

Ad Hoc 网络中基于链路故障的路由修复机制

赵季红¹, 曲桦^{2,3}, 张鹏¹

(1. 西安邮电学院通信工程系, 710061, 西安; 2. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安;
3. 西安交通大学软件学院, 710049, 西安)

摘要: 针对已有的 Ad Hoc 网络中路由修复算法未考虑节点状态的不确定性、以单一节点作为路由查找目的地、恢复效率低等局限性, 提出了一种基于链路故障的路由修复机制. 该机制不是简单地认为移动节点自始至终都处于工作状态, 而是每个修复节点将下游节点的状态变化所导致的路由失效作为选择路由修复策略的依据. 根据状态变化分析了链路断开的原由, 包括节点间相对移动、节点故障和节点关闭, 从而选择不同的节点作为 RREQ 消息的目的节点. 修复节点采用多目的地址的 RREQ 消息进行广播. 通过数学分析和仿真表明, 在不同的节点故障情况下, 所提机制的平均路由建立时间可降低 13% 左右, 平均控制开销可减小 18%, 这显示出机制具有更好的适应实际网络的能力.

关键词: Ad Hoc 网络; 路由修复; 链路故障

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)10-0047-05

A New Route Repair Mechanism Based on Failures for Ad Hoc Networks

ZHAO Jihong¹, QU Hua^{2,3}, ZHANG Peng¹

(1. Department of Telecommunications Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710061, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. School of Software Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Focusing on the limitations of the existing route repair algorithm for ad hoc networks, such as without considering the nondeterminacy of the node state, setting a single node as the routing destination, and low repair efficiency, a new route repair mechanism is presented based on link failures. The mechanism doesn't always regard the moving node at working state. The status changes of downstream nodes from the repairing node are used as the basis of choosing route repair schemes. The causes of link breaks such as mobility between nodes, node failures and node power-off are analyzed according to the change of node status, and different nodes are selected as destinations for RREQ. RREQ with multiple destinations is broadcasted by the repairing node. Mathematical analysis and simulations are carried out to evaluate the network performance. Results under different node failure circumstances show that the average route setup time of the proposed mechanism is reduced by 13%, the control overhead ratio is decreased by 18%, and that the proposed mechanism is well applicable to real networks.

Keywords: Ad Hoc network; route repair; link failure

Ad Hoc 网络是一种多跳无线分布式网络^[1], (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector)^[4]是按需路由协议的代表, 提供本地路由修复机制, 即由断链处

的上游节点完成路由修复,这有助于降低修复时间,控制开销。当网络的规模较大或路径较长时,更有必要采用本地路由修复^[5]。基于本地修复的改进机制主要有3类:备用路由^[6]、跨层交互^[7-8]、改进网络层算法^[9-10]。备用路由要求节点监听所有数据帧以维护备用路由,这将大大增加节点能耗。跨层交互的难点是在层间进行有效的信息交互。因此,在网络层改进路由修复算法有其必要性。已有网络层路由修复机制简单地认为节点始终无故障工作,实际上节点可以自由入网或退网,也可能关闭或发生故障。若断链处的下游节点失效,反向路由重建机制^[9]的效率会更低。保存下2跳策略^[9]虽然在较小范围广播路由请求(RREQ: Route Request)仍可修复路由,但维护下2跳节点却增加了路由协议的开销。

1 基于链路故障的路由修复机制

基于链路故障的路由修复机制的设计思想是:①关注节点状态的变化,即修复节点将它的下游节点的状态变化作为选择路由修复策略的依据;②修复节点依据下游节点的状态变化分析链路断开的原因,根据不同的断链原因选择不同的节点地址作为RREQ的目的节点。

1.1 链路故障的分类

从网络层角度分析实际网络中节点状态对路由的影响得知,导致链路断开的原因除了节点相互移动以外,还包括节点关闭、节点由于发生故障而失效。根据节点状态的变化对链路产生的影响,链路断开的原因可归纳为3类,对应着3种链路故障:①节点的相对移动,造成链路中断或者产生单向链路;②节点自身故障,包括软、硬件故障,致使上、下游链路同时中断;③节点主动关闭,包括人为关闭或能耗殆尽关闭等,致使上、下游链路同时中断。

1.2 改进的RREQ分组

改进修复机制采用了改进的RREQ,RREQ分组不仅包括下游节点(下1跳或下2跳)地址,而且还包括数据分组的目的地址。修复节点广播RREQ,既可以尝试建立到达下游节点的路由,也可以搜索到达最终目的节点的路由。

1.3 故障通知分组

节点关闭时需收集路由表中有效路由表项的下1跳节点和目的节点信息,然后向邻节点广播命令REN(Route Error Notification)(生存时间=1 s),而REN的参数是若干对路由表项的节点地址。邻节点收到REN后认为它与REN发送节点间的链

路将断开,并设置链路故障为第3种故障,然后根据REN的发送节点和其中的目的节点地址查找路由表,并将路由表项的下2跳节点设置为REN中对应的下1跳节点。

改进的路由修复机制的实施方案分为2个阶段:第1阶段,修复节点发起第1次路由修复,若路由失效的原因为第3种链路故障,修复节点广播以下2跳和数据分组目的节点为目的地的RREQ;否则,修复节点广播以下1跳和数据分组目的节点为目的地的RREQ。第1次路由修复过程采用小范围的RREQ广播,如果第1次路由修复成功,修复节点更新路由表并转发缓存的数据分组,路由修复过程结束;如果路由修复失败,修复节点发起第2次路由修复过程,该过程和AODV的本地修复过程是相同的。

2 典型实例

如图1所示,网络中有1条路由A—B—F—C—E—H—J,假设网络中分别产生以下3种链路故障。

(1)节点C和节点E的相对移动造成链路CE断开。

(2)节点E发生软硬件故障造成链路CE、DE、EH同时断开。

(3)节点E的关闭造成链路CE、DE、EH同时断开,节点E广播故障,通知分组,节点C收到消息后可以得到其下2跳节点H,节点C设置路由为无效。

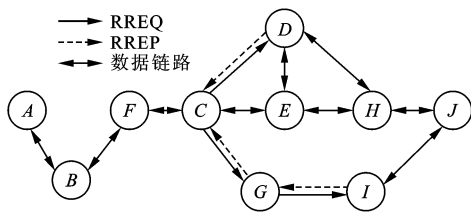


图1 基于链路故障的路由修复过程

根据图1路由及其链路假设,其相应的路由修复过程描述如下。

(1)节点C收到目的地址为数据分组目的节点J的数据分组,此时到达节点J的路由已失效,节点C将修复该路由。

(2)在第1次路由修复过程中,如果链路CE为第3种故障,则节点C广播以下2跳节点H和数据分组目的节点J为目的地的RREQ;否则,节点C

广播以下 1 跳节点 E 和数据分组目的节点 J 为目的地的 RREQ。

(3) 若节点 J 或者有到达节点 J 的路由节点 I 收到 RREQ, 则节点返回 RREP(Route Reply)。

(4) 若节点 D 收到 RREQ, 如果它有到达节点 J 的路由, 返回 RREP, 否则取出 RREQ 中的第 2 个目的地, 即节点 E (第 1 种或第 2 种链路故障) 或节点 H (第 3 种链路故障); 如果节点 D 具有到达节点 E 或节点 H 的有效链路, 返回 RREP, 并在路由表中建立 1 条路由, 以节点 J 为目的节点, 以节点 E 或节点 H 为下 1 跳节点。

(5) 节点 C 收到 RREP 后更新路由表并依次转发缓存中的数据分组, 路由修复过程结束。

(6) 若第 1 次路由修复失败, 则节点 C 发起第 2 次路由修复过程, 路由搜索条件仅为目的节点 J 。

(7) 若第 2 次路由修复失败, 则节点 C 广播 RERR, 通知其他节点链路 CE 已断开。

3 性能分析

下面用数学方法和仿真软件来评估基于故障的路由修复机制的性能。

3.1 数学分析

设 P_i 为第 i 类链路故障发生的概率, $i = 1, 2, 3$, 且 $\sum_{i=1}^3 P_i = 1$; Q_i 为第 1 次路由成功修复第 i 类链路故障的概率, T_i 为相应的路由修复时间; T_a 为第 1 次路由修复失败后, 第 2 次路由成功修复的平均时间; T_w 为第 1 次路由修复时修复节点等待 RREP 分组的最长时间。

改进的路由修复机制包含了 2 次路由修复过程, 若第 1 次路由修复失败, 则发起第 2 次路由修复过程。对于第 i 种链路故障, 改进机制成功建立新路由的平均时间 $T'_i = Q_i T_i + (1 - Q_i)(T_a + T_w)$, 因此改进机制成功建立新路由的平均时间 $T_{lr++} =$

$$\sum_{i=1}^3 (T'_i P_i) = \sum_{i=1}^3 [Q_i T_i + (1 - Q_i)(T_a + T_w)] P_i.$$

AODV 本地修复和基于链路故障的路由修复机制的第 2 次路由修复过程相同, 因此 AODV 本地修复成功建立新路由的平均时间 $T_{lr} = T_a$ 。需要证明: $T_{lr} \geq T_{lr++}$, 即 $T_{lr} - T_{lr++} \geq 0$ 。

$$T_{lr} - T_{lr++} = T_a - \sum_{i=1}^3 (T'_i P_i) = T_a - \sum_{i=1}^3 [Q_i T_i + (1 - Q_i)(T_a + T_w)] P_i = T_a \sum_{i=1}^3 Q_i P_i -$$

$$\sum_{i=1}^3 Q_i T_i P_i - T_w (1 - \sum_{i=1}^3 Q_i P_i)$$

为使上式 ≥ 0 , 要求

$$T_a \sum_{i=1}^3 Q_i P_i - \sum_{i=1}^3 Q_i T_i P_i - T_w (1 - \sum_{i=1}^3 Q_i P_i) \geq 0 \Rightarrow$$

$$T_w (1 - \sum_{i=1}^3 Q_i P_i) \leq T_a \sum_{i=1}^3 Q_i P_i - \sum_{i=1}^3 Q_i T_i P_i$$

因为 $Q_i < 1$ 且 $\sum_{i=1}^3 P_i = 1$, $\sum_{i=1}^3 Q_i P_i < 1 \Rightarrow 1 - \sum_{i=1}^3 Q_i P_i > 0$, 所以

$$T_w \leq \frac{T_a \sum_{i=1}^3 Q_i P_i - \sum_{i=1}^3 Q_i T_i P_i}{1 - \sum_{i=1}^3 Q_i P_i} = T \quad (1)$$

下 1 跳和下 2 跳节点通常比目的节点更接近修复节点, 则有 $T_a > T_i$, 由式(1)可得 $T > 0$ 。所以, 只要 T_w 满足式(1), 就有 $T_{lr} \geq T_{lr++}$, 证明成立。

下 1 跳与下 2 跳节点距离目的节点越远, $T_a - T_i$ 就越大, 式(1)的分子就越大; 第 1 次路由修复成功建立路由的概率 Q_i 越大, 式(1)的分母就越小, 所以 T 值就越大, 从而 T_w 的取值范围越大, 因此更容易满足 $T_{lr} > T_{lr++}$ 的条件。由此可知, 改进的路由修复机制的路由建立时间比传统 AODV 的短, 而且下 1 跳和下 2 跳节点距离目的节点越远, 第 1 次路由修复的成功率越高, 优化效果就越明显。同理可以证明, 改进的路由修复机制的控制开销比传统 AODV 的小, 而且下 1 跳和下 2 跳节点距离目的节点越远, 第 1 次路由修复的成功率越高, 优化效果就越明显。

3.2 仿真分析

采用 NS-2 仿真软件来评估基于链路故障的路由修复机制的性能。网络中随机分布 50 个节点, 分布区域 $1\,500\text{ m} \times 300\text{ m}$, 节点采用 Random Way-point 运动模型, 节点随机选择一个目的地, 以最大为 10 m/s 的速度移动至目的地, 随机停留一段时间后, 再随机移动到下一个目的地。网络内最大会话数为 20, 业务模式采用 CBR(Constants Bit Rate)流量模型, 每秒钟产生 4 个数据分组, 每个分组为 512 B。无线传输采用 IEEE 802.11b, 速率为 2 Mb/s , 传输半径为 250 m 。仿真过程使用了 5 个不同的场景, 每次仿真时间为 600 s 。仿真结束后统计各性能参数的平均值。

为模拟现实网络中节点状态的变化, 节点以一定概率随机发生状态变化, 状态变化包括节点启动、关闭和异常故障。节点异常为第 2 种链路故障, 节点

关闭为第3种链路故障,节点间的移动为第1种链路故障.节点故障率为仿真过程中发生异常故障和正常关闭的节点占总节点数的比例,其中预定发生异常故障的节点与正常关闭的节点数的比例为1:4,此比例仅是对实际网络内节点故障情况的大致估计.

对采用改进路由修复机制的AODV和传统路由修复机制的AODV分别仿真,并统计数据分组传送率、路由建立时间和控制开销.数据分组传送率为成功接收的数据分组数与发送的数据分组总数的比值;路由建立时间为所有成功的路由建立所用的平均时间;控制开销比为控制的数据分组数与成功发送的数据分组数的比值.分别进行2组实验:①考察改进机制在不同拓扑变化环境下的性能;②评估改进机制在不同网络故障环境下的性能.

3.2.1 节点移动性对路由性能的影响 通过调整节点的最大停留时间 $\max t$ 来反映网络拓扑的变化程度,节点移动到某处后在区间 $[0, \max t]$ 内按照均匀分布概率随机选择停留时间 t , t 较大意味着网络拓扑变化缓慢.分别在7组实验中设置 $\max t = 50\text{ s}, 100\text{ s}, 200\text{ s}, 300\text{ s}, 400\text{ s}, 500\text{ s}, 600\text{ s}$,采用统一的节点故障率 $r = 0.2$.

节点移动性对路由性能的影响如图2所示,可以看出改进机制的性能在不同的网络拓扑环境下优于AODV本地修复机制,路由建立时间平均减少了近8%,控制开销比降低了约20%,数据分组传送率提高了约3%.在传统的路由修复机制中,修复节点

在网络范围内广播RREQ,以建立到达目的节点的路由,而在改进的路由修复机制中,修复节点首先在小范围内广播改进的RREQ,不仅尝试建立到达目的节点的路由,还搜索到达下1跳或下2跳节点的路由,从而控制了RREQ的传播范围,优化了路由修复过程.同时,改进机制要求节点在关闭前广播REN,通知邻节点,避免了邻节点在将要断开的链路上发送数据分组,从而提高了数据分组传送率.

3.2.2 节点故障率对路由性能的影响 通过调整节点故障率来反映网络内节点故障的发生情况.分别在5组实验中设置5种不同的节点故障率 $r = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$,采用统一的 $\max t = 50\text{ s}$.

节点故障率对路由性能的影响如图3所示,可以看出改进机制的性能在不同故障环境下优于AODV本地修复机制,路由建立时间平均减少了近13%,控制开销比降低了约18%,数据分组传送率在节点故障率较大的情况下优化效果更明显,平均提高了约10%.与图2相比,图3的数据分组传送率呈逐渐下降的趋势,这是由于网络内节点故障的增加必然更多地造成数据分组的传送失败.在改进的机制中,节点关闭前广播REN,邻节点收到消息后先缓存数据分组,然后进行路由修复,从而避免了数据分组传送失败.

4 结束语

本文提出了一种基于链路故障的路由修复机

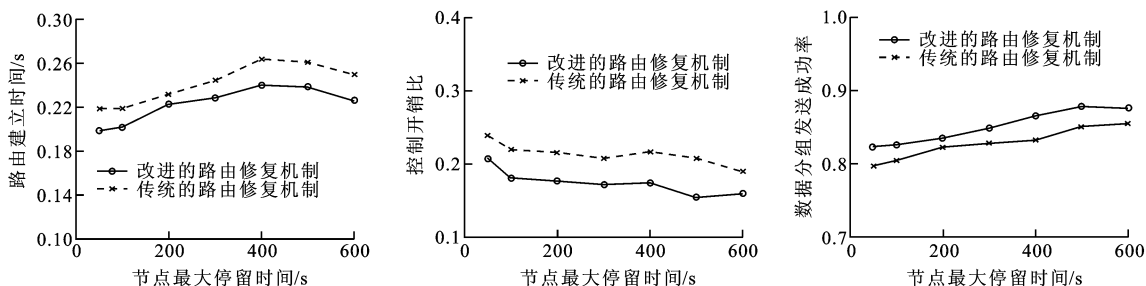


图2 节点移动性对路由性能的影响

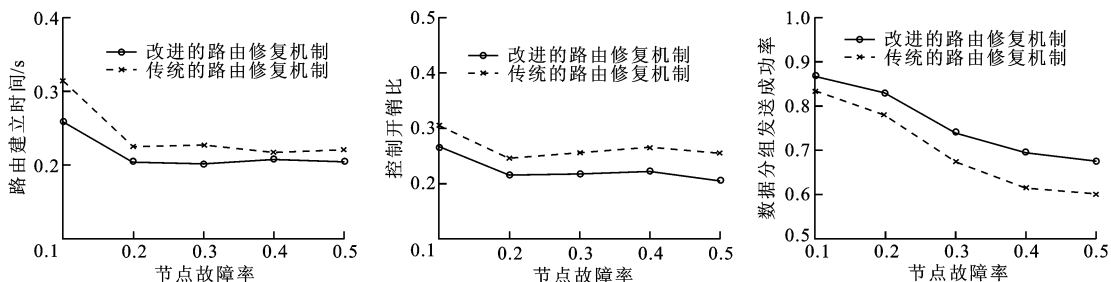


图3 节点故障率对路由性能的影响

制,通过对链路故障分类,修复节点可采取相应的路由修复方法.改进的路由修复机制关注网络内节点的状态变化,其更加适应现实的网络环境.数学分析和仿真结果表明,改进的路由修复机制能降低控制开销和路由建立时间,提高数据分组发送的成功率.后续的研究将以提高路由修复机制的自适应性为目标,为不同的业务环境和网络环境提供更多的路由修复策略.

参考文献:

- [1] CORSON S, MACKER J. RFC 2501 Mobile ad hoc networking (MANET): routing protocol performance issues and evaluation considerations [S]. Reston, VA, USA: Internet Society, 1999.
- [2] 周元,李光胜,詹永照,等. Ad Hoc 网络组播路由协议的设计与仿真 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(4): 41-45.
ZHOU Yuan, LI Guangsheng, ZHAN Yongzhao, et al. Design and simulation of multicast routing protocol for ad hoc networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(4): 41-45.
- [3] 郑杰,屈玉贵,郭淑杰,等. 无线传感器网络低时延能量均衡安全路由 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 161-165.
ZHENG Jie, QU Yugui, GUO Shujie, et al. Low delay energy equalizing secure routing in wireless sensor network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 161-165.
- [4] PERKINS C, ROYER E, DAS S. RFC 3561 Ad hoc on-demand distance vector routing [S]. Reston, VA, USA: Internet Society, 2003.
- [5] ARON I D, GUPTA S. Analytical comparison of local and end-to-end error recovery in reactive routing protocols for mobile ad hoc networks [C]//Proceedings

of the 3rd ACM International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York, USA: ACM, 2000: 69-76.

- [6] 王玉明,杨宗凯,赵大胜. 基于缓存旁路和本地修复的多跳网络路由重建机制[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1622-1627.
WANG Yuming, YANG Zongkai, ZHAO Dasheng. Cache bypass and local recovery based route reconstruction scheme for mobile ad hoc networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(7): 1622-1627.
- [7] FENG Meiyu, CHENG Sheng, ZHANG Xu, et al. A self-healing routing scheme based on AODV in ad hoc Networks[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Computer and Information Technology. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society, 2004: 616-620.
- [8] PANDEY M, PACK R, LEI W, et al. To repair or not to repair: helping ad hoc routing protocols to distinguish mobility from congestion [C]//INFOCOM 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2311-2315.
- [9] 卢昊,郭伟. 保存下两跳节点策略在 AODV 路由算法中的应用 [J]. 计算机科学, 2005, 32(4): 110-112.
LU Hao, GUO Wei. Keep the second hop node in the AODV routing protocol [J]. Computer Science, 2005, 32(4): 110-112.
- [10] 葛文英,李腊元. AODV 路由协议局部修复机制的优化与仿真研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2007, 31(3): 464-467.

GE Wenying, LI Layuan. Optimism and simulation of local repair mechanism of AODV [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 31(3): 464-467.

(编辑 苗凌)

[本刊相关文献链接]

延长实时无线传感器网络生命周期的能量平衡路由. 西安交通大学学报, 2007, 41(10): 1137-1141.
基于随机密钥预分布模型的安全定向扩散协议. 西安交通大学学报, 2007, 41(12): 1423-1426.
无线传感器网络低时延能量均衡安全路由. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 161-165.
多输入多输出的异构无线传感器网络时分多址调度算法. 西安交通大学学报, 2008, 42(11): 1402-1407.
双心音媒体接入协议中的隐藏节点问题及其改进. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1459-1463.
面向信誉的自组网节点合作方法. 西安交通大学学报, 2009, 43(8): 17-21.