

## 无线传感器网络中分簇算法能量有效性分析

李莉 温向明

(北京邮电大学通信网络综合技术研究所 北京 100876)

**摘要:** 该文针对无线传感器网络是一种能量受限的网络, 首先说明根据节点数目以及分布区域特征, 确定合理的成簇数目是分簇算法设计的核心; 然后给出节点在通信中使用的能量模型, 按照分簇的不同层数, 分别对其成簇的数目进行理论上的优化分析, 最后通过实验的方法验证优化的分簇算法能够满足能量有效性, 对均匀节点能耗分布, 提高网络生存时间有着重要作用。

**关键词:** 无线传感器网; 路由; 分簇; 能量有效

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2008)04-0966-04

## Energy Efficient Optimization of Clustering Algorithm in Wireless Sensor Network

Li Li Wen Xiang-ming

(Institute of Communication and Network Technology,

Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Based on the strict energy limitations in wireless sensor network, how to decide the number of clusters, which is influenced with the total number of sensors and the characteristics of the disposed area, is the key idea in clustering algorithm. The energy model used in the communication process is given, the optimization of the number of clusters according to different level of clusters is analyzed theoretically. The simulation results show that the rational number of clusters can unify the energy distributions of sensors and improve the lifetime of network.

**Key words:** Wireless Sensor network; Routing; Cluster; Energy efficient

### 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)是由具有计算、存储和无线通信能力的小型智能设备组成的分布式感知网络<sup>[1]</sup>。传感器节点负责收集监测区域内的声音、电磁或地震信号等多种信息, 通过无线信道将它们发送到 Sink 节点(或称汇聚点、基站 base station)。Sink 节点具有更强的处理能力, 能够进一步处理信息, 或拥有更大的发送范围, 可以将信息送往某个大型网络, 使远程用户能够检索到该信息。

通常传感器节点体积都非常小, 只具有有限的计算能力、有限的存储能力、有限的无线通信能力和有限的电源供应(电池供电)<sup>[2]</sup>, 因此满足能量有效性成为无线传感器网络通信协议设计的主要目标<sup>[3]</sup>。所谓能量有效性是指网络在有限的能源条件下能够处理的请求数量。具体表现在 WSN 中就是尽量节约传感器的能量, 最大化地延长工作的寿命。

理论和实验证明, 采用层次路由比平面路由更能满足能量有效性的要求。层次路由通过分簇算法对无线传感器网络中的节点进行层次划分, 将数据采集和通信任务分配给角色不同的节点执行, 有利于能耗在全网节点上的均匀、一致地

分布, 达到提高工作寿命的目的<sup>[4]</sup>。分簇算法也可以用于执行数据融合, 数据融合将传感器感测的大量数据组合成少量有意义的信息集合, 在达到应用规定的数据率的条件下, 传输的消息越少节省的能量就越多。本文主要讨论根据节点的分布数目与区域特征, 对分簇算法中如何确定成簇的数目以及层数进行优化分析, 使之满足能量有效性的要求, 并通过仿真结果进行验证。

### 2 相关概念

分簇是对网络中的节点进行层次划分, 若干地理位置相邻节点构成一个簇, 每个簇内选举一个簇首(cluster header)。簇内的节点将采集到的数据直接传送给簇首, 而簇首将数据融合后发送到 sink, 如果簇首距离 sink 比较远, 可以通过其它簇首进行转发。在分簇算法中主要包括成簇、簇维护、簇内路由和簇间路由 4 个部分。成簇主要解决如何在动态分布式网络环境下使节点高效地聚集成簇, 它是分簇算法的关键, 簇维护解决在节点移动过程中的簇结构维护, 其中包括移动节点退出和加入簇、簇的产生和消亡等功能。簇内(intra-cluster)和簇间(inter-cluster)路由主要是从降低能量消耗的角度, 选择最优化的路由。衡量一个分簇算法的优劣主要有以下几个标准, 簇结构的稳定性, 簇首节点的数量以及负载均衡度等。

无线传感器网络中最具有代表性的分簇算法是低功耗自适应簇类路由协议即(LEACH, Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy)<sup>[5]</sup>, LEACH中定义了“轮(round)”的概念, 一轮由初始化和稳定工作两个阶段组成; LEACH实现了一个负载平衡进程, 允许不同节点在不同的时间以随机概率  $P$  成为簇首, 平均分担中继通信业务。同平面路由协议相比, LEACH 提高了网络的整体性能, 均衡了传感器节点之间的能量消耗; 后续很多分簇算法都是在 LEACH 基础上进行改进。

多层分簇<sup>[6]</sup>是无线传感器网络的一种新的分簇实现机制, 这种算法的设计思想是根据所要求达到的层数, 在原来传统分簇的基础上, 采用由底至上(bottom-up)的原则继续进行分簇, 每一层的簇首由下一层簇首以一定的概率产生, 直到最高层的簇首选出, 就完成了整个分簇体系。在多层分簇中, 假设网络节点被分成  $h$  层簇, 则整个通信过程是由最底层的传感器节点将采集的数据传递给第 1 层簇首, 第 1 层簇首将数据融合后传递给第 2 层簇首, 这样依次进行下去。最后, 当第  $h$  层簇首收到来自第  $h-1$  层簇首发送来的数据, 进行融合处理后发送到 Sink 节点。因此, 整个通信过程中所消耗的能量为每层通信所消耗能量的求和  $\sum_{i=1}^h E_i$ 。多层分簇更好地满足了能量有效性要求, 但实施的复杂度也有所增加。

### 3 能量有效性优化分析

成簇是分簇算法的关键问题, 而如何在给定的网络条件下, 达到合适的成簇数目并且满足能量有效性的要求成为设计成簇的核心思想。成簇的数目不能太多也不能太少, 如果太多将会引入大量的成簇开销, 节点的能耗将增大, 而且可允许复用的网络资源有限; 如果数目太少, 每个簇内的成员节点数增多, 簇首将承担过重的收发负担, 能量消耗增加而导致过早死亡, 因此合适的成簇数目不仅可以均衡节点的能耗, 延长工作寿命, 而且可以有效地提高链路的利用率。下面分别对单层分簇和多层分簇中成簇数目的优化问题进行讨论。

#### 3.1 能量损耗模型

确定合理的簇首数目是建立在充分考虑能量有效性的基础之上, 因此, 首先定义节点在通信过程中能量损耗模型。我们使用文献[5]中的无线通信系统模型进行计算, 该模型由发送电路、功率放大器和接收电路构成, 当发端传输  $b$  比特数据到距离为  $d$  的接收端时, 发送所消耗的能量为

$$\begin{cases} E_{Tr} = bE_{elec} + bu_1d^2, & d < d_0 \\ E_{Tr} = bE_{elec} + bu_2d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

接收所消耗的能量为  $E_{RX} = bE_{elect}$

其中  $d_0 = \sqrt{u_1^2/u_2}$  为距离的临界值, 当收发之间的距离小于该临界值, 则使用自由空间模型; 如果大于该值, 则使用双

路径模型。各个参数的具体含义和取值如表 1 所示。

表 1 能量参数表

符号	表示意义	取值
$E_{elec}$	发送和接收电路的能耗	$E_{elec} = 50\text{nJ/bit}$
$u_1, u_2$	分别在不同传输距离条件下, 放大电路的能耗	$u_1 = 10\text{pJ/b/m}^2,$ $u_2 = 0.0013\text{pJ/b/m}^4$
$E_F$	数据融合消耗的能量	$E_F = 5\text{nJ/bit}$

#### 3.2 单层分簇

初始化状态网络中节点具有相同的能量, 簇首的产生一般有两种情况<sup>[6]</sup>, 首先节点以广播的形式向邻居节点发送成簇信息, 相邻节点根据收到信号的强弱选择准备加入的簇, 并向发送节点返回确认消息, 则发送节点成为自愿簇首(volunteer cluster head); 如果节点没有收到其它节点的消息, 则节点成为强迫簇首(forced cluster head), 最终成簇数目为两种簇首数目之和。

假设无线传感器网络中有  $N$  个节点, 分布在边长为  $A \times A$  的正方形区域内, 分布密度服从参数为  $\lambda = N/A^2$  的泊松分布, Sink 节点位于分布区域以外, 节点的传播范围为  $r$ , 理想的成簇概率为  $P$ , 其中自愿簇首的概率为  $P_1$ , 强迫簇首的概率为  $P_2$ , 最终成簇的数目为  $K = NP$ , 簇首节点的分布密度为  $\lambda_1 = p\lambda$ , 普通节点的分布密度  $\lambda_0 = (1-p)\lambda$ 。如果  $\lambda_1, \lambda_0$  相互独立, 则根据文献[7,8]的推论结果, 每个簇内的成员节点的数目为  $E[n_c] = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty e^{-\lambda_1 \pi x^2} \lambda_0 x dx d\theta = \lambda_0/\lambda_1$ , 簇内成员到簇首的平均距离为  $d_{toCH} = 1/(\pi\lambda_1)$ , 设簇内节点发送数据给簇首所消耗的能量为  $E_{no-CH}$ , 根据能量损耗模型则有:

$$E_{no-CH} = bE_{elec} + bu_1[1/(\pi\lambda_1)]^2 \quad (1)$$

簇首将收到的数据进行融合处理后发送给汇聚点, 消耗能量为  $E_{CH}$ :

$$E_{CH} = b\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1}\right)E_{elec} + b\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_1} + 1\right)E_F + bE_{elec} + bu_2d_{toCH}^4 \quad (2)$$

一个簇所消耗的总能量为  $E_{cluster} = E_{CH} + \frac{\lambda_0}{\lambda_1}E_{no-CH}$  (3)

网络所消耗的总能量为  $K$  个簇的能量之和即

$$E_{total} = KE_{cluster} = K\left(E_{CH} + \frac{\lambda_0}{\lambda_1}E_{no-CH}\right) \quad (4)$$

将式(1), 式(2)代入到式(4)中, 令  $p = K/N$ , 并将  $\lambda_1, \lambda_0$  转换为以  $k$  为自变量的函数, 得到消耗总能量的表达式:

$$E_{\text{total}} = 2bNE_{\text{elec}} + \frac{u_1 b A^2}{\pi} \left( \frac{N}{K} - 1 \right) + bE_F N + Kb(u_2 d_{\text{to sink}}^4 - E_{\text{elec}}) \quad (5)$$

$$\text{令 } \frac{\partial E_{\text{total}}}{\partial K} = 0, \text{ 求得 } K = \sqrt{\frac{u_1}{\pi(u_2 d_{\text{to sink}}^4 - E_{\text{elec}})}} A \sqrt{N} \quad (6)$$

从式(6)可知, 在给定分布区域大小  $A$  和节点数目  $N$  的条件下, 代入相关能量参数可以得到满足能量有效性条件下的理想分簇数目  $K$ 。

当确定簇首数目以后, 可求得成簇概率  $p = K/N$ , 则节点成为自愿簇首概率  $P_1$  和强迫簇首概率  $P_2$  满足下式:

$$p_1 + p_2(1 - p_1)(1 - p_1 r^2 / A^2) = K/N \quad (7)$$

**证明** 随机变量  $X$  表示网络中产生簇首数目, 节点  $i$  成为簇首, 则有  $X_i = 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ , 设  $X_{i,1}$ ,  $X_{i,2}$  分别表示节点  $i$  成为自愿簇首或是强迫簇首, 两者相互独立。

$$\begin{aligned} E[X_i] &= P[X_i = 1] \\ &= P[(X_{i,1} = 1) \cup (X_{i,2} = 1)] \\ &= P[X_{i,1} = 1] + P[X_{i,2} = 1] \\ &= E[X_{i,1}] + E[X_{i,2}] \end{aligned}$$

其中  $E[X_{i,1}] = p_1$ ,  $E[X_{i,2}] = p_2 \times p$  (节点  $i$  没选作自愿簇首的概率)  $= p_2 \times (1 - p_1)(1 - p_1 r^2 / A^2)^{n-1}$  又因  $E[X_i] = E[X]/N = K/N$ , 所以式(7)成立。证毕

### 3.3 多层分簇

在单层分簇的基础上, 根据层数的要求继续对网络中的节点进行分簇, 假设每层簇首数目为  $k_i$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, h$ ,  $h$  为最高层。对于第  $i$  层的节点来说, 簇首数目  $k_i$  是在第  $i-1$  层  $k_{i-1}$  个节点中以一定概率产生, 每个簇内有  $k_{i-1}/k_i$  成员节点, 簇首的分布密度服从  $\lambda_i = k_i/A^2$ 。根据上节的分析, 一个簇内消耗的总能量为簇首和成员节点的能量之和, 即

$$E_{\text{total}(i)} = [E_{\text{CH}_i} + [(k_{i-1}/k_i) - 1]E_{\text{no-CH}_i}] \quad (8)$$

其中簇内成员消耗的能量:

$$E_{\text{no-CH}_i} = bE_{\text{elec}} + bu_1 \left( \frac{1}{\lambda_i} \right)^2 = bE_{\text{elec}} + bu_1 \left( \frac{A^2}{\pi k_i} \right) \quad (9)$$

簇首消耗的能量分为两种情况: 当簇首节点处于  $i = h$  层时, 收集和处理后的数据将直接发送到汇聚节点, 而当层数小于  $h$  时, 簇首将数据发送到其相邻的第  $i+1$  层节点, 因此:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{CH}_i} &= b \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) E_{\text{elec}} + b \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} \right) E_F + bE_{\text{elec}} + bu_2 d_{\text{to sink}}^4, \quad i = h \\ E_{\text{CH}_i} &= b \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) E_{\text{elec}} + b \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} \right) E_F + bE_{\text{elec}} + bu_1 \frac{A^2}{\pi k_{i+1}}, \quad i < h \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

综上, 第  $i$  层中  $k_i$  个簇所消耗的总能量为

$$E_{\text{cluster}(i)} = k_i \left[ E_{\text{CH}_i} + \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) E_{\text{no-CH}_i} \right] \quad (11)$$

网络所消耗的总能量是各层能耗的求和, 由于最高层的簇首直接将数据发送给汇聚节点  $\text{sink}$ , 同其底下各层簇节点

的操作有所不同, 先对第 1 层到第  $h-1$  层所消耗的能量进行求和, 最后再加上最高层  $h$  的能耗。具体求解如下:

令从  $i = 1$  到  $i = h-1$  所消耗的能量为  $E_{\text{total}(1 \rightarrow h-1)}$ , 则有表达式:

$$\begin{aligned} E_{\text{total}(1 \rightarrow h-1)} &= \sum_{i=1}^{h-1} k_i \left[ \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) bE_{\text{elec}} + \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} \right) bE_F + \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) \right. \\ &\quad \cdot \left. \left( bE_{\text{elec}} + \frac{u_1 b A^2}{\pi k_i} \right) \right] = \sum_{i=1}^{h-1} \left[ 2(k_{i-1} - k_i) bE_{\text{elec}} + k_{i-1} bE_F + \frac{u_1 b A^2}{\pi} \right. \\ &\quad \cdot \left. \left( \frac{k_{i-1}}{k_i} - 1 \right) \right] \quad (12) \end{aligned}$$

令  $i = h$  消耗的能量为  $E_{\text{total}(i=h)}$ , 则有表达式

$$\begin{aligned} E_{\text{total}(i=h)} &= k_h \left[ \left( \frac{k_{h-1}}{k_h} \right) bE_{\text{elec}} + \left( \frac{k_{h-1}}{k_h} \right) bE_F + bu_2 d_{\text{to sink}}^4 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{k_{h-1}}{k_h} - 1 \right) \left( bE_{\text{elec}} + b \frac{u_1 A^2}{\pi k_h} \right) \right] = 2bE_{\text{elec}} k_{h-1} - k_h bE_{\text{elec}} \\ &\quad + bE_F k_{h-1} + k_h bu_2 d_{\text{to sink}}^4 + b \frac{u_1 A^2}{\pi k_h} \left( \frac{k_{h-1}}{k_h} - 1 \right) \quad (13) \end{aligned}$$

将式(12), 式(13)合并得到网络消耗的总能量  $E_{\text{total}} = E_{\text{total}(1 \rightarrow h-1)} + E_{\text{total}(i=h)}$ , 化简整理后:

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= 2NbE_{\text{elec}} + \sum_{i=1}^h k_{i-1} bE_F + b \frac{u_1 A^2}{\pi} \left[ \sum_{i=1}^h \frac{k_{i-1}}{k_i} - h \right] \\ &\quad + k_h b(u_2 d_{\text{to sink}}^4 - E_{\text{elec}}) \quad (14) \end{aligned}$$

根据总能量的表达式, 当满足能耗最小值时, 直接求解每层的成簇数目比较困难。可以通过对式(14)求不同参数的导数后, 得出成簇数目之间的关系式。因  $k_{i=0} = N$ , 对式(14)进行变形整理。

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= 2NbE_{\text{elec}} + E_F b \left( N + \sum_{i=1}^{h-1} k_i \right) + \frac{u_1 b A^2}{\pi} \left( \frac{N}{k_1} + \sum_{i=2}^h \frac{k_{i-1}}{k_i} \right) \\ &\quad + k_h b(u_2 d_{\text{to sink}}^4 - E_{\text{elec}}) \quad (15) \end{aligned}$$

当  $\frac{\partial E_{\text{total}}}{\partial k_1} = 0$ , 得到  $k_1$  与  $k_2$  之间的关系式

$$N/k_1^2 - 1/k_2 = \pi E_F / (u_1 A^2) \quad (16)$$

当  $\frac{\partial E_{\text{total}}}{\partial k_i} = 0$ ,  $i \in [2, h-1]$ , 得到  $k_i$  与  $k_{i-1}$  之间关系式

$$k_{i-1}/k_i^2 - 1/k_{i+1} = \pi E_F / (u_1 A^2) \quad (17)$$

当  $\frac{\partial E_{\text{total}}}{\partial k_h} = 0$ , 得到  $k_h$  所满足的关系式

$$k_{h-1}/k_h = [\pi / (u_1 A^2)] (u_2 d_{\text{to sink}}^4 - E_{\text{elec}}) \quad (18)$$

从上面的关系式中可知, 随着分簇层数的增加, 计算复杂度也随之增加, 因此, 多层分簇中层数取值并不越大越好, 过多的分层反而将会产生较大的通信开销。针对多层分簇中成簇数目和分层数目不能通过理论分析直接求得, 我们将采用仿真的方法做进一步的分析。

## 4 仿真分析

首先建立一个简单的网络模型, 100 个传感器节点均匀分布在  $100\text{m} \times 100\text{m}$  的正方形区域内组成一个无线传感器

网络, 汇聚节点 sink 位于分布区域之外, 能量参数的取值如表1所示, 每个节点的初始能量为2J, 数据包大小为500byte。每一轮持续的时间为175s, 总共进行了5次仿真, 最终结果取平均值。

对于单层分簇, 通过改变成簇的数目( $k$ 的取值从1到10), 观察网络能量消耗的大小变化, 如图1所示, 随着成簇数目的增加, 系统的总能耗先减少后增加, 当成簇数目 $k=3$ 时, 能耗取得最小值。这同理论分析得出 $k=2.8$ 的结果非常相近。分簇数目的增大而导致能耗增加的原因主要是当网络中簇的数目过多时, 簇内与簇间节点需要维护的通信开销就增多, 因而能耗也随之增大, 特别是簇首与汇聚节点之间的通信采用的是双路径模型, 距离 sink 较远的簇首能量消耗会更大。所以在确定满足能量有效性的成簇数目时, 应当充分依据节点的数目和分布区域等具体的网络特征。

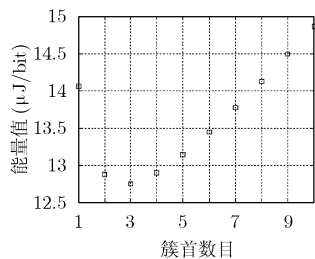


图1 簇首数目与能耗之间的变化关系

对于多层分簇, 我们在单层分簇的基础上继续对其分簇, 当层数达到5时终止程序的执行。得到层数与能耗之间的变化关系如图2所示。随着分簇层数的增加, 网络的总能耗也相应减少, 这同理论分析是一致的, 尤其是当分簇的层数从1层增加到2层时, 能耗降低了10%左右, 变化幅度非常明显, 而当层数再继续增加时, 能耗的降低幅度变得比较小。因此, 采用多层分簇进一步节约节点的能耗是可取的, 但是考虑到实施的复杂度, 并不是层数越多越好。当分簇的层数达到2或3时, 从节能和降低复杂度两方面均衡考虑, 效果是比较理想的。

根据以上的讨论, 我们对节能效果比较好的2层分簇算法作进一步的研究, 主要根据式(15)和式(16)对如何确定每层的成簇数目进行分析。 $k_1$ ,  $k_2$ 分别表示第1层簇首和第2层簇首的数目, 两者不同的取值引起网络的能耗变化。在图3所示的三维曲面图中, 颜色的深浅程度表示了能耗大小的变化趋势, 其中最深色区域表示能量的最小值, 此时求得, 第1层簇首 $k_1$ 的取值接近9, 第2层簇首 $k_2$ 的取值在[1,2]之间。该结果验证了多层分簇对节约节点能耗和延长工作寿命有重要作用, 尤其是层数值较低的多层分簇, 总体效果比较理想。

## 5 结束语

分簇算法是实现层次路由的核心机制, 其基本思想是通

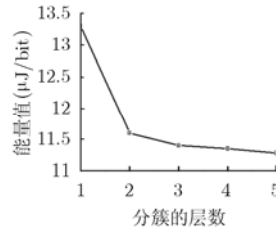


图2 层数与能耗之间的变化关系

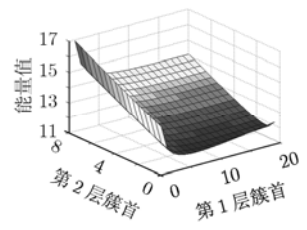


图3 2层分簇的能耗变化

过簇首对簇内节点之间的相关信息融合及转发机制减少数据的传输量和距离, 进而降低通信能量, 达到网络节能的目的。本文通过对单层分簇和多层分簇中如何根据节点的数目以及分布特征, 选择合适的成簇数目进行能量有效性的优化分析, 并通过实验进一步验证其满足能量有效性, 尤其是层数较低的多层分簇, 在减少能耗和延长节点寿命等方面效果更具优势。

## 参考文献

- [1] Pottie G and Kaiser W. Wireless sensor networks. *Communications of the ACM*, 2000, 43(5): 51-58.
- [2] 李国华, 田辉, 崔鸿雁, 沈树群. 无线传感器网络中一种基于能量策略的路由算法[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(1): 168-171.
- [3] Bandyopadhyay S and Coyle E J. An energy efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks[C]. *Proceedings of INFOCOM*, San Francisco, Calif, USA, March 2003, Vol.3, 1713-1723.
- [4] Handy M J, Haase M, and Timmermann D. Low energy adaptive Clustering Hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]. *Proceedings of the 4th IEEE International Workshop on Mobile and Wireless Communications Network*. Paris, France, 2002: 368-372.
- [5] Heinzelman W R, Chandrakasan A, and Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4): 660-670.
- [6] Yuanzhu P C, Arthur L, Liestman, and Liu Jiangchuan. Energy efficient data aggregation hierarchy for wireless sensor networks[C]. *The Second International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks (QSHINE)*, Orlando, FL, 2005: 7-15.
- [7] Foss S G and Zuyev S A. On a voronoi aggregative process related to a bivariate poisson process [J]. *Advances in Applied Probability*, 1996, 28(4): 965-981.
- [8] Frank C, Shyamala C S, and William R. Energy conserving architectures and algorithms for wireless sensor networks[C]. *Proceedings of the 39th Hawaii International Conference on Systems Sciences*, Washington, DC, USA, 2006: 236-245.

李莉: 女, 1978年生, 博士生, 研究方向为下一代无线网络关键技术。

温向明: 男, 1959年生, 北京邮电大学副校长, 博士生导师, 研究方向为无线网络中的关键技术、IP及宽带接入技术。