

# 基于二进制粒子群算法的异构传感器网络成本最优节点部署机制

李明 石为人

(重庆大学自动化学院 重庆 400030)

**摘要** 节点部署作为无线传感器网络应用的一个核心问题,是保证网络服务质量的重要手段。针对异构传感器网络节点的高密度部署和监测目标的非均匀分布的情况,提出一种基于二进制粒子群算法的异构节点成本优化部署方法。该算法在满足区域节点部署要求的条件下以最小化传感器节点的部署成本为目标函数进行优化操作,以达到降低网络冗余、提高网络服务质量的效果。仿真结果表明,该算法能快速收敛于最优解,能够降低网络部署的成本,提高网络中目标监测的质量。

**关键词** 无线传感器网络,异构网络,节点部署,二进制粒子群算法

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Optimal Sensor Deployment Scheme in Heterogeneous Sensor Networks Based on Binary Particle Swarm Algorithm

LI Ming SHI Wei-ren

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract** As one of key issues addressed in the application of wireless sensor networks (WSNs), sensor deployment is one of the significant means of guaranteeing the quality of service in networks. To relieve the high density of distributing heterogeneity nodes in WSNs and geographical irregularity of the sensed event in the monitored area, a optimal differentiated sensor deployment scheme based on binary particle swarm algorithm was proposed, to compute the cost of networks and choose the right type of sensor at appropriate position. With guaranteeing coverage of sensors in the zone, the objective of min-cost of sensor deployment was computed in order to reduce network redundancy and enhance quality of service. Finally, the experimental results demonstrated that the proposed approach is suitable for solving deployment problems of heterogeneous WSNs.

**Keywords** Wireless sensor networks, Heterogeneous networks, Sensor deployment, Binary particle swarm optimization algorithm

节点部署问题是无线传感器网络 (Wireless Sensor Networks, WSNs) 的一个关键问题,反映了对物理世界的感知能力,是保证网络服务质量的重要手段<sup>[1,2]</sup>。近年来,粒子群算法及其改进算法作为问题求最优解的有效工具,受到越来越多研究者的重视,在 WSNs 节点部署优化中得到广泛应用。文献[3]提出了基于并行粒子群算法的移动节点优化策略。文献[4]利用粒子群算法寻找最优汇节点的位置,对网络拓扑结构进行优化。文献[5]以网络的最大覆盖和节点利用率的最小化为目标,利用二进制粒子群算法进行优化。文献[6]以网络有效覆盖率为优化目标,提出了基于概率测量模型的粒子群优化策略。以上对节点覆盖问题的研究大多是基于同构节点展开的,即参与覆盖的节点的寿命、电源能量、感知半径、通信半径、移动能力等都相同,同时假定节点在监测区域内是均匀分布的,这有悖于现实中目标常出现在“热点”区域<sup>[7,8]</sup>,并且同构节点构成的网络具有扩展性差<sup>[9]</sup>的特点。针对这些

问题,本文提出了一种基于二进制粒子群算法的异构网络节点部署方法。该方法适用于布尔传感模型和概率传感模型,能在保证网络连通性、覆盖性和容错性的条件下,使得网络对目标监测的质量最好和部署的成本最少。

### 1 问题描述

假定监测区域  $A$  为二维平面,被离散化为  $N$  个栅格,每个栅格的面积为 1;有  $K$  种不同类型的传感器节点,其感知半径  $r_k$  和通信半径  $r_c$  已知,且  $r_k \geq 2r_c$ ,保证异构节点部署后构成一个连通的网络。每一种类型的传感器节点的成本为  $c_k$ 。在保证覆盖和容错性的前提下,使得网络成本最低的形式化描述为

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_k x_{ik} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K a_{ijk} x_{ik} \geq b_j \quad j=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

到稿日期:2010-01-08 返修日期:2010-03-18 本文受 863 国家重点基金项目(2006AA780201-2),博士点基金(20060611010)资助。

李明(1982-),男,博士生,主要研究方向为无线传感器网络,E-mail:sshilm@163.com;石为人(1948-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为智能感知、控制与决策。

$$\sum_{k=1}^K x_k \leq 1, i=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$x_k = \{0, 1\} \quad i=1, 2, \dots, N; k=1, 2, \dots, K$$

其中,决策变量

$$x_k = \begin{cases} 1, & \text{在栅格 } i \text{ 放置类型为 } k \text{ 的传感器节点} \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

变量  $c_k$  表示在栅格  $i$  放置类型为  $k$  的传感器节点的成本。 $b_j$  表示对栅格  $j$  覆盖度的要求,其值取决于应用需求。式(3)保证一个栅格内至多只能布撒一个传感器节点。

### 1.1 布尔传感模型

布尔模型也称 0 1 模型。在该模型中,节点的感知范围是以节点为圆心、最大感知距离为半径的圆。即目标若出现在该圆区域内,则一定能被该节点检测到(值为 1),否则无法检测到(值为 0)。在该模型下,变量  $a_{ijk}$  的值取决于栅格  $i$  与栅格  $j$  之间的欧氏距离( $d_{ij}$ )与类型为  $k$  的传感器感知半径  $r_k$  的关系

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1, & d_{ij} \leq r_k \\ 0, & \text{其他情况} \end{cases}$$

为简化计算,以栅格的重心代表此栅格。栅格  $i$  与栅格  $j$  之间的欧氏距离( $d_{ij}$ )即为两栅格重心之间的距离。在布尔传感模型中, $b_i$  取非负整数。一般地,为保证网络的健壮性和容错性, $b_i \geq 1$ 。当均匀覆盖时, $b_i$  为常数。

### 1.2 概率传感模型

在概率模型中,目标被节点检测到的概率与目标和节点之间的距离及方向有关。本文采用文献[10,11]中的数学模型,监测点  $j$  被放置在点  $i$  处、类型为  $k$  的传感器节点检测到的概率为

$$p_{ijk} = e^{-\alpha_k d_{ij}} \quad (4)$$

式中, $\alpha_k$  为类型为  $k$  的传感器的参数,其值取决于传感器的类型。 $d_{ij}$  为点  $i$  和点  $j$  之间的欧氏距离。点  $j$  未能被放置在点  $i$  处、类型为  $k$  的传感器节点检测到的概率为

$$p = 1 - x_k p_{ijk} = \begin{cases} 1 - p_{ijk}, & \text{当 } x_k = 1 \\ 1, & \text{当 } x_k = 0 \end{cases} \quad (5)$$

点  $j$  不能被所有传感器检测到的概率为

$$p' = \prod_{i=1}^N \prod_{k=1}^K (1 - x_k p_{ijk}) \leq L \quad (6)$$

$L$  为概率上界, $0 < L < 1$ 。将式(6)两边取对数进行变换可得

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \ln(1 - x_k p_{ijk}) \leq \ln L \quad (7)$$

由于

$$\ln(1 - x_k p_{ijk}) = \begin{cases} \ln(1 - p_{ijk}), & x_k = 1 \\ 0, & x_k = 0 \end{cases}$$

因此式(7)可变为

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K \ln(1 - p_{ijk}) x_k \leq \ln L \quad (8)$$

比较式(8)与式(2)可知,在概率模型下,

$$a_{ijk} = -\ln(1 - p_{ijk}), b_j = -\ln L \quad (9)$$

当  $i=j$  时, $p_{ijk} = p_{iik} = 1, (1 - p_{ijk}) = 0$ ,取对数无意义。在本文中令  $p_{iik} = 0.999$ 。

## 2 基于二进制粒子群算法的成本最优节点部署算法

粒子群算法(PSO)是由 Kennedy 和 Eberhart 等于 1995 年提出的一种群体智能进化计算方法<sup>[12]</sup>,具有概念简单、搜

索效率高等特点。为解决实际工程应用的组合优化问题,Eberhart 等又提出二进制粒子群算法<sup>[13]</sup>,它通过优化可连续变化的二进制概率(即二进制变量为 1 的概率)达到间接优化二进制变量的目的。

二进制 PSO 中微粒  $i$  的各维速度更新公式与标准 PSO 一样,为

$$V_{ij}(t+1) = \omega V_{ij}(t) + c_1 \text{rand}() (P_{ij}(t) - X_{ij}(t)) + c_2 \text{rand}() (P_{gj}(t) - X_{ij}(t)) \quad (10)$$

式中, $c_1, c_2$  为学习因子, $\omega$  为惯性权重, $\text{rand}()$  是在  $[0, 1]$  范围内变化的随机数, $P_{ij}(t)$  是粒子经历的最好位置即历史最优解, $P_{gj}(t)$  是种群中所有粒子所经历的最好位置即全局最优解。

粒子位置更新公式与标准 PSO 完全不同:

$$x_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{rand}() < \text{Sig}(v_{ij}(t+1)) \\ 0, & \text{rand}() \geq \text{Sig}(v_{ij}(t+1)) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\text{Sig}()$  为 sigmoid 函数,通常取  $\text{Sig}(x) = 1/(1 + \exp(-x))$ 。

值得注意的是,虽然二进制 PSO 的速度迭代公式与标准 PSO 相同,但其意义完全不同。二进制 PSO 中速度分量  $v_{ij}$  决定了位置分量  $x_{ij}$  取 1 或 0 的概率, $v_{ij}$  越大,则  $x_{ij}$  取 1 的概率越大。在二进制粒子群算法中,仍保留了  $v_{\max}$ ,它起着限制  $x_{ij}$  取 1 或 0 的概率的作用。通过限制  $v_{ij}$ ,可使  $S(v_{ij})$  不会太接近 0.0 或 1.0。 $v_{\max}$  越大,算法越倾向于当前最优解附近的局部搜索; $v_{\max}$  越小,算法越倾向于全局搜索;当  $v_{\max} = 0$  时,算法变成纯粹的随机搜索算法。为避免算法的早熟收敛,本文将  $v_{ij}$  限制在  $\pm 4$  之间<sup>[14]</sup>,对应于  $\text{Sig}(4) = 0.018$ 。在二进制模型中, $v_{\max}$  与遗传算法的变异率的作用类似。

将二进制粒子群算法应用于本文,具体的求解步骤如下:

#### Step 1 粒子编码

本文中每个粒子的维数为  $2 * |S| * |W| + 1$ ,其中  $|S|$  是传感器类型数, $|W|$  是区域中栅格的数目。前  $|S| * |W|$  维是粒子的位置信息,取 1 或 0,分别对应是否选择某种类型的节点布撒在该区域,如图 1 所示。其中, $z_1, z_2, z_3$  表示候选的放置传感器节点的位置; $s_1, s_2, s_3, s_4$  表示不同的传感器类型;紧邻着的  $|S| * |W|$  维是粒子的速度信息;最后一维是粒子的适应度,代表该粒子对应的解的优劣质量。

z1	z2	z3									
0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
s1			s2			s3			s4		

图 1 粒子编码设计

#### Step 2 粒子群初始化

(1)初始化粒子群的参数  $\omega, c_1, c_2$ 。

$$c_1 = c_2 = 2 \quad (12)$$

在  $\omega$  中引入自适应扰动机制<sup>[15]</sup>,增强粒子群跳出局部最优的能力。

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\text{LoopCount}} \times \text{CurCount} \times \left[1 - \frac{g}{2g_{\max}}\right]^g \quad (13)$$

$$g = \begin{cases} 0, & \text{若最优解在进化} \\ g+1, & \text{若最优解已 } G \text{ 次没有进化,且 } g+1 \leq g_{\max} \\ g_{\max}, & \text{其他情况} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\omega_{\max}, \omega_{\min}$  是  $\omega$  的极大值和极小值;CurCount 是当前的迭

代次数, LoopCount 是总的迭代次数;  $g_{\max}$  是扰动因子  $g$  的最大值,  $g$  的取值如式(14)所示。

(2) 初始化微粒群的初始位置。粒子群的初始位置为随机的二进制向量, 速度在  $[-4, -4]$  之间取值。

### Step 3 粒子群适应度评价

本文的粒子适应度设计为

$$f = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K c_{ik} x_{ik} + M \{ \min \{ 0, \{ \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K a_{ijk} x_{ik} - b_i \} \} \}^2 \quad (15)$$

式中,  $M$  是罚函数因子, 一般取任意大的正整数, 以使粒子在可行区域内运动。

### Step 4 粒子更新

按照式(10)、式(11)对粒子的速度和位置进行更新。

### Step 5 循环

循环执行第 3 到第 4 步, 直到符合算法停止条件。算法停止条件为粒子的适应度变化小于给定的阈值, 或者算法迭代次数达到预定的迭代次数。

## 3 仿真及结果分析

### 3.1 仿真参数设置

假定部署区域为  $20\text{m} \times 20\text{m}$ , 监测目标出现的概率服从有边界的帕累托分布<sup>[7,8]</sup>, 密度函数为

$$F(k) = \frac{\left(1 - \left(\frac{a}{k}\right)^\alpha\right)}{\left(1 - \left(\frac{a}{b}\right)^\alpha\right)} \quad (16)$$

在部署区域内根据式(16)所示的 Pareto 分布产生一定数量的目标, 其中包含目标数量多、密度大的部分区域称为“热点区域”。图 2 所示为本文目标分布示意图, 具体参数设置为目标总数 150, 其余参数  $\alpha=1.1, a=3, b=100$ 。

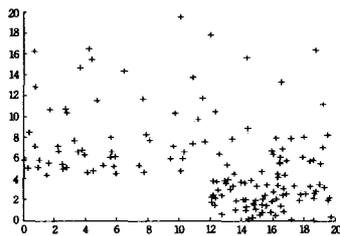


图 2 系统中目标分布示意图

系统中共有 3 种类型的传感器节点, 其参数如表 1 所列。

表 1 传感器参数表

类型	技术参数	感知半径/m	成本/Yuan
1	0.49	4	100
2	0.25	6	300
3	0.64	2	60

粒子群的规模  $NP=20$ , 最大迭代次数  $\text{LoopCount}=200$ ,  $g_{\max}=10, G=10^{[15]}, M=10000$ , 每个栅格中目标出现的阈值由系统根据目标分布自动生成。

### 3.2 结果及分析

本文以概率传感模型下的仿真结果为例(布尔传感模型下的结果与此类似)进行分析。

#### 3.2.1 算法性能评估

在运行过程中, 为了评价算法的性能, 采用 DeJong 提出的在线性能<sup>[16]</sup>(on-line performance)和离线性能(off-line performance)来衡量算法性能的优劣。在环境  $e$  下策略  $s$  的在线

性能  $X_e(s)$  定义为

$$X_e(s) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_e(t) \quad (17)$$

式中,  $f_e(t)$  是在环境  $e$  下第  $t$  时刻的平均目标函数值或平均适应度。算法的在线性能指标表示了算法从开始运行一直到现在为止的时间段内算法性能值的平均值, 反映了算法的动态性能。在环境  $e$  下策略  $s$  的离线性能  $X_e^*(s)$  定义为

$$X_e^*(s) = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T f_e^*(t) \quad (18)$$

式中,  $f_e^*(t)$  是在环境  $e$  下、在  $[1, T]$  时段内最好的目标函数值或最大适应度。算法的离线性能表示了算法运行过程中各进化代的最佳性能的累积平均, 反映了算法的收敛性能。算法的在线性能和离线性能如图 3 和图 4 所示。

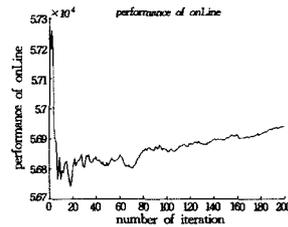


图 3 算法的在线性能

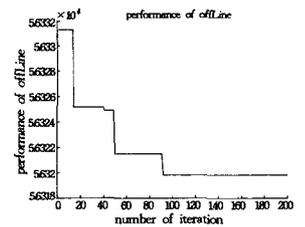


图 4 算法的离线性能

从图 3 和图 4 可以看出, 本文的粒子群算法能较快收敛到最优解, 具有较强的跳出局部最优的能力。

#### 3.2.2 算法结果

运用二进制粒子群算法求解异构节点最优部署如图 5 所示, 其中红色 \* 表示类型为 1 的传感器节点, 绿色六边形表示类型为 2 的传感器节点, 蓝色 + 表示类型为 3 的传感器节点, 其余的区域为空白区域。由图可以看出, 由于边界效应的存在, 在边界处布置的节点数较多, 密度较大。

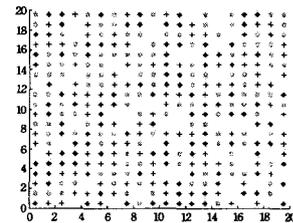


图 5 节点部署示意图

**结束语** 本文研究了异构无线传感器网络节点的成本优化覆盖问题, 提出了基于二进制粒子群算法的优化覆盖策略。该方法既适用于节点的布尔感知模型, 又能应用于节点的概率感知模型。仿真结果表明, 本文提出的优化方法有效收敛于最优解, 在保证网络的容错性和健壮性的前提下, 降低了网络部署的成本, 提高了目标监测的质量。

本文研究的是一种确定性静止异构节点部署方法, 节点的位置预先计算后进行部署。在实际中, 节点的位置一般不能预先得到, 特别是通过飞机播撒的方式进行部署时。今后的工作将集中在节点位置近似于最优位置时的部署优化问题以及借助移动节点完成网络的二次部署优化问题。同时, 本文研究的异构节点部署仅仅假定其感知半径不同, 下一步的工作将解决在节点的寿命、状态切换能力、移动性能等不同的情况下节点的优化部署问题。

## 参考文献

[1] Ghosh A, Das S K. Coverage and connectivity issues in wireless

- sensor networks: A survey[J]. *Pervasive and Mobile Computing*, 2008, 4(3): 303-334
- [2] 俞舰, 王志波, 骆吉安, 等. 面向移动目标追踪的无线传感器网络 QoS 指标体系设计[J]. *计算机学报*, 2009, 32(3): 441-462
- [3] 王雪, 王晟, 马俊杰. 无线传感网络移动节点位置并行微粒群优化策略[J]. *计算机学报*, 2007, 30(4): 563-568
- [4] 张轮, 陆琰, 董德存, 等. 一种无线传感器网络覆盖的粒子群优化方法[J]. *同济大学学报*, 2009, 37(2): 262-266
- [5] 郭怡婷, 王俊年. 无线传感器网络中基于微粒群算法的优化覆盖机制[J]. *计算机与现代化*, 2009, 6: 1-4
- [6] 林祝亮, 冯远静. 基于粒子群算法的无线传感网络覆盖优化策略[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(4): 190-193
- [7] Yu C S, Shin K G, Lee B. Power-stepped protocol: Enhancing spatial utilization in a clustered mobile ad hoc network[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(7): 1322-1334
- [8] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442
- [9] Gupta P, Kumar P R. The capacity of wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2000, 46(2): 388-404
- [10] Dhillon S S, Chakrabarty K, Iyengar S S. Sensor Placement for Grid Coverage Under Imprecise Detections[C]// *Proc. International Conference on Information Fusion*. Annapolis: IEEE Press, 2002: 1581-1587
- [11] Dhillon S S, Chakrabarty K. Sensor Placement for Effective Coverage and Surveillance in Distributed Sensor Networks[C]// *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference*. New Orleans: IEEE Press, 2003: 1609-1614
- [12] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization [C]// *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1995: 1942-1948
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]// *Proceedings of the 1997 Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1997: 4104-4109
- [14] Kennedy J, Eberhart R C, Shi Y H. *Swarm Intelligence*[M]. San Francisco, USA: Morgan Kaufmann Press, 2001
- [15] 张国富, 蒋建国, 夏娜, 等. 基于离散粒子群算法求解复杂联盟生成问题[J]. *电子学报*, 2006, 35(2): 323-327
- [16] 周明, 孙树栋. *遗传算法原理及其应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004

(上接第 40 页)

- [29] Cheeseman P, Strutz J. Bayesian Classification (AutoClass): Theory and Results [M]. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. Cambridge, MA: AAAI/MIT Press, 1996: 153-180
- [30] Erman J, Arlitt M, Mahanti A. Traffic Classification Using Clustering Algorithms [C]// *Proceedings of SIGCOMM Workshop on Mining Network Data*. Pisa, Italy, 2006
- [31] Ester M, Kriegel H, Sander J, et al. A Density-based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise [C]// *Proceedings of Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 96)*. Portland, OR, 1996
- [32] Erman J, Mahanti A, Arlitt M. Internet Traffic Identification Using Machine Learning Techniques [C]// *Proceedings of IEEE Global Telecommunications Conference*. San Francisco, USA, 2006
- [33] Bernaille L, Teixeira R, Salamati K. Early Application Identification [C]// *Proceedings of Conference on Future Networking Technologies 2006 (CoNEXT 06)*. Lisbon, Portugal, 2006
- [34] Witten I, Frank E. *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques with Java Implementations (Second Edition)*[M]. Morgan Kaufmann Publishers, 2005
- [35] Rand W. Objective criteria for the evaluation of clustering methods [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1971, 66(336): 846-850
- [36] Halkidi M, Batistakis Y, Vazirgiannis M. Cluster validity methods: part I [J]. *SIGMOD Rec*, 2002, 31(2): 40-45
- [37] Xu R, Wunsch D. Survey of clustering algorithms [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2005, 16(3): 645-678
- [38] Halkidi M, Batistakis Y, Vazirgiannis M. Clustering validity checking methods: part II [J]. *SIGMOD Rec*, 2002, 31(3): 19-27
- [39] Zander S, Williams N, Armitage G. Internet Archeology: Estimating Individual Application Trends in Incomplete Historic Traffic Traces [C]// *Proceedings of Passive and Active Measurement Workshop (PAM 2006)*. Adelaide, Australia, 2006
- [40] Karagiannis T, Broido A, Brownlee N, et al. Is P2P dying or just hiding [C]// *Proceedings of the IEEE Globecom*. Dallas, TX, 2004
- [41] Erman J, Mahanti A, Arlitt M, et al. Identifying and Discriminating Between Web and Peer-to-Peer Traffic in the Network Core [C]// *Proceedings of the 16th International World Wide Web Conference (WWW 2007)*. New York, NY, USA, 2007
- [42] Wang R, Liu Y, Yang Y X, et al. Solving the App-level Classification Problem of P2P Traffic via Optimized Support Vector Machines [C]// *Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '06)*. Jinan, China, 2006
- [43] Erman J, Mahanti A, Arlitt M, et al. Semi-supervised Network Traffic Classification [C]// *Proceedings of ACM SIGMETRICS'07*. San Diego, CA, 2007
- [44] 徐鹏, 刘琼, 林森. 改进的对等网络流量传输层识别方法 [J]. *计算机研究与发展*, 2008, 45(5): 794-802
- [45] 徐鹏, 刘琼, 林森. 基于支持向量机的 Internet 流量分类研究 [J]. *计算机研究与发展*, 2009, 46(3): 407-414
- [46] Xu K, Zhang Z, Bhattacharya S. Profiling Internet Backbone Traffic: Behavior Models and Applications [C]// *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005*. Philadelphia, PA, 2005
- [47] Bernaille L, Soule A, Jeannin M I, et al. Blind application recognition through behavioral classification [R]. RP-LIP6-2005-02-02. Laboratory of Computer Sciences, Paris 6, Pierre & Marie Curie University, 2005
- [48] Collins M P, Reiter M K. Finding Peer-to-Peer File-sharing Using Coarse Network Behaviors [C]// *Proceedings of the 11th European Symposium on Research in Computer Security (ESORICS 2006)*. Hamburg, Germany, 2006
- [49] Bartlett G, Heidemann J, Papadopoulos C. Inherent Behaviors for On-line Detection of Peer-to-Peer file sharing [R]. ISI-TR-2006-647. University of Southern California, 2006
- [50] Bernaille L, Teixeira R. Early Recognition of Encrypted Applications [C]// *Proceedings of PAM'07*. Louvain, Belgium, 2007