

多信道无线网络中优化 QoM 吉布斯采样信道选择算法

夏 娜¹⁾ 陈秀珍¹⁾ 徐朝农²⁾ 郑 榕³⁾

¹⁾(合肥工业大学计算机与信息学院 合肥 230009)

²⁾(中国石油大学计算机科学与技术系 北京 102249)

³⁾(休斯顿大学计算机系 美国 休斯顿 77204)

摘 要 在无线网络中采用专用节点对用户的通信活动进行监测可实现网络的故障诊断和资源管理. 由于硬件资源受限, 无线节点通常在一个时刻只能工作在一个信道上, 因此优化各个节点的信道选择使整个网络收集的用户信息量达到最大, 即网络监测质量(QoM)达到最优是一个关键问题. 文中提出一种基于吉布斯采样(Gibbs Sampler)的分布式节点信道选择算法. 根据优化目标构造了能量函数, 以计算各个信道的选择概率, 并完成对信道的优化选择. 该算法复杂度低, 具有可证明的收敛性, 大量实验结果表明该算法可以实现无线网络 QoM 最优化问题的分布式求解, 而且解的质量近似达到了集中式算法的性能.

关键词 物联网; 多信道无线网络; 信道选择; 监测质量; 吉布斯采样; 能量函数

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2011.01214

Channel Selection Algorithm Based on Gibbs Sampler for Optimal QoM in Multi-Channel Wireless Networks

XIA Na¹⁾ CHEN Xiu-Zhen¹⁾ XU Chao-Nong²⁾ ZHENG Rong³⁾

¹⁾(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

²⁾(Department of Computer Science and Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249)

³⁾(Department of Computer Science, University of Houston, Houston 77204, USA)

Abstract In wireless networks, wireless nodes are distributed in a region to monitor the activities of users. It can be used for fault diagnosis, resource management and critical path analysis. Due to the constraint of hardware, wireless nodes can only collect information on one channel at a time. Therefore, it is a key issue to optimize the channel selection for nodes to maximize the information collected, so as to maximize the Quality of Monitoring (QoM) for wireless networks. In this paper, the authors propose a distributed channel selection algorithm based on Gibbs Sampler, and according to the optimization objective, design an energy function to calculate the selection probability of each channel. The optimized channel selection can be achieved according to the former probabilities. This algorithm is with low complexity and provable convergence performance. Experiments show that the proposed algorithm can optimize the QoM of wireless networks in distributed manner, and the quality of solutions can approach the performance of centralized algorithms.

Keywords Internet of Things; multi-channel wireless networks; channel selection; quality of monitoring; Gibbs sampler; energy function

收稿日期: 2011-01-14; 最终修改稿收到日期: 2011-06-02. 本课题得到国家自然科学基金(61003307)、中央高校基本科研业务费专项资金(2011HGZL0010)以及美国国家科学基金(CNS-0832084)资助. 夏 娜, 男, 1979年生, 博士, 副教授, 中国计算机学会会员, 主要研究方向为无线传感器网络、导航信息处理、计算智能与应用等. E-mail: xiananawo@hfut.edu.cn. 陈秀珍, 女, 1984年生, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络. 徐朝农, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为自组织无线网络、嵌入式系统. 郑 榕, 女, 1975年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为网络监测和诊断、序列学习和决策理论.

1 引言

物联网(The Internet of Things)是把具有标识、感知和智能处理能力的物体,借助通信技术互连而成的网络^[1-3].无线网络(WiFi、WiMax、Mesh、WLAN等)是物联网的重要组成部分.随着无线网络应用的深入,准确、实时地监测无线网络的状况并实施有效的管理变得越来越重要,因此无线网络监测已成为物联网研究领域的一个重要分支.

在无线网络中,通常采用专用监测设备获取监测区域内无线设备的传输信息,保存帧信息或者物理层信息,并进行分布式或集中式分析.无线监测通常基于SNMP和基站日志来实现,由于它们能显现PHY(如信号强度、光谱密度)和MAC(如冲突、重发)层的行为细节以及时间信息,因此可以对无线网络的诊断和管理发挥重要作用^[4-11].

无线监测设备通常是单电台多信道设备^[12-14],即具有多个可选信道^①,因此如何为这些监测设备优化配置信道等资源,从而使整个网络的监测质量达到最优是一个关键课题^[15-20].文献^[21]证明了在用户中心模式下,为网络中的监测设备(节点)分配最优信道是一个NP-hard问题.由于在广域无线网络和基础设施建设不完备的地区,节点无法通过有线以太网进行互联,因此难以通过集中式算法求解上述问题,而节点利用本地信息分布式求解该问题则具有重要意义,它对物联网技术的广泛应用和性能提升具有推动作用.

本文第2节对近几年的相关工作进行分析;第3节形式化地描述无线监测网络信道选择问题;第4节提出一种分布式的吉布斯采样(Gibbs Sampler)算法用于解决第3节提出的问题;第5节是仿真实验及实际网络测试;第6节总结全文.

2 相关工作

近年来,无线网络监测已成为研究的热点.研究内容主要包括监测设备的研制、系统的设计、故障诊断技术的开发等^[4-11].2004年,Yeo等人^[4-5]首次提出了应用多个无线传感器节点进行被动监测的技术,分析了无线被动监测的优势和所面临的挑战,并初步设计了一种应用系统,多个节点通过时间同步和数据融合实现了网络的故障诊断.2005年,Rodríguez等人^[6]利用传感器节点获取无线信息以分析

802.11WiFi网络的性能特征.2006年,Cheng等人^[7]对150个节点组成的大规模监测网络进行了研究,讨论了分布式节点时钟同步方法.2007年,杨文国等人^[8]研究了无线监测传感器网络的寿命模型,通过实时调整监测节点的感知/通信半径达到最大化网络寿命的目标.2010年,Liu等人^[9]研究了无线传感器网络中监测节点个数与误报率之间的关系,并基于poller-polllee结构提出一种限定误报率的最小化监测节点数的算法.

目前,通过优化监测节点的信道选择以提高无线网络的监测质量已成为一个重要课题.2009年,Shin等人^[22]研究了无线Mesh网中监测节点的信道选择问题,其优化目标是使用户得到最大化覆盖,作者将该问题描述成基于群预算限制的最大化覆盖问题^[23-24],进而采用贪婪算法和线性规划算法进行了求解,得到了较好的性能.在以上研究的基础上,2010年,Scalosub等人^[21]在通用网络模型下以最大化无线网络的监测质量(Quality of Monitoring, QoM)为优化目标,公式化描述了节点信道分配问题,证明了它是一个NP-hard问题,并采用贪婪算法和线性规划算法加以求解.贪婪算法以集中方式实现,在解决问题过程中追求当前利益最大化,很难得到全局最优解;线性规划算法也是一种集中式算法,虽然解的质量较高,但对于分布式无线网络可实现性不好.

无线网络本身的多信道选择技术也已取得一些成果^[15-20].2006年,Wormsbecker等人^[16]研究了信道选择技术对系统通信性能的影响,采用软信道预留技术进行信道选择,减少了链路层数据帧的损失,提高了TCP吞吐量.2007年,Kanthi等人^[17]基于Spanner概念提出了一种结合网络拓扑结构的信道选择算法,用于解决多电台多信道Mesh网中的信道分配问题,该算法可以提高通信链路层的数据吞吐量.2009年,You等人^[18]研究了无线蜂窝网中点到点数据传输和无线信道资源优化配置问题,并采用随机准梯度法初步解决了该问题.2010年,Hou等人^[19]研究了认知无线电(Cognitive Radio)网络中节点信道选择问题,将其描述成一个二进制整数非线性优化问题,并设计了一种基于优先序列的信道选择算法,可以优化网络中二级节点的信道利用

① IEEE 802.11.b/g WLAN有3个非重叠信道,IEEE 802.11.a WLAN有12个非重叠信道.

率. 2011 年, 杜振国等人^[20]针对多电台多信道无线 Mesh 网提出一种域内集中式信道分配 (ICCA) 方案, 在一定程度上避免了干扰与碰撞, 提高了网络吞吐量并降低了传输时延. 以上研究主要针对无线网络本身, 而不是无线监测节点, 所采用的方法均为集中式算法, 难以分布式实现, 且方法的理论基础较薄弱.

本文引入吉布斯采样理论解决无线监测网络最大化 QoM 的节点信道选择问题, 设计了分布式可实现的退火吉布斯采样信道选择算法. 基于完备的吉布斯采样理论体系, 算法具有可证明的收敛性, 大量仿真实验和实际测试结果验证了算法的有效性.

3 问题描述

3.1 网络模型

假设在一个无线网络中有 m 个监测节点, n 个用户, k 个信道, $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示监测节点集合, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 表示用户集合, $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$ 表示信道集合. 在同构网络中, 节点具有相同的传播特性, 并具有读取帧信息的能力, 可以分析来自用户或其它节点的信息; 节点在一个时刻只能工作于一个信道. 用户 u_j ($j=1, 2, \dots, n$) 在一段时间内固定工作于某个信道 $c(u_j) \in C$, 并以信息传输概率 p_{u_j} 进行数据传输. 这些用户可以是无线路由器、接入点或手机用户等. 如果一个用户在时刻 t 通过某个信道发送信息, 那么称之为时刻 t 的活动用户.

在无线网络中, 节点和用户的关系可以用一个无向二分图 $G = (S, U, E)$ 来表示, 如图 1 所示. 在 G 中, 若 u_j 在 s_i 的监测范围内, 则它们之间有一条连线, 用 $e = (s_i, u_j)$ 表示; 当节点 s_i 和用户 u_j 工作于同一信道时, s_i 可以获取来自 u_j 的信息, 此时我们称 u_j 被 s_i 覆盖. E 表示所有连线的集合. 若某个用户不在任何一个节点的监测范围之内, 则它被排除在 G 以外. G 中的顶点 v 是节点或用户, 即 $v \in S \cup U$. $N(v)$ 表示顶点 v 的邻居, 若顶点是用户 u_j , $N(u_j)$ 表示它的邻居节点的集合; 若顶点是节点 s_i , $N(s_i)$ 表示其邻居用户的集合. 当一个节点在另一个节点的通信范围内, 则称这两个节点相邻, 称其中一个节点是另一个节点的相邻节点, $V(s_i)$ 表示节点 s_i 的相邻节点的集合, B_{s_i} 表示 s_i 相邻节点下标的集合. 本文假设节点间通信半径等于节点监测范围半径的两倍.

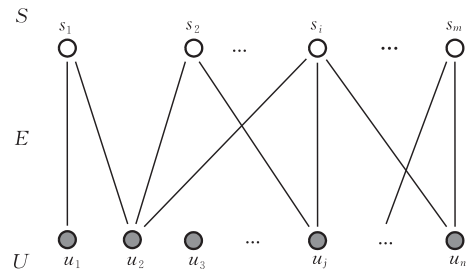


图 1 无向二分图 G

3.2 问题公式化描述

用 $a: S \rightarrow C$ 表示无线监测网络中一种节点对信道的选择方案, 用 A 表示所有可能的信道选择方案集合. a 可用向量表示, 即 $a = (a(s_1), a(s_2), \dots, a(s_m))$, 其中 $a(s_i) \in C$ 表示节点 s_i 选择的信道. 当 s_i 选择信道 $a(s_i)$ 后, 它可以和工作于信道 $a(s_i)$ 的邻居用户进行通信. 给定一个信道选择方案 a , 则 $S = \bigcup_{q=1}^k S_{c_q}$, $U = \bigcup_{q=1}^k U_{c_q}$, 其中 S_{c_q} 表示选择信道 c_q 的节点集合, U_{c_q} 表示工作于信道 c_q 的用户集合. 用无向二分图 $G_{c_q} = (S_{c_q}, U_{c_q}, E_{c_q})$ 表示工作在信道 c_q 的所有节点和用户的集合.

定义 1. 节点的监测质量 (Monitoring Quality of Node, MQN). 当无线监测网络工作于某信道选择方案 $a \in A$ 时, 节点 s_i 的监测质量定义为

$$Q_{s_i}(a) = \sum_{u \in N(s_i)} p_u \cdot \frac{\mathbf{1}(c(u) = a(s_i))}{1 + \sum_{t \in B_{s_i}} \mathbf{1}(c(u) = a(s_t), s_t \in N(u))} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{1}(\cdot)$ 是指示函数, 当条件满足时它等于 1, 否则为 0. 由式 (1) 可见, 节点 s_i 的邻居用户中与节点工作在同一信道的用户越多, 这些用户的信息传输概率越大, 并且覆盖这些用户的其它节点越少, 则节点 s_i 的监测质量越大. 节点的监测质量反应了当节点选择某个信道后, 能与其进行通信的活动用户的个数. 活动用户指的是处于信息发送状态的用户.

给定信道选择方案 a , 无线监测网络的监测质量 (QoM) 为

$$Q(a) = \sum_{s_i \in S} Q_{s_i}(a) \quad (2)$$

可见, 无线监测网络的 QoM 越大, 则网络中可被监测到的活动用户越多, 无线监测网络的服务质量就越高.

问题 1. 最大化无线网络监测质量 (Maximizing of QoM, MQM) 问题就是在有限的节点和用户的情况下, 寻找一种信道选择方案使无线网络的 QoM 达到最大, 从而使节点最大可能地获取活动用户传

输的信息. 无线监测网络会在不同时间段依概率变换信道选择方案, 所以无线监测网络在较长时间内获取的信息量最大可以表示为

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{\mathbf{a} \in A} Q(\mathbf{a}) \times \pi(\mathbf{a}) \\ \text{s. t.} \quad & \pi(\mathbf{a}) \in [0, 1] \\ & \sum_{\mathbf{a} \in A} \pi(\mathbf{a}) = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $\pi(\mathbf{a})$ 为无线监测网络工作于信道选择方案 \mathbf{a} 的概率.

由式(3)可得, 最优信道选择方案为

$$\mathbf{a}^* = \arg \max Q(\mathbf{a}) \quad (4)$$

由式(1)~(4)可见, 计算 $Q(\mathbf{a})$ 需要用到各节点的监测质量, 而要计算 $Q_{s_i}(\mathbf{a})$, 只需知道节点 s_i 的邻居用户 $N(s_i)$ 和相邻节点 $V(s_i)$ 的信息, 这使得分布式求解 MQM 问题成为可能. 以下我们将提出一种分布式信道选择算法用于解决该问题.

4 吉布斯采样信道选择算法

本文提出一种吉布斯采样信道选择算法(Gibbs Sampler based Channel Selection algorithm, GSCS). 首先概述吉布斯采样基本理论.

4.1 Gibbs Sampler

Gibbs Sampler 的基本理论来源于物理学, 1902 年由 Gibbs 提出. 在此基础上, 1984 年, Geman 提出了 Gibbs Sampler 算法, 该算法是一种特殊的蒙特卡罗(MCMC)算法, 它最显著的特点是通过沿一系列互补的方向来构建条件分布序列的方式构造此算法的马尔可夫链. 该算法适用于对离散的多维问题进行分布式求解, 在无线通信领域已得到应用, 解决了 802.11 WLAN 中 AP 的信号发射功率控制和最小化用户端干扰等问题^[25-26].

Gibbs Sampler 的分布函数如下:

$$\pi_T(\mathbf{X}) = \frac{1}{Z_T} e^{-\frac{1}{T}\epsilon(\mathbf{X})} \quad (5)$$

\mathbf{X} 表示系统的一个状态向量, Λ 表示所有状态向量的集合, 则 $\mathbf{X} \in \Lambda$, $T > 0$ 表示温度, 能量函数 $\epsilon(\mathbf{X})$ 表示状态向量 \mathbf{X} 的能量, $0 < \epsilon(\mathbf{X}) < +\infty$ ^[27-28].

$Z_T = \sum_{\mathbf{X}' \in \Lambda} e^{-\frac{1}{T}\epsilon(\mathbf{X}')}$, 可见 $\pi_T(\mathbf{X}) \in [0, 1]$.

Gibbs Sampler 通过以下的方式来更新它的状态向量: 假设状态向量 \mathbf{X} 分为 d 个分量, 即 $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_d)$. 设第 t 次迭代的状态向量为 $\mathbf{X}^{(t)} = (x_1^{(t)}, \dots, x_d^{(t)})$, 则第 $t+1$ 次迭代中对任意一个 $i(i=$

$1, 2, \dots, d)$, 依条件概率分布 $p(x_i | x_1^{(t+1)}, \dots, x_{i-1}^{(t+1)}, x_{i+1}^{(t)}, \dots, x_d^{(t)})$ 在状态空间中采样 $x_i^{(t+1)}$. 上述条件概率分布可由 Gibbs Sampler 分布函数得到^[28-29].

可以证明, 根据以上步骤进行足够多次状态向量的更新, 状态向量 $\mathbf{X}^{(0)}, \mathbf{X}^{(1)}, \dots, \mathbf{X}^{(t)}, \mathbf{X}^{(t+1)}, \dots$ 近似服从目标分布 π . 这样便实现了从一个给定分布采样随机样本(但这些样本是相关的)的目标^[27-29]. Gibbs Sampler 是一种机制, 它确保系统从一个随机的状态向量开始, 最终收敛到目标分布(5). 由 Gibbs Sampler 分布函数可见, 某个状态的能量函数值越小, 其选择概率越大.

Gibbs 采样理论中“子团”是相互之间有紧密关系的元素的集合. 一个单独的元素组成的集合 $\{s\}$ 是一个子团; 一个非空集合 L , 其中的元素两两相邻, 则 L 是一个子团. 势函数将一个非负实数 $V(L)$ 与 L 联系在一起, $V(L)$ 仅与 L 中的元素的状态相关, 若 L 不是一个子团, 那么 $V(L)$ 等于 0.

对于所有的 $\mathbf{X} \in \Lambda$ 和所有的 L , 能量函数将一个实数 $\epsilon(\mathbf{X})$ 与状态向量 \mathbf{X} 相联系. 如果以下等式成立, 则称能量函数是由势函数 $\{V_L\}$ 构造而成的:

$$\epsilon(\mathbf{X}) = \sum_L V(L, \mathbf{X}) \quad (6)$$

在本文问题中, 无向二分图 G 包含 m 个节点 s_1, s_2, \dots, s_m . 每个节点 $s_i (i=1, 2, \dots, m)$ 都具有一个状态 x_{s_i} , 即节点所选择的信道, 所有可能的状态组成一个集合 C , 那么 G 的状态可用一个状态向量 $\mathbf{X} = (x_{s_1}, x_{s_2}, \dots, x_{s_m}) (x_{s_i} \in C, i=1, 2, \dots, m)$ 来表示.

当 $\epsilon(\mathbf{X})$ 可以表示为式(6)时, 节点 $s_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的本地能量将由与 s_i 相关的 L 的势函数组成:

$$\epsilon_{s_i}(x_{s_i}, x_{(s_j)_{j \in B_{s_i}}}) = \sum_{L: s_i \in L} V(L) \quad (7)$$

将节点 s_i 的本地能量 ϵ_{s_i} 与 Gibbs Sampler 分布函数联系, 得到节点 s_i 选择信道 x_{s_i} 的概率:

$$\mu_{s_i}(x_{s_i}) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{T}\epsilon_{s_i}(x_{s_i}, x_{(s_j)_{j \in B_{s_i}}})\right)}{\sum_{x_{s_i}' \in C} \exp\left(-\frac{1}{T}\epsilon_{s_i}(x_{s_i}', x_{(s_j)_{j \in B_{s_i}}})\right)} \quad (8)$$

由上式可见, 节点 s_i 根据邻居节点的状态来更新自身的状态, 即节点 s_i 在已知邻居节点工作信道的情况下, 在 C 中依概率 μ_{s_i} 选择自身的信道, 完成一次状态更新. 同时可见, 某个状态对应的本地能量越低, 节点选择它的可能性越大.

节点根据本地能量进行状态更新是一个分布式

的过程,经过足够多次迭代,无向二分图 G 将逐渐收敛到具有较低全局能量的状态向量。

4.2 算法设计

以下将论证本文问题符合 Gibbs Sampler 理论应用条件,并设计吉布斯采样信道选择算法(GSCS)。本文的设计目标是最大化无线网络的监测质量(MQM),目标函数如下:

$$Q(\mathbf{a}) = \sum_{s_i \in S} Q_{s_i}(\mathbf{a}) \\ = \sum_{s_i \in S} \left\{ \sum_{u \in N(s_i)} p_u \cdot \frac{\mathbf{1}(c(u) = a(s_i))}{1 + \sum_{t \in B_{s_i}} \mathbf{1}(c(u) = a(s_t), s_t \in N(u))} \right\}.$$

研究目标是找到一种信道选择方案 \mathbf{a} ,使得目标函数值 $Q(\mathbf{a})$ 达到最大。若节点分布式求解该问题,则目标函数为节点的监测质量:

$$Q_{s_i}(\mathbf{a}) = \sum_{u \in N(s_i)} p_u \cdot \frac{\mathbf{1}(c(u) = a(s_i))}{1 + \sum_{t \in B_{s_i}} \mathbf{1}(c(u) = a(s_t), s_t \in N(u))}.$$

设节点 s_i 和 s_j ($i, j = 1, 2, \dots, m$, 且 $i \neq j$), 定义以下函数:

$$T(s_i) = \sum_{u \in N(s_i)} p_u \quad (9)$$

$$M(s_i) = \sum_{u \in N(s_i)} p_u \cdot \mathbf{1}(c(u) = a(s_i)) \quad (10)$$

$$N_{\text{share}}(u, s_i) = 1 + \sum_{t \in B_{s_i}} \mathbf{1}(c(u) = a(s_t), s_t \in N(u)) \quad (11)$$

$$R(s_i, s_j) = \sum_{u \in N(s_i) \cap N(s_j)} p_u \cdot \frac{\mathbf{1}(c(u) = a(s_i), a(s_i) = a(s_j))}{N_{\text{share}}(u, s_i)} \quad (12)$$

根据式(10)和(12), $Q_{s_i}(\mathbf{a})$ 可以写为

$$Q_{s_i}(\mathbf{a}) = M(s_i) - \sum_{\{s_i, s_j\} \subseteq S} R(s_i, s_j) \quad (13)$$

根据式(9)和(13),用补值方法构造能量函数:

$$E_{s_i}(a(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}}) \\ = T(s_i) - Q_{s_i}(\mathbf{a}) \\ = T(s_i) - (M(s_i) - \sum_{\{s_i, s_j\} \subseteq S} R(s_i, s_j)) \\ = (T(s_i) - M(s_i)) + \sum_{\{s_i, s_j\} \subseteq S} R(s_i, s_j) \\ = \sum_{s_i \in L, L \subseteq S} V(L) \quad (14)$$

V 是以下方方式构造的关于 L 的势函数:

$$V(L) = T(s_i) - M(s_i) \quad \text{for } L = \{s_i\} \\ V(L) = R(s_i, s_j) \quad \text{for } L = \{s_i, s_j\} \\ V(L) = 0 \quad \text{for } |L| \geq 3 \quad (15)$$

可见,能量函数 E 可由势函数加和构造而成,因

此符合 Gibbs Sampler 理论应用的充要条件^[25-26]。节点 s_i 选择 $a(s_i)$ 对应的本地能量可以表示为

$$\epsilon_{s_i}(a(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}}) = E_{s_i}(a(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}}) \\ = \sum_{s_i \in L, L \subseteq S} V(L) = (T(s_i) - M(s_i)) + \sum_{\{s_i, s_j\} \subseteq S} R(s_i, s_j) \quad (16)$$

根据 4.1 节中 Gibbs Sampler 理论框架,将以上能量函数代入式(8)可得到节点选择各个信道的条件概率分布,即 $p(x_i | x_1^{(t+1)}, \dots, x_{i-1}^{(t+1)}, x_{i+1}^{(t)}, \dots, x_d^{(t)})$ 。通过多次信道选择后,所有节点将选择到具有较低能量的信道,此时整个网络就得到了具有较低能量的信道选择方案,也就得到了具有较高目标函数值的信道选择结果。

为了使 GSCS 算法可以更好地收敛到具有全局最低能量的信道选择方案,引入退火策略:

$$T = \frac{T_0}{\log(2+t)} \quad (17)$$

式中, T_0 为初始温度, t 为算法迭代次数。

算法收敛性分析:本文算法基于 Gibbs Sampler 理论,能量函数的设计符合该理论应用的充要条件,同时引入了退火策略。根据文献[25-26]的应用模式可知,当 $t \rightarrow \infty$ 时,算法依概率收敛到具有全局最小能量的状态向量,即最优信道选择方案。此类证明过程在文献[27]中有详细论述,限于篇幅本文不做赘述。以下是具有退火策略的 GSCS 算法描述。

4.3 算法步骤

1. 计算当前温度: $T = \frac{T_0}{\log(2+t)}$;

2. 节点 s_i 根据式(16)分别计算各个信道 c_1, c_2, \dots, c_k 的本地能量 $\epsilon_{s_i}(a(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}})$;

(邻居节点选择的信道采用最近更新的值)

3. 节点 s_i 依以下概率计算结果选择信道:

$$\mu_{s_i}(a(s_i)) = \frac{\exp\left(-\frac{1}{T}\epsilon_{s_i}(a(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}})\right)}{\sum_{a'(s_i) \in C} \exp\left(-\frac{1}{T}\epsilon_{s_i}(a'(s_i), a(s_j)_{j \in B_{s_i}})\right)}$$

5 实验结果及分析

5.1 仿真实验

为了充分验证本文 GSCS 算法求解 MQM 问题的有效性,将其与遗传算法(GA)、文献[21]采用的线性规划算法(LP)、贪婪算法(Greedy)以及确定性算法(Deterministic)进行了对比实验。

遗传算法. 在已知网络全局信息的条件下,以信道选择方案为染色体并构成种群,以网络的 QoM

为适应度函数. 种群进行多次进化得到最优或近似最优的染色体(信道选择方案).

线性规划算法. 求解来源于式(4)的整数规划问题.

贪婪算法. 分别对每个节点进行信道选择, 节点选择信道使得自身的监测质量 MQN 最大, 这可以是分布式算法.

确定性算法. 每个节点根据式(16)计算本地能量, 然后选择具有最小能量的信道, 再将自身的信道选择结果发送给相邻节点.

吉布斯采样信道选择算法、贪婪算法和确定性算法都是分布式算法, 遗传算法和线性规划算法是集中式算法. 其中, 吉布斯采样信道选择算法的复杂度为 $O(2k \cdot I)$, 贪婪算法的复杂度为 $O(k)$, 确定性算法的复杂度为 $O(2k \cdot I)$. 其中 k 为可选信道个数; I 为算法迭代次数. 可见, GSCS 算法复杂度低, 易于节点分布式实现. 另外, 虽然遗传算法是集中式算法, 对于节点可实现性差, 但是它经过足够多次迭代, 能找到最优解或近似最优解, 因此它的求解结果可以评价其它算法解的性能.

表 1 给出了算法参数设置.

表 1 算法参数设置

T_0 (GSCS)	p_c (GA)	p_m (GA)
0.1	0.1	0.53

初始温度 T_0 是退火 Gibbs Sampler 的主要参数, 当 T_0 较大时, 算法收敛速度较慢, 全局搜索能力较强; 当 T_0 较小时, 算法可能会快速收敛到局部最优解. 大量实验结果显示, 当 T_0 在 0.1 到 1 之间取值时, 算法求解性能较好. p_c 和 p_m 分别为遗传算法的交叉和变异概率. 多次实验结果表明, 当 $p_m = 0.53$, $p_c = 0.1$ 时, 算法收敛速度较快, 解的质量较优.

本文在 OPNET 平台上进行了算法的仿真实验. OPNET Modeler 采用三层建模机制, 最上层为网络模型, 定制网络的拓扑结构; 其次为节点模型, 由相应的协议模型构成, 定义设备特性; 最底层为进程模型, 以有限状态机模型来描述协议和算法. 本文分别建立了网络级、节点级和进程级模型, 对上述 5 种信道选择算法进行了仿真和比较. 在网络级模型中, 在 $500\text{m} \times 500\text{m}$ 的区域内随机分布 500 个用户, 用户的信息传输概率在 $[0, 0.05]$ 内取值^①, 在该区域内布置 25 个节点用于监测区域内用户的通信活动, 如图 2 所示. 由于仿真网络规模较大, 图 2 仅给出网络级模型的一部分, 其中两个深色图标为监测节点, 其余浅色图标为用户.

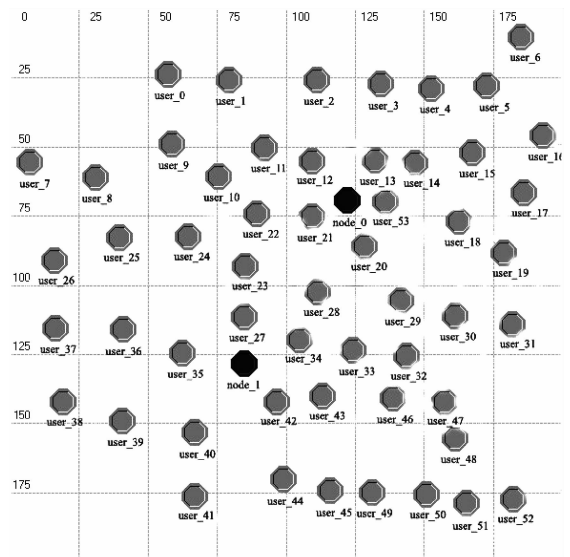


图 2 网络级模型

实验中, 我们为监测节点都配备了单射频 IEEE 802.11.b 接口卡, 数据传输率为 11 Mbps, 节点监测半径为 120 m, 可选信道 3 个^②, 并且假设每个正交信道的带宽相同. 仿真结果如图 3 和图 4 所示.

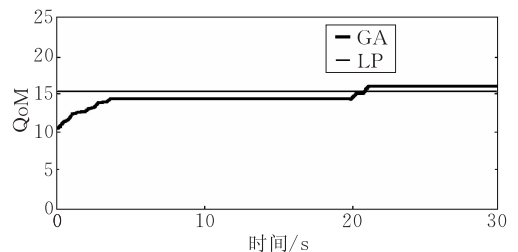


图 3 集中式算法求解性能

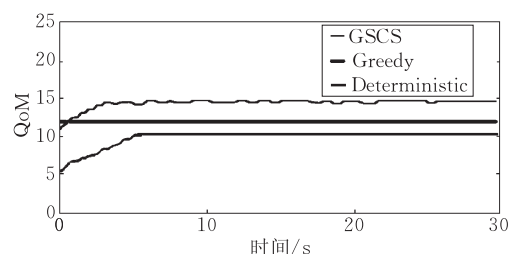


图 4 分布式算法求解性能

由图 3 和图 4 可见, GA 算法经过 20s 进化, 收敛到近似最优解 ($QoM = 15.89$), 但由于算法运行需要全局信息, 且算法复杂度高, 因此难以在实际网络中实现; LP 算法也是集中式算法, 虽然所求解的质量较高 ($QoM = 15.03$), 但同样存在难以实现的

① 假设区域内有 10 个基站, 平均每个基站覆盖 50 个用户, 则平均每个用户的信息传输概率为 0.02, 取值范围设为 $[0, 0.05]$.

② IEEE 802.11.b/g WLAN 的 3 个非重叠信道分别为第 1、6、11 信道, 它们的中心频率分别为 2412 MHz、2437 MHz、2462 MHz.

问题. 在分布式算法中, 本文 GSCS 算法比 Greedy 算法和 Deterministic 算法具有明显的性能优势. GSCS 算法能在较短的时间内收敛到比较优的解 ($QoM=14.5$), 接近集中式算法的性能, 而 Greedy 和 Deterministic 所求解的 QoM 分别为 11.95 和 10.11. 需要说明的是由于 GSCS 算法求解过程的随机性, 所求解呈现出波动特性, 且随着迭代次数的增加, 波动幅度越来越小, 波动频率越来越低, 趋向稳定. 由于无线设备信道切换操作延时非常小^①, 几乎不会对网络监测质量造成影响, 因此本文在实验部

分不对其进行评估.

表 2 示出了多组实验的统计结果. 其中, GSCS、GA 和 Deterministic 算法在每组实验中均运行 20 次, 得到平均的最优解 QoM 值; LP 和 Greedy 算法因为是确定方法, 所以只需运行一次. 由表 2 可见, GSCS 算法的解均近似达到了集中式算法 GA 和 LP 解的性能, 明显优于分布式算法 Greedy 和 Deterministic 的解. 另外, GSCS 算法复杂度低, 程序运行时间短.

表 2 多组实验统计结果

GSCS		GA		Deterministic		LP		Greedy	
平均最优 QoM	运行时间/s (1000 iter.)	平均最优 QoM	运行时间/s (1000 iter.)	平均最优 QoM	运行时间/s (1000 iter.)	QoM	运行时间/s	QoM	运行时间/s
14.593	4.425	15.871	29.124	10.142	4.213	14.956	6.021	11.904	2.045

本文还进行了可选信道数为 12 的比较实验. 实验初始数据(用户的分布和信息传输概率)相同, 但多个用户分别工作在 12 个信道上, 运行 GSCS 算法实现监测节点的优化信道选择, 算法收敛过程如图 5 所示. 由于信道个数增加, 工作于同一信道的用户个数减少, 因此整个无线监测网络的 QoM 相对较小; 同时, 因为可选信道数增加, 算法复杂度增加, 所以算法需要更长时间才能收敛.

性能得到改善. 大量实验结果显示, 当 T_0 在 $0.1 \sim 1$ 间取值时, 算法综合性能较优.

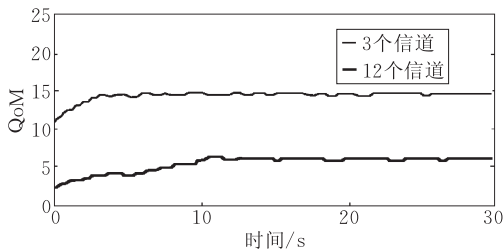


图 5 可选信道数不同时 GSCS 算法性能比较

由以上实验结果可见, 本文 GSCS 算法基于 Gibbs Sampler 理论, 利用节点和邻居节点之间的关系, 以节点监测质量 MQN 构造能量函数, 并引入退火策略, 实现了最大化无线网络监测质量 (MQM) 问题的分布式求解, 并且在解的质量和收敛速度方面均达到了良好的性能.

本文 GSCS 算法引入了退火策略, 见式 (5) 和 (17). 初始温度 T_0 是退火策略的主要参数. 以下拓展实验显示了退火策略对算法性能的影响. 图 6 给出了在实验中未引入退火策略以及引入退火策略 (不同 T_0 参数) 的 GSCS 算法收敛过程的比较. 可见, 未引入退火策略时, 算法所求解会在一个较好解的附近跳动, 难以收敛; 引入退火策略后, 算法的收敛

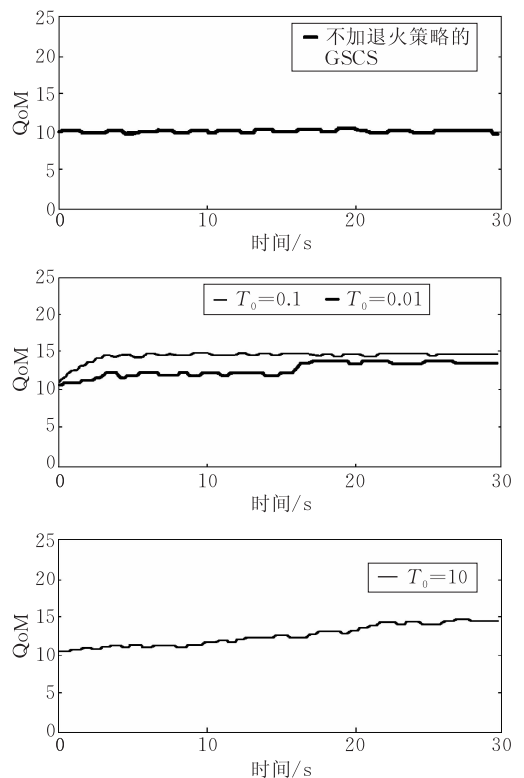


图 6 退火策略及初始温度 T_0 对算法性能的影响

5.2 实际网络实验

下面基于校园无线网络 (IEEE 802.11.b WLAN) 的实际测试来评估本文 GSCS 算法性能. 在一栋楼内布置了 21 个 WiFi 节点, 监测时间为

① GSM 跳频通信应用中, 无线设备信道切换频率可大于 600 跳/s, 切换延时小于 1.7 ms.

1 pm ~ 6 pm 共 5 个小时, 每个节点可以获取约 320000 个 MAC 帧, 这些节点总共可以监测到 622 个工作在 3 个非重叠信道的用户. 其中工作于第 1、2、3 信道的用户数分别为 349、118、155 个. 在 622 个用户中, 信息传输概率(在单位时间内用户活动时间的百分比)在 0~0.01、0.01~0.02、0.02~0.04 之间的用户数分别为 578、15、29. 可见, 除了少数用户活动比较频繁外, 大部分用户的信息传输概率小于 0.01, 平均信息传输概率为 0.0026.

图 7 给出了在不同监测节点规模下网络监测质量的变化. 可见, 当节点数从 5 增加到 21 时, 网络监测质量(被监测到的活动用户数)逐渐增加. 在不同节点规模的实验中, 改变节点位置进行多次实验, 统计出网络监测质量 QoM 均值. 由于用户的平均活动概率为 0.0026, 因此在每个时间段内活动用户数不超过 1.7 个. 由 5 种算法实际运行结果可见, 本文 GSCS 算法明显优于 Greedy 和 Deterministic 算法, 接近于集中式算法 GA 和 LP 的性能. 在节点数为 21 的测试实验中, GSCS 算法的收敛过程如图 8 所示, 与之前的仿真结果基本一致.

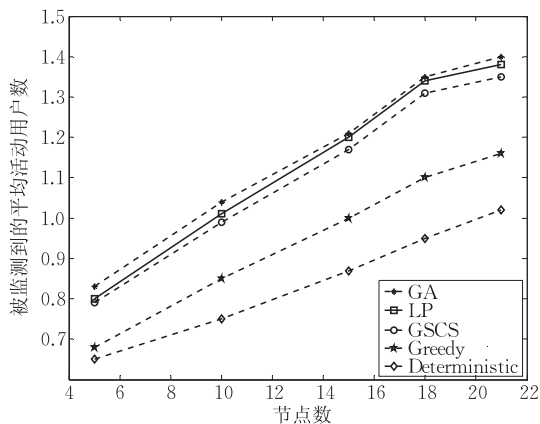


图 7 实际校园无线网络监测质量 QoM

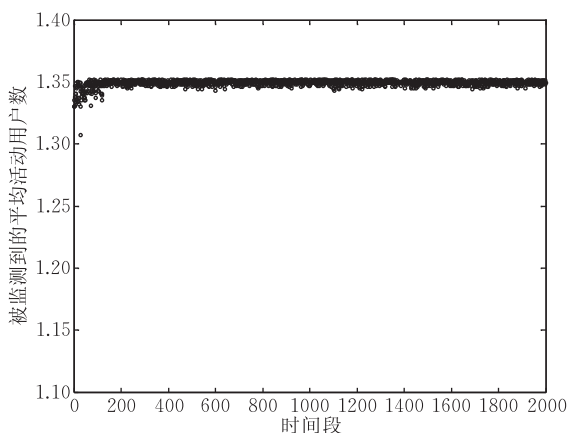


图 8 在实际网络中节点数为 21 时算法收敛过程

6 结 论

无线网络是物联网的重要组成部分. 本文重点研究了无线网络的分布式监测技术, 定义了节点监测质量, 描述了最大化无线网络监测质量 MQM 问题, 并引入退火 Gibbs Sampler 理论提出了求解算法. 以节点监测质量构造本地能量函数, 计算各信道的选择概率, 完成对信道的优化选择. 节点运行本文 GSCS 算法仅需要本地信息和与其相邻节点的信道信息(为获取该信息的通信开销甚微). 该算法设计符合 Gibbs Sampler 的理论框架, 具有可证明的收敛性, 同时算法复杂度低, 易于节点分布式实现. 大量实验结果证明该算法可以实现 MQM 问题的分布式求解, 算法收敛速度快, 且解的质量近似达到了集中式算法的性能. 作为下一步工作, 我们将进一步引入相关理论增强监测节点的学习能力, 使其可以感知和预测用户信息, 并基于此完成对信道的动态优化选择.

参 考 文 献

- [1] Gu Jing-Jing, Chen Song-Can, Zhuang Yi. Wireless sensor network-based topology structures for the Internet of things localization. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(9): 1548-1556(in Chinese)
(顾晶晶, 陈松灿, 庄毅. 基于无线传感器网络拓扑结构的物联网定位模型. *计算机学报*, 2010, 33(9): 1548-1556)
- [2] Ning Huan-Sheng, Xu Qun-Yu. Research on global Internet of things' developments and it's construction in China. *Chinese Journal of Electronics*, 2010, 38(11): 2590-2599(in Chinese)
(宁焕生, 徐群玉. 全球物联网发展及中国物联网建设若干思考. *电子学报*, 2010, 38(11): 2590-2599)
- [3] Sun Qi-Bo, Liu Jie, Li Shan. Internet of things: Summarize on concepts, architecture and key technology problem. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2010, 33(3): 1-9(in Chinese)
(孙其博, 刘杰, 黎旻. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述. *北京邮电大学学报*, 2010, 33(3): 1-9)
- [4] Yeo J, Youssef M, Agrawala A. A framework for wireless LAN monitoring and its applications//*Proceedings of the 3rd ACM Workshop on Wireless Security*. New York, USA, 2004: 70-79
- [5] Yeo J, Youssef M, Henderson T, Agrawala A. An accurate technique for measuring the wireless side of wireless networks//*Proceeding of the 2005 Workshop on Wireless Traffic Measurements and Modeling*. Berkeley, California, USA, 2005: 13-18

- [6] Rodrig M, Reis C, Mahajan R, Wetherall D, Zahorjan J. Measurement-based characterization of 802.11 in a hotspot setting//Proceedings of the 2005 ACM SIGCOMM Workshop on Experimental Approaches to Wireless Network Design and Analysis. New York, USA, 2005: 5-10
- [7] Cheng Y C, Bellardo J, Benkő Péter, Snoeren A C, Geoffrey M, Voelker, Savage S. Jigsaw: Solving the puzzle of enterprise 802.11 analysis//Proceedings of the 2006 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. New York, USA, 2006: 39-50
- [8] Yang Wen-Guo, Guo Tian-De, Zhao Tong. An optimal lifetime model and its solution of a heterogeneous surveillance sensor network. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(7): 532-538(in Chinese)
(杨文国, 郭田德, 赵彤. 异构监测传感器网络寿命最大化模型及其求解. 计算机学报, 2007, 30(7): 532-538)
- [9] Liu C, Cao G. Distributed monitoring and aggregation in wireless sensor networks//Proceedings of the 29th Conference on Information Communications. Piscataway, New Jersey, USA, 2010: 1-9
- [10] Qin S H, Li H H, Xiong J Q, Zhao Q. Wireless embedded monitoring network system research based on radio frequency networks//Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian, China, 2008: 1-3
- [11] Wu T, Hu J, Gao C, Zhao J, Ye W. Wireless monitoring system based on bluetooth smart phones//Proceedings of the 2nd International Conference on Networking and Digital Society. Wenzhou, China, 2010: 648-651
- [12] Jin J, Zhao B, Zhou H. DLDC: A distributed link-weighted and distance-constrained channel assignment for single-radio multi-channel wireless mesh networks//Proceedings of the International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing, China, 2009: 1-5
- [13] Campbell C, Loo K K, Comley R. A new MAC solution for multi-channel single radio in wireless sensor networks//Proceedings of the 7th International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS). York, UK, 2010: 907-911
- [14] Zhang Z, Yu X. A simple single radio multi-channel protocol for wireless mesh networks//Proceedings of the 2nd International Conference on Future Computer and Communication. Wuhan, China, 2010: (V3-411)-(V3-415)
- [15] Nesargi S, Prakash R. Distributed wireless channel allocation in networks with mobile base stations. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(6): 1407-1421
- [16] Wormsbecker I, Williamson C. On channel selection strategies for multi-channel MAC protocols in wireless ad hoc networks//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications. Washington, USA, 2006: 212-220
- [17] Kanthi C N, Jain B N. Spanner based distributed channel assignment in wireless mesh networks//Proceedings of the 2nd International Conference on Communication Systems Software and Middleware. Bangalore, India, 2007: 1-10
- [18] You L, Wu P, Song M. Dynamic control and resource allocation in wireless-structured distributed cellular networks with OFDMA//Proceedings of the 2009 International Conference on Parallel Processing Workshops. Washington, USA, 2009: 337-343
- [19] Hou F, Huang J. Dynamic channel selection in cognitive radio network with channel heterogeneity//Proceedings of the 2010 IEEE Global Telecommunications Conference. Miami, Florida, USA, 2010: 6-12
- [20] Du Zhen-Guo, Hong Pei-Lin, Zhou Wu-Yang, Xue Kai-Ping. ICCA: Interface-clustered channel assignment in multi-radio wireless Mesh networks. Chinese Journal of Electronics, 2011, 39(3): 723-726(in Chinese)
(杜振国, 洪佩琳, 周武阳, 薛开平. 多射频无线 Mesh 网中的接口分域信道分配. 电子学报, 2011, 39(3): 723-726)
- [21] Scalosub G, Zheng R. On quality of monitoring for multi-channel wireless infrastructure networks//Proceedings of the 11th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. Chicago, Illinois, USA, 2010: 111-120
- [22] Shin D H, Bagchi S. Optimal monitoring in multi-channel multi-radio wireless mesh networks//Proceedings of the 10th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New Orleans, Louisiana, USA, 2009: 229-238
- [23] Kim B J, Leung K K. Frequency assignment for IEEE 802.11 wireless networks//Proceedings of the 58th IEEE Vehicular Technology Conference. Orlando, Florida, USA, 2003: 1422-1426
- [24] Chekuri C, Kumar A. Maximum coverage problem with group budget constraints and applications//Proceedings of the International Workshop on Approximation Algorithms for Combinatorial Optimization Problems. Cambridge, Massachusetts, USA, 2004: 72-83
- [25] Mhatre Vivek P, Papagiannaki K, Baccelli F. Interference mitigation through power control in high density 802.11 WLANs//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, Alaska, USA, 2007: 535-543
- [26] Kauffmann B, Baccelli F, Chaintreau A. Measurement-based self organization of interfering 802.11 wireless access networks//Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, Alaska, USA, 2007: 1451-1459
- [27] Bremaud P. Markov Chains, Gibbs Field, Monte Carlo Simulation and Queues. New York; Springer, 1999
- [28] Liu Jun S. Monte Carlo Strategies in Scientific Computing. New York; Springer-Verlag, 2001
- [29] Spall James C. Introduction to Stochastic Search and Optimization. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2003



XIA Na, born in 1979, Ph. D., associate professor. His main research areas are wireless sensor networks, navigation information processing, and computational intelligence and applications.

CHEN Xiu-Zhen, born in 1984, master. Her research area is wireless sensor networks.

XU Chao-Nong, born in 1977, Ph. D., associate professor. His main research areas are self-organizing wireless networks, embedded system.

ZHENG Rong, born in 1975, Ph. D., associate professor. Her research interests include network monitoring and diagnosis, cyber physical systems, and sequential learning and decision theory.

Background

With the extended applications and research of wireless infrastructure networks, wireless sensor network and web of things, it is becoming increasingly important to manage the wireless networks effectively by using wireless nodes to monitor and diagnose the condition and performance of these networks. Due to the constraint of hardware, wireless nodes can only collect information on one channel at a time. Therefore, it is a key issue to optimize the channel selection for nodes to maximize the information collected, so as to maximize the Quality of Monitoring (QoM) for wireless networks.

The authors of this paper have conducted the research in this direction from 2005, and have been supported by Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China (20070359029), Natural Science Foundation of Anhui Province (070412035), Fundamental Research Funds for the Central Universities (2011HGZL0010) and National Natural Science Foundation of China (61003307). The research team has done some creative work and published several papers in international or domestic journals and conference proceedings. From 2009 to 2010, the first author Xia Na acted as a

visiting scholar in WiSeR Lab of Computer Science Department, University of Houston, USA. He was mainly involved in the project "Robust resource management in ISM bands" (NSF CNS-0832084). He concentrated on the research of resources optimization in wireless networks, especially the channels allocation and management.

In 2010, one member of our research team (Zheng Rong) published a paper "On quality of monitoring for multi-channel wireless infrastructure networks" in *MobiHoc 2010*. In this paper, we defined the problem of maximizing Quality of Monitoring (QoM) of wireless networks, proved that it is a NP-hard problem, and using greedy algorithm and linear programming algorithm solved the problem and achieved good performance. Since these methods are centralized optimization methods, it is difficult to be applied in some fields. In this paper, we research and present a Gibbs sampling based distributed channel selection algorithm to improve the realizability of method. Furthermore, the convergence of algorithm can be proved, so that the performance of solution can be guaranteed.