

基于虚拟信号强度的 RFID 定位方法研究

李军怀 张果谋 于 蕾 孙转宜

(西安理工大学计算机科学与工程学院 西安 710048)

摘 要 针对 RSSI 方法中定位信号之间干扰严重、误差较大、信号波动剧烈等问题,提出了一种基于虚拟信号强度的 RFID 定位方法。该方法引入虚拟信号强度概念,在定位区域内构造虚拟信号强度空间,然后利用经典信号传播模型计算各虚拟参考标签的信号强度。在采用最近邻方法计算定位坐标时引入 Q-Function 来计算每个邻居的权值,以减小正态随机变量标准差 σ 带来的阴影效应,解决实际部署过程中大量高密度参考标签带来的射频信号干扰问题,从而灵活部署参考标签。仿真实验结果表明,该方法与经典的 LANDMARC、VIRE 方法相比,具有较高的定位精度。

关键词 RFID,虚拟信号强度,定位

中图法分类号 TP399 文献标识码 A

Efficient RFID Location Method Based on Virtual Signal Strength

LI Jun-huai ZHANG Guo-mou YU Lei SUN Zhuan-yi

(School of Computer Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract In analysis of the serious interference, low accuracy and other drawbacks of the existing typical positioning methods, a location algorithm based on virtual signal strength was proposed. This algorithm technically introduces the concept of the virtual signal strength and constructs virtual space with a classic radio propagation model in location area. Besides, Q-Function is brought in our algorithm to reduce the shadow effect caused by σ , a standard deviation of normal random variable. The simulation experimental results show that compared with the classical LANDMARC and VIRE, our algorithm has high accuracy and effectively solves the actual interference problem brought in the deployment of high-density reference tags.

Keywords RFID, Virtual signal strength(VSS), Indoor location

1 引言

随着物联网技术研究与应用的不深入,人们在许多应用场景下对基于位置的服务有着巨大的应用需求。移动定位技术不仅可用于对物体的定位,如仓储货品定位、图书管理、医院医疗设备管理、生产过程管理,还可用于人员的定位,如煤矿井下人员定位、个性化信息服务、目标发现等重要领域。移动对象的定位方法和技术是提供基于位置服务的核心技术之一,其研究正在逐渐深入^[1,2]。

对于室外环境下, GPS^[3] 作为一种比较成熟、典型的定位技术,在许多行业都已得到广泛运用。但是,应用于室内环境中的定位方法的研究和发展相对比较缓慢。室内定位可视为定位技术与人联系最紧密的一个组成部分,其存在的重要潜在应用,近年来吸引了大量的研究和关注。

自无线网络出现以来,广大学者对室内定位技术的研究不断深入,涌现了大量成果,主要包括 A-GPS 定位^[4]、超声波^[5]、光跟踪定位系统^[6]以及在 WSN、RFID 中广泛使用的

RSSI(Received Signal Strength Indicator)^[7] 定位等方法。然而这些方法分别存在各种不足之处:光跟踪定位需要复杂且昂贵的设备支持;A-GPS 要求定位设备集成 GPS 接收器,成本和性能受限;超声波定位利用电磁波传输与声波传输的时间差来测距,其测量距离较短且会发生声吸收现象,影响距离测量精度;RSSI 定位技术是利用电磁波在传输过程中接收信号功率强度与传输距离之间的变化关系进行定位。另外,还有 IEEE 802.11 技术、超宽带、蜂窝网技术等^[8]。

RFID 技术利用射频方式进行非接触双向通信,自动识别目标对象并获取相关数据,具有精度高、适应环境能力强、抗干扰强、操作快捷、可识别高速运动的物体,且可同时识别多个标签等优点,因此备受关注。目前,已经出现了许多 RFID 定位技术以及典型的系统,如 LANDMARC^[9]、SpotON^[10,11]、VIRE^[12] 等,这些都为我们研究室内定位技术奠定了良好基础,提供了经验指导。在这些方法中,大多数都是基于信号强度的定位技术,它们使用接收到的 RSSI 来确定待定位物体的位置。但是,基于 RSSI 的定位系统存在着许多

到稿日期:2011-05-05 返修日期:2011-08-07 本文受陕西省科技计划项目(2011NXC01-12),西安市科技项目(CXY09020),陕西省教育厅科技项目(2010JC15)资助。

李军怀(1969—),男,博士,教授,主要研究方向为 RFID 技术、网络计算等, E-mail: lijunhuai@xaut.edu.cn;张果谋(1988—),男,硕士生,主要研究方向为 RFID 定位技术;于蕾(1976—),女,主要研究方向为移动计算、物联网技术;孙转宜(1985—),女,硕士生,主要研究方向为 RFID 定位技术。

问题,由于各种特性所决定,电磁波在媒介中传播时将受到信号衰减、折射、反射、散射、绕射、多径干涉和多普勒频移等多种物理过程的影响。同时,大量同频率的信号之间存在着较强的信号干扰,这些因素造成了现有基于 RSSI 的定位系统定位精度较差。因此,现有的很多工作围绕如何通过改善 RSSI 信息的精度来提高定位精度^[13]。

2 基于虚拟信号强度的 RFID 定位方法

2.1 RFID 信号传播模型

RFID 信号传播模型也称作对数路径损耗模型,是一种用来预测信号在室内环境下沿着某特定路径随距离增加平均衰减程度的传播模型^[14]。通过对 RFID 信号传播模型的分析 and 实验,研究者发现^[15],对某一确定位置、任意的读写器与标签距离 d ,路径损耗 $PL(d)$ 可以使用如下公式进行描述:

$$PL(d)_{dB} = PL(d_0) + 10N \lg \frac{d}{d_0} + X_n \quad (1)$$

式中, n 是路径损耗指数; d_0 是近地参考距离,通常为 1m; d 是读写器与标签之间的间隔距离; X_n 是服从正态分布的随机变量。

接收到的信号强度值可以由下式表示:

$$RSSI(d)_{dB} = P_{tB} + G_{tB} - PL(d)_{dB} \quad (2)$$

式中, P_t 表示发射功率, G_t 是发射节点天线增益。

由式(1)、式(2)可得,对于确定的读写器与标签间隔距离 d ,从信道中获得的信号强度值 RSSI 为

$$RSSI(d) = RSSI(d_0) - 10N \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_n \quad (3)$$

式中, N 为路径损耗指数; d_0 指发射站的近地参考距离,通常取 1m。

设定位区域内部署有 R_1, R_2, \dots, R_m 台信号 RFID 读写器。并且该区域内部署有 $RT_1, RT_2, \dots, RT_{m_m}$ 个实体参考标签,则记 $RTSS_{ij}$ 为参考标签 RT_j 发送给读写器 R_i 的信号强度。假设 MT 为定位区域内的待定位标签,则用 $MTSS_i$ 表示 MT 发送给读写器 R_i 的信号强度。

本文中 d_0 处的信号强度值采用 Friis 公式来计算:

$$RSSI(d_0) = P_t + G_t + G_r + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) \quad (4)$$

式中, λ 为载波波长, G_t 为天线增益, P_t 为 RFID 标签的发射功率, G_r 为 RFID 读写器接收天线增益。由以上两个公式可得,沿着参考标签 RT_j 与读写器 R_i 方向上的路径损耗指数可用式(5)计算:

$$N_{ij} = \frac{RSSI(d_0) - RTRSS_{ij}}{10 \log d_{ij}} = \frac{P_t + G_t + G_r + 20 \log \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right) - RTRSS_{ij}}{10 \log d_{ij}} \quad (5)$$

2.2 VSS(Virtual Signal Strength)算法

很多研究者提出,在定位区域内增加参考标签的密度可以提高定位的精度。但是,部署高密度的参考标签不仅会增加系统的建设和维护成本,而且会增加信号在同一信道上相互干扰的概率。所以,通过增加参考标签密度来提高精度很可能会被信号间干扰造成的定位误差的提高所抵消。面对这组矛盾,单纯依赖于部署更多的参考标签无法得到令人满意的定位精度。但是,如果引入虚拟信号点的概念,则可以较好地解决这个问题。一方面,虚拟信号点所提供的 RSSI 信息可以起到类似于真实参考标签的作用,能够提高系统精度;另一方面,由于虚拟信号点并不真实存在,增加虚拟信号点的密

度不会对其他参考标签产生信号干扰。基于这些考虑,本文提出一种新的算法 VSS(Virtual Signal Strength),即虚拟信号强度算法。具体包括如下 3 个步骤。

(1) 构建虚拟信号强度

在 $M \times N$ 的区域中,每隔 $Space$ 宽度构建一个虚拟信号点,如图 1 所示,则沿 x 轴方向和 y 轴方向部署的虚拟信号点个数分别为 $\lfloor M/Space \rfloor$ 和 $\lfloor N/Space \rfloor$, 设虚拟信号点表示为 VP_m , 虚拟信号强度表示为 VSS_m , 且 $m \in [1, \lfloor M/Space \rfloor]$, $n \in [1, \lfloor N/Space \rfloor]$ 。

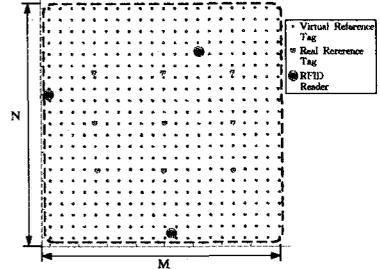


图 1 虚拟信号强度的构建

(2) 计算虚拟信号强度

本文利用信号传播模型来估计虚拟参考标签的信号强度。由于室内环境中存在障碍物,信号在传播过程中会产生阴影效应。为了解决阴影效应造成的信号强度剧烈的波动,需要计算读写器在较短时间内读取的 RSSI 样本值的平均值。

$$RSSI = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m} \quad (6)$$

式中, x_i 为第 i 个信号强度值, m 为采集这一点处相对于一个读写器的信号强度值的次数,即求这些信号强度的平均值作为该点相对于该读写器的信号强度值。实体参考标签 RT_j 、待定位标签 MT 和虚拟信号点 VP_m 发送给读写器 R_i 的信号强度均取 RSSI 样本值的平均值,分别记为 \overline{RTSS}_{ij} 、 \overline{MTSS}_i 和 $\overline{VSS}_{m \cdot i}$ 。

由于实体参考标签 RT_j 对虚拟信号点信号强度的影响,虚拟信号点 VP_m 发送到读写器 R_i 的信号强度可以用式(7)计算:

$$\overline{VSS}_{m \cdot ij} = \overline{RTSS}_{ij} - 10N_{ij} \log \left(\frac{d_{m \cdot i}}{d_{ij}} \right) \quad (7)$$

式中, \overline{RTSS}_{ij} 表示实体参考标签 RT_j 发送到读写器 R_i 的信号强度值, $d_{m \cdot i}$ 表示虚拟信号点 VP_m 到读写器 R_i 的距离, d_{ij} 表示实体参考标签 RT_j 到 R_i 的距离。设 H_m 表示虚拟信号点范围内实体参考标签的集合,对于每一个虚拟信号点,其范围内所有的实体参考标签 $RT_j \in H_m$ 均会对虚拟信号强度产生影响。理想情况下,相邻集合 H_m 应当包含 3 个以上实体参考标签。

虚拟信号点的信号强度计算需要通过一个权值公式综合评估相邻集合 H_m 中的每一个实体参考标签对虚拟信号点信号强度的影响。实体参考标签距离虚拟信号点越近,对虚拟信号强度的影响就会越大,则它所占的权重就会越大。

通过大量的实验分析,本文提出了在虚拟信号点 VP_m 范围内的实体参考标签 RT_j 所占的权重计算公式:

$$w_j = \frac{1}{d_{j \cdot i}^2} \cdot i = \frac{1}{\sum_{k \in H_m} d_{k \cdot i}^2} \quad (8)$$

式中, H_m 表示虚拟信号点范围内实体参考标签的集合, $d_{j \cdot i}$ 表示实体参考标签 RT_j 离阅读器 R_i 的距离。

因此,虚拟信号点 VP_{nm} 发送给读写器 R_i 的信号强度可由式(9)计算:

$$VSS_{nm,i} = \sum_{k \in H_{nm}} w_j VSS_{nm,ij} \quad (9)$$

(3)定位阶段

定义待定位标签的信号强度矢量为

$$MTSS = (MTSS_1, MTSS_2, \dots, MTSS_n)$$

式中, $MTSS_i$ 表示待定位标签 MT 发送给读写器 R_i 的信号强度值 $i \in (1, n)$ 。

定义虚拟信号点的信号强度矢量为

$$VSS = (VSS_{nm,1}, VSS_{nm,2}, \dots, VSS_{nm,n})$$

式中, $VSS_{nm,i}$ 表示虚拟信号点 VP_{nm} 发送给读写器 R_i 的信号强度值。对于每个待定位标签 MT , 定义:

$$E_{nm} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (MTSS_i - VSS_{nm,i})^2} \quad (10)$$

式中, E_{nm} 表示虚拟信号点和待定位标签之间信号的欧几里得距离。 E 越小, 表示虚拟信号点和待定位标签越近。接下来需要从待定位标签范围内选择 E 值最小的 k 项作为邻近虚拟信号点集合, 记为 K 。

对于一个待定位标签, 其坐标 (x, y) 可以通过式(11)计算:

$$(x, y) = \sum_{VT_{nm} \in K} w_{nm} (x_{nm}, y_{nm}) \quad (11)$$

式中, w_{nm} 表示利用虚拟信号点对定位标签 MT 进行定位时的权值, 为 E 的函数。利用 LANDMARC 算法中的权值公式, w_{nm} 可以通过式(12)计算:

$$w_{nm} = \frac{1}{E_{nm}^2} \sum_{VT_{nm} \in K} \frac{1}{E_{nm}^2} \quad (12)$$

3 算法性能分析

本文使用 MATLAB 对算法进行了一系列仿真实验来评估 VSS 算法的性能。定义 ME (Mean Error) 作为待定位标签的实际坐标和估计的坐标之间的平均估计误差的度量:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (13)$$

式中, (x_0, y_0) 为待定位标签的实际坐标, (x, y) 为待定位标签的估计坐标, n 为定位的次数。在定位实验中, $7.7m \times 8.15m$ 的定位区域内部署了 3 台读写器和 9 个实体参考标签。整个定位区域分为中心区域和外围区域, 把实体参考标签覆盖的范围记为中心区域, 边界部分记为外围区域, 如图 2 所示。

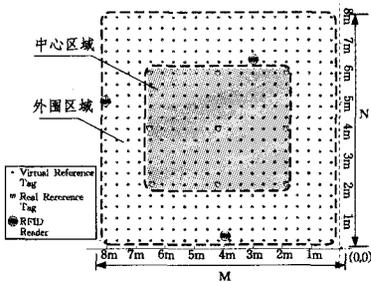


图 2 RFID 读写器及标签部署

3.1 不同参数对 VSS 算法的影响

虚拟信号点范围值、虚拟信号点之间的间隔和邻近虚拟信号点的数量对 VSS 算法都有不同的影响。

(1) 虚拟信号点范围值对 VSS 算法的影响

设 H_{nm} 表示虚拟信号点范围内实体参考标签的集合, 对于每一个虚拟信号点, 其范围内所有的实体参考标签 $RT_i \in$

H_{nm} 均会对虚拟信号强度产生影响。理想情况下, 相邻集合 H_{nm} 应当包含 3 个以上实体参考标签。

虚拟信号点的范围值会影响最终的定位精度, 所以本文在定位区域内随机选择了 1000 个点, 对每个点进行了 3 次定位测定。图 3 显示的是不同的虚拟信号点范围值下算法的平均估计误差 ME 的分析。

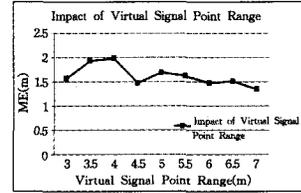


图 3 虚拟信号点范围值对 ME 的影响

从图 3 可以看出, 不同的虚拟信号点范围值对定位精度的影响不同。当虚拟信号点范围值小于与真实参考标签距离的最小值时, 构造的虚拟信号点的信号强度与真实标签的信号强度等价。实验结果显示, 当虚拟信号点的范围为 7m 时, VSS 算法的定位误差最小。

(2) 虚拟信号点间隔 Space 对 VSS 算法的影响

在定位实验中对不同的虚拟信号点间隔 $Space$ 进行了一系列实验。每次实验随机选择 1000 个位置, 对每一个位置进行 5 次定位测量。图 4 显示的是不同 $Space$ 下算法的平均估计误差 ME 的分析。

如图 4 所示, 随着 $Space$ 值的减小, 定位精度会上升。但是当 $Space$ 的值大于 0.8 时, 定位精度会降低。虽然减小虚拟信号点之间的距离可以提高定位精度, 但是计算大量的虚拟信号信息会对定位系统产生负担, 可能会对定位的实时性产生影响。因此, 采取一种折中的方案, 选取 $Space$ 值的范围为 $[0.8, 1.4]$ 。

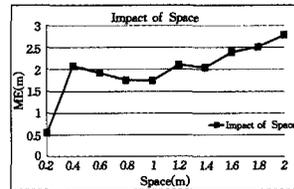


图 4 虚拟信号点间隔对 ME 的影响

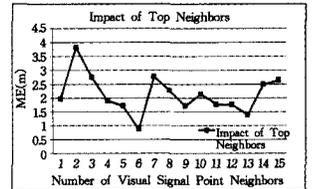


图 5 邻近虚拟信号点数量 k 对 ME 的影响

(3) 邻近虚拟信号点的数量对 VSS 算法的影响

邻近虚拟信号点数量 k 也会对算法性能产生影响。在定位实验中对不同的 k 值进行了一系列实验, 每次实验随机选择 1000 个位置, 对每一个位置进行 5 次定位测量。图 5 显示的是不同 k 下算法的 ME 平均估计误差的分析。

由图 5 可知, 不同的邻近虚拟信号点数量 k 对 ME 的影响波动比较明显。实验结果表明, 当 k 取 6 时, ME 达到最小值 0.8m。

3.2 VSS 算法与经典 LANDMARC 算法、VIRE 算法对比分析

为了验证 VSS 算法相对 LANDMARC 算法和 VIRE 算法在定位性能上的优越性, 使用 MATLAB 对 VSS 算法和 LANDMARC 算法、VIRE 算法进行了一系列对比实验。LANDMARC 系统中设置邻近参考标签的数量 k 为 4, 以便获得最佳定位精度。VSS 算法中邻近虚拟信号点的数量 k 也设为 4。

整个定位区域根据实体参考标签的密度和与读写器的距离, 划分为中心区域和外围区域, 然后在不同的区域对 VSS

算法、LANDMARC算法和 VIRE 算法的 ME 平均估计误差做对比分析。在这两个区域的每次实验中随机选择 10 个位置,对每一个位置分别用 VSS 算法、LANDMARC 算法和 VIRE 算法进行 50 次定位测量。图 6 和图 7 是实验结果的汇总分析。

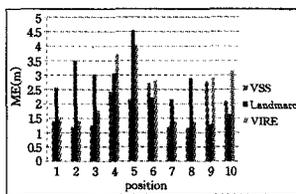
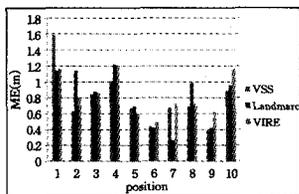


图 6 中心区域定位误差对比 图 7 外围区域定位误差对比

从图 6、图 7 可以看到,中心区域 LANDMARC 算法的定位误差在 0.26~1.14m 之间,VIRE 算法的定位误差在 0.49~1.19m 之间,而 VSS 算法的定位误差在 0.39~1.58m 之间。在外围区域,LANDMARC 算法的定位误差在 1.2~4.5m 之间,VIRE 算法的定位误差在 1.3~4.0m 之间,而 VSS 算法的定位误差在 1.1~2.8m 之间。使用 LANDMARC 算法对中心区域定位的平均误差约为 0.9m,VIRE 算法的平均误差约为 0.83m,VSS 算法的平均误差约为 0.78m。使用 LANDMARC 算法对外围区域定位的平均误差约为 2.69m,VIRE 算法的平均误差约为 2.4m,VSS 算法的平均误差约为 1.84m。相比较而言,在中心区域 VSS 算法比 VIRE 算法的定位精度平均提高了约 0.05m,比 LANDMARC 算法平均提高了约 0.12m,在外围区域 VSS 算法比 VIRE 算法的定位精度平均提高了约 0.56m,比 LANDMARC 算法平均提高了约 0.85m。

结束语 本文通过对现有室内定位方法的研究与分析,探索了一种基于虚拟信号强度的 RFID 室内定位方法,它可以较好地解决通过部署大量 RFID 设备来提高定位精度而引起的信号干扰问题,并可以降低系统成本,提高定位精度。未来的工作将集中在结合多种位置感知信息,进一步提高定位精度。

参考文献

[1] Atzori L, Iera A, Morabito G. The Internet of Things; A survey [J]. *Computer Networks*, 2010, 54(15): 2787-2805

[2] Fuchs C, Aschenbruck N, Martini P, et al. Indoor tracking for mission critical scenarios; A survey [J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2011, 7(1): 1-15

[3] McNeff J G. The global positioning system [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, 50(3): 645-652

[4] Sun G, Chen J, Guo W, et al. Signal processing techniques in network-aided positioning; a survey of state-of-the-art positioning designs [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2005, 22(4): 12-23

[5] Fretzagias C, Papadopoulou M. Cooperative Location-sensing for Wireless Networks [C] // *Proceedings of the Second IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'04)*. March 2004; 121-131

[6] Smith A, Balakrishnan H, Goraczko M, et al. Tracking moving devices with the cricket location system [C] // *Proceeding ACM MobiSYS'04*. 2004; 190-202

[7] Figel W G, Shepherd N H, Trammel W F. Vehicle location by a signal attenuation method [J]. *IEEE Trans Veh Technol*, 1969, 11(18): 105-109

[8] Paul A S, Wan E A. Wi-Fi based indoor localization and tracking using sigma-point Kalman filtering methods [J]. *IEEE*, 2008; 645-659

[9] Ni L M, Yunhao L, Yiu Cho L, et al. LANDMARC; indoor location sensing using active RFID [C] // *Pervasive Computing and Communications (PerCom 2003)*. 2003; 409-415

[10] Hightower J, Want R, Borriello G. SpotON: An indoor 3D location sensing technology based on RF signal strength [R]. 2000-02-02. Seattle, WA; University of Washington, Feb. 2000

[11] Hightower J, Vakili C, Borriello G, et al. Design and Calibration of the SpotON Ad-Hoc Location Sensing System [R]. 00-02-02. Seattle; University of Washington, Department of Computer Science and Engineering, August 2001

[12] Yiyang Z, Yunhao L, Ni L M. VIRE; Active RFID-based Localization Using Virtual Reference Elimination [C] // *the 2007 International Conference on Parallel Processing (ICPC 2007)*. 2007; 56-56

[13] Luo X, O'Brien W J, Julien C L. Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites [C] // *Advanced Engineering Informatics*. 2010

[14] Zhao J, Zhang Y, Ye M. Research on the received signal strength indication location algorithm for RFID system [J]. *IEEE*, 2006

[15] Want R, et al. The active badge location system [J]. *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 1992, 10(1): 91-102

[16] 陈伟涛. 基于网络编码的 P2P 流媒体性能优化研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008

[17] 李亚龙. 基于网络编码的 P2P 直播数据传输策略研究与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009

[18] Ho T, M'edard M, Koetter R, et al. A Random Linear Network Coding Approach to Multicast [J]. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2006, 52(10): 4413-4430

[19] Sanders P, Egnor S, Tolhuizen L. Polynomial Time Algorithms for Network Information Flow [C] // *Proc of the 15th ACM Symposium on Parallel Algorithms and Architectures (SPAA)*. San Diego, California, USA, June 2003; 286-294

[20] Chu Y-h, Ganjam A, Ng T S E, et al. Early Experience with an Internet Broadcast System Based on Overlay Multicast [C] // *Proc of the USENIX Annual Technical Conference*. Boston, Massachusetts, USA, July 2004

[21] Zhang M, Zhang Y X Q, Sun L, et al. Optimizing the Throughput of Data-Driven Peer-to-Peer Streaming [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(1): 97-110

[22] Wong B, Slivkins A, Sifer E G. Meridian: A Lightweight Network Location Service without Virtual Coordinates [C] // *Proc of the ACM SIGCOMM*. Philadelphia, PA, USA; ACM Press, 2005; 85-96

[23] Chen X, Ren N, Zhang X, et al. SonicStream: a Network Coding Based Live P2P Media Streaming System with Rich User Experiences [J]. *Journal of Communication and Networks*, 2008, 10(4): 430-436