

基于可靠稳定性评价的 MANET 多路径路由优化算法

李智楠^{*①} 杨晓冬^{①②}

^①(哈尔滨工程大学信息与通信工程学院 哈尔滨 150001)

^②(日本明星大学联合研究中心 东京 191-8506)

摘要: 针对移动 Ad hoc 网络动态拓扑特性, 该文提出一种以可靠路径稳定度估计为基础的多路径路由优化算法。该算法从路径剩余生存期统计特性出发, 充分考虑相邻链路生存期相关性, 从而消除已有算法在路径稳定度估计中存在的理论误差, 并利用优化后的稳定度准则实现路由发现进程的多路径选取和基于备用路径支持的快速路由修复。仿真对比结果表明, 该算法具有较快的收敛速度, 能够有效提高网络吞吐量, 缩短数据传输时延并降低路由开销, 更好地保证较高节点移动度下的数据传输稳定性。

关键词: 移动 Ad hoc 网络; 路径剩余生存期; 稳定性估计; 多路径路由; 路由修复

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)03-0605-08

DOI: 10.11999/JEIT160462

Optimized Multipath Routing Algorithm for MANET Based on Reliable Stability Estimation

LI Zhinan^① YANG Xiaodong^{①②}

^①(College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

^②(Collaborative Research Center of Meisei University, Tokyo 191-8506, Japan)

Abstract: To deal with dynamic network topology in Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs), a reliability-enhanced multipath source routing algorithm is proposed based on accurate path stability estimation. In order to eliminate theoretical errors existing in current approaches, statistical properties of residual path lifetime are exploited by fully introducing correlation among neighboring links' residual link lifetime. Optimized link and path stability metric is then provided to realize a multipath-enabled routing discovery procedure and a backup path-support fast routing recovery mechanism. Simulation results show that the proposed routing algorithm can achieve fast routing discovery convergence, increase network throughput, reduce data transmission delay, and lower routing overhead. Furthermore, high network reliability can be well guaranteed even under high node mobility degree.

Key words: Mobile Ad hoc NETWORKS (MANETs); Residual path lifetime; Stability estimation; Multipath routing; Routing recovery

1 引言

为了缓解移动 Ad hoc 网络(MANET)时变拓扑特性对移动传输的不利影响, 近年来基于链路或路径剩余生存期(Residual Link/Path Lifetime, RLL/RPL)估计的链路动态特性分析^[1]及“稳定性”优先路由策略成为了 MANET 研究关注的重点^[2-5]。虽然现有算法一定程度上实现了网络优化, 但仍存在很多不足。首先, 以 RLL 估计为基础的路由算法强调链路级别的逐跳路由决策^[5,6], 造成大量网络资源及节点能量消耗; 其次, 路径稳定性分析中的 RPL 估计均忽略了由节点共享引起的相邻链路 RLL 相关性^[3,7], 造成的估计误差使算法在优化能力方面具

有很大局限性; 另外, 上述问题同样存在于已有的多路径稳定性路由策略中^[4,8-11], 限制了算法可靠性。

为了弥补这一不足, 本文在充分考虑相邻链路 RLL 相关性前提下, 提出一种以路径 RPL 统计特性作为稳定性评价标准的多路径路由优化算法(RELIability-enhanced Multipath Source Routing, REL_MSR)。该算法基于反应式(reactive)源路由协议, 改进了路由发现进程中路由请求(Route REQUEST, RREQ)和路由应答(Route REPLY, RREP)报文格式及其转发处理机制, 能够实现备用路径支持的快速路由修复。

2 RPL 统计特性及稳定性标准

该稳定性标准提出的目的在于: (1)在 RPL 估

计中充分考虑相邻链路 RLL 统计相关性, 提高理论建模准确性; (2) 提供更可靠的多路径选取准则, 增强 MANET 动态环境下的通信连续性。

2.1 多条链路 RLL 联合概率密度分布

目前绝大部分 MANET 路由优化策略^[3,12,13]在 RLL 与 RPL 统计特性分析中, 为简化计算或降低算法复杂度, 均沿用如下结论: 多跳路径生存期(PL)服从指数分布^[3,13]且可由构成该路径的 N 条链路生存期(LL_{*i*})表示为^[12]

$$\frac{1}{\text{PL}} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\text{LL}_i} \quad (1)$$

以上结论前提条件为: (1) 路径中各链路生存期保持统计独立^[12]; 或(2) 路径跳数足够多, 各链路长度足够大(渐进条件)^[13]。如图 1 所示, 链路 l_1 和 l_2 生存期同时受共享节点 N_2 移动性的影响, 必然存在相关性, 文献[14]给出了该相关性的仿真证明, 因此条件(1)中的独立性假设并不成立; 实际 MANET 部署受能量供给和通信质量影响, 节点传输范围和路径跳数均受限, 因此条件(2)很难满足。针对上述问题, 本文在已有工作^[14]基础上, 以充分考虑 RLL 相关性为前提, 提出一种更准确的链路及路径稳定性统计定义方法。根据图 1 给出的多跳路径移动参数, 设节点传输半径为 R , d_i 为 RLL 估计时刻 N_1 与 N_2 相对距离, V_i, ϑ_i 为 N_i 速度和方向角, T_i 为 l_i 的 RLL ($i = 1, 2, \dots$) 且 $V_i \sim U(V_{\min}, V_{\max})$ ($V_{\max} > V_{\min} \geq 0, V_d = V_{\max} - V_{\min}$)。文献[14]中式(15)给出当 V_2 固定时 T_1 的概率密度分布(PDF)表达式:

$$f_{T_1|V_2}(t_1 | v_2) = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\chi^2}{2\pi V_d t_1^2 \sqrt{\chi^2 + v_2^2 t_1^2 + 2v_2 t_1 \chi \cos \varphi}} d\varphi \quad (2)$$

其中, $\chi = d_1 \cos \varphi + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2 \varphi}$, T_1 的 PDF 可表示为

$$f_{T_1}(t_1) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f_{T_1|V_2}(t_1 | v_2) \cdot f_{V_2}(v_2) dv_2 \quad (3)$$

进一步可得 T_1 累积分布函数(CDF):

$$F_{T_1}(t'_1) = P(T_1 \leq t'_1) = \int_0^{t'_1} f_{T_1}(t_1) dt_1 \quad (4)$$

其中, $F(\cdot), P(\cdot)$ 分别表示 CDF 和概率函数。

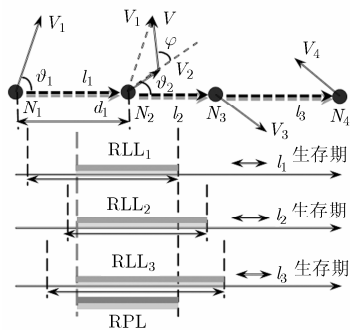


图1 多跳路径节点移动参数及 RLL 与 RPL 相互关系

$f_{T_2|V_2}(t_2 | v_2)$ 及 $f_{T_2}(t_2)$ 可按类似方法求得。下面进行 T_1, T_2 联合 PDF $f_{T_1, T_2}(t_1, t_2)$ 求解。首先由于考虑相邻链路 RLL 相关性, T_1 与 T_2 不具备相互独立性, 因此, 式(5)不成立:

$$f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) = f_{T_1}(t_1) \cdot f_{T_2}(t_2) \quad (5)$$

而当 V_2 固定, T_1 与 T_2 相互独立(此时二者间由节点共享所引入的统计相关性被消除)。现利用图 2 证明如下:

如图 2 所示, 设 α, α' 分别为 RLL 估计时刻 N_1, N_3 相对于 N_2 的方位角(图中 $\alpha' = 0$); ϑ, ϑ' 分别为 (N_1, N_2) 与 (N_2, N_3) 两对节点移动方向夹角。 V_1, V_2, V_3 及上述变量均相互独立。 V, V' 分别为 N_1, N_3 与 N_2 的相对速率; φ, φ' 分别为 V, V' 与 V_2 的夹角。对于 N_1, N_2 而言, 变量 V, φ 均为 V_1, V_2, ϑ 的函数。根据 2 维空间几何拓扑关系, V 的取值可由式(6)给出:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 - 2V_1V_2 \cos(\vartheta)} \quad (6)$$

φ 与 V_1, V_2, ϑ 的函数对应关系取决于后三者的取值范围。特别地, 讨论图 2 所对应情况($\vartheta_i \in [0, \pi) \cap (V_1 \cos \vartheta - V_2 > 0)$), 此时,

$$\varphi = \arctan \left(\frac{V_1 \sin \vartheta}{V_1 \cos \vartheta - V_2} \right) \quad (7)$$

运用同样方法, 对于 N_2, N_3 , 可将变量 V', φ' 分别表示为 V_2, V_3, ϑ' 的函数。

进一步利用已知变量可得

$$T_1 = \frac{d_1 \cos(\varphi + \alpha) + \sqrt{R^2 - d_1^2 \sin^2(\varphi + \alpha)}}{V} \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{d_2 \cos(\varphi' + \alpha') + \sqrt{R^2 - d_2^2 \sin^2(\varphi' + \alpha')}}{V'} \quad (9)$$

通过式(6)~式(9)可知, 虽然 T_1, T_2 表达式分别包含多个随机变量, 但它们共有的, 即造成二者统计相关的变量有且只有 V_2 。由此可证: 当 V_2 为定值, T_1 与 T_2 相互独立。根据这一结论, 可得

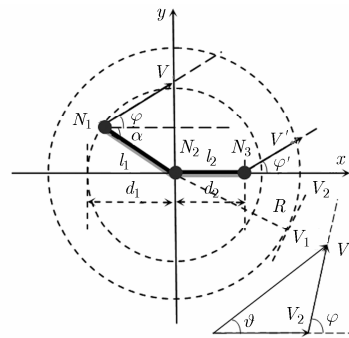


图2 N_1, N_3 与 N_2 的相对速度及空间方位关系

$$f_{T_1, T_2 | V_2}(t_1, t_2 | v_2) = f_{T_1 | V_2}(t_1 | v_2) \cdot f_{T_2 | V_2}(t_2 | v_2) \quad (10)$$

进而 T_1, T_2 联合 PDF 可表示为

$$f_{T_1, T_2}(t_1, t_2) = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} f_{T_1, T_2 | V_2}(t_1, t_2 | v_2) \cdot f_{V_2}(v_2) dv_2 \quad (11)$$

文献[14]中已经证明：与相互独立条件下的 $f_{T_1, T_2}(t_1, t_2)$ 推导方法(式(5))相比，式(11)能够给出更准确的求解结果。若进一步设路径 r 由 N 条链路构成，则有

$$\begin{aligned} f_{T_1, T_2 \dots T_N}(t_1, t_2 \dots t_N) \\ = \int_{v_2} \dots \int_{v_{N-1}} f_{T_1, T_2 \dots T_N | V_2 \dots V_{N-1}}(t_1, t_2 \dots t_N | v_2 \dots v_{N-1}) \\ \cdot f_{V_2}(v_2) \dots f_{V_{N-1}}(v_{N-1}) dv_2 \dots dv_{N-1} \end{aligned} \quad (12)$$

各链路 RLL 联合 CDF 为

$$\begin{aligned} F_{T_1, T_2 \dots T_N}(t'_1, t'_2 \dots t'_N) \\ = P(T_1 \leq t'_1, T_2 \leq t'_2 \dots T_N \leq t'_N) \\ = \int_0^{t'_1} \dots \int_0^{t'_N} f_{T_1, T_2 \dots T_N}(t_1, t_2 \dots t_N) dt_1 \dots dt_N \end{aligned} \quad (13)$$

虽然与链路独立条件下的结果相比，本文理论建模复杂度有所增加，但当网络中路径跳数较少，各节点遵循统一且较为简单的移动模型(如 $V_i \sim U(V_{\min}, V_{\max})$)时，很容易得到式(12)的解析解。

2.2 链路及路径稳定度评价准则

基于上述理论建模，本文进一步给出如下链路及路径稳定度定义：

定义 1 链路稳定度(Link RELiability, LREL)为链路 RLL 不小于特定时间间隔 T 的概率，对于 l_1 ：

$$\text{LREL}_1(T) = 1 - F_{T_1}(T) = P(T_1 \geq T) \quad (14)$$

定义 2 路径稳定度(Path RELiability, PREL)为路径 RPL 不小于 T 的概率，对于路径 r (含 N 条链路)：

$$\text{PREL}_r(T) = 1 - F_{T_1, T_2 \dots T_N}(T) = P(T_1, T_2 \dots T_N \geq T) \quad (15)$$

以上定义的合理性及优越性在于：(1)节点移动复杂度较低时，移动模型不受限；(2)充分体现了链路或路径在规定时间内保持有效性的能力。另外，文献[14]中表 1 给出：忽略链路 RLL 相关性会导致 PREL 估计值偏高，不利于路由选取。因此，本文所给定义能够为路由算法提供更准确的稳定性评价标准。

2.3 PREL 对网络性能的影响

从网络层角度，PREL 的重要性主要体现在以下两方面。首先 $\text{PREL}_r(T)$ 实际代表某一预期时延为 T 的数据经过路径 r 的成功传输概率。若时间 T_w ($T_w \geq T$) 内有 Q 个数据被成功接收，则网络吞吐量 TH 可定义为

$$\text{TH} = \frac{1}{T_w} \sum_{q=1}^Q G_q \cdot \text{PREL}_{r_q}(T_q) \quad (16)$$

其中， G_q, T_q, r_q 分别表示单个数据的尺寸、预期传输时延和对应传输路径。由式(16)可知：TH 与传输路径的 PREL 成正比。因此提高 PREL 可以有效提高网络传输质量。

其次，由定义 2 可得单个数据流所需平均传输次数为 $1/\text{PREL}_r(T)$ ，则数据传输时延 TD 可表示为

$$\text{TD} = T / \text{PREL}_r(T) \quad (17)$$

由式(17)可知：路由算法所选路径 PREL 值与 TD 成反比，进一步证明了提高 PREL 的重要意义。

3 REL_MSR 算法实现

与主动式(proactive)路由协议不同，反应式路由协议只在数据传输请求产生时创建节点间路由，节省了路由维护成本。动态源路由协议(Dynamic Source Routing, DSR)是经典的反应式路由协议，其最大特点为：RREQ 中可携带通信节点间完整路由信息，便于 LREL 与 PREL 估计。这是 REL_MSR 算法优化的基础。

3.1 RREQ 转发及参数更新

REL_MSR 算法源节点(N_s)广播的 RREQ 报文必须携带其所经节点的运动及链路状态信息，用于目的节点(N_d)基于 LREL 和 PREL 的路由选取。图 3(a)详细给出 REL_MSR 算法 RREQ 报文格式。报文头部规定了消息类型和长度；S_addr, D_addr 分别为 N_s 与 N_d 地址；RREQ_ID 为路由请求序号，与 S_addr 组成数据请求的标识信息；HC_num 表示 RREQ 当前位置与 N_s 间跳数；路由表 $\mathbf{RL} = [N_s \ N_1 \ N_2 \dots]$ 且 $N_s = N_0$ ；RREQ_LT 定义报文生存期。RREQ 还包括以下用于稳定性估计的附加参数：**N_mob** 包含 $\mathbf{RL}$ 中各节点移动参数， $\mathbf{N_mob} = [N_mob_s \ N_mob_1 \ N_mob_2 \dots]$ ，其中 N_mob_i 指示了节点收到 RREQ 报文时位置信息和节点移动模型、速率范围等随机参量信息；**LREL_flag** 指示了 $\mathbf{RL}$ 中各链路 LREL 是否达到链路共享要求的稳定度阈值(LREL_thr)。 N_i ($i \geq 1$) 会根据从 N_{i-1} 接收到的有效 RREQ 报文中 N_mob_{i-1} 值和自身 N_mob_i 计算两点间链路 LREL_i (式(14))，若 LREL_i 超过 LREL_thr ，则 LREL_flag_i 为 1 ($i_{i-1,i}$ 允许共享)，反之为 0。以上参数随 RREQ 转发不断更新，直至到达 N_d 。另外，当接收到 RREQ 的节点已经存在于 $\mathbf{RL}$ ，则丢弃报文以防止路由环路。

3.2 多路径选取及 RREP 发送

REL_MSR 算法采用基于 LREL 和 PREL 估计的多路径选取,其特点为:主路径(MP)和备用路径(BP)允许“部分相交(partially disjoint)”^[4](链路共享)。这一准则依据为:(1)节点间严格不相交(node disjoint)路径数量受限于最小割定律^[8],且稳定度往往无法满足传输要求;(2)若允许共享的链路足够稳定,则可消除因单条链路断裂导致多路径同时失效的可能性,从而保证备用路径数量和路由修复的有效性。

当 N_D 接收到第 1 个 RREQ 副本,将按算法启动路由选取机制。 N_D 首先在 RREQ 副本所携带的路径中,将最先接收且 PREL 满足稳定度阈值 (PREL_thr) 的路径设为 MP,以保证其在所选路径中具有最短的端到端传输时延。 N_D 收到后续 RREQ 副本时除了估计其所携带路径 r_i 的 PREL,还需检验链路共享条件是否满足:即 r_i 与 MP 不完全重合的前提下,若所有共享链路 LREL_flag 值为 1,则满足条件, r_i 被列入 BP 列表 BPL;反之 r_i 为无效路径。另外, N_D 在 MP 确定时刻启动路由选择定时器 (Timer),设定 RREQ 副本接收时限,当 Timer = 0,路径选取停止, N_D 将所选路径信息以 RL 参数形式附于单个 RREP 报文(图 3(b))中,沿 MP 发送给 N_S 。至此路由发现进程结束。

3.3 路由修复机制

基本源路由协议不具备路由修复机制。当数据传输中路径失效, N_S 只能通过 RREQ 泛洪重启路由发现进程,造成大量的路由开销。REL_MSR 算法利用备用路径策略实现快速路由修复,具体方法为:当首先负责数据传输的 MP 失效,断裂链路的上游节点向 N_S 发送路由错误(Route Error, RERR)报文, N_S 选取 PREL 最高的 BP 作为新的 MP 进行数据续传,若多条 BP 同时满足要求,则 N_S 选择其中跳数最少的路径。

Type	RREQ		Length		HC_num
S_addr	RREQ_ID		D_addr	RREQ_LT	
RL	N_S	N_1	N_2	...	N_D
N_mob				...	
LREL_flag	0			0/1	

(a) RREQ

Type	RREP	Length	
S_addr	RREQ_ID	RL	

(b) RREP

图 3 REL_MSR 算法 RREQ 及 RREP 报文格式

表 1 目的节点处路由选取算法

算法 1 目的节点处 RREQ 处理及路由选取

描述: 目的节点 N_D 收到来自上游节点 N_P 的 RREQ 报文

```

1  if (RREQ_LT == 0) or (RREQ 中路径  $r_i$  与  $N_D$  已记录
    的具有相同(S_addr, RREQ_ID)的某条路径重合) or
    (PREL < PREL_thr)
2  丢弃 RREQ 报文
3  else 将  $N_D$  添加到 RREQ 的 RL 中
4      if ( $r_i$  为 (S_addr, RREQ_ID) 对应第 1 条路径)
5          设置该路径为 MP
6          为 (S_addr, RREQ_ID) 设置 Timer 选取 BP
7  else if ((S_addr, RREQ_ID) 路径记录已存在)
    and (Timer == 0)
8      丢弃 RREQ 报文
9  else if ( $r_i$  与已有 (S_addr, RREQ_ID) 路径严格不
    相交)
10     将该路径加入 BPL 并记录其 PREL
11     else 找出  $r_i$  与已有 (S_addr, RREQ_ID) 路径的共
        享链路
12     if (共享链路不包含  $l_{PD}$ )
13         跳转到 15 行
14     else 计算 LRELPD 并设定 LREL_flag
15         检验所有共享链路 LREL_flag
16     if (所有检验结果 == 1)
17         将该路径加入 BPL 并记录其 PREL 计算结果
18     else 丢弃 RREQ 报文
19  end all if

```

4 性能仿真及分析

运用 MATLAB 仿真平台实现 MANET 建模,将本文 REL_MSR 算法与另外两种稳定性路由算法 PRMLE^[3]和 LEBR^[6]进行对比。首先比较 3 种算法的路由发现收敛时间,再进一步通过吞吐量 (TH)、平均数据传输时延 (TD) 和路由开销 (R_OH) 的仿真结果比较,验证本文算法的有效性和优越性。表 2 给出了 3 种算法核心思想(不涉及 PRMLE 算法中继节点网络编码部分)。其中 LEBR 基于按需距离矢量路由协议 (Ad hoc On-demand Distance Vector, AODV)。AODV 的 RREQ 和 RREP 报文中只包含其转发节点的一跳信息。PRMLE 本地路由修复机制是指当数据传输路径中某条链路稳定度降低时,中间节点可以进行数据缓存并启动路由发现机制建立与目的节点的新路径,而 REL_MSR 算法的路由修复则是由 N_S 集中控制。

4.1 算法收敛时间仿真对比

本文针对反应式路由算法改进,为了考察算法收敛速度,比较 REL_MSR 与 PRMLE, LEBR 算法的路由发现收敛时间 T_C ,即路由建立时间^[15](平均

表2 3种算法核心思想及实现方法

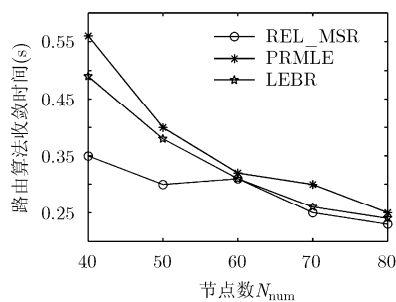
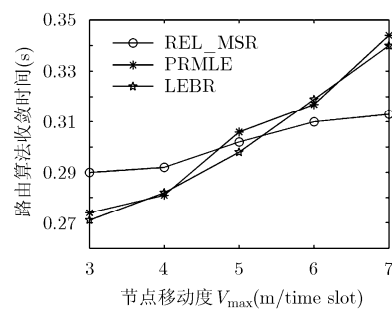
算法名称	链路稳定性准则	路径稳定性准则	算法类别	路由修复	链路相关性
PRMLE	链路生存期(LL): 相邻节点接收功率周期性采样, 文献[3]式(1)~式(18)	路径生存期(PL): $PL = \min(LL_1, LL_2, \dots, LL_N)$	改进DSR 单BP	中间节点 本地修复	不考虑
LEBR	链路有效性(L): 链路LL与平均LL之比, 文献[6]式(29)和式(30)	路径有效性(P_{LA}): $P_{LA} = \prod_{i=1}^N L_i$	改进AODV 无BP	无	不考虑
REL_MSR	LREL: 式(14)	PREL: 式(15)	改进DSR 多BP	源节点 修复	考虑

完成单个(N_s, N_d)路由请求的耗时)。仿真实验方法为: (1)将 N_{num} 个移动节点随机分布于面积为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域内, 各算法以 $t_0=5\text{ s}$ 为周期执行单次路由发现, 共进行100次; (2)各周期(N_s, N_d)随机选取, N_s 于周期初始时刻广播RREQ, 当 N_s 成功接收规定数量的RREP报文时, 路由发现结束; (3)单周期内各节点移动速度和方向服从均匀分布($V_i \sim U(0, V_{\text{max}})$, $\vartheta_i \sim U(-\pi, \pi)$)且保持恒定; (4)各算法每隔 t_0 记录路由发现耗时, 最终取100次输出记录的平均值作为 T_C 结果。

为了排除网络协议栈其他各层因素(如节点间通信退避机制, 传输带宽配置)、单个节点计算延迟及路由表存储对算法性能评估的影响, 仿真进一步假设: (1)路由发现过程中只有 N_d 可以发送RREP报文, 中间节点只负责报文转发和处理; (2)RREQ在各转发节点所需更新时间统一设为 20 ms , 即转发同步(不考虑各算法在计算所需参数时的复杂度差异); (3)相邻节点报文传输耗时均为 40 ms ; (4)PRMLE和本文REL_MSR算法 N_d 处RREP接收(路径选取)时限为 60 ms , 仿真为LEBR算法设置相同的路径选取时限, 目的是使其在单次路由决策中选出 P_{LA} 最优路径; (5)链路断裂条件为两节点间距离大于传输半径 $R=15\text{ m}$, 若负责RREP传输的链路在其经过前发生断裂, 则路由建立失败, N_s 需立即重新广播RREQ再次尝试路由发现。

图4为 $V_{\text{max}}=5\text{ m/s}$ 时, 3种算法 T_C 随 N_{num} 变化对比结果。从图中可以看出, 总体上各算法收敛时间随 N_{num} 增大而有所下降。这是因为节点密度增大后各节点间平均距离缩小, 链路稳定性随之提升, 有利于高质量路由的建立。另外, 当 N_{num} 较小时(≤ 60), 本文REL_MSR算法 T_C 明显小于其他两种算法结果。图5为 $N_{\text{num}}=60$ 时, 3种算法 T_C 随 V_{max} 变化对比结果。由图5可知, 增大 V_{max} 使链路稳定性降低, 造成各算法 T_C 均有所上升, 但本文算法 T_C 曲线上升最为平缓, 且 $V_{\text{max}} \geq 5$ 后 T_C 值明显低于其他两种算法。

综上所述, 在网络状态良好的情况下(N_{num} 较大, V_{max} 较小), 3种路由算法收敛速度相当; 当网络节点连通性降低或移动度升高, 本文REL_MSR算法收敛时间更短, 具有一定优越性。这一结果的根本原因在于: 其他两种算法受路径稳定性标准所限(未考虑相邻链路统计相关性), N_d 路由决策所选路径未必是稳定性最优的, 因此链路断裂造成RREP无法成功到达 N_s 的可能性增加, 且PRMLE算法中 N_d 需要将两个RREP报文沿不同路径发送给 N_s (本文算法和LEBR算法只需发送一个RREP报文), 额外增加了路由发现耗时。本文算法利用准确的LREL和PREL估计, 提高所选路径的稳定性, 能够显著缩短路由建立时间。

图4 节点数变化时 T_C 仿真结果图5 节点移动度变化时 T_C 仿真结果

4.2 网络性能指标仿真对比

现考虑算法改进对网络整体性能影响, 首先做如下假设: (1) 仿真中不考虑 MAC 层及物理层环境影响(如信道衰落或乱序造成的传输误差), 数据到达 N_D 即视为正确接收; (2) 链路具有足够带宽避免网络拥塞; (3) RREP 报文均能被 N_S 正确接收; (4) 路由修复允许数据续传, 无需重启路由发现; (5) 若路由发现重新启动, 则 N_D 丢弃数据流中已接收到的部分, 等待重传; (6) 各节点随机移动模型相同: $V_i \sim U(0, V_{\max})$, $\vartheta_i \sim U(-\pi, \pi)$ 。

仿真参数设置如表 3 所示。仿真中应用层采用的每个 CBR 数据流预期传输时延 $T_E = 50$ (time slot)。本文 REL_MSR 算法 PREL(T) 及 LREL(T) 估计中取 $T = (1 + \gamma)T_E$ 。 γ ($0 < \gamma < 1$) 为算法预设因子, 设置目的在于: 理论上规定并保证各链路(路径)RLL(RPL)值大于 T_E 。仿真中设 $\gamma = 0.1$ 。其次, 各组参数下系统在仿真周期(T_0)初始时刻分配 60 个数据请求(含不同 N_S, N_D), T_0 后输出并记录各项性能指标, 仿真截止($100T_0$)后各指标取其所有输出值的均值作为最终统计结果。最后, 仿真中若路由发现进程重启 3 次后数据传输仍无法完成, 则数据丢失。另外, 设 PRMLE 算法用于功率采样的 HELLO 报文发送周期为 1 (time slot)。

图 6, 图 7 和图 8 分别给出当网络中节点移动度 $V_{\max} = 3$ (m/time slot), 节点数(N_{num})变化时, 3 种算法所得 TH, TD 及 R_OH 仿真对比结果。总体来看, 在仿真区域固定情况下, 增加 N_{num} 等同于增加节点密度, 节点间路由选择机会及连通性有所增加, 因而网络性能趋于优化。

如图 6 所示, REL_MSR 算法所得 TH 比 PRMLE 和 LEBR 算法分别提高 10% 左右, 当 $N_{\text{num}} \in (660, 700)$ 时优化效果最为明显。由图 7 可见, 与 LEBR 算法相比, REL_MSR 和 PRMLE 算法能使数据传输时延平均缩短约 15%, 当 N_{num} 较小时尤为明显($N_{\text{num}} = 600$ 时, 该比率值约为 24%)。这一结果根本原因在于: REL_MSR 和 PRMLE 算法

表 3 网络性能仿真参数设置

参数名称	参数设置
仿真区域	400 m×400 m
节点数	600~800
仿真周期 T_0	100 time slot
仿真运行时间	100 T_0
数据类型	固定速率数据流(CBR)
单个数据尺寸	100 packets
发送速率	2 packet/time slot
路由协议	PRMLE/LEBR/REL_MSR
路径选取时限	Timer = 2 (time slot)
节点传输半径	50 m
节点最小速率	0
节点最大速率	1~6 m/s

具有快速路由修复机制, 能够有效避免 N_S 与 N_D 间因链路断裂造成的多次路由发现和数重传, 从而更好地保证通信连续性。图 8 中, 本文算法 R_OH 明显低于 PRMLE 算法: 当 N_{num} 分别为 600 和 800 时, 后者 R_OH 约是前者的 1.6 倍和 2 倍。该结果说明: 虽然 PRMLE 与本文算法在缩短 TD 方面达到了同样效果, 但却以更高的 R_OH 作为代价。这是因为前者 R_OH 中除了 RREQ, RREP 及 RERR 报文, 还包括邻居节点间用于 RLL 估计的周期性 HELLO 报文, 在一定程度上增大了资源消耗。

图 9, 图 10 和图 11 分别给出当 $N_{\text{num}} = 700$, $V_{\max}$ 变化时, 3 种算法所得各指标仿真对比结果。总体上由于 $V_{\max}$ 增大会增强链路不稳定性, 因此网络性能随 $V_{\max}$ 升高有所下降。由图 9 可知, PRMLE 和 LEBR 算法所得 TH 基本相同, 而 REL_MSR 算法所得 TH 比前两者平均提高约 10%, 且在各 $V_{\max}$ 取值下均较为明显。图 10 中, REL_MSR 算法得到的 TD 值最小且对应曲线上升最为平缓, PRMLE 和 LEBR 算法 TD 分别在 $V_{\max} = 5$ 和 $V_{\max} = 4$ 之后出现明显上升。当 $V_{\max} = 1$ 时 LEBR 算法平均 TD 约为 REL_MSR 算法的 1.1 倍, 而 $V_{\max} = 6$ 时前者约

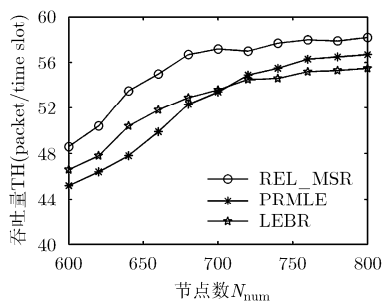


图 6 节点数变化时 TH 仿真结果

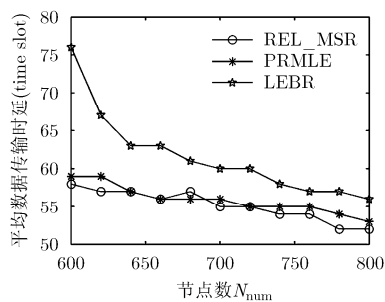


图 7 节点数变化时 TD 仿真结果

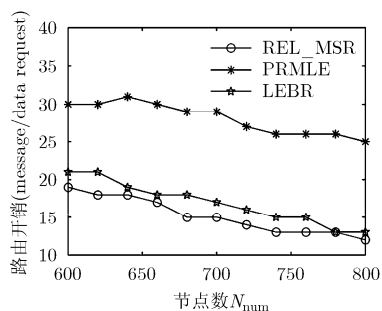


图8 节点数变化时 R_OH 仿真结果

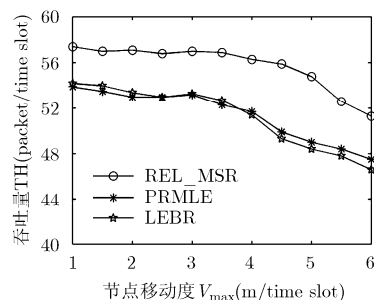


图9 节点移动度变化时 TH 仿真结果

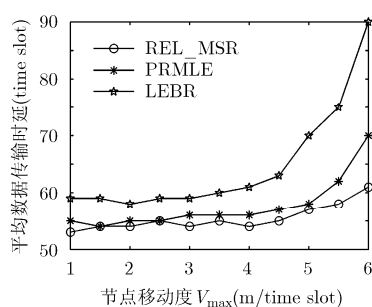


图10 节点移动度变化时 TD 仿真结果

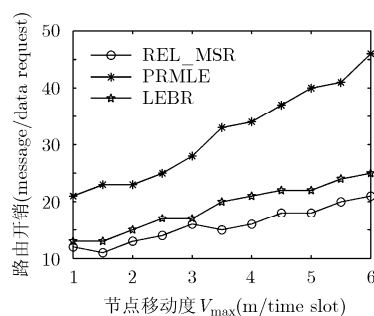


图11 节点移动度变化时 R_OH 仿真结果

为后者的 1.5 倍。图 11 显示出了与图 10 一致的对比结果, 显然 REL_MSR 所得 R_OH 低于其他两种算法, 特别当 $V_{\max} = 1$ 和 $V_{\max} = 6$ 两种情况下, PRMLE 算法 R_OH 分别是 REL_MSR 算法的 1.8 倍和 2.2 倍左右。

综上所述, 图 6-图 11 的仿真结果充分验证了本文算法的有效性及其优越性: 与现有算法相比, REL_MSR 算法充分考虑了相邻链路 RLL 相关性, 能够建立更准确、可靠的稳定性评估准则, 使数据传输依赖于生存期更长的路径, 有效减弱节点高速移动对数据传输造成的不利影响, 具有更强的适应性, 并且在提高网络 TH, 缩短数据 TD 的同时保证较低的 R_OH, 实现稳定性与资源利用的合理兼顾。

5 结束语

本文在路径 RPL 统计特性分析基础上, 充分考虑相邻链路 RLL 相关性, 提出一种优化的路径稳定性评估准则, 进而提出一种基于可靠路径稳定度估计的多路径路由优化算法。仿真对比结果表明: 与已有稳定性路由算法相比, 本文算法能够提供更可靠的路径稳定性评估准则, 在网络拓扑动态性较高的情况下依然能够保持较快的收敛速度, 并且能够有效降低节点移动度上升对数据传输造成的不利影响, 在提高 MANET 网络吞吐量, 缩短数据传输时延, 减少路由开销方面具有重要意义。

参考文献

- [1] 郑博, 黄国策, 张衡阳. 三维移动 Ad hoc 网络链路动态性研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(11): 2605-2609. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00191.
ZHENG Bo, HUANG Guoce, and ZHANG Hengyang. Link dynamics in three-dimensional mobile Ad hoc networks[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(11): 2605-2609. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00191.
- [2] MOUSSAOUI A and BOUKEREAM A. A survey of routing protocols based on link-stability in mobile ad hoc networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2015, 47: 1-10. doi: 10.1016/j.jnca.2014.09.007.
- [3] WU Dapeng, WANG Ruyan, and ZHEN Yan. Link stability-aware reliable packet transmitting mechanism in mobile ad hoc network[J]. *International Journal of Communication Systems*, 2012, 25(12): 1568-1584. doi: 10.1002/dac.1323.
- [4] SALEEM M, ULLAH I, KHAYAM S A, et al. On the reliability of ad hoc routing protocols for loss-and-delay sensitive applications[J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(3): 285-299. doi: 10.1016/j.adhoc.2010.07.012.
- [5] AKBARI TORKESTANI J and MEYBODI M R. A link stability-based multicast routing protocol for wireless mobile ad hoc networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(4): 1429-1440. doi: 10.1016/j.jnca.2011.03.026.
- [6] LEI Lei, WANG Dan, ZHOU Liang, et al. Link availability

- estimation based reliable routing for aeronautical ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2014, 20: 53–63. doi: 10.1016/j.adhoc.2014.03.005.
- [7] WU Dapeng, ZHOU Jianer, and WANG Ruyan. Received signal strength based link lifetime estimating mechanism in MANET[C]. IEEE Conference Anthology, Chongqing, China, 2013: 1–4. doi: 10.1109/ANTHOLOGY.2013.6784986.
- [8] SANTOS M A S, PORRAS D E T, SILVEIRA R M, *et al.* Multipath source routing strategies for video transmission in ad hoc wireless networks[J]. *Wireless Networks*, 2014, 21(3): 859–869. doi: 10.1007/s11276-014-0823-x.
- [9] KUMAR C N and SATYANARAYANA N. Multipath QoS routing for traffic splitting in MANETs[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, 48: 414–426. doi: 10.1016/j.procs.2015.04.115.
- [10] YI J, ADNANE A, DAVID S, *et al.* Multipath optimized link state routing for mobile ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(1): 28–47. doi: 10.1016/j.adhoc.2010.04.007.
- [11] YANG Wenjing, YANG Xinyu, YANG Shusen, *et al.* A greedy-based stable multi-path routing protocol in mobile ad hoc networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(4): 662–674. doi: 10.1016/j.adhoc.2010.09.004.
- [12] TRIVIÑO-CABRERA A, GARCÍA-DE-LA-NAVA J, CASILARI E, *et al.* Application of path duration study in multihop ad hoc networks[C]. IFIP Advances in Information and Communication Technology, Prague, Czech Republic, 2007: 63–74. doi: 10.1007/s11235-008-9094-0.
- [13] 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. doi: 10.1016/j.comnet.2005.10.005.
- [14] LI Zhinan and HAAS Z J. On residual path lifetime in mobile networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2016, 20(1): 185–188. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2520467.
- [15] FENG Renjian, LI Tongling, WU Yinfeng, *et al.* Reliable routing in wireless sensor networks based on coalitional game theory[J]. *IET Communications*, 2016, 10(9): 1027–1034. doi: 10.1049/iet-com.2015.0884.
- 李智楠: 女, 1987 年生, 博士生, 研究方向为无线通信系统理论、MANET 路由优化算法.
- 杨晓冬: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代通信系统技术与理论、现代天线技术.