

## 战术无线自组网中稳定多径路由协议

王 硕, 周 阳, 陈英伟, 周 桃, 严晔隼

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 在战术通信网络中,节点快速移动会导致网络拓扑变化较快,从而频繁触发新的路由发现进程,导致网络稳定性下降。提出了一种稳定缠绕多径路由协议 SWMR,在利用源路由信息建立节点不相交多径路由的同时,利用无线通信特性,构建缠绕主路由间的备份路径,减少网络路由开销,增强网络稳定性。仿真结果表明,在网络拓扑快速变化场景下,SWMR 协议在快速移动发送成功率、平均端到端延时和归一化路由开销等方面与 AOMDV 和 AODV 协议相比具有一定优势。

**关键词:** 战术通信网络; 自组网; 缠绕路径; 多径路由

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-637X(2017)03-0085-04

## Stable Multi-path Routing Protocol in Tactical Ad Hoc Network

WANG Shuo, ZHOU Yang, CHEN Ying-wei, ZHOU Tao, YAN Xi-jun

(Beijing Institute of Astronautics System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Nodes moving with high speed can bring rapid topology change in tactical communication network, which may invoke new route discovery processes and lead to network performance degradation. To alleviate this problem, a novel Stable Wrapped Multi-path Routing (SWMR) protocol is proposed, which uses source routing approach to establish node-disjoint primary routes, and builds up several backup paths among each primary route synchronously by utilizing overheard route reply packets. By constructing such multi-path routes, the protocol not only provides higher network stability, but also reduces route discovery latency and routing overheads. Simulation results show that: compared with AOMDV and AODV, SWMR has a better routing performance in packet delivery ratio, average delay and normalized load metrics when the network topology changes rapidly.

**Key words:** tactical communication network; Ad Hoc; wrapped path; multi-path routing

### 0 引言

战术无线自组网络是一种在战术环境下无需基础设施的多跳临时性无线自组移动网络,具有无中心、自组织、多跳路由、独立组网、节点移动等特点。在战术无线自组网中,节点作为路由器需要转发来自其他节点的分组信息。但是受移动性、通信范围的限制,特别是在节点高速移动的情况下,网络拓扑结构变化很快,会频繁触发路由发现过程,增加路由开销。

为了提高网络路由的稳定可靠性,战术无线自组网中多采用多径路由。在多径路由协议中,只有当所

有路径均失效后才会启动新的路由发现,大大减少了路由开销<sup>[1]</sup>。文献[2]利用节点的地理位置信息将网络划分成不相交区域,快速建立最大限度不相交多径路由;文献[3]通过选择邻居节点变化率和路由长度低的节点来提高路由稳定性;文献[4]利用链路状态感知信息及时切换备用路径,以降低路由延时。但在以上路由协议中,当某一段链路失效时,即使该路由上其他链路仍处于完好状态,仍会导致该路由中断,降低网络性能。

为充分利用既有仍处于完好状态的路由信息,增强网络稳定性,本文提出了稳定缠绕多径路由协议(Stable Wrapped Multipath Routing, SWMR)。SWMR 协议在源路由信息的基础上,充分利用无线信道广播通信的特性,在源-目的节点间的节点不相交主路由旁边建立多条备份路径,以实现完好路径的充分利用。

收稿日期:2016-09-14

修回日期:2016-10-19

作者简介:王 硕(1985—),男,湖北荆州人,硕士,工程师,研究方向为战术通信网络技术。

## 1 多径路由稳定性分析

网络的路径稳定性同许多因素有关,比如说无线信道干扰、地理位置、节点移动性等。在本文的稳定性分析中,不考虑其他因素,只考虑节点的移动性以及路径相关性对路径稳定所产生的影响。

### 1.1 参考模型

节点  $S$  和  $D$  之间的多径路由  $MP_0$ , 包括路径  $P = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  和路径  $P = (B_1, B_2, \dots, B_n)$ , 多径路由  $MP_1$  包括路径  $P = (C_1, C_2, \dots, C_n)$  和路径  $P = (E_1, E_2, \dots, E_n)$ 。  $MP_0$  与  $MP_1$  有相同的跳数, 但  $MP_0$  是节点不相关的, 而  $MP_1$  是链路不相关(有共享节点)<sup>[5]</sup>。

假设每个节点的移动概率相同, 均为  $p$ 。对路径  $P = (A_1, A_2, \dots, A_n)$ , 其中断概率为

$$p(P_{\text{break}}) = 1 - (1 - p)^n \quad (1)$$

其稳定性概率为

$$p(P_{\text{stability}}) = (1 - p)^n \quad (2)$$

定义  $MP_i$  为包含两条路径的多径路由, 其中,  $i$  值为 2 条路径的共享中间节点数。设其中第 1 条路径的跳数为  $n$ , 第 2 条为  $m$ 。

对于  $MP_i$  的稳定性分析, 可计算  $MP_i$  2 条路径均中断的概率。定义  $p(MP_i)$  为  $MP_i$  2 条路径均中断的概率。

当  $i = 0$  时,

$$p(MP_0) = p[P_{\text{break}}(A_1, A_2, \dots, A_n)] \cap p[P_{\text{break}}(B_1, B_2, \dots, B_n)] = [1 - (1 - p)^n][1 - (1 - p)^m] \quad (3)$$

当  $i = 1$  时,

$$p(MP_1) = p[P_{\text{break}}(C_1, C_2, \dots, C_n)] \cap p[P_{\text{break}}(E_1, E_2, \dots, E_m)] = [1 - (1 - p)^{n-1}][1 - (1 - p)^{m-1}] + p \quad (4)$$

将  $p(MP_1)$  和  $p(MP_0)$  相减, 即

$$f_1(p) = p(MP_1) - p(MP_0) = p[1 - (1 - p)^{n-1} - (1 - p)^{m-1} + (2 - p)(1 - p)^{n-1}(1 - p)^{m-1}] \geq 0 \quad (5)$$

将  $p(MP_2)$  和  $p(MP_1)$  相减, 即

$$f_2(p) = p(MP_2) - p(MP_1) = p[1 - (1 - p)^{n-2} - (1 - p)^{m-2} + (2 - p)(1 - p)^{n-2}(1 - p)^{m-2}] \geq 0 \quad (6)$$

由式(5)、式(6)结果, 对  $i$  值扩展后可以得出

$$p(MP_k) \geq \dots \geq p(MP_l) \geq \dots \geq p(MP_0) \quad (7)$$

式中,  $k > l > 0, k < \min(n, m)$ 。

### 1.2 结论分析

从对上述节点不相关路径和链路不相关路径的稳定性分析中, 可以得出如下两个结论。

1) 多径路由的中断概率与中间节点的移动性以及中间节点的个数相关。

2) 多径路由的中断概率还与路径的相关性有联系, 即多径路由中共用的节点数越少, 其中断的概率就

越小。节点不相关的多径路由, 其稳定性要好于链路不相关的多径路由。

## 2 SWMR 路由协议

为了减少由路由失效而导致额外的路由发现开销, SWMR 协议在每一对源 - 目的节点间构建了 2 条节点不相交的主路由和若干缠绕在主路由周围的备份路径。当源 - 目的节点主路由某一段链路失效断开后, SWMR 协议会启用缠绕主路由周围的备份路径快速恢复主路由, 从而避免整条主路由失效, 减少重启路由发现次数, 从而减少网络路由开销。SWMR 协议可分为路由建立和路由维护 2 部分。

### 2.1 路由建立

当源节点有数据包发送但没有到达目的节点的路由信息时, SWMR 协议则启动路由建立机制。SWMR 路由建立机制主要完成在源 - 目的节点间发现和建立 2 条节点不相交的主路由和若干围绕在主路由周围的备份路径。

SWMR 协议路由建立可分为两部分: 1) 寻找从源节点  $s$  到目的节点  $d$  间可达路径的路径发现过程; 2) 构建从目的节点  $d$  到源节点  $s$  的不相交多径路由及缠绕主路由间的备份路由的路径构建过程。

#### 2.1.1 路径发现

源节点首先广播发送路由请求包 RREQ, 并建立路由表。网络中间节点第 1 次从接收到的 RREQ 中获取到所经历的路由信息后, 将其前向广播给邻居节点。对后续接收到的 RREQ, 中间节点在判断其跳数不大于第 1 个 RREQ 且与第 1 个 RREQ 经过的路径无交叉的情况下将其前向广播, 否则丢弃。

在 AODV 协议中, 当中间节点自身存在到达目的节点路由信息时, 接收到路由请求 RREQ 后会直接向源节点发送路由回复包 RREP。但如此一来, 目的节点则可能收集不到足够的 RREQ 所带的路由探测信息, 从而无法建立节点不相交多径路由。因此, SWMR 协议中只有目的节点才能给源节点发送路由回复包。

#### 2.1.2 路径构建

当目的节点接收到路由请求包 RREQ 后, 按照接收时间顺序从中选取 2 条节点不相交的主路由, 然后通过主路由分别回传路由回复包 RREP。路由回复包可分为主路由回复包 RREP 和备份路由回复包 RREP\_AP。

在无线通信网络中, 节点通过电磁波在空间广播的方式进行信号传输, 在电磁波通信范围内其他节点均能监听到该信息。借助该特性, SWMR 协议在中继回传路由回复包 RREP 过程中构建围绕主路由的备份路径。

图 1 给出了 SWMR 协议建立围绕主路由的备份

路径的过程示意。其具体过程如下。

1) 目的节点 d 接收到源节点 s 发起的多个路由请求 RREQ, 而 a, b, c, e, f 等中间节点在前传 RREQ 的同时获取了各自到达源节点的反向路由。

2) 目的节点 d 优选出 s-a-b-c-d 作为主路由后, 向节点 c 发送路由回复包 RREP。

3) 目的节点 d 的邻居节点 c, g, j 同时接收到该 RREP。节点 c 接收到后记录下主路由信息, 并向节点 b 广播。节点 g, j 监听到该 RREP 后, 发现其存在到达主路由下一跳节点 b 的路由, 则构建一条到目的节点的备份路径, 并向节点 b 发送备份路由回复 RREP<sub>AP</sub>。RREP<sub>AP</sub> 只在 1 跳范围内传播。

4) 节点 b 接收到 RREP<sub>AP</sub> 后, 将节点 g, f 作为备份路径的下一跳记录在路由表中。节点 f, i 接收到该 RREP<sub>AP</sub> 后, 发现自己不在主路由中, 则丢弃该数据包。

5) 当源节点 s 接收到节点 a 发送的 RREP 和节点 e, h 发送的 RREP<sub>AP</sub> 后, 则构建 s-a-b-c-d 的主路由及缠绕期间的备份路径, 见图 1c, 路径构建过程完毕。

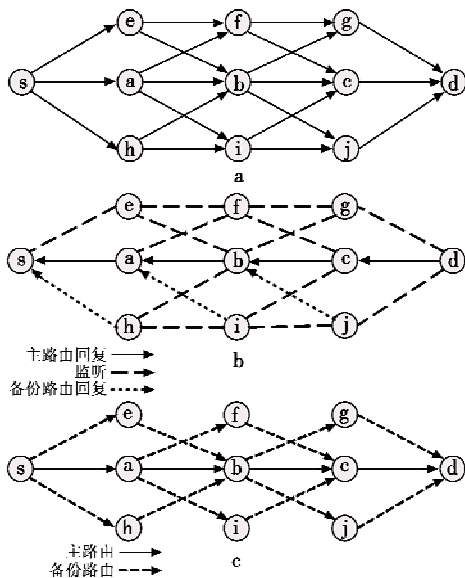


图1 主/备份路由建立过程

Fig. 1 Primary routes and backup routes construction

### 2.2 路由维护

在节点快速运动导致网络拓扑变化、路由失效时, SWMR 协议启动路由维护过程, 主要面临的情况有 2 种。

1) 前向发送数据包失败。当节点 i 向主路由下一跳节点 j 传输数据包失败时, 首先节点 i 从路由表中删除经节点 j 转发的所有路由信息, 然后查询是否存在到达目的节点的备份路径信息。如存在备份路径则节点 i 通过已有的备份路径转发数据包; 如不存在备份路径或所有备份路径均失效的情况下, 节点 i 中止转发数据包, 并向源节点发送路由错误包 RERR。

2) 接收到路由错误包 RERR。当中间节点 i 接收到节点 j 回传的路由错误包 RERR 后, 节点 i 从路由表中删除经节点 j 到达目的节点的路由信息, 并回传 RERR。源节点收到 RERR 后, 删除该主路由信息, 并将网络负载重新分配到另一条主路由上。当源-目的节点间所有路由均失效时, 源节点启动新一轮路由建立过程。

## 3 仿真环境及性能指标

### 3.1 仿真环境设置

本文采用 OPNET 14.5 作为仿真平台。节点随机分布在仿真场景中, 每个节点从仿真时间 10 s 开始产生数据分组直至仿真结束, 数据源类型为 CBR。数据链路层采用 OPNET 提供的 IEEE 802.11 DCF 无线接入协议, 传输速率设置为 2.4 Mbit/s。仿真的其他参数如表 1 所示<sup>[6-10]</sup>。

表1 仿真参数表

Table 1 Simulation parameters

业务	参数
仿真时间/s	600
仿真节点数	50
场景/m	1500 × 1500
移动模型	参考点组移动模型
节点通信范围/m	250
数据流量大小/(个 · s <sup>-1</sup> )	5
数据包大小/B	512
目的地址	随机

本文选择经典的单径路由协议 AODV 和多径路由协议 AOMDV 与 SWMR 协议进行对比仿真分析。每个仿真结果为 5 个不同仿真种子实验下仿真结果的平均。

### 3.2 仿真性能指标

1) 发送成功率: 接收端接收的数据包数/发送端发送的数据包数, 反映了网络传输的可靠性, 数值越大可靠性越高。

2) 平均端到端延时: 目的节点收到数据包的时间与源节点发送数据包的时间差, 值越小网络反应越快, 网络质量越令人满意。

3) 归一化路由开销: 单位数据包个数所引起的额外路由包个数, 反映了路由协议的运行效率。

## 4 仿真结果分析

仿真试验中网络节点运动速率分别为 0 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s, 20 m/s, 主要测试 SWMR, AOMDV, AODV 3 种协议在不同网络移动性下的网络性能差异。从图 2 中可以看出, 随着网络拓扑变化加快, 路由失效概率增大, 3 种协议的发送成功率降低。由于 SWMR 协议构建了节点不相交的主路由和缠绕其间的备份路由, 降低了

路由失效次数,在部分路径失效后能够通过备份路由由快速修复,因此其发送成功率高于 AOMDV 和 AODV。

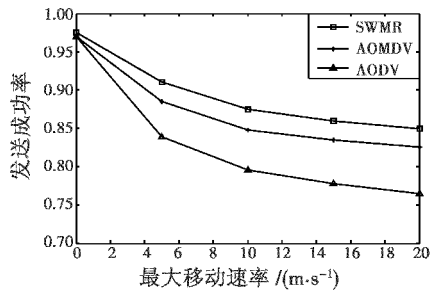


图2 发送成功率对比

Fig. 2 Packet delivery ratio vs velocity

图3显示随着节点移动速率增加,3种协议的平均端到端时延增加,但SWMR协议的时延增加幅度最小。当节点移动速率较小时,AOMDV和AODV协议延时比SWMR协议小,这是由于中间节点不回复路由和目的节点多径选择而延迟回复RREP所导致。当节点移动速率较大时,SWMR协议延时比AOMDV,AODV协议低。究其原因是,由不相交多径路由和备份路由构建的稳定传输链路减少了路由中断次数,有效地减少因路由失效而引起的数据包缓存数量,降低了排队时延。

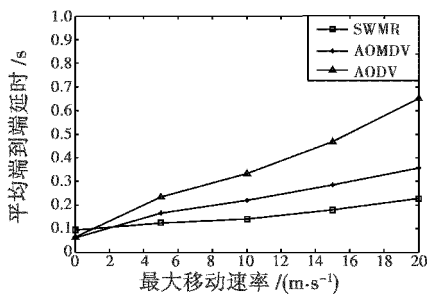


图3 平均端到端延时对比

Fig. 3 Average delay vs velocity

图4显示当节点低速率移动时,3种协议的路由开销较小,但随着节点移动速率增加,网络拓扑不稳定,路由开销增大。

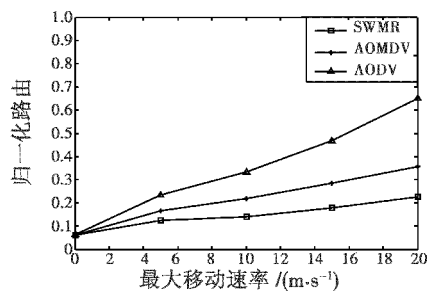


图4 归一化路由开销对比

Fig. 4 Normalized routing load vs velocity

SWMR协议中,减少了由中间节点发送的RREP数量,同时增加了用于建立备份路由的RREP\_AP。因而在移动速度较低时,3种协议路由开销大致相同。

而随着速度增加,SWMR协议路由开销远小于AOMDV,AODV协议。这是由于构建的稳定路由降低了由于某一段链路中断而导致新路由发现启动次数,从而减少了路由开销。

## 5 结束语

本文提出的稳定缠绕多径路由SWMR协议,在路由发现过程中构建2条节点不相交主路由,并利用无线信道广播特性以较小的开销建立若干缠绕在主路由边的备份路径,形成了较为稳定的路由网络,使其能较好地适应战术移动网络应用场景。仿真结果表明,相比AOMDV和AODV协议,在节点移动速度较快时,SWMR协议具有更高的发送成功率,更低的端到端平均延时和路由开销。SWMR协议的提出为设计和优化多径路由协议提供了一种新的思路,在流媒体网络方面拥有较好的应用前景。

## 参考文献

- [1] RADI M, DEZFOULI B, BAKAR K. A, et al. Multipath routing in wireless sensor networks: survey and research challenges [J]. *Sensors*, 2012, 12(1): 650-685.
- [2] 董萍,钱焕延,魏晓飞,等. Ad Hoc网络基于平面区域划分的多径路由协议[J]. *计算机应用研究*, 2014, 31(5): 1554-1557.
- [3] 王顶,王珊珊,席效禹. 基于路由长度的多径路由协议[J]. *计算机工程*, 2014, 40(9): 82-86.
- [4] 谢忠明,何华冰,李云飞,等. 一种基于链路状态感知的Zigbee多径路由算法[J]. *微电子学与计算机*, 2015, 32(9): 65-69.
- [5] 袁博. Ad Hoc网络多路路由研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [6] LEE Y O, NARASIMHA A L. Constructing disjoint paths for failure recovery and multipath routing [J]. *Computer Networks*, 2012, 56(2): 719-730.
- [7] 潘胜利,杨析儒,张志勇,等. 单源多径路由网络拥塞链路识别[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(9): 2232-2237.
- [8] 赵科莉,李铮,李皓,等. 基于OPNET的多数据链组网设计与仿真[J]. *电光与控制*, 2014, 21(9): 61-64.
- [9] PERKINS C E, ROYER E M. Ad-Hoc on-demand distance vector routing (AODV) [R]. California: University of California, 2013.
- [10] JOHNSON D, HU Y, MALTZ D. RFC4728 on the Dynamic Source Routing protocol (DSR) for mobile Ad Hoc networks for IPv4 [EB/OL]. [2007-02-13]. <http://www.ietf.org/rfc/rfc4728.txt>.