



东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名： 李鹏

日期： 2010 年 3 月 2 日

东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：

于鹏

指导教师签名：

周洁

日期：2010年3月2日

日期：2010年3月2日

基于 Markov 理论的移动 Ad Hoc 网络节点连接建模与分析

摘 要

移动 Ad Hoc 网络(MANET)是在不依赖于现有固定主干网或基站的情况下,由一组分散的且具有无线通信功能的移动节点自组织形成的网络,广泛地应用在军事、救险、商业、民用和临时通信等领域,是目前通信技术研究的热点。在 MANET 中,节点间的连接变化对网络的性能有着重大的影响,而连接变化率反映了相邻的移动节点间连接变化问题,因此,连接变化率是研究网络连接的一个重要指标。本文将利用马尔可夫理论工具针对移动节点间的连接变化,在分析已有模型的基础上,提出了新的模型,并对所建立的模型进行分析。

首先,本文利用离散高斯-马尔可夫移动模型和一般化的离散高斯-马尔可夫移动模型得出节点间的连接变化率,并分析其特性,得出每个节点的连接数趋于稳定等结论。在模型中,节点的运动模式由时间、速率、方向这三个随机变量所描述,体现了一定的随机性,更符合实际场合的要求。

其次,利用随机微分方程工具,针对网络中任意布置的静态节点间的连接变化进行建模,构成由删除,重组,添加和无变化四种状态间进行切换的节点间连接变化系统,并对其进行分析,得出所建系统 P 阶指数递减、几乎处处指数稳定等结果,并针对此系统初步考虑节点的移动速度因素。

最后,综合考虑了对移动节点间连接变化产生影响的因素,针对移动节点间连接变化系统进行了一般化建模与分析,并给出了判断此系统不稳定或稳定的判定定理。

关键词: Ad Hoc 网络, 连接变化率, 马尔可夫理论, 稳定性

LINKING MODELING AND ANALYSIS OF MOBILE AD HOC NETWORK BASED ON MARKOV THEORY

ABSTRACT

Nowadays, Mobile Ad Hoc Networks (MANET) has been one hot research subject in telecommunication technology fields, because it is decentralizing, self-organizing, and highly dynamic networks formed by a set of mobile hosts connected through wireless links, without requiring any existing fixed backbone or infrastructure. It is widely used in military, recovery, commercial, civil, and temporary communications and other fields. In the MANET, the linkage changing between two nodes has a significant impact in the performance of the network, but the link generation rate reflects the changing rate of neighborhoods of MANET. So the generation rate is an important index of a network connection. Several mobility models are first introduced and then new mobility models for MANET are presented in this paper. In the models, this paper will make use of Markov theoretical tool for modeling the link changing of mobile nodes, and the analysis is given in the following.

First of all, this paper will deduce the linking generation rate for discrete Gauss-Markov mobility model and generalized discrete Gauss-Markov mobility model. The characteristics of models are analysed, and the stability of node degree is discussed in the end. The movement pattern of mobile nodes in the model is characterized by time interval, speed and direction, which reflects a certain degree of randomness and yield more realistic behaviors.

Secondly, for the link changing of static network nodes in an arbitrary arrangement in the modeling, the system is composed by deleting, rewiring, adding, and no change to switch among four states of the link changing by the stochastic differential equations tool. Its analysis of a series of results obtained, and the important things are *hth* moment exponential decreasing and the stability analysis for the system. The mobile node speed factors are primarily taken into account in the systems.

Finally, for the link changing in the generalized system modeling and analysis of mobile nodes, this paper takes into account the impact of factors, and gives the judge this system instability or stability of the judge's theorem.

Peng Yu (Applied Mathematics)

Supervised by Jie Zhou

KEY WORDS: ad hoc networks, the changing rate of linking, Markov theory, stability

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 研究的背景及意义.....	1
1.2.1 Ad Hoc 网络概述.....	1
1.2.2 网络连接模型研究现状.....	4
1.3 马尔可夫跳系统的研究现状.....	5
1.4 本课题的目的和主要工作.....	6
1.5 论文结构及章节安排.....	7
第 2 章 基于离散高斯-马尔可夫移动模型的连接变化率分析.....	9
2.1 引言.....	9
2.2 基于离散高斯-马尔可夫模型的连接变化率.....	10
2.3 基于一般化离散高斯-马尔可夫模型的连接变化率.....	14
2.4 本章小结.....	16
第 3 章 静态节点间连接模型及其分析.....	17
3.1 引言.....	17
3.2 静态节点间连接基本模型的建立与分析.....	17
3.2.1 静态节点间的连接基本模型建立.....	17
3.2.2 模型分析.....	19
3.3 静态节点间连接模型特例.....	21
3.4 节点恒速移动的连接模型分析.....	23
3.5 本章小结.....	24
第 4 章 模型系统的稳定性分析.....	25
4.1 引言.....	25
4.2 弱连接情形下的稳定性分析.....	26
4.2.1 特殊模型一.....	26
4.2.2 特殊模型二.....	30
4.2.3 特殊模型三.....	31
4.3 数值例子.....	32
4.4 本章小结.....	33
第 5 章 模型改进与分析.....	34
5.1 模型改进.....	34

5.2 模型分析.....	35
5.2.1 强连接下的不稳定性分析.....	35
5.2.2 弱连接下的稳定性分析.....	37
5.3 本章小结.....	38
第6章 论文结论与展望.....	39
6.1 主要结论.....	39
6.2 课题展望.....	39
参考文献.....	40
攻读硕士期间发表的论文.....	44
致谢	45

第1章 绪论

1.1 引言

随着移动通信技术的发展,同时伴随着计算机和网络技术的发展,实现一种人和移动设备之间随时随地进行各种业务通信的要求日益迫切,极大的促进了无线网络技术的发展。就基础设施而言,可以分为有基础设施的网络和无基础设施的网络。前者中的移动节点借助于通讯范围内最近的基站实现通信,移动节点相当于移动终端,不具备路由功能,也不能直接进行数据交换,必须依靠具有重心控制功能的设备进行消息转发,通常以蜂窝移动方式和方式出现。后者是一种无基础设施的移动网络,称作移动自助网络,即 Ad Hoc 网络。应运而生的移动自助网络模型已成为当前的研究重点和热点。

在随机过程理论中,马尔可夫模型是一个已有广泛研究的领域,本文的主要目的是将移动自助网络模型与马尔可夫模型相结合,研究在有限的状态空间中,应用马尔可夫链对随机动态网络模型系统的进行建模,并且对建立的模型进行定性分析。

1.2 研究的背景及意义

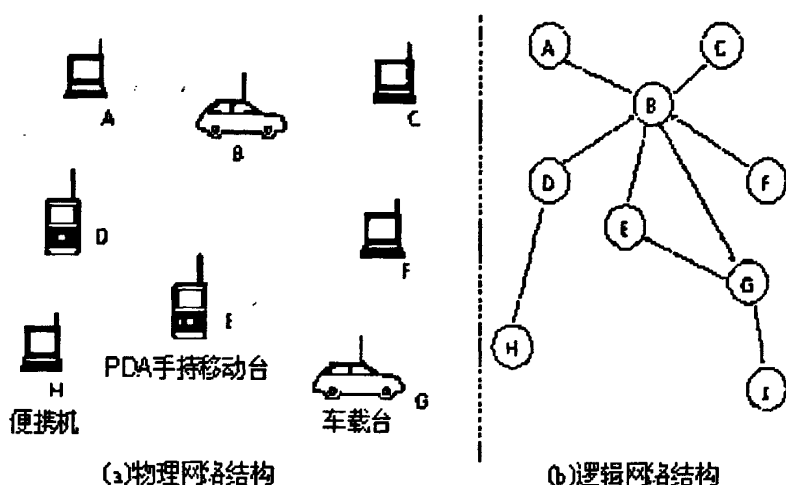
在 Ad Hoc 网络模型中的节点间的连接变化问题是一个随机过程,会由于突发现象的发生而改变,譬如,节点的移动、节点能量的消耗、网络密度的变化和节点传输覆盖范围的变化等等。将引起节点连接变化各种状态(增加连接、重组连接和删除连接)混合而构成一个系统。马尔可夫跳系统(Markov Jump Systems),就是一个典型的混合模型系统(Hybrid modeling systems),在马尔可夫跳系统中,网络系统的动态变化可以看作是各种状态在系统中的随机的相互转换。

1.2.1 Ad Hoc 网络概述

“Ad Hoc”一词源于拉丁语,其含义是“For the specific purpose only”,由于翻译后的名字很难描述该网络的特点,为了避免引起歧义,我们仍使用“Ad

Hoc”一词来称呼这种特殊的无线网络。1972年美国DARPA[1]提出的分组无线网络(PRNET, Packet Radio Network)是Ad Hoc网络的前身,其研究的最初动机是满足战场生存的军事需求。Ad Hoc网络是一种特殊的无线移动通信网络,现已成为当前通信领域研究的热点。移动Ad Hoc网络是由移动节点通过分布式协议组织起来的一种无线网络,网络中的节点不仅具有普通移动终端所需的功能,而且具有报文转发能力。与传统的蜂窝网和无线网相比,移动Ad Hoc网络有许多优点,如无需依赖于任何预先假设的基础网络设施、无中心结构、自组织性能、多跳路由、很强的抗毁性和灵活性和较低的运行成本等。

以下是Ad Hoc网络的简单结构图:



Ad Hoc网络作为一种特殊的网络,具有以下特点[2]:

(1)动态变化的网络拓扑结构:网络的拓扑结构是指从网络层角度来看到的物理网络的逻辑视图。在自组网中,由于主机节点随时随意的移动、节点的随时开机和关机,加上地理环境的限制、无线发射装置发射功率的变化以及无线信道间的干扰等因素的影响,其拓扑结构将随时发生改变。

(2)有限的无线传输带宽:由于无线信道本身的物理特性,加上无线通信的吞吐量受到系统多路访问、信道衰减和噪声干扰等因素的影响,使得它的网络带宽比有线信道要低得多。由于目前移动网络经常依赖于固定基础设施而存在,因此Ad Hoc网络的用户也需要类似的服务,这就在多媒体计算和网络的协作应用方面也相应增加。

(3)主机节点能源受限:Ad Hoc网络中的部分或全部节点主机通常依靠电池等可耗尽能源供电的手持设备,故其主机能源有限。因此,节点能量优化设计将是一个很重要的方面。

(4)自组织,易于建网:不需要固定的骨干网设施,只需将一系列带有收发

装置的节点主机置于某一特定区域,就可形成Ad Hoc网络。

(5)无中心,鲁棒性强:自组网没有严格的控制中心,所有的节点地位平等,是一个对等式网络。采用非集中控制方式,故当网络中某节点出现故障时,不会使整个网络瘫痪。

(6)移动方便:整个网络仅由一些充当主机与路由器的节点组成,无固定基础设施,网络搬迁非常方便。

(7)生存时间短:一般是临时建立的,任务完成后即可撤除。因而移动自组织网络的寿命相对固定网络而言是短暂的。

(8)可能存在单向通信:网络中节点的信号覆盖范围存在差异,若主机节点A和B的发射功率不同,A发射的信号B能收到,但B发射的信号A却不能收到,就使得节点间存在单向通信的可能。

(9)多跳路由:当节点要与其覆盖范围之外的节点进行通信时,需要中间节点的多跳转发。与固定网络的单跳路由不同,Ad Hoc网络中的多跳路由是由普通的网络节点完成的,而不是由专用的路由设备(如路由器)完成的。

(10)分布式控制:移动自组织网络中的移动节点集成了路由和主机的功能,不需要网络中心控制点,不存在类似基站的集中网络中心的控制。

(11)安全保密性差:由于移动自组织网络的自组织和分布式控制等特性使得网络易遭到窃听、拦截和拒绝服务等各种网络攻击。

由于Ad Hoc网络具有很大的灵活性,它可以被应用到很多的场合,例如:

(1)军事应用:军事应用是Ad Hoc网络技术的主要应用领域。因其特有的无需架设网络设备、可快速展开、抗毁性强等特点,Ad Hoc网络技术是其核心技术。

(2)抢险救灾:在发生大规模自然灾害(例如飓风、地震、海啸等)时替代被摧毁的有线和蜂窝无线通信系统,确保应急通信畅通。

(3)临时场合:Ad Hoc网络的快速、简单组网能力使得它适用于临时场合的通信,比如会议、庆典、展览会等,并可以免去布线和部署网络设备的工作。

(4)商业应用:使用Ad Hoc网络技术可以组建家庭无线网络、移动医疗监护系统,开展移动和可携带计算等。

(5)个人通信:Ad Hoc网络技术可以应用于个人局域网,实现PDA、手机、掌上电脑等个人电子通信设备之间的通信,并可以创建虚拟教室和讨论组等移动对等应用。

1.2.2 网络连接模型研究现状

在研究复杂网络中,研究者使用的主要工具就是随机图理论。该理论创始于上个世纪 40 年代。由 Erdos 等人创立。最早提出的经典随机图模型就是 ER 模型, B.Bollobas(1985)[3], 在随机图中, 边的出现成为概率事件。近年来人们发现真实世界的复杂网络有所不同与经典随机图, 即复杂网络可以从数学上被描述为有大量结点的动态的发展的随机图。无标度网络(scale-free networks)概念是 20 与 21 世纪之交由 A. L. Barabasi, R. Albert, and H. Jeong(1999)[4]提出, 现在文献上通常将无标度网络基本模型称为 BA 模型, 他们计算分析了单个节点的连接分布问题, 并在这个模型中提出了两条重要的网络演化机理: 增长和择优, 为了计算网络的度分布, 他们还提出了平均场方法(mean-field approach)。为了与实际网络的度指数在(1, 4)之间的事实相吻合, 采用了内部连接的重新连接或者增加和删除连接来推广 BA 模型, R. Albert and A.-L. Barabasi(2000)[5], 首先提出了一个组合演化模型, 另外, 许多实际的网络不仅有新节点和新连线的加入, 同时也会有旧节点与旧连线被删除, 表现出有增有减的动态演化过程。连通性[6]是 Ad Hoc 网络中保证正常通信的一个必要条件, 主要是利用一些数学模型来研究 Ad Hoc 网络节点数、传播范围和所在区域之间的关系。文献[7]都给出了评价 Ad Hoc 网络的方法, 但是他们都是针对静态 Ad Hoc 网络的, 不适用于移动 Ad Hoc 网络。S. Papavassiliou, J. Zhu[8], 根据连续性理论, 即把在 t 时间步节点 i 的度数 $k_i(t)$

看作连续动力学函数, $k_i(t)$ 应该近似地满足他们构建的三个动力学方程, 即增

加连接、重组连接和删除连接模型, 分别是 $\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{pm_1}{N} + pm_1 Q_1(k_i)$,

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = -\frac{qm_2}{N} + qm_2 Q_2(k_i), \quad \frac{\partial k_i}{\partial t} = -rm_3 Q_3(k_i) - rm_3 A_i, \quad \text{其中 } A_i = \sum_{all k_j \neq k_i} \frac{Q_3(k_j)}{k_j}, \quad N$$

是网络的节点数(常数), p 是增加 m_1 个新连接的概率, q 是重组 m_2 个新连接的概率, r 是删除 m_3 个连接的概率, $Q(k_i)$ 表示当前节点 i 有 k_i 个连接的概率, 可称作是关于 k_i 的“偏好度”函数。

节点间的连接问题, 也就是网络的拓扑结构问题, 对网络的性能有着重大的影响。无线 Ad Hoc 网络的拓扑结构受一些可控因素和不可控因素决定, 不可控

因素有移动性、天气、地形和干扰等,可控因素有传输功率和天线方向。连通性是一条贯穿拓扑管理研究的主线,它描述了通信网的一个基本要求,即任意两个节点之间是否存在一条路径。对连通性的研究主要有两种方法:基于概率统计的方法[9-15]和基于图论的方法[16-18]。基于概率统计的方法主要研究节点的数量、分布和通信半径与网络连通概率的关系。网络中节点的移动[19-23]直接关系到其拓扑结构的变化,进而影响到对网络路由协议的分析和评价。在文献[24]中,主要是对 Random Direction 节点移动模型进行了研究,给出了 Random Direction 节点移动模式在一维和二维的空间概率分布函数的公式,认为运动节点空间的分布在二维坐标下呈现出中心概率密度小,边缘概率密度大,且具有对称的非均匀分布等特点。Cho and Hayes 在文献[25]讨论了节点在恒定速度移动模型中连接变化率,接下来 Prince and Stephen 在文献[26]提出了节点速率范围在 $[a, b]$ 上且方向任意的移动模型中的连接变化率。

除了以上方法针对节点间连接问题的研究,马尔可夫跳系统(Markov Jump Systems)X. Mao [27-29]也可作为一项非常重要的研究工具,就是一个典型的混合模型系统(Hybrid modeling systems)。在马尔可夫跳系统中,网络系统的动态变化可以看作是各种状态在系统中的随机的相互转换。结合 Ad Hoc 网络模型中的马尔可夫跳理论和 S. Papavassiliou, J. Zhu[8],由 Demin Li(2008) [30] 提出了基于马尔可夫理论的 Ad Hoc 网络随机连接模型。

1.3 马尔可夫跳系统的研究现状

近年来,对含有Markov随机跳变参数系统的研究逐渐成为控制理论研究的热点之一。马尔可夫跳跃系统的概念最先由Krasovskii以及Lidskii于20世纪60年代提出。由于这一类跳跃系统在社会经济[31]、制造系统[32]等方面有着广泛的应用,引起了国内外学者的广泛关注。该系统提供了一个模型框架,可以描述现代社会中一些复杂的系统,比如制造、电力、生物、经济以及网络系统等。这

类系统的共同特点是在运行过程中常常会受突发事件的影响,使系统的结构参数发生随机的跳变。许多动力系统由于随机突变因素,诸如,随机故障和维修、子系统之间互联机构的变化、环境的突然变化、非线性系统经线性化后,工作点的变化等等,会出现可变化的多结构现象。因此,在控制理论的许多领域中,有时不能忽略随机因素存在的问题。比如,在最优调节器问题中,可控性问题、可观测性问题、稳定性、镇定以及 H_2/H_∞ 控制问题中,均广泛地考虑了跳变线性系统的相应问题。

如今,在数学理论背景下,国内学者们对于马尔可夫跳系统的研究已经比较深入。但是到目前为止,有关Markov跳跃系统的研究大多局限于跳跃线性系统领域。例如哈尔滨工程大学的张利军等[33],针对具有参数不确定的线性马尔可夫跳变系统的鲁棒适应控制问题进行了研究。文献[34]讨论了一类具有随机跳变参数的线性系统正实控制问题。中南大学的李小勇等[35],研究了一类带马尔可夫跳跃参数的离散时滞双线性系统的稳定性问题。文献[36]讨论了一类线性不确定时滞Markov跳变系统的控制问题。华南理工大学自动化科学与工程学院的包俊东等[37]研究了一类具有不确定性Markov跳变参数的线性分布型时滞系统。吉林大学的李顺祥等[38]根据动态系统的稳定性定义以及随机过程理论,给出了Markov线性切换系统的随机稳定性定义,并且分析了Markov线性切换系统的随机稳定性问题,给出了判定随机稳定性的充分必要条件。国外文献Mariton M [31],研究了带有跳参数的离散线性系统“对于时刻N的期望能控”的概念,并给出了判别期望能控性的条件。随着对跳跃系统研究的深入,很多专家已着手进行对跳跃非线性系统领域的探索。文献Yuan Cheng-gui, MAO Xue-rong [39]则研究了跳跃系统的依分布渐进稳定问题。文献Yuan Cheng-gui, MAO Xue-rong [40]研究了跳跃时滞系统的渐进稳定问题。这些工作为跳跃非线性系统的稳定性研究提供了数学基础。此外,文献[41]、[42]探讨了跳跃非线性系统的 H_∞ 设计问题。稳定性是切换系统中最集中的问题。与非切换系统相比,切换系统具有这样的特殊性质:即使每个子系统都是不稳定的,也可能通过构造一个适当的切换策略使得整个系统渐进稳定[43];反之,即使每个子系统都稳定,如果切换策略选择不好,也可导致整个系统的不稳定[44]。

1.4 本课题的目的和主要工作

作者在研究生期间一直从事 Ad Hoc 网络节点间连接模型的研究,有关研究成果也已经发表在多家国内外核心期刊中(见论文末尾附录)。

移动 Ad Hoc 网络(MANET)是在不依赖于现有固定主干网或基站的情况下,由具有无线通信功能的移动节点自组织形成的网络。由于无需基础设施,MANET 在军事和民用领域具有广阔的应用前景,是目前网络研究的热点问题。在 MANET 中,节点间的连接变化对网络的性能有着重大的影响,而连接变化率反映了相邻的移动节点间连接变化问题,因此,连接变化率是研究网络连接的一个重要指标。

鉴于 MANET 的一些特有的特征,要建立 MANET 节点间的连接模型便成为

了一大难题。Ad Hoc 网络本身是一个对等的网络,也就是说网络中的节点的地位是彼此平等的,在此基础上考虑节点的“连接偏好”问题,便得出了一系列的连接模型出来。

在已建立的连接模型基础上,对其进行稳定性评判又是一大难题,需要利用马尔可夫理论工具来对其进行分析和验证。

为了达到上述目的,本课题主要对以下方面进行了研究:

首先,本文利用离散高斯-马尔可夫移动模型和一般化的离散高斯-马尔可夫移动模型得出节点间的连接变化率,并分析其特性,得出每个节点的连接数趋于稳定等结论。在模型中,节点的运动模式由时间、速率、方向这三个随机变量所描述,体现了一定的随机性,更符合实际场合的要求。

其次,利用随机微分方程工具,针对网络中任意布置的静态节点间的连接变化进行建模,构成由删除,重组,添加和无变化四种状态间进行切换的节点间连接变化系统,并对其进行分析,得出所建系统 P 阶指数递减、几乎处处指数稳定等结果,并针对此系统初步考虑节点的移动速度因素。

最后,综合考虑了对移动节点间连接变化产生影响的因素,针对移动节点间连接变化系统进行了一般化建模与分析,并给出了判断此系统不稳定或稳定的判定定理。

1.5 论文结构及章节安排

本文首先介绍了课题研究的背景和意义,说明了国内外有关网络连接模型和马尔可夫理论的研究现状和存在的一些问题,进而引出研究的切入点——Ad Hoc 网络中连接模型的建立。在现有的连接模型基础上,结合 Ad Hoc 网络的一些显著特性,利用马尔可夫切换理论针对 Ad Hoc 网络的连接问题进行建模,并分别针对移动节点和静态节点进行讨论分析,最后构造出一般化模型,并对其进行稳定性分析。具体的章节安排如下:

第一章介绍了课题背景、Ad Hoc 网络背景,结构体系,网络特点、国内外的研究现状以及论文的主要工作。

第二章针对 Ad Hoc 网络中的移动节点,利用离散高斯-马尔可夫移动模型和一般化的离散高斯-马尔可夫移动模型得出节点间的连接变化率,并分析其特性,得出每个节点的连接数趋于稳定等结论。

第三章利用马尔可夫状态间的切换理论,结合 Ad Hoc 网络的一些特性,针对 Ad Hoc 网络中静态节点间的连接问题进行建模,并对其进行分析,得出所建系统 P 阶指数递减等结论,并针对此系统初步考虑节点的移动速度因素。

第四章考虑网络的实际特点, 引入强连接和弱连接概念, 主要是针对已建立的连接模型, 结合连接偏好的特例函数, 对其理论性验证说明, 得出所建系统几乎处处指数稳定等结果。

第五章分别考虑网络节点的强连接与弱连接情况, 着重针对弱连接情况下的 Ad Hoc 网络, 得出判定网络连接模型稳定与不稳定的判定定理。

第六章对本文所做的工作进行一个全面的总结, 并做出展望。

第2章 基于离散高斯-马尔可夫移动模型的连接变化率分析

在前章绪论的基础上,引进离散高斯-马尔可夫移动模型,进行模型分析,结合文献[26],得出每个节点的连接数的初步估计和连接数趋于稳定等结论。

2.1 引言

在MANET中,连接变化率反映了相邻的移动节点间连接变化,因此,连接变化率是研究网络性能的一个重要指标。文献[25]讨论了节点在恒定速度移动模型中连接变化率,文献[26]提出了节点速率范围在 $[a, b]$ 上且方向任意的移动模型中的连接变化率。然而针对一般移动模型(如高斯-马尔可夫模型),如何对节点的连接变化率进行处理,现在还没有很好的方法。本章就是针对这个基本问题展开讨论的。

高斯-马尔可夫节点移动模型中,节点在移动间隔 t 时,节点的位置是由 $t-t$ 时刻的位置、移动的速度和方向决定的。在该模型中,在初始时给每个节点赋一个速度和方向。则在 t 时刻,节点的速度和方向计算如下:

$$\begin{aligned}v_t &= av_{t-1} + (1-a^2)\bar{v} + \sqrt{(1-a^2)}v_{x_{t-1}} \\d_t &= ad_{t-1} + (1-a^2)\bar{d} + \sqrt{(1-a^2)}d_{x_{t-1}}\end{aligned}$$

式中 v_t 和 d_t 分别为节点在时间 t 的速度和方向;

a 表示用于改变节点随机运动的调节参数;

$\bar{v}$ 和 $\bar{d}$ 表示节点速度和方向的均值,是一个常量;

$v_{x_{t-1}}$ 和 $d_{x_{t-1}}$ 表示高斯分布的随机变量。

当 $a=0$ 时,节点的运动完全是随机的;当 $a=1$ 时,节点是一种线性的运动。节点在时间 t 的位置定义如下:

$$\begin{aligned}x_t &= x_{t-1} + v_{t-1} \cos d_{t-1} \\y_t &= y_{t-1} + v_{t-1} \sin d_{t-1}\end{aligned}$$

式中 (x_t, y_t) 和 (x_{t-1}, y_{t-1}) 表示节点在时间 t 和 $t-1$ 的坐标位置。

本章将分两部分针对Ad Hoc网络模型中节点的连接变化率进行讨论,第一部分着重讨论离散高斯-马尔可夫模型下的节点连接变化率,第二部分重点讨论一般化离散高斯-马尔可夫模型下的节点连接变化率。

2.2 基于离散高斯-马尔可夫模型连接变化率

假设在固定直角坐标系中, 沿 X 和 Y 轴的正交单位向量分别为 $\vec{i}$ 和 $\vec{j}$ 。由文献[45], 我们可知, 在高斯-马尔可夫模型中, 对节点 k 有

$$\vec{v}_k(t+1) = v_{kx}(t+1)\vec{i} + v_{ky}(t+1)\vec{j} \quad (2-1)$$

其中

$$v_{kx}(t+1) = \alpha_x v_{kx}(t) + (1 - \alpha_x)\mu_x + \sigma_x \sqrt{1 - \alpha_x^2} w(t)$$

$$v_{ky}(t+1) = \alpha_y v_{ky}(t) + (1 - \alpha_y)\mu_y + \sigma_y \sqrt{1 - \alpha_y^2} w(t)$$

在 $(t+1)$ 时段中, 沿 X 轴和 Y 轴的移动速率分别为 $v_{kx}(t+1)$, $v_{ky}(t+1)$, 而 α_x , α_y 分别是沿 X 轴和 Y 轴的记忆水平(The memory level), μ_x , μ_y 分别是 $v_{kx}(t)$, $v_{ky}(t)$ 的平均数, σ_x^2 , σ_y^2 分别是 $v_{kx}(t)$, $v_{ky}(t)$ 的方差, $w(t)$ 是期望为 0 且方差为 1 的不相关高斯过程, 且与 $v_{kx}(t)$, $v_{ky}(t)$ 相互独立。

由(2-1)式知, 节点 l 相对于节点 k 的速度为

$$\begin{aligned} \vec{v}(t+1) &= \vec{v}_l(t+1) - \vec{v}_k(t+1) \\ &= [v_{lx}(t+1) - v_{kx}(t+1)]\vec{i} + [v_{ly}(t+1) - v_{ky}(t+1)]\vec{j} \\ &= \alpha_x [v_{lx}(t) - v_{kx}(t)]\vec{i} + \alpha_y [v_{ly}(t) - v_{ky}(t)]\vec{j} \end{aligned} \quad (2-2)$$

假设时间 t 是单位时间段的整数倍, 我们由式(2-2)得

$$\begin{aligned} \vec{v}(t) &= \alpha_x [v_{lx}(t-1) - v_{kx}(t-1)]\vec{i} \\ &\quad + \alpha_y [v_{ly}(t-1) - v_{ky}(t-1)]\vec{j} \\ &= \alpha'_x [v_{lx}(0) - v_{kx}(0)]\vec{i} + \alpha'_y [v_{ly}(0) - v_{ky}(0)]\vec{j} \end{aligned}$$

所以节点 l 相对于节点 k 的速率为

$$|\vec{v}(t)| = \sqrt{\alpha_x'^2 [v_{lx}(0) - v_{kx}(0)]^2 + \alpha_y'^2 [v_{ly}(0) - v_{ky}(0)]^2} \quad (2-3)$$

且节点 l 相对于节点 k 的速度方向为

$$\angle \vec{v}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha'_y [v_{ly}(0) - v_{ky}(0)]}{\alpha'_x [v_{lx}(0) - v_{kx}(0)]} \right) \quad (2-4)$$

为了简明, 我们假设 $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$, 即沿 X 轴和 Y 轴有相同的记忆水平, 由式(2-3)和 (2-4)可知,

$$\begin{aligned} \nu(t) &= |\bar{\nu}(t)| = \\ &= \sqrt{\alpha_x^{2'} [\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)]^2 + \alpha_y^{2'} [\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t)]^2} \\ &= \alpha' \sqrt{[\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)]^2 + [\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t)]^2} \\ &= \alpha' |\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)| \sqrt{1 + \left(\frac{[\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t)]}{[\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)]} \right)^2} \end{aligned} \quad (2-5)$$

且

$$\varphi = \angle \bar{\nu}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_y' [\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t)]}{\alpha_x' [\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)]} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{[\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t)]}{[\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t)]} \right) \quad (2-6)$$

$\nu(t)$ 和 φ 的联合概率密度为

$$f(\nu, \varphi) = f(\nu|\varphi)f(\varphi)$$

假设所有节点在同一时刻开始移动, 且在高斯-马尔可夫模型中的取样时刻是相同的 (如 1 秒钟), 在取样时刻中所有节点都以常速移动, 通过文献[26], 我们得到连接变化率为

$$\begin{aligned} \lambda_{gen}(t) &= 2 \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} 2R\rho \nu f(\nu, \varphi) d\nu d\varphi \\ &= 4R\rho \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} \nu f(\nu, \varphi) d\nu d\varphi \end{aligned} \quad (2-7)$$

其中 R 是连接半径, ρ 是节点的密度。

定理 2.1 在高斯-马尔可夫模型中, 若每个节点具有相同记忆水平且在同一时段沿 X 轴和 Y 轴移动, $\nu_{kx}(0) - \nu_{kx}(t) \sim N(0,1)$, $\nu_{ky}(0) - \nu_{ky}(t) \sim N(0,1)$, 我们可得到连接变化率为 $\lambda_{gen}(t) = 0$, 即在 Ad Hoc 网络中的每个节点的连接数都没有发生改变。

证明: 由式(2-6), 我们可以得到 φ 的概率密度函数为

$$f(\varphi) = \frac{1}{\pi} (1 + \tan^2 \varphi) \quad (2-8)$$

而由(2-5), 可得到 $\nu(t)$ 的条件概率密度函数为

$$f(\nu|\varphi) = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{2\pi\alpha'}} e^{-\frac{\nu^2 \cos^2 \varphi}{2\alpha'^2}} \quad (2-9)$$

所以

$$f(\nu, \varphi) = f(\nu|\varphi)f(\varphi) = \frac{1}{\pi\sqrt{2\pi\alpha'} \cos \varphi} e^{-\frac{\nu^2 \cos^2 \varphi}{2\alpha'^2}} \quad (2-10)$$

由式(2-7)和(2-10), 我们可得到连接变化率为

$$\begin{aligned} \lambda_{gen}(t) &= 4R\rho \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \nu f(\nu, \varphi) d\nu d\varphi \\ &= \frac{4R\rho}{\pi\sqrt{2\pi\alpha'}} \int_0^\infty \int_{-\pi}^\pi \nu \frac{1}{\cos \varphi} e^{-\frac{\nu^2 \cos^2 \varphi}{2\alpha'^2}} d\varphi d\nu = 0 \end{aligned}$$

定理得证。■

定理 2.2 在高斯-马尔可夫模型中, 若每一节点具有同一记忆水平且在同一时段沿 X 轴和 Y 轴移动, $\nu_x(0) - \nu_{x'}(0) \sim N(\mu, \sigma^2)$, $\nu_y(0) - \nu_{y'}(0) \sim N(\mu, \sigma^2)$, 我们得到连接变化率 $\lambda_{gen}(t) = 4\sqrt{2\pi} R\rho\sigma^2 AB\alpha'^2$, 即在 Ad Hoc 网络中每一节点的连接数随时间的增长会趋向于 0, 其中

$$\begin{aligned} A &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|y|}{y} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \left[\Phi\left(\frac{y\varepsilon - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-y\varepsilon - \mu}{\sigma}\right) \right] dy \\ B &= \left(e^{\frac{\mu^2}{2\sigma^2}} - 1 \right) \sigma + \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} + \sqrt{2\pi} \left(\Phi(0) - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) \right) \right] \mu \end{aligned}$$

其中 $\Phi(x)$ 是标准高斯分布函数。

证明: 类似于定理 2.1 的证明, 我们得出 φ 的概率密度函数, 即

$$f(\varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma^2 \cos \varphi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y\cos\varphi - \mu)^2 + (y - \mu)^2}{2\sigma^2}} |y| dy$$

且 $\nu(\varphi)$ 的条件概率密度函数为

$$f(\nu|\varphi) = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{2\pi\sigma\alpha'}} e^{-\frac{\left(\frac{\nu\cos\varphi}{\alpha'} - \mu\right)^2}{2\sigma^2}}$$

而

$$f(\nu, \varphi) = \frac{g(\varphi)}{\sqrt{2\pi\sigma\alpha'} \cos \varphi} e^{-\frac{\left(\frac{\nu\cos\varphi}{\alpha'} - \mu\right)^2}{2\sigma^2}}$$

所以我们得到连接变化率为

$$\begin{aligned} \lambda_{gen}(t) &= 4Rp \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{\pi} \nu f(\nu, \varphi) d\nu d\varphi \\ &= 4Rp \int_0^{+\infty} \nu d\nu \int_{-\infty}^{+\infty} |y| e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} dy \int_{-\pi}^{+\pi} \frac{1}{\cos \varphi} e^{-\frac{(y\cos\varphi - \mu)^2 + (y - \mu)^2}{2\sigma^2}} d\varphi \end{aligned}$$

假设 $\varphi \in (-\varepsilon, \varepsilon)$, 其中 $\varepsilon \rightarrow 0$, 然后我们便得到

$$\lambda_{gen}(t) = 4\sqrt{2\pi} Rp \sigma^2 AB \alpha^{2'}$$

其中

$$\begin{aligned} A &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|y|}{y} e^{-\frac{(y-\mu)^2}{2\sigma^2}} \left[\Phi\left(\frac{y\varepsilon - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{-y\varepsilon - \mu}{\sigma}\right) \right] dy \\ B &= \left(e^{\frac{\mu^2}{2\sigma^2} - 1} \right) \sigma + \left[\sqrt{\frac{\pi}{2}} + \sqrt{2\pi} \left(\Phi(0) - \Phi\left(-\frac{\mu}{\sigma}\right) \right) \right] \mu \end{aligned}$$

定理得证。■

我们显然可以得到以下结论:

推论 2.1 若定理 2.2 中的 $\mu = 0$, 我们可以得到如定理 2.1 中相同结果, 即, 在 Ad

Hoc 网络中每一节点的连接数没有发生改变。

推论 2.2 若定理 2.2 中的 $\mu \neq 0$, 在任意时刻, 每一节点的连接变化率 $\lambda_{gen}(t) \neq 0$ 且随着时间的增长趋向于零。

2.3 基于一般化离散高斯-马尔可夫模型连接变化率

考虑到在高斯-马尔可夫模型中, 所有节点在同一时刻开始移动, 但是抽样的时间段不相等, 为了便于表达, 令时间区间迭加, $\tau_{n+1} = \tau_n + \frac{1}{n+1}$ (初始条件为 $\tau_0 = 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \tau_n = +\infty$)。类似于第二节, 高斯-马尔可夫模型中, 节点 k 沿 X 轴和 Y 轴, 任意时间 t , 存在 n 使得 $\tau_n \leq t < \tau_{n+1}$,

$$\begin{aligned}\vec{v}(t) &= \alpha_x''[v_x(\tau_0) - v_{kx}(\tau_0)]\vec{j} + \alpha_y''[v_y(\tau_0) - v_{ky}(\tau_0)]\vec{j} \\ &= \alpha_x''[v_x(0) - v_{kx}(0)]\vec{j} + \alpha_y''[v_y(0) - v_{ky}(0)]\vec{j}\end{aligned}$$

所以节点 l 相对于节点 k 的速率为

$$|\vec{v}(t)| = \sqrt{\alpha_x^{2n}[v_x(0) - v_{kx}(0)]^2 + \alpha_y^{2n}[v_y(0) - v_{ky}(0)]^2} \quad (2-11)$$

且节点 l 相对于节点 k 的速度方向为

$$\angle \vec{v}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_y''[v_y(0) - v_{ky}(0)]}{\alpha_x''[v_x(0) - v_{kx}(0)]} \right) \quad (2-12)$$

为了简明, 我们假设 $\alpha_x = \alpha_y = \alpha$, 即沿 X 轴和 Y 轴有相同的记忆水平, 由式(2-11) 和 (2-12)可知,

$$\begin{aligned}v(t) &= |\vec{v}(t)| = \sqrt{\alpha^{2n}[v_x(0) - v_{kx}(0)]^2 + \alpha^{2n}[v_y(0) - v_{ky}(0)]^2} \\ &= \alpha^n \sqrt{[v_x(0) - v_{kx}(0)]^2 + [v_y(0) - v_{ky}(0)]^2} \\ &= \alpha^n |v_x(0) - v_{kx}(0)| \sqrt{1 + \left(\frac{[v_y(0) - v_{ky}(0)]}{[v_x(0) - v_{kx}(0)]} \right)^2}\end{aligned} \quad (2-13)$$

且

$$\begin{aligned}\varphi &= \angle \vec{v}(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha_y'' [v_{by}(0) - v_{by}(0)]}{\alpha_x'' [v_{bx}(0) - v_{bx}(0)]} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{[v_{by}(0) - v_{by}(0)]}{[v_{bx}(0) - v_{bx}(0)]} \right)\end{aligned}\quad (2-14)$$

$v(t)$ 和 φ 的联合概率密度函数为

$$f(v, \varphi) = f(v|\varphi)f(\varphi)$$

假设所有节点在同一时间开始移动, 且考虑在任意时间段里 $\tau_n \leq t < \tau_{n+1}$, 所有节点是常速的, 我们可得连接变化率为

$$\begin{aligned}\lambda_{gen}(t) &= 2 \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} 2R\rho v f(v, \varphi) dv d\varphi \\ &= 4R\rho \int_0^{+\infty} \int_{-\pi}^{+\pi} v f(v, \varphi) dv d\varphi\end{aligned}$$

定理 2.3 在高斯-马尔可夫模型里, 每一节点具有相同的记忆水平沿 X 轴和 Y 轴移动, 时间段趋近于零, 即

$$\Delta\tau = \tau_{n+1} - \tau_n = \frac{1}{n+1} \rightarrow 0, \text{ as } n \rightarrow \infty$$

且 $v_{bx}(0) - v_{bx}(0) \sim \mathcal{N}(0, 1)$, $v_{by}(0) - v_{by}(0) \sim \mathcal{N}(0, 1)$, 我们得到连接变化率为 $\lambda_{gen}(t) = 0$, 也就是说, Ad Hoc 网络中每一节点的连接数都没有发生改变。

证明: 对任意时刻 t , 存在 n 使得 $\tau_n \leq t < \tau_{n+1}$, 其中 $\tau_{n+1} = \tau_n + \frac{1}{n+1}$ (初始条件为 $\tau_0 = 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \tau_n = +\infty$), 定理证明可参照定理 2.1 的证明。■

定理 2.4 在高斯-马尔可夫模型中, 所有节点具有同一记忆水平沿 X 轴和 Y 轴移动, 时间段趋近于零, 即,

$$\Delta\tau = \tau_{n+1} - \tau_n = \frac{1}{n+1} \rightarrow 0, \text{ as } n \rightarrow \infty$$

且 $v_{bx}(0) - v_{bx}(0) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$, $v_{by}(0) - v_{by}(0) \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ 。对任意时间 t , 我们得到连接

生成率为 $\lambda_{gen}(t) = 4\sqrt{2\pi} R \rho \sigma^2 A B \alpha^{2t}$, 也就是说, 在 Ad Hoc 网络中所有节点的连接数随着时间的增长趋近于零。

证明: 对任意时间 t , 总是存在 n 使得 $\tau_n \leq t < \tau_{n+1}$, 其中 $\tau_{n+1} = \tau_n + \frac{1}{n+1}$ (初始条件为 $\tau_0 = 0$ 且 $\lim_{n \rightarrow +\infty} \tau_n = +\infty$), 定理证明可参照定理 2.2 的证明。■

2.4 本章小结

高斯-马尔可夫移动模型是一种较为实际的随机模型, 节点在整个过程的运动速度和方向的改变时很平滑的, 本章, 针对离散高斯-马尔可夫移动模型和一般话的离散高斯-马尔可夫移动模型中的移动节点, 关于连接变化率得出每个节点的连接数趋于稳定等结论。但其中参数的选取不是很好选取, 导致缺乏令人满意的实际应用, 在实际研究中效果不好。

第3章 静态节点间连接模型及其分析

在第2章中针对离散高斯-马尔可夫移动模型中的连接变化率做了初步分析和估计,但没有考虑状态切换和连接偏好问题,在本章中将对此进行分析和讨论。

3.1 引言

影响连接变化率的因素,有增加连接,重组连接和删除连接,本章将会对静态节点之间包括连接不发生改变的四种状态做研究,从而得出新的 Ad Hoc 网络静态节点间的连接模型。

S. Papavassiliou, J. Zhu[8], 根据连续性理论,即把在 t 时间步节点 i 的度数 $k_i(t)$ 看作连续动力学函数, $k_i(t)$ 应该近似地满足他们构建的三个力学方程,即

增加连接、重组连接和删除连接模型, 分别是 $\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{pm_1}{N} + pm_1 Q_1(k_i)$,

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = -\frac{qm_2}{N} + qm_2 Q_2(k_i), \quad \frac{\partial k_i}{\partial t} = -rm_3 Q_3(k_i) - rm_3 A_i, \quad \text{其中 } A_i = \sum_{all k_j \text{ links } i} \frac{Q_3(k_j)}{k_j},$$

N 是网络的节点数 (常数), p 是增加 m_1 个新连接的概率, q 是重组 m_2 个新连接的概率, r 是删除 m_3 个连接的概率, $Q(k_i)$ 表示当前节点 i 有 k_i 个连接的概率, 可称作是关于 k_i 的“偏好度”函数。

本章的结构如下: 第一部分是引言; 第二部分建立并论述了 Ad Hoc 网络中静态节点间连接基本模型, 并经分析后得到模型是 P 阶距指数递减等结果; 第三部分介绍特殊连接模型和分析模型 P 阶距指数递减性; 第四部分介绍节点恒速移动的连接模型分析; 第五部分是本章小结。

3.2 静态节点间连接基本模型的建立与分析

3.2.1 静态节点间的连接基本模型建立

在 Ad Hoc 网络中, 假设节点数 $N(N \geq 2)$ 是一个常数, 也就是说, 网络外不存在新节点连入网络。由文献[8]中所建立的 Ad Hoc 网络基础模型, 可以得到关于连接数 x_k 的马尔可夫跳跃微分方程一般模型, 其中 x_k 是网络中任意节点 k 的连

接数。模型如下:

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = f(x_k(t), t, r(t)) \quad (3-1)$$

其中 $f(x_k(t), t, r(t))$ 是节点 k 的连接变化率, $r(t)$ 为取值于有限状态空间

$S = \{1, 2, 3, 4\}$ 的右连续的 Markov 链, 其转移概率为

$$P\{r(t+\Delta) = j | r(t) = i\} = \begin{cases} \gamma_{ij}\Delta + o(\Delta) & \text{if } i \neq j \\ 1 + \gamma_{ii}\Delta + o(\Delta) & \text{if } i = j \end{cases} \quad (3-2)$$

这里, $\Delta > 0, \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{o(\Delta)}{\Delta} = 0$, γ_{ij} 表示从时刻 t 状态 $i (i \neq j)$ 转移到 $t + \Delta$ 时刻状态

j 的转移速率, 若 $i \neq j$, 那从状态 i 到状态 j 的转移率 $\gamma_{ij} \geq 0$, 且满足

$$\gamma_{ii} = -\sum_{j \neq i} \gamma_{ij}, \text{ 其中 } i, j \in S.$$

$r(t)$ 的每一个样本轨道都是一个右连续的阶梯函数 (见王梓坤《随机过程通

论》, 上册), 而由转移速率 γ_{ij} 构成转移速率矩阵

$$\Gamma = (\gamma_{ij})_{4 \times 4}$$

为了方便起见, 令

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T, \quad \frac{dx(t)}{dt} = \left[\frac{dx_1(t)}{dt}, \frac{dx_2(t)}{dt}, \dots, \frac{dx_N(t)}{dt} \right]^T,$$

$$f(x(t), t, r(t)) = [f_1(x_1(t), t, r(t)), f_2(x_2(t), t, r(t)), \dots, f_N(x_N(t), t, r(t))]^T,$$

得到

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), t, r(t)) \quad (3-3)$$

在 Ad Hoc 网络中, 节点 k 是任意选取的, 现在来介绍关于连接数的四种状态。

(S1). 依概率 r ($0 \leq r < 1$) 删除 m_1 连接的状态

$$f_1(x_k(t), t, 1) = -rm_1 Q_1(x_k(t)) - rm_1 A_k \quad (3-4)$$

上式右端第一项表示选择节点 k 删除连接, 即, 与节点 k 相连接的其它节点选择移除与节点 k 的连接, 而第二项表示节点 k 选择移除与本身相连接的其它节点的连接。其中 $Q_1(x_k(t))$ 表示在时刻 t 节点 k 关于连接数 $x(k)$ 的选择概率,

$A_k = \sum_{\text{任意 } x_k \text{ 的连接 } l_k} Q_1(x_j(t))/x_j(t)$, 其中 x_j 表示当前节点 j 的连接数。

(S2). 依概率 q ($0 \leq q < 1$) 重新连接 m_2 连接的状态

$$f_2(x_k(t), t, 2) = -\frac{qm_2}{N} + qm_2Q_2(x_k(t)) \quad (3-4)$$

上次右端第一项表示减少的连接, 即, 从某节点移除连接, 而第二项表示以重建连接概率 $Q_2(x_k(t))$ 增加节点的连接, 其中 $Q_2(x_k(t))$ 的定义如同 $Q_1(x_k(t))$ 。

(S3). 依概率 p ($0 \leq p < 1$) 增加 m_3 连接的状态

$$f_3(x_k(t), t, 3) = \frac{pm_3}{N} + pm_3Q_3(x_k(t)) \quad (3-5)$$

上次右端第一项表示选择任意连接的起始节点, 而第二项表示以概率 $Q_3(x_k(t))$ 选择终端节点, 其中 $Q_3(x_k(t))$ 的定义如同 $Q_1(x_k(t))$ 。

(S4). 依概率 w ($0 \leq w < 1$) 不更改连接的状态, 其中 $p+q+r+w=1$,

$$f_4(x_k(t), t, 4) = 0 \quad (3-6)$$

注 3.1: 显然, 在 Ad Hoc 网络模型中, 若任意一个节点的连接均在状态(S2) 和(S4) 之间进行转换, 则系统肯定是稳定的, 这是因为节点的连接数不会发生改变。而如果处在状态(S1)和(S3)下, 节点的连接数会发生改变, 则系统就不会是稳定的, 因此, 对于由这四种状态混合而构成的系统的稳定性研究便成为了本文的研究重点。

3.2.2 模型分析

定义 3.1 (M -矩阵) 若存在 $B \geq 0$, $s > \rho(B)$, 使得矩阵 $U = (a_{ij})_{N \times N}$ 满足 $U = sI - B$,

其中 I 是单位矩阵, $\rho(B)$ 是 B 的谱半径, 那么就称矩阵 U 为非奇异 M -矩阵。

定义 3.2 (P 阶距指数递减) 设 h, λ 为正数, 式(3-3)的解的初值为 $x(0) = x_0 \in R^n$,

若 $\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(E \|x(t, x_0)\|^h) = -\lambda$, 其中 $\|\cdot\|$ 表示 R^n 上的欧几里得范数, 则式(3-3)

的解 $x(t, x_0)$ 是 P 阶距指数递减的。

引理 3.1 对 $\forall i \in S$, 存在常数使得 $x^T f(x, t, i) \leq \alpha_i |x|^2$, 定义矩阵

$U(h) = \text{diag}(-h\alpha_1, \dots, -h\alpha_N) - \Gamma$ 。若 $U(h)$ 是一非奇异 M -矩阵, 则式(3-3)的解是 P

阶距指数递减的。

证明：此定理的证明由文献[28]的定理 4.3 和 4.8 直接给出。

特别地，针对 $M=4$ 来研究，每一个节点都在四种状态中进行转换，即建立新连接，重组连接，删除连接和连接不更改等四种状态。对节点任意 k ，可以得到，

i. $r(t)=1$ 时，删除连接状态，

$$P(r(t)=3)=p_1=r, f(x_k(t), t, 1)=-rm_1A_k-rm_1Q_1(x_k(t));$$

ii. $r(t)=2$ 时，重组连接状态，

$$P(r(t)=2)=p_2=q, f(x_k(t), t, 2)=-qm_2\frac{1}{N}+qm_2Q_2(x_k(t));$$

iii. $r(t)=3$ 时，新建连接状态，

$$P(r(t)=3)=p_3=p, f(x_k(t), t, 3)=pm_3\frac{1}{N}+pm_3Q_3(x_k(t));$$

iv. $r(t)=4$ 时，连接不更改状态，

$$P(r(t)=4)=p_4=1-p-q-r, f(x_k(t), t, 4)=0。$$

由式(3-3)，我们可得到，

$$\frac{dx_k(t)}{dt}=f(x_k, t, i) \quad (3-7)$$

其中 $i=1,2,3,4, k=1, \dots, N$ 。

定理 3.1 若 $U(h)$ 是一非奇异 M 矩阵，且对 $\forall i \in S=\{1,2,3,4\}$ ，存在常数 $\alpha_i \in R$

使得 $x^T f(x, t, i) \leq \alpha_i |x|^2$ ，或者

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N [\alpha_1 x_k^2 + rm_1 x_k Q_1(x_k) + rm_1 x_k A_k] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k^2 - qm_2 x_k Q_2(x_k) + \frac{qm_2}{N} x_k] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k^2 - pm_3 x_k Q_3(x_k) - \frac{pm_3}{N} x_k] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3-8)$$

则式(3-3)的解 $x(t)$ 是 P 阶距指数递减的，其中 $x(t)$ 是 N 个节点的连接向量。

证明：此定理可由引理 3.1 得出。

注 3.2 若式 (3-3) 是 p 阶距指数递减的, 我们可以得到

$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(E|x(t, x_0)|^p) = -\lambda$, 意思是指具有初值 $x_0 = x(0) = [x_1(0), x_2(0), \dots, x_N(0)]^T$ 的向量 $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T$ 将随时间的减少逼近于零向量, 也就是说, 第 k 个节点与其它节点连接数 $x_k(0)$ 将随时间的减少而逼近于零。若满足定理 3.1 中的条件, 在 Ad Hoc 网络中将没有节点相互连接。也就是说, 当 $U(h)$ 或 $f(x, t, t)$ 不满足定理 3.1 中的条件时, 网络中的节点按一定概率相互连接。在下一部分, 我们将讨论 Ad Hoc 网络中针对连接数递减的特例。

3.3 静态节点间连接模型特例

1. 特例一, 新建连接偏向于连接数多的节点, 同时满足, 与某一节点的连接数越多, 就越有可能删除连接。由文献[8]中可知,

$$\begin{aligned} Q_2(x_k) = Q_3(x_k) &= \frac{x_k + 1}{\sum_{\text{所有节点 } k} (x_k + 1)}, \quad Q_1(x_k) = \frac{x_k}{\sum_{\text{所有节点 } k} x_k}, \\ A_k &= \sum_{\text{任意 } x_k \text{ 的所有连接 } l_y} \frac{Q_1(x_j)}{x_j} = \sum_{\text{任意 } x_k \text{ 的所有连接 } l_y} \frac{x_j}{\sum_{\text{所有节点 } r} x_r} \frac{1}{x_j} = Q_1(x_k) \end{aligned}$$

在时刻 t , 整个网络的连接数只取决于状态 $r(t)=1$ 和 $r(t)=3$, 由文献[8]可知,

$$\sum_{\text{所有节点 } k} x_k = 2(pm_3 - rm_1)t, \text{ 结合定理 3.1 我们可得,}$$

定理 3.2 对 $\forall i \in S$, 若 $U(h)$ 是一非奇异 M 矩阵, 存在常数 $\alpha_i \in R$ 使得

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_1 + \frac{rm_1}{(pm_3 - rm_1)t}] \geq 0 \quad (3-9)$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k - \frac{qm_2(x_k + 1)}{2(pm_1 - rm_3)t + N} + \frac{qm_2}{N}] \geq 0 \quad (3-10)$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k - \frac{pm_3(x_k + 1)}{2(pm_3 - rm_1)t + N} - \frac{pm_3}{N}] \geq 0 \quad (3-11)$$

则式(3-3)的解 $x(t)$ 是 p 阶距指数递减的。

注 3.3 若时间 t 满足式(3-9), x_k 满足(3-10)和(3-11), Ad Hoc 网络中将没有节点相互连接。

II. 特例二, 新建连接偏向于均匀连接, 即, 连接数越多的节点, 越有可能删除连接, 由文献[8]知,

$$\begin{aligned} Q_2(x_k) = Q_3(x_k) &= \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\sum_{\text{所有节点 } k} \frac{1}{x_k+1}} \approx \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\sum_{\text{所有节点 } k} \frac{1}{E(x_k)+1}} \\ &= \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\frac{N}{\frac{2(pm_3 - rm_1)t + N}{N} + 1}} = \frac{2(pm_3 - rm_1)t + N}{N^2(x_k + 1)} \\ Q_1(x_k) &= \frac{x_k}{\sum_{\text{所有节点 } k} x_k} = \frac{x_k}{2(pm_3 - rm_1)t} = A_k \end{aligned}$$

我们很容易由定理 3.1 得到

定理 3.3 对 $\forall i \in S$, 若 $U(\lambda)$ 是一非奇异 M -矩阵, 存在常数 $\alpha_i \in R$ 使得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N [\alpha_1 + \frac{rm_1}{(pm_3 - rm_1)t}] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k - \frac{2(pm_3 - rm_1)qm_2 t + qm_2 N}{N^2(x_k + 1)x_k} + \frac{qm_2}{N}] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k - \frac{2(pm_3 - rm_1)pm_3 t + pm_3 N}{N^2(x_k + 1)x_k} - \frac{pm_3}{N}] &\geq 0 \end{aligned}$$

则式(3-3)的解 $x(t)$ 是 P 阶距指数递减的。

III. 特例三, 系统的连接条件与删除连接的概率相关。由文献[8],

$$\begin{aligned} Q_2(x_k) = Q_3(x_k) &= \frac{x_k + 1}{\sum_{\text{所有节点 } k} (x_k + 1)} = \frac{x_k + 1}{2(pm_3 - rm_1)t + N} \\ Q_1(x_k) &= \frac{x_k}{\mu N + \sum_{\text{所有节点 } k} x_k} = \frac{x_k}{\mu N + 2(pm_3 - rm_1)t} = A_k \end{aligned}$$

其中 μ 是调整因子, 我们可以由定理 3.1 得到,

定理 3.4 对 $\forall i \in S$, 若 $U(\lambda)$ 是一非奇异 M -矩阵, 存在常数 $\alpha_i \in R$ 使得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N [\alpha_1 + \frac{2rm_1}{\mu N + 2(pm_3 - rm_1)t}] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k - \frac{qm_2(x_k + 1)}{2(pm_3 - rm_1)t + N} + \frac{qm_2}{N}] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k - \frac{pm_3(x_k + 1)}{2(pm_3 - rm_1)t + N} - \frac{pm_3}{N}] &\geq 0 \end{aligned}$$

则式(3-3)的解 $x(t)$ 是 P 阶距指数递减的。

3.4 节点恒速移动的连接模型分析

结合第二章中的内容, 假设所有的节点以相同的恒速 v 移动, 但方向是随机的。文献[25]中介绍了对恒速条件下, 连接变化率为 $4\rho Rv \sin \frac{\theta}{2}$, 其中 ρ 是 N 个节点的节点密度, R 是节点的传输半径, θ 是在区间 $[0, \pi]$ 上随机变化。因此平均连接变化率为

$$\lambda_{gen} = \int_0^\pi 4\rho Rv \sin \frac{\theta}{2} \frac{1}{\pi} d\theta = \frac{8}{\pi} \rho Rv$$

当节点以恒速移动时, 节点间的连接变化率等于连接断开率, 而基于式(3-7)的无移动网络模型中节点 k 的连接变化率为

$$\frac{dx_k}{dt} = f(x_k, t, r(t)) + \frac{16}{\pi} \rho Rv \quad (3-12)$$

由定理 3.1 和(3-7), 我们可以得到

定理 3.5 对 $\forall i \in S$, 若 $U(\lambda)$ 是一非奇异 M 矩阵, 存在常数 $\alpha_i \in R$ 使得

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N [\alpha_1 x_k^2 + rm_1 x_k Q_1(x_k) + rm_1 x_k A_k - \frac{16}{\pi} \rho Rv] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k^2 - qm_2 x_k Q_2(x_k) + \frac{qm_2}{N} x_k - \frac{16}{\pi} \rho Rv] &\geq 0 \\ \sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k^2 - pm_3 x_k Q_3(x_k) - \frac{pm_3}{N} x_k - \frac{16}{\pi} \rho Rv] &\geq 0 \end{aligned} \quad (3-13)$$

则式(3-3)的解 $x(t)$ 是 P 阶距指数递减的。

3.5 本章小结

在本章中, 在文献[8]的基础上, 我们针对 Ad Hoc 网络中静态的节点和移动(常速)的节点, 建立连接状态模型, 并且得到模型系统 P 阶指数递减等结果, 如果某些条件满足的话, 网络中将不会有节点相互连接。换句话说, 当 $U(h)$ 和 $f(x, t, i)$ 都不满足该条件的时候, 网络中节点按一定概率与其它节点相互连接。

第4章 模型系统的稳定性分析

在第3章中建立了静态节点间的连接变化率系统,并进行初步分析,得到系统 P 阶指数递减等结论,本章将进一步对其进行分析,得出稳定性等结论。

4.1 引言

在前章中,应用了一些关于“连接偏好度”函数的特例,对模型进行了初步分析,满足现实情况下的物理意义,着重分析了网络节点间会随时间的增长趋近于无连接状态。本章将对网络中一直存在连接的状态进行分析,且假设任意节点 k 至少存在一个连接。在第三章最后一部分中,初步引进了模型控制项的问题,考虑了节点恒速移动情况下,对节点连接变化率的影响。但只是针对模型解的 P 阶距指数递减性进行了说明和分析,没有针对模型的稳定性进行分析,本章将针对移动的单节点连接变化率模型进行稳定性分析,在本章开始之前,先引进强连接与弱连接的概念。

文献[46]中指出,强连接是指组织中密切而频繁的直接联系,而弱连接是指组织间疏远、不频繁的直接联系。而将其引进到Ad Hoc网络中相邻节点间的连接,就得到下面两个定义:

定义 4.1 若在Ad Hoc网络中任意节点与相邻节点之间始终至少有一个连接,即对任意节点 k 有, $P(x_k(t) \geq 1) = 1$, 那么就称相邻节点间的连接为强连接。

定义 4.2 若在Ad Hoc网络中存在一节点与相邻节点之间不存在任何连接而产生孤立点,即对任意节点 k 有, $P(x_k > 0) = \lambda$, $0 < \lambda < 1$, 那么就称相邻节点间的连接为弱连接。

很自然的,人们会想到,强连接比弱连接更容易让人理解。而按照实际情况来看,节点间的数据传输,丢包现象是经常发生的,所以出现弱连接的机会要比强连接高得多。本章将只针对弱连接情况下的连接模型进行分析,下一章将针对强连接情况进行说明和分析,并针对此模型进行改进及其分析。影响单节点连接变化率的四种状态在第三章中已经给出,本章将应用第三章中提到的关于“连接偏好度”函数的特例,对模型进行稳定性分析,主要是指指数稳定性。

本章的结构如下:第一部分是引言;第二部分重述Ad Hoc网络中静态节点间连接基本模型,并介绍特殊连接模型及其稳定性分析;第三部分针对第二部分的分析,对其进行数值验证;第四部分是本章小结。

4.2 弱连接情形下的稳定性分析

在第三章中,应用随机微分方程的知识对 Ad Hoc 网络中静态节点间的连接进行建模,构造出一个由 4 个状态之间进行切换的网络连接模型系统。模型如下,

$$\frac{dx_k(t)}{dt} = f(x_k(t), t, r(t)), \quad (4-1)$$

四个状态分别为,

(S1). 依概率 r ($0 \leq r < 1$) 删除 m_1 连接的状态

$$f_1(x_k(t), t, 1) = -rm_1Q_1(x_k(t)) - rm_1A_k \quad (4-2)$$

(S2). 依概率 q ($0 \leq q < 1$) 重新连接 m_2 连接的状态

$$f_2(x_k(t), t, 2) = -\frac{qm_2}{N} + qm_2Q_2(x_k(t)) \quad (4-3)$$

(S3). 依概率 p ($0 \leq p < 1$) 增加 m_3 连接的状态

$$f_3(x_k(t), t, 3) = \frac{pm_3}{N} + pm_3Q_3(x_k(t)) \quad (4-4)$$

(S4). 依概率 w ($0 \leq w < 1$) 不更改连接的状态, 其中 $p + q + r + w = 1$,

$$f_4(x_k(t), t, 4) = 0. \quad (4-5)$$

在弱连接情形下,下面将分别针对第三章中提到的三个常用的“连接偏好函数” $Q(x_k(t))$ 构成的三个特殊模型,来研究模型系统(4-1)解的稳定性。本章只针对任意单个节点进行研究。

4.2.1 特殊模型一

此模型的“连接偏好”可描述为,新连接偏向于连接数多的节点,同时还要满足,节点的连接数越多,此节点被移除连接的概率也就越大。

根据文献[8]可知,

$$Q_2(x_k) = Q_3(x_k) = \frac{x_k + 1}{\sum_{\text{所有节点 } k} (x_k + 1)}, \quad Q_1(x_k) = \frac{x_k}{\sum_{\text{所有节点 } k} x_k},$$

$$A_k = \sum_{\substack{\text{任意 } x_k \text{ 的所有连接 } l_{kj}}} \frac{Q_1(x_j)}{x_j} = \sum_{\substack{\text{任意 } x_k \text{ 的所有连接 } l_{kj} \\ \text{所有节点 } r}} \frac{x_j}{\sum_r x_r} \frac{1}{x_j} = Q_1(x_k) \quad (4-6)$$

在时刻 t , 整个网络的连接数只取决于状态 $r(t)=1$ 和 $r(t)=3$, 由文献[8]可知,

$\sum_{\text{所有节点 } k} x_k = 2(pm_3 - rm_1)t$ 。显然地, 在一个拥有 N 个节点的网络中, $\sum_{i=1}^N x_i$ 的最大

数为 $C_N^1 \cdot C_{N-1}^1 = N^2 - N$ 。

引理 4.1 对 $\forall (x_k, t, i) \in R^+ \times R^+ \times S$, 有

$$x_k f(x_k, t, i) \leq \alpha_i |x_k|^2, \quad (4-7)$$

其中 $\alpha_1 = -\frac{2}{N^2 - N}rm_1, \alpha_2 = \frac{1}{N}qm_2, \alpha_3 = \frac{3}{N}pm_3, \alpha_4 > 0$, 为了计算方便, 令

$\alpha_4 = w$ 。

证明: 在一个拥有 N 个节点的网络中, 根据 $\sum_{i=1}^N x_i$ 的最大值, 可知

$(pm_3 - rm_1)t$ 的最大值为 $\frac{N^2 - N}{2}$, 得出,

$$\begin{aligned} x_k f(x_k, t, 1) &= x_k \left[-\frac{2rm_1 x_k}{\sum_{i=1}^N x_i} \right] \\ &\leq -\frac{2rm_1}{N^2 - N} x_k^2 \\ x_k f(x_k, t, 2) &= x_k \left[-\frac{qm_2}{N} + qm_2 \frac{x_k + 1}{\sum_{i=1}^N x_i + N} \right] \\ &\leq \frac{qm_2}{N} x_k^2 \end{aligned}$$

$$x_k f(x_k, t, 3) = x_k \left[\frac{pm_3}{N} + pm_3 \frac{x_k + 1}{\sum_{i=1}^N x_i + N} \right]$$

$$\leq \frac{3pm_3}{N} x_k^2$$

$$x_k f(x_k, t, 4) = 0 \leq \alpha x_k^2$$

由此便得出,

$$x_k f(x_k, t, i) \leq \alpha_i |x_k|^2.$$

注 4.1 此引理为了满足条件(4-7)得出 α_i 的合适的值。

引理 4.2 对 $\forall (x_k, t, i) \in R^+ \times R^+ \times S$, 有

$$|f(x_k, t, i)| \leq K |x_k|, \quad t \in [t_0, \infty) \quad (4-8)$$

$$\text{其中, } K = \max \left\{ \frac{rm_1}{(pm_3 - rm_1)t_0}, \frac{qm_2}{2}, pm_3(N+2), 1 \right\}.$$

证明: 假设开始时, 网络中没有连接, 则满足条件 $pm_3 - rm_1 > 0$ 。得出,

$$|f(x_k, t, 1)| = \left| \frac{2rm_1 x_k}{\sum_{i=1}^N x_i} \right| \leq \frac{rm_1}{(pm_3 - rm_1)t_0} |x_k|$$

$$|f(x_k, t, 2)| = \left| -\frac{qm_2}{N} + qm_2 \frac{x_k + 1}{\sum_{i=1}^N (x_i + 1)} \right| \leq \frac{qm_2}{2} |x_k|$$

$$|f(x_k, t, 3)| = \left| \frac{pm_3}{N} + pm_3 \frac{x_k + 1}{\sum_{i=1}^N (x_i + 1)} \right| \leq pm_3(N+2) |x_k|$$

$$|f(x_k, t, 4)| = 0 \leq |x_k|.$$

令 $K = \max \left\{ \frac{rm_1}{(pm_3 - rm_1)t_0}, \frac{qm_2}{2}, pm_3(N+2), 1 \right\}$, 在任意时间和状态, 对

$(x_i, t, i) \in R^+ \times R^+ \times S$, 得出

$$|f(x_i, t, i)| \leq K|x_i|, \quad t \in [t_0, \infty).$$

注 4.2 引理 4.2 为系统(4-1)的解提供了几乎处处指数稳定的可行性条件, 针对任意节点在任意时刻和状态, (4-8)都成立, 连接变化率的绝对值不大于连接数的倍数, 这是本章讨论系统(4-1)的解几乎处处稳定性的关键之一。

定义 4.3 若存在一正常数 K 使得 $|f(x_i, t, i)| \leq K|x_i|$, $(x_i, t, i) \in R^+ \times R^+ \times S$,

令 $\varphi > 0$ 且 $\lambda > 0$, 使得满足 $\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(E|x_i(t)|^\varphi) \leq -\lambda$, 则系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的。

定理 4.1 针对连接模型一, 若

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} > 0 \quad (4-9)$$

其中 $\alpha_1 = -\frac{2}{N^2 - N}pm_1, \alpha_2 = \frac{1}{N}qm_2, \alpha_3 = \frac{3}{N}pm_3$, 且 $\alpha_4 = w$, 则系统(4-1)的解是几乎处处稳定的。

此定理可由引理 4.1 和引理 4.2, 以及定义 4.2 和文献[28]中定理 4.6 直接得出, 下面本章将简单的对此定理进行证明。

为了满足条件(4-7), 在引理 4.1 中获得 $\alpha_i (i=1,2,3,4)$ 。另外, 在引理 4.2

中, 可得到常数 K 来满足条件(4-8)。

显然地, $\alpha_1 < 0$ 且 $\alpha_i > 0 (i=2,3,4)$, 因此系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的当且仅当

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} > 0$$

注 4.3 从基于引理 4.1 和 4.2 的定理 4.1 中, 本章便可得到一重要结果, 即如若能满足一些条件, 利用马尔可夫理论可知, 针对模型一, 系统(4-1)的解将是几乎处处指数稳定的。

此定理同时也表明, 如若能找到满足式(4-7)和(4-8)的条件, 且系统的状态转换率能满足条件(4-9), 则解是几乎处处指数稳定的。

通过以上的讨论, 针对模型一解的几乎处处指数稳定性结论, 本节给出了充

分条件。也就是说,若系统的连接数和连接变化率满足某些条件,系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的,只得到了其充分性。下面将引用反例来说明,在不满足定理 4.1 中的条件的情况下,系统的解仍然是几乎处处指数稳定的。

假设 $\Gamma = (0)_{4 \times 4}$, 显然地,系统是稳定的,但是

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} = 0$$

不满足条件(4-9),所以条件(4-9)仅为充分条件。

4.2.2 特殊模型二

在模型二中,新建连接偏向于均匀连接,即,连接数越多的节点,越有可能删除连接,由文献[8]知,

$$\begin{aligned} Q_2(x_k) &= Q_3(x_k) = \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\sum_{\text{所有节点 } k} \frac{1}{x_k+1}} \approx \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\sum_{\text{所有节点 } k} \frac{1}{E(x_k)+1}} \\ &= \frac{\frac{1}{x_k+1}}{\frac{N}{\frac{2(pm_1 - rm_3)t}{N} + 1}} = \frac{2(pm_3 - rm_1)t + N}{N^2(x_k+1)} \\ Q_1(x_k) &= \frac{x_k}{\sum_{\text{所有节点 } k} x_k} = \frac{x_k}{2(pm_3 - rm_1)t} = A_k \end{aligned} \quad (4-10)$$

定理 4.2 针对特殊模型二,若

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} > 0 \quad (4-11)$$

$\alpha_1 = -\frac{2}{N^2 - N}rm_1$, $\alpha_2 = \frac{2N-1}{2N}qm_2$, $\alpha_3 = \frac{2N+1}{2N}pm_3$, $\alpha_4 = w$, 其中 $pm_3 - rm_1 > 0$.

则系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的。

证明:证明过程与定理 4.1 相似。

与模型一中相同,首先满足条件(4-7)和(4-8),而不同的是,针对特殊连接模

型二解的几乎处处指数稳定的结论, 通过满足定理 4.2 中的条件(4-11)便可得到其充分条件。

4.2.3 特殊模型三

在特殊模型三中, 系统的连接条件与删除连接的概率相关。由文献[8],

$$\begin{aligned} Q_2(x_k) &= Q_3(x_k) = \frac{x_k + 1}{\sum_{\text{所有节点 } k} (x_k + 1)} = \frac{x_k + 1}{2(pm_3 - rm_1)t + N} \\ Q_1(x_k) &= \frac{x_k}{\mu N + \sum_{\text{所有节点 } k} x_k} = \frac{x_k}{\mu N + 2(pm_3 - rm_1)t} = A_k \end{aligned}$$

其中 μ 是调整因子。

定理 4.3 针对连接模型三, 若

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} > 0 \quad (4-12)$$

其中 $\alpha_1 = -\frac{2}{\mu N + N^2 - N}rm_1, \alpha_2 = \frac{1}{N}qm_2, \alpha_3 = \frac{3}{N}pm_3, \alpha_4 = w$, 则系统(4-1)的

解是几乎处处指数稳定的。

证明: α_2 和 α_3 的获得类似于引理 4.1, 下面来讨论 α_1 。

显然地, 在一个具有 N 个节点的网络中, $(pm_3 - rm_1)t$ 的最大值为 $\frac{N^2 - N}{2}$,

因此,

$$\begin{aligned} x_k f(x_k, t, 3) &= x_k \left[-\frac{2rm_1 x_k}{\mu N + 2(pm_3 - rm_1)t} \right] \\ &\leq -\frac{2rm_1}{\mu N + N^2 - N} x_k^2 \end{aligned}$$

可得出 $\alpha_1 = -\frac{2}{\mu N + N^2 - N}rm_1$ 。

综合以上的讨论, 令

$$\alpha_1 = -\frac{2}{\mu N + N^2 - N}rm_1, \alpha_2 = \frac{1}{N}qm_2, \alpha_3 = \frac{3}{N}pm_3, \alpha_4 = w。$$

其它的证明部分类似于定理 4.1。

与模型一中相同, 首先满足条件(4-7)和(4-8), 而不同的是, 针对特殊连接模型三解的几乎处处指数稳定的结论, 通过满足定理 4.3 中的条件(4-12)便可得到其充分条件。

4.3 数值例子

在小节, 将讨论一些实例来对以上得出的结论进行验证。

实例 4.1 针对模型一, 令(4-7)和(4-8)成立, 假设

$$\Gamma = \begin{pmatrix} -2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & -4 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & -3 \end{pmatrix} \quad (4-13)$$

由定理 4.1 可得

$$\frac{32}{N^2 - N}rm_1 - \frac{20}{N}qm_2 - \frac{27}{N}pm_3 - 3w > 0 \quad (4-14)$$

其中 $r + q + p + w = 1$, 则系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的。

证明: 假设

$$\begin{vmatrix} -\alpha_1 & -\gamma_{12} & -\gamma_{13} & -\gamma_{14} \\ -\alpha_2 & -\gamma_{22} & -\gamma_{23} & -\gamma_{24} \\ -\alpha_3 & -\gamma_{32} & -\gamma_{33} & -\gamma_{34} \\ -\alpha_4 & -\gamma_{42} & -\gamma_{43} & -\gamma_{44} \end{vmatrix} \\ = \begin{vmatrix} \frac{2}{N^2 - N}rm_1 & -1 & -1 & 0 \\ -\frac{1}{N}qm_2 & 2 & -1 & 0 \\ -\frac{3}{N}pm_3 & -2 & 4 & -1 \\ -w & -2 & 0 & 3 \end{vmatrix} > 0$$

$$\text{使得 } \frac{32}{N^2 - N}rm_1 - \frac{20}{N}qm_2 - \frac{27}{N}pm_3 - 3w > 0。$$

显然地, 通过定理 4.1 可知系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的。

注 4.4 对于转换率矩阵(4-13), 如果能满足条件(4-14), 很容易便证明解是几乎处处指数稳定的。也就是说, 针对由四种状态组合而成的系统, 任何状态转换率矩阵都对应着一个矩阵不等式。

实例 4.2 令(4-7)和(4-8)成立, 假设

$$\Gamma = \begin{pmatrix} -3 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -3 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -3 \end{pmatrix} \quad (4-15)$$

由定理 4.1 可得

$$\frac{2}{N^2 - N}rm_1 - \frac{1}{N}qm_2 - \frac{3}{N}pm_3 - w > 0 \quad (4-16)$$

其中 $r + q + p + w = 1$ ，则系统(4-1)的解是几乎处处指数稳定的。

此例表明混合系统的四种状态之间的切换是等概率切换。

接下来，本节将针对定理 4.2 和定理 4.3 进行实例说明。

基于实例 4.2，令(4-7)和(4-8)成立，且已知(4-15)，则由定理 4.2 可得，

$$\frac{4}{N^2 - N}rm_1 - \frac{2N-1}{N}qm_2 - \frac{2N+1}{N}pm_3 - 2w > 0, \text{ 其中 } r + q + p + w = 1, \text{ 使得系统(4-1)}$$

的解是几乎处处指数稳定的。

类似地，令(4-7)和(4-8)成立，且已知(4-15)，则由定理 4.3 可得，

$$\frac{2}{\mu N + N^2 - N}rm_1 - \frac{1}{N}qm_2 - \frac{3}{N}pm_3 - w > 0, \text{ 其中 } r + q + p + w = 1, \text{ 使得系统(4-1)的解}$$

是几乎处处指数稳定的。

4.4 本章小结

本章着重运用马尔可夫理论对 Ad Hoc 网络中的特殊连接模型进行了连接变化分析，得出了一些客观的结果，即，如果某些条件能够得到满足，则三个特殊连接模型的解将是几乎处处指数稳定的。将会在下一章中介绍一般模型的情况。

第5章 模型改进与分析

除了在第三章提到的速度可以用来控制模型的稳定性,还可以建立任何符合物理意义的控制函数来控制模型的稳定性,本章将对模型进行改进,通过添加任意控制函数 $g(x, t, r(t))$ 的方式来判定模型的不稳定性与稳定性。

5.1 模型改进

通过第三章的讨论和分析后,所构造的系统(4-1)将会根据 Markov 链的规律从一种模态转变到另一种模态中,由“注 3.1”可知,系统在某些状态下是可控并且是稳定的,但并不是在整个混合状态下可控且稳定的,据此,可以设计一个可控量来对系统(4-1)进行控制,来进一步研究模型的稳定性或者不稳定性。模型描述如下,

$$dx(t) = f(x(t), t, r(t))dt + g(x, t, r(t))dw(t) \quad (5-1)$$

其中 $t \geq 0$, 初值 $x_k(0) = x_0$ 。

令 $w(t), t \geq 0$ 为 m 维的 Brown 运动, $r(t)$ 为取值于有限状态空间 $S = \{1, 2, 3, 4\}$ 的右连续的 Markov 链, 其转移概率为

$$P\{r(t+\Delta) = j | r(t) = i\} = \begin{cases} \gamma_{ij}\Delta + o(\Delta) & \text{if } i \neq j \\ 1 + \gamma_{ii}\Delta + o(\Delta) & \text{if } i = j \end{cases}$$

这里, $\Delta > 0, \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{o(\Delta)}{\Delta} = 0$, γ_{ij} 表示从时刻 t 状态 $i (i \neq j)$ 转移到 $t + \Delta$ 时刻状态 j 的转移速率, 若 $i \neq j$, 那从状态 i 到状态 j 的转移率 $\gamma_{ij} \geq 0$, 且满足

$$\gamma_{ii} = -\sum_{j \neq i} \gamma_{ij}, \text{ 其中 } i, j \in S.$$

而由转移速率 γ_{ij} 构成转移速率矩阵为

$$\Gamma = (\gamma_{ij})_{4 \times 4}.$$

接下来, 本章将根据实际的物理意义来对系统(5-1)进行探讨。

由于要考虑连接数 x 的物理特征, 也就是说, 一个正常的 Ad Hoc 网络, 节点的连接数通常是 $x_k \geq 1$, 而在某节点不存在连接的情况下, $x_k = 0$, 不存在

$0 < x_k < 1$ 的情况。这是得到第三章的一系列结果的一个重要因素，在“注 3.2”中已经做出了详尽的描述，而这只是在一个极端的情况下，进行考虑的，接下来本文将要对通常的情况下的连接问题进行探讨。由文献 Mao[47]引进两个定义如下，

定义 5.1 若任意初值 $x_k(0) = x_0 \neq 0$ ，有

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(|x(t; x_0)|) > 0 \quad \text{a.s.} \quad (5-2)$$

则系统(5-1)的解是几乎处处指数不稳定的。

定义 5.2 若任意初值 $x_k(0) = x_0$ ，有

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(|x(t; x_0)|) < 0 \quad \text{a.s.} \quad (5-3)$$

则系统(5-1)的解是几乎处处指数稳定的。

5.2 模型分析

5.2.1 强连接下的不稳定性分析

对于定义 5.1，结合网络节点的物理特性，在节点的“连接能力”逐渐损耗为 0 的情况（最终节点间相互不存在连接）下，在第三章中已做了充分的讨论。在强连接情况下，根据定义 5.1，可得出一个定论，即，

定理 5.1 若 Ad Hoc 网络中节点间永久性地存在一定的连接数，且是强连接状态，即 $|x(t)| \geq 1$ ，则 Ad Hoc 网络中连接系统(5-1)的解是不稳定的。

证明：假设 Ad Hoc 网络中节点间永久性地存在一定的连接数，节点的“连接能力”能够得到保障，构成强连接，也就表明了 $|x(t)| \geq 1$ ，而这一条件，满足式(5-2)的条件，根据定义 5.2，可以得出结论，系统(5-1)的解是几乎处处指数不稳定的。■

由于定理 5.1 中的“永久性”条件在实际情况下是难以满足的，接下来，本文将给出判定系统(5-1)的解是几乎处处指数不稳定的判定定理。

假设 5.1 存在 Markov 链的平稳分布 $\chi = (\chi_1 \ \chi_2 \ \chi_3 \ \chi_4) \in R^{n \times 4}$ 使得

$$\chi \Gamma = 0,$$

其中对 $\forall j \in S$, 有 $\sum_1^4 \chi_j = 1$ 且 $\chi_j > 0$ 。

假设 5.2 对 $\forall i \in S$, 存在三个常量 ρ, σ 和 α_j , 使得

$$|g(x(t), t, i)| \geq \rho_j |x(t)|,$$

$$|x^T g(x(t), t, i)| \leq \sigma_j |x(t)|^2$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_1 x_k^2 + r m_1 x_k Q_1(x_k) + r m_1 x_k A_k] \leq 0$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k^2 - q m_2 x_k Q_2(x_k) + \frac{q m_2}{N} x_k] \leq 0.$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k^2 - p m_3 x_k Q_3(x_k) - \frac{p m_3}{N} x_k] \leq 0$$

判定定理 5.1 在假设 5.1 和 5.2 的条件下, 如果 Ad Hoc 网络系统中的连接数满足

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(|x(t)|) \geq \sum_{j=1}^4 \chi_j (\alpha_j + 0.5 \rho_j^2 - \sigma_j^2), \quad x_0 \neq 0 \quad \text{a.s.}$$

$$\text{其中 } \sum_{j=1}^4 \chi_j (\alpha_j + 0.5 \rho_j^2 - \sigma_j^2) > 0,$$

则系统(5-1)的解是几乎处处指数不稳定的

证明: 可由文献 Mao[47]中的定理 3.6 直接得出。

实例 5.1: 下面将用实例来应用判定定理 5.1, 由注 3.1 的说明, 在 Ad Hoc 网络模型中, 若任意一个节点的连接均在状态(S2) 和(S4)之间进行转换, 则系统肯定是稳定的, 这是因为节点的连接数不会发生改变。而如果处在状态(S1)和(S3)下, 节点的连接数会发生变化, 则系统就不会是稳定的。

为了描述方便, 本章只针对状态(S1)和(S3)两个状态进行分析, 并假设任意节点 k 的连接数 x_k 满足, $1 \leq x_k \leq N-1$, 为了分析方便, 重新定义一下两个状态, 即,

(S1). 依概率 r ($0 \leq r < 1$) 删除 m_1 连接的状态

$$f_1(x_k(t), t, 1) = -r m_1 Q_1(x_k(t)) - r m_1 A_k$$

(S2). 依概率 p ($0 \leq p < 1$) 增加 m_3 连接的状态

$$f_2(x_k(t), t, 3) = \frac{pm_3}{N} + pm_3 Q_3(x_k(t))$$

为了方便起见, 令

$$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)]^T, \quad \frac{dx(t)}{dt} = \left[\frac{dx_1(t)}{dt}, \frac{dx_2(t)}{dt}, \dots, \frac{dx_N(t)}{dt} \right]^T,$$

$$f(x(t), t, r(t)) = [f_1(x_1(t), t, r(t)), f_2(x_2(t), t, r(t)), \dots, f_N(x_N(t), t, r(t))]^T,$$

得到

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), t, r(t))$$

令 $r(t)$ 是由以上两个状态生成的 Markov 链, 状态转移速率矩阵为

$$Q = \begin{pmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{pmatrix}, \text{ 则 Markov 链的平稳分布为 } (\chi_1, \chi_2) = \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right), \text{ 下面将来}$$

选定控制函数 $g(x, t, 1)$ 和 $g(x, t, 2)$ 。

假设控制函数 $g(x, t, 1) = x$, $g(x, t, 2) = -2x$, 也就是说, 当在状态 S1 时, 节点 k 添加 x_k 个连接, 当在状态 S2 时, 节点 k 添加 $-2x_k$ 个连接, 则为了满足假设

5.2, 取 $\alpha_1 = -rm_1$, $\alpha_2 = \frac{pm_3}{N(N-1)}$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $\sigma_1 = 1$, 且 $\sigma_2 = 2$ 。得出

$$\sum_{j=1}^2 \chi_j (\alpha_j + 0.5\rho_j^2 - \sigma_j^2) = (-rm_1 - 0.5)\chi_1 + \left(\frac{pm_3}{N(N+1)} - 2 \right) \chi_2。$$

由判定定理 5.1 可知, 当 $[pm_3 - 2N(N-1)]\lambda > N(N-1)(rm_1 + 0.5)\mu$ 时, 系统 (5.1) 的解是几乎处处指数不稳定的。

5.2.2 弱连接下的稳定性分析

对于定义 5.2, 结合网络节点的物理特性, 在弱连接情况下,

假设 5.3 对 $\forall i \in S$, 存在三个常量 ρ_i , σ_i 和 α_i , 使得

$$|g(x(t), t, i)| \leq \rho_i |x(t)|,$$

$$|x^T g(x(t), t, i)| \geq \sigma_i |x(t)|^2$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_1 x_k^2 + rm_1 x_k Q_1(x_k) + rm_1 x_k A_k] \geq 0$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_2 x_k^2 - qm_2 x_k Q_2(x_k) + \frac{qm_2}{N} x_k] \geq 0.$$

$$\sum_{k=1}^N [\alpha_3 x_k^2 - pm_3 x_k Q_3(x_k) - \frac{pm_3}{N} x_k] \geq 0$$

判定定理 5.2 在假设 5.1 和 5.3 的条件下, 如果 Ad Hoc 网络系统中的连接数满足

$$\liminf_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \log(x(t)) \leq \sum_{j=1}^4 \chi_j (\alpha_j + 0.5 \rho_j^2 - \sigma_j^2), \quad x_0 \neq 0 \quad \text{a.s.}$$

$$\text{其中 } \sum_{j=1}^4 \chi_j (\alpha_j + 0.5 \rho_j^2 - \sigma_j^2) < 0,$$

则系统(5-1)的解是几乎处处指数稳定的

证明: 可由文献 Mao[47]中的定理 3.3 直接得出。

实例 5.2: 下面将用实例来应用判定定理 5.2,

为了简明, 只针对状态(S1)和(S3)两个状态进行分析, 为了分析方便, 与实例 5.1 相同。

$$\text{令 } (\chi_1, \chi_2) = \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu}, \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right), \text{ 选定控制函数 } g(x, t, 1) = x, \quad g(x, t, 2) = -2x, \text{ 则}$$

为了满足假设 5.3, 取 $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = \frac{N+1}{N} pm_3$, $\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 2$, $\sigma_1 = 1$, 且 $\sigma_2 = 2$ 。得出

$$\sum_{j=1}^2 \chi_j (\alpha_j + 0.5 \rho_j^2 - \sigma_j^2) = -0.5 \chi_1 + \left(\frac{N+1}{N} pm_3 - 2 \right) \chi_2.$$

由判定定理 5.2 可知, 当 $[(N+1)pm_3 - 2N]\lambda < 0.5N\mu$ 时, 系统(5.1)的解是几乎处处指数稳定的。

5.3 本章小结

本章综合考虑了 Ad Hoc 网络的特性, 并对其进行模型完善, 使得节点间的连接模型成为一种较为实际的随机模型。结合引进的强连接和软连接概念, 给出判定连接模型的稳定性与不稳定性判定定理。

第6章 论文成果与展望

6.1 论文所取得的主要成果

本论文在马尔可夫理论模型的基础上,对 Ad Hoc 网络中的连接模型进行建立,使得连接模型更加贴切实际,针对不同的连接偏好函数得出不同的连接模型。同时,本文还针对不同的连接模型进行了稳定性分析,取得了较好的结果。其中,本文所取得的主要成果如下:

1. 针对一般移动模型(如高斯-马尔可夫模型),对节点的连接变化率进行了讨论和研究,着重讨论离散高斯-马尔可夫模型和一般化离散高斯-马尔可夫模型,并对其进行了理论性分析。在现有的连接模型基础上,结合 Ad Hoc 网络的一些显著特性,利用马尔可夫切换理论针对 Ad Hoc 网络的连接问题进行建模,并分别针对移动节点和静态节点进行讨论分析。

2. 在以上模型的基础上,结合特殊连接偏好函数,构造准确性模型,对以上的稳定性结论进行验证,得出一些更切合实际模型和分析结果。

3. 鉴于上面的理论讨论,进行归纳总结出更加贴切实际和更加一般化的实际连接模型,并得出能够判定网络连接模型稳定性与不稳定性的判定定理。

6.2 课题展望

值得进一步研究的方向归纳如下两个方面:

1. 隐 Markov 状态的研究。在本论文的问题研究中,Markov 状态转移概率阵都是在假定已知的前提下进行分析设计的,而在实际工程应用中,很难得到 Markov 状态转移概率矩阵,在状态转移概率未知的情况下,如何对模型系统进行分析是今后所要研究的问题之一。

2. 非线性 Ad Hoc 网络连接模型系统的研究。目前国内外学者对于线性控制系统的研究取得了很大的进展,已经有了很多成果,但对非线性控制系统的研究还很少,没有形成一套系统的分析方法。因此,寻求针对于非线性 Ad Hoc 网络连接模型的新的控制方法 and 研究手段,也是今后所要研究的问题。

参考文献

- [1] John Jubin and Janet D. Tornow, The DARPA packet radio network protocols, Proceedings of the IEEE, 1987, 75: 21-32.
- [2] 郑少仁, 王海涛, 赵志峰等, Ad Hoc 网络技术, 人民邮电出版社, 2005.
- [3] B.Bollobas, Random Graphs, Academic Press, 1985.
- [4] A. L. Barabasi, R. Albert, and H. Jeong, Mean field theory for scale free random networks, Physica A, 1999, 272: 173-187.
- [5] R. Albert and A.-L. Barabasi, Topology of evolving networks: local events and universality, Physical Review letters, 2000, 85: 5234-5237.
- [6] Christian Bettstetter, On the minimum node degree and connectivity of a wireless multihop network, Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing, 2002, 80-91.
- [7] P. Santi, and D. M. Blough, An evaluation of connectivity in mobile wireless Ad Hoc networks, Proceeding of the International Conference on Dependable Systems and Networks, 2002, 89-98.
- [8] S. Papavassiliou, J. Zhu, A continuum theory-based approach to the modeling of dynamic wireless sensor networks, IEEE Communications Letters, 2005, 9(4): 337-339.
- [9] P. Santi, and D. M. Blough, The Critical Transmitting Range for Connectivity in Sparse Wireless Ad Hoc Networks, IEEE Trans. On Mobile Computing, 2003, 2(1): 25-39.
- [10] H. Li and D. Yu, A statistical study of neighbor node properties in ad hoc network, Proc. Of international Conference on Parallel Processing Workshops, 2002, 103-108.
- [11] O. Dousse, P. Thiran and M. Hasler, Connectivity in ad hoc and hybrid networks, IEEE INFOCOM, 2002, 1079-1088.

- [12] C. Bettstetter, On the connectivity of wireless multihop networks with homogeneous and inhomogeneous range assignment, Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, 2002, 1706-1710.
- [13] V. Ramasubramanian and D. Mosse, Statistical analysis of connectivity in unidirectional ad hoc networks, Proc. of the International Conference on Parallel Processing Workshops, 2002, 109-115.
- [14] M. Desai and D. Manjunath, On the connectivity in finite ad hoc networks, IEEE Communications Letters, 2002, 6(10): 437-439.
- [15] D. Yu and H. Li, On the definition of ad hoc network connectivity, Proc. of International Conference on Communication Technology, 2003, 990-994.
- [16] Robert Sedgewick, Algorithms in C parts 5: Graph algorithms, 中国电力出版社, 2003.
- [17] Robert Sedgewick, Graph algorithms in C parts 1-4: fundamentals, data structures, sorting, searching, 中国电力出版社, 2003.
- [18] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, et al. Introduction to algorithms, 高等教育出版社, 2002.
- [19] 张行文, 孙宝林, Ad Hoc 网络移动模型的研究, 计算机工程与应用, 2006, 42(29): 126-128.
- [20] 赵金晶, 朱培栋, Ad Hoc 网络移动模型及其应用, 计算机工程与科学, 2005, 27(5): 15-17.
- [21] Dmitri D. Perkins, Herman D. Hughes, and Charles B. Owen, Factors affecting the performance of ad hoc networks, IEEE, Michigan, 2004, 2048-2052.
- [22] Wang B, Yan B. Y, and Yuan D. H, The basic study of the features of the ad hoc nodes mobility model. Journal of Sichuan University. 2006, 42(1): 68-72.
- [23] Camp T, Boleng J, and Davies V, A survey of mobility models for ad hoc network research, Wireless Communication and Mobile Computing, 2002, 2(5): 483-502.
- [24] 时锐, 杨孝宗, 自组网 Random Direction 移动模型点空间概率分布的研究, 计算机研究与发展, 2004, 41(7): 1166-1173.
- [25] S. Cho and J. P. Hayes, Impact of mobility on connection stability in ad hoc

- networks, IEEE Wireless and Communications and Networking Conference, 2005, 3: 1650-1656.
- [26] Prince S and Stephen B. Wicker, On the Behavior of Communication Links of a Node in a Multi-Hop Mobile Environment, MobiHoc'04, 2004, 145-156.
- [27] Xurrong Mao, Stochastic Differential Equations and their Applications, Chichester: Horwood Publishing Limited, 1997.
- [28] Xuerong Mao, Stability of stochastic differential equations with Markov switching, Stochastic Process and Applications, 1999, 79: 45-67.
- [29] Xuerong Mao, A. Matasov, and A. B. Piunovskiy, Stochastic differential delay equations with Markov switching, Bernoulli, 2000, 6: 73-90.
- [30] Demin Li, Jie Zhou and Jiacun Wang, A Markov Jump Theory Based Approach to the Linking Model in Mobile Ad Hoc Network, Journal of Physics: Conference Series, 2008, 96.
- [31] Mariton M. J. Linear Systems in Automatic Control [M], New York :Marcel Dekker , 1990.
- [32] Sethi S. P, and Zhang Q, Hierarchical Decision Making in Stochastic Manufacturing Systems [M], Berlin :Birkhauser ,1994.
- [33] 张利军, 李春文, 程代展, 参数不确定马尔可夫跳变系统的鲁棒适应控制, 控制与决策, 2005, 20(9): 1030-1033.
- [34] 刘飞, 苏宏业, 褚健, 含参数不确定性的马尔可夫跳变过程鲁棒正实控制, 自动化学报, 2003, 29(5): 761-766.
- [35] 李小勇, 罗交晚, 带马尔可夫跳跃参数的离散随机双线性系统的稳定性, 长沙铁道学院学报, 2003, 21(4): 73-76.
- [36] 何舒平, 刘飞, 基于观测器的不确定时滞 Markov 跳变系统 H_∞ 控制, 系统工程与电子技术, 2007, 29(12).
- [37] 包俊东, 邓飞其, 罗琦, 基于 LMIs 方法-不确定性随机分布型时滞 Markov 跳变系统的鲁棒镇定, 系统工程理论与实践, 2005, No.6: 1-10.
- [38] 李顺祥, 田彦涛, Markov 切换系统的随机稳定性分析, 控制工程, 2004, 11(4): 325-327.

- [39] Yuan Cheng-gui, and Xuerong Mao, Asymptotic stability in distribution of stochastic differential equations with Markovian switching [J], Stochastic Process and Their Applications, 2003, 103: 277-291.
- [40] Yuan Cheng-gui, and Xuerong Mao, Robust stability and controllability of stochastic differential delay equations with Markovian switching [J]. Automatic, 2004, 40: 343-354.
- [41] M. D. S. Aliyu, E. K. Boukas, H_∞ control for markovian jump nonlinear systems, Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control, Tampa, Florida USA, 1998, 1:766-771.
- [42] M. D. S. Aliyu, Dissipativity and stability of nonlinear jump systems, Proceedings of the American Control Conference, 1999, 795-799.
- [43] M. S. Branicky, S. K. Mitter, Algorithms for optimal hybrid control, Proceedings of the 34th Conference on Decision & Control, 1995, 2661-2666.
- [44] J. P. Hespanha, and A. S. Morse, Towards the high performance control of uncertain processes via supervision, Proceeding of the 30th annual Conference on information science & systems, 1996, 405-410.
- [45] Ben Liang and Zygmunt J. Haas, Predictive distance-based mobility management for multidimensional PCS networks, IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(5): 718 - 732.
- [46] 邝宁华等, 强联系与跨部门复杂知识转移困难的客服, 研究与发展管理, 2004, 20-25.
- [47] Xuerong Mao, G. George Yin and Chenggui Yuan, Stabilization and destabilization of hybrid systems of stochastic differential equations, Automatica, 2007, 43: 264-273.

攻读硕士期间发表的论文

- [a] Peng Yu, Jie Zhou , Demin Li, and Chuan Ji, An Approach to Linkage Stability Analysis for in Mobile Ad hoc Network by Markov Jump Theory, International Journal of Intelligent Control and Systems, 2009, 14(3): 193-198.
- [b] Demin Li, Jie Zhou, Jiacun Wang and Peng Yu, Linking Generation Rate based on Gauss-Markov Mobility Model for Mobile Ad Hoc Networks, Wireless Communications and Trusted Computing, 2009, 358-361.

致谢

本硕士论文是在导师周洁副教授的悉心指导下完成的。周老师严谨的治学态度、平易近人的工作作风给了我极大的帮助和教诲。她多年来从事科研工作的亲身体验和科学的研究方法，使我能在逐渐的引导中，学会了如何独立进行科研工作。从周老师那里，我学习到了做研究的方法，一丝不苟的敬业精神，以及豁达开朗的生活态度。在此，表示最衷心的感谢！

同时我还要真诚地感谢李德敏教授和舒慧生教授。两位老师在我攻读硕士期间给予我无私的帮助和真诚的关怀，是我能够顺利完成硕士学业，在此也衷心地感谢他们。当然还有很多人给过我帮助，尽管在此我无法一一列举，我会将他们铭记在心。

我亲爱的父母，敬爱的老师，热心的同学及朋友们，谢谢你们，是你们的关怀、指导、帮助才是我顺利完成我的学术研究！