

文章编号: 2095-4980(2019)03-0424-06

典型战术 Ad Hoc 电台一维组网连通性仿真与分析

杨会杰¹, 王 巍², 刘伯栋¹, 刘春茂¹

(1.中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471000; 2.通信信息控制和安全技术重点实验室, 浙江 嘉兴 314033)

摘要: 针对单兵便携式战术 Ad Hoc 电台在一维场景下网络的连通性, 分别研究随机均匀分布网络的链路连通概率和全连通概率, 并通过蒙特卡罗方法和网络仿真平台, 对网络部署和业务运行情况进行了仿真模拟。分析和实验结果表明, 典型战术 Ad Hoc 电台一维组网时, 全网连通概率在 l/τ 附近取得最小值; 大规模 Ad Hoc 网络中, 网络全连通概率与节点通信范围之间存在 0~1 突变现象; 与实现全连通相比, 实现网络高概率连通所需节点数要少得多。

关键词: Ad Hoc 电台; 一维组网; 连通性; 仿真

中图分类号: TN924.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201903.0424

Simulation and analysis of the one dimensional connectivity for representative tactical Ad Hoc radio networks

YANG Huijie¹, WANG Wei², LIU Bodong¹, LIU Chunmao¹

(1.Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang Henan 471000, China; 2.Key Laboratory of Communication Information Control and Security Technology, Jiaying Zhejiang 314033, China)

Abstract: This paper analyzes the link connectivity probability and the full connectivity probability of the network in a one-dimensional scenario for the man-portable tactical Ad Hoc radio station. By taking Monte Carlo and network simulation approaches, the network deployment and business operations are simulated. The analysis and experimental results show that: the connectivity probability of a typical Ad Hoc radio network gets the minimum value near l/τ ; in a large-scale Ad Hoc network, there exists a 0-1 phase transition between the network full connectivity probability and the node communication range; the number of nodes required to achieve a high probability connected network is much less than that to achieve a full connected network.

Keywords: Ad Hoc radio; one dimensional networks; connectivity; simulation

Ad Hoc 网络在军事通信上最重要的应用之一是战术 Ad Hoc 网络(Tactical Ad Hoc Networks), 它是数字化部队建设的基础。战术 Ad Hoc 网络具有无中心、自组织的特征, 各传输和控制系统之间存在互联、互通和互操作性, 网络组织根据部队作战的特点, 形成单层或分层的网络结构。Ad Hoc 网络的连通性是指网络节点间无线链路、路径的存在状况, 它是网络的一个基本特性, 对无线 Ad Hoc 网络的组网应用、拓扑控制、节点的功率优化以及网络协议设计等都具有重要意义^[1-2]。国内外针对网络连通性的研究, 采用了图论、概率论、渗流理论^[3-6]等方法, 从网络覆盖、节点临界通信距离、网络连通概率^[7-10]等方面进行了分析, 给出了多种场景下的网络连通结果, 但相关结果在实际应用中仍缺少进一步的验证。本文针对单兵便携式战术 Ad Hoc 网络电台在平面地域部署时的连通性, 从一维线性组网形式出发, 分别研究网络的链路连通概率和全连通问题, 并通过网络仿真平台, 对网络业务运行情况进行仿真模拟, 为战术 Ad Hoc 电台的组网应用和协议研究提供了应用支撑。

1 一维战术 Ad Hoc 网络组网连通性

1.1 一维战术 Ad Hoc 网络模型

一维战术 Ad Hoc 网络主要模拟在一维空间分布下的网络, 例如沿道路呈队列行进时多部战术 Ad Hoc 电台

所组成的网络，其网络模型如图 1 所示。

其中，网络节点数为 n ，节点部署在 $[0, l]$ 的一维区域，任意 2 个节点 i (坐标 X_i) 和节点 j (坐标 X_j) 之间的距离为 r_{ij} 。记节点的最远通信范围为 τ ，2 个节点之间能够一跳可达的概率 (链路连通概率) $p(r_{ij})$ 可表示为：

$$p(r_{ij}) = \begin{cases} 1, & 0 < r_{ij} \leq \tau \\ 0, & r_{ij} > \tau \end{cases} \quad (1)$$

即落在通信覆盖范围内的节点都能和中心节点通信，而通信范围外节点无法与之通信。

1.2 一维战术 Ad Hoc 网络链路连通概率

假设一维战术 Ad Hoc 网络节点在 $[0, l]$ 区间内随机均匀分布，任意 2 个节点 i 和节点 j 之间的链路连通概率^[11-12]为：

$$p(r_{ij}) = P_r[|X_i - X_j| \leq \tau] = \begin{cases} 1, & 0 \leq l \leq \tau \\ \frac{2l\tau - \tau^2}{l^2}, & 0 \leq \tau < l \end{cases} \quad (2)$$

图 2 为随机均匀分布条件下，一维战术 Ad Hoc 网络链路连通概率与节点通信距离和网络部署范围的关系。

1.3 网络全连通概率

网络全连通是指网络中任意 2 个节点之间都存在至少 1 条路径，使得所有节点相互连通，也称为 1-连通。针对一维无线 Ad Hoc 网络，Ghasemi^[13]和 Desai^[14]等研究了节点均匀分布下网络的连通问题，给出了网络全连通概率的近似公式：

$$p_c(n, l, \tau) = \sum_{i=0}^m C_{n-1}^i (-1)^i \left(1 - i \frac{\tau}{l}\right)^n \quad (3)$$

式中 $m = \min\{n-1, \lfloor l/\tau \rfloor\}$ ， $\lfloor l/\tau \rfloor$ 表示不大于 l/τ 的最大整数 (即向下取整)， n 为网络节点数， τ 为节点通信半径，节点均匀分布在 $[0, l]$ 的一维区域。由于网络全连通概率 p_c 是节点数 n 、部署范围 l 和节点通信范围 τ 的三元函数，当部署范围 l 为定值 (例如 $l = 5 \text{ km}$) 时，网络全连通概率 p_c 如图 3 所示。

首先，分析节点通信范围和网络全连通概率的关系。当 $l = 5 \text{ km}$ 时，分别取节点数 $n = 2, 5, 20, 50$ ，节点通信范围 τ 和网络全连通概率 p_c 的关系如图 4 所示。可以看出，当 $n = 2$ 时，全网连通概率与链路连通概率结果一致；当 n 大于 5 时，随着节点数的增加，网络全连通概率从 0 到 1 的上升趋势更加陡峭，即在大规模 Ad Hoc 网络中，网络全连通概率与节点通信范围之间存在 0~1 突变现象，这也说明当节点数量较多时，适当增大节点发射功率或提高接收灵敏度，是提高 Ad Hoc 网络连通性的重要方法。

其次，分析节点数量和网络全连通概率的关系。当 $l = 5 \text{ km}$ 时，分别取节点通信范围 $\tau = 0.5 \text{ km}, 1 \text{ km}, 2 \text{ km}, 3 \text{ km}$ ，节点数量 n 和网络全连通概率 p_c 的关系如图 5 所示。可以看出，当 $n \leq \lfloor l/\tau \rfloor$ 时，随着节点数的增加，网

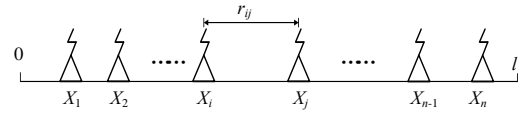


Fig.1 Model of one dimensional tactical Ad Hoc network
图 1 一维战术 Ad Hoc 网络模型

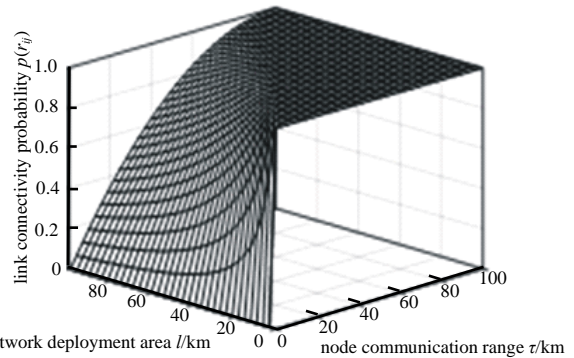


Fig.2 Link connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network
图 2 一维战术 Ad Hoc 网络链路连通概率

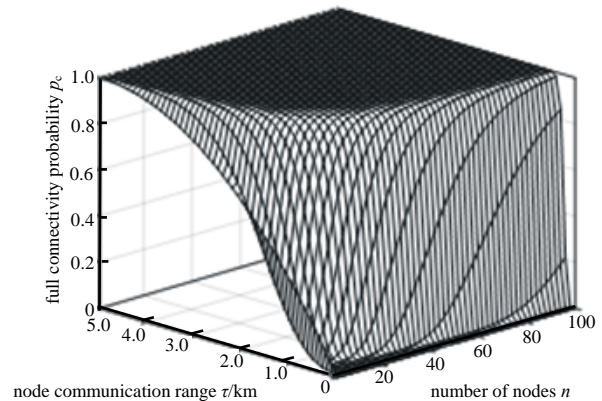


Fig.3 Full connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network
图 3 一维 Ad Hoc 网络全连通概率 ($l = 5 \text{ km}$)

络全连通概率降低, 最小值在 $n=\lceil l/\tau \rceil$ 处取得; 当 $n>\lceil l/\tau \rceil$ 时, 随着节点数的增加, 网络全连通概率逐渐趋近于 1, 但此时增加速度逐渐减慢, 例如, 当 $\tau=1$ km 时, 在节点数 $n=33$ 处, 网络全连通概率 p_c 达到 98%, 而在 $n=60$ 时, p_c 达到 100%, 说明实现网络的高概率连通 ($p_c \geq 98\%$) 与网络全连通 ($p_c=100\%$) 之间还有不小的差距。

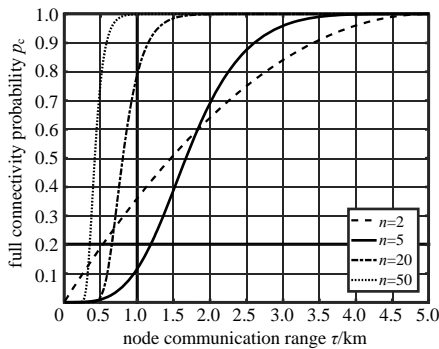


Fig.4 Full connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network for different numbers of nodes $n(l=5$ km)
图 4 不同节点数量时, 一维 Ad Hoc 网络全连通概率分布 ($l=5$ km)

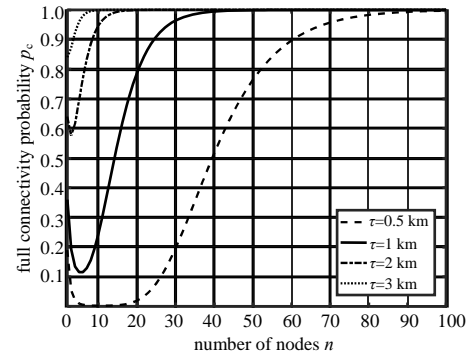


Fig.5 Full connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network for different communication ranges $\tau(l=5$ km)
图 5 不同通信半径时, 一维 Ad Hoc 网络全连通概率分布 ($l=5$ km)

最后, 分析保证网络全连通时节点数量和通信距离之间的关系。根据式(3)可知, 令 $p_c(n, l, \tau)=1$, 即可确定网络全连通时, 节点数 n 、部署范围 l 和节点通信范围 τ 的关系。图 6 所示为当 $l=5$ km, $p_c=100\%$ 和 $p_c=98\%$ 时, 节点数 n 最小值和节点通信范围 τ 最小值的关系曲线, 即网络全连通时所需最少节点数和最小节点通信范围的关系。当节点通信范围 $\tau=1$ km 时, 保证网络为全连通网络的节点数为 $n_{\text{full}} \geq 60$, 而覆盖整个区域只需大约 $\lceil l/\tau \rceil=5$ 个节点, 显然要实现一个全连通网络并不容易, 需要较多的网络节点, 而保证网络高概率连通 ($p_c=0.98$) 时, 所需节点数 $n_{\text{high}} \geq 33$ 则要相对少很多 (n_{high} 比 n_{full} 少 45%)。

2 仿真分析

2.1 链路连通概率仿真

链路连通概率仿真采用蒙特卡洛方法, 在 Matlab 平台进行仿真实验。首先, 生成服从随机均匀分布的节点位置参数; 然后, 根据节点通信距离, 判断 2 个节点能否连通; 最后, 多次重复实验, 统计 2 个节点间的链路连通概率。以网络部署范围 $l=5$ km 为例, 仿真次数为 10^5 次, 结果如图 7 所示。可以看出, 仿真结果与式(2)的结果一致, 验证了推理的正确性。当节点通信距离 $\tau=1$ km 时, 随机均匀分布的任意 2 个节点间链路连通概率 $p(r_{ij})=36.0\%$ 。

2.2 全网连通概率仿真

全网连通概率仿真采用蒙特卡洛方法, 在 Matlab 平台进行仿真实验。首先, 生成服从随机均匀分布的所有节点位置参数; 其次, 根据节点通信距离, 判断两两节点能否连通, 建立邻接矩阵; 再次, 对邻接矩阵进行深度优先搜索(Depth First Search, DFS)或广度优先搜索(Breadth First Search, BFS), 对每一个节点进行分块, 当所有节点在同一个块内, 则判断该网络为全连通网络; 最后, 多次重复实验, 统计网络为全连通网络的概率。

以网络部署范围 $l=5$ km、节点通信距离 $\tau=1$ km 为例, 仿真次数为 10^5 次, 结果如图 8 所示。可以看出, 仿真结果与理论结果一致, 验证了式(3)的正确性。当节点数 $n=2$ 时, 全网连通概率等于链路连通概率; 当 $n=\lceil l/\tau \rceil$ 时, 网络连通概率取最小值; 当 $n>\lceil l/\tau \rceil$ 时, 随着节点数的增加, 网络全连通概率逐渐趋近于 1, 但增加速度逐渐放缓, 即实现全网连通比实现高概率连通需要更多的节点数。

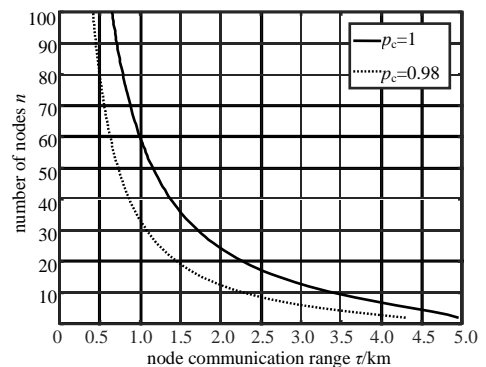


Fig.6 Relationship between number of nodes and node communication range for different communication probability $p_c=100\%$ and $p_c=98\%$ ($l=5$ km)
图 6 网络全连通时节点数与节点通信范围的关系 ($l=5$ km)

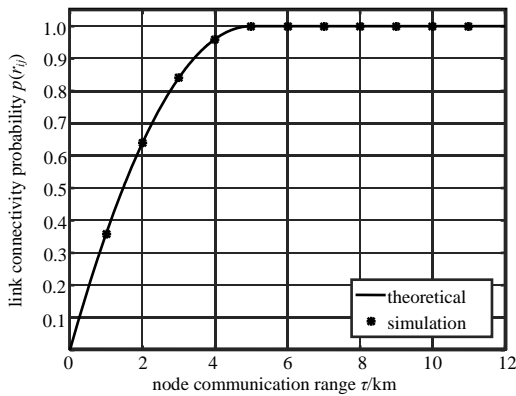


Fig.7 Simulation results for link connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network

图 7 一维 Ad Hoc 网络链路连通概率仿真

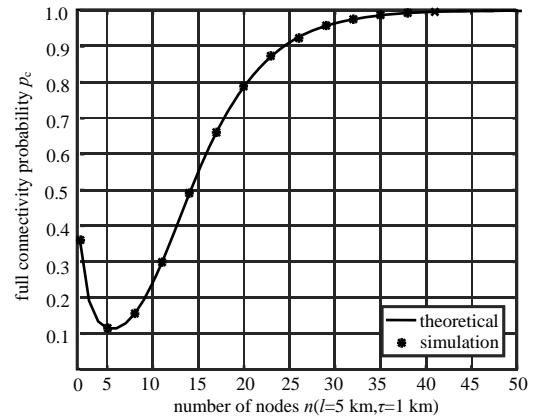


Fig.8 Simulation results for full connectivity probability of one dimensional tactical Ad Hoc network

图 8 一维 Ad Hoc 网络全网连通概率仿真

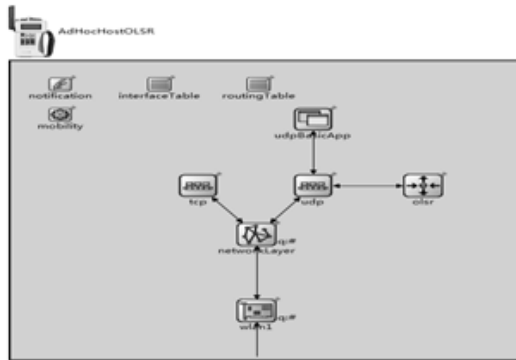


Fig.9 Ad Hoc simulation node using OLSR routing protocol

图 9 采用 OLSR 路由协议的 Ad Hoc 网络节点

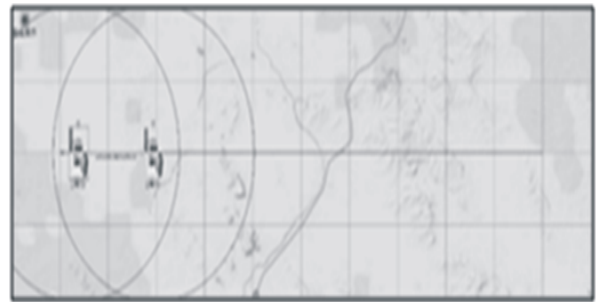


Fig.10 Service simulation of one dimensional tactical Ad Hoc network

图 10 一维战术 Ad Hoc 网络业务模拟

2.3 网络业务仿真与分析

网络业务仿真在 VRNET 仿真平台^[15]进行实现。针对某便携式 Ad Hoc 电台，建立仿真节点模型，如图 9 所示。其中，物理层模型为 BasicRadio，工作频率为 2.4 GHz；信道带宽为 2 MHz；数据传输速率为 500 kbps；调制方式为频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)；发射功率为 0.5 W；接收灵敏度为-93 dBm；信道模型为 Hata Model；模拟通信距离为 1 km。介质访问控制(Media Access Control, MAC)层采用 802.11 bMAC 协议。网络层采用链路状态路由协议(Optimized Link State Routing, OLSR)。传输层包括传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)和用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)。应用层为 UDP 数据收发应用模块。

网络节点随机部署在长度为 5 km 的直线区域内，节点以较低的速度在直线范围内进行随机运动，模拟节点的随机分布，如图 10 所示。为源节点到其他所有节点间建立连续比特流业务，通过统计数据包收发情况即可模拟网络在随机均匀分布条件下的连通情况。

2.3.1 链路连通概率仿真结果

当网络节点数为 2 时，数据包平均到达率仿真结果如图 11 所示。可以看出，当网络趋于稳定时，数据包平均到达率为 35.5%，由于节点低速运动，在节点通信范围临界点导致少量丢包，从而验证了链路连通概率理论值 36%(见图 7)的正确性。

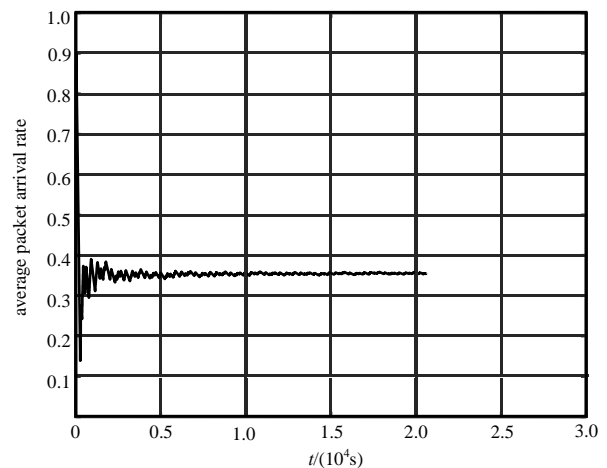


Fig.11 Mean arrival rate of data packets for the network with two nodes

图 11 两个节点时数据包平均到达率

2.3.2 全网连通概率仿真

对于全网连通率的仿真模拟,以任一节点全网广播为例,统计数据包实时到达率,当实时到达率为 100% 时,说明网络为全连通网络,在节点低速运动时,数据包实时到达率为 100% 的概率即可近似为网络连通概率,仿真结果如图 12 所示。其中,图 12(a)为节点数 $n=5$ 时,数据包实时到达率分布情况,统计其中到达率为 100% 的比例为 11.1%;图 12(b)为节点数 $n=20$ 时,数据包实时到达率分布情况,其中到达率为 100% 的比例为 75.1%,与图 8 的结果基本一致,从仿真的角度验证了理论分析的正确性。

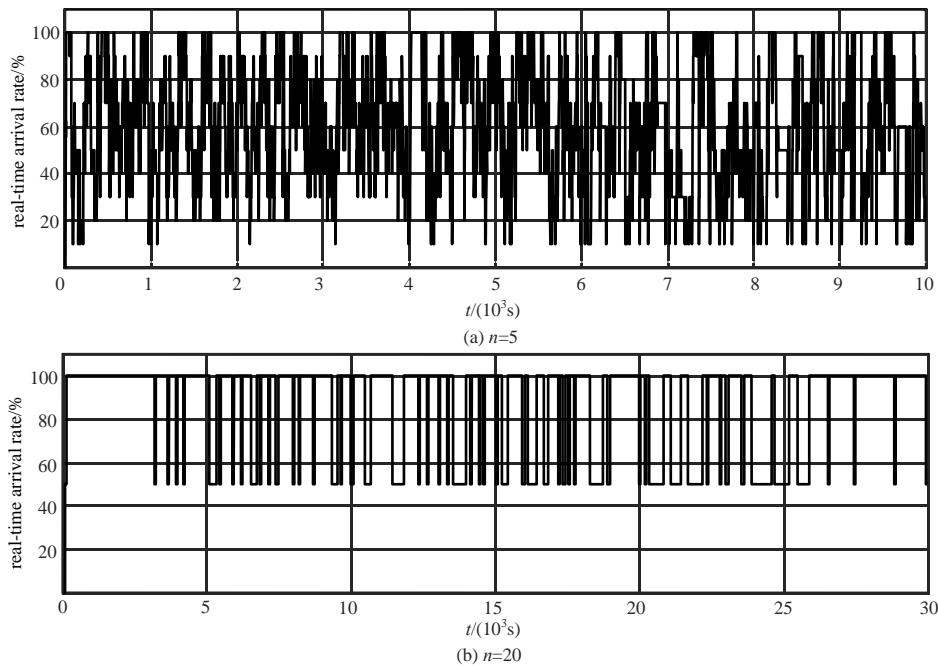


Fig.12 Real-time arrival rate of data packets for the network with different numbers of nodes n
图 12 数据包实时到达率仿真结果

3 结论

连通性分析是战术 Ad Hoc 网络部署和应用中的重要问题,本文针对单兵便携式战术 Ad Hoc 电台在一维场景下网络的连通性,分别研究了随机均匀分布时网络的链路连通概率和全连通概率,给出了链路连通概率的解析式,并通过蒙特卡罗方法和网络仿真平台,对网络部署和业务运行情况进行了仿真模拟。分析和实验结果表明,典型战术 Ad Hoc 电台一维组网时,全网连通概率在 l/τ 附近取得最小值;大规模 Ad Hoc 网络中,网络全连通概率与节点通信范围之间存在 0~1 突变现象;与实现全连通相比,实现网络高概率连通所需节点数要少得多。以此为基础,可以猜想在二维平面和三维空间部署战术 Ad Hoc 网络时可能会面临类似问题,这值得进一步分析和仿真验证。

参考文献:

- [1] HAN G. Connectivity analysis of wireless Ad Hoc networks[D]. Maryland,USA:University of Maryland,College Park, 2007.
- [2] GU X,FENG H. Connectivity analysis for a wireless sensor network based on percolation theory[C]// International Conference on Computer Application and System Modeling. Taiyuan,China:IEEE, 2010:203-207.
- [3] 郑博,张衡阳,孙鹏,等. 航空自组网单、双向航路连通性研究[J]. 上海交通大学学报,2012,46(4):624-629. (ZHENG Bo, ZHANG Hengyang,SUN Peng,et al. Connectivity on one and two way flight routes in aeronautical Ad Hoc networks[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2012,46(4):624-629.)
- [4] SHARIF-nassab A,ASHTIANI F. Connectivity analysis of one-dimensional Ad Hoc networks with arbitrary spatial distribution for variable and fixed number of nodes[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2012,11(10):1425-1435.
- [5] 刘丰威,杨胜天,陈雁,等. 一维无线 Ad Hoc 网络的连通性[J]. 浙江大学学报(工学版),2007(8):1335-1340. (LIU Fengwei, YANG Shengtian,CHEN Yan,et al. On connectivity of one-dimensional wireless Ad Hoc networks[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2007(8):1335-1340.)

- [6] SANTI P, BLOUGH D. An evaluation of connectivity in mobile wireless Ad Hoc networks[C]// Proceedings of the Dependable Systems and Networks. [S.l.]:IEEE, 2002:89-98.
- [7] SANTI P, BLOUGH D. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless Ad Hoc networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003,2(1):25-39.
- [8] SANTI P. Topology control in wireless Ad Hoc and sensor networks[J]. ACM Computing Surveys(CSUR), 2005,37(2):164-194.
- [9] PISHRO N, CHAN K, FEKRI F. Connectivity properties of large-scale sensor networks[J]. Wireless Networks, 2009,15(7):945-964.
- [10] QING L, ZHI T. Minimum node degree and k-connectivity of a wireless multihop network in bounded area[C]// Proceedings of the Global Telecommunications Conference. [S.l.]:IEEE, 2007:1296-1301.
- [11] YANG H, WANG H, XU S. A regularity-based connectivity analysis of three-dimensional wireless sensor networks[J]. Communications in Computer & Information Science, 2012,334(3984):588-597.
- [12] VIEIRA L, ALMIRON M, LOUREIRO A. 3D MANETs:link probability,node degree network coverage and applications[C]// Wireless Communications and NETWORKING Conference. Cancun,Mexico:IEEE, 2011:2042-2047.
- [13] GHASEMI A, Nader-esfahani S. Exact probability of connectivity one-dimensional Ad Hoc wireless networks[J]. Communications Letters, 2006,10(4):251-253.
- [14] DESAI M, MANJUNATH D. On the connectivity in finite Ad Hoc networks[J]. Communications Letters, 2002,6(10):437-439.
- [15] 未尔科技. VRNET Developer 用户手册[Z]. 未尔科技, 2011. (VIRE. VRNET developer user manual[Z]. VIRE Tech, 2011.)

作者简介：



杨会杰(1987-), 男, 河南省宝丰县人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信对抗效果评估.email:yanghuijie163@163.com.

王 巍(1980-), 男, 河北省张家口市人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为网络安全、协议分析.

刘伯栋(1977-), 男, 河北省辛集市人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为通信对抗.

刘春茂(1981-), 男, 山东省烟台市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信对抗效果评估.

(上接第 417 页)

作者简介：



周宝亮(1985-), 男, 内蒙古自治区赤峰市人, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为分布式孔径相参合成雷达技术研究.email:zbluestc@126.com.

周东明(1985-), 男, 黑龙江省七台河市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为分布式孔径相参合成雷达技术研究.

高红卫(1980-), 男, 西安市人, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统总体设计与信号处理.

鲁耀兵(1965-), 男, 湖北省天门市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为雷达系统总体设计.