

# 基于梯度信息的无线传感器网络 MAC 协议研究

杨 兵<sup>1</sup> 张珂珂<sup>2</sup> 李国徽<sup>2</sup> 何伟康<sup>1</sup>

(湖北大学教育技术学系 武汉 430062)<sup>1</sup> (华中科技大学计算机科学与技术学院 武汉 430074)<sup>2</sup>

**摘要** 在无线传感器网络中,MAC 协议负责协调节点竞争,为节点分配共享的无线信道资源。使用节点采集信号强度信息来划分梯度,依据梯度将事件域内节点分配到不同时间空间中竞争信道,可以减轻信道的负担。仿真实验表明,引入自适应的梯度划分算法能很好地适应网络拓扑结构的变化,采用的梯度跳跃机制可以有效减小由于梯度划分而带来的延迟,并且,所设计的空间相关性控制策略能够有效减小重建误差。

**关键词** 无线传感器网络,空间相关性,介质访问控制,梯度划分

**中图分类号** TP311 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2015.5.025

## Medium Access Control Protocol of Wireless Sensor Networks Based on Gradient Information

YANG Bing<sup>1</sup> ZHANG Ke-ke<sup>2</sup> LI Guo-hui<sup>2</sup> HE Wei-kang<sup>1</sup>

(Department of Educational Technology, Hubei University, Wuhan 430062, China)<sup>1</sup>

(School of Computer Science & Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)<sup>2</sup>

**Abstract** In wireless sensor networks (WSN), medium access control (MAC) protocols determine the usage mode of wireless channel and allocate shared radio resource among sensor nodes. In this paper, we introduced a new channel competition mechanism to allocate the channel resources for the nodes. The protocol utilizes the signal strength collected by nodes to partition gradients. Based on that, we assigned the nodes in the event region to different time period to contend for the channel. The simulation result proves this method has lightened the burden of channel. And we proposed a self-adaptive gradients partition algorithm which makes the gradients partition more flexible and can adapt to the changes of the network topology very well. At the same time, a gradient jumping mechanism to reduce latency caused by gradients partition was designed. At last, this protocol also gives a strategy to control the distortion of reconstruction caused by spatial correlation of nodes.

**Keywords** Wireless sensor networks, Spatial correlation, MAC, Gradient partition

## 1 引言

在无线传感器网络中,介质访问控制协议(Medium Access Control, MAC)主要协调传感器节点竞争,为节点分配共享无线信道资源,创建整个网络的基础结构<sup>[1]</sup>,其性能的好坏直接影响无线信道利用效率和整个网络的性能<sup>[2]</sup>。

数据发送和接收是无线传感器网络能量消耗的主要因素,而 MAC 协议控制着节点的收发和信道使用方式,它能否协调好节点竞争,将数据包无冲突地发送出去,直接影响到节点寿命<sup>[3]</sup>乃至整个网络的生命周期。并且,传感器网络拓扑会由于各种原因(如节点失效等)频繁发生变化<sup>[4-6]</sup>,MAC 协议只有具有一定的适应能力,才能保证整个网络正常高效运行。同时,大多数传感器网络应用都对延迟有一定的要求,尤其是目标跟踪应用,它要求对机动目标做出快速反应,对网络延迟有更高要求,还要保证目标位置重建的精确性。

针对目标跟踪应用对延迟、目标位置重建精度等要求,本文提出 GB-Sift MAC 协议,对 Sift 协议<sup>[7]</sup>进行了扩展,使得每一次事件发生时,能够对事件域内节点进行合理调度,选择合适节点进行上报。上报工作完成后再使用其他协议,比如 S-MAC 等,将此次事件产生的数据信息发送到 Sink 节点。这样充分利用各个协议优点,从而提高网络性能。

本文第 2 节介绍相关工作;第 3 节介绍 GB-Sift MAC 协议设计思想;第 4 节给出性能评价;最后总结全文。

## 2 相关工作

针对不同的应用,研究人员提出了许多专用于无线传感器网络的 MAC 协议。MAC 协议以其在传感器网络中的重要地位,一直是研究的热点。目前的 MAC 协议主要考虑能量有效的问题,同时也有些协议在设计时兼顾了延迟等方面的因素。到目前为止,学术界所提出的 MAC 协议大致分为 3

到稿日期:2014-02-11 返修日期:2014-04-18 本文受国家自然科学基金项目(61170093),中国博士后科学基金项目(20110491149),湖北省自然科学基金(2013CFB003),湖北省信息化与基础教育均衡发展协同创新中心基金项目(201406),湖北大学教学改革与研究项目(201309)资助。

杨 兵(1975-),男,博士后,副教授,主要研究领域为移动实时数据库系统、无线传感器网络;张珂珂(1985-),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络;李国徽(1973-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为现代数据工程、实时数据库系统、无线传感器网络;何伟康(1990-),男,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络、物联网教育应用。

类<sup>[8,9]</sup>;基于竞争的 MAC 协议、基于调度的 MAC 协议以及混合接入和跨层 MAC 协议。

基于竞争的 MAC 协议以随机竞争的方式抢占信道,是研究最早、最成熟的 MAC 协议。其基本思想是:节点以竞争的方式抢占信道,若发现冲突,则使用特定的回退策略重新抢占,直到发送完成或放弃本次发送<sup>[10]</sup>。IEEE802.11 是其最典型的代表,随后研究人员在 IEEE802.11 的基础上又提出了许多基于竞争的 MAC 协议,比如 S-MAC、T-MAC、B-MAC<sup>[11]</sup>和 Sift-MAC 协议等。

基于调度的 MAC 协议的基本思想是:采用某种调度策略将节点分配到相互独立的子信道中以实现发送,因此调度协议被称为是无冲突 MAC 协议<sup>[12]</sup>。目前研究最为成熟的是基于时分复用(TDMA)的 MAC 协议。这类协议的代表有 TRAMA 协议、DMAC 协议、DEANA<sup>[13]</sup>(distributed energy-aware node activation)等。频分复用(FDMA)以及码分多址(CDMA)由于其实现复杂且成本高或受限于传感器网络的特点,因而研究尚不是很深入。

混合接入的 MAC 协议充分利用了基于调度和竞争的 MAC 协议的优点,在不同的阶段采用不同的接入方式<sup>[14]</sup>,从而实现优势互补,进而提高网络的性能。具有代表性的混合接入 MAC 协议有:Z-MAC(Zebra MAC)<sup>[15]</sup>、Funneling-MAC<sup>[16]</sup>等。

跨层设计的 MAC 协议的设计思想是通过各层之间的信息共享和交换来满足全局需要。由于节点资源有限,分层协议栈已不能很好地处理能量、内存等的有效利用<sup>[17]</sup>。通过将 MAC 与其他网络层结合起来优化网络,期望能获得更高的性能。具有代表性的有 AIMRP(address-light integrated MAC and routing)协议<sup>[18]</sup>、SARAM-M 协议<sup>[19]</sup>等。

Sift MAC 协议以一种全新的思路来解决节点竞争信道的问题。该协议在设计时充分考虑了传感器网络的以下特性<sup>[20]</sup>:

第一,时间和空间相关性。在传感器网络中,任何一个事件的发生都会引起事件源附近多个节点同时侦测到该事件,这样就形成了节点在事件监测区域上的空间相关性。事件发生以后,侦测到事件的节点要同时组织并上报信息,这样就形成了节点发送的时间相关性。

第二,针对一个事件,只需要一部分相关节点上报,就能获得关于该事件的足够信息。

第三,事件源内节点分布密度随时间不断变化。协议要对节点数目有一定的适应能力。

Sift MAC 协议充分利用了传感器网络的以上 3 个特性,同时考虑了可扩展性,解决了对竞争节点数目变化的适应性问题。Sift 协议的设计目标是:将观察到事件的  $N$  个节点中  $R(R \leq N)$  个节点以最快方式完成上报工作。Sift 协议成功解决了以往基于竞争 MAC 协议窗口调整的问题,大大减轻了网络负载,减少了网络冲突和事件上报延迟。

与以往基于竞争 MAC 协议不同的是,在 Sift 协议中参与竞争的节点在不同竞争时槽上有着不同的发送概率,竞争节点依据概率选择发送时槽。节点在第  $r$  个竞争时槽发送数据的概率  $p_r$  可由式(1)计算。该协议使用非均匀概率分布为节点分配发送时槽。

$$p_r = \frac{(1-\alpha)\alpha^{CW}}{1-\alpha^{CW}} \alpha^{-r}, 0 < \alpha < 1, r=1, \dots, CW \quad (1)$$

式中, $\alpha$  为分布参数, $CW$  为竞争窗口大小。 $\alpha$  的选择与  $N$ (节点数)和  $CW$  有关。

同时该协议还是一个非坚持 MAC 协议,也就是在任何一次成功传输或冲突结束后,所有参与竞争的节点都会放弃自己先前选择的时槽,并重新开始新一轮的时槽选择。而 802.11 等其他 MAC 协议记住上次剩余的时槽数目,一旦信道空闲就恢复计数器继续计数。

Sift MAC 协议满足了事件驱动传感器网络应用的大部分需求,成功解决了对节点数目变化的适应性问题,提供了低延迟并降低了大量能耗。该协议非常适合事件驱动传感器网络应用,也能满足目标跟踪应用的大部分需求,但依然存在着不足。

目标跟踪应用对目标定位精度有一定要求,也就是说要尽量减小 Sink 节点根据传感器节点传回的报告重建的目标位置与实际目标位置之间的误差。文献[21]分析了数据收集策略对目标位置重建的影响,指出通过合理地调度节点的上报,Sink 节点在重建目标位置时所产生的误差会远远小于随机选择节点上报所带来的误差。

Sift 虽然使用了非均匀概率分布给每个竞争时槽分配了概率,但是事件源内的所有节点在发送上都是公平的,可以认为协议是随机地在事件源内选择节点上报。这种方式会使得一些离事件源很远但侦测到事件的节点成功上报,这些节点的上报只会增加目标重建的误差。所以 Sift 虽然拥有提供了低延迟等诸多优点,但是仍不能完全满足目标跟踪应用的需求,而解决的方法是有选择、合理地调度事件源内的节点进行上报。本文提出的基于梯度信息的 MAC 协议正是立足目标跟踪应用的。

文献[22]中使用一种简单的模型证明了随机选择节点上报会造成较大的误差,并给出了随机上报和以距离优先的策略上报两种情况所引起的误差对比图。从误差对比图可以看出,以与事件源的距离作为指导来选择节点进行上报的方式所产生的目标重建误差会远远小于使用随机方式上报所造成的误差;而且目标重建误差并不是随着上报节点的数目的增加而一直减少,而是在一定范围内会逐渐减少,当节点数目超过一定的数值后,重建误差反而会不断上升,这是因为距离事件源远的节点的上报会带来较大的误差。

因此在目标跟踪应用中要保证目标重建的精度,必须合理地调度事件域内的节点上报,这是 Sift 协议所不能完成的。本文协议设计的主要目标就是使用基于信号强弱梯度信息的分布式调度策略对事件域内的节点进行选择,尽可能地让靠近事件源的节点上报而抑制其他距离较远的节点的上报。

### 3 基于梯度信息的 MAC 协议的设计思想

Sift 协议使用式(1)所示的概率分布为各个竞争时槽分配了不同的发送概率,该方法取得了很好的效果。本文的基于梯度信息的 MAC 协议(Gradient Based Sift, GB-Sift 协议)将继续使用该方法,只不过 GB-Sift 协议将整个竞争窗口( $CW$ )依据梯度划分成相应的多个段(小竞争窗口),在每个段中分别使用非均匀概率分布的方法为段内时槽分配发送概率。同时 GB-Sift 协议加入对重建误差进行控制的功能模块。下面将详细介绍 GB-Sift 的具体设计过程。

#### 3.1 梯度的引入

为了能够在竞争节点中有效地选择上报节点,以提高定

位的精度,本文引入了梯度的概念。梯度是根据节点采集信号强度来划分的,是节点上报的依据。梯度的划分是本文设计协议的基础。

梯度的划分其实就是对节点采集信号强度的划分,不同的梯度代表着不同的信号采集强度区域。通过梯度的划分,事件域内的节点被划分到不同的区域中,如图1所示。通过分配不同梯度内节点到不同的竞争窗口中去竞争信道,来实现减轻信道负担、减少冲突和碰撞的目的。

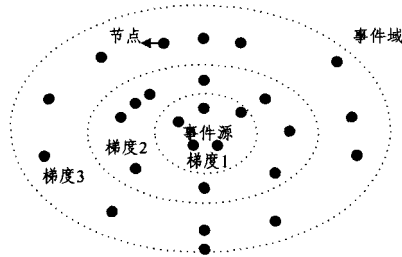


图1 依据梯度信息对事件域的划分

采集信号的强度与具体的应用有关,在划分梯度时,使用的是应用中有效的采集信号范围。每个节点都会保存一份关于梯度的划分,初始时,梯度的划分可以根据具体应用以及误差要求划分,或者只是简单地将有效采集信号划分成均等的3份来完成梯度的划分。初始划分对协议影响不大,因为节点在运行时可能会采用3.3节中介绍的自适应梯度划分算法来不断地调整梯度的划分,进而使得梯度的划分能够适应网络拓扑结构的变化。

### 3.2 竞争窗口的划分

竞争窗口的划分是本文中协议的基础,因此本文对节点的竞争窗口进行了仔细的划分。在竞争窗口的划分中采用了交叉划分的方法,这样做是因为竞争窗口的大小有限,如果不使用交叉划分,每个梯度分配的时槽数就会很少(平均为10个),那么当某梯度内的节点数目过多时,将会产生冲突。

本文希望所有的节点都能在梯度1对应窗口内进行发送,所以在协议中梯度1对应窗口大小设得大一些,设置为16。将梯度1对应的窗口大小设为16是基于如下事实,即将Sift协议中的竞争窗口大小设为16和设为32时,在节点数目不是很多时,其性能差别很小,也就是说窗口虽然缩小了,但平均延迟却在一个可以接受的范围。梯度2和梯度3主要用来容纳部分竞争节点,进而缓解梯度1的竞争压力,因而它们对应的窗口大小会比梯度1的小,设为12。分布在梯度2和3内的节点,可以通过3.4节介绍的梯度跳跃机制跳跃到梯度1中去,进而在梯度1对应的时槽中竞争发送。

在决定了各个梯度对应的竞争窗口大小后,本文将详细地介绍交叉时槽的划分。文献[7]指出了其所使用的概率分布可以划分成3个区:低概率区、中概率区和高概率区,并说明了当节点数目多时节点将在低概率区成功发送,节点数目适中时节点会在中概率区发送成功,当节点数目少时会在高概率区发送成功。

根据Sift协议的这一思想,本文设计了交叉划分的方法:让梯度2对应的竞争窗口中概率小的区域与梯度1对应的竞争窗口的概率大的区域重叠,而且重叠部分很小,只有3个时槽(时槽13、14、15)。这样如果处于梯度1内的节点选择这3个时槽发送,那么就有理由认为此时梯度1内的节点数目很少,可以将梯度2内的节点引入到梯度1(通过跳跃机制),这

样非但不会影响梯度1内节点的发送,反而可以加快节点的上报工作。因为节点数目增多,会有节点选择小概率区域进行发送,而选择小概率区域意味着更少的空时槽等待。同理,梯度2和梯度3也有交叉,交叉时槽是20、21、22、23、24,共5个时槽。梯度2和梯度3的窗口的交叉区域比较大,这样做是因为梯度2和梯度3对应的窗口不是用来发送的,它们是用来缓存节点的。

综上所述,GB-Sift协议中将竞争窗口划分成3段,梯度1对应的段为 $[0, 16)$ ,梯度2对应窗口为 $[13, 25)$ ,梯度3对应窗口为 $[20, 32)$ ,这样一个原本大小为32的竞争窗口就被划分成了3个小的竞争窗口。同一梯度内的节点只能在其对应的小窗口内竞争发送时槽,事件源内的所有节点也因此被划分成了3个区域,并在3个不同的时段(小竞争窗口)内竞争时槽。

### 3.3 分布式自适应梯度划分算法

梯度的划分对协议的设计至关重要,一方面它要保证落在梯度1内的节点达到一定的数量,至少要大于等于 $R$ (应用所需上报数)。另一方面梯度1的范围又不能太大,否则会影响目标重建的精度。为了能够合理地划分梯度并能很好地适应拓扑的变化,本文提出了一种快收缩慢扩张(quickly shrink and slowly expand)的自适应梯度划分算法。

该算法的主要思想是:梯度的划分并不是一成不变的,所有节点根据自己对梯度内节点数目的估算,来合理地调整梯度的范围。该算法主要针对梯度1的划分,因为本文协议希望所有的事件上报都在梯度1对应的时槽内完成。对梯度2和梯度3使用了假收缩和假扩张的策略。梯度3的范围是不会发生变化的,实际变化的只有梯度1的范围。梯度1的范围扩展有一定的限制,它不应超过梯度2的上限。

### 3.4 梯度跳跃机制

梯度的划分工作完成后,由于每个梯度对应一个小的竞争窗口,并且不同梯度内的节点在发送时有一个时间顺序(先是梯度1内节点,然后依次是梯度2、梯度3),这样就出现了一个问题,即当梯度1内没有节点时,梯度2内的节点就成为优势节点,但它们要发送还不得不等待至少13个空时槽(因为那些时槽属于梯度1);更糟糕的是如果一事件发生,能感应到此事件的节点都在梯度3,那么节点在每次竞争发送前则至少要等待20个空时槽。这样就会浪费很多的时间。为了解决这一问题,本文提出了梯度跳跃机制。

首先,在每个要发送的数据包中加入一个字段,用来指示当前发送节点所处的梯度(该梯度是节点的实时梯度,不同于3.3节中的梯度),那么所有收到数据的节点(不一定是数据包的目的节点)会根据数据包内的梯度信息来修改自己的梯度,以实现梯度的跳跃。如果节点从收到的数据包中解析出来的梯度数值大于1,那么它就有理由认为梯度1内的节点都发送完了,就可以实现梯度的跳跃了,于是它将自己的梯度值减1,这样梯度2的节点就会进入到梯度1,也就消除了空等待的时间。本文在仿真实验部分设计了专门的实验来测试梯度跳跃机制的性能,通过实验可以发现,梯度跳跃机制能大大缩短节点上报时间,尤其是所有节点都处于梯度3时。

除了上述情况会发生梯度的跳跃外,当节点预测到自己所在梯度内的节点数目过多时,也会出现梯度跳跃情况。具体方法是设置重传阈值(实验中短重传阈值为3,长重传阈值为

为2),一旦节点连续重传的次数超过该阈值,则节点认为此时信道的竞争过于激烈,即自己所处梯度内的节点数目过多。于是节点主动退出该梯度,降到下一个梯度中去,然后重新竞争信道。这样如果某一个梯度内的节点数目过多,冲突不断产生,那么这些冲突的节点就会对当前信道竞争情况做出一个预测,然后及时地调整自己的梯度,进而从一定程度上缓解该梯度内节点的竞争。通过这种方式,节点能够对信道的竞争情况进行监测,并及时做出调整,尽量使信道的竞争保持在一个合理的范围。

梯度跳跃机制缓解了由于竞争窗口的划分所带来的空时槽等待的问题,使得协议更加灵活,能够快速适应节点数目以及拓扑的变化。

### 3.5 节点空间相关性的控制策略

文献[23]给出了一种计算目标重建误差的模型,如式(2)所示,同时指出了两种影响重建误差的因素:

1)上报节点与事件源的距离,距离越近则误差越小,反之则越大。

2)上报节点之间的距离,上报节点在空间上的相关性,使得若上报节点距离越近,它们上报的数据相关性就越大,从而会加大重建误差。

$$D_E(M) = \sigma_s^2 - \frac{\sigma_s^4}{M(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)} (2 \sum_{i=1}^M \rho(s, i) - 1) + \frac{\sigma_s^6}{M^2(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j \neq i}^M \rho(i, j) \quad (2)$$

在式(2)中,干扰噪声使用了高斯白噪声模型。节点采集信号  $S_i$  采用的是联合高斯随机分布模型。 $\sigma_s^2$  为所有节点采集到的事件强度的方差信息, $\sigma_n^2$  为高斯白噪声的方差。 $\sigma_s^2$  是一个统计值信息,可以由 Sink 节点通过对整个网络的上报情况进行统计而得出。 $\rho(i, j)$  是节点  $i$  采集信号强度  $S_i$  和节点  $j$  采集信号强度  $S_j$  的相关系数。 $\rho(s, i)$  表示  $S_i$  和事件源处强度  $S$  的相关系数。相关系数由式(3)定义,其中  $d$  为节点之间的距离。

$$\rho(i, j) = \frac{E[S_i, S_j]}{\sigma_s^2} = e^{-d/\theta_1} \theta_2, \theta_1 > 0, \theta_2 \in (0, 2] \quad (3)$$

本文中协议通过梯度的划分来限制上报节点的范围,进而解决上述第一个问题。而针对第二个问题,本文通过对式(2)的分析,得出了重建误差与上报节点间距的关系,进而提出了一种能控制节点空间相关性的方法。具体分析过程如下:

在式(2)中,固定上报节点数  $M$ ,将该  $D_E$  看成是  $d$  的函数。假定所有上报节点之间的距离都是相等的,设为  $d$ ,那么式(2)就可以转变成式(4):

$$D_E(d) = \sigma_s^2 - \frac{\sigma_s^4}{M(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)} (2 \sum_{i=1}^M \rho(s, i) - 1) + \frac{(M-1)\sigma_s^6}{M(\sigma_s^2 + \sigma_n^2)^2} e^{-d/\theta_1} \quad (4)$$

从式(4)中可以看出,重建误差是随节点间距的减小而增加的。 $d$  越小,上报的数据相关性越大, $d=0$  时误差达到最大值。由于应用对重建误差有一定的要求,将之设置为  $D_{Max}$ ,将  $D_{Max}$  代入式(4),然后计算出  $d$  的值。该  $d$  被称作相关半径,节点  $i$  周围半径为  $d$  的区域被称为节点  $i$  的相关区域,如图2所示。节点收到数据包后,会判断自己离发送节点的距离,如果距离小于相关半径,则会增加自己的梯度值,让出发送权。通过这种方式发送节点将屏蔽其相关区域内其它

节点的发送,进而减小上报数据的相关性。

开始运行时首先要估算出一个相关半径  $r$ ,估算方法是:根据节点分布密度,在梯度1范围内的区域内随机地分布  $N$  个节点, $N$  由节点分布密度和梯度1面积计算得来。然后随机地在  $N$  个节点中选择  $R$ (应用所需上报数)个,根据这  $R$  个节点的位置信息,计算出式(4)中的  $(2 \sum_{i=1}^M \rho(s, i) - 1)$ ,这样就可以初步估算出一个相关半径  $r$ ,并发送给所有传感器节点。能使用此种方法估算的原因是:传感器节点的分布都是随机的,而且上报节点的范围被限制在梯度1内,因此可以在梯度1的范围内模拟一个随机的场景来代替现实的情况。在以后的运行中,节点在发送数据时要携带其关于梯度1划分的值以及位置信息,这样 Sink 节点就会不断地根据网络情况动态地计算和调整相关半径的值,然后发送给网内节点。

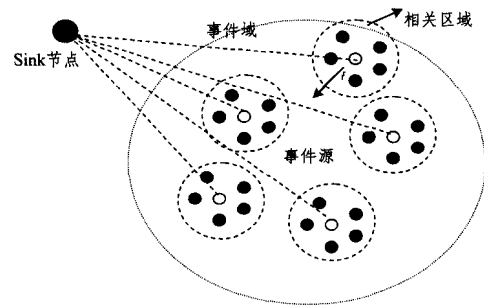


图2 节点相关半径  $r$  和相关区域示意图

整个估算相关半径的过程中使用的都是网络中的统计信息值,因此,就算传感器网络的拓扑由于节点失效或新节点的加入而发生变化,也不会对估算结果造成太大的影响,除非节点的数量大幅度地减少。那么此时这些节点采集的信息也就不可能达到应用的需求了,因此这些上报的信息也就没有太大意义了。

### 3.6 信道竞争机制

信道竞争机制主要是解决节点如何选择发送时槽以及如何抢占发送信道的问题。本文中所使用的协议的信道竞争机制是:首先将竞争窗口划分成3个区域,依据梯度的划分,不同节点被分配到不同的竞争区域中,然后在各自的区域中会使用 Sift 协议的分布式概率竞争的方式来在本节点所对应的竞争窗口(小窗口)中选择发送窗口。

信道的竞争的过程是:所有节点根据自己采集信号的程度值计算出所处梯度并运行自适应的梯度划分算法,然后找出自己对应的竞争窗口,进而使用非均匀概率分布的方式在自己所处的竞争窗口中选择发送时槽。在竞争信道的过程中,节点通过分析收到的数据包,对整个信道情况和节点相关性进行评估,及时地调整自己的梯度值,然后重新计算发送时槽,等待发送,直至事件收集完毕。

## 4 实验仿真

网络模拟平台版本是 NS 2.29<sup>[24]</sup>。无线传播模型使用双径地面反射模型(TwoRayGround)。天线模型使用 Omni-Antenna 全向天线。队列则使用了 DropTail/PriQueue,队列大小设为 50。节点的通讯距离和载波监听距离使用的是 NS2 中默认的,分别为 250m 和 550m。仿真参数配置如表1所列。

表 1 仿真参数配置

参数	值
节点通讯距离	250m
载波侦听距离	550m
时槽大小	20 $\mu$ s
竞争窗口	32
分组长度	64Bytes
初始能量	1000J
空闲侦听能耗	334.2mW
发送能耗	386mW
接收能耗	368.2mW
链路速率	1Mbps

#### 4.1 上报节点分布分析

为了测试 GB-Sift 协议在调度事件源内节点上报的优势,即查看 GB-Sift 是否能够在事发区域合理地调度节点上报,设计了如下两个实验,并分别给出了上报节点分布的对比图。

实验 1:固定节点数目为 128,控制节点的拓扑结构,变化梯度 1 内的节点数  $N$ ,然后分别运行 Sift 协议和 GB-Sift 协议。针对  $N$  的某个取值,计算出此次事件上报过程中前  $N$  个成功上报的节点中处于梯度 1 内的节点数目  $X$ ,最后绘出  $X/N$  随  $N$  的变化图,如图 3 所示。为了对比方便,给出了在完全随机的情况下(所有节点发送概率相等)的一个曲线。

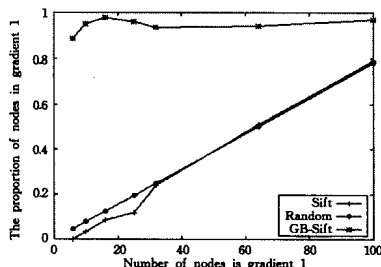


图 3 上报的前  $N$  个数据包中,梯度 1 内节点所占比例

本次实验的网络拓扑结构是随机生成的,128 个节点分布在  $200 \times 200$  的一个矩形区域内。为了控制梯度 1 内的节点数目,改进了随机生成拓扑的命令,添加了一个参数用于表示要生成的拓扑结构中梯度 1 内的节点数目。在生成拓扑时,首先随机生成梯度 1 内的节点,然后随机生成梯度 2、3 内的节点。

从图 3 中可以看出,Sift 协议很接近随机的情况。因为 Sift 协议虽然规定了每个发送时槽有不同的概率,但是每个节点的上报概率是相等的(随机的)。而 GB-Sift 协议则根据梯度划分,赋予每个节点不一样的发送概率,使得它能以梯度划分为指导,有效地选择合适的节点进行上报。梯度 1 内的节点都是距离事件源近的节点,因而 Sink 节点收到的梯度 1 内节点上报的信息越多,则目标重建的误差越小。

实验 2:固定节点数目为 128,确定上报数目为 32,变化梯度 1 内的节点数目  $N$ ,然后给出上报节点中梯度 1 内的节点所占的比值,如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,使用 GB-Sift 协议后,对节点上报的调度十分接近于最好情况(让距离事件源近的节点先上报)。GB-Sift 协议由于使用了梯度的划分,采集信号强度大(距离事件源近的节点)的节点有较大的优势获得信道,进而成功发送上报,而其他采集信号弱的节点会被抑制,直到事件收集结束。同时可以看出,由于使用了交叉时槽划分及梯度跳跃机

制,使得部分处于大梯度范围内的节点能成功地在比其梯度值小的节点对应的发送时槽内成功发送,因此协议的性能会与最优的情况有一定的差距。

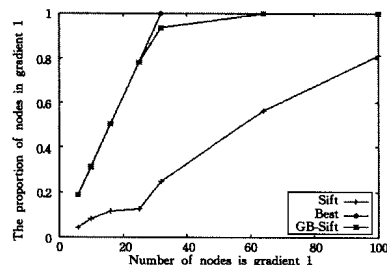


图 4 上报节点中梯度 1 内节点所占比例

GB-Sift 协议的设计目的就是尽可能地让离事件源最近的节点上报。从图 3 和图 4 中可以看出,GB-Sift 协议对节点上报的调节十分有效,基本上达到了预期目的。

#### 4.2 重建误差分析

在分析目标重建误差时,为了分析 GB-Sift 协议在重建误差上的优势,设计了如下两个实验。

实验 3:固定节点数目为 128,所需上报节点数目  $R$ (式(2)中的  $M$ )为 16,节点随机分布于  $200 \times 200$  的区域范围内。通过调整分布于梯度 1 内的节点数目来分析 GB-Sift 协议的重建误差。

针对节点在梯度 1 内的数目,每次运行仿真 15 次,然后取误差的平均值,得出 GB-Sift 协议、Sift 协议和 MAC802.11 协议三者的对比图,如图 5 所示。

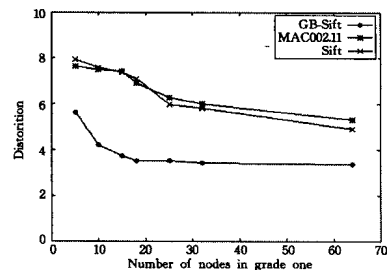


图 5 重建误差随梯度 1 内节点数目的变化

从图 5 可以看出,随着梯度 1 内节点数目的增多,Sift 协议和 MAC802.11 的重建误差都有所下降,因为这两个协议是随机选择节点上报的,因此当梯度 1 内的节点数目增多后,其选择的上报节点中距离事件源近的节点数会增多,因此会使重建误差逐步减小;而同时由于它们都采用了随机上报策略,因而这两条曲线很接近。GB-Sift 协议则在梯度 1 内节点数目超过 16 后就达到一个平稳状态,这说明协议能很好地调度事件域内节点的上报。由于合理的调度,能尽量选择距离事件源近的节点上报,因而重建误差明显小于随机选择上报的协议。

实验 4:固定节点数目为 128,设定梯度 1 内节点数目为 20,变化上报节点数目  $R$ ,实验方法与实验 1 相同,误差的计算方法也相同。给出重建误差随上报节点数目变化的对比,如图 6 所示。

从图 6 可以看出,对于随机选择节点上报的协议 Sift、MAC802.11,在随着上报节点数目增加的情况下,误差有所下降。但是 GB-Sift 协议在上报节点数目达到一定程度后,误差会逐步增加,这是因为随着上报节点数目的增多,超过梯

度 1 内的节点数目后,协议不得不选择其他梯度的节点上报,而这些节点远离事件源,因而会带来较大的重建误差,从而使得本次重建的误差不断增加,直至接近随机上报的情况。

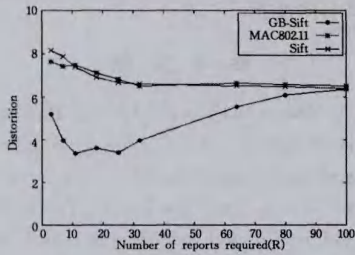


图 6 重建误差随所需上报数目 R 的变化

### 4.3 延迟分析

这里的延迟指的是端到端的延迟,即事件包从节点 Agent 层出发开始,到 Sink 节点的 Agent 收到该数据包为止的时间。在本次实验中,为了接近真实,采用完全随机的拓扑结构,并没有指定梯度 1 内的节点数(将随机生成拓扑命令的相应参数设为 0)。为了分析延迟,设计了以下两个实验。

实验 5: 固定节点数目为 128, 节点随机分布于  $200 \times 200$  的区域内。为了方便,将 Sink 节点设在区域的正中央,并且将事件源与 Sink 节点位置重合。然后,变化需要上报的节点数目 R 来分别进行仿真。通过仿真,计算出节点发送 R 个包所用的总时间,即第 R 个数据包到达 Sink 节点 Agent 层的时间,并绘出了 GB-Sift 协议、Sift 协议和 802.11 协议的对比,如图 7 所示。

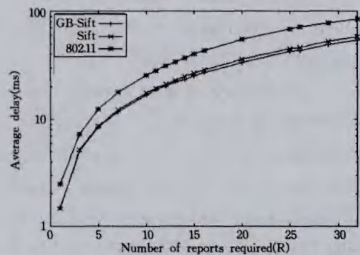


图 7 发送 R 个数据包所用延迟对比图

从图 7 可以看出,GB-Sift 协议的性能和 Sift 协议的性能非常接近,而且此二者的性能远远好于 802.11 协议。这是因为 GB-Sift 协议和 Sift 协议使用了相同的竞争机制,这种分布式概率取胜的竞争机制能更快地协调节点进行无冲突的发送。但是由于 GB-Sift 协议使用了梯度跳跃机制和自适应的梯度划分算法,能有效地减少空等待的时间,并减少同时竞争信道的节点数目,因而 GB-Sift 协议能更快地调度事件源内的节点进行上报。

实验 6: 固定所需上报节点数  $R=16$ , 变化节点数  $N=16, 25, 32, 64, 128, 200, 256, 512$ , 然后分析每个包的平均延迟。节点分布区域依然是  $200 \times 200$ , 并使用随机拓扑结构。图 8 给出了 GB-Sift、Sift 和 802.11 协议前 16 个数据包的平均延迟对比。

由图 8 可以看出当节点数目少时,GB-Sift 协议的性能和 Sift 协议十分接近。随着节点数目的增多,GB-Sift 协议反而能更好处理节点的上报,包的平均延迟有所下降。这是因为,自适应的梯度划分算法可以很好地适应节点数目及拓扑的变化,虽然节点数目增多,但梯度 1 内的节点始终会保持在一个

合理的范围,因此延迟不会增加。同时由于节点分布密度的增加,梯度 1 内的节点数目超出应用所需上报数目,因此其他梯度内的节点都会被屏蔽掉,梯度 1 内的节点会在小时槽内竞争成功,协议也不会运行梯度跳跃机制(会增加延迟),因而延迟会有所下降。Sift 协议随着节点数目的增多,延迟也有所下降,这是因为随着节点数目增多,更多的节点选择小的时槽发送,减少了时槽的等待时间。但是随着节点数目的增多,冲突也会发生,因此其性能比 GB-Sift 协议稍差。

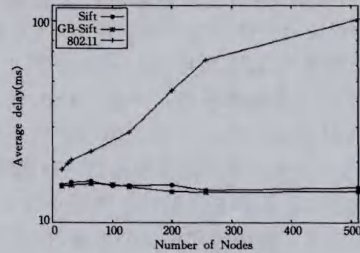


图 8 前 16 个数据包的平均延迟

### 4.4 公平性分析

公平性是指竞争无线信道的节点能否公平共享无线信道的带宽。分析协议的公平性也即是分析协议是否能在竞争信道的节点间公平地分配带宽。数据流的吞吐量是指目的节点在连接时间内所收到的数据包的总数。因此,可以使用吞吐量这个性能指标来衡量协议的公平性。

在测试协议公平性的实验中,采用了 cbr 数据流模型。由于 cbr 数据流模型中没有给出节点采集信号强度的信息(离事件源的距离),因此在 cbr 中实现了一个命令 setDistance,用来设定节点与事件源的距离。在此次仿真中,假定目的节点与事件源重合。这样就可以在两个节点间建立连接时,使用“[cbr 对象] setDistance [node1 对象] [node2 对象]”命令来记录节点与事件源的距离,并将此参数传给 udpAgent 对象,由它将距离信息填充到产生的数据包中去。

实验的拓扑结构如图 9 所示,共有 8 个节点,所有节点都可以相互通讯,即它们共用无线信道。这 8 个节点中,有 4 个是目的节点,4 个是源节点,共构成 4 条数据流。

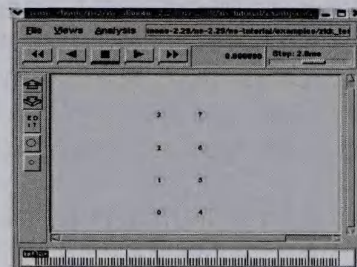


图 9 实验拓扑结构

在本次实验中,使用的是恒定数据流模型 cbr, 4 条数据流同时启动,并且有相同的时间间隔,每隔 0.02 秒 cbr 会产生一个数据包,包大小为 1024 bytes,仿真时间是 100s。仿真中确保每个节点上负载都超过可以利用的无线带宽。为了测试协议的公平性,设计了如下两个实验。

实验 7: 设定 4 条数据流都工作在梯度 1, 即源和目的节点间的距离都小于 50。这是专为 GB-Sift 协议设计的,对 MAC802.11 和 Sift 协议没有影响。在这种情况下,3 个协议的吞吐量如图 10 所示。

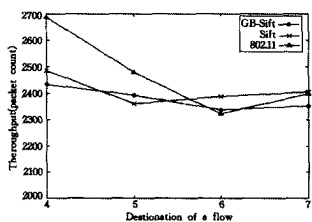


图 10 公平性 (所有数据流都处于梯度 1)

从图 10 可以看出,当 4 条数据流的节点都处于梯度 1 时,GB-Sift 协议的公平性与 Sift 协议相似,因为他们都使用了分布式概率竞争的方式,而且 GB-Sift 协议只工作在梯度 1 内,没有梯度的变化等额外开销。而且 GB-Sift 协议和 Sift 协议都好于 802.11 协议。802.11 协议由于使用了二进制回退的策略,使得发生冲突的节点的竞争窗口不断地增大,从而在竞争中处于劣势,显示出不公平性。图中也显示出 GB-Sift 协议和 Sift 协议并不能达到理想的公平性,但这不是一个主要的问题,因为在传感器网络中会有大量冗余的节点来报告同一事件。

实验 8:在实验 7 的基础上调整节点所处的梯度,3 条数据流处于梯度 1,而另一条数据流处于梯度 2,分别测试这 3 个协议的公平性。这种改变对 Sift 协议和 802.11 协议没有任何影响。图 11 给出了 3 个协议的公平性对比。

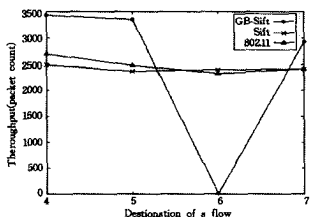


图 11 协议的公平性 (3 条数据流处于梯度 1,一条处于梯度 2)

由图 11 可以看出,802.11 和 Sift 协议没有太大的改变,但是 GB-Sift 协议的那条处于梯度 2 的数据流的吞吐量非常小,只有几十个数据包。这是由于梯度划分后,梯度 2 内节点的竞争时槽是 [13, 24],而梯度 1 内节点的竞争时槽是 [0, 16)。这样每次在竞争信道时,大多数的情况下梯度 1 内的 3 条数据流的节点由于选择低时槽而竞争信道成功。只有当 4 条数据流的发送节点都选择交叉时槽区域 [13, 16) 时,节点 2 到节点 6 的数据流才能成功发送。因此节点 2 到节点 6 的这条数据流的吞吐量很低。这样实际上就只有 3 条数据流在竞争信道,故其他 3 条数据流的节点的吞吐量会比 MAC802.11 和 Sift 协议的大一些。

这正是该协议所要达到的目的。在节点的上报过程中,每个节点由于采集信号的不同,它们对事件源重建的作用也不同,因此有理由给所有节点不同的权值,让采集信号强度大的节点有高的发送权,而尽量抑制其他采集信号弱的节点的发送。从图 11 可以看出,GB-Sift 协议很好地抑制了采集信号弱的节点的发送(位于梯度 2 的节点)。这样采集信号强度大的节点就会获得更大的吞吐量,从而能尽快地将采集到的事件源的信号发送到 Sink 节点。

**结束语** 本文中的 MAC 协议适用于事发区域,能快速高效地收集事发区域内的相关信息,但它不太适用于网络中数据的传输。因此希望能找到一个能量高效的、低延迟的 MAC 协议作为网络中数据传输的协议,而本文中的协议只负责事件的收集工作,充分发挥各自优势,提高整体性能。

下一步将结合目标跟踪算法,测试本文中的 MAC 协议能否达到预期的效果,并以此为指导不断地完善协议;更进一步地深入研究和分析节点空间相关性的控制策略,通过仿真实验研究其具体性能。

## 参 考 文 献

- [1] Farshad A, Vikram S, Chua Kee-Chaing. Topology control for delay sensitive applications in wireless sensor networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2007, 12(5/6): 406-421
- [2] Zhang Tao, Chen Li-jun, Chen Dao-xu. Energy Efficient MAC Layer Broadcast Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. *Computer Science*, 2013, 40(1): 29-32, 62
- [3] Liu Yun-lu, Pu Ju-hua, Fang Wei-wei, et al. A MAC Layer Optimization Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2012, 35(3): 529-539
- [4] Pan Jian-ping, Hou Y T, Cai Lin, et al. Topology control for wireless sensor networks[C]// *Proceedings of the 9th annual international conference on Mobile computing and networking*. San Diego: ACM, 2003: 286-299
- [5] Kakria A, Aseri T C. Survey of synchronous MAC protocols for wireless sensor networks[C]// *Proceedings of 2014 Recent Advances in Engineering and Computational Sciences*. Chandigarh, 2014: 1-4
- [6] Li Xiang-yang, Song Wen-zhan, Wang Yu. Localized topology control for heterogeneous wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2006, 2(1): 129-153
- [7] Jamieson K, Balakrishnan H, Tay Y C. Sift: A MAC protocol for event-driven wireless sensor networks [C] // *Proceedings of Wireless Sensor Networks-Third European Workshop (EWSN 2006)*. Zurich, 2003, 3868: 260-275
- [8] Wang Lei. *The Research of MAC Protocol Based on Wireless Sensor Networks[D]*. Shan Dong University, 2006
- [9] Huang Tao, Shu Jian, Chen Yu-bin, et al. Research on MAC Protocol for Even-driven Wireless Sensor Networks[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2008, 27(8): 12-15
- [10] Liu Xiao-jie. *The Research of MAC Protocol in Wireless Sensor Networks[D]*. Shang Hai Jiao Tong University, 2008
- [11] Polastre J, Hill J, Culler D. Versatile low power media access for wireless sensor networks[C]// *Proc. of the 2nd ACM conf. on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys)*. Baltimore, 2004: 95-107
- [12] Jian Qiang, Gong Zheng-hu, Zhu Pei-dong, et al. Overview of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks[J]. *Journal of Software*, 2008, 19(2): 389-403
- [13] Bao L, Garcia-Luna-Aceves J J. A new approach to channel access scheduling for ad hoc networks[C]// *7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. Rome Italy, 2001: 210-220
- [14] Tang Liang, Tan Min-sheng. Study and Analyze of Wireless Sensor Networks MAC Protocols[J]. *Computer and Information Technology*, 2007, 15(6): 31-33
- [15] Rhee In, Warrier A, Aia M, et al. Z-MAC: A hybrid MAC for wireless sensor networks[C]// *Proc. of the 3rd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sensys 2005)*. San Diego, 2005: 90-101
- [16] Ahn G S, Miluzzo E. Funneling-MAC: A localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks[C]// *Proc. of the 4th ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems (Sen-*

[17] Zheng Guo-qiang, Li Jian-dong, Zhou Zhi-li. Overview of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2008, 34(3): 305-316

[18] Kulkarni S, Iyer A, Rosenberg C. An address-light, integrated MAC and routing protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Trans. on Networking, 2006, 14(4): 793-806

[19] Rossi M, Zorzi M. Probabilistic algorithms for cost-based integrated MAC and routing in wireless sensor networks[C] // Proc. of the 3rd Int'l Modeling and Performance Analysis of Wireless Sensor Networks (Senmetrics 2005). San Diego, 2005: 86-96

[20] Sun Li-ming, Li Jian-zhong, Chen Yu. Wireless Sensor Networks [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005; 70-72

[21] Dong M, Tong L, Sadler B M. Impact of Data Retrieval Pattern on Homogeneous Signal Field Reconstruction in Dense Sensor Networks[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2006, 54(11): 4352-4364

[22] Zhao Ming, Chen Zhi-gang, Zhang Lian-ming. Hybrid Spatial Correlation-based Medium Access Control for Dense Event-driven Sensor Networks[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1863-1868

[23] Vuran Mehmet C, Akyildiz Ian F. Spatial Correlation-Based Collaborative Medium Access Control in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(2): 316-329

[24] Wang Hui. Principle and Application of NS2 Network Simulator [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2008

(上接第 108 页)

个评价指标均有所提高,其中提高一栏的百分比是相对于处理前的数据的。本研究对其他的 6 个数据集进行了处理,表 5 列出了其他数据集处理后的 5 个评价指标提高的百分比。

表 4 和表 5 的数据显示,这种去噪方法在 5 个指标上都有所提升。其中 One-Error 指标上有个别数据出现了较小的负值,显示去噪声后指标值略有下降,其部分原因是前面在处理时,对某几个数据集来说个别非噪声数据被当成了噪声数据来处理。

多个数据集的实验结果验证了所提出的预处理方法的有效性。本文提出的方法简单可行,只要数据集的大部分数据呈现近似的正态分布,此方法就可以用来去除噪声,提高多标签的分类效果。

**结束语** 本文介绍了一种正态分布的数据集去噪声的方法,并在 Mulan 平台上对多个数据集、多种分类算法都进行了验证,提供了实验分析数据,表明了该方法的有效性。此方法简单方便、不受领域限制,能较好地适用于符合近似正态分布的数据集。

### 参 考 文 献

[1] Zhang Min-ling, Zhou Zhi-hua. ML-KNN: A lazy learning approach to multi-label learning [J]. Pattern Recognition, 2007, 7(40): 2038-2048

[2] Tsoumakas G, Katakis I, Vlahavas I. Mining multi-label data [M] // Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. New York: Springer US, 2010

[3] Xu Xin-shun, Jiang Yuan, Peng Liang, et al. Ensemble approach based on conditional random field for multi-labels image and video annotation[C] // Proceedings of the 19<sup>th</sup> ACM international conference on Multimedia. Scottsdale, Arizona, USA, 2011: 1377-1380

[4] Wang Jing-dong, Zhao Ying-hai, Wu Xiu-qing, et al. A transductive multi-label learning approach for video concept detection [J]. Pattern Recognition, 2011, 44(10/11): 2274-2286

[5] Sanden C, Zhang J Z. Enhancing multi-label music genre techniques [C] // Proceedings of the 34<sup>th</sup> International ACM SIGIR Conference on Research and Development in information Retrieval (SIGIR'11). New York, USA, 2011: 705-714

[6] Wiczorkowska A, Synak P, Ras Z. Multi-label classification of emotions in music[C] // Proceeding of the 2006 International Conference on Intelligent Information Proceeding and Web Mi-

ning(IIPWM). 2006: 307-315

[7] Trohidis K, Tsoumakas G, Kalliris G, et al. Multi label classification of music into emotions[C] // Proceeding of 9<sup>th</sup> International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR). Philadelphia, PA, USA, 2008; 69-75

[8] Zhang Yi, Burer S, Street W N. Ensemble pruning via semi-definite programming [J]. Journal of Machine Learning Research, 2006(7): 1315-1338

[9] Read J, Pfahringer B, Holmes G, et al. Classifier Chains for Multi-label Classification[J]. Machine Learning, 2011, 85(3): 333-359

[10] Shen X, Boutell M, Luo J, et al. Multi-label machine learning and its application to semantic scene classification[C] // Proceedings of the 2004 International Symposium on Electronic Imaging. San Jose, California, USA, 2004: 18-22

[11] Hullermeier E, Furnkranz J, Cheng W, et al. Label ranking by learning pairwise preferences [J]. Artificial Intelligence, 2008(16): 1897-1916

[12] Read J. A pruned problem transformation method for multi-label classification[C] // Proceeding of the New Zealand Computer Science Research Student Conference. New Zealand, 2008: 143-150

[13] Tsoumakas G, Katakis I. Multi-label classification: An overview [J]. International Journal of Data Warehousing and Mining, 2007, 3(3): 1-13

[14] Tsoumakas G, Vlahavas I. Random k-Labelsets: An ensemble method for multi-label classification [C] // Proceedings of the ECML. Warsaw, Poland, 2007: 406-417

[15] Zhang Min-ling, Zhou Zhi-hua. Multi-label neural networks with applications to functional genomics and text categorization[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2006, 18(10): 1338-1351

[16] Zhang Min-lin, Zhou Zhi-hua. A k-nearest neighbor based algorithm for multi-label classification[C] // Proceedings of the IEEE International Conference on Granular Computing. Beijing, China, 2005, 2: 718-721

[17] Tsoumakas G, Dimon A, Spyromitros E, et al. Correlation based pruning of stacked binary relevance models for multi-label learning[C] // Proceedings of the ECML/PKDD. Slovenia, 2009: 101-113

[18] <http://mulan.sourceforge.net/datasets.html>

[19] <http://meka.sourceforge.net/#download>