

Ad Hoc 网络中移动节点相邻概率的模型检测分析^{*})

陈立斌 文 英 董荣胜

(桂林电子科技大学计算机系 桂林 541004)

摘 要 在 Ad Hoc 网络中,两个节点的相邻概率对路由选择和网络性能分析及预测有着重要的作用。本文应用概率模型检测技术,基于城市区域移动模型,将其建模为离散时间马尔可夫链,然后用概率模型检测工具 PRISM 分析了 Ad Hoc 网络中移动节点在不同的拓扑结构中不同时刻、不同有效传输半径时相邻概率的变化情况,从而有助于在移动节点间建立有效路由。

关键词 Ad Hoc 网络,相邻概率,城市区域移动模型,概率模型检测,PRISM

1 引言

Ad Hoc 网络是由一组无线移动且相互协作的节点组成的多跳无线网络,其移动节点包括便携式笔记本、掌上电脑、个人数字助理(PDA)、传感器等。不同于传统网络,它不需任何固定基站,各移动节点本身兼具路由器和客户机两种功能,两个移动节点之间的通信往往借助于若干个其它移动节点转发形成一条多跳(Multi-Hop)路径来完成。它的组建和撤除都很灵活,并有高度自治的特点。自组网在数字化作战系统、抗灾抢险、科考探险等领域有着重要的地位和作用^[1~3]。

在 Ad Hoc 网络的研究中,移动模型中的节点相邻概率是路由协议的一个基本参数。节点运动速度和方向的变化,导致网络拓扑及路由动态变化,影响到节点的相邻概率,从而影响到网络的总体性能。文[4]为此做了假设,所描述的模型实际上是一种城市区域移动模型^[5],构造了离散时间马尔可夫链,并运用数学理论对节点的平稳分布、节点的相邻概率、节点的邻居数、平均泛洪距离等方面进行了分析推理。本文在此基础上,将概率模型检测方法应用于这一移动模型,用概率模型检测工具 PRISM,自动地得出节点在不同情况下的相邻概率。这对于建立与目标节点的有效通信路径和网络性能分析有一定的意义。

概率已经广泛地应用于软件和硬件系统的设计与分析中。概率模型检测是一种验证存在随机行为系统的形式化分析技术。本文使用的概率模型检测工具 PRISM^[6]是由英国伯明翰大学开发。PRISM 支持三种模型:离散时间马尔可夫链(Discrete Time Markov Chains—DTMCs),马尔可夫判定过程(Markov Decision Processes—MDPs),连续时间马尔可夫链(Continuous Time Markov Chains—CT-

MCs)。它对传统的时态逻辑进行了扩充以描述具有概率性质的系统,包括 PCTL(Probabilistic Computational Tree Logic)和 CSL(Continuous Stochastic Logic)。PCTL 用于规约 DTMCs 和 MDPs 的性质,CSL 则用于规约 CTMCs 的性质。

2 离散时间马尔可夫链的分析及其建模

离散时间马尔可夫链(DTMCs)定义了一个状态转移另一个状态的概率,用于建模一个单一概率系统,或者几个以同步方式组合的概率系统。DTMCs 的形式化定义为一个四元组 (S, s_0, P, L) :

- ① S 是一有限状态集合;
- ② $s_0 \in S$ 是初始状态;
- ③ $P: S \times S \rightarrow [0, 1]$ 是转移概率矩阵,对于任意 $s \in S, s' \in S, \sum P(s, s') = 1$;
- ④ $L: S \rightarrow 2^{AP}$ 是标记函数。

转移概率矩阵中 $P(s, s')$ 表示从状态 s 转移到状态 s' 的概率。对于任意 $s \in S, s' \in S$, 有 $\sum P(s, s') = 1$, 即状态转移概率之和为 1。结束状态可以通过增加一个自循环来实现(以概率 1 返回到同一状态的转移)。标记函数 L 将状态从集合 S 映射到原子命题集合 AP 中。

2.1 构造离散时间马尔可夫链

在 ad hoc 网络里,节点会从一个位置移动到另一个位置。如何正确地选择移动模型是系统设计及网络实现中的重要问题。一个合适的模型应当能够模拟现实网络节点的运动情况,速度和方向会在一个合理的时间间隔内发生变化。本文考虑的是一个基于随机方向和速度的城市区域移动模型,为此对 Ad Hoc 网络进行如下假设^[4]:

- (1) 城市(网络)区域为 A , 共有 N 个移动节点均匀分布其中,并独立地自由移动。
- (2) 网络信道是理想的。每个移动节点具有相

^{*}) 广西自然科学基金项目(编号:0542052)的资助。

同的不随时间变化的稳定信号发射功率,信号的衰减仅与距离有关,不考虑随机噪声干扰和障碍物遮挡等非主要因素。

(3)接收的信号强度是可测量的(在技术上能够实现),在测量分辨率之内可以将信号强度分为有限个等级,设为 $a+1$ 个等级,记为 $S=\{0,1,2,\dots,a\}$ 。每个等级对应于同长的一段空间距离。相对于一个节点而言,其它节点位于以 S 中各等级为半径的同心圆上或圆内。

(4)所有移动节点均具有相同的信号传输半径,记为 r ,且 $r \in S$ 。

(5)节点的运动速度是人员-车辆级的,这样能够保证在一定时间内,任何节点间的距离不会超出所研究的网络范围。

根据上述假设,可以将其建模为 $G(V,E)$,其中 V 代表网络中移动节点的集合, $V=\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$; E 代表网络中边的集合, $E=\{e_1, e_2, \dots, e_L\}$, $L=N(N-1)/2$, 记 $Z=\{0, 1, 2, \dots\}$ 为建模的时间序列^[7]。设 $\langle u, v \rangle$ 表示两个不同节点 u 和 v 之间的边, $\langle u, v \rangle$ 在时刻 $t(t \in Z)$ 的距离记为 $d_t(u, v)$ 。无特别指明时, d_t 表示某两个节点在时刻 t 的距离。由假设 3 知 $d_t \in S$ 。

若 v 满足 $d_t(u, v) \leq r$, 则称 v 是 u 在时刻 t 的邻居(或称在 t 时刻, v 与 u 是相邻的)。由假设,邻居(相邻)关系是相互对称的,即 v 是 u 的邻居则 u 一定也是 v 的邻居。在 Ad Hoc 网络中,只有相邻的两个节点才能够进行直接(不相邻的两个节点需要进行多跳路由经中间节点通信)通信。在分析两个移动节点的距离情况时,可以把它看作是相对运动,将其转移为一个节点相对与另一个节点的运动(一个节点可以看作是城市中心,另一节点在城市区域里移动),从而可以得出 t 时间上的相邻概率。

随着时间 t 的推移,由上述假设 5 可知节点 u 和 v 的运动规律: $d_t(u, v)$ 在下一时刻的取值,只与当前时刻的状态有关,而与以前时刻的状态无关;当 $d_t(u, v)=0$ 时,意味着 u 与 v 在同一位置且相对静止,处于最强信号级别区域(0 级区域),其 $d_{t+1}(u, v)$ 即在下一时刻的可能取值是 0 或 1;当 $d_t(u, v)=a$ 时,意味着 u 与 v 距离最远,处于最弱信号级别区域(a 级区域), $d_{t+1}(u, v)$ 的取值可能是 a 或 $a-1$;当 $d_t(u, v)=i(0 < i < a)$ 时, d_{t+1} 的可能取值是 $i-1, i, i+1$ 中的任一个。显然 $\{d_t(u, v) | t \in Z\}$ 构成了一个状态空间为 S 的离散时间有限状态马氏链,简记为 $\{d_t | t \in Z\}$ 。根据假设, $\{d_t | t \in Z\}$ 的转移概率矩阵如下:

$$P = \begin{pmatrix} r_0 & p_0 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ q_1 & r_1 & p_1 & \cdots & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \cdots & q_{a-1} & r_{a-1} & p_{a-1} \\ 0 & \cdots & \cdots & 0 & q_a & r_a \end{pmatrix}$$

其中:

$$\begin{aligned} 0 < q_i < 1 (1 \leq i \leq a), 0 < p_i < 1 (0 \leq i \leq a-1) \\ r_0 + p_0 = 1, q_a + r_a = 1, q_i + r_i + p_i = 1 \\ (0 < i < a) \end{aligned}$$

其概率有限状态机如图 1 所示:

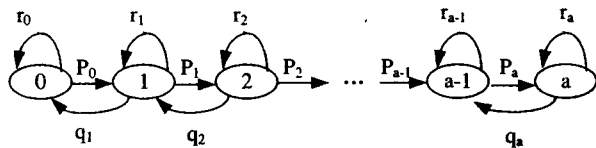


图1 两个移动节点间距离的概率有限状态机

这里的 $0, 1, 2, \dots, a-1, a$ 对应于系统中的一个状态,后面将考虑系统的初始状态。

2.2 计算状态的转移概率

直观上,平面上节点 u 到 v 的距离区域,按信号强度进行分级,形成了一个以 u 为圆心的同心圆环序列,如图 2 所示。

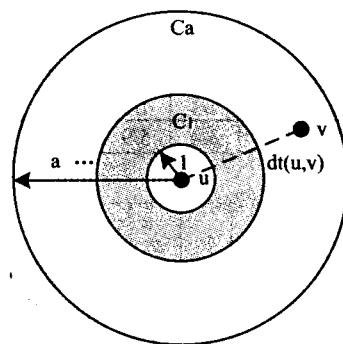


图2 城市移动区域模型

设时刻 t 节点 u 到 v 的距离为 i , 即 $d_t = d_t(u, v) = i$, 由假设 5, $d_{t+1} \in \{i-1, i, i+1\}$ 也就是说 v 在时刻 t 处于圆环 i 上时, 在时刻 $t+1$ 则可能处于 $i-1, i, i+1$ 任一圆环上。因此, 设 C_i 表示圆环 i 的面积(C_0 实际上是内圆), $\{d_t | t \in Z\}$ 的转移概率计算如下:

$$\begin{aligned} r_0 &= P\{d_{t+1}=0 | d_t=0\} = C_0 / (C_0 + C_1) \\ q_0 &= P\{d_{t+1}=1 | d_t=0\} = C_1 / (C_0 + C_1) \\ q_i &= P\{d_{t+1}=i-1 | d_t=i\} = C_{i-1} / (C_0 + C_i + C_{i+1}) \\ r_i &= P\{d_{t+1}=i | d_t=i\} = C_i / (C_{i-1} + C_i + C_{i+1}) \\ p_i &= P\{d_{t+1}=i+1 | d_t=i\} = C_{i+1} / (C_{i-1} + C_i + C_{i+1}) \\ q_a &= P\{d_{t+1}=a-1 | d_t=a\} = C_{a-1} / (C_{a-1} + C_a) \\ r_a &= P\{d_{t+1}=a | d_t=a\} = C_a / (C_{a-1} + C_a) \end{aligned}$$

根据上述公式易得出状态间的转移概率如表 1。

2.3 PRISM 建模

(1)模型表示

PRISM 系统由模块和变量组成。变量包括全局变量和局部变量,用于描述模块的状态,其行为通过命令组成:

[] <guard> -> <command>;

guard 是系统变量的断言,如果 guard 满足,command 就描述为模型能够执行的转移。如果转移是概率的,则表示如下,其中 prob 为概率。

[] <guard> -> <prob> : <command> + ... + <prob> : <command>

本文将这一移动模型建模为 DTMCs。模块的部分代码如下:

```
probabilistic //模型的类型是 DTMCs
const N; //网络中节点的个数
const r; //信号传输半径
const t; //系统的模型检测基于 t 时刻
const k; //系统的初始状态
module duv
    s1:[0...10] init k; //通信信号可测量级,根据
    假设 3, a=10, s1 为状态
```

变量,初始状态为 k

```
t1:[0...100] init 0; //模型检测时间
[] s1=0 -> 1/4:(s1'=0)& (t1'=min(t1+1,
100)) + 3/4:(s1'=1)& (t1'=min(t1+1,
100));
:
[] s1=10 -> 21/40:(s1'=10)& (t1'=min(t1
+1, 100)) + 19/40:(s1'=9)& (t1'=min
(t1+1, 100));
endmodule
```

(2)模型统计

考虑了参数 k、t、r 不同值时,使用 PRISM 对上述模型的运行过程进行了统计见表 2,包括:模型中的状态数和迁移数量、MTBDD 中的节点数量和树叶数量、系统创建的时间、迭代次数。

表 1 状态间的转移概率

状态 概率	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
q_{i-1}	—	1/5	1/9	5/21	7/27	3/11	11/39	13/45	15/51	17/57	19/40
r_i	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3
P_{i+1}	3/4	5/9	7/15	3/7	11/27	13/33	15/39	17/45	19/51	7/19	—

表 2 运行过程统计表

k	r	t	Model		MTBDD		Construction	
			States	Transitions	Nodes	Leaves:	Time	Iters
0	1	5	1056	2976	1307	24	0.328	414
2	1	5	1072	3024	1295	24	0.141	237
4	3	7	1080	3048	1285	24	0.125	421
3	3	10	1077	3039	1293	24	0.141	237
1	1	15	1065	3003	1304	24	0.11	222

3 结果分析

3.1 性质规约

本文使用 DTMCs,其性质规约为 PCTL 类型。PCTL 的语法如下:

$\phi ::= true \mid a \mid \phi \wedge \phi \mid \neg \phi \mid \mu_p[\varphi]$

$\varphi ::= X\phi \mid \phi_u \leq^k \phi \mid \phi_u \phi$

其中 a 是一个原子命题, $\sim \in \{<, \leq, \geq, >\}$ 是关系操作符, $p \in [0, 1]$ 是概率, k 是整数, ϕ 表示一个状态公式, φ 表示一个路径公式。最值得注意的是包括 μ 操作符。如果以 s 开始的路径以 $\sim p$ 的界限满足路径公式 φ , 那么公式 $\mu_p[\varphi]$ 在状态 s 中满足, 也就是说, φ 被满足的概率, 对于所有的非确定性决定, 都符合 $\sim p$ 的范围。PRISM 支持三种类型的路径公式: “next ($X\phi$)”, “bounded until” ($\phi_1 u \leq^k \phi_2$) 和 “until” ($\phi_1 u \phi_2$)。沿着路径 π 的路径公式 φ 满足, 表示成 $\pi \models \varphi$, 定义如下:

(1) $\pi \models X\phi$ 当且仅当在 π 的下一个状态 ϕ 被满足。

(2) $\pi \models \phi_1 u \leq^k \phi_2$ 当且仅当在 π 的首先 k 个状态

之一 ϕ_2 被满足, 并且在所有之前的状态中 ϕ_1 都是被满足的。

(3) $\pi \models \phi_1 u \phi_2$ 当且仅当对于某些 $k \geq 0$, $\pi \models \phi_1 u \leq^k \phi_2$ 。

Until 操作符最常见的一种形式是, $\phi_1 = true$ 时就变为概率可达性。如果状态 s 满足 PCTL 形式 $\mu_p[true u \phi]$, 那么达到满足 ϕ 状态时, 其概率必须符合 $\sim p$ 。相似地, bounded until 操作符定义了 in k 步内的可达性概率。PCTL 的一些典型例子如下:

(1) $\mu_{\geq 1}[true u leader]$ 表示领导者最终以概率 1 的机会被选举。

(2) $\mu_{\leq 0.05}[true u \leq^k leader]$ 表示在 k 步离散时间内, 选举领导者的概率最多为 0.5。

本文所分析的性质是: 在城市区域移动模型中, 两个节点在 t 时刻的相邻概率。性质规约为 $P = ? [true U ((s1 < r) \& (t1 = t))]$ 。

3.2 结果分析

PRISM 分析结果如下。

(下转第 18 页)

开始,此时运行时间为 30ms,此后以运行时间增长最小为目标进行搜索,计算结果如图 2 所示。此时的最优策略是甲完成 A 作业,乙完成 B 作业,丙完成 C 作业,丁完成 D 作业,总运行时间为 280ms。与本文给出的优化算法相比,爬山法给出的是次优解,而最优解与之相比使服务匹配系统性能改善 7.69%。

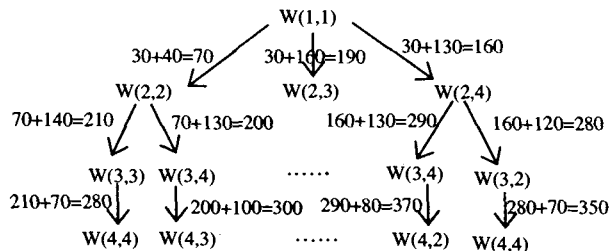


图 2 爬山法的搜索结果

结论 本文通过在网格服务模型中引入代表作业运行时间或运行成本的权函数,给出了网格作业-网格服务匹配的优化解。网格服务管理中的服务匹配问题是个十分复杂的问题,本文的方法在理论上给出了全局最优解,适合用于电子商务和电子政务核心多媒体应用中保证服务质量的预留资源的分配。但是该方法对于系统的动态性考虑仍不足,仍然有缺陷,这是将来进一步的工作。

参考文献

- 1 Foster I, et al. The Grid; Blueprint for a New Computing Infrastructure(2nd Edition). Morgan Kaufmann, 2004
- 2 Czaowski K, Foster I, et al. A resource management architecture for metacomputing systems. In: 4th workshop on Job Scheduling Strategies for Parallel Processing, Springer-Verlag, Heidelberg, 1998. 62~82
- 3 Czaowski K, Foster I, et al. Co-allocation services for computational Grids. In: 8th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1999
- 4 Raman R, Livny M, et al. Matchmaking: distributed resource management for high throughput computing. In: 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1998
- 5 Foster I, Kesselman C, Nick J, et al. Grid services for distributed system integration. IEEE Computer, 2002, 35(6): 37~46
- 6 单志广,戴琼海,林闯,等. Web 请求分配和选择的综合方案与性能分析. 软件学报, 2001, 12(3): 355~36
- 7 曲绍刚,杨广文,林闯,史树明. 基于完成时间的任务分配方案与性能分析. 计算机研究与发展, 2005, 42(8): 1397~1402
- 8 Tierney B, Johnstone W, et al. The NetLogger methodology for high performance distributed systems performance analysis. In: 7th IEEE International Symposium on High Performance Distributed Computing, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1998
- 9 The Open Group. Systems Management; Application Response Measurement; [Technical Standard C807]. Available at: www.opengroup.org/publications/catalog/c807.htm
- 10 杨扬. 离散事件系统理论与柔性制造系统. 冶金工业出版社, 1994. 219~221
- 11 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法. 中国科学技术大学出版社, 2003. 192~199

(上接第 10 页)

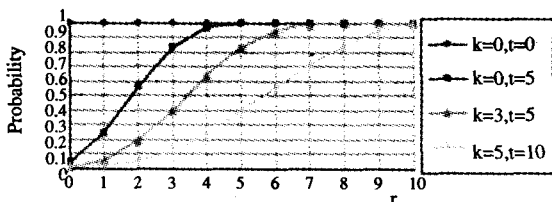


图 3 相邻概率 P 与有效半径 r 的关系 (k, t 不变时)

(1)从图 3 中可以看出,在初始状态 $k=0$ 、运动时刻 $t=0$ 时,两个节点的相邻概率 P 不随有效半径 r 变化,均为 1;其他的情况下, P 随着有效半径 r 的增大而增大。

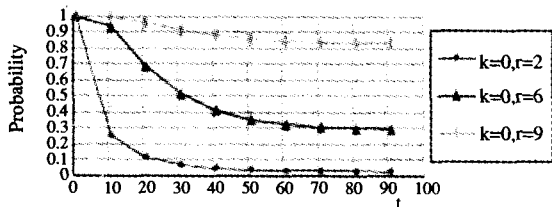


图 4 相邻概率 P 与系统时间 t 的关系 (k, r 不变时)

(2)如图 4 所示,在初始状态 k 和时刻 r 一定时,两个节点的相邻概率 P 随系统时间 t 的增大而减少。

(3)从图 5 中可以看出,在初始状态 r 和时刻 t

一定、初始状态 k 不同时,两个节点的相邻概率 P 随着初始状态 k 的增大而减少。

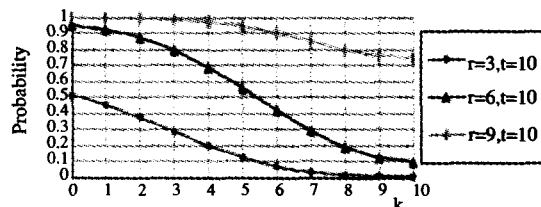


图 5 相邻概率 P 与系统的初始状态 k 的关系 (r, t 不变时)

参考文献

- 1 Royer E M, Toh C K. A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. IEEE Personal Communications, 1999, 6(2): 46~55
- 2 Broch J, Maltz D A, Johnson D B, et al. A Performance Comparison of MultiHop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. In: Proceedings of ACM/IEEE MobiCom'98, 1998. 85~97
- 3 Johnson D B, Maltz D A. Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks. IETF Internet Draft, 1998
- 4 方建超,王汉兴,贾维嘉. ad hoc 网络的离散时间马氏链建模及分析. 计算机工程, 2004, 30(5): 98~101
- 5 Markoulidakis J G, Lyberopoulos G L, Tsirkas D F, et al. Mobility modelling in third generation mobile telecommunication systems[J]. IEEE Personal Communications, August, 1997, 4(3): 41~56
- 6 [Http://www.cs.bham.ac.uk/~dpx/prism](http://www.cs.bham.ac.uk/~dpx/prism)
- 7 Jacquet P, Laouti A. Analysis of Mobile Ad Hoc Network Routing Protocols in Random Graph Models; [Institut National de Recherche en Informatique et en automatique. Rapport de Recherche n°3835]. 1999