

基于可靠路径稳定性估计的 MANET 路由发现算法研究

李智楠¹, 杨晓冬^{1,2}

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 日本明星大学联合研究中心, 日本 东京 191-8506)

摘 要: 提出一种基于可靠路径剩余生存期 (RPL, residual path lifetime) 估计的 MANET 路由发现算法 (RLE-RPLP), 该算法充分考虑相邻链路剩余生存期相关性, 建立优化的多跳路径 RPL 统计特性分析, 提供了更可靠的路由稳定性评估。通过仿真分别与忽略链路 RLL 相关性的源路由协议及已有稳定性路由协议进行对比。仿真结果表明, RLE-RPLP 算法能有效提高网络吞吐量并减少路由重建次数; 当节点移动度较高或网络负载较大时, 在吞吐量、路由开销等方面均优于已有的稳定性路由对比算法。

关键词: 移动 ad hoc 网络; 链路剩余生存期; 移动相关性; 路径剩余生存期; 稳定性估计

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

Routing discovery algorithm based on reliable path stability estimation in MANET

LI Zhi-nan¹, YANG Xiao-dong^{1,2}

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Collaborative Research Center, Meisei University, Tokyo 191-8506, Japan)

Abstract: A novel routing discovery algorithm for MANETs was proposed based on reliable residual path lifetime (RPL) prediction (RLE-RPLP). Correlation between residual link lifetime (RLL) of neighboring links was explicitly investigated and fully taken into account in stability estimation of multi-hop paths in the algorithm. Optimized RPL statistical properties were further explored to offer a more reliable path stability metric. Simulation analysis demonstrates that the proposed RLE-RPLP routing discovery algorithm shows prominent superiority in improving network throughput and reducing route reconstruction frequency. Moreover, compared with the existing link stability-aware routing protocol, the RLE-RPLP achieves better performance improvement in terms of throughput and routing overhead.

Key words: MANET, residual link lifetime, mobility correlation, residual path lifetime, stability estimation

1 引言

移动 ad hoc 网络 (MANET) 摒弃了蜂窝网络昂贵的底层基站及相关基础设施建设, 实现了移动节点分布式动态组网、自主处理的优越性能。节点间路径可靠性评估是决定 MANET 路由优化算法有效性及网络连通性的关键因素之一。由于 MANET 网络节点移动特性, 多跳路径都具备一定的路径剩余生存期 (RPL, residual path lifetime)^[1], 即从路径建立或传输过程中某时刻至构成该路径的任一条链路初次发生中断的时间间隔。在主动式路由机制 (proactive routing protocols) 中, 准确估计 RPL

可使算法在路径中断之前启动新的路径发现进程来保证节点间数据尤其是数据流业务的传输连续性; 在反应式路由机制 (reactive routing protocols) 中, RPL 的过高估计会导致路由算法频繁地启动路由修复或重建进程, 降低网络通信质量, 增加传输延时和资源消耗。因此, 可靠的 RPL 估计是 MANET 路由机制优化和完善的关键因素。

文献[1~8]提出了基于可靠路径估计的路由策略。而作为多跳路径构成基础的链路剩余生存期 (RLL, residual link lifetime) 估计理论也得到深入探讨^[9~13]。越来越多的路由优化策略及 MANET 现实应用^[4,5,14]侧重于 RLL 统计特性^[1,15,16]描述, 但相

邻链路 RLL 相关性对路径稳定性评估的影响还没有得到足够重视。

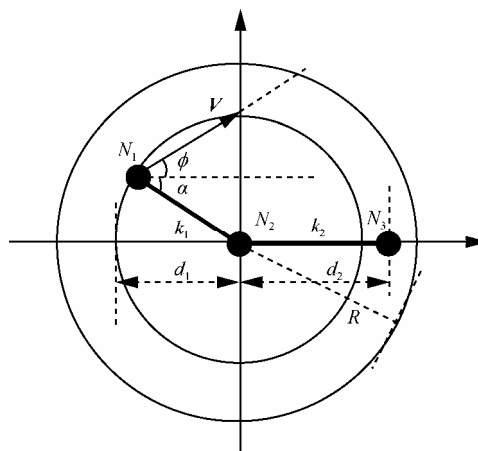
文献[16]在文献[15]的基础上指出,路径生存期可以表示为各条链路生存期倒数之和,但两者均以链路独立性为前提。文献[1]将上述条件改进为一种渐进性条件,即 RLL 相关性会随路径跳数及平均链路长度的增加而减弱。然而以该理论为基础的 RPL 估计算法,并不适用于对路径跳数有严格限制的普遍情况。文献[4]提出了详细的链路及路径持续时间的理论分析模型,但推导设定所有节点移动速率相等且为常量,限制了理论实用性且很大程度上降低了相邻链路相关性约束。上述 RPL 预测的问题也同样存在于 ad hoc 网络的实际扩展应用场景中,如 VANET^[5,17]、车联网系统 (connected vehicles)^[18]及航空通信网络^[14,19]。文献[20]强调了 RLL 相关性的重要意义并将其用于平均路径生存期估计 PDMP (piecewise deterministic Markov process) 理论建模当中,然而离散的节点运动参数(速率和移动方向)必须作为满足数值分析的限制条件,同样不符合实际情况。

为了在路由机制中充分引入相邻链路 RLL 相关性进而提供更准确的路径可靠性评估标准,本文首先提出了一种 RLL 相关性统计建模方法,在节点移动模型不受限的情况下给出多跳路径中各链路 RLL 联合概率密度分布 (PDF) 表达式,在此基础上提出一种基于可靠 RPL 估计的路由发现算法 (RLE-RPLP),该算法完善了路由发现进程中路径 RPL 的判断标准,因而能够减少路由失效频率。仿真分析将 RLE-RPLP 与另外 2 种路由算法进行对比,分别为忽略链路 RLL 相关性条件下的源路由协议及文献[19]提出的稳定性路由协议。通过性能对比验证了 RLE-RPLP 在提高网络吞吐量、减少路由重建次数及路由开销方面的有效性以及对基于路径稳定性路由算法的优化作用。

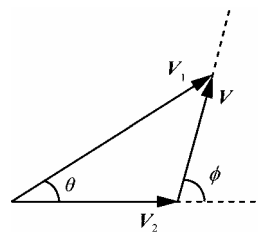
2 基于 RLL 相关性的 RPL 统计特性分析

由于节点共享,MANET 同一路径中相邻链路 RLL 相关性是 RPL 估计的关键因素。文献[20]强调并验证了这一观点。本文提出一种链路 RLL 相关性统计建模方法,利用随机理论给出多跳路径中各链路 RLL 联合 PDF 明确表达式,该方法不以特定的节点移动模型为限制,为路径稳定性提供更可靠的评估参考。

首先构建简化路由模型,如图 1(a)所示,并简要证明相邻链路 RLL 相关性。设节点 N_1 、 N_2 、 N_3 构成 2 条相邻链路 $k_1(N_1-N_2)$ 、 $k_2(N_2-N_3)$ 。某时刻 N_i 移动速率 V_i 及方向 θ_i 任意。实际上链路 RLL 主要受限于其 2 个端节点的剩余能量和两者相对距离,显然,若图 1 中仅 N_1 或 N_3 变化, k_1 和 k_2 的 RLL 不会同时受到影响;而若 k_1 和 k_2 的共享节点 N_2 能量消耗或随机移动,都会同时导致两者 RLL 发生变化,因此 k_1 、 k_2 的 RLL 的 PDF 相关性普遍存在。本文着重对节点随机移动引起的相邻链路 RLL 相关性进行分析并应用于路由优化策略。



(a) 三节点路径移动模型



(b) N_1 、 N_2 速率参数关系

图 1 子镜头分割流程

首先推导链路 k_1 剩余生存期 RLL_1 的 PDF 表达式。如图 1 所示,设 R 为节点传输半径, N_2 为坐标参考点, V_2 平行于正 x 轴。初始时刻 ($t=0$) N_1 位置与 N_2 距离为 $d_1(d_1 < R)$,与负 x 轴夹角为 α 且 α 服从 $(0,2\pi)$ 均匀分布 ($\alpha \sim U(0,2\pi)$)。若某时刻 t_1 ,两节点间距首次超过 R ,则链路中断, $RLL_1 = T_1 = t_1$ 。 θ 为 V_1 与 V_2 夹角且 $\theta \sim U(-\pi, \pi)$; $f_{\theta}(\vartheta) = \frac{1}{2\pi}$, $V_{\min} \leq V_1, V_2 \leq V_{\max}$; $V_d = V_{\max} - V_{\min}$ 。

显然, V_1 、 V_2 、 θ 相互独立,有

$$f_{V_1, \theta}(v_1, \vartheta) = \frac{f_{V_1}(v_1)}{2\pi}$$

其中, v_1 、 θ 分别代表随机变量 V_1 、 θ 某一特定取值(下同), V 、 ϕ 分别表示 N_1 、 N_2 间相对速度及 V 与 x 轴的夹角, $\phi \in (-\pi, \pi)$ 。文献[19]中首先给出三维空间中 2 相邻节点相对速率的 PDF 表达式, 进而推导出链路生存期的累积概率密度分布(CDF)和单条链路生存期期望值。上述推导均以 V 与 ϕ 相互独立为前提, 而实际上两者存在统计相关性且不可忽略, 证明如下: 首先从直观上分析, 根据图 1(b) 显然可以看出, V 取决于 V_1 、 V_2 , 而 ϕ 与 $|V_1|$ 、 $|V_2|$ 有关, 因此必然与 V 有关, 两者不可能是独立的。具体而言, 利用图 1 中各参数几何关系可得

$$V = |V| = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos\theta} \quad (1)$$

ϕ 同样为 V_1 、 V_2 、 θ 的函数, 且当三者取值范围变化时, 函数对应关系也随之变化。为便于证明, 讨论当 $\theta \in [0, \pi) \cap (V_1 \cos\theta - V_2 > 0)$ 的情况(对应图 1(b)), 此时有

$$\phi = \arctan\left(\frac{V_1 \sin\theta}{V_1 \cos\theta - V_2}\right) \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可见, V_1 、 V_2 、 θ 中任一参数发生变化均同时影响 V 、 ϕ 取值, 因此两者相互独立的假设并不成立。其次, 考察 V 、 ϕ 相关系数

$$\rho_{V,\phi} = \frac{\text{Cov}(V,\phi)}{\sqrt{\text{Var}(V)\text{Var}(\phi)}} \quad (3)$$

其中, $\text{Cov}(\cdot)$ 和 $\text{Var}(\cdot)$ 分别表示协方差和方差函数。利用仿真方法进行每组 (v_1, v_2) 采样点下 10 000 次随机实验, 每次实验规定 θ 在 $(0, \pi)$ 随机取值并求解式(3), 将所有实验结果的平均值作为各坐标点对应的关系系数。图 2 给出仿真结果, 从图中可以直观看出, V 、 ϕ 相关系数大多在 0.5 左右, 这一结果有力证明了即使在 V_1 、 V_2 互不相关的条件下, V 和 ϕ 的统计相关性依然存在且不可忽略。

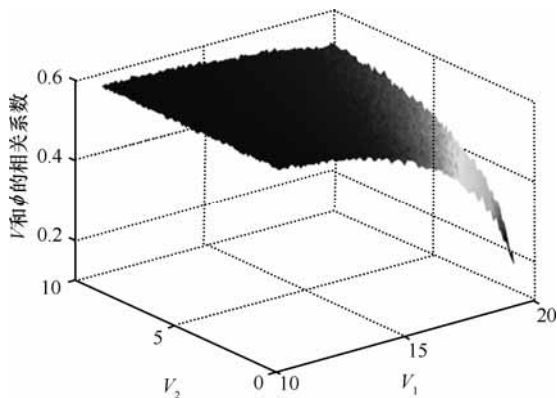


图 2 V 和 ϕ 相关系数仿真结果

针对文献[19]中的问题, 本文给出改进后的链路剩余生存期 PDF 推导过程。首先设 $F(\cdot)$ 为 CDF 表达式, 则引用文献[19]将 $F_{T_1}(t_1)$ 表示为

$$F_{T_1}(t_1) = P\{T_1 \leq t_1\} = P\left\{\frac{d_1 \cos\phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2\phi}}{V} \leq t_1\right\} \quad (4)$$

其中, $P(\cdot)$ 为概率函数。当 V_2 为定值, V 、 ϕ 均由 V_1 和 θ 给定, 有

$$\begin{aligned} F_{T_1|V_2}(t_1 | v_2) &= P(T_1 \leq t_1 | V_2) \\ &= P\left(\frac{d_1 \cos\phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2\phi}}{V} \leq t_1 | V_2\right) \\ &= P\left(V \geq \frac{d_1 \cos\phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2\phi}}{t_1} | V_2\right) \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} \int_{\frac{d_1 \cos\phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2\phi}}{t_1}}^{v_2 + V_{\max}} f_{V,\phi|V_2}(v, \phi | v_2) dv d\phi \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $f(\cdot)$ 为 PDF 函数。根据 Jacobian 转换, 可得如下条件 PDF 表达式

$$f_{V,\phi|V_2}(v, \phi | v_2) = \frac{f_{V_1,\theta}(v_1^*, \theta^*)}{J(v_1^*, \theta^*)} \cdot J(v_1^*, \theta^*) = \begin{vmatrix} \frac{\partial v}{\partial v_1} & \frac{\partial v}{\partial \theta} \\ \frac{\partial \phi}{\partial v_1} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \end{vmatrix} \quad (6)$$

显然, $f_{V_1,\theta|V_2}(v_1, \theta | v_2) = f_{V_1,\theta}(v_1, \theta)$, 根据式(1)和式(2)可得 Jacobian 行列式结果

$$\begin{aligned} J(v_1^*, \theta^*) &= \frac{v_1}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 - 2v_1v_2 \cos\theta}} \\ &= \frac{v_1}{v} = \frac{\sqrt{v^2 + v_2^2 + 2vv_2 \cos\phi}}{v} \end{aligned}$$

代入式(6), 可得

$$f_{V,\phi|V_2}(v, \phi | v_2) = \frac{f_{V_1}(v_1)v}{2\pi\sqrt{v^2 + v_2^2 + 2vv_2 \cos\phi}}$$

若假设 $V_1 \sim U(V_{\min}, V_{\max})$, 则有

$$f_{V,\phi|V_2}(v, \phi | v_2) = \frac{v}{2\pi V_d \sqrt{v^2 + v_2^2 + 2vv_2 \cos\phi}}$$

代入式(5)并对 t_1 求导, 可得 RLL_1 条件 PDF 表达式为

$$f_{T_1|V_2}(t_1|v_2) = \frac{dF_{T_1|V_2}(t_1|v_2)}{dt_1}$$

$$= \frac{d}{dt_1} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{d_1 \cos \phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2 \phi}}^{v_2 + V_{\max}} \frac{v}{2\pi V_d \sqrt{v^2 + v_2^2 + 2vv_2 \cos \phi}} dv d\phi \quad (7)$$

利用 Leibniz 法则将式(7)简化为一重积分, 可得

$$f_{T_1|V_2}(t_1|v_2) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{t_1^2 \left(d_1 \cos \phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2 \phi} \right)^2}{2\pi V_d t_1^2 \sqrt{\left(d_1 \cos \phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2 \phi} \right)^2 + v_2^2 t_1^2 + 2v_2 t_1 \cos \phi \left(d_1 \cos \phi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2 \phi} \right)}} d\phi \quad (8)$$

进而可得 RLL_1 的 PDF 表达式为

$$f_{T_1}(t_1) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f_{T_1|V_2}(t_1|v_2) f_{V_2}(v_2) dv_2$$

本文进一步给出考虑链路 RLL 相关性的路径 RPL 统计分析。 $f_{T_2|V_2}(t_2|v_2)$ 与式(8)推导方法类似, 因此当 V_2 取定值, k_1 和 k_2 剩余生存期 RLL_1 和 RLL_2 的联合条件 PDF 表达式为

$$f_{T_1, T_2|V_2}(t_1, t_2|v_2) = f_{T_1|V_2}(t_1|v_2) f_{T_2|V_2}(t_2|v_2)$$

对 V_2 求积分, 可得 RLL_1 及 RLL_2 的联合 PDF 表达式为

$$f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f_{T_1, T_2|V_2}(t_1, t_2|v_2) f_{V_2}(v_2) dv_2 \quad (9)$$

进一步地, 若路径由 3 条链路构成, 它们各自 RLL 的联合 PDF 可表示为

$$f_{T_1, T_2, T_3}(t_1, t_2, t_3) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f_{T_1, T_2, T_3|V_2, V_3}(t_1, t_2, t_3|v_2, v_3) \cdot f_{V_2}(v_2) f_{V_3}(v_3) dv_2 dv_3 \quad (10)$$

以此类推。

本文将路径统计特性进一步表示为多跳路径(l)的 RPL 不小于某一时间间隔 T 的概率, 即路径中各链路 RLL 均不小于 T 的概率 ($P_l(T)$)。通过对式(9)或式(10)积分可得

$$P_l(T) = \int_T^{\infty} \int_T^{\infty} f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) dt_1 dt_2 = 1 - F_{RPL}(T) \quad (11)$$

3 RLE-RPLP 路由算法设计

与主动式路由机制不同的是, 反应式路由无需周期性地启动新旧路由替换来进行路由维护, 节点间传

输路径是按需建立的, 节约了网络运行成本。AODV (ad hoc on-demand distance vector) 和 DSR (dynamic source routing) 是 2 种经典的反应式路由协议。本文首先根据上述理论建模提出一种以准确 RPL 预测为标准的路由选取准则, 接着以 DSR 协议为基础, 给出 RLE-RPLP 算法实现及网络性能优化目标。

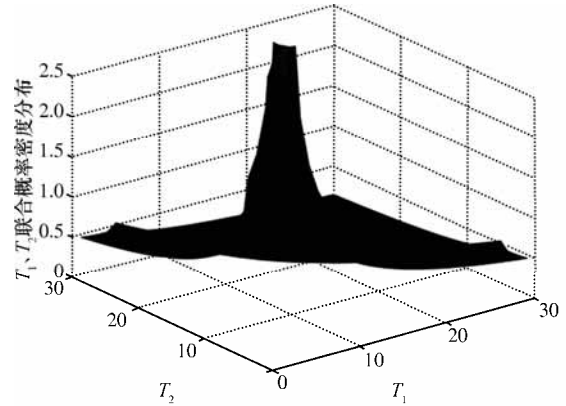
3.1 基于可靠 RPL 估计的路由稳定性准则

在路由发现进程中, 目的节点 N_d 收到来自源节点 N_s 的路由请求 RREQ 报文之后沿原路径发送路由应答 RREP 报文。经典 AODV 协议中 N_s 只选取 RREP 最先到达的路径, DSR 同样以“最短路径”准则进行路由选取, 两者均无法保证路径稳定性。为了证明 RLE-RPLP 路由策略在提供更准确路径 RPL 估计方面较以往算法的优越性, 在引入和忽略相邻链路 RLL 相关性条件下, 进行双链路 RLL 联合 PDF 仿真求解并给出误差分析。

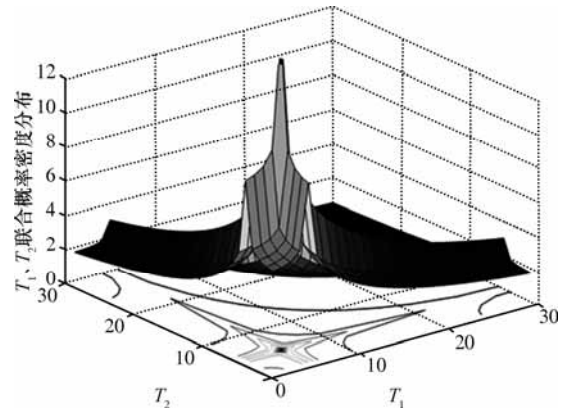
首先在不考虑链路相关性时, 式(9)可改写为

$$f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) = f_{T_1}(t_1) f_{T_2}(t_2) \quad (12)$$

图 3 给出分别由式(9)和式(12)得到的 RLL_1 和



(a) 考虑 RLL 相关性



(b) 不考虑 RLL 相关性

图 3 RLL_1 、 RLL_2 联合 PDF 数值仿真对比 ($R=100, d_1=d_2=50, V_d=10$)

RLL_2 联合 PDF 数值仿真对比结果。可见虽然两者变化趋势基本一致，但 x - y 平面各点所对应的联合 PDF 值存在显著差异，原点附近尤为明显（式(11)是式(9)所得结果的 4~5 倍），而这一误差也直接影响 $P_l(T)$ 求解结果。当改变 (d_1, d_2) 参数设置时，大量仿真对比结果证明：节点间初始距离越小，忽略 RLL 相关性导致的 $P_l(T)$ 估计误差越大。因此，当链路长度较短，考虑 RLL 相关性会使 RPL 估计准确度提升更为明显。

3.2 RLE-RPLP 算法实现

RLE-RPLP 路由发现算法采用与 DSR 相似的源路由机制，源节点保存完整路由并提供多路径支持，具体实现过程如下。

路由请求。当有数据请求到达， N_s 以广播形式向邻居节点发送 RREQ 报文，报文格式如图 4(a)所示。除了 N_s 、 N_d 地址及路由表等基本信息，RLE-RPLP 算法的 RREQ 中还需要包含路径选取所需的节点移动参数，该参数随 RREQ 转发实现获取，详细记录了路由表中各节点所遵循的随机移动模型以及与其上游节点的相对运动信息，并按照不同的分组与各节点对应。

路由决策。 N_d 接收到来自同一数据请求的首个 RREQ 时启动延时定时器，进入路由选取阶段。具体算法实现见算法 1。 N_d 首先在定时器规定时间内根据 RREQ 携带的路径信息选取多条链路不相交 (link-disjoint) 路径，构成备用路径集合 $\{l\}$ ，再利用各路径的节点移动参数，根据式(11)或其推广形式计算 $\{l\}$ 中路径 RPL 不小于预设时间间隔 T 的概率 $P_l(T)$ (T 应大于待传数据的预期传输时间 T_e)。设 P_{th} 为 RLE-RPLP 算法预设的稳定性阈值，最终满足 $P_l(T) \geq P_{th}$ 且跳数最少的路径将被选为最终路由。

路由应答。路由决策完成后（与路由选取定时器数值归零基本同步）， N_d 将所选路径信息保存于 RREP 报文中并沿该路径发送至 N_s 。RLE-RPLP 算法的 RREP 报文格式如图 4(b)所示。

报文类型	广播 ID	N_s 地址	N_d 地址	跳数	生存期	路由表	节点移动参数
------	-------	----------	----------	----	-----	-----	--------

(a) RREQ

报文类型	广播 ID	N_s 地址	N_d 地址	生存期	路由表
------	-------	----------	----------	-----	-----

(b) RREP

图 4 RLE-RPLP 算法路由控制报文格式

算法 1 目的节点处路由选取

描述：目的节点 N_d 接收到其上游节点 N_p 发送的 RREQ 报文，报文中携带路径 l 的相关信息。

- 1) if (RREQ 生存期值归零) or (l 与 N_d 已记录的具有相同 $\langle N_s$ 地址, 广播 ID \rangle 的某条路径重合)
- 2) 丢弃该 RREQ 报文
- 3) else 将 N_d 添加到 RREQ 路由表中
- 4) if (l 为其 $\langle N_s$ 地址, 广播 ID \rangle 对应的第一条路径)
- 5) 添加 l 至备选路径集合 $\{ \}$
- 6) 启动该 $\langle N_s$ 地址, 广播 ID \rangle 路径选取定时器 Timer
- 7) else if (l 与 N_d 中已有的含相同 $\langle N_s$ 地址, 广播 ID \rangle 的路径均严格不相交) and (Timer 未归零)
- 8) 添加 l 至备选路径集合 $\{ \}$
- 9) else 丢弃该 RREQ 报文
- 10) end all if
- 11) when (Timer == 0)
- 12) find $P_l(T) \geq P_{th}$ 且跳数最少的路径
- 13) 设置该路径为 RLE-RPLP 算法最终路由

3.3 网络性能优化目标

本文以吞吐量 (Th , 单位时间内网络成功传输的数据量), 路由重建次数 N_r 及路由开销作为评价标准来验证 RLE-RPLP 在提高网络性能方面的优势。 N_r 表示一定时间内所有用于数据传输的路径由于链路断裂需要重建的次数；路由开销是指 N_s 与 N_d 间完成一次数据传输需要交换的路由控制报文主要为 RREQ 和 RREP 数量。 Th 实际上由网络中各层协议共同决定。本文为了强调路径稳定性对 Th 的影响，作如下定义及说明。

定义 1 $P_{l_s}(T)$ 表示路径 l_s 在间隔 T 内传输数据被目的节点正确接收的概率。若 l_s 由 Q 条链路构成， t_1, t_2, \dots, t_q 分别表示各链路 RLL，则根据式(11)有

$$P_{l_s}(T) = \int_T^{\infty} \int_T^{\infty} f_{T_1, T_2, \dots, T_q}(t_1, t_2, \dots, t_q) dt_1 dt_2 \dots dt_q \quad (13)$$

式(13)实质上从网络层角度量化了路径在所需时间间隔内成功完成数据传输的能力。文献[21]通过定义链路成功传输概率 $p_{i,j}$ 来描述物理层干扰对链路的影响，因此本文定义 1 作为 $p_{i,j}$ 定义的延伸，旨在描述网络层路由机制中路径稳定性对端到端数据传输的整体影响，具有合理性。

定义 2 若只考虑路径跳数较少的情况，可以

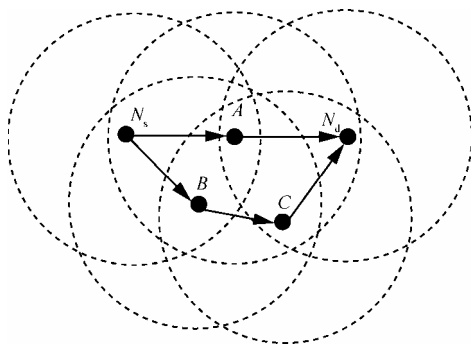
假设备选路径传输 F_s (packets) 所需时间 T_0 (s)大致相等, 若 F_s 为 N_s 到 N_d 单次传输请求所含数据量, N 为 T_0 内网络数据传输路径总数, 则吞吐量定义为

$$Th = \frac{1}{T_0} \sum_{s=1}^N F_s P_s(T_0) \quad (14)$$

式(14)未考虑物理层和 MAC 层影响, 即忽略物理层信号衰落并假设 N_d 对接收数据都能正确解码且无重复或乱序。由于本文研究 MANET 网络层路由协议优化, 因此上述简化不影响算法评估有效性及其可扩展性。

接下来, 利用图 5(a)中简化网络模型将 RLE-RPLP 路由选取方法与“最短路径”准则进行对比, 给出算法优化例证。设 F_s 从 N_s 到 N_d 的传输需在 T_0 内完成, A 、 B 、 C 分别表示 3 个中间节点, N_d 在路由选取结束后共得到 $l_1(N_s \rightarrow A \rightarrow N_d)$ 和 $l_2(N_s \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow N_d)$ 2 条备选路径信息。图 5(b)给出本文算法和忽略 RLL 相关性时两者 $P_l(T_0)$ 值, 即 P_1 、 P_2 分别代表数据成功接收概率的实际(准确)估值和过高(错误)估值。

设路径稳定性阈值 $P_{th}=0.7$, F_s 和 T_0 归一化为 1。本文算法参考 P_1 , 只有 l_2 达到标准, 由式(14)得到网络吞吐量为 0.8; 若不考虑链路 RLL 相关性 (P_2 为参考), l_1 和 l_2 均达到稳定性标准, 最终跳数较少的 l_1 被选为最终路由。但 Th 计算需要用数据成功接收概率的实际值 P_1 , 因此 Th 仅为 0.6。由此可见 RLE-RPLP 算法能够避免 RPL 估计误差造成的路径稳定性误判, 优化了网络性能。



(a) RLE-RPLP 优化性例证简化网络模型

路径 \ 概率	P_1	P_2
l_1	0.60	0.80
l_2	0.80	0.85

(b) l_1 和 l_2 路径稳定性 (数据成功接收概率) 估计结果

图 5 RLE-RPLP 优化性例证简化网络模型及路径稳定性设置

4 网络性能仿真分析

为了验证 RLE-RPLP 算法合理性及有效性, 进行 MATLAB 仿真环境下的 MANET 网络构建, 路由机制实现及性能对比分析。MATLAB 广泛应用于路由算法仿真中, 并且能够对单层协议设计提供可信用度较高的性能分析及合理性验证^[22-24]。本文利用两组参数设置将 RLE-RPLP 算法分别与忽略链路 RLL 相关性条件下的源路由协议及文献[19]中提出的稳定性路由协议进行对比并给出仿真结果及性能分析。

4.1 引入 RLL 相关性的路由机制优化作用

对比算法与本文算法路由发现进程类似, 但区别在于: 路径稳定性评估不考虑 RLL 相关性, $P_l(T)$ 利用式(12)及其推广形式计算。采用 Th 和 N_r 作为性能指标对两者进行对比分析。

4.1.1 网络参数设置

设移动节点随机分布于 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的方形区域, 各节点带宽足够大(无链路拥塞延迟), 每个仿真周期 $T_0=5$ 时隙起始时刻加载 N 个($N=10$) N_s 不同且大小为 F_s (25 单元)的数据流服务请求, 数据预期传输时长为 T_0 , $R=20\text{ m}$, $P_{th}=0.8$, 路径选取定时器 $=0.05 T_0$, $P_l(T)$ 计算中取 $T=1.5 T_0$ 。仿真共运行 $100 T_0$ 。速率和吞吐量单位分别设为米/时隙、单位/时隙。

定义路由重建(失效)条件: 1) RLE-RPLP 算法, 路由发现进程中备选路径 $P_l(T)$ 值均未达到 P_{th} ; 2) 对比算法, 所选路径实际 $P_l(T)$ 值未达到 P_{th} (因该算法会导致 $P_l(T)$ 估计过高, 因此当参数设置合理, 每个数据请求备选路径中至少有一条路径满足 $P_l(T) \geq P_{th}$)。若发生路由重建, 则 Th 计算时(式(14))对应路径 $P_l(T)$ 值为 0, 即认为数据不允许重传, 一旦路径失效, 则数据丢失。

4.1.2 结果与分析

图 6 和图 7 分别给出当 $V_d=10$, Th 和 N_r 随网络节点数 (N_p) 变化的仿真对比结果。由图 6 可见, Th 随 N_p 增加(节点密度增大)呈上升趋势。当 $V_{min}=2$, RLE-RPLP 算法所得 Th 比不考虑 RLL 相关性的结果平均提升约 16%。其根本原因在于: 忽略链路相关性使路径 $P_l(T)$ 估计值偏高, 达到 P_{th} 要求的备选路径数量增多, 路由选取时可靠性最佳的路径很容易被“跳数最少”路径所替代, 导致数据丢失频率增加, 降低网络吞吐量。其次, 当 $N_p=20$ 和 70, 2 种算法所得

Th 差值分别为 3 和 8, 说明 RLE-RPLP 对吞吐量优化效果随 N_p 增大而增加。这一结果的理论依据在于: N_p 越大, 链路平均长度越短, 2 种算法 $P(T)$ 计算值相差越大, 以 RPL 估计准确度占优的 RLE-RPLP 算法能获得更理想的 Th 。另外, 当节点移动度增大 (V_{min} 由 2 增加到 5, V_d 不变), Th 均有所下降, 但 $V_{min}=5$ 时, RLE-RPLP 算法所得 Th 依然优于对比算法在 $V_{min}=2$ 时的结果, 说明本文算法能够有效缓解因节点移动性增加而造成的网络性能恶化。

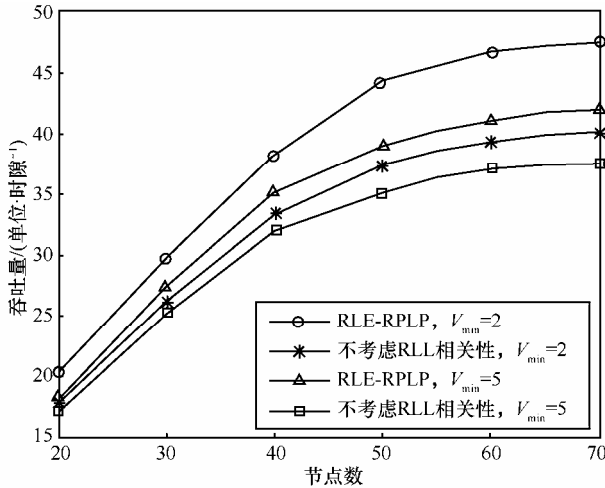


图 6 N_p 变化时 Th 仿真结果对比 ($V_d=10$)

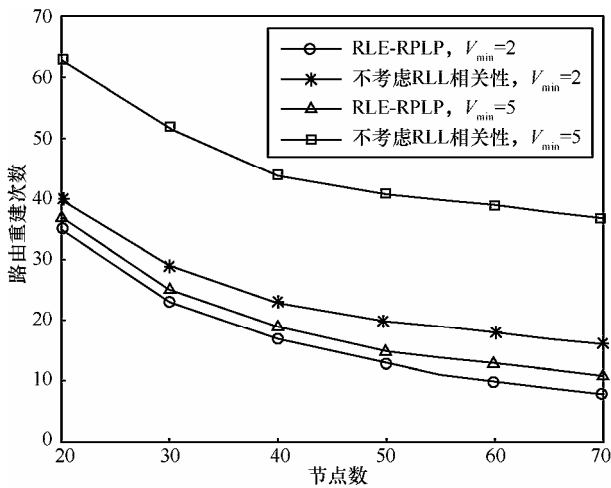


图 7 N_p 变化时 N_r 仿真结果对比 ($V_d=10$)

图 7 同样表明增加节点密度能够提高网络连通性, 实现性能提升 (N_r 减少)。仿真结果显示, RLE-RPLP 算法能有效降低路由重建次数, 且节点移动度较高时效果更为明显。以 $N_p=70$ 处仿真结果为例: $V_{min}=2$ 时, RLE-RPLP 的 N_r 值较其对比算法减少约 53%; 而 $V_{min}=5$ 时, 这一比率上升至 71%。另外, 对比 $N_p=70$ 处 V_{min} 分别为 2 和 5 的结果, 可

见忽略 RLL 相关性时 N_r 差值为 21; 而运用 RLE-RPLP 算法 N_r 差值仅为 3, 进一步验证了其在高节点移动度下保证网络性能的能力。

图 8 和图 9 分别给出当 $V_{min}=2$, Th 和 N_r 随节点移动度 (V_d) 变化的仿真对比结果。显然 V_d 增大加剧了网络拓扑的动态变化, 使链路断裂的概率增大, 网络性能有所降低。而 RLE-RPLP 在这种情况下依然表现出明显的优越性: 当 $N_p=60$, 图 9 中 RLE-RPLP 算法 Th 较对比算法提升约 20%; 图 10 中前者 N_r 较后者减少约 57%。当 $N_p=40$, 网络性能整体偏低, 与图 6 和图 7 所得结论一致。

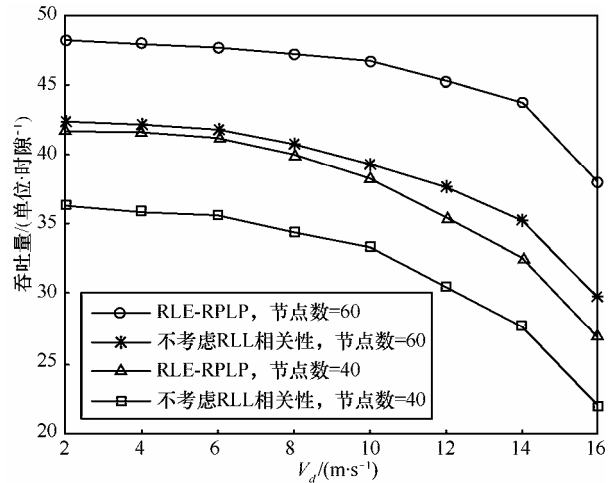


图 8 V_d 变化时 Th 仿真结果对比 ($V_{min}=2$)

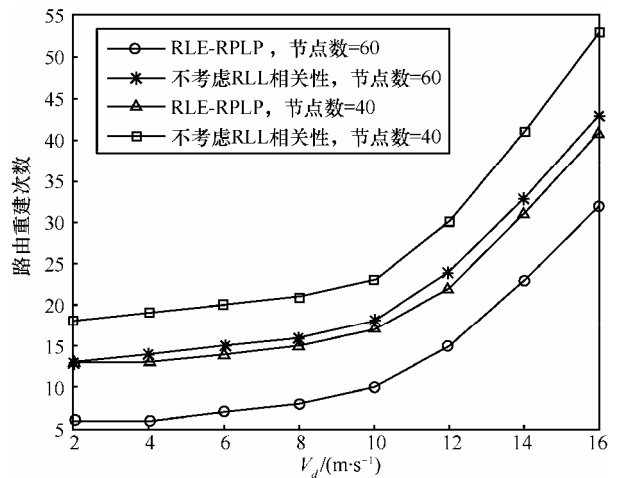


图 9 V_d 变化时 N_r 仿真结果对比 ($V_{min}=2$)

4.2 与已有稳定性路由协议性能对比

进一步将 RLE-RPLP 算法与文献[19]提出的基于链路有效性估计的路由 (LEBR, link availability estimation based routing) 算法进行比较, 以吞吐量和路由开销作为性能指标实现有效性验证。LEBR

算法以链路生存期作为其有效性量化标准，主要特点为：1) 以 AODV 协议为改进基础，同一路径中的各节点只保存了其相邻节点路由信息，各链路有效性(L_{ij})需随 RREP 转发逐跳计算；2) 路径有效性(P_{LA})为各链路 L_{ij} 的乘积，即 $P_{LA} = \prod L_{ij}$ 。由此可见，LEBR 强调链路级别的稳定性分析，且默认各链路统计特性相互独立。

4.2.1 网络参数设置

各参数设置如表 1 所示。与文献[19]不同，仿真中采用简化的节点随机移动模型，节点速率服从最大值与最小值间的均匀分布特性。LEBR 算法采用改进的 AODV 协议实现，即在对应 RREP 报文及路由表中加入 P_{LA} 分区用于有效性指示及路由选取。

表 1		仿真参数设置
参数分组	参数名称	取值
网络设置	仿真区域	100 m×100 m
	节点数	60
	仿真运行时间	100 s
应用层	数据类型	固定速率数据流(CBR)
	数据分组尺寸	512 byte/packet
	分组发送速率	10 packet/s
网络层	路由协议	RLE-RPLP, LEBR
链路层	链路带宽	2 Mbit/s
	MAC 协议	802.11 DCF
物理层	传播模型	free space
	节点传输半径	20 m
	天线类型	全向
节点移动模型	最小速率	0
	最大速率	2~10 m/s

4.2.2 结果与分析

图 10 和图 11 分别为当网络加载的数据请求数量 N_q 为 10，2 种算法在节点移动度 (V_{max}) 变化情况下所得 Th 及路由开销对比结果。如图 10 所示，当移动度相对较低 (V_{max} 不大于 6)，两者所得 Th 基本一致 (大于 7×10^4 bit/s)，而当 $V_{max}=10$ ，RLE-RPLP 算法 Th (约 4×10^4 bit/s) 约为 LEBR 算法 Th (约 2.4×10^4 bit/s) 的 1.6 倍，说明本文算法在 V_{max} 较大时能够保证较低的 Th 下降速率，显示出了在对抗网络高度动态性方面的优势。图 11 进一步验证了 RLE-RPLP 算法的这一优势：当 $6 \leq V_{max} \leq 10$ ，RLE-RPLP 算法路由开销比 LEBR 算法降低了约 26%。其原因为：在节点高速运动使路

径稳定性明显下降的情况下，本文算法能够以路径整体生存期估计作为参考依据进行更可靠地路由决策，有效地减少了因路由重建而产生的 RREQ 泛洪概率，从而降低了路由开销。

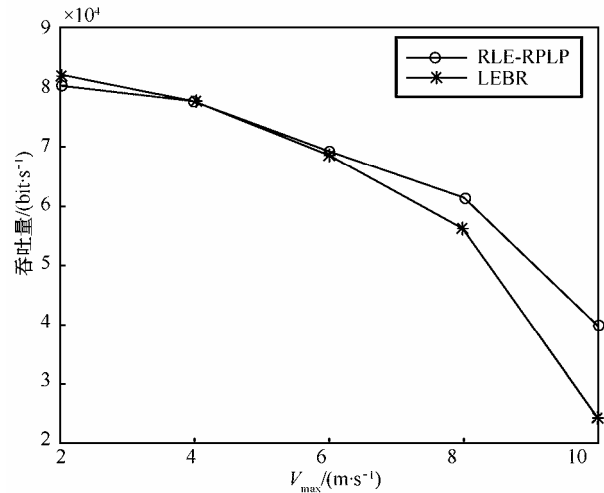


图 10 V_{max} 变化时 Th 仿真结果对比($N_q=10$)

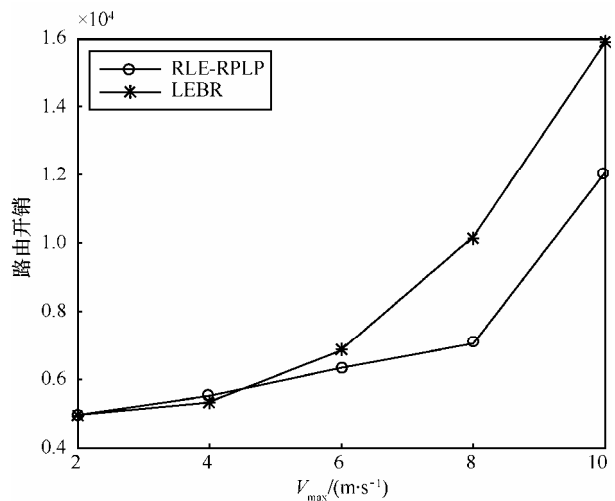


图 11 V_{max} 变化时路由开销仿真结果对比($N_q=10$)

图 12 和图 13 分别为 $V_{max}=8$ 情况下，网络中数据传输请求数量变化时 2 种算法所得 Th 及路由开销对比结果。由图 12 可知，两者 Th 差值随数据请求增加而增大：当 $N_q=1$ ，两者 Th 几乎相等；当 $N_q=20$ ，本文算法 Th (约 6.5×10^4 bit/s) 比 LEBR 算法 Th (约 4.3×10^4 bit/s) 提升约 51%。实际上，当 N_q 增加，网络中物理层及链路层的数据通信质量会受到影响，路由选择机会相应减少，相比 LEBR 算法中逐跳的链路有效性判断，RLE-RPLP 算法中基于路径 RPL 的路由决策准则能够更有效、真实地评估所选路径的稳定性进而保证其持续连通性。从图 13 结果来看，

RLE-RPLP 算法在所有 N_q 对应值情况下都能更有效地控制路由开销：较 LEBR 算法平均减少约 17%，当 N_q 较大时尤为明显（当 $N_q=20$ ，这一比率约为 21.6%）。这一结果同样验证了本文算法在可靠路径稳定性判断中的优化效果以及对网络性能的提升作用。

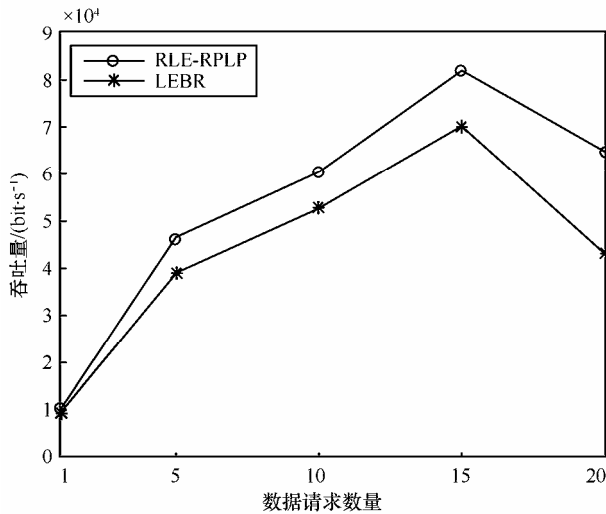


图 12 N_q 变化时 Th 仿真结果对比 ($V_{\max}=8$)

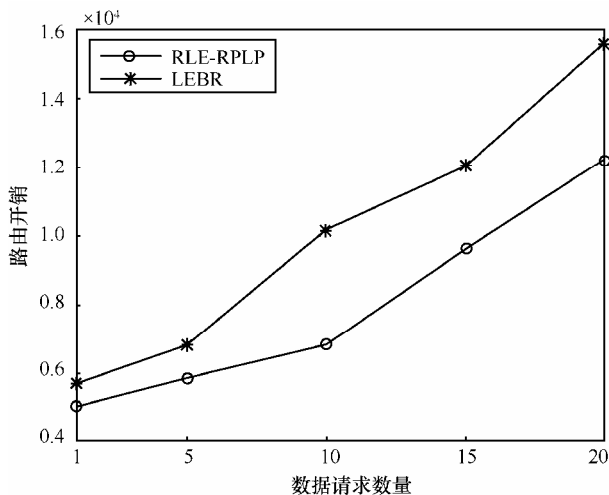


图 13 N_q 变化时路由开销仿真结果对比 ($V_{\max}=8$)

5 结束语

本文将 MANET 多跳路径中相邻链路 RLL 相关性引入路径 RPL 统计特性分析，重点研究更具一般性及实际意义的路径稳定性估计准则，提出了一种基于可靠路径 RPL 估计的路由发现算法 (RLE-RPLP)。该算法首先通过相邻链路 RLL 相关性统计建模，给出了在节点移动模型不受限情况下多跳路径中各链路 RLL 联合 PDF 表达式及理论推导过程，进而优化了路径 RPL 的统计特性描述，

建立了更准确的路由稳定性判断准则，在此基础上提出了优化的 RLE-RPLP 路由发现算法。仿真分析表明：在路径跳数较少、链路长度较小的一般性 MANET 环境中，该算法与不考虑 RLL 相关性的稳定性路由算法相比，在提高网络吞吐量、减少路由重建次数方面具有显著优越性；与基于链路有效性估计的 LEBR 算法相比，能够在节点移动度较高或网络负载较大时更有效地保证网络吞吐量及控制路由开销，对网络性能具有更明显的优化作用。

参考文献：

- [1] LA R J, HAN Y. Distribution of path durations in mobile ad hoc networks and path selection[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2007, 15(5):993-1006.
- [2] 王博, 陈训逊. ad hoc 网络中一种基于信任模型的机会路由算法[J]. 通信学报, 2013, 34(9): 92-104.
WANG B, CHEN X X. Opportunistic routing algorithm based on trust model for ad hoc network[J]. Journal on Communications, 2013, 34(9): 92-104.
- [3] VU T K, KWON S. Mobility assisted on demand routing algorithm for MANETs in the presence of location errors[J]. The Scientific World Journal, 2014, Article ID 790103.
- [4] NAMUDURI K, PENDSE R. Analytical estimation of path duration in mobile ad hoc networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(6): 1828-1835.
- [5] NAMUDURI K, WAN Y, GOMATHISANKARAN M, et al. Airborne network: a cyber-physical system perspective[C]//The first ACM MobiHoc workshop on Airborne Networks and Communications. c2012: 55-59.
- [6] YANG W, YANG X, YANG S, et al. A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 9(4): 662-674.
- [7] SARGOLZAEY H, ALI B M, KHATUN S. A cross layer metric for discovering reliable routes in mobile ad hoc networks[J]. Wireless Personal Communications, 2012, 66(1): 207-216.
- [8] 居熙, 陶军, 陆一飞, 等. 一种基于迁移可测度的移动自组织网络路由模型[J]. 电子学报, 2010, 38(6): 1-5.
JU X, TAO J, LU Y F, et al. A predictable-delivery-ratio based routing model in mobile ad hoc networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(6): 1-5.
- [9] HUA E Y, HAAS Z J. An algorithm for prediction of link lifetime in MANET based on unscented kalman filter[J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(10):782-784.
- [10] HAAS Z J, HUA E Y. Residual link lifetime prediction with limited information input in mobile ad hoc networks[C]// The 27th IEEE International Conference on Computer Communications. c2008: 13-18.
- [11] WU D P, ZHOU J E, WANG R Y. Received signal strength based link lifetime estimating mechanism in MANET[C]//IEEE Conference An-

- thology. c2013: 14.
- [12] CARMO R D, WEMER M, HOLLICK M. Signs of a bad neighborhood: a lightweight metric for anomaly detection in mobile ad hoc networks[C]//8th ACM Symposium on QoS and Security for Wireless and Mobile Networks. c2012: 47-54.
- [13] WANG C F, CHIOU Y P, LIAW G H. Next hop selection mechanism for nodes with heterogeneous transmission range in Vanets[J]. Computer Communications, 2015, 55: 22-31.
- [14] VIRIYASITAVAT W, BAI F, TONGUZ O K. Dynamics of network connectivity in urban vehicular networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(3): 515-533.
- [15] SADAGOPAN N, BAI F, KRISHNAMACHARI B, et al. PATHS: analysis of path duration statistics and their impact on reactive MANET routing protocols[C]//The 4th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. c2003: 1-3.
- [16] HAN Y, LA R J, MAKOWSKI A M, et al. Distribution of path durations in mobile ad hoc networks-Palm's theorem to the rescue[J]. Computer Networks, 2006, 50(12): 1887-1900.
- [17] KARAGIANNIS G, ALTINTAS O, EKICI E, et al. Vehicular networking: a survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2011, 13(4): 584-616.
- [18] LU N, CHENG N, ZHANG N, et al. Connected vehicles: solutions and challenges[J]. IEEE Internet Things Journal, 2014, 1(4): 289-299.
- [19] LEI L, WANG D, ZHOU L, et al. Link availability estimation based reliable routing for aeronautical ad hoc networks[J]. Ad Hoc Networks, 2014, 20: 53-63.
- [20] ANTUNES N, JACINTO G, PACHECO A. An analytical framework to infer multihop path reliability in MANETS[C]//The ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. c2010: 323-332.
- [21] LEE G Y, HAAS Z J. Simple, practical, and effective opportunistic routing for short-haul multi-hop wireless networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3583-3588.
- [22] DANA A, ZADEH A K, SADAT NOORI S A. Backup path set selection in ad hoc wireless network using link expiration time[J]. Computers and Electrical Engineering, 2008, 34(6): 503-519.
- [23] WU Y S, LEE D H, JUNG J I. Derivation and analysis of link/route maintenance probability in multi hop mobile ad hoc networks[C]// International Conference on Information Technology: New Generations. c2009: 623-627.
- [24] SHELLY S, VIJAY V, BABU A V. Model for path duration in vehicular ad hoc networks under greedy forwarding strategy[C]// International Conference on Computer, Communication and Convergence (ICCC 2014). c2014: 394-400.

作者简介:



李智楠 (1987-), 女, 辽宁丹东人, 哈尔滨工程大学博士生, 主要研究方向为无线通信系统理论、MANET 路由优化算法等。



杨晓冬 (1963-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 哈尔滨工程大学教授, 主要研究方向为现代通信系统技术与理论、现代天线技术等。