

文章编号: 1001-0920(2013)04-0613-05

## 基于马尔可夫链策略的传感器网络节点密度控制算法

刘 逵, 刘三阳, 冯海林

(西安电子科技大学 理学院, 西安 710071)

**摘 要:** 如何保证多跳自组织网络的连通性是无线传感器网络研究的核心问题. 在正态遮蔽衰退模型的基础上, 借助状态转移概率矩阵提出一种基于马尔可夫链策略的节点密度控制算法. 该算法利用一步转移概率矩阵求出信号在任意节点对之间互达的迟早概率, 并通过令节点间信号互达的迟早概率趋近于 1 来逼近网络全连通时的最小节点密度. 实验结果表明, 与 R.HEKMAT 算法相比, 所提出的算法能有效降低数值误差, 从而提高算法结果与实验数据的吻合度.

**关键词:** 无线传感器网络; 连通性; 马尔可夫链; 状态转移矩阵

中图分类号: TN939

文献标志码: A

### Node density control algorithm based on Markov chain for wireless sensor networks

LIU Kui, LIU San-yang, FENG Hai-lin

(School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China. Correspondent: LIU San-yang, E-mail: liusanyang@126.com)

**Abstract:** How to guarantee the connective of ad-hoc networks is an important work in the learning of wireless sensor networks. In this paper, based on a log-normal shadow fading model which takes into account statistical variations of the radio signal power around its mean value, and by using the condition transition matrix of Markov chain and the log-normal shadow fading model, a minimum nodes density algorithm is proposed to get the minimum node density to ensure the connective of wireless sensor networks. The probability of signal transmit between an arbitrary pair of sensor nodes can be obtained by using the one-step transition probability matrix. So the minimum node density to ensure the connective of networks can be got by letting the probability of signal transmitting between an arbitrary pair of sensor nodes approach one. Compared with other algorithms like R.HEKMAT algorithm, simulation results show that the proposed approach can reduce the error of the numerical examples. So that the identical degree of the results of the minimum nodes density algorithm and the experimental data is improved.

**Key words:** wireless sensor networks; connectivity; Markov chain; condition transition matrix

## 0 引 言

近年来, 无线传感器网络在环境监测、战场监视以及交通流量监测等诸多方面的应用非常广泛. 面对这些实际的应用, 如何保证网络的连通性以及最大化沿长网络的生存时间变得至关重要. 传感器节点一般是随机地分布在野外等环境比较恶劣的地方, 如果节点的密度过大, 则会加大节点之间的通信冲突; 如果节点的密度过小, 则无法保障系统的连通性和对被监测区域的覆盖程度, 因此节点密度的大小直接影响着无线传感器网络的服务质量和网络代价.

目前有关自组织网络(Ad.Hoc)连通问题的研究已经取得了丰富的成果<sup>[1-5]</sup>. 其中文献[1-4]提出的策略均是基于路耗衰退几何模型设计的, 该模型没有考虑障碍物和场地周边环境对节点信道的干扰情况. 这种干扰造成了信号到达距源节点距离相等的各节点时, 具有不同的衰退值, 因此可能造成一些距源节点距离小于阈值的节点不在其通信范围之内, 而一些距源节点距离大于阈值的节点反而在其通信范围之内, 从而使得该模型的实用性差、误差大. 在路耗衰退几何模型的基础上, 文献[5]提出了一种正态遮蔽

收稿日期: 2011-10-19; 修回日期: 2012-05-03.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60874085, 60974082).

作者简介: 刘逵(1980—), 男, 博士生, 从事无线传感器网络算法及其优化的研究; 刘三阳(1959—), 男, 教授, 博士生导师, 从事现代最优化理论与方法、无线传感器网络算法及其优化的研究.

衰退模型,该模型充分考虑了障碍物和节点所处场地的周边环境对节点信道的干扰情况.正态遮蔽衰退模型在路耗衰退公式中引入一个服从标准正态分布的随机衰退因子,并用随机衰退因子来刻画障碍物和不规则的周边环境对节点信道的干扰程度,因此该模型比路耗衰退几何模型更加实用、可靠.同时文献[6]证明了如下结论,即在无限大的区域或者封闭的球形区域上(目的是避开边界效应带来的影响),网络达到 $K$ 连通时的节点密度趋近于网络中最小节点度数不小于 $K$ 时的节点密度.文献[5]在该理论的支撑下设计了一种求最小节点密度以保证网络连通的R.HEKMAT算法.在无限大的区域上,取该区域中间某块作为目标区域(目的是避开边界效应带来的影响)进行实验,实验结果与算法求出的数据相吻合;但在有限的区域或不封闭的区域上,由于存在边界效应,实验结果与算法求出的数据存在明显误差.由于R.HEKMAT算法要求初始网络布置的区域无限大以避开边界效应的影响,这就大大限制了R.HEKMAT算法的实用性.

针对上述问题,本文借助马尔可夫链中的一步转移概率矩阵<sup>[7]</sup>,提出一种基于马尔可夫链策略的节点密度控制算法.该算法以R.HEKMAT算法求出的结果为初始值,借助任意节点对之间的信号互达迟早概率来逼近网络全连通时的节点密度.算法结果与实验数据相吻合,因此本文提出的基于马尔可夫链策略的控制算法比R.HEKMAT方法更加实用可靠.

## 1 正态遮蔽衰退模型

### 1.1 正态遮蔽衰退模型

在路耗衰退几何模型中,各节点具有相同的发射功率 $P_t$ 和接收阈值功率 $P_{r,th}$ ,利用发射功率和接收阈值功率求得的传感器节点的接收分贝阈值<sup>[8]</sup>为 $\beta_{th} = 10 \times \lg \frac{P_t}{P_{r,th}}$  dB,信噪衰退公式为

$$\beta_1(u, v) = 10 \times a \lg s(u, v) \text{ dB}.$$

如果 $\beta_1(u, v) \leq \beta_{th}$ ,则两节点间有一条边;否则两节点间无边.当 $\beta_1(u, v) = \beta_{th}$ 时,求出的 $s(u, v)$ 即是节点 $u$ 的最大一跳通信半径,记为 $r_0$ .因为该模型没有考虑障碍物和场地周边环境对节点信道的干扰情况,所以该模型误差较大.R.HEKMAT等<sup>[9-11]</sup>在路耗衰退几何模型的基础上设计了一种更为实用、精确的正态遮蔽衰退模型,他们将网络中各种恶劣因素对节点通信能力的干扰用一个服从正态分布的随机变量 $\beta_2$ 来刻画,其概率密度函数为

$$f(\beta_2) = \frac{1}{2\pi\sigma} \exp(-\beta^2/(2\sigma^2)),$$

则信噪衰退公式变为

$$\beta(u, v) = \beta_1(u, v) + \beta_2.$$

如果 $\beta_1(u, v) + \beta_2 \leq \beta_{th}$ ,则两节点 $u, v$ 便能建立直接通信的边,两节点之间有边的概率为

$$P(A(u, v)|s(u, v)) = P(\beta(u, v) \leq \beta_{th}|s(u, v)) = \int_{-\infty}^{\beta_{th}-\beta_1} f(\beta_2) d\beta_2.$$

将变量 $\beta_2$ 的概率密度函数代入上式化简可得

$$P(A(u, v)|s(u, v)) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{10a}{\sqrt{2}\sigma} \lg \frac{s(u, v)}{r_0}\right). \quad (1)$$

其中

$$\operatorname{erf}(Z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \exp(-\xi^2) d\xi, \quad r_0 = 10^{\frac{\beta_{th}}{10a}} \text{ m}.$$

图1为路耗指数 $a = 4$ 时,对应不同的标准差 $\sigma$ ,相距为 $s$ 的两节点间存在一条边的概率.其中 $x$ 轴的坐标为两节点之间距离 $s$ 与 $r_0$ 的比值.

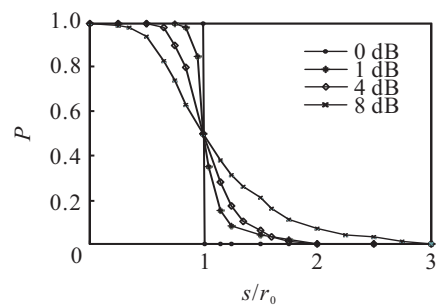


图1 正态遮蔽衰退模型

### 1.2 节点的平均度数

节点的邻居个数称为节点的度,其均值为

$$E(D) = \sum_{i=1}^{\infty} P_i(A|s_i) \pi(s_i^2 - s_{i-1}^2) \rho,$$

化简上式可得

$$E(D) = 2\pi\rho \int_0^{\infty} P(A|s) s ds + 0 = 2\pi\rho \int_0^{\infty} P(A|s) s ds,$$

节点度数是一个服从泊松分布的随机变量,强度为 $E(D)$ .利用泊松分布的性质可得,节点为孤立节点的概率是 $P(D=0) = e^{-E(D)}$ .

## 2 R.HEKMAT算法的局限性

**定义1** 在无线传感器网络中,任意两节点之间均有 $K$ 条相互独立的链路(即每条链路除了源节点和目标节点相同外,中间节点不相同,则称链路相互独立)供两节点进行通信,称这个网络是 $K$ -连通的.

**定义2** 在无线传感器网络中所有节点的邻居个数最少的那个节点,其邻居个数称为此网络的最小节点度数.

在一个无限大区域或一个封闭的球形区域上(目的是为了屏蔽区域边界对边界节点度数的影响:无限大的区域弱化了边界节点所受的边界效应;封闭的球形区域则没有边界,各节点所处的环境是相同的,不存在边界效应),存在以下性质<sup>[6]</sup>.

**引理1** 节点按强度为 $\lambda = \rho(t)A$ 的泊松分布

随机部署在上述目标区域上(其中 $\rho$ 为目标区域上的节点密度,  $A$ 为目标区域的面积), 且密度 $\rho(t)$ 是关于时间 $t$ 的增函数, 则随着时间的增长, 在某个时刻无线传感器网络同时到达 $K$ -连通和最小节点度数不小于 $K$ 这两种状态; 且对每个时刻的 $\lambda = \rho(t)A$ , 网络恒有 $P[G \text{ 是 } K \text{ 连通的}] = P[G \text{ 中节点最小度数不小于 } k]$ .

R.HEKMAT 算法依据上述引理设计一种求最小节点密度以保证网络 $K$ -连通的方法, 利用NS2仿真平台, 基于RTS/CTS方式的CSMA/CA协议进行仿真实验. 设定 $\beta_{\text{th}} = 30 \text{ dB}$ ,  $a = 3$ ,  $\sigma = 5 \text{ dB}$ ,  $S = 10^6 \text{ m}^2$ 的封闭球形区域, 节点均位于球面上且各节点的通信半径为 $r_0 = 10^{\frac{\beta_{\text{th}}}{10}} = 100 \text{ m}$ . 令基站位于球心, 各节点利用各自的定位装置定位, 并将位置信息发送给基站, 基站计算出每对节点之间建立一条边的概率. 利用统计原理, 逐步加大节点的密度, 对应每一个密度值, 做1000次仿真实验, 依次查看网络 $K$ -连通的概率和节点最小度数是 $K$ 的概率, 如图2所示.

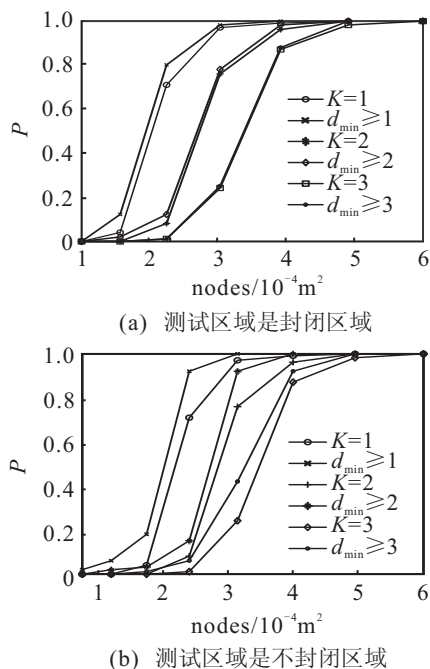


图2 不同条件下网络 $K$ -连通和节点最小度数是 $K$ 的概率

从图2可以看出, 在封闭的区域上, 数据吻合度较高, 但在有限区域或不封闭区域上, 仿真结果误差很大, 这主要是由边界效应造成的, 因此R.HEKMAT算法在应用上存在很大的局限性.

### 3 基于马尔可夫链策略的密度控制算法

#### 3.1 理论基础

在无限大区域或封闭的球形区域上, 无线传感器网络是连通的等价于网络中无孤立节点, 但在有限区域或不封闭的球形区域上, 二者并不等价. 网络中无孤立节点的条件弱, 而网络是连通的条件强. 随着节

点密度的加大, 网络最先达到无孤立节点状态, 进一步加大节点密度才可达到全连通状态. 因此, 在有限或不封闭的区域上, 可先求出网络达到无孤立节点状态时的节点密度 $\rho$ ; 然后在此基础上利用信号的一步转移概率矩阵求出任意节点对之间信号互达的迟早概率 $f(u, v)$ , 并令其趋近于1来逼近网络全连通时的节点密度 $\rho^*$ . 由节点的平均邻居个数的均值可以求出 $P(\text{no isolation} | \text{number of nodes is } n) = (1 - e^{-E(D)})^n$ , 所以在面积为 $A$ , 节点密度为 $\rho$ 的不封闭区域上, 网络中无孤立节点的概率为

$$P(\text{no isolation}) = \sum_{n=0}^{\infty} P(N = n)(1 - e^{-E(D)})^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho A)^n}{n!} e^{-\rho A} \times (1 - e^{-E(D)})^n = e^{-\rho A} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\rho A - \rho A e^{-E(D)})^n}{n!} = e^{-\rho A e^{-E(D)}}. \quad (2)$$

用概率 $P$ 表示节点的密度 $\rho$ , 将式(2)两边取对数可得

$$\ln P = -\rho A e^{-E(D)} = -\rho A e^{-2\pi\rho\xi},$$

化简可得

$$\frac{2\pi\xi}{-A} \ln P = 2\pi\rho\xi e^{-2\pi\rho\xi}.$$

令 $x = 2\pi\rho\xi$ , 同时设函数 $y = xe^{-x}$ 的反函数为 $x = g(y)$ , 将其代入上式可得

$$\rho = \frac{1}{2\pi\xi} g\left(\frac{2\pi\xi \ln P}{-A}\right). \quad (3)$$

其中:  $\xi = \int_0^{\infty} P(\Delta|s) ds$ , 当网络中无孤立节点的概率 $P$ 趋近于1时, 其对应的节点密度 $\rho$ 可通过式(3)求出, 面积为 $A$ 的区域上节点个数为 $n$ , 各节点利用自身的定位装置定位, 并将信息传送给基站. 对每个节点 $u$ , 基站利用各节点的位置信息计算其与另外 $(n-1)$ 个节点之间的距离 $S(u, v)$ , 代入式(1)可得节点 $u$ 与其他 $(n-1)$ 个节点直接通信的概率 $P(\Lambda(u, v)|S(u, v))$ , 从而得到信号从节点 $u$ 跳到节点 $v$ 的概率为

$$N(u, v) = \frac{P(\Lambda(u, v)|S(u, v))}{\sum_{v=u} P(\Lambda(u, v)|S(u, v))}. \quad (4)$$

建立 $n \times n$ 阶信号一步转移概率矩阵 $N$ , 以式(4)作为矩阵 $N$ 中节点 $u$ 对应的行与节点 $v$ 对应的列相交处的元素, 将每个节点看成是信号的一个状态. 信号从一个节点转移到另一个节点时, 可看作是信号由一个状态节点转移到另一个状态节点. 下面将讨论信号从一个状态节点转移到另一个状态节点的马尔可夫性.

**定理1** 对应于节点密度 $\rho$ , 信号在其生成的无线传感器网络中传送的过程可看成是一个有限、齐次

的马尔可夫链.

**证明** 以各节点作为信号的一个状态, 节点的个数  $n$  为一有限数字, 于是信号便有  $n$  个状态供其转移, 即信号转移的状态集是有限且离散的; 同时信号从一个状态节点转移到另一个状态节点, 中间经过的跳数均为整数, 即其参数集也是离散的. 又因为信号从状态节点  $u$  转移到状态节点  $v$  的概率  $P(A(u, v)|S(u, v))$  与信号传送到状态节点  $u$  之前经历过的状态节点无关, 同时与信号传送到状态节点  $u$  之前经历过的跳数也无关, 它仅与信号当前在状态节点  $u$  这个条件有关, 所以信号在此无线传感器网络中传送的过程是一个有限的、齐次马尔可夫链. 当对应于节点密度  $\rho$  生成的无线传感器网络是一个连通的网络时, 各状态节点均是常返状态. 此时信号在网络中传送的过程可视为一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链.  $\square$

**引理 2 (Doebelin 公式)** 对于有限、齐次马尔可夫链中的任意两个状态节点  $u$  和  $v$ , 信号从状态节点  $u$  转移到状态节点  $v$  的迟早概率为

$$f(u, v) = \lim_{E \rightarrow \infty} \frac{\sum_{e=1}^E N^e(u, v)}{1 + \sum_{e=1}^E N^e(v, v)}, \quad (5)$$

其中  $N^e(u, v)$  为信号  $e$  步从状态节点  $u$  转移到状态节点  $v$  的概率.

证明过程参见文献 [7].

对应于节点密度  $\rho$ , 基站利用各状态节点的位置信息求出信号一步转移概率矩阵  $N$ , 然后借助 Doebelin 公式求出信号从一个状态节点传送到另一个状态节点的迟早概率.

**定理 2** 如果对应于密度  $\rho$  生成的无线传感器网络是不连通的, 则存在状态节点对  $(u, v)$ , 使信号从状态节点  $u$  转移到状态节点  $v$  的迟早概率满足  $f(u, v) \rightarrow 0$ ; 如果网络是连通的, 则对于任意的状态节点对  $(u, v)$ , 均有  $f(u, v) \rightarrow 1$ .

**证明** 如果对应于节点密度  $\rho$  生成的无线传感器网络是不连通的, 则网络中至少存在两个连通分枝, 分别从不同的连通分枝中取出状态节点  $u$  和  $v$ , 则这两个状态节点是不连通的, 即  $P(A(u, v)|S(u, v)) \rightarrow 0$ , 从而有  $N(u, v) \rightarrow 0$ . 因为状态节点  $u$  和  $v$  分别属于不同的连通分枝, 所以经过任意步  $e$ , 两状态节点也不连通, 从而有  $N^e(u, v) \rightarrow 0$ , 将其代入式 (5) 可得  $f(u, v) \rightarrow 0$ . 如果对应于节点密度  $\rho$  生成的无线传感器网络是连通的, 则由定理 1 可知, 信号在网络中传送的过程可看成是一个有限、齐次、不可约的马尔可夫链. 再由 Doebelin 公式即可求出  $f(u, v) \rightarrow 1$ .  $\square$

### 3.2 算法描述

利用式 (3) 求出对应于实际网络的无独立节点时的节点密度  $\rho$ , 然后按正态分布随机生成对应于密度  $\rho$  时的无线传感器网络, 各节点利用各自的定位装置定位, 并将位置信息传送给基站. 基站利用各节点的位置信息计算出信号一步转移概率矩阵  $N$ , 并由式 (5) 得到信号从状态节点  $u$  转移到状态节点  $v$  的迟早概率  $f(u, v)$ . 若任意两状态节点之间的迟早概率均趋近于 1, 则此时网络是连通的; 否则加大节点的投放密度. 各新加入的状态节点利用自身定位装置进行各自定位, 并将数据传送给基站, 基站求出各状态节点对之间的相互通信概率  $P(A(u, v)|S(u, v))$ , 同时修正信号在各状态节点对之间的一步转移概率阵  $N(u, v)$ . 随后, 再次利用式 (5) 求出信号在各节点对之间的迟早转移概率  $f(u, v)$ , 并以此判断网络的连通性. 依次循环, 直至逼出网络连通时的节点密度.

如果要保证传感器网络是  $K$ -连通的, 则只需保证信号一步转移概率矩阵  $N$  的所有  $[N - (K - 1)]$  阶子矩阵均应满足如下性质: 一步转移概率矩阵  $N$  的  $C_N^{K-1}$  个  $[N - (K - 1)]$  阶子矩阵所包含的状态节点对之间互达的迟早概率  $f(u, v)$  都趋近于 1. 本文可以借助这个性质求出无线传感器网络是  $K$  连通时的最小节点密度.

### 3.3 仿真实验

利用 NS2 仿真平台, 采用基于 RTS/CTS 方式的 CSMA/CA 协议进行仿真实验, 各节点利用各自的定位装置定位, 并将位置信息发送给基站, 基站计算出节点对之间有边的概率; 然后固定参数  $\beta_{th} = 50$  dB,  $a = 3$ , 并不断改变参数  $K, \sigma, A(m^2)$  的取值. 利用数理统计原理, 逐步加大实验区域上节点的密度; 对应每一个密度值, 作 1000 次仿真实验, 依次查看网络  $K$ -连通的概率和节点最小度数是  $K$  的概率.

表 1 不同环境下网络达到  $K$ -连通时的最小节点密度及仿真数据

$K$	$\sigma$	$A(m^2)$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$
1	0	$4 \times 10^5$	$1.59 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-3}$	$1.874 \times 10^{-3}$
1	4	$3 \times 10^5$	$1.26 \times 10^{-3}$	$1.41 \times 10^{-3}$	$1.421 \times 10^{-3}$
2	0	$4 \times 10^5$	$2.16 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$2.676 \times 10^{-3}$
2	4	$3 \times 10^5$	$1.65 \times 10^{-3}$	$2.14 \times 10^{-3}$	$2.137 \times 10^{-3}$
3	0	$4 \times 10^5$	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.92 \times 10^{-3}$	$2.926 \times 10^{-3}$
3	4	$3 \times 10^5$	$1.97 \times 10^{-3}$	$2.38 \times 10^{-3}$	$2.373 \times 10^{-3}$

表 1 中,  $\rho_1$  为最小节点度数不小于  $K$  时网络中节点的密度,  $\rho_2$  为逼近网络  $K$  连通时对应的节点密度,  $\rho_3$  为仿真实验求出的网络  $K$  连通时节点密度数据. 从表 1 中可以看出, 与 R.HEKMAT 算法相比, 本文算法能有效提高算法结果与实验数据的吻合度. 这是因为本文算法利用信号在任意状态节点间互达的

迟早概率趋近于1来逼近网络达到  $K$ -连通时的最小节点密度, 进而有效地降低了数值误差.

## 4 结 论

本文充分考虑了障碍物和节点所处周边环境对传感器网络通信信道的影响, 借助正态遮蔽衰退模型和信号一步转移概率矩阵, 给出了一种求最小节点密度的控制算法, 该算法利用任意节点对之间的信号转移迟早概率来逼近网络连通时的最小节点密度. 仿真实验得到的数据与利用该算法求得的密度数据相吻合, 因此该算法有效降低了 R.HEKMAT 算法对初始条件(被测区域无限大或是一个封闭的球形区域)的要求, 提高了算法的实用性.

## 参考文献(References)

- [1] Tian D, Georganas N. Connectivity maintenance and coverage preservation in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3: 744-761.
- [2] Cardei M, Wu J. Energy-efficient coverage problems in wireless ad-hoc sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2006, 29(4): 413-420.
- [3] Du X, Lin F. Maintaining differentiated coverage in heterogeneous sensor networks[J]. *Eurasip J on Wireless Communication and Networking*, 2005, 5(4): 565-572.
- [4] Huang C F, Lo L C, Tseng Y C, et al. Decentralized energy-conserving and coverage-preserving protocols for wireless sensor networks[J]. *ACM Trans on Sensor Networks*, 2006, 2(2): 182-187.
- [5] Hekmat R, Miegheem P V. Connectivity in wireless Ad-hoc networks with a log-normal radio model[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2006, 11: 351-360.
- [6] Penrose M D. On  $K$ -connectivity for a geometric random graph[J]. *Wiley Random Structures and Algorithms*, 1999, 15: 145-164.
- [7] 何书元. 随机过程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008. (He S Y. *Stochastic process*[M]. Beijing: Beijing University Press, 2008.)
- [8] Agrawal P, Patwari N. Correlated link shadow fading in multi-hop wireless networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2009, 8(8): 4024-4036.
- [9] Mao G, Anderson B D O, Fidan B. Path loss exponent estimation for wireless sensor network localization[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(10): 2467-2483.
- [10] Lee H, Cerpa A, Levis P. Improving wireless simulation through noise modeling[C]. *Proc of the 6th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks*. Cambridge, 2007: 21-30.
- [11] Haenggi M. A geometry-inclusive fading model for random wireless networks[C]. *Proc of IEEE Int Symposium on Information Theory*. Seattle, 2006: 1329-1333.
- [12] von Rickenbach P, Wattenhofer R. Gathering correlated data in sensor networks[C]. *Proc of DIALM-POMC*. Philadelphia, 2004: 60-66.
- [13] Xue Yuan, Cui Yi, Klara Nahrstedt. Maximizing lifetime for data aggregation in wireless sensor networks[J]. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(6): 853-864.
- [14] Madan R, Lall S. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2006, 5(8): 2185-2193.
- [15] Hua C, Yum T P. Optimal routing and data aggregation for maximizing lifetime of wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2008, 16(4): 892-903.
- [16] Liu Feng, Tsui Chi Ying, Zhang Ying Jun. Joint routing and sleep scheduling for lifetime maximization of wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2010, 9(7): 2258-2267.
- [17] Zeydan E, Tureli D K, Comanicu C, et al. Bottleneck throughput maximization for correlated data routing: A game theoretic approach[C]. 2010 the 44th Annual Conf on Information Sciences and Systems. Princeton, 2010: 1-6.
- [18] Krishnamachari B, Estrin D, Wicker S. The impact of data aggregation in wireless sensor networks[C]. *Proc of the 22nd Int Conf on Distributed Computing Systems Workshops*. Vienna, 2002: 575-578.
- [19] Cristescu R, Beferull-Lozano B, Vetterli M. On network correlated data gathering[C]. *Proc of IEEE INFOCOM*. Hong Kong, 2004: 2571-2582.
- [20] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks[C]. *Proc of the Hawaii Int Conf on System Sciences*. Maui, 2000: 1-10.
- [21] Kelly F P. Charging and rate control for elastic traffic[J]. *Eur Trans on Telecommun*, 1997, 8(1): 33-37.
- [22] Srikant R. The mathematics of internet congestion control[M]. Boston: Birkhauser, 2004: 13-17.
- [23] Bertsekas D P, Tsitsiklis J N. Parallel and distributed computation: Numerical methods[M]. Hillsborough Nashua: Athena Scientific, 1997: 395-397.

(上接第612页)