

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.11.017

引用格式:夏辉,王辛果,杜晓明.一种适用于军用无线自组网的可靠多径路由协议[J].电讯技术,2014,54(11):1549-1553. [XIA Hui, WANG Xin-guo, DU Xiao-ming. A Reliable Multipath Routing Protocol for Military Wireless Ad Hoc Networks[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(11): 1549-1553.]

一种适用于军用无线自组网的可靠多径路由协议^{*}

夏 辉¹,王辛果^{2,**},杜晓明³

(1. 海军装备研究院,上海 200436;2. 中国西南电子技术研究所,成都 610036;3. 中国北方工业公司,北京 100053)

摘 要:由于在无线环境、移动模型、硬件平台等方面的差异,民用无线自组网协议无法直接适用于军用网络。为军用无线自组网设计了一种新的可靠多径路由协议。首先,设计了新的可靠性、稳定性路径指标和多路径之间的相关性因子,并提出了选择满足单路径指标且互相关因子最低的 L 条路径的选路算法。仿真结果表明,该协议比 DT-MAODV 具有更高的投送成功率和更低的端到端时延。

关键词:军用无线自组网;可靠路由;多径路由;路径相关因子

中图分类号:TN915.04;TN923 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)11-1549-05

A Reliable Multipath Routing Protocol for Military Wireless Ad Hoc Networks

XIA Hui¹, WANG Xin-guo², DU Xiao-ming³

(1. Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China; 2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China; 3. China North Industries Corporation, Beijing 100053, China)

Abstract: The protocols designed for traditional civil wireless ad hoc networks cannot be directly applied to military counterparts, due to the differences in wireless environment, hardware platform, mobility model, etc. In this paper, a novel reliable multipath routing protocol (RMRP) is proposed for military wireless ad hoc networks. First, new path factors in terms of reliability, stability, and the correlation factor of multi paths are designed, and then a routing algorithm that can select L paths is proposed, where the reliability and stability of each path meets the requirements and the path correlation factor of any two paths is minimized. Extensive simulation results show that RMRP achieves higher delivery success ratio and lower end-to-end delay when compared with DT-MAODV.

Key words: military wireless ad hoc network; reliable routing; multi-path routing; path correlation factor

1 引 言

由于作战应用的特殊需求,军用无线自组网对通信路径的可靠性和稳定性要求极高。如何在动态变化的网络拓扑中建立满足 QoS (Quality of Service) 需求的通信路径是无线自组网研究的关键问题之一^[1]。多径路由协议在源和目的节点之间维护多条路径,与单径路由相比具有更高的可靠性和稳定性^[2]。

与民用无线自组网相比,军用无线自组网还具有一些特性需要在设计路由协议时予以充分考虑:无线通信环境更加恶劣,经常会受到外部的严重干扰;节点移动的群体性更强,属于同一编队的节点运动轨迹相关性较高;节点移动速率高,断链可能会频繁发生;节点通常具有地理定位模块,地理位置信息易于获取。

在多径路由中,除了优化每条路径的路径指标

^{*} 收稿日期:2014-07-01;修回日期:2014-11-04 Received date:2014-07-01;Revised date:2014-11-04

^{**} 通讯作者:xinguowang911@163.com Corresponding author:xinguowang911@163.com

• 1549 •

外,还应让连接相同源和目的节点的路径之间保持低相关性,以提升路由可靠性。本文首先分析了路径相关性与网络拓扑的关系,定义了一种新的基于地理位置的路径相关因子来进一步量化路径之间的相关程度;然后,提出了一种最小化路径相关性的多径路由协议,该协议选择多条既能满足给定的单路径指标又具有最低相关性的路径,从而最大程度保证多径路由的可靠性和稳定性。

2 选路指标

2.1 路径指标

路径指标主要包括可靠性和稳定性,路径由多跳链路组成,因而路径指标取决于链路指标。

2.1.1 可靠性

链路质量指标^[3] (Link Quality Indication, LQI) 为链路的一次性传输的成功率,该值的计算方法如下:

$$LQI = \frac{N_{rx}}{N_{tx}} \tag{1}$$

其中, N_{rx} 是接收方正确接收的消息数量; N_{tx} 是发送方发送的消息数量。每个节点通过周期性广播的 HELLO 消息向相邻节点反馈本节点正确接收的消息数量。

路径质量指标 (Path Quality Indication, PQI) 则为路径上所有链路的一次性传输成功率的乘积:

$$PQI = \prod LQI_k \tag{2}$$

将路径质量指标 PQI 作为可靠性指标。

2.1.2 稳定性

如图 1 所示,在评估从节点 i 到节点 j 的链路失效时间时,建立以节点 i 的位置为原点的三维垂直坐标系。链路失效时间 (Link Expiration Time, LET) 定义为按照节点间目前的相对运动速度,节点 j 离开 i 的通信半径范围 R 所需的时间。

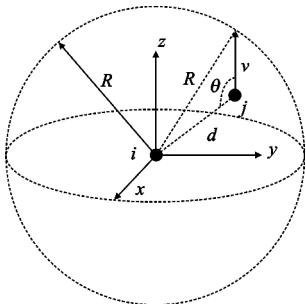


图 1 链路失效时间估计模型
Fig. 1 LET estimation model

通过交换位置和速度信息,可以计算得到当前时刻节点 i 和 j 之间的距离 d 以及它们之间的相对运动速度向量 v 与向量 ij 的夹角 θ 。根据余弦定理,可以得到

$$LET = \frac{d \cos \theta + \sqrt{R^2 - (d \sin \theta)^2}}{|v|} \tag{3}$$

当 θ 小于 90° 时,平台 i 与 j 将相向运动,链路失效时间相对较长;否则,平台 i 与 j 将背向运动,链路失效时间相对较短。

路径失效时间 (Path Expiration Time, PET) 则定义为路径上所有链路的失效时间的最小值:

$$PET = \min \{ LET_k \} \tag{4}$$

将路径失效时间 PET 作为稳定性指标。

2.2 路径相关性

路径相关性是指两条路径之间在可靠性和稳定性方面的相关程度,路由协议选择多条路径时应选择路径两两之间的相关性尽可能低的路径集^[4]。如图 2 所示,按照是否具有相同的转发节点,路径的关系可以分为相交和不相交,前者的相关性显然高于后者。

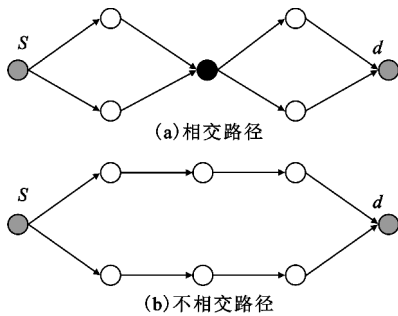


图 2 路径相关性
Fig. 2 Path correlation

对于相交的两条路径,根据具有相同的转发节点数量化它们的相关性,路径具有的相同转发节点越多,路径的相关性就越高;对于不相交的两条路径,根据路径之间的空间距离量化它们的相关性。在实际网络中,距离越近的多跳链路越有可能因受到来自相同干扰源的干扰而造成多条路径同时失效,距离越近的节点越有可能属于同一编队而同时离开目前所在区域造成多跳路径同时断开。因此,距离越近的路径之间的相关性越高,反之亦然。

假设路径 P_i 上的节点依次为 $s, r_1, r_2, \cdots, r_m, d$ 。

其中, s 为源节点, d 为目的节点, 转发节点集 R_i 为 $\langle r_1, r_2, \dots, r_m \rangle$ 。根据转发节点的地理位置, 采用剪枝搜索算法计算得到 R_i 对应的凸包集 $Q_i = \langle q_1, q_2, \dots, q_k \rangle$, 显然 $Q_i \subseteq R_i$ 。计算凸包集 Q_i 的质心 c_i 的地理位置 $\langle x_{c_i}, y_{c_i}, z_{c_i} \rangle$ 。同理, 可计算路径 P_j 的质心位置。进一步, 可计算不相交路径 P_i 和 P_j 的质心距得到相关因子 $PCF_{i,j}$ 。

如图 3 所示, 路径 i 和 j 的相关因子 $PCF_{i,j}$ 的正式定义如下:

$$PCF_{i,j} = \begin{cases} |R_i \cap R_j|, & R_i \cap R_j \neq \emptyset \\ 1 - \frac{\sqrt{(x_{c_i} - x_{c_j})^2 + (y_{c_i} - y_{c_j})^2 + (z_{c_i} - z_{c_j})^2}}{H}, & R_i \cap R_j = \emptyset \end{cases} \quad (5)$$

其中, H 为网络中最大节点间距离。路径相交时, 相关因子等于两条路径具有的共同转发节点的数量, $PCF \geq 1$; 路径不相交时, 相关因子取决于两条路径的质心距和 H 的比值, $0 \leq PCF < 1$ 。

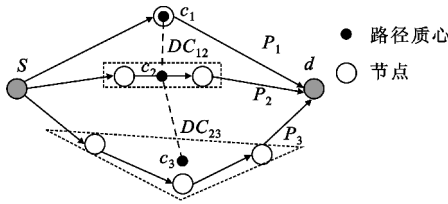


图 3 路径相关因子
Fig. 3 Path correlation factor

3 路由协议

3.1 选路算法

多径路由算法选出满足给定的可靠性和稳定性要求且任两条路径的相关性尽可能低的 $L (L \geq 2)$ 条路径, 该路径集合记为 P 。选路算法可以建模为下面的优化问题:

$$\begin{aligned} \min \max_{i,j \in P} PCF_{i,j} \quad (6) \\ \text{s. t.} \quad |P| = L \\ PQI_i \geq \gamma, PQI_j \geq \gamma, \forall i, j \in P \\ PET_i \geq \tau, PET_j \geq \tau, \forall i, j \in P \end{aligned}$$

其中, γ 为最低链路可靠性, τ 为最小路径持续时间。优化目标为最小化 L 条路径的互相关因子的最大值。第一个约束条件是必须选出 L 条路径, 第二和第三个约束条件分别是选择的路径的可靠性和稳

定性指标必须满足要求。

假设满足可靠性和稳定性要求的路径共有 N 条, 路径集合为 P , 路径的转发节点集为 $\langle R_1, R_2, \dots, R_N \rangle$ 。假设 $N \geq L$, 否则, 表示算法无法选出 L 条符合条件的路径, 则将 L 减 1 作为算法输入。将 P 中所有路径的转发节点集的交集 $R_1 \cap R_2 \dots \cap R_N$ 记为 C 。问题(6)的求解过程如下:

- 步骤 1: 进行如下操作, 直至 $C = \emptyset$ 或 $|P| = L$:
- (1) 找到与 C 具有最多相同节点的路径 s , 即 $s = \arg \max_{i \in P} |R_i \cap C|$;
 - (2) 将路径 s 从路径集 P 中删除, 重新计算 C ;
 - (3) 如果 $C = \emptyset$, 则进行步骤 2), 如果 $|P| = L$, 则算法结束;

步骤 2: 经过步骤 1 后, 路径集 P 中只剩下不相交路径, 进行如下操作, 直至 $|P| = L$, 算法结束:

- (1) 找到路径集 P 中 PCF 最大的路径对 $\langle i, j \rangle$;
- (2) 如果 $\max PCF_{i,k \in \{P - \{i,j\}\}} > \max PCF_{j,k \in \{P - \{i,j\}\}}$, 将路径 i 从 P 中删除;
- (3) 否则, 将路径 j 从 P 中删除。

3.2 协议细节

RMRP 协议采用先应式的路由策略, 每个节点通过与其他邻居节点不断地交换链路状态消息, 获取全网的拓扑信息, 并维护本节点到网络中其他所有节点的 L 条最优路径。

3.2.1 链路建立

网络中所有节点周期性地广播 HELLO 消息, 获取与本节点邻接的链路状态。该消息中包含本节点地址、本节点的地理位置和运动速度、本节点在统计窗口内收到的来自邻居节点的 HELLO 消息数列表等信息。收到 HELLO 消息后, 计算邻居节点到本节点的链路传输质量和链路失效时间。HELLO 消息的传播距离为一跳, 仅用于感知邻接链路状态和快速建立链路。

3.2.2 拓扑感知

网络中所有节点周期性地广播 TC (Topology Control) 消息共享邻接链路状态信息, 从而获取全网的拓扑信息。TC 消息包含链路的发送地址和接收地址、时间戳、链路质量指标、链路持续时间。节点在全网拓扑表中维护所有感知到的链路状态, 并在拓扑表发生变化时调用选路算法。

RMRP 协议采用与 OLSR (Optimized Link State Routing) [5] 协议中多点中继类似的拓扑信息广播机

制,以减少 TC 消息的广播次数,降低控制开销。每个节点从其一跳邻居节点集中挑选一部分节点作为 MPR(Multi-Point Relay)节点。MPR 节点的邻居节点集合的并集全包含源节点的两跳邻居节点集,保证可通过 MPR 节点到达所有两条邻居节点。节点广播 TC 消息后,只有被选为 MPR 的邻居节点才负责转发 TC 消息。

3.2.3 多径路由

多径选路算法计算 L 条连接源节点和目的节点的相关性低的路径。为确保该性质,采用源路由方式,即源节点将路径上所有节点的地址包含在消息中,中间节点转发消息时直接从消息的头部中查找下跳节点。为保持负载均衡和网络公平性,源节点在每次发送消息时从 L 条路径中随机选择之一作为传输路径。

4 仿真实验及结果分析

采用 OPNET 网络仿真平台^[6]比较 RMRP、DT-MAODV^[7]在投送成功率和端到端时延方面的性能。DT-MAODV 是为 Ad Hoc 网络设计的多径路由协议,该协议通过选择不相交的多条路径来提升传输可靠性。不失一般性,仿真场景为边长为800 km的正方形区域,节点总数为 200,节点通信半径设为 100 km。节点采用参考点组移动模型^[8]作随机运动。在该模型中,属于同一个组的在指定的参考点区域内随机运动。参考点的运动采用 RWP(Random Way Point)模型,最大运动速率为680 m/s。所有仿真结果均为 10 次仿真实验的统计平均值。协议配置参数为 $L=3, \gamma=0.9, \tau=20\text{ s}$ 。应用层采用 CBR(Constant Bit Rate)流量模型,源节点产生消息的间隔为 0.1 s,每条消息的大小为 512 B,消息的目的接收节点为随机产生。

投送成功率定义为目的节点收到消息数与源节点发送消息数的比值,该指标是路由协议可靠性的重要指标。如图 4 所示,两种协议的投送成功率均随链路干扰比例上升或节点运动速率增加而下降。由于 RMRP 协议能够选择相关性更低的多条路径,端到端传输的可靠性更高。在相同网络场景配置下,RMRP 的投送成功率比 DT-MAODV 更高,链路干扰比例越高或者节点的运动速率越大,RMRP 的优势越明显。当链路干扰比例为 0.4 时,RMRP 的投送成功率比 DT-MAODV 高 46.7%;当节点的运动速率为680 m/s时,RMRP 的投送成功率比 DT-

MAODV 高 23.7%。

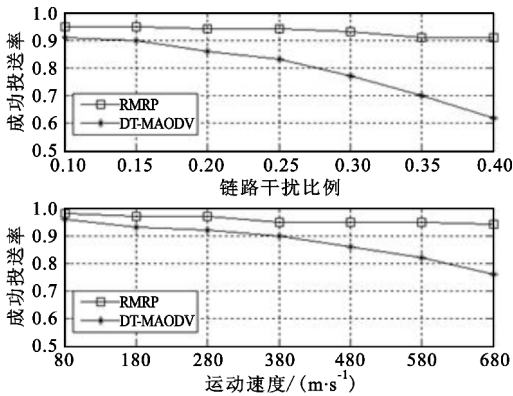


图 4 投送成功率
Fig.4 Delivery ratio

在传输层增加可靠传输机制,并考察消息的端到端时延。该时延定义为从源节点应用层开始产生消息到目的节点应用层收到消息的总时延。如图 5 所示,链路干扰比例越高或运动速率越大,所有消息的平均端到端时延越高。在相同网络场景配置下,RMRP 的端到端时延比 DT-MAODV 更低,链路干扰比例越高或者节点的运动速率越大,RMRP 的优势越明显。当链路干扰比例为 0.4 时,RMRP 的端到端时延比 DT-MAODV 低 60.1%;当节点的运动速率为 680 m/s 时,RMRP 的端到端时延比 DT-MAODV 低 37.1%。

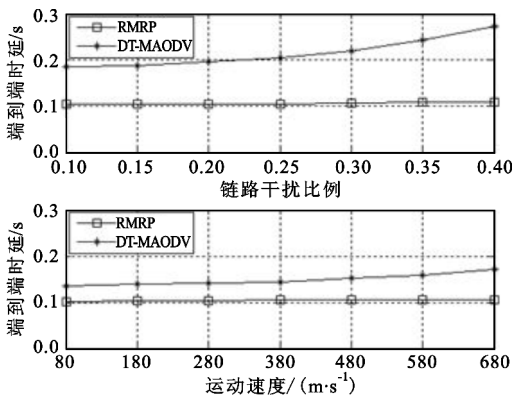


图 5 端到端时延
Fig.5 End-to-end delay

5 总 结

本文针对军用无线自组网的通信环境和平台移动特性设计了一种可靠多径路由协议,即 RMRP 协议。首先,定义了路径的可靠性和稳定性指标以及路径之间的相关因子;接着,提出了一种保证可靠性和稳定性要求且相关性尽可能低的多径选择算法。

仿真结果表明,RMRP 比 DT-MAODV 具有更高的投送成功率和更低的端到端时延。如何利用 RMRP 提供的 L 条路径进一步提升投送成功率是值得继续深入研究的问题。

参考文献:

- [1] Zhang N, Anpalagan A. Comparative Review of qos-aware on-demand routing in ad hoc wireless networks [J]. Wireless Sensor Network, 2010(2): 274-284.
- [2] Mareo A, Gareia-Luna-Aeeves J J. Improving route discovery in on-demand routing protocols using two-hop connected dominating sets [J]. Ad Hoc Networks, 2006, 4(4): 509-531.
- [3] Wang Y, Liu J. A backup multipath routing protocol for ad hoc networks with dynamic topology [C] // Proceedings of 2012 IEEE ICSEM Conference. Guiyang: IEEE, 2012: 237-241.
- [4] Biswas S, Morris R. ExOR: Opportunistic multi-hop routing for wireless networks [C] // Proceedings of 2005 ACM SIGCOMM Conference. Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005: 133-143.
- [5] RFC 3626, Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) [S].
- [6] 龙华. OPNET Modeler 与计算机网络仿真 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
LONG Hua. OPNET Modeler and Computer Network Simulation [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Sahu R K, Saha R, Chaudhari N S. Fault Tolerant Reliable Multipath Routing Protocol for Ad hoc Network [C] // Proceedings of 2012 IEEE CICN Conference. Mathura, India: IEEE, 2012: 117-121.

- [8] 徐鑫鑫. 无线移动 Ad hoc 网络移动模型研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2008.

XU Xin-xin. Research of Mobility Model in Wireless Mobile Ad Hoc Network [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)

作者简介:



夏 辉 (1981—), 男, 江西九江人, 2004 年于国防科技大学获工学硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为航空电子;

XIA Hui was born in Jiujiang, Jiangxi Province, in 1981. He received the M. S. degree from National University of Defense Technology in 2004. He is now an engineer. His research concerns avionics.

王辛果 (1983—), 男, 四川遂宁人, 2011 年于中国科技大学获工学博士学位, 现为工程师, 主要研究方向为战术数据链、无线自组网等;

WANG Xin-guo was born in Suining, Sichuan Province, in 1983. He received the Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2011. He is now an engineer. His research interests include tactic data link, wireless ad hoc networks, etc.

Email: xinguowang911@163.com

杜晓明 (1977—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 2003 年于北京理工大学获工学硕士学位, 现为工程师, 主要研究方向为车辆电控自动化。

DU Xiao-ming was born in Huhhot, Inner Mongolia Autonomous Region, in 1977. He received the M. S. degree from Beijing Institute of Technology in 2003. He is now an engineer. His research concerns vehicle electronic control automation.