

文章编号:1001-9081(2007)08-1835-04

一种无信标无线传感器网络中的目标定位策略

蔡志强^{1,2}, 谷雨¹, 胡燊^{1,2}, 许胤龙^{1,2}

(1. 中国科学技术大学 计算机科学与技术系, 合肥 230027;

2. 国家高性能计算中心, 合肥 230027)

(caizhq@mail.ustc.edu.cn)

摘 要: 无信标无线传感器网络的传感器节点通常是按照一定的概率, 以分组形式部署, 为实现其定位和动态节点跟踪, 提出了的无信标定位发现策略, 在已有的部署之上, 建立模型去反映目标位置和监测传感器探测信息之间的内在关系, 同时还建立了预测模型来对目标移动方式进行推断。利用贝叶斯理论构造了一个条件概率分布, 将以上两种模型相关参数归并起来, 并在这个分布上应用最大似然估计 (MLE) 方法来估测目标的位置。实验结果表明此目标定位策略取得了较好的效果。

关键词: 系统设计; 预测模型; 贝叶斯理论; 最大似然估计

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Target localization scheme for cluster-based beaconless WSN

CAI Zhi-qiang^{1,2}, GU Yu¹, HU Yu-chong^{1,2}, XU Yin-long^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China;

2. National High Performance Computing Center, Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: A beacon-less location discovery scheme was proposed due to the following observations: sensors are usually deployed in groups and sensors from the same group may land in different locations that follow a probability distribution. With this prior deployment knowledge, a model was built to reflect inherence information between positions of the object and observations provided by alert sensors. Also a prediction model was set up to offer prior knowledge about moving patterns of the object. Generally speaking, the Bayes rule provides us a suitable way to combine those two kinds of knowledge so as to generate a conditional distribution. By applying the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method to this distribution, the object's accurate positions could be estimated. Experimental results prove that the scheme can get better effect.

Key words: system design; prediction model; Bayes rule; Maximum Likelihood Estimation (MLE)

0 引言

许多传感器网络需要处理在环境监测^[1]和入侵跟踪^[2]中的物理实体的移动, 目前已提出了各种目标定位策略^[3-9], 分别是基于到达时间差 (Time Difference Of Arrival, TDOA), 到达方向 (Direction Of Arrival, DOA) 以及三角测量算法^[10]等。这些方法主要考虑在跟踪过程中减少能量消耗或提高定位精确性。它们使用的传感器节点几乎都是“已知”和“固定”空间部署, 但这些假设在实际中的许多特定条件下是不能使用的。

在无信标无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 中没有传感器位置的信息, 整个网络的传感器节点部署通常按分组形式分布在不同区域, 而同一分组的传感器大抵按照一定概率分布。基于此我们建立了模型来反映目标位置和监测传感器探测信息之间的内在联系。同时建立一个预测模型来提供目标移动方式的已有知识。Bayes 理论提供了一个合适的方法来结合这两种模型的相关参数, 以便产生一个条件概率分布。通过应用最大似然估计 (Maximum Likelihood Estimation, MLE) 方法来计算这个分布, 可以估计目标的精确位置。最后通过实验设计操作和评估了这个策略。

1 相关研究

近些年来, 由于在 WSN 中跟踪问题的重要性, 许多文章都提出了各种各样的定位和跟踪方法。文献[3]在基于集中簇的无线网络提出了节能目标侦测和定位策略。文献[4]中讨论了协作目标侦测的传感器部署, 其中路径发现被用作评测传感器部署的有效性。文献[5]则重点关注感知位置的数据路由对系统资源 (例如能量和带宽) 的影响。

文献[11]考虑了在 Ad hoc 网络中节点定位问题, 提出了一个不依赖于全球定位系统 (GPS) 的分布式定位算法, 它利用了节点之间的距离, 在二维空间中进行计算。本文也使用了这个策略, 在无信标 WSN 中建立一个局部坐标系。

文献[12]是基于分组部署的模型, 它介绍了怎么在目标位置和探测传感器节点信息之间建立一个概率分布。本文重点利用这个模型和结论, 并在不同方面对其进行改进。

2 问题描述

使用文献[12]所提出的假设和部署方式来定义跟踪问题。首先定义部署点即为定位点, 但它不是这个传感器节点的实际位置。传感器节点以一定的概率分布在这个点的周围。

收稿日期: 2007-02-07。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60241004); 国家 973 计划资助项目 (2003CB314801)。

作者简介: 蔡志强 (1975-), 男, 山西阳泉人, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向: 无线网络协议和算法; 谷雨 (1985-), 男, 安徽巢湖人, 博士研究生, 主要研究方向: 无线网络协议及性能分析; 胡燊 (1983-), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向: 网络路由算法和协议; 许胤龙 (1963-), 男, 安徽庐江人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 并行算法、网络编码、网络路由算法和协议。

2.1 基于分组部署的模型

假设所有的传感器节点在部署结束后都保持固定。为了简化讨论,本文给出两个重要的定义如下:

定义 1 部署点。部署点是一个传感器将要部署的位置,它不是这个传感器最后所在的位置。

定义 2 常驻点。这是传感器最后所在的位置。

本文按如下部署知识建模(见图 1):

1) N 个传感器分成 n 个大小相同的分组,每个分组里有 $m = N/n$ 个传感器。因此每个分组 $G_i (i = 1, 2, \dots, n)$,按部署点进行部署,令 (x_i, y_i) 表示 i 的坐标。

2) 部署点的位置是预先确定的,它们的坐标存储在每个传感器的内存里。

3) 在部署过程中,分组 G_i 中的节点 k 的常驻点按照概率分布函数(Probability Distribution Function, PDF) $f(x - x_i, y - y_i)$ 进行分布,例如:PDF 是一个二维的高斯分布。

由于一些原因,我们的模型在无线传感器网络中是无信标或者没有工作信标的,例如,它们部署在敌方范围内,信标在部署期间由于干扰或被破坏而不能精确工作,也就意味着所有传感器节点不能确定它们的位置信息。假设刚好部署完成后,每个传感器执行一个分布式的簇头选举算法,选举出它们自己所在分组的簇头。然后所有节点保持警惕,当一些传感器侦测到入侵时,它们仅和自己的簇头进行通信。

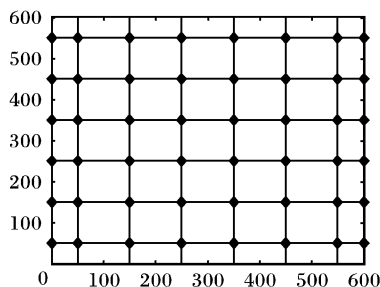


图 1 基于分组部署的例子(每个实点表示一个部署点)

2.2 问题提出

在上述假设和描述前提下,跟踪问题转变为怎样通过部署信息和传感器的观察来定位一个目标,同时让传感器节点要尽量减少能量消耗。没有全局坐标信息,可以通过文献[11]中提出的方法建立一个局部的坐标系,它可以相对简单地计算出目标的局部坐标。为了将这些局部位置信息转变为全局信息,将抽象这个问题为一个统计模型,本文使用贝叶斯理论来处理。

3 基于局部策略的贝叶斯统计理论

3.1 贝叶斯理论

贝叶斯理论是一个用来计算条件概率的数学公式。它在主观判断或贝叶斯定理的方法中有显著的表现,可用于认识论、统计学和归纳逻辑。

给定贝叶斯规则的详细定义如下:给定 θ 和 ε ,及它们的联合概率函数 $f(\varepsilon, \theta)$ 和边缘概率函数 $\pi(\theta)$,贝叶斯定理中表示了找到条件概率函数 $f(\theta | \varepsilon)$ 的基本方法:

$$f(\theta | \varepsilon) = \frac{f(\varepsilon | \theta) \pi(\theta)}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(\varepsilon | \theta) \pi(\theta) d\theta} \quad (1)$$

贝叶斯定理的应用通常按照如下四个步骤进行:

1) 为了估计未知参数 θ ,先把它当作随机变量。假设现在

θ 已经给定,因此用联合概率函数 $f(\theta, \varepsilon)$ 作为条件概率函数 $f(\varepsilon | \theta)$ 是合适的。

2) 找到一个适当的先验分布函数 $\pi(\theta)$ 。

3) 得用式(1) 计算 $f(\theta | \varepsilon)$ 。

4) 用不同的方法估计 θ ,如 MLE 方法。

通常来说,在一个基于簇的无线信标 WSN 中跟踪一个动态目标的问题,可以归类为传统的贝叶斯问题,其中未知目标的位置使用参数 $\theta(x, y)$ 表示,然后问题转化为:如何通过部署知识和可以侦测到目标各传感器所得到的信息,来得到一个可靠的先验分布 $\pi(\theta)$ 和 ε 。

3.2 一个应用可靠先验分布的预测模型

我们为可靠的先验分布创建了一个预测模型,该模型的关键作用在于它给基站(Base Station, BS)提供了这样的信息:目标下一时刻可能会出现范围,然后就可以被用来进行先验分布的计算。文献[13]也提出了一个预测方法,但是它缺乏实际考虑和详细的数学定义。为了预测目标在时间 i 的位置,将使用先验位置信息来进行目标跟踪,这在实际环境中是一个连续的过程。

定义 3 目标跟踪。用 \vec{I} 来表示,定义如下:

$$\vec{I} = (I_0(x_0, y_0), \dots, I_i(x_i, y_i), \dots)$$

$I_i(x_i, y_i) (i \geq 0)$ 表示目标在时刻 i 的位置。

假设目标跟踪时间从 0 到 $i-1$: $\vec{I} = (I_0(x_0, y_0), \dots, I_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}))$,按照二维高斯分布模拟目标在时间 $i (i \geq 1)$ 的位置,它在预测点 (x_{pre-i}, y_{pre-i}) 的中心。也就是高斯分布中值 μ 等于 (x_{pre-i}, y_{pre-i}) ,目标位置在时刻 i 的概率分布函数如下:

$$\pi(\theta) = f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_{pre-i})^2 + (y-y_{pre-i})^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中 σ 是标准方差。不失一般性,假设对于所有概率分布函数的标准方差是相同的。

预测点 (x_{pre-i}, y_{pre-i}) 表示目标在时刻 i 的最大可能位置,它依赖于目标跟踪的先验信息。这里按照实际情况的不同应用两种不同方法:

1) 假设目标沿着直线移动: $y = y_{i-1} + (x - x_{i-1}) \tan \theta$,那么可以定义预测点为(Δt 是 $i-1$ 到 i 之间的时间间隔):

$$\begin{cases} x_{pre-i} = x_{i-1} + V_{i-1} \Delta t \cos \theta \\ y_{pre-i} = y_{i-1} + V_{i-1} \Delta t \sin \theta \end{cases}; i \geq 2, \theta = \arctan\left(\frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{x_{i-1} - x_{i-2}}\right) \quad (3)$$

V_{i-1} 表示目标在时刻 $i-1$ 的瞬时速度:

$$V_{i-1} = \frac{|I_{i-1} - I_{i-2}|}{\Delta t}; i \geq 2 \quad (4)$$

2) 如果没有更多关于目标的有用的先验信息(在实际环境中通常是这样),则目标位置在时刻 $i-1$ 将会使用预测点:

$$\begin{cases} x_{pre-i} = x_{i-1} \\ y_{pre-i} = y_{i-1} \end{cases}; i \geq 1 \quad (5)$$

因为精确预测未来目标位置是困难的,那么可以利用式(1)来预测时刻 i 目标所在的一个足够大的范围,而不是它的精确位置。

按照式(1),如果目标跟踪 $I = (I_0(x_0, y_0), \dots, I_{i-1}(x_{i-1}, y_{i-1}))$ 是已知的,则目标在预测点 (x_{pre-i}, y_{pre-i}) 周围半径 R 的概率可以利用下面的理论 1 计算出来,它将会大于一个给定的阈值 $H (0 \leq H \leq 1)$ 。那也就意味着可以计算出这样一个范

围,目标在时刻 i 位于此范围内的概率大于 H 。

理论1 给定一个阈值 $H(0 \leq H \leq 1)$, $\exists R \geq |\sigma| \times \sqrt{2 \ln \frac{1}{1-H}}$, 在时刻 i 时, 目标位于预测点 (x_{pre-i}, y_{pre-i}) 半径 R 的范围内的概率大于 H 。

3.3 部署信息

假设所关心的目标位置是 $\theta(x, y)$ 。假定参数 m 为部署在每个分组里的节点数, 对应于每个分组 G_1, \dots, G_n , 部署的概率分布函数为 a_1, \dots, a_n , 这些概率信息可以被位于 θ 的节点观察到。设 X_i 为随机变量, 它表示在分组 G_i 中位于目标位置 θ 的节点数。设 $\vec{A} = (a_1, \dots, a_n)$ 为矢量, 表示探测的信息。按照文献[6], 设 $g_i(\theta)$ 为分组 G_i 里的某一传感器在点 θ 周围分布的概率, 定义为:

$$g_i(\theta) = \left(\frac{1}{2\pi\Omega^2} e^{-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2}{2\Omega^2}} \right) \cdot \pi R^2 \quad (6)$$

其中, $\Omega = 6.238 \times R^2 / \sigma^2 + \sigma$ 。所以, a_i 个传感器在点 θ 周围按如下概率分布 (其中 m 是配置在每个配置点的传感器数目):

$$f(X_i = a_i, \theta) = \binom{m}{a_i} (g_i(\theta))^{a_i} (1 - g_i(\theta))^{m-a_i} \quad (7)$$

由于有 n 个分组在这个范围内, 则似然函数 $f(\vec{X}, \theta)$ 表示观察信息和我们通过部署分布计算的数值一致, 可以按如下公式进行计算:

$$f(\vec{X}, \theta) = \prod_{i=1}^n \binom{m}{a_i} (g_i(\theta))^{a_i} (1 - g_i(\theta))^{m-a_i} \quad (8)$$

也是我们想要的联合分布。按照贝叶斯定理的标准步骤可以得出:

$$h(\theta | \vec{A}) = \frac{\prod_{i=1}^n \binom{m}{a_i} (g_i(\theta))^{a_i} (1 - g_i(\theta))^{m-a_i}}{\iint \prod_{i=1}^n \binom{m}{a_i} (g_i(\varphi))^{a_i} (1 - g_i(\varphi))^{m-a_i} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_{pri})^2 + (y-y_{pri})^2}{2\sigma^2}} \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_{pri})^2 + (y-y_{pri})^2}{2\sigma^2}} dx dy} \quad (9)$$

其中, $\vec{A} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ 。

现在, 位置发现的目标变成了估计问题, 也就是需要为参数空间选择参数 θ 。为此, 要尽可能获取参数 θ 的值使概率密度 $h(\theta | \vec{X})$ 大, 然后使用这个数值来估计 θ , 所以需要使用最大似然估计 (简化的 MLE)。

MLE 方法是统计评估方面广泛使用的方法, 其规则简单, 也就是找到参数值, 使观察数据最可能真实。换句话说, MLE 是一种通过概率分布来使观察数据最可能正确的方法。

最大化似然函数 $h(\theta | \vec{X})$ 中的 θ 值与最大化函数 $\log h(\theta | \vec{X})$ 中的 θ 值相同, 因为对数是一个递增的函数。因此, 它能让 MLE 更加方便地找到 θ 的最大数值 (我们已经忽略了跟 θ 无关的条件):

$$L(\theta) = \log h(\theta | \vec{X}) = \sum_{i=1}^n (a_i \log g_i(\theta) + (m - a_i) \log(1 - g_i(\theta))) - \frac{(x - x_{pri})^2 + (y - y_{pri})^2}{2\sigma^2} \quad (10)$$

有许多方法来找到最大化 $L(\theta)$ 的 θ 值。当 $L(\theta)$ 是可微的并且存在最大值, 它必须满足以下偏微分方程, 即似然方程:

$$\frac{\partial L(\theta)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial L(\theta)}{\partial y} = 0 \quad (11)$$

连续可微函数最大值的定义说明了它在该点上一阶偏导为 0。如果一阶偏导有一个简单的分析形式, 我们能够求解上述似然方程来找到 $\theta(x, y)$ 的值。

4 模拟结果

本节将详细地进行定量分析来评估本文策略的性能。显然可以用定位估计出错情况来进行评估, 部署区域是一个 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的正方形, 它被分成 10×10 的格栅, 每个都是 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$; 这些格栅的中心被选作部署点。用 m 表示每个分组里的节点数, R 表示传输范围。在实验中, 固定 $\sigma = 50$, 然后基于部署模型随机产生传感器网络。

图 2 显示了当 $R = 20 \text{ m}, 30 \text{ m}, 40 \text{ m}$ 时估计错误和 m 之间的关系, 可以清楚地看到估计错误随着 m 的增加而减少。图 3 显示了当 $m = 100, 200, 300$ 时估计错误和 R 之间的关系。通过分析该图可知, 估计错误会随着 R 的增加而减少。这两个模拟结果表明: 当 WSN 的密度增加时, 会有越来越多的传感器可以侦测到目标, 也就是提供给这些活动节点更多的观察, 因此使用本文的策略可以产生更精确的结果。

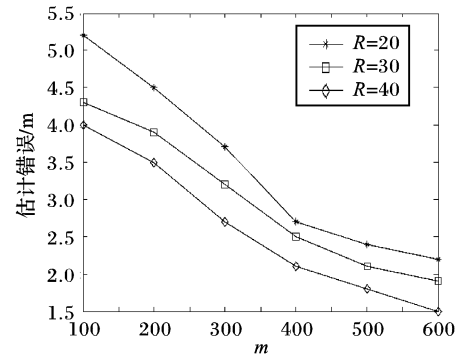


图2 估计错误与 m 值的关系 ($R = 20 \text{ m}, 30 \text{ m}, 40 \text{ m}$)

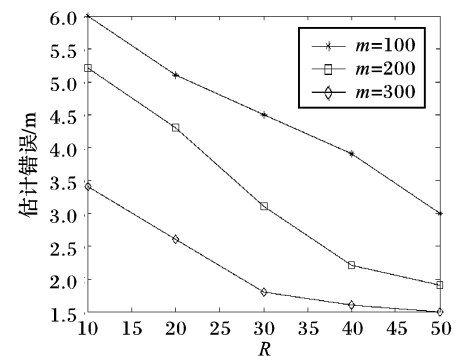


图3 估计错误与 R 值的关系 ($m = 100, 200, 300$)

从上面的实验中可以看出, 当估计的前提条件比较好时 (即 R 或 m 比较大的情况下), 使用本文的定位策略可以提供相当高的精度 ($1 \sim 3 \text{ m}$ 之间), 这样的精度可以满足大部分传感器网络上的应用需求, 因此该定位策略的结果是值得鼓励的。但是, 在定位条件不是很理想的情况下, 例如在稀疏网络中, 定位的精度不是很让人满意, 通过分析认为, 主要问题在于在不同环境中的方差变化, 因此在将来的工作中需要重点研究怎样改善精度。

5 结语

已有的关于跟踪问题的文献通常重点降低能量消耗或者改善定位的精确性,它们都基于这样一个假设,即知道每个传感器的坐标。本文没有按照此假设,而是将其归结为基于簇的无信标 WSN 中的定位和跟踪问题,并提出了一个相应的定位策略来阐明怎样利用贝叶斯理论取得目标的精确估计。利用部署知识,建立一个模型来反映目标位置和监控传感器所提供的观察之间的内在信息,同时建立了一个预测模型来提供目标移动模式的先验知识。贝叶斯理论使用这些模型可以产生目标的坐标。实验证明了策略的有效性。

在今后的工作中,我们不仅要修改 MLE 方法来减少计算成本延长网络寿命,还要考虑障碍因素来解决完全未知的分布式问题,使得该策略可以更好地适应实际应用。

参考文献:

- [1] CERPA A, ELSON J, ESTRIN D, *et al.* Habitat monitoring: application driver for wireless communications technology[C]// Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on Data Communications in Latin America and the Caribbean, Costa Rica. [S. l.]: ACM Press, 2001: 20–41.
 - [2] LI D, WONG K, HU Y, *et al.* Detection, classification and tracking of targets in distributed sensor network[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 17–29.
 - [3] ZOU Y, CHAKRABARTY K. Energy-Aware target localization in wireless sensor networks[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003). [S. l.]: IEEE Computer Society, 2003: 60–67.
 - [4] CLOUQUEUR T, PHIPATANASUPHOM V, RAMANA-THN P, *et al.* Sensor deployment strategy for target detection[C]// Proceedings of 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York: ACM Press, 2002: 42–48.
 - [5] BROOKS R, AMANATH -AN P, SYEED K M. Distributed target classification and tracking in sensor networks [J]. Proceedings of the IEEE, 2003, 91(8): 1163–1171.
 - [6] AL-HERTANI H, ILOW J. Pattern recognition based detection and localization in a network of randomly distributed sensor nodes[C]// Proceedings of the 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA 2005). Washington: IEEE Computer Society, 2005: 412–419.
 - [7] AL-HERTANI H, ILOW J. Detection and localization in a wireless network of randomly distributed sensors [C/OL]// CCGEI 2003, Montreal, 2003 [2007-01-20]. http://www.ece.wisc.edu/~sensit/publications/Clouqueur_WSNA2002.pdf.
 - [8] LIU J, CHEUNG P, GUIBAS L, *et al.* A dual-space approach to tracking and sensor management in wireless sensor networks[C]// REGHAVENDRV C S. Proceedings of 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York: ACM Press, 2002: 131–139.
 - [9] YU X, NIYOGI K, MEHROTRA S, *et al.* Adaptive target tracking in sensor networks[C]// Communication Networks and Distributed Systems Modeling and Simulation conference (CNDS 04), San Diego. San Antonio: SCS Press, 2004: 253–258.
 - [10] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system[C]// Proceedings of 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). [S. l.]: IEEE Computer and Communications Societies, 2000, 2: 775–584.
 - [11] CAPKUN S, HAMDI M, HUBAUX J-P. GPS-free positioning in mobile Ad hoc networks[J]. Cluster Computing Journal, 2002, 5(2): 157–167.
 - [12] FANG L, DU W L, NING P. A beacon-less location discovery scheme for wireless sensor networks[C]// Proceedings of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2005). [S. l.]: IEEE Computer and Communications Societies, 2005: 161–171.
 - [13] HUANG Q F, LU C Y, ROMAN G-C. Reliable mobicast via face-aware routing[C]// Proceedings of 23rd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2004). [S. l.]: IEEE Computer and Communications Societies, 2004, 3: 2108–2118.
-
- (上接第 1834 页)
- [3] LIU Y H, XIAO L, LIU X M, *et al.* Location awareness in unstructured Peer-to-Peer systems[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems (TPDS), 2005, 16(2): 163–174.
 - [4] XIAO L, LIU Y H, NI L M. Improving unstructured Peer-to-Peer systems by adaptive connection establishment [J]. IEEE Transactions on Computers (TC), 2005, 54(9): 1091–1103.
 - [5] LV Q, CAO P, COHEN E, *et al.* Search and replication in unstructured peer-to-peer networks[C]// Proceedings of the 16th ACM International Conference on Supercomputing. New York: ACM Press, 2002: 254–261.
 - [6] CHAWATHE Y, RATNASAMY S, BRESLAU L, *et al.* Making Gnutella-like P2P systems scalable[C]// Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York: ACM Press, 2003: 407–418.
 - [7] GKANTSIDIS C, MIHAIL M, SABERI A. Hybrid search schemes for unstructured Peer-to-Peer networks[C]// Proceedings of the INFOCOM 2005. New York: IEEE Computer and Communications Societies, 2005: 1526–1537.
 - [8] LIANG J, KUMAR R, XI Y J, *et al.* Pollution in P2P file sharing systems [C]// Proceedings of the INFOCOM 2005. New York: IEEE Computer and Communications Societies, 2005: 1174–1185.
 - [9] RODRIGUEZ P, BIERSECK E W. Dynamic parallel access to replicated content in the Internet [J]. IEEE/ACM Transactions on Network, 2002, 10(4): 455–465.
 - [10] ZHAO S Y, STUTZBACH D, REJAIE R. Characterizing files in the modern Gnutella network: a measurement study[C]// Proceedings of Multimedia Computing and Networking, SPIE 6071. [S. l.]: SPIE, 2006.
 - [11] BLOOM B H. Space/time trade-offs in Hash coding with allowable errors [J]. Communications of the ACM, 1970, 13(7): 422–426.
 - [12] ADLER I, ROSS S M. The coupon subset collection problem [J]. Journal of Applied Probability, 2001, 38(3): 737–746.
 - [13] ZHONG M, SHEN K. Random walk based node sampling in self-organizing networks [J]. ACM SIGOPS Operating Systems Review, 2006, 40(3): 49–55.
 - [14] Peersim [EB/OL]. [2007-01-02]. <http://peersim.sourceforge.net/>.
 - [15] SRIPANIDKULCHAI K, MAGGS B M, ZHANG H. Efficient content location using interest-based locality in Peer-to-Peer systems [C]// Proceedings of INFOCOM 2003. New York: IEEE Computer and Communications Societies, 2003: 2166–2176.