

一种基于无线传感器网络的三维定位模型

聂文惠 鞠时光 薛安荣

(江苏大学计算机科学与通讯工程学院 镇江 212013)

摘要 分布式无线传感器网络节点的定位是一个重要而基本的问题,在诸如搜救、目标跟踪、供应链管理、减灾以及智能环境等领域具有重要的应用价值。将节点分布在具体的应用环境中,利用节点构成自组网,不需要特定的通讯设施,就可以感知和传送周围信息。在建筑项目的管理中,材料管理在管理成本中占有很大的比例,通过在建筑材料上安装 RFID,可以比较容易地实时检测它们的位置,甚至可以检测材料的状况。这样在很大程度上提高了生产效率,降低了建筑企业的成本。基于上述原因,提出了一个三维环境下的节点定位模型,并特别地对定位误差进行了分析。该模型已经成功地在建筑项目管理中得到了应用。

关键词 无线传感器网络, 网格, Reader, Tag, 三维定位

中图分类号 TP316 **文献标识码** A

3D Positioning Model and Algorithm Based on Wireless Sensor Networks

NIE Wen-hui JU Shi-guang XUE An-rong

(College of Computer Science & Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract Positioning of distributed wireless sensor nodes is an important and fundamental problem in a wide range of applications, such as search and rescue, target tracking, supply chain management, disaster relief and smart environments. By deployed in physical environments, the nodes are envisioned to form ad hoc communication networks and provide sensed data without special communications infrastructure. In construction project, equipped with RFIDs, the locations of materials and components become of immediate use if such construction resources are to be tracked. Tracking the location of construction resources enables effortless progress monitoring and supports real-time construction state sensing. This greatly improve the productivity and reduce the cost for the construction enterprise. For above reason, we gave a node positioning model in 3 dimensional space and specially discussed it's localization error. This model had successfully used in construction project management.

Keywords Wireless sensor network, Cells, Reader, Tag, 3-dimensional positioning

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, 简称 WSN)经常要求大量的分布式计算。WSN 的节点一般比较简单,依靠自带电池供电,要求最大限度地节约使用能量,延长电池使用时间。对大多数 WSN 应用,采用一定机制或算法实现节点定位很重要^[4]。定位算法要求:1)算法简单,以便最大限度地减少运算量,从而尽可能节约有限的能量。2)模型与实际网络尽量一致,具有实用性。3)便于实现,硬件成本低。4)节点协作性好^[7]。

目前,无线传感器网络节点定位算法主要有 Slobodan N. Simic 和 Shankar Sastry 提出的 Bounding Box 算法^[1]、Niculescu 等人提出的 DV-hop 算法、Euclidean 算法、Robust position 算法等^[3]。这 4 种算法的共同特点是全部基于二维空

间。第一种采用平面网格划分方法,简化 Reader 的有效作用域,利用矩形之间的关系,算法仅涉及到较简单的线性运算,具有运算简单、能耗低的优点,但是定位精度对锚节点的数量依赖较强,需要根据被识别对象的尺寸大小,要求具有足够的锚节点数量,否则定位精度较低。在实际应用中,设置较多的锚节点可能造成成本较大的增加。后 3 种算法则利用未知节点到锚节点之间网络平均每跳距离和两者之间跳数间的关系对未知节点定位,优点是定位精度较高,硬件成本可能相对较低;由于都要用到最小二乘法求解,运算相对复杂,能耗较高。另外,张令文等提出的混合优化算法 HOA^[8],将泰勒级数展开算法和最速下降法有机结合,具有一定的精确性和顽健性,收敛速率快,计算量小,但是也涉及到较复杂的非线性运算。倪巍等提出了一种利用测量到的用户之间的接收功率实现定位及跟踪的算法^[6],该算法具有一定的独特性。

到稿日期:2009-05-06 返修日期:2009-08-14 本文受国家自然科学基金(60773049),江苏省中小企业技术创新基金(BC2008140),镇江市科技计划项目(GY2008030)“基于无线传感器网络的建筑工地信息管理系统”资助。

聂文惠(1968-),男,硕士,讲师,主要研究方向为 MIS、软件体系结构、传感器网络,E-mail:whnie@ujs.edu.cn;鞠时光(1955-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为安全数据库、数据挖掘、传感器网络等;薛安荣(1964-),男,博士,副教授,主要研究方向为数据库和数据挖掘。

Simic 和 Sastry 提出的在无线 Ad Hoc 网中的分布式定位模型(以下简称分布式定位模型),具有算法简单、运算量小的特点,非常适合无线传感器网络对运算量和节能方面的要求。Song Jongchul 等人利用该模型和算法在建筑项目的材料管理中得到成功应用^[2]。但该模型的局限性在于,它是建立在二维基础上的,而真实的无传感器网络的信号是分布在三维空间上的。例如对于红外、雷达、RFID 等有源信号,它们的信号辐射范围显然呈现三维状态分布,即通讯有效范围分布在三维空间中,所以建立三维模型更接近实际。

2 3D-PMWSN 模型简介

在空间建立三维直角坐标系,把该坐标系下的一个研究空间进行量化。所有的研究对象都分布在这个研究空间中。研究对象主要有两种:被定位对象和探测设备(Reader)。被定位对象在一定范围内可以感应到检测设备发出的信号。为了研究方便,对被定位对象和探测设备进行简化,不考虑自身大小,只考虑物理性能。利用多个探测设备对同一个被定位对象感应的空间性质就可以实现定位。

下面介绍模型框架、用到的术语以及定义的符号。

首先,选取边长为 s 的正方体 Q (如图 1 所示),下面所有的研究都在 Q 中进行。通过把 Q 的每个边 n 等分,从而把整个 Q 分为 n^3 个小正方体。每个小正方体称为一个 cell(网格),作为将来节点定位的最小单位。定义 n^3 为 Q 的分辨率。按照图 1 所示方式对分割后的 Q 进行空间位置标识,每个 cell 都有自己的唯一坐标——网格坐标 (x, y, z) , $(1 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq n, 1 \leq z \leq n)$ 。分布在空间 Q 中的研究对象占据至少 1 个 cell 的空间大小,研究对象的位置可以通过 cell 的坐标进行描述。

现在在 Q 中放置 m 个位置已知的 Reader,假设每个 Reader 可以发出覆盖范围半径为 r 、分布在球形空间的信号,不同 Reader 具有不同的网格坐标,还假设这里的网格坐标可以预先得知。同时,把需要定位的物体看成是一个 Tag, Tag 只要位于某个 Reader 发射的信号的有效覆盖范围内,就可以被该 Reader 感知,即该 Tag 被该 Reader 捕获。现在的目的是要通过若干个位置已知的 Reader 来确定在 Q 中的位置未知的物体 Tag 的坐标。一般情况下,某个 Tag 可能被多个 Reader 捕获,即该 Tag 应该位于这些 Reader 的有效信号覆盖空间的交集中,通过运算这些 Reader 的信号的空间覆盖范围的交集,便可以得到该 Tag 所在的区域。如果要对 Q 内任意位置的 Tag 进行定位,只要在 Q 中的适当位置安置适当数量的 Reader 即可。分辨率的选择主要依据被定位对象的最小尺寸。Reader 位置和数量的选择可以决定定位的精度(显然,分辨率的最佳值是 1 个 cell)。

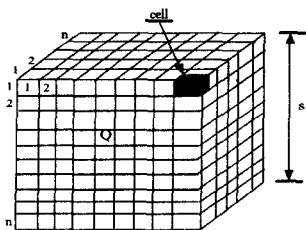


图 1 3D-PMWSN 模型

以下是对该模型中几个定义符号的说明。

Q :操作空间(space of operations): $Q=[0, s] \times [0, s] \times [0, s]$,是边长为 s 的一个正方体区域,所有研究都在该三维空间区域内进行。

s :表示 Q 的边长。

n :把 Q 的每边 n 等分,从而把 Q 分为 n^3 个小正方形,被称为 n^3 个 cells。每个 cell 的网格坐标为 (x, y, z) ($1 \leq x \leq n, 1 \leq y \leq n, 1 \leq z \leq n$),是定位的最小量化单位,这样就使 Q 离散化。

N :表示在 Q 中的节点数。假设每个节点(node)都对应一个 cell,即一个节点对应一个唯一的网格坐标。 N 个节点又分为位置已知节点(known node)和位置未知节点(unknown node)。位置已知节点放置的是 Reader,位置未知节点放置的是 Tag。在实际应用环境中,已知位置的节点可以通过预先测定好特定位置的坐标,然后在该位置放置固定的 Reader 实现,也可以利用带 GPS 功能的 Reader 实现。这样,Reader 即使在移动中,也可以知道自己的位置。通过多个 Reader 对在 Q 中同一个 Tag 的同时感应,利用它们射频有效覆盖范围的运算关系,就可以实现对 Tag 的定位。

G :表示每个 Reader 的 RF 的信号有效覆盖区域,可以近似地视为半径为 r 的球 G 。因为每个 Reader 的有效 RF 覆盖范围可以近似地看成是一个半径为 r 的球体,那么分布在 G 内的所有 Tag 都可以被该 Reader 感应到。

S :表示球 G 的最大内包正方体,定义为 Reader 的通讯范围(communication range)。选取 S 作为通讯范围,而不直接选取球 G 作为通讯范围,目的是为了简化计算(从下面的运算可知:正方体之间的运算要比球体之间的运算简单得多),节约运算开销,符合无线传感器网络对节能方面的特殊要求。

3 3D-PMWSN 定位算法

针对上面定义的模型,再做如下假设:(1)操作空间 Q 确定不变,即 Q 的边长 s 是常数; Q 的网格分割方式确定,即 n 确定; Q 中每个 Reader 的信号有效覆盖区域 G 完全一样,即 G 的半径 r 确定,这样 Reader 的通讯范围 S 确定。在 Q 中安放若干个网格坐标已知的 Reader 和随机分布着若干个位置待定的 Tag。那么,每个 cell 的大小可以计算出来,Reader 的通讯范围 S 可以用 cell 的数量表示。如果某个 Tag 可以同时被两个 Reader 检测到,那么该 Tag 的位置就应该在两个 Reader 的通讯范围交集中,交集的大小和位置可以计算出来。同样地,若某个 Tag 能够同时被多个 Reader“捕获”,那么多个 Reader 的通讯范围有交集,交集的大小和位置也可以计算出来,从而实现 Tag 的定位。具体方法如下。

3.1 Reader 的通讯范围及多个 Reader 的空间表示

首先分析 Reader 的信号的空间性质(如图 2 所示)。在 n, r, s 确定的情况下,令最大内包正方体 S 的边长为 $2x$,显然 $3x^2 = r^2$,可以得到:

$$\rho = \left\lceil \frac{nr}{\sqrt{3}s} \right\rceil \quad (1)$$

说明: $\lceil x \rceil$ 表示对 x 取整, ρ 的单位是 cell 的个数。

从而最大内包正方体 S 的边长为 $2\rho + 1$ 个 cells。

显然, S 包含 $(2\rho + 1)^3$ 个 cells。

这说明 Reader 的通讯范围可以简化为由若干个 cell 表

示。

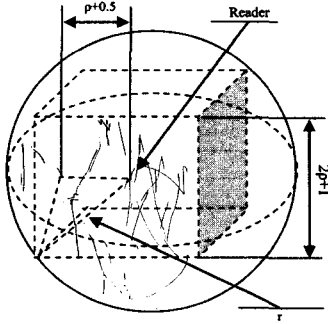


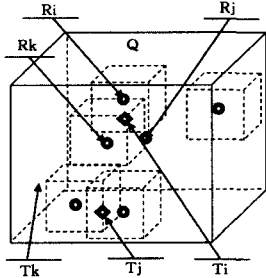
图2 3D-PMWSN模型中一个Reader的通讯范围

下面讨论在 Q 中Reader和Tag的关系。

假设前述 N 个节点中位置已知节点(known node)共 k 个,分别用 R_1, R_2, \dots, R_k 标记。每个节点处放置一个“同类型”的Reader,它们的通讯范围用 S_1, S_2, \dots, S_k 标记。每个节点的网格坐标表示为:

$$(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), \dots, (x_k, y_k, z_k) \\ (1 \leq x_i \leq n, 1 \leq y_i \leq n, 1 \leq z_i \leq n)$$

在图3中, R_i, R_j, R_k 是分布在 Q 中的3个Reader(图中还有两个Reader未做标记), T_i, T_j, T_k 是随机分布在 Q 中的3个Tag。其中, T_i 能够同时被 R_i, R_j, R_k 检测到。



(O表示位置已知的Reader,◇表示位置未知的Tag,边为虚线的正方体分别表示所在Reader的通讯范围)

图3 3D-PMWSN模型中Reader和Tag的空间关系

现在来定义每个Reader的通讯范围。

对于整数 a, b, c, d, e, f ,满足 $1 \leq a < b \leq n, 1 \leq c < d \leq n, 1 \leq e < f \leq n$ 。 $[a, b] \times [c, d] \times [e, f]$ 表示 Q 中的一个立方体区域,它包含若干个网格的集合,每个网格的坐标设为 (x, y, z) ,且满足以下条件:

$$a \leq x \leq b, c \leq y \leq d, e \leq z \leq f$$

显然,对 R_i ,它的通讯范围 S_i 可以表示为:

$$S_i = [x_i - \rho, x_i + \rho] \times [y_i - \rho, y_i + \rho] \times [z_i - \rho, z_i + \rho] \quad (2)$$

3.2 两个Reader的通讯范围交集的计算

下面计算图3中通讯范围交集不为空的两个Reader的交集。

如果 R_m 和 R_n 是 R_1, R_2, \dots, R_k 中的两个Reader, $m, n \in (1, 2, \dots, k)$,它们的网格坐标分别为 $(x_m, y_m, z_m), (x_n, y_n, z_n)$,如果它们的通讯范围的交集不为空,可以求出该交集 T (如图4所示)。

令

$$T = Q \cap S_m \cap S_n = [\max(x_m, x_n) - \rho, \min(x_m, x_n) + \rho] \times \\ [\max(y_m, y_n) - \rho, \min(y_m, y_n) + \rho] \times [\max(z_m, z_n) - \rho, \min(z_m, z_n) + \rho] \quad (3)$$

其中, $\max(x_m, x_n)$ 表示 R_m 和 R_n 的网格坐标 x_m 和 x_n 中较

大的一个。 $\min(x_m, x_n)$ 表示 R_m 和 R_n 的网格坐标 x_m 和 x_n 中较小的一个。 $\max(y_m, y_n), \min(y_m, y_n), \max(z_m, z_n), \min(z_m, z_n)$ 具有相同意义。

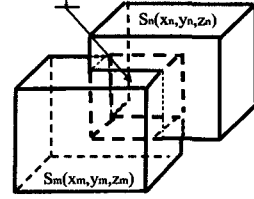


图4 3D-PMWSN模型中两个Reader的通讯范围 S_1 和 S_2 的交集

由式(3)可以看出,如果某个Tag能够同时被 R_m 和 R_n 两个Reader所“捕获”,那么它应该位于它们的交集 T 空间内,这样Tag在 Q 中的位置范围得到确认。在 Q 中放置适当数量的Tag,能“捕获”到该Tag的Reader会增多,计算出的Tag的位置会越来越精确。有关多个Reader通讯范围交集的计算在下节给出具体的公式。显然,这种定位算法只需要简单的加减和比较运算,对传感器网络的分布式处理特别适合。

3.3 多个Reader的通讯范围交集的计算

现在考虑某个Tag能够同时被其相邻的多个Reader“捕获”的情况。

假设某个Tag T_i 能够被 R_1, R_2, \dots, R_k 共 k 个Reader同时感应到,则此Tag应该在 R_1, R_2, \dots, R_k 的通讯范围的交集中(如图3所示)。

令

$$T = Q \cap \bigcap_{i=1}^k S_i$$

则显然有:

$$T = Q \cap \bigcap_{i=1}^k S_i = Q \cap [x_+ - \rho, x_- + \rho] \times [y_+ - \rho, y_- + \rho] \times [z_+ - \rho, z_- + \rho] \quad (4)$$

其中, $x_+ = \max(x_1, \dots, x_m), x_- = \min(x_1, \dots, x_m), y_+ = \max(y_1, \dots, y_m), y_- = \min(y_1, \dots, y_m), z_+ = \max(z_1, \dots, z_m), z_- = \min(z_1, \dots, z_m)$ 。

从式(4)看出,只要知道 k 个Reader的网格坐标,在 Q 和Reader性能确定的情况下,通过简单的加减运算就可以计算出Tag的空间位置范围。而且,随着 n 的增大及Reader数量和位置的合理设置,定位的精度将越来越高。

4 定位算法误差分析

由于模型对Reader的通讯范围进行了简化,定位算法又是在简化的通讯范围内进行,这样必然存在误差。现在对误差进行分析。

首先以图5为例。假如某个Tag同时被Reader R_1 和 R_2 感应到,假设 R_1 和 R_2 两个圆的 G_1 和 G_2 的方程分别为:

$$G_1: x^2 + y^2 = 3^2, G_2: (x-3)^2 + y^2 = 3^2$$

现在计算简化算法的误差概率。

Tag的位置位于 R_1 和 R_2 对应的 G_1 和 G_2 的交集 Ω 中。

取 Ω 为样本空间, $\Omega = \{(x, y) \in G_1 \text{ 和 } G_2\}$,显然有:

$$\Omega = \int_{-\frac{3\sqrt{3}}{2}}^{\frac{3\sqrt{3}}{2}} dy \int_{3-\sqrt{9-y^2}}^{\sqrt{9-y^2}} dx \quad (5)$$

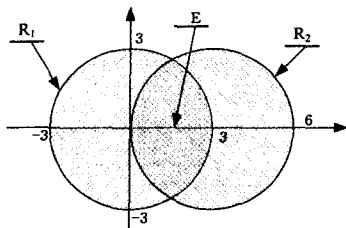


图5 两个 Reader 实际交集

而在本算法中对 S_1 和 S_2 进行了简化,如图 6 所示,即 Tag 必须位于简化后的交集 E 中。出错事件 M 可以定义为落在图 5 中的 Ω 内,并且落在图 6 中的 E 外的事件。

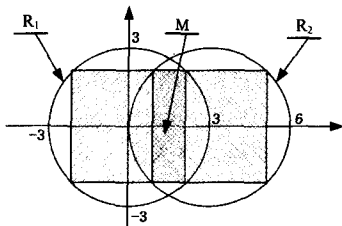


图6 简化条件下两个 Reader 实际交集

$$M = \{(x, y), (x, y) \in \Omega, \text{且} (x, y) \notin E\} \quad (6)$$

$$p(M) = \frac{\Omega - E}{\Omega} \quad (7)$$

按照上面给出的方程, $p(M)$ 的值大约是 17.3%。

5 仿真实验与结果分析

对于 Q , 在 s, n, r 确定的情况下, 假设位置已知的 Reader 的数量为 k , 并取初值为 4, 它们的网格坐标已经确定(随机给出, 但要保证两两之间的交集不为空, 假设所有 Reader 都能感应到被定位的 Tag), 求出它们的交集(是网格数量)。然后 k 的值每次增加 1, 即每次增加两个 Reader, 同样要保证新增加的每个 Reader 和原来的 Reader 两两之间的交集不为空, 每次都记录新的交集, 共做 $k-1$ 次(从 2 个开始)。结果如下:

方案 1 选取 $s=10000, n=5000, r=100$, 由式(1)知 $\rho=28$, 仿真实验中取 $k=10$, 这 10 个已知位置的 Reader 的网格坐标分别选取为:

$R_1(1305, 1505, 1805), R_2(1310, 1510, 1810)$

$R_3(1315, 1515, 1815), R_4(1320, 1520, 1820)$

$R_5(1325, 1525, 1825), R_6(1330, 1530, 1830)$

$R_7(1335, 1535, 1835), R_8(1340, 1540, 1840)$

$R_9(1345, 1525, 1825), R_{10}(1350, 1530, 1830)$

先取 R_1 和 R_2 两个 Reader 求交集 T , 即两个 Reader 可以同时感应到被定位对象 Tag, 交集就是 Tag 的位置范围。然后依次增加 Reader, 每次增加 1 个, 同时求出分别对应的 T , 实验结果如表 1 所列。

表 1 方案 1 仿真结果(T 的单位是万个 cells)

k	2	3	4	5	6	7	8	9
T	6.8	4.7	3.0	1.8	0.9	0.4	0.1	0.02

方案 2 选取 $s=10000, n=2000, r=100$, 显然 $\rho=12$ (除 cell 变大, 其它条件同方案 1)

仿真实验中取 $k=10$, 这 10 个已知位置的 Reader 的网格坐标分别同方案 1。

先取 R_1 和 R_2 两个 Reader 求交集 T , 即两个 Reader 可以同时感应到被定位对象 Tag, 交集就是 Tag 的位置范围。然后依次增加 Reader, 每次增加 1 个, 同时求出分别对应的 T 。

实验结果如表 2 所列。

表 2 方案 2 仿真结果(T 的单位是万个 cells)

k	2	3	4	5
T	0.69	0.27	0.073	0.0027

结果分析: 对于方案 1, 从表 1 仿真实验结果可以看出, 随着 k 的增加, T 呈几何倍数关系递减, 定位精度逐渐提高, 即利用该算法进行定位, k 的数量不一定很多, 只要位置放置合理, 就可以进行比较精确的定位。结果体现了算法的可行性和合理性^[2]。

同时, 在仿真实验结果中, 虽然随着 k 的增大, T 越来越小, 即定位精度逐渐提高, 但是有时局部的变化趋势不明显。分析认为, 这与 Reader 之间的相对位置有关系。

对于方案 2, 定位收敛速度相对方案 1 快, 最多需要 5 个 Reader 就可以实现精确定位, 主要原因是网格颗粒变大了。图 7 是两种方案的对比。

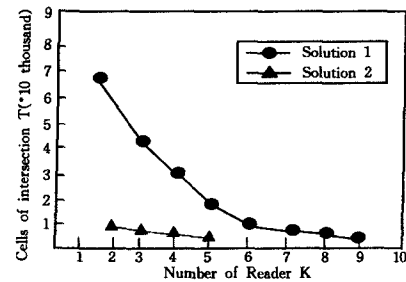


图7 两种方案的对比

结束语 3D-PMWSN 模型具有结构简单、运算容易的特点, 能适应无线传感器网络分布式处理的要求, 能实现三维空间下的定位。仿真实验表明, 3D-PMWSN 具有网络结构比较简单、定位速度比较快、运算比较简单的特点, 在仓储、超市、建筑工程管理、敬老院、动物跟踪等方面具有较大的应用价值^[4]。

由于目前尚未发现基于这种模型的应用, 针对该模型还要进行详尽的分析和实验, 找到可行的误差应对方法。这些都需要继续研究, 以达到更好的定位效果。

参考文献

- [1] Simic S N, Sastry S. Distributed Localization in Wireless Ad Hoc Networks[R]. Technical Report UCB/ERL M02/26. Berkeley CA: Department of Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, 2002
- [2] Song Jongchul. Tracking the location of materials on construction projects[D]. The University of Texas at Austin, 2005
- [3] Wang Fu-bao, Si Long, Ren Feng-Yuan. Self-Localization Systems and Algorithms for Wireless Sensor Networks[J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868
- [4] Ren F Y, Huang H N, Lin C. Wireless sensor networks[J]. Journal of Software, 2003, 14(7): 1282-1291
- [5] Ni Wei, Wang Zong-xin. An adaptive multi-user Location and tracking algorithm for indoor wireless network[J]. Journal of Communications, 2005, 26(1): 66-73
- [6] Wei Xing, Wan Jian-wei, Kan Huangfu. New technique in single

(上接第 25 页)

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^N m_i}{2^N} \quad (5)$$

如图 4 所示,横坐标为 Peer 的失效率,纵坐标为系统中所有节点均获免疫的比率,设定 $N=20$ 。可以明显地看出,ET+树的稳定性与传统指数树相比明显增强。例如在失效节点比率达到 5%的情况下,指数树中节点的免疫成功比率为 60.27%,而在 ET+树中免疫成功比率达到 97.53%;在失效节点比率达到 10%的情况下,指数树中节点的免疫成功比率仅为 35.85%,而在 ET+树中免疫成功比率达到 90.46%。原因是在传统指数树中的节点要想成功获得免疫的前提是其所有的前驱节点都不能失效,其中任何一个节点失效都会导致其所有的后继节点无法获得免疫;而在 ET+树,只有当节点及其备份节点都失效时,其后继节点才会无法获得免疫,这样的概率将低得多。

另外,随着节点数的增多,即阶数的增加,可以发现在相同失效节点比率的情况下,ET+树的稳定性与传统指数树相比也明显增强,如图 5 所示,在失效节点比率为 20%的情况下,在阶数为 6 时,指数树中节点的免疫成功比率为 53.14%,而在 ET+树中免疫成功比率达到 88.58%;在阶数为 20 时,指数树中节点的免疫成功比率迅速下降为 12.16%,而在 ET+树中免疫成功比率仍然达到 66.76%。

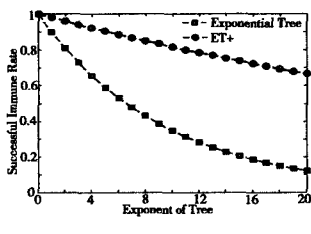
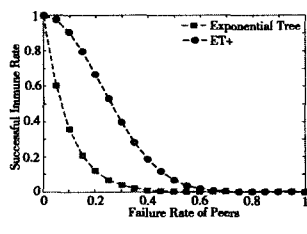


图 4 ET+树与传统指数树的稳定性在不同失效率下的对比

图 5 ET+树与传统指数树的稳定性在不同阶数下的对比

此外,在相同节点数的情况下,设指数树为 K 阶,则节点数为 2^K ;设 ET+树为 N 阶,即 $2^{N+1} - 2^{N-1} - 1 = 2^K$,则 ET+树的阶数 N 为:

$$N = \log_2 \left(\frac{2^{K+1} + 2}{3} \right) \quad (6)$$

则在相同节点数的情况下 VTA 在 ET+树中的迁移步数比指数树要少。

结束语 P2P 网络系统中的恶意代码问题已经得到了广泛的关注,然而传统的针对网络病毒的防御手段没有从体系结构的高度来解决该问题,因此难以有效控制恶意代码传播及对网络和节点的破坏。本文所介绍的基于多移动 Agent 的 P2P 网络主动免疫模型正是面向这种需要提出的。为了更为有效地防御 P2P 环境中的恶意代码,还有以下的一些问题需要进一步深入研究。

(1)由于 P2P 系统中的节点的资源价值和重要程度以及

连接度存在差异,因此以何种免疫策略来对节点进行更具针对性的免疫是影响系统整体免疫效果的关键,而现有的随机免疫(Random Immunization)^[3]、熟人免疫(Acquaintance Immunization)^[13]、目标免疫(Targeted Immunization)^[14]和偏好目标免疫(Preferential Targeted Immunization)^[15]等策略都存在着一一些问题。

(2)P2P 环境中恶意代码多种多样,对病毒、蠕虫、木马的具体传播模型还需要进一步研究,才能设计出更为完善、实用性强的防御系统。

(3)利用移动 Agent 技术构造的恶意代码探测 Agent 和疫苗承载 Agent 需要异地执行,其本身的安全性如何保障,存在的来自恶意节点、传输链路等的攻击如何进行防御也是需要进一步探讨的。

参 考 文 献

[1] Kannan J. Implications of peer-to-peer networks on worm attacks and defenses[R]. CS29424 Project. California, 2003

[2] 黄新力. 基于复杂网络理论的对等计算系统关键技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2006

[3] Anderson R, May R M. Infectious Diseases in Humans[M]. Oxford: Oxford University Press, 1992

[4] Hethcote H. The mathematics of infectious diseases[J]. SIAM Review, 2000, 42: 599-653

[5] Moreno Y, Pastor - Satorras R, Vespignani A. Epidemic outbreaks in complex heterogeneous networks[J]. Eur. Phys. J. B, 2002, 26: 521-529

[6] FIPA. FIPA abstract architecture specification[OL]. 2002. <http://www.fipa.org/specs/fipa00001/SC00001L.html>

[7] 史忠植. 智能主体及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000

[8] Wooldridge M. An introduction to multi - agent systems [M]. Chichester, England: John Wiley & Sons, 2002

[9] Gray R, Cybenko G. D'Agents: applications and performance of a mobile-agent system[J]. Software-Practice and Experience, 2002, 32 (6): 543-573

[10] 张云勇, 刘锦德. 移动 agent 技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003

[11] 于善谦, 王洪海, 朱乃硕, 等. 免疫学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999

[12] 王佰玲. 基于良性蠕虫的网络蠕虫主动遏制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006

[13] Pastor-Satorras R, Vespignani A. Immunization of complex networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 65

[14] Dezsó Z, Barabási A. Halting viruses in scale-free networks[J]. Phys. Rev. E, 2002, 65

[15] Cohen R, Havlin S. Efficient Immunization Strategies for Computer Networks and Populations[J]. Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 247-901