

移动自组网中信息层次扩散的可靠性和健壮性分析^{*}

郭敬林 李 航 朱智林 陈 平

(西安电子科技大学软件工程研究所 西安710071)

摘 要 讨论了移动自组网的层次结构生成过程,并利用任意度随机图理论为该生成过程建模。同时,基于逾渗理论分析了信息在该层次结构中扩散的可靠性和健壮性。并结合应用,给出了节点扇出与信息层次扩散的可靠性和健壮性之间的关系。最后,通过仿真验证了理论分析的正确性。

关键词 移动自组网,层次扩散,逾渗理论,可靠性,健壮性

Analysis of Reliability and Robustness in Hierarchical Information Diffusion of Mobile Ad Hoc Networks

GUO Jing-Lin LI Hang ZHU ZHI-Lin CHEN Ping

(Software Engineering Institute, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract The paper discusses the build of hierarchical structure in the mobile ad hoc networks and uses random graph of arbitrary degree distribution to model procedure. In the mean time, the paper analyzes the hierarchical information diffusion based on percolation theory and gives the relationships among the node fan-out, information reliability and information robustness combined with applications. Finally, the theory analysis is verified by the simulation results.

Keywords Mobile ad hoc networks, Hierarchical diffusion, Percolation theory, Reliability, Robustness

在军事战术环境中,地面移动节点和 UAV(Unmanned Airborne Vehicles, 无人机)、微型卫星之间构成了一种层次网络。军事应用中的移动自组网(Mobile Ad hoc Networks)即属于该类网络。可靠性和健壮性是衡量战术网络性能的重要指标。研究信息在该层次网络上扩散的可靠性和健壮性,对设计通信协议具有指导意义。

Strogatz 揭示了网络功能与其结构之间存在着密切关系^[1]。本文以任意度随机图理论为基础,分析移动自组网的结构,并建模移动自组网中信息的层次化扩散过程。同时基于逾渗理论分析了该层次化信息扩散过程的可靠性和健壮性,并结合应用,给出了节点扇出与信息扩散的可靠性、健壮性之间的关系。

^{*}“十五”军事预研项目资助,项目编号413150501。郭敬林 博士生,研究方向:离散事件仿真,软件工程。李 航 博士生,研究方向:嵌入式系统。朱智林 博士生,研究方向:形式验证技术。陈 平 博士生导师,教授,研究方向:面向对象技术,软件工程等。

向天线进行发送的分组所占比例并不高,因此仍然能够保证网络空分复用能力的提高。

结论 本文研究了 MANET 网络中,节点使用方向性天线工作时,对于网络层路由协议性能的影响。本文以 DSR 协议为研究对象,通过仿真证明了在使用方向天线时,协议性能会因为路由探测和维护效率的降低而变差。提出了解决这个问题的方法,即通过使用全向天线发送部分携带重要路由信息的分组,可以改善路由协议性能;而其余的绝大多数分组使用全向天线进行发送,以便提高系统的空间复用能力。

参 考 文 献

1 Takai M, Martin J, Bagrodia R. Directional Virtual Carrier Sensing

1 信息层次扩散模型

1.1 问题的提出

与其它网络中的节点不同的是,移动自组网中的节点同时又起到路由器的作用。对于大规模的应用来说,多跳(Multi-hop)的通信方式几乎是必然的选择。在移动自组网中,信息扩散的时间复杂度和网络的直径有关。Watts 等研究的“small world”现象为缩短网络直径提供了解决思路^[2]。在网格(grid)状的节点之间,只须加少量的“捷径(short Cut)”,网络的直径将显著缩短。地面节点之间通过多跳可以实现捷径,但对大规模的应用来说,这样做需要中转节点较多,捷径不易建立,而通过上层的 UAV(或微型卫星)实现则容易很多。地面节点和若干 UAV 之间构成了一个层次状网络。显然此时 UAV 是该

for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks. Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking. In: Proc. of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, New York, NY, USA: ACM Press, 2002. 183~193

2 Bellofiore S, Balanis C A. Smart-Antenna Systems for Mobile Communication Networks. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2002, 44(3): 145~154

3 Johnson D B, Maltz D A, Hu Yih-Chun, Jetcheva J G. The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks (DSR). Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-09. txt, April 2003

4 LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. IEEE Std. 802. 11[S], 1999

5 Yum T S, Hung K W. Design Algorithms for Multihop Packet Radio Networks with Multiple Directional Antennas Stations. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40(11): 1716~1724

网络的关键节点。为了凸显网络结构和网络性能的关系,本文从随机图生成的角度出发讨论了移动自组网的结构,在移动自组网中,随机图的生成过程和路由建立存在一一映射关系。

1.2 模型的建立

移动自组网中的节点通常呈簇集状态。多个地面簇集和匿于 UAV 形成了层次网络。地面簇集相当于一个战术单位。本文假定地面簇集之间必须通过 UAV 中转才能连通。最初,每个节点都探测邻居节点,目的是连边以形成信息扩散的路由。首先考虑簇内的探测过程,不妨设该簇节点数为 M 个。在此,假定簇内探测节点概率相互独立,任何一个节点平均连接 f 个其它节点,因而每个节点与簇内其他节点的连边概率为 $p = \frac{f}{M-1}$ 。根据经典随机图的定义,该过程构成了一个二项分布的随机图 $\zeta(M, p)$,其顶点度数分布的生成函数为:

$$G_0(x) = \sum_{i=0}^M \binom{M}{i} p^i (1-p)^{M-i} x^i = (1-p+px)^M \quad (1)$$

当 M 较大时,二项分布可以近似为泊松分布。则式(1)可以近似为:

$$G_0(x) = e^{\lambda(x-1)}, \text{ 其中 } \lambda = M * p \quad (2)$$

类似地,在其它簇集内部同样有该过程存在。上层的 UAV 之间也存在这样的探测过程,但探测概率一般与地面节点不同。不妨假定共有 H 个 UAV,每个 UAV 与其它 k 个 UAV 连接,则上层的 UAV 可以构成随机图 $\zeta(H, q)$, $q = \frac{k}{H-1}$ 。其度数分布的生成函数形如式(1)和式(2)。

根据 Molloy 和 Newman 等人的任意度随机图理论^[3,4],随机图发生相变,即随机图存在最大块(Giant Component)的充要条件为其顶点度数均值 $z > 1$ 。 z 为随机图度数均值,在式(1)和式(2)中, $z = G_0'(1)$ 。对于随机图 $\zeta(M, p)$ 来讲,最大块意味着至少有 $O(M^{2/3})$ 的节点是连通的。 z 越大,图的连通程度越高。

在层次网络中,地面节点通过 UAV 建立捷径,但并不是每个节点都需要和 UAV 通信。以任意一个簇集为例,在地面节点的某个簇集内部,往往是由若干个节点充当簇集内部其它节点和 UAV 通信的路由,该路由节点和上层 UAV 集合的某个子集存在通信关系。不失一般性,设每个地面簇集和 UAV 节点连边数目为 w ,进而 w 个地面节点集合与上层 UAV 集合随机选取的某个子集 V 构成二部随机图,其中该二部随机图共有 w 条边, V 非空且元素个数不大于 w ,整个移动自组网层次结构形成。在实际应用中,节点经常处于移动状态,所以该随机图生成过程相当于一次按需(On-demand)建立路由的过程。

2 信息扩散的可靠性分析

信息在自组网中扩散,一般采用 flooding 方式。该方式所形成的随机图通常是有向的,类似于流行病在生物网络中的传播。有下面的定理保证信息扩散的可靠性。

定理1 设 s 为随机图 $\zeta(T, p)$ 中一消息源节点, $p = (\log T + c + o(1))/T$, c 为任意常数,则当 $T \rightarrow \infty$, s 可以到达 $\zeta(T, p)$ 中任意节点的概率为 $e^{-e^{-c}}$ 。(证明见 Ball^[5])从定理1可以看出,节点根据随机图的连通情况(路由信息)扩散。在 flooding 扩散过程中,节点信息扇出数等于随机图的度数。可见当节点以及 UAV 的数目确定之后,如果 f, k 值较大时,信息扩散到同层节点的概率也会很大。

地面节点与 UAV 之间的连边数目 w 是影响信息扩散可靠性的一个关键因素。在分布式环境中,可以有两种解决方案:第一种是地面任何一个节点都可以和 UAV 通信,但需要控制参与和 UAV 通信地面节点个数。可以采用类似“气味”控制的方法,即地面的消息源节点设定信息素(Pheromone),该节点以概率1与某个 UAV 连边,随后信息素数值衰减并随信息扩散下去,收到信息的节点以更小的连边概率和 UAV 通信。第二种是地面某些特定节点与 UAV 通信,通过加大 f, k 值,确保信息能够到达这些“通信枢纽”节点。采用何种方案与具体的应用有关。整个随机图生成过程是按需进行的,所以第一种方案对移动自组网是可行的。本文只考虑第二种方案,即探讨节点扇出 f, k 值和信度层次扩散可靠性的关系。

由任意度随机图理论,最大块和节点的度数存在如下关系:

$$S = 1 - e^{-zS} \quad (3)$$

其中, S 为最大块节点占节点总数的比例, z 为该随机图的平均度数。式(3)说明 z 越大, S 越大。进而,通过调整 f, k 值,可以使最大块中以高概率 $(1 - O(1/N))$ 包含“通信枢纽”节点。

下面通过仿真说明 f, k 值和 w 的关系。设 α 为系统生成随机图的最大块所包含的节点数, β 为系统节点总数(地面节点总数+UAV 节点总数),定义可靠性 $r = \alpha/\beta$,仿真环境为 matlab6.1。

图1所示为50次仿真结果的平均值。从图1可以看出,增加 f, k 的值可以增加可靠性。虽然图1未给出 r 与 w 的关系,但易知,增加 w 的值也可以增加可靠性。系统行为在 f 或 k 的值为1时不稳定,这是因为 $f=1, k=1$ 分别是地面节点和 UAV 节点所构成随机图的相变点。

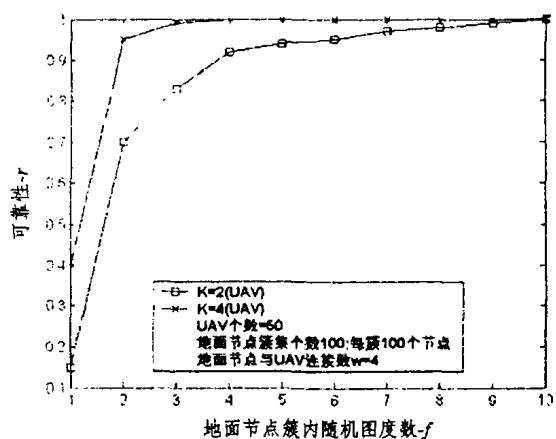


图1 可靠性 r 与 f, k, w 之间的关系

3 信息扩散的健壮性分析

信息扩散的健壮性涉及两种情况。第一,由于系统节点都具有移动能力,所以有必要研究节点变化情况对随机图最大块的影响。第二,在某些移动自组网中,存在外界恶意破坏系统的情况,所以有必要研究该随机图在恶意攻击下的承受能力。换句话说,本文所关心的健壮性的物理意义在于按需建立的路由在什么情况下需要重建。

Albert 等人研究了复杂网络的容错以及抗攻击能力^[3],分析了网络在恶意攻击和自然出错情况下的性能。本文采用类似于 Albert 的研究方法。针对第一种情况,拟对系统所生

(下转第53页)

结论 本文从理论上对基于移动 Agent 的和传统的基于 SNMP 的网络管理系统的通信方式进行比较,然后对基于移动 Agent 的两种通信模式进行最优化分析,并用模拟实验进行验证。定性分析和实验结果都表明:移动通信模式是保证基于移动 Agent 的网络管理高性能较优的方式。最后应用此模型对基于 SNMP 和移动 Agent 的网络管理的性能进行比较,得出当网络规模较大时,基于移动通信模式的移动 Agent 会显著提高网络的性能。

参考文献

- Kinga A, Huntb R. Protocols and architecture for managing TCP/IP network infrastructures Computer Communications, 2000, 23: 1558~1572
- Barotto A M, Souza A D, Westphall C B. Distributed Network Management Using SNMP, Java, WWW and CORBA. Journal of Network and Systems Management, 2000, 8(4)

- Cabri G, Leonardi L, Zambonelli F. Mobile Agent Coordination for Distributed Network Management. Journal of Network and Systems Management, 2001, 9(4)
- Mountzia M A, Rodosek G D. Using the Concept of Intelligent Agents in Fault Management of Distributed Services. Journal of Network and Systems Management, 1999, 7(4)
- Sabrina F, Jha S. An Adaptive Resource Management Architecture for Active Networks Telecommunication Systems, 2003
- Stamatelopoulos M F, Maglaris B. Performance and Efficiency in Distributed Enterprise. Journal of Network and Systems Management, 1999, 7(1)
- Puliatitoa A, Tomarchiob O. Using mobile agents to implement flexible network management strategies. Computer Communications, 2000
- 赵永翼, 王光兴. 一种基于分布式网络的性能管理模型及算法. 东北大学学报(自然科学版), 2000, 123(2)
- 刘奕明, 陈涵生. Agent 模型在网络管理中的应用. 计算机工程, 2003, 29(21)
- 冯新宇, 吕建, 曹建农. 通用的移动 Agent 通信框架设计. 软件学报, 2003, 14(5)

(上接第43页)

成随机图等概率摘除边,以研究边的变化对随机图最大块的影响;针对第二种情况,拟等概率摘除随机图的上层顶点(UAV),以研究如果对 UAV 进行定点清除,随机图中的最大块会发生怎样的变化。根据逾渗理论(Percolation Theory),上述过程分别属于边逾渗(Bond Percolation)和点逾渗(Site Percolation)。

等概率随机摘除边等价于节点度数等概率缩小。不妨设随机摘边概率为 a ,则对于式(3)有:

$$S = 1 - e^{-(1-a)S} \quad (1)$$

从可靠性角度分析,在随机等概率摘边的情况下,通过坐标平移就可以得到可靠性的曲线。如图2为最大块随 a 变化的情况($f=4; k=4$,其它参数同图1)。仿真环境为 matlab 6.1。

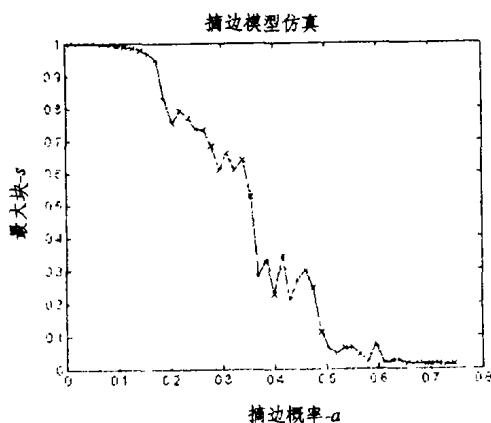


图2 最大块随摘边概率 a 的变化

图2所示为20次仿真结果的平均值。从图2可以看出,摘边概率 a 大于0.2以后,最大块迅速衰减。在移动自组网络中,恶意攻击与随机摘边或摘点不同,恶意攻击一般采用的是定点清除系统中关键节点的方式。在移动自组网络中,UAV 节点显然更重要,所以本文考虑随机等概率摘除 UAV 节点的情况。根据逾渗理论,UAV 节点之间构成的随机图仍可以有类似式(4)的方程,但整个移动自组网所构成的随机图不满足该方程。图3为最大块随摘掉 UAV 点概率 b 变化的情况(参数设置同图2)。

图3所示为50次仿真结果的平均值。可见,当 b 接近0.2时,整个系统所构成随机图的最大块随概率 b 增加而开始减

小。可以认为,在遭受恶意攻击的时候,UAV 的扇出度直接决定了信息层次扩散的健壮性。

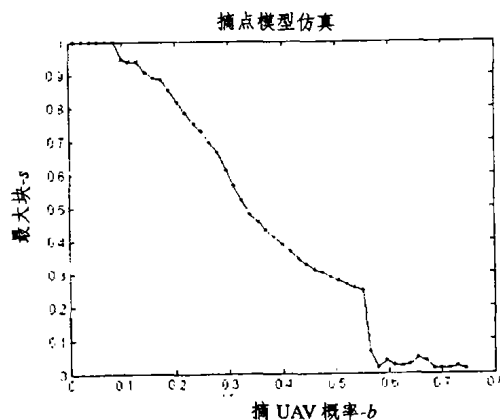


图3 系统最大块随摘掉 UAV 点概率 b 的变化

总结 本文分析了分布计算环境中信息的层次化扩散过程,并利用任意度随机图理论为信息层次化扩散建模。同时,结合应用需求,基于逾渗理论研究了信息层次扩散过程的可靠性和健壮性。给出了节点扇出与信息扩散可靠性和健壮性的关系。在分布式环境中,在没有全局知识的前提下,节点探测概率如果不独立,则必然产生度数分布呈现 Scale-Free 特性的随机图。对该类随机图来说,任意度随机图理论依然成立,但具体的分布由实际应用情况决定。为了增强系统抗毁能力,指挥控制类型的应用通常是同构的,即泊松或二项分布的随机图,因而本文做的假设是合理的。

参考文献

- Strogatz S H. Exploring complex networks[J]. Nature, 2001, 410: 268~276
- Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. Nature, 1998, 393: 440~442
- Newman M E J, Strogatz S H, Watts D J. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications[J]. Phys. Rev. E, 2001, 64(026118)
- Molloy M, Reed B. A critical point for random graphs with a given degree sequence[J]. Random Structures and Algorithms 1995, 6: 161~179
- Ball F, Barbour A. Poisson Approximation for Some Epidemic Models[J]. J. Applied Probability, 1990, 27: 479~490
- Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and error tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406: 378~382