

## 移动传感网中基于本地信息的机会路由策略

董 婷\*

(湖南科技职业学院 电子信息工程与技术系, 长沙 410004)

(\* 通信作者电子邮箱 6938741@qq.com)

**摘 要:**在考虑节点信道质量、移动方向和速率、剩余能耗等本地信息的基础上,在移动传感网中提出了基于本地信息的机会路由策略(OR-LI)。该策略采用能在一定程度上反映信道质量的接收信号强度指示值对数-常态分布模型建立节点机会概率值;引入移动速率和方向反映节点的移动性;使用节点的剩余能耗反映节点的剩余使用寿命,实现机会路由,并通过候选节点的优选序号来确定候选点的侦听转发时间以避免报文重发。与机会路由策略 ExOR 和 OB 比,新策略更适合移动传感网,具有传输有效性高、能耗低等优点。

**关键词:**移动传感网;延时容忍网络;机会路由;信号接收强度指示值;移动速度;能耗

**中图分类号:**TP393 **文献标志码:**A

## Opportunistic routing strategy based on local information in mobile sensor networks

DONG Ting\*

(Department of Computer Technology and Electronic Information Engineering,  
Hunan Vocational College of Science and Technology, Changsha Hunan 410004, China)

**Abstract:** An opportunistic routing strategy was proposed based on the analyses of the channel quality, the movement speed and energy cost of a node synthetically. The received signal strength indicator was used to build opportunity probability. And then, the movement speed was used to reflect the node mobility. At last, the energy cost was used to express node residual life. The opportunistic routing was built by them and the preferred number of a candidate node was defined in order to determine its listening forwarding time. Furthermore the problem of package retransmission was solved. The analysis and simulation show that, compared with Extremely Opportunistic Routing (ExOR) and Opportunistic with Backtracking (OB), the new strategy is more suitable for opportunistic network with higher validity and lower energy cost.

**Key words:** mobile wireless sensor network; delay tolerant network; opportunistic routing; Received Signal Strength Indicator (RSSI); movement speed; energy cost

### 0 引言

随着传感器、无线通信等技术的飞速发展,无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)被广泛应用于环境监测、工业控制、目标跟踪等众多领域<sup>[1]</sup>。其中,以移动目标为监控对象,节点间的直接通信依靠相遇机会来实现的 WSN 称为移动传感网<sup>[2]</sup>。当前,机会网络的应用成为 WSN 中热点研究领域之一。而路由策略,作为网络组成的重要部分,会直接影响到网络的整体性能<sup>[1]</sup>。移动环境下,传感器网络路由面临着更多新的挑战。

### 1 相关工作

WSN 中大部分路由协议都是针对静态拓扑提出的确定性路由,如 LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)<sup>[3]</sup>、DD (Directed Diffusion)<sup>[4]</sup>等,即路由时先建立一条端到端的节点序列,然后每次分组转发时确定下一跳节点后再转发。尽管确定性路由方式逻辑简单,但未考虑无线信道的广播、时变和干扰不规则性。无线信道的广播特性使得一次分组转发可能被多个节点收到,且接收概率各不相同;时变特性导致网络中链路的状态随时间而改变<sup>[3]</sup>。路由协议设计过程中如果缺乏对信道广播和丢失特性的充分考虑,必将导致大量网络资源被浪费,并严重影响 WSN 的网络吞吐

量和使用寿命<sup>[3]</sup>。

针对无线信道的广播、时变、丢失特性和确定性路由策略的不足,麻省理工学院(MIT)的 Biswas 等<sup>[5]</sup>提出了机会路由,不以源-目标节点间直接可达路径为基础,节点转发包时不确定下一跳,广播报文后再利用转发候选集中的最佳节点转发报文。机会路由充分利用了无线信道的广播特性,尽可能地克服动态拓扑、链路信道变化频繁等影响,从而有效提高无线网络性能<sup>[5]</sup>。研究机会路由策略(Opportunistic Routing)来提升无线多跳网络的性能已成为当前传感器网络组网协议研究中的重要方向<sup>[5]</sup>。

ExOR (Extremely Opportunistic Routing)<sup>[5]</sup>是典型的以端到端的最短路 ETX (Expected Transmission Count)<sup>[6]</sup>值为基准的机会路由策略,由于 ExOR 以全网链路状态为基础,因此其可扩展性不强;其次,由于缺乏各备选转发节点之间的有效相互确认和协调机制, Sink 收到重复分组的概率较高;而且 ExOR 需要大量交互路由报文,使节点在传输路由报文时消耗大量的能量,不适用于能量有限的传感器网络。其他以 ETX 建立机会概率值的机会路由,如 CBF (Cluster-based Forwarding)<sup>[7]</sup>、DTRP (Directed Transmission Routing Protocol)<sup>[8]</sup>等虽然都能反应信道质量,但路由代价大,重复分组量也大。基于端到端迭代的机会路由策略,如 BitSOR (Bit-rate Selection for Opportunistic Routing)<sup>[9]</sup>等,需较高的计算量

收稿日期:2013-01-04;修回日期:2013-02-12。

基金项目:湖南省教育厅科研项目(11C0604);湖南省科技厅科研项目(2012FJ3053);湖南省教育厅重点项目(11A056)。

作者简介:董婷(1978-),女,湖南长沙人,讲师,硕士,主要研究方向:无线传感器网络。

和大量网络状态信息的采集和传播。基于地理位置的机会路由,如 MGOR(Multi-rate Geographic Opportunistic Routing)<sup>[10]</sup>、BO(Basic-opportunistic)<sup>[11]</sup>、OD(Opportunistic with Delay)<sup>[11]</sup>、OB(Opportunistic with Backtracking)<sup>[11]</sup>等,虽然省去了和地理位置相关的协议开销,但未考虑除距离外的其他因素对链路质量产生的影响,而且提供节点定位机制需要昂贵的额外设备支持。

另外,这些算法都没有考虑节点的移动方向、移动速率、剩余能耗等问题。而这些本地信息对选择下一跳节点来说都是至关重要的。因此,在考虑信道质量、节点移动方向和速率、节点剩余能耗的基础上,提出了基于本地信息的机会路由策略(Opportunistic Routing based on Local Information, OR-LI)。OR-LI 采用能在一定程度上反映信道质量的接收信号强度指示值的对数-常态分布模型<sup>[12]</sup>建立节点机会概率值;引入移动速度反映节点的移动性;使用节点的剩余能耗来反映节点的使用寿命,利用具有更高机会概率的最佳节点存储转发报文,实现机会路由,并通过候选节点的优选序号来确定候选点的侦听转发时间以避免报文重发。OR-LI 与机会路由策略 ExOR 和 OB 相比更适合移动传感网,具有传输有效性高、能耗低等优点。

## 2 机会路由系统模型与相关定义

系统模型:考虑有向图  $G = \{N, L\}$ , 其中  $N$  为网络节点数,  $L$  为节点间链路集合。若节点  $j$  在节点  $i$  的传输距离内, 则  $\exists l_{ij} \in L$ 。

定义1 节点  $i$  的邻居节点集  $Ne_i = \{j | \exists l_{ij} \in L\}$ , 即节点  $i$  传输距离内所有节点集合。

定义2 节点  $i$  到 Sink 的机会概率值  $OP_{is}$  定义为报文从节点  $i$  到 Sink 成功传输的机会概率, 机会概率值用于选择当前转发节点的下一跳, 是实现机会路由的基础和关键。

定义3 节点  $i$  到 Sink 的下一跳转发候选节点集  $C_{is} = \{j | OP_{js} > OP_{is}, j \in Ne_i\}$ , 即  $i$  的邻居点中到 Sink 的机会概率值比  $i$  到 Sink 的机会概率值大的节点集合。

## 3 算法思想

### 3.1 考虑移动节点与 Sink 间信道质量和位置关系

采用接收的信号强度指示值(Received Signal Strength Indicator, RSSI)的对数-常态分布模型作为无线传感器网络路径损耗模型,所以对节点  $i$  收到 Sink 周期性发送的 Hello 报文后的接收信号强度指示值可用式(1)表示:

$$PL(d_{is}) = PL(d_0) + 10n \lg(d_{is}/d_0) + X_\sigma \quad (1)$$

其中:  $d_0 = 1 \text{ m}$  是参考距离,  $PL(d_0)$  是经过距离为  $d_0$  后的路径损耗;  $d_{is}$  是  $i$  与 Sink 之间的距离;  $X_\sigma$  是平均值为零的以 dB 为单位的遮蔽因子;  $n$  是路径损耗指数, 由环境决定, 一般户外自由空间下  $n = 2$ <sup>[12]</sup>。

由式(1)可得到:

$$d_{is} = d_0 \times 10^{\frac{PL(d_{is}) - PL(d_0) - X_\sigma}{10n}} \quad (2)$$

考虑用  $Loc_{i,t+1}$  表示在  $t+1$  时刻移动节点  $i$  与 Sink 间的位置关系, 其中  $d_{\max}$  表示 Sink 到检测区域最远处的距离:

$$Loc_{i,t+1} = \frac{d_{\max} - d_{is}}{d_{\max}} = 1 - \frac{d_{is}}{d_{\max}} \quad (3)$$

显然  $Loc_{i,t+1}$  越大,  $i$  与 Sink 间的距离越小,  $i$  向 Sink 转发报文的成功率越高。

### 3.2 考虑移动节点的移动速率和方向

用  $\vec{dir}_{i,t+1}$  表示节点  $i$  在  $t+1$  时刻的移动速率和方向:

$$\vec{dir}_{i,t+1} = v_i / v \quad (4)$$

$$v_i = (d_{is,t} - d_{is,t+1}) / \Delta t \quad (5)$$

其中:  $\Delta t$  是 Sink 发送 Hello 报文的间隔时间,  $v$  为设定的最快速率, 即在特定场景下携带传感器节点的移动对象能达到的最大速率。设移向 Sink 的方向为正方向,  $v_i$  是  $t$  时刻到  $t+1$  时刻  $i$  节点的速度。若  $i$  节点  $t+1$  时刻收到 Hello 报文后计算的  $d_{is,t+1}$  比  $t$  时刻收到 Hello 报文后计算得到的  $d_{is,t}$  小, 表示  $i$  离 Sink 越来越近,  $\vec{dir}_{i,t+1} > 0$ , 即  $i$  向 Sink 移动; 否则有  $\vec{dir}_{i,t+1} < 0$ , 表示  $i$  离 Sink 越来越远, 即  $i$  正远离 Sink。显然  $\vec{dir}_{i,t+1}$  越大,  $i$  向 Sink 转发报文的成功率越高。

### 3.3 考虑移动节点的剩余能耗

传感器网络节点能量有限, 当节点能量耗尽后一般情况下就认为节点失效了。为了尽可能地延长网络寿命, 必须均衡网络中的节点能耗。

$$令 E_{i,t+1} = e_{i,t+1} / e_0 \quad (6)$$

其中:  $e_0$  是节点的初始能耗,  $e_{i,t+1}$  是  $i$  节点在  $t+1$  时刻的剩余能耗。显然  $E_{i,t+1}$  能反映节点  $i$  的剩余使用寿命,  $E_{i,t+1}$  越大,  $i$  的剩余能耗越多。

### 3.4 考虑移动节点的机会概率

所有节点机会概率的初始值为 0。节点  $i$  接收到的 Hello 报文后按 3.1 节~3.3 节的方法计算  $Loc_{i,t+1}$ 、 $\vec{dir}_{i,t+1}$  和  $E_{i,t+1}$ , 代入式(7)计算  $OP_{is}$ :

$$OP_{is,t+1} = OP_{is,t} + Loc_{i,t+1} \times \vec{dir}_{i,t+1} \times E_{i,t+1} \quad (7)$$

由于节点的信道质量和移动性等问题, 可能存在节点接收不到 Hello 报文。若有节点要发送数据包时已超过 1 个  $\Delta t$  的时间未收到 Hello 报文, 则考虑用式(8)衰减机会概率值, 其中  $t_{pac}$  表示节点要发送数据包的时间,  $t_{Hello}$  表示上次收到 Hello 报文的时间, 这个差值越大, 表示该节点越久未接收到 Hello 报文, 即该节点远离 Sink 或信道质量不好, 此时该节点的机会概率变小。

$$OP_{is,t+1} = OP_{is,t} / (t_{pac} - t_{Hello}) \quad (8)$$

## 4 算法步骤

本文的算法步骤如下所示:

1) Sink 周期性的广播 Hello 报文, 所有节点按 3.4 节更新其机会概率值。一段时间后, 与 Sink 节点间信道好、距离较近、移向 Sink、剩余能耗多的节点机会概率值较高, 反之则较小。

2) Sink 接收到数据报文后广播确认报文, 确认报文中包含已收到数据报文的报文号。

3) 节点  $i$  发送数据包时先计算自己的机会概率值  $OP_{is}$ , 将该数值加入报文头后直接把数据包广播。随后节点  $i$  监听是否有节点转发该报文, 若监听到其他节点转发报文或在监听期间  $i$  收到 Sink 发来已收到该数据报的确认报文,  $i$  删除数据包。若发送定时器超时后仍没有监听到其他节点转发报文且没有收到确认报文, 则重新发送该报文。若重发次数超过限定值, 则删除该报文, 不再重发。

4) 转发节点  $j$  接收到数据报文前, 如果接收到来自 Sink 的确认报文, 证明该数据报文已被 Sink 接收,  $j$  删除报文, 不再转发。否则,  $j$  从报文头部提取机会概值  $OP_{is}$ , 并与自身的机会概率值  $OP_{is}$  比对, 若  $OP_{is} < OP_{js}$  则  $j \in C_{is}$ ; 否则,  $j$  删除报文。为了避免网络中数据包的冗余重传, 考虑利用  $i, j$  间机会概率差值来确定转发候选点  $j$  的优选序号  $P_j$ 。

$$P_j = f(\Delta OP) = OP_{js} - OP_{is} \quad (9)$$

转发节点与上一跳的机会概率差越大, 其优选序号越大, 说明该节点转发的优先级越高。因为移动传感网往往对延时

的要求不高,是延时容忍网络<sup>[13]</sup>,所以考虑设定一个时间常量 $T$ , $T$ 的值可以根据移动传感网应用需求、部署的环境来确定。转发候选点 $j$ 在接收到报文后计算自己的优选序号,在 $T/P_j$ 个时间内如果监听到其他转发候选点转发数据包或 $j$ 收到 Sink 发来的已收到该数据报的确认报文,则 $j$ 删除数据包;否则, $j$ 认为自己就是优选序号最高的转发候选点,按步骤3)转发数据包。

## 5 仿真实验与分析

### 5.1 仿真实验性能评判标准

1) 协议有效性 (Validity of the Protocol, 简称 Val)。等于 Sink 收到的有效数据包(重复收到的数据包不计算)除以事件总数的百分比。

2) 网络平均能耗 (Average Energy per Event, 简称 AE)。等于网络中随机生成的事件从源节点发送到 Sink 时网络的平均能耗( $e_k$  表示第 $k$ 个节点的能耗, $N$ 为网络中节点总数):

$$AE = \left( \sum_{k=1}^N e_k \right) / \text{EventsNumber}$$

仿真实验中引入文献[3]的能耗模型计算节点收发数据包的能耗。

3) 平均延时 (Delay)。等于 Sink 接收到的数据包从源节点到目的节点延迟的平均值。

### 5.2 仿真实验参数

仿真实验中,事件随机生成,设 Sink 每 5 s 发送一次 Hello 报文,即  $\Delta t = 5$  s;节点重发数据包的发送定时器设定为 3 s,时间常量  $T = 1$  s。假设传感器节点放置在马路上,马的最大参考速率可到 60 km/h,设置  $v = 60 \text{ km/h} \approx 16.7 \text{ m/s}$ 。节点的初始能耗为  $e_0 = 1 \text{ J}$ 。Hello 报文的长度为 10 Byte,确认报文长度为 10 Byte,数据报文的长度均为 128 Byte,数据包的重传次数小于等于 5 次。传感器节点的传输距离为 20 m, Sink 每次在 100 m 范围内广播 Hello 报文。节点个数  $N$  从 10, 20, 一直递增到 100, 随机移动。网络区域大小为  $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ , Sink 点位于网络区域中心,则 Sink 到检测区域最远处距离为网络区域中心点到顶点间的距离,故  $d_{\max} = 150\sqrt{2} \text{ m}$ 。此外,在 OB 中活节点密度  $\lambda_{\text{off}} = 0.2$ ,数据报文和 beacon 的延时分别设置成 7 s 和 1 s。不考虑 Sink 能耗等问题。

### 5.3 仿真结果及分析

图 1 表示了不同节点数时协议有效性的变化。

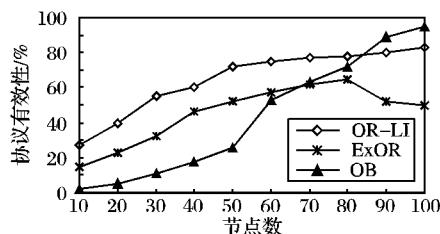


图1 协议有效性

从图1可以看出,OR-LI 的有效性高于 ExOR,节点数较少时 OR-LI 的有效性高于 OB,节点数较大时 OB 的有效性高于 OR-LI。这主要是因为当节点密度较小时,数据包可能要经过多次重传才能到达 Sink,所以三种算法的有效性都不高。随着节点个数的增多,OR-LI、ExOR 和 OB 的有效性都增大了,但是 ExOR 缺乏各备选转发节点之间的有效相互确认和协调机制, Sink 收到重复数据包的概率较高,当节点增加到一定程度后,数据包重传问题更严重了,导致了 ExOR 有效性的下降;OR-LI 则通过计算上一跳节点和当前候选点之间的机会概率差值来确定候选点的优选序号,序号高的节点才转发数据包,有

效地控制了数据包重传的问题;而 OB 是带有原路返回的机会路由,该机制能有效提高数据报文到达 Sink 的概率。

图2表示了不同节点数时网络的平均能耗。随着节点数的增大,OR-LI、ExOR 和 OB 的平均能耗都降低了,这主要是因为当节点密度较小时,网络断接频繁,所以节点平均能耗较大。OR-LI 的平均能耗低于 ExOR 和 OB,因为 ExOR 以全网链路状态为基础,网络中每个节点需要定期地全网广播自己邻接链路的 ETX 值,这给网络带来了较大的负担,当节点数增大到一定程度后,全网因广播 ETX 值报文的能耗持续增大,导致了 ExOR 平均能耗的增加。OR-LI 中仅需 Sink 周期性地广播 Hello 报文,让各节点自行计算自己的机会概率值,并通过优选序号的大小来确定下一跳转发点,有效地降低了发送数据包的平均能耗。而 OB 中大部分节点休眠,仅有  $N \times \lambda_{\text{off}}$  个节点是激活的,因此在节点总数较少时,活动节点更少,这使数据报文需多次重传才可能到达 Sink,平均能耗较大;随着节点数的增多,活动节点增多,休眠模式能较好地节约能耗,但 OB 的原路返回机制增加了平均能耗。

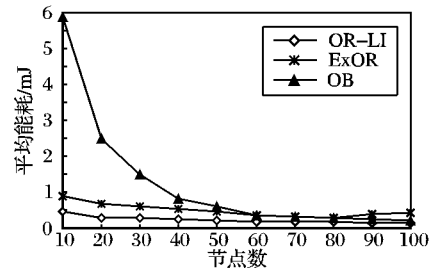


图2 网络平均能耗

图3表示了在不同节点密度下的网络平均延时,随着节点密度的增大,OR-LI、ExOR 和 OB 的平均延时都降低了,但 OB 的平均延时较高、OR-LI 次之,ExOR 最低。这是因为 ExOR 是端到端的最短路的 ETX 值为基准的机会路由算法,在节点欲发送数据时,采用逆向 Dijkstra 最短路径算法计算各邻居节点到目的节点的最小期望转发总次数,依据其到目的节点的距离设置优先级,优先级最高的节点转发数据包,因此,当网络中节点密度较大后,ExOR 的延时较小。OR-LI 中候选点 $j$ 计算自己的优选序号后,需要在  $T/P_j$  个时间内监听是否有其他转发点候选点转发了数据包,如果没有, $j$ 才转发数据包,所以 OR-LI 的延时比 ExOR 大。而 OB 中的下一跳节点需由上一跳节点唤醒,若下一跳节点中没有距离 Sink 更近的节点则等待一段时间,之后若数据报文仍未转发则可以将报文原路返回,直到找到距离 Sink 更近的下一跳为止。因此 OB 的延迟最大,特别是节点较少时,报文发生原路返回的概率更高,因此节点越少 OB 的延迟越大。可见,OB 仅适合节点密度较大的网络。另一方面,OB 假设所有节点都知道自己和 Sink 的位置信息,这给该策略的实施增加了限制条件。

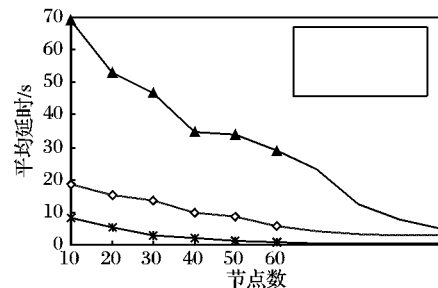


图3 平均延时

## 6 结语

针对由移动的传感器节点组成的移动传感网提出了一种  
(下转第 1518 页)

够同时利用未标记样本和已标记样本,且采取了措施来消除辅助分类器的噪声数据,保证了分类精度,而渐进的增量学习方法,在一定程度上提高了分类精度。

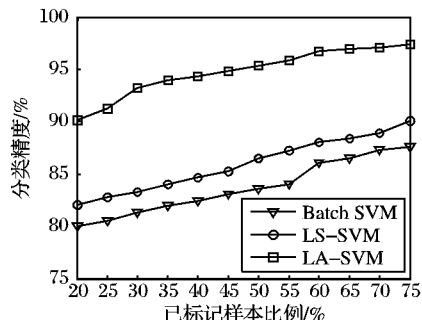


图7 改进的 Tri-training 训练下的分类精度

#### 4 结语

本文提出的支持向量机的半监督网络流量分类方法,在增量学习的基础上提出合理的确定支持向量的策略,避免一些有用的历史数据过早地被淘汰而影响分类精度。同时,改进 Tri-training 半监督学习方法,减少在协同训练分类器过程中产生的噪声数据,避免分类器交叉验证。与同类方法相比,该方法在网络流量分类的精度和训练时间方面都有一定的优势,但分类的实时性还有待进一步提升。

由于网络流量分类数据庞大,多 SVM 分类器的增量学习,将为网络流量分类提供一种新的思路。下一步的工作是:在原始和新增样本中收集尽可能少且有价值的样本,实现在大规模网络流量环境下在线增量学习。

#### 参考文献:

- [1] LI W, CANIN M, MOORE A W. Efficient application identification and the temporal and spatial stability of classification schema[J]. *Computer Networks*, 2009, 53(6): 790-809.
- [2] 张宾, 杨家海, 吴建平. Internet 流量模型分析与评述[J]. *软件学报*, 2011, 22(1): 115-131.

(上接第1507页)

结合节点接收信号强度指示值、移动速度和剩余能耗的机会路由,其中信号强度指示值反映了信道质量,移动速度反映了节点的动态特征,剩余能耗反映了节点的使用寿命。与机会路由策略 ExOR 和 OB 相比,新策略更适合移动传感网,具有传输有效性高、能耗低等优点,虽然 OR-LI 通过候选节点的优选序号来确定候选点的侦听转发时间在避免报文重发的同时带来了延迟,但这符合移动传感网中对路由策略高有效性、低能耗、延时容忍的要求。

#### 参考文献:

- [1] 尚凤军, 任东海. 无线传感器网络中分布式多跳路由算法研究[J]. *传感技术学报*, 2012, 25(4): 529-534.
- [2] PELUSI L, PASSARILLA A, CONTI M. Opportunistic networking: data forwarding in disconnected mobile Ad Hoc networks[J]. *IEEE Communication Magazine*, 2006, 44(11): 84-91.
- [3] 石为人, 柏荡, 高鹏, 等. 无线传感器网络簇头半径自适应调节路由算法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(8): 1779-1785.
- [4] 邹春学, 叶胤鹏, 许博威. 基于梯度阈值和时延的定向扩散路由协议[J]. *计算机工程*, 2012, 38(7): 77-79.
- [5] BISWAS S, MORRIS R. ExOR: Opportunistic routing in multi-hop wireless networks[C]// *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2005*. New York: ACM, 2005: 133-143.
- [6] ROZNER E, SESHADRI J, MEHTA Y, et al. Simple opportunistic routing protocol for wireless mesh networks[C]// *Proceedings of the IEEE WiMesh 2006*. Washington, DC: IEEE Computer Society,

- [3] MOORE A W, PAPAGIANNAKI K. Toward the accurate identification of network application[C]// *Proceedings of the 6th International Workshop on Passive and Active Network Measurement*. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 41-54.
- [4] THUY T T, ARMITAGE G. A survey of techniques for Internet traffic classification using machine learning[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2008, 10(4): 56-76.
- [5] 李响. 基于半监督支持向量机的网络流量分类机制的研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011.
- [6] 徐鹏, 林森. 基于 C4.5 决策树的流量分类方法[J]. *软件学报*, 2009, 20(10): 2692-2704.
- [7] 贺玲, 蔡益朝, 杨征. 高维数据聚类方法综述[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(1): 23-26.
- [8] 周伟达, 张莉, 焦李成. 支撑向量机推广能力分析[J]. *电子学报*, 2001, 29(5): 590-594.
- [9] 王晓丹, 郑春颖, 吴崇明. 一种新的 SVM 对等增量学习算法[J]. *计算机应用*, 2006, 26(10): 2440-2443.
- [10] 萧嵘, 王继承, 孙正兴, 等. 一种 SVM 增量学习算法  $\alpha$ -ISVM [J]. *软件学报*, 2001, 12(12): 1818-1823.
- [11] 曾文华, 马健. 一种新的支持向量机增量学习算法[J]. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2002, 41(6): 687-691.
- [12] GOLDMAN S, ZHOU Y. Enhancing supervised learning with unlabeled data[C]// *Proceedings of the 17th International Conference on Machine Learning*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2000: 327-334.
- [13] ZHOU Z H, LI M. Tri-training: Exploiting unlabeled data using three classifiers[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2005, 17(11): 1529-1541.
- [14] MOORE A W, ZUEY D. Internet traffic classification using Bayesian analysis techniques[C]// *Proceedings of the 2005 International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems*. New York: ACM, 2005: 50-60.
- [15] 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.

- [6] 2006: 48-54.
- [7] CAO Q, ABDELZAHER T, HE T, et al. Cluster-based forwarding for reliable end-to-end delivery in wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2007*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 1928-1936.
- [8] NASSR M S, JANGEUN J, EIDENBENZ S J, et al. Scalable and reliable sensor network routing: performance study from field deployment[C]// *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2007*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 670-678.
- [9] GRAY C, SANTHAPURI N, NELAKUDITI S. On bit-rate selection for opportunistic routing[C]// *Proceedings of the IEEE SECON 2008*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 1-6.
- [10] ZENG K, LOU W, ZHAI H. On end-to-end throughput of opportunistic routing in multirate and multihop wireless networks[C]// *Proceedings of the IEEE INFOCOM 2008*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 816-824.
- [11] AITSAADI N, BLASZCZYSHYN B, MUHLETHALER P. Performance of opportunistic routing in low duty-cycle wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the Wireless Days*. Dublin, Ireland: Wireless Days, 2012: 1-3.
- [12] 张勇. 基于 ZigBee 无线测距模型的建立[J]. *煤炭技术*, 2012, 31(9): 121-122.
- [13] 杨斌, 田勇, 檀傑猛, 等. 基于时间序列预测的延迟容忍网络路由算法[J]. *北京邮电大学学报*, 2011, 34(6): 91-94.