

# 战术通信中异构 Ad-hoc 网络路由策略

王 硕, 李 峭, 熊华钢

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

**摘 要:** 针对战术通信中的网络异构性和节点群组移动性, 在建立群组移动模型的基础上, 采用簇头稳定分簇算法动态划分管理异构网络分层结构, 提出基于链路状态的分层路由策略整合异构无线资源。该策略分为区内路由策略和区间路由策略, 面向不同网络层次采用不同路由机制。OPNET 仿真结果表明, 该策略的分组成功接收率和平均端到端延时性能均优于分层 AODV 协议。

**关键词:** Ad-hoc 路由; 战术通信; 异构网络; 群组移动; 分簇算法

## Heterogeneous Ad-hoc Network Routing Strategy in Tactical Communication

WANG Shuo, LI Qiao, XIONG Hua-gang

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191)

**【Abstract】** Aiming at the network heterogeneity and node group mobility in tactical communication, based on building group movement model, this paper uses cluster-head stable clustering algorithm to dynamically divide and manage hierarchical structure in heterogeneous network. It presents hierarchical routing strategy based on link state to integrate heterogeneous wireless resource. The strategy consists of intra-group routing strategy and inter-group routing strategy, adopts different routing strategies for hierarchical network structure. OPNET simulation results show that this strategy has better performance of group success delivery ratio and average end-to-end delay over hierarchical AODV.

**【Key words】** Ad-hoc routing; tactical communication; heterogeneous network; group movement; clustering algorithm

### 1 概述

移动 Ad-hoc 网络(Mobile Ad-hoc NETwork, MANET)由于其自组织、自修复特性被广泛应用于战术通信和灾害救援领域。在战术通信网络中, 节点一般装有多种无线通信终端, 如微波通信终端、短波通信终端。短波通信网采用轮询和主站转发策略, 具有星型网络结构。微波通信网采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)协议, 具有无中心的 Ad-hoc 网络结构。目前移动 Ad-hoc 网络的一个重要研究方向为设计合理有效的路由策略整合网络中各种异构无线资源。本文主要研究战术通信中由微波通信网和短波通信网组成的异构 Ad-hoc 网络路由策略。

在多种不同的网络结构和通信协议共存的异构 Ad-hoc 网络中, 通过挖掘各种环境特性以改善网络性能。在战术通信中, 节点的运动不是随机的, 同一建制单位内节点担负相同的作战任务, 因此, 它们的移动方向和速度具有相似性, 移动方式具有群组移动特性。近年来, 已有一些研究工作将节点群组移动特性引入到移动 Ad-hoc 网络中。文献[1]提出几种群组移动模型, 利用数学建模给出量化评价。文献[2]运用群组移动特性引入“路由组”的概念, 应用其改进动态源路由(Dynamic Source Routing, DSR)协议。文献[3]利用节点分布密度来灵活控制组移动结构, 并研究该模型对 AODV 协议和 DSR 协议的影响。上述研究只限于对现有按需路由协议的扩展, 并不能完全适用于战术通信环境。本文改进簇头稳定分簇(Cluster-head Stable Clustering, CSC)算法划分维护分层网络, 提出一种基于链路状态信息的分层混合式路由策略提高整体性能。

### 2 网络模型

战术通信网络可以表示成一个带权无向图  $G=(V,E,F)$ , 其中,  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  是节点的集合;  $E=\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$  是微波网中边的集合;  $F=\{f_1, f_2, \dots, f_k\}$  是短波网中边的集合。若双方均在对方的微波通信范围内, 则边  $e_i=(v_i, v_j)$  表示  $V$  中的节点  $v_i$  和  $v_j$  的连接;  $t(v_i, v_j)$  为  $e_i$  的边权, 可以是延时、跳数; 边  $f_s=(v_i, v_j)$  表示短波网主站  $v_i$  与从站  $v_j$  的连接;  $s(v_i, v_j)$  为  $f_s$  的边权。每个节点具有 3 个属性: (1)节点标识 ID, ID 越小指挥权限越大; (2)节点度(Node Degree, ND)为其邻居节点的个数; (3)节点建制标识(TYpe, TY), 同一建制的节点集中分布在同一区域内, 具有相似移动特性。群组移动模型见图 1。

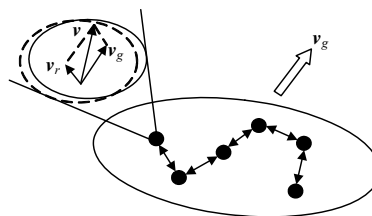


图 1 群组移动模型

本文采用群组移动模型来模拟节点群组移动特性。节点

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(60879024); 航空科学基金资助项目(20081951028)

**作者简介:** 王 硕(1985—), 男, 硕士研究生, 主研方向: Ad-hoc 网络路由协议; 李 峭, 讲师; 熊华钢, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2010-02-11 **E-mail:** wangshuo@ee.buaa.edu.cn

运动矢量  $\mathbf{v}$  可表示为

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_g + \mathbf{v}_r \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{v}_g$  为节点所在区域的群组移动矢量, 大小和方向一旦设定便不再改变;  $\mathbf{v}_r$  为节点自身的随机扰动矢量, 可表示为

$$\mathbf{v}_r = |\mathbf{v}_r| e^{j\theta} \quad (2)$$

其中,  $|\mathbf{v}_r|$  为一服从均匀分布的随机变量,  $|\mathbf{v}_r| \in U[0, |\mathbf{v}_g|/3]$ ;  $\theta$  为  $|\mathbf{v}_r|$  与  $|\mathbf{v}_g|$  的夹角,  $\theta \in U[0, 2\pi]$ , 每隔 30 s 变化一次。这样既体现节点的独立移动, 又不会影响整体的群组移动特性。

### 3 簇头稳定分簇算法

分簇分层网络结构可以屏蔽异构网络低层中的不同网络结构, 减少路由发现洪泛开销, 加速路由查找过程。近年来, 已提出许多分簇算法, 其中, 最小 ID 号(Lowest ID, LID)算法和最高节点度(Highest Degree, HD)算法由于简单高效而被广泛应用。本文结合 LID 算法和 HD 算法, 侧重于算法简易性和簇稳定性, 采用 CSC 算法动态地划分管理网络。

CSC 算法利用节点群组移动特性, 将具有相似移动特性的同建制节点集划为一个簇群<sup>[4]</sup>。节点获知自己的 ND 值后向其他节点广播。簇中具有最高节点度的节点被选为簇头; 当节点度相同时, 选择 ID 最小的节点作为簇头。簇内同时采用微波网和短波网通信, 簇头通过短波网构成虚拟骨干网。

网络拓扑变化过快会导致簇头频繁更换。为增加簇稳定性, 本文规定节点需维护 2 个本地变量: 当前节点度  $J$  和选举度  $S$ ,  $S$  为节点选举为簇头时的节点度。在簇维护时, 簇头计算  $J$  与  $S$  之间的差值, 如果差值超过规定门限值  $K$ , 则簇群重新选举簇头, 否则该节点继续充当簇头。CSC 算法只在区内周期性路由维护时运行, 无额外的控制开销, 能有效地管理维护分级结构。

### 4 基于链路状态信息的分层混合式路由策略

在分级网络基础上, 基于链路状态信息的分层混合式路由策略由 2 个部分组成:

(1) 区内路由策略通过周期性发送探测分组来建立维护路由;

(2) 区间路由策略只在有信息发送时才建立路由, 引入路由组(Routing Group, RG)机制来减少路由开销。

#### 4.1 区内路由策略

区内路由策略采用基于链路状态的先验式路由策略, 节点在数据分组发送前已获得路由信息。节点的群组移动特性使簇内拓扑变化较慢, 先验式路由能以较小的开销运行。区内路由策略定义链路延时为路径权值的度量标准。

微波网在路由建立时采用探测分组获取链路延时信息, 通过节点洪泛广播各自邻居链路信息来获取完整区内微波网拓扑。短波网通过主站轮询确定网络拓扑, 短波网传输速率较低, 传输延时占据了主要花费。

节点在得到全局网络拓扑后, 按照拓扑信息产生图的邻接矩阵。设  $G_n = (V, E, F)$  是具有  $n$  个簇群节点的图, 则  $G_n$  的微波网邻接矩阵  $\mathbf{W}$ 、短波网邻接矩阵  $\mathbf{S}$  是如下性质的  $n$  阶方阵,  $\mathbf{W} = \mathbf{W}^T, \mathbf{S} = \mathbf{S}^T$ :

$$\mathbf{W}[i, j] = \begin{cases} t(i, j) & \text{若 } d(i, j) < R \\ \infty & \text{若 } d(i, j) \geq R \end{cases} \quad (3)$$

$$\mathbf{S}[i, j] = \begin{cases} D_w & \text{若 } v_i \text{ 或 } v_j \text{ 为短波网主站} \\ 2D_w & \text{其他情况} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $d(i, j)$  为节点  $v_i$  和  $v_j$  之间的物理距离;  $R$  为微波终端最大传输距离;  $t(i, j)$  为相应边的延时。在获得邻接矩阵后, 节点通过改进的 Dijkstra 算法得出最短路径。改进的 Dijkstra

算法具体步骤如下:

源节点到其余节点  $v$  的最短路径为  $P[v]$  及其带权长度为  $D[v]$ ;

$C$  为图中算法已遍历过的节点的集合

While(图  $G$  中还有节点不再  $C$  中), 那么

在  $G$  中选择权值最小的  $D[v]$  值, 且该节点还未被加到  $C$  中将节点  $v$  加到  $C$  中

For each  $v$  的邻边  $w$

计算到节点  $v$  的累计代价值  $\text{cost}[v]$

从  $A[v][w], B[v][w]$  中取得最小代价赋给  $E[v][w]$

If  $\text{cost}[v] + E[v][w] < D[w]$

更新  $D[w]$ , 路径  $P[w]$  的值

End if

End for

End while

给定图  $G_n$ , 区内路由策略异构路由建立的总时间复杂度最大为  $O(n^2) + O((n^2 - n)/2) + O(n - 1)$ , 其中,  $O(n^2)$  为改进 Dijkstra 算法运行的时间复杂度;  $O((n^2 - n)/2)$  为生成邻接矩阵的时间复杂度;  $O(n - 1)$  为邻居发现的时间复杂度。

区内路由策略在判定拓扑发生变化时, 将在区内广播新的邻居链路表, 采用序列号机制防止路由环的产生。不同类型网络更新周期不相同, 短波网相比微波网覆盖区域大, 网络拓扑简单, 因此, 其更新周期比微波网长。

#### 4.2 区间路由策略

区间路由策略采用基于路由组的按需路由策略。不同簇群的移动特性差别较大, 按需路由能较好地适应这种情况。同一簇群节点构成一个路由组, 具有固定的路由组编号。簇头在区间路由发现后, 在区内广播获得的相应路由组成员和编号信息。节点通过学习该信息减少不必要的路由发现开销。

区间路由策略通过点到点证实机制维护已有路由, 即相邻节点间通过数据链路层消息证实机制检测各邻节点的可达性。当判定链路失效时, 中间节点向源节点发送错误分组, 以触发建立新的路由。

### 5 仿真及结果分析

#### 5.1 仿真环境设置

本文采用 OPNET 10.0 作为仿真平台。仿真场景中, 节点呈若干个集群分布, 每个集群的组移动矢量不同。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。鉴于战术通信中数据流“纵向化”的特征<sup>[5]</sup>, 设定簇内节点除对簇内成员发送数据分组外, 周期性轮流向其他簇头节点发送数据分组。数据链路层采用 TDMA 协议和轮询点名 2 种 MAC 模块分别模拟微波通信终端和短波通信终端。节点移动模型采用上文设计的群组移动模型, 仿真基本参数如表 1 所示。

表 1 仿真基本参数

参数	值	参数	值
仿真时间/s	600	微波通信半径/km	30
仿真节点/个	30	短波通信半径/km	150
场景/km <sup>2</sup>	300×300	微波更新周期/s	60
数据包大小/bit	600	短波更新周期/s	90
短波传输速率/(bit·s <sup>-1</sup> )	2 400	微波传输速率/(bit·s <sup>-1</sup> )	51 000

为了与区内路由策略进行对比分析, 本文将 AODV 路由协议扩展到分层网络结构中, 称为分层 AODV(Hierarchical AODV, H-AODV)协议。在分层 AODV 协议中, 簇头节点和普通节点都采用 AODV 协议, 且簇头节点同时在骨干网中广

播请求分组进行寻路, 仿真结果为 5 个不同仿真实验下的平均值。

## 5.2 性能评价指标

本文选取分组发送成功率和平均端到端延时为主要性能评价指标。

(1) 分组发送成功率  $D_R$

$$D_R = P_A / P_R \quad (5)$$

其中,  $P_A$  为成功到达目的节点的分组数;  $P_R$  为源节点总共发送的分组数;  $D_R$  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  $D_{E-E}$

$$D_{E-E} = \sum_{i=1}^N (rt_i - st_i) / N \quad (6)$$

其中,  $rt_i$  表示第  $i$  个分组到达目的节点的时间;  $st_i$  表示第  $i$  个分组从源节点端开始发送的时间;  $N$  表示成功发送的分组数。平均端到端延时越小, 说明网络反应越快, 网络质量越好。

## 5.3 仿真结果分析

在节点数据分组产生率为 2 个/s 的情况下, 仿真基于链路状态信息的分层混合式路由策略(下文简记为本文策略)和 H-AODV 在不同群组移动速率场景下的网络性能, 结果如图 2、图 3 所示。在图 2 中, 随着群组移动速率的增大, 两者的分组发送成功率均有小幅下降, 但本文策略分组发送成功率始终高于 H-AODV。在图 3 中, 两者的平均端到端延时随着移动加快而上升, 并且两者之间的差值也随之变大。在中高移动速率(>15 m/s)情况下, 由于按需式路由能较快地适应网络拓扑变化, H-AODV 性能下降较本文策略平缓, 此时本文策略相比 H-AODV, 分组发送成功率始终高 2%~5%, 平均端到端延时少 0.8 s~1.5 s, 其原因是本文策略采用分簇结构屏蔽不同层次网络拓扑变化, 减小了拓扑变化带来的网络开销, 增强了网络稳定性。

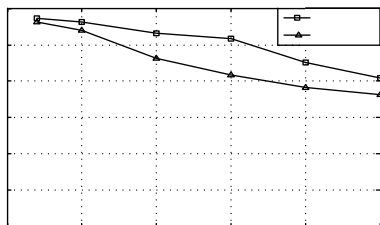


图 2 移动性对分组接收成功率的影响

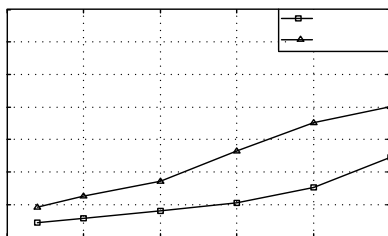


图 3 移动性对平均端到端延时的影响

在节点群组移动速率为 10 m/s 的情况下, 仿真本文策略和 H-AODV 在不同网络负载场景下的网络性能, 结果如图 4、图 5 所示。在图 4 中, 两者的分组成功发送率随着网络负载的增加而下降, 本文策略分组发送成功率变化相对平缓。在

图 5 中, 当负载较小时, 两者的平均端到端延时都很小, 而当分组产生速率大于 4 packet/s 时, H-AODV 平均端到端延时上升速度大于本文策略, 其原因是此时网络平均负载超出了骨干网的通信能力, 从而导致网络性能大幅下降。但由于区间数据流量要小于平均流量(周期轮流发送), 且子网传输能力仍能满足通信要求(微波网速率为 51 000 bit/s), 因此高负载时并未产生严重拥塞。在高负载情况下, 本文策略相比 H-AODV 分组发送成功率高 5%~6%, 平均端到端延时少 1.8 s~2.5 s, 其原因是本文策略采用混合式路由, 区内采用的先验式路由在高负载情况下具有相对低的路由发现延时, 在区间采用“路由组”减少路由开销。

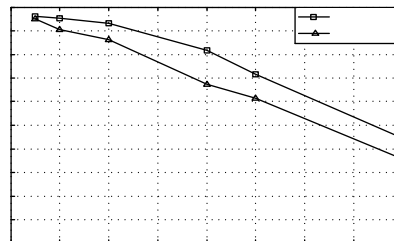


图 4 网络负载对分组发送成功率的影响

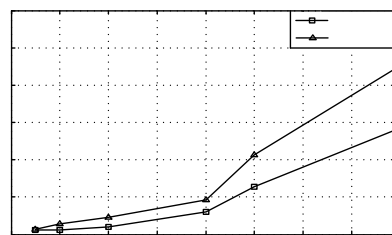


图 5 网络负载对平均端到端延时的影响

## 6 结束语

本文在战术通信环境下, 结合分簇网络和混合式路由技术给出一种新的路由整合策略。仿真实验结果证明, 在战术通信环境下, 该策略能较好地适应战术通信要求。下一步工作为研究战术通信环境中有 QoS 保障的路由算法。

## 参考文献

- [1] Camp T, Boleng J, Davies V. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research[J]. Wireless Communication & Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502.
- [2] Badia L, Bui N, Miozzo M, et al. Mobility-aided Routing in Multi-hop Heterogeneous Networks with Group Mobility[C]//Proc. of GLOBECOM'07. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007.
- [3] Ng J M, Zhang Yan. Impact of Group Mobility on Ad Hoc Networks Routing Protocols[C]//Proc. of ICACI'06. Washington D. C., USA: [s. n.], 2006.
- [4] 雒宝宏, 杨瑞娟, 马晓岩, 等. 基于群限制的 Ad Hoc 网络多跳分群算法[J]. 计算机工程, 2008, 34(17): 120-122.
- [5] 杨盘龙, 田 畅, 于 雍. 基于战术互联网环境的自组织网络路由协议性能仿真与评估[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1538-1542.

编辑 陆燕菲