



节点移动处理的高效 RPL 路由协议

徐会彬

(湖州师范学院, 浙江 湖州 313000)

摘要: 针对低功耗有损网络 (low-power and lossy network, LLN) 的节点移动问题, 提出基于博弈论自适应调整传输速率的移动 RPL 路由 (GT-mRPL)。GT-mRPL 路由通过博弈论传输速率, 进而获取高的数据分组传递率和吞吐量。在移动环境中, 将节点竞争发送数据过程设计成一个游戏。将通过增加传输率所获取的增益 (效用函数) 与因节点移动而产生的成本 (移动函数) 的比值看成收益函数。同时, 考虑能耗对收益函数的影响。仿真结果表明, 在移动环境下, 提出的 GT-mRPL 路由降低了数据分组丢失率, 提高了吞吐量。

关键词: 低功耗有损网络; RPL; 移动; 博弈论; 收益函数

中图分类号: TN939.5

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019164

High-efficient RPL routing for analyzing mobility of nodes

XU Huibin

Huzhou University, Huzhou 313000, China

Abstract: To deal with the mobility of nodes in low-power and lossy network(LLN), the adaptive transmission rate based game-theory mobile RPL (GT-mRPL) was proposed. GT-mRPL uses variable transmission rate-based game theory to achieve higher packet delivery ratio and better throughput. In a mobile environment, a game was designed for nodes competing to send data. The payoff function was defined to assess the profit gained from increasing data transmission rate (utility function) against the cost induced by the presence of mobile nodes (mobility function). Other factor was also taken into account in formulating the payoff function including the energy consumption. Simulation results show that in the presence of mobility, GT-mRPL reduces the packet lost ratio and improves the throughput.

Key words: low-power and lossy network, RPL, mobility, game theory, payoff function

1 引言

作为无线传感器网络 (wireless sensor network, WSN) 的特例^[1], 低功耗有损网络 (low-power lossy network, LLN)^[2] 已在健康医疗、城市交通和环

境监测等领域使用, 其相关研究也得到广泛关注。随着应用领域的不断拓展, LLN 也面临技术挑战。节点移动性是 LLN 必须解决的技术挑战^[3]。例如, 在医院网络内, 安装在病人身上的设备 (传感节点) 需连接到网络^[4], 而病人具有移动性, 因此,

收稿日期: 2018-11-23; 修回日期: 2019-05-31

基金项目: 湖州师范学院博士启动基金项目 (No.RK24051)

Foundation Item: The Doctor Start-up Foundation of Huzhou University(No.RK24051)

这些传感节点表现出移动性。

目前,研究人员已对 LLN 的能效和数据传输的可靠性方面进行了深入研究,如 IPv6 路由^[5]、ORPL^[6]。这些路由协议在时延、能量消耗和可靠性方面的性能均优于 LLN 的路由协议(routing protocol for LLN, RPL)。然而,这些协议不能有效地应对具有移动性的 LLN,它们并没有对移动节点有针对性地操作,也没有讨论如何识别移动节点^[7-9]。参考文献[7-9]证实,针对静态网络设计的协议(如 RPL),当面临移动节点的网络时,网络性能急剧下降。例如,参考文献[10]提出一种 RPL 多路径路由策略,并通过链路质量、节点能量进行决策路由,但是它没有考虑节点的移动问题。

参考文献[10-11]研究了 LLN 节点移动问题。参考文献[10]考虑了节点移动问题,但是其并没有因为节点移动调整数据传输率。而参考文献[11]提出了按需自组织距离矢量路由(LLN on-demand Ad-Hoc distance-vector routing, LOAD)协议,它为移动节点提供了无缝连接。然而,这些协议也存在一些不足:没有考虑周期性工作(duty-cycling, DC)无线电,而 DC 是 LLN 最重要的特性,其可以有效地降低节点的能耗;未及时地更新因节点移动而产生的动态拓扑信息。

实际上,依据节点的移动调整节点的传输速率,能应对因节点移动而产生的网络断裂问题。为此,提出基于博弈论(game-theory, GT)的自适应传输速率调整算法,再将该算法应用于移动 RPL 路由协议,形成 GT-mRPL 路由。仿真结果表明,提出的 GT-mRPL 路由提高了数据分组传递率,并能有效地处理 RPL 的移动问题。

2 网络模型

考虑如图 1 所示的网络模型。网络内有 1 个静态的信宿(sink)、 n 个静态节点和 m 个移动节点,其中 sink 作为网关,连接外网。通过部署 n 个

静态节点维持网络的基本连通,使得网络具有更好的覆盖性。

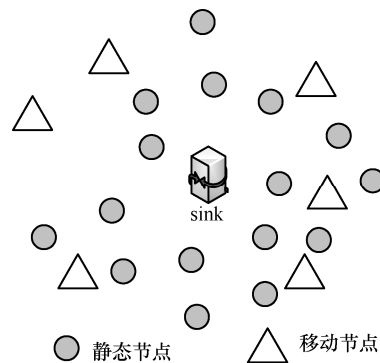


图 1 网络模型

博弈理论^[12]主要涉及玩家(player)、策略(strategy)以及收益函数(payoff-function)。令 $\Gamma = (N, S, \psi)$ 表示博弈论,其中 N 为玩家数、 S 为策略集、 ψ 为收益函数。而策略是由多个动作构成的。

对于第 k 个玩家 p_k ,其中 $k \in N$ 。令 s_k 、 ψ_k 分别表示它的策略矢量、收益函数。每个玩家的收益函数表示采取了一个动作所付出的成本。在博弈论中,玩家采用的动作影响其他玩家的效用函数(utility function)。而动作包括改变数据传输率、改变父节点、设置 trickle 和调整传输功率。图 2 表述了如何将博弈论引入 RPL 的关系。

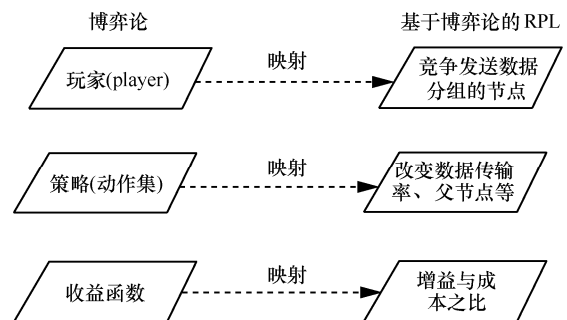


图 2 将博弈论映射到 RPL

3 基于博弈论的传输率的均衡

3.1 玩家

玩家表示竞争发送数据分组的节点。



$P = p_1, p_2, \dots, p_k, \dots, p_N$ 。每个玩家 p_k 以 $[0, \lambda_{\max}]$ 发送数据, 其中 $\lambda_{\max}$ 表示最大的数据传输率。

3.2 策略 (动作集)

每个节点可采用多个动作, 其维持可能动作集矢量 $A = (A_1, \dots, A_k, \dots, A_N)$, 其中 $A_k = [0, \lambda_{\max}]$ 代表玩家 p_k 的策略空间, 且 $A = \prod_{k=1}^N A_k$ 。

3.3 收益函数

玩家 p_k 的收益函数 ψ_k 定义为玩家 p_k 在移动环境中以 λ_k 向 sink 传输数据的成本。具体而言, 收益函数 ψ_k 包括效用函数、因移动而产生的成本、能效成本。

3.3.1 效用函数

令 U_k 表示玩家 p_k 实施动作 A_k 所获取的益处, 其反映了玩家通过增加传输率 λ_k 的增益, 其目的在于最大化吞吐量。效用函数的定义如式(3)所示:

$$U_k = \lg(\lambda_k + C) \quad (3)$$

其中, C 是常数, 使得 U_k 总是维持一个确定的值。若不引用安全常数, 则当 $\lambda = 0$ 时, $U_k \rightarrow \infty$ 。每个玩家的利益就是增加传输率, 进而最大化效用函数, 最终获利。

3.3.2 移动函数

通过移动函数测量因移动产生的成本。为了能够有效地测量移动, 用平均接收分组信号强度指标 (received signal strength indication, RSSI) 和链路质量指标 (link quality indication, LQI) 估计链路质量成本 (link quality cost, LQ) [11]。

同时, 本文引用随机点移动模型 (random waypoint mobility model), 其能够反映 WSN 和 IoT 中节点实际移动行为 [13-14]。

因此, 依据随机点移动模型, 建立玩家 p_k 的移动函数 M_k :

$$M_k = M_m \cdot LQ \cdot \lambda_k \quad (4)$$

其中, λ_k 为系统参数, 而 M_m 为移动指标, LQ 为链路质量成本。

(1) LQ

随着芯片技术的不断进步, 多数传感节点均能支持 RSSI 和 LQI 这两个参数值。例如, CC2420 模块在 MAC 层的帧校验域内携带了 RSSI 和 LQI 值, 如图 3 所示。

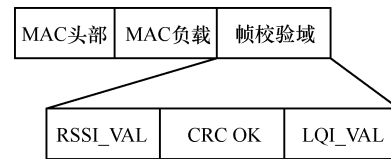


图3 CC2420 模块的帧校验域

依据 IEEE802.15.4 协议, 通过接收的报文中 8 个符号的能量平均值计算 RSSI 值, 其取值范围在 $-100 \sim 0$ dBm。而 LQI 是底层射频芯片 DSSS-OQPSK 调制码片的差错率, 其取值一般在 $50 \sim 110$ 。该值越大, 帧交互过程越顺利, 链路质量越好。

本文利用 RSSI 和 LQI 这两项信息估计 LQ 值。依据参考文献[15]的分析, 当 LQI 不小于 255 时, 链路质量最优; 当 LQI 小于 165 时, 链路质量差。而当 LQI 在 $165 \sim 255$ 时, 仅依据 LQI 这项信息难以表征链路质量, 属于不确定区域, 见表 1。

表1 依据 LQI 的链路分类

LQI 标准	链路质量评价
LQI=255	链路质量很好, 可使用该链路传输数据
$165 < \text{LQI} < 255$	链路质量不确定, 没有足够的信息评价链路质量
$\text{LQI} \leq 165$	链路质量差, 不建议用该链路传输数据

为此, 本文先依据 LQI 设定离散的 LQ 值。LQ 值越小, 链路质量越好。因此, 当 LQI 不小于 255 时, $LQ=0.1$; 当 LQI 小于 165 时, $LQ=0.9$; 而在不确定区域内, 就依据 RSSI 信息, 设置 LQ 值。依据 RSSI 与数据分组传递率 (packet delivery ratio, PDR) 关系 [15], 当 RSSI 值大于 -74 dBm 时, 链路质量较好; 而当 RSSI 值小于 -91 dBm 时, 链路质量差。

综上所述, LQ 值定义如式 (5) 所示:

$$LQ = \begin{cases} 0.1, LQI \geq 255 \\ 0.2, 165 < LQI < 255, RSSI > -74 \text{ dBm} \\ 0.4, 165 < LQI < 255, -91 \text{ dBm} < RSSI < -74 \text{ dBm} \\ 0.7, 165 < LQI < 255, RSSI < -91 \text{ dBm} \\ 0.9, LQI < 165 \end{cases} \quad (5)$$

(2) M_m

M_m 为移动指标, 其反映了节点的移动情况, 定义如式(6)所示:

$$M_m = \frac{1}{|N|} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{1}{T} \int_0^T |V_i(t) - V_j(t)| dt \quad (6)$$

其中, N 为 RPL 拓扑内的总的节点数, T 为总的运行时间, 单位为 s。 $|V_i(t) - V_j(t)|$ 表示在时刻 t , 两节点 i 、 j 速度差^[16]。当然, 依据节点的实际移动情况, 难以计算移动指标 M_m 。为此, 依据基于 Bonnmotion^[16] 的通用移动场景计算移动指标 M_m , 其中 Bonnmotion 是产生移动场景的工具。

3.3.3 能效函数

能耗是多数物联网应用中最重要指标。节点的能耗受多方面因素影响。其中数据传输率、网络节点密度对节点能耗有直接的影响。传输速率越高, 节点在单位时间内传输的数据分组数就越多, 能耗也就越高。而节点密度越高, 节点需要转发的数据分组越多, 能耗也自然增加。此外, 高的节点密度也会增加数据传输碰撞概率, 提高数据分组重传次数, 最终也增加了节点的能耗。

据于上述分析, 将节点传输速率 λ 和节点密度纳入能耗函数。因此, 玩家 p_k 的能耗函数 E_k 定义如(7)所示:

$$E_k = \rho_n \lambda_k \quad (7)$$

其中, ρ_n 表示节点所在区域的节点密度。

引用参考文献[17]的公式, 节点密度 ρ_n , 如式(8)所示:

$$\rho_n = \frac{|N| \pi R^2}{A} \quad (8)$$

其中, N 为节点数, R 为节点传输半径, A 为部

署区域面积。

最终, 可得玩家 p_k 的效用函数 ψ_k , 如式(9)所示:

$$\begin{aligned} \psi_k &= \alpha U_k - \beta M_k - \gamma E_k \\ &= \alpha \lg(\lambda_k + C) - \beta M_n \cdot LQ \cdot \lambda_k - \gamma \rho_n \lambda_k \end{aligned} \quad (9)$$

其中, α 、 β 和 γ 为权重因子。

3.4 基于 Lagrangian 函数的最优传输速率

通过选用最优策略, 进而可最大化效用函数 ψ_k 。即选择最优的传输速率 λ_k^* , 使得效用函数 ψ_k 最大化, 且 $\lambda_k^* \in S$ 。为此, 利用 Lagrangian 函数求解最优 λ_k^* 值。

先建立 Lagrangian 函数, 如式(10)所示:

$$L_k = \psi_k + \mu_k \lambda_k + \nu_k (\lambda_k^{\max} - \lambda_k) \quad (10)$$

其中, μ_k 和 ν_k 均为 Lagrangian 乘子。

利用 Karush-Kuhn-Tucker (KKT)^[18] 条件, 将 Lagrangian 函数的最大化问题转化为:

$$\mu_k, \nu_k \geq 0 \quad (11)$$

$$\lambda_k \geq 0 \quad (12)$$

$$\lambda_k^{\max} - \lambda_k \geq 0 \quad (13)$$

$$\nabla_{\lambda_k} \psi_k + \mu_k \nabla_{\lambda_k} + \nu_k \nabla_{\lambda_k} (\lambda_k^{\max} - \lambda_k) = 0 \quad (14)$$

$$\mu_k, \nu_k (\lambda_k^{\max} - \lambda_k) \geq 0 \quad (15)$$

通过式(11)~式(15)求解, 便可得到最优的 λ_k^* 值, 其中 $\lambda_k^{\max}$ 表示最大传输速率。

4 性能分析

4.1 仿真环境及参数

本节就分析 GT-mRPL 协议的性能。此外, 选用 RPL^[8] 和 mRPL^[10] 协议作为参照。RPL 协议没有考虑节点移动, 但它仍是 LLN 的基本协议。尽管 mRPL 协议考虑了节点移动, 但是它采用固定的传输率, 并没有依据节点移动而调整传输率。

选择约 1 600 m² 的康复医疗区域 Ω 进行仿真, 如图 4 所示。在整个区域内部署 11 个传感节点和一个信宿, 其中 3 个传感节点作为静态节点,

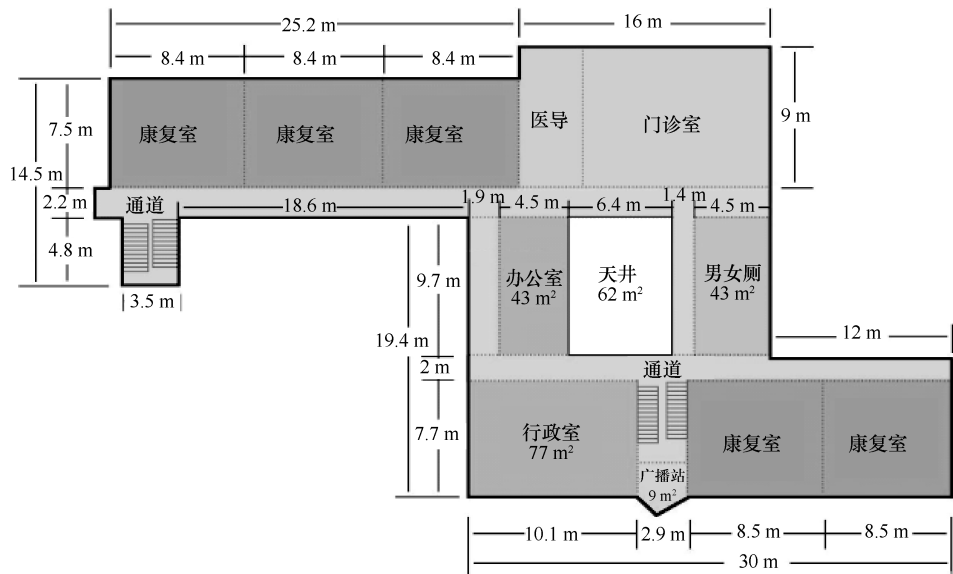


图4 典型的康复医疗楼单元

通过它们提高网络覆盖率，剩余的 8 个传感节点作为移动节点。即 $n=3$ ， $m=8$ 。

给 11 个传感节点分配 ID,3 个静态节点的 ID 分别为 2、3、4。而 8 个移动节点的 ID 分别为 5、6、7、8、9、10、11 和 12。节点传输范围为 20 m，具体的仿真参数见表 2。

表 2 仿真参数		
变量	符号	值
仿真区域	Ω	1600m2
静态节点	n	3
移动节点	m	8
传输半径	r	20 m
无线电	Radio	CC2420
权重因子	α, β, γ	4.7, 1, 0.05
节点密度	ρ_n	9.42
移动指标	M_n	0.725
常数	C	0.1

由于是基于康复医疗区域进行仿真，传感节点产生数据分组的频率，即数据分组产生率并不高。因此，在仿真过程中，分别考虑 $\lambda_k^{\max}=2 \text{ packet/s}$ (场景 1) 和 $\lambda_k^{\max}=4 \text{ packet/s}$ (场景 2) 两种场景。例如， $\lambda_k^{\max}=2 \text{ packet/s}$ 表示每秒产生两个数据分

组，且数据分组大小为 512 byte。场景 2 环境下的网络负载是场景 1 环境下的两倍。通过考虑这两个场景分析路由随网络负载变化的数据传输性能，包括数据分组传递率和吞吐量。

数据分组产生率越高，网络内需要传输、处理的数据越多，即网络负载越重。在网络可以承载的负载范围内，网络吞吐量随着数据分组产生率的增加而上升。当网络负载过重，导致网络无法承受，形成网络拥塞，反而降低吞吐量。

而数据分组产生率越高，并不能有效地提高数据分组传递率，反而降低数据分组传递率。原因在于：数据分组产生率越高，网络内需要传输的数据越多，信道资源竞争越激烈，进而降低了数据分组传递率。

此外，选用 Contiki2.7 操作系统^[19]和 Cooja^[20]仿真器。Cooja 仿真器支持应用级别的仿真，其采用了接口和插件。而每个接口呈现了传感节点属性。

4.2 数据分析

4.2.1 数据分组传输率

首先，分析 11 个节点的数据分组传输率情况。考虑两种情况： $\lambda_k^{\max}=2 \text{ packet/s}$ 和 $\lambda_k^{\max}=4 \text{ packet/s}$ 。

在基于康复医疗区域的仿真环境下,数据分组传输率本身并不高,并结合参考文献[8]和参考文献[10]中对数据分组传输率的设置,才考虑了 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 或 4 packet/s 两个环境。

图5显示了11个传感节点的数据分组传递率。3个协议(GT-mRPL、mRPL、RPL)中3个静态节点的数据分组传递率较高,均在88%以上。但是,3个协议的移动节点的数据分组传递率出现分化。GT-mRPL路由的数据分组传递率最高,高于mRPL和RPL协议。例如,在 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s时,GT-mRPL路由和mRPL路由中移动节点的数据分组传递率仍维持在88%。但RPL协议的移动节点的数据分组传输率分别降至48%,下降了47%。

在 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 和 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s 两种情况下,GT-mRPL路由的数据分组传递率相近。但是,mRPL协议在 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s的数据分组传递率比在 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s的数据分组传递率下降。这说明,mRPL协议对节点移动问题不具有强的稳健性。

4.2.2 吞吐量

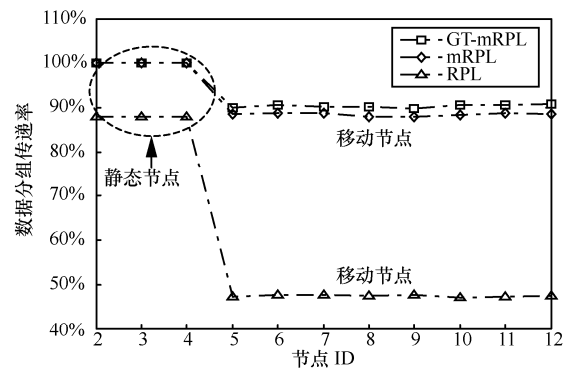
接下来,分析11个节点的吞吐量。同样考虑两种情况: $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 和 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s,仿真结果如图6所示。

从图6可知,当 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s时,相比于mRPL协议,尽管GT-mRPL路由的吞吐量并不存在优势,但是mRPL协议并没有优化传输率,而RPL协议的吞吐量最低。这说明,节点的移动对系统性能有重要影响。

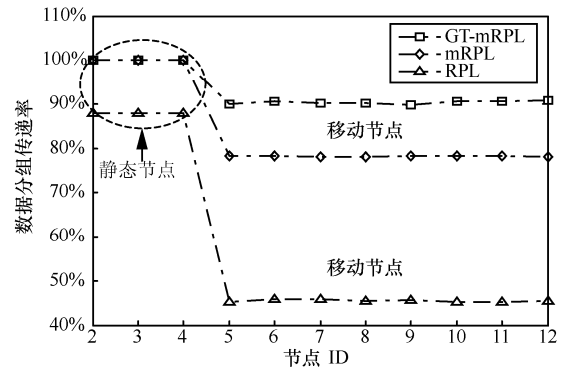
对比图6(a)和图6(b)不难发现, $\lambda_k^{\max}$ 的增加有利于提高系统吞吐量。例如,当 $\lambda_k^{\max}$ 从2 packet/s变化至4 packet/s时,GT-mRPL路由中移动节点的吞吐量从112 bit/s提升至200 bit/s。

4.2.3 能量消耗

接下来,分析每传输一个数据分组所消耗的能量。同样考虑两种情况: $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 和 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s。

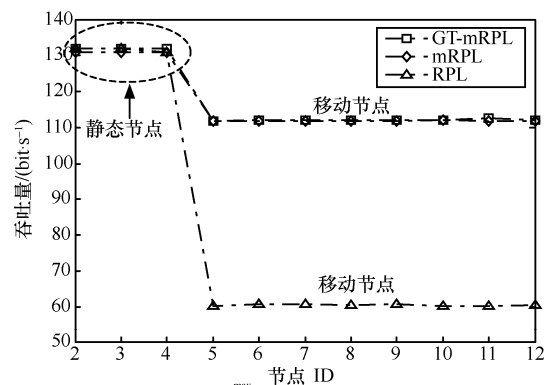


(a) $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 时数据分组传递率

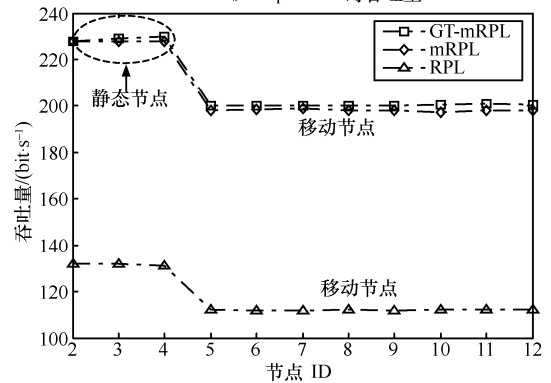


(b) $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s 时数据分组传递率

图5 数据分组传递率



(a) $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 时吞吐量



(b) $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s 时吞吐量

图6 吞吐量



图 7 显示了各节点每传输一个数据分组所消耗的能量。从图 7 可知, RPL 协议的能耗最大。原因在于: RPL 的数据分组传递率最低, 它需要多次重传才能成功传输一个数据分组, 这就增加了每传输一个数据分组所消耗的能量。

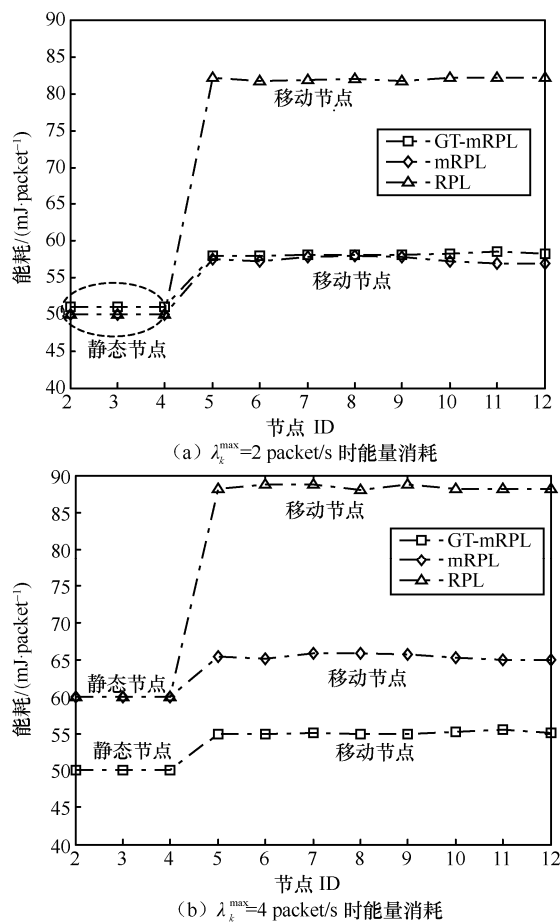


图 7 能量消耗

在 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 时, mRPL 协议与 GT-mRPL 协议具有相同能耗。但是, 在 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s 时, GT-mRPL 协议的能耗比 mRPL 协议的能耗降低约 16%。原因在于: mRPL 协议的数据分组传输率下降, 需要多次才能成功传输一个数据分组。

4.2.4 数据传输时延

最后, 分析各协议数据分组的平均传输时延。同样考虑两种情况: $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 和 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s, 分析结果见表 3。

表 3 协议的端到端传输时延

$\lambda_k^{\max}$	PPL	mRPL	GT-mRPL
2	5.7 s	4.15 s	4.15 s
4	5.8 s	5.6 s	4.9 s

从表 3 可知, 在 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 时, mRPL 协议与 GT-mRPL 协议的传输时延相近。这主要是因为: 节点数、传输频率不高, 不足以增加 LQ 成本。然而, 当 $\lambda_k^{\max}$ 增加至 4 packet/s 时, GT-mRPL 协议的传输时延比 mRPL 协议的传输时延下降了约 16%。而 RPL 协议的传输时延较高, 在两种速率环境下, 传输时延均大于 5 s。原因在于: RPL 协议没有考虑到节点的移动问题, 降低了路由的稳定性。

此外, 从表 3 可知, 3 个路由协议的传输时延在 4~5 s 上下波动。原因在于: 仿真区域是在室内多径环境 (如图 4 所示)。在室内的多径环境下, 信号衰落快, 信号可能需要经过多次反射或折射才能传输至目的节点, 这增加了传输时延。

5 结束语

针对 LLN 的节点移动问题, 提出基于博弈论的 GT-mRPL 路由。GT-mRPL 路由利用博弈论调整移动节点的传输速率, 进而处理节点的移动问题。仿真结果表明, GT-mRPL 能够有效处理节点的移动。相比于 RPL, GT-mRPL 路由的吞吐量提高了 10%, 能耗降低了近 10%。

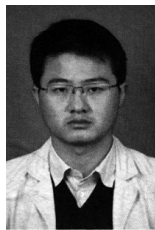
后期, 将进一步优化算法, 并分析 GT-mRPL 的复杂度。并扩展 GT-mRPL 应用场景, 如车联网。此外, 在仿真中只考虑了 $\lambda_k^{\max}=2$ packet/s 和 $\lambda_k^{\max}=4$ packet/s 这两种情况, 后期可分析 $\lambda_k^{\max}$ 对路由性能的影响, 这将是未来的研究内容之一。

参考文献:

- [1] 宋朝, 郑迎凤, 赵文彬. 一种有效的稀疏无线传感网络路由方案[J]. 电信科学, 2016, 32(4): 59-64.
SONG C, ZHENG Y F, ZHAO W B. An effective routing scheme of sparse wireless sensor networks[J]. Telecommunica-

- tions Science, 2016, 32(4): 59-64.
- [2] 姚玉坤, 刘江兵, 李小勇, 等. LLN 中基于环路避免的高效路由修复算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(5): 1135-1142.
YAO Y K, LIU J B, LI X Y, et al. Highly-efficient routing repair algorithm based on loop-free for LLN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(5): 1135-1142.
- [3] 姚玉坤, 刘江兵, 李小勇. 基于簇父集协作通信的低功耗有损网络路由算法优化[J]. 计算机应用, 2017, 37(5): 1300-1305.
YAO Y K, LIU J B, LI X Y. Optimized routing algorithm based on cooperative communication of cluster parent set for low power and lossy network[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(5): 1300-1305.
- [4] 冯馨于, 仇英辉. 基于剩余级别负载均衡的 RPL 路由协议[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4): 607-613.
FENG X Y, QIU Y H. The RPL routing protocol based on load balance of remaining level[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(4): 607-613.
- [5] TIAN B, HOU K M, SHI H, et al. Application of modified RPL under VANET-WSN communication architecture[C]//5th International Conference on Computational & Information Sciences, June 21-23, 2013, Shiyang, China. Washington: IEEE Computer Society, 2013: 1467-1470.
- [6] COBARZAN C, MONTAVONT J, NOEL T. Analysis and performance evaluation of RPL under mobility[C]//IEEE Symposium on Computers & Communication (ISCC), June 23-26, 2014, Funchal, Madeira, Portugal. Washington: IEEE Computer Society, 2014: 1-6.
- [7] GADDOUR O, KOUBÂA A, ABID M. Quality-of-service aware routing for static and mobile IPv6-based low-power and lossy sensor networks using RPL[J]. Ad Hoc Networks, 2015(33): 233-256.
- [8] GARA F, SAAD L B, AYED R B. RPL protocol adapted for healthcare and medical applications[C]// International Wireless Communication Mobile Computing Conference (IWCMC), August 24-28, 2015, Dubrovnik, Croatia. Piscataway: IEEE Press, 2015: 690-695.
- [9] 刘东东, 李勇, 徐栋. 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.
LIU D D, LI Y, XU D. A load balance-based multi-path data transmission mechanism for RPL[J]. Computer Engineering, 2019, 45(1): 67-72, 77.
- [10] FOTOUHI H, MOREIRA D, ALVES M. mRPL: boosting mobility in the internet of things[J]. Ad Hoc Networks, 2015, 26(4): 17-35.
- [11] ANAND M R, TAHILIANI M P. mRPL+: Smarter-hop for optimizing mobility in RPL[C]//IEEE Region 10 Symposium (TENSYP), May 9-11, 2016, Bali, Indonesia. Piscataway: IEEE Press, 2016: 36-41.
- [12] 姚天, 张晖. 面向蜂窝-D2D 混合场景的双层博弈匹配算法[J]. 电信科学, 2018, 34(1): 43-51.
YAO T, ZHANG H. A bilevel game matching algorithm in cellular-D2D hybrid scenario[J]. Telecommunications Science, 2018, 34(1): 43-51.
- [13] AL-NIDAWI Y, YAHYA H. Tackling mobility in low latency deterministic multihop IEEE 802.15. 4e sensor network[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(3): 1412-1427.
- [14] AL-NIDAWI Y, YAHYA H, KEMP A H. Impact of mobility on the IoT MAC infrastructure: IEEE 802.15. 4e TSCH and LLDN platform[C]//IEEE 2nd World Forum Internet Things (WF-IoT), December 14-16, Milan, Italy. Piscataway: IEEE Press, 2015: 478-483.
- [15] HENRY J, MARTIN H. Quick and efficient link quality estimation in wireless sensor networks[C]//2018 14th Annual Conference on Wireless On-demand Network System and Service, Feb 6-8, 2018, Wengen, Switzerland. Piscataway: IEEE Press, 2018: 86-90.
- [16] HARITH K, HAYDER A. A game theoretic optimization of RPL for mobile internet of things applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(6): 2520-2530.
- [17] ASCHENBRUCK N, ERNST R, GERHARDS-PADILLA E, et al. Bonnmotion: a mobility scenario generation and analysis tool[C]//the 3rd International ICST Conference on Simulation Tools and Techniques, March 15 - 19, 2010, Torremolinos, Malaga, Spain. New York: ACM Press, 2010.
- [18] KUHN H, TUCKER A. Nonlinear programming[C]//2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics Probability. California, USA. California: University of California Press, 1951: 481-492.
- [19] DUNKELS A, GRONVALL B, VOIGT T. Contiki-a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors[C]//29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, Nov 16-18, 2004, Tampa, USA. Piscataway: IEEE Press, 2004: 455-462.
- [20] OSTERLIND F, DUNKELS A, ERIKSSON J. Crosslevel sensor network simulation with cooja[C]//31st IEEE Conference Local Computer Network, Nov 14-16, 2006, Tampa, USA. Piscataway: IEEE Press, 2006: 641-648.

[作者简介]



徐会彬 (1982—), 男, 湖州师范学院博士生、讲师, 主要研究方向为车载网络路由协议、安全隐私、超宽带通信定位等。