.

[13] MA C, SHEU J P, HSU C X. A game theory based congestion control protocol for wireless personal area networks [J/OL]. Journal of Sensors. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6168535>.

[14] YAO Y K, LIU J B, REN Z, et al. High-Efficient RPL routing protocol for centralized network congestion control [J]. Systems Engineering and Electronics, 2017, 39(12): 2810-2816. (in Chinese)

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.