

一种无线传感器网络性能评估及优化方法

王绍青, 聂景楠

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏南京 210007)

摘要: 文章提出了一种无线传感器网络性能评价及优化方法,以单位能耗所支持的平均数据速率为量度,分析了路由策略、接入机制及物理层传输技术对网络性能的综合影响.在讨论单跳分组成功传输概率、时延的基础上,将问题拓展至多跳网络,对网络端到端分组成功传输概率、耗时、耗能进行了统计分析,导出了单位能耗所支持的平均数据速率的表达式,并依此对网络性能进行了仿真研究.结果表明:网络性能可以通过优化分组发送概率和编码纠错能力的方法得到较大改进.

关键词: 无线传感器网络; 优化; 能量效率; 路由策略; 时延

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 04-0882-05

An Approach of Performance Analysis and Optimization for Wireless Sensor Networks

WANG Shao-qing, NIE Jing-nan

(*Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract: The paper proposes a novel optimization approach of performance for WSN. The end-to-end data rate per the unit of energy is introduced such that the integrated effects of the routing algorithm, the access control protocol and the transmission technologies on the performance of WSN are discussed. The packet success ratio and delay per hop were derived, based on which the end-to-end packet success ratio, delay and energy cost were deduced. Finally, the expression of the average end-to-end data rate was derived and the performance of WSN was analyzed. The simulation results demonstrate that the performance of WSN can be enhanced greatly by optimizing the transmission probability of packet and error correcting capability.

Key words: wireless sensor networks; optimization; energy efficiency; routing strategy; delay

1 引言

无线传感器网络(WSN)中的节点靠电池供电,能量严重受限^[1].此外,受限于节点的发送功率,源节点发送的数据分组一般要经过中继节点的多跳转发才能到达信宿(SINK)节点;该过程不但消耗了节点的能量,而且形成了多跳分组时延.考虑到 WSN 对数据传输有一定的时延限制^[2],因而在满足时延需求的前提下提高端到端能量使用效率是 WSN 协议设计的重要指标.众多文献提出了用于 WSN 的高能效 MAC 协议^[3,4]和路由算法^[5-7],并利用网络仿真软件评估了协议的能源效率;但未能定量地描述能源效率与协议参数间的关系.而针对特定网络协议构建合理的数学模型,定量地分析网络性能与协议参数间的关系,对于优化网络通信协议性能、设计新型通信机制将起到推动、指导和评价作用,具有重要的理论和实际意义.

文献[8~11]采用不同的数学模型分析了 WSN 的能量效率.文献[8]以能源效率为度量,讨论了节点传输范围的优化问题.文献[9]以单位能源所支持的分组期望前进距离为网络性能度量,分析了 WSN 能源效率的上下边界.文献[10]研究了能耗与时延的折中问题,但未考虑路由算法对网络性能的影响.文献[11]讨论了一维 WSN 分簇通信方案的能源效率,其结论不适用于二维 WSN.

在前人工作的基础上,针对时延敏感应用的 WSN,本文提出将单位耗能所支持的端到端数据成功传输的平均速率作为评估 WSN 性能的新度量,综合考虑路由策略、接入控制机制、以及物理层传输技术对 WSN 性能的影响,分析并优化了二维 WSN 的端到端性能.首先分析了链路的分组成功传输概率和分组时延,在此基础上将问题拓展至多跳网络,对网络端到端分组成功传输概率、耗时、耗能进行了统计分析,进而导出了单位耗能所

支持的平均速率的表达式,并依此对网络性能进行了仿真研究,深入讨论了分组发送概率、编码纠错能力以及分组产生速率对平均速率优化值的影响,最后提出了一种新的既满足时延需求,又能提高能量效率的网络性能优化与参数取值方法。

2 系统模型及性能描述量度

设 N 个节点按照泊松点过程随机分布于二维平面区域,形成一跳无线传感器网络.考虑到节能要求,任一时刻总有 $N(1-\rho)$ (其中 $0 < \rho < 1$) 个节点处于休眠状态, ρ 称为网络的激活率.假定节点采用编码效率为 l/n 的差错控制编码发送数据分组 (l 为有效负载比特数, n 为分组长度),平均发送功率为 P_t ,数据速率为 R_b ,单跳传输范围为 R ,经多跳转发后数据分组最终到达宿节点 (SINK).如果数据分组由源节点传输至 SINK 节点的平均成功传输概率为 p_s ,所消耗的平均能量为 E_p ,平均耗时为 $T_{e\tau}$,那么,能耗约束下的传感器网络性能可由下式度量:

$$\eta = \frac{l \times p_s / T_{e\tau}}{E_p} \quad (1)$$

该式反映了单位能量消耗所能支持的端到端平均数据速率.在多跳传感器网络中,若不考虑重传机制,端到端平均分组成功传输概率可表示为:

$$p_s = (p_{link})^m \quad (2)$$

其中, m 为端到端分组传输所需的平均转发次数 (跳数),而 p_{link} 为网络中单跳分组成功传输概率.相应地,端到端分组传输的平均能耗也由所需的平均跳数决定.忽略分组接收能耗,对于平均跳数为 m 的多跳网络,平均端到端传输能耗可表示为:

$$E_p = mE_{link} = m \left(P_t \frac{n}{R_b} \right) \quad (3)$$

其中, E_{link} 为单跳分组传输能耗.端到端分组传输的平均耗时不仅受限于平均跳数,而且依赖于每跳的分组排队时延、分组时长等参数.

综上,单跳传输的相关指标是分析式(1)的基础,以下首先从单跳传输性能入手,分析单跳分组成功传输概率 p_{link} 与分组时延;进而通过设定特定的路由策略将问题拓展至多跳网络。

3 网络单跳传输性能

3.1 分组成功传输概率

考虑节点采用时隙 Aloha 协议接入信道.处于活动状态的节点在时隙的起始时刻以概率 p 随机发送数据分组.假设节点 A 选择节点 B 为分组转发节点,如果在同一时隙节点 B 的传输范围内有 j 个干扰节点发送数据分组.通过考察节点 B 的接收信干比,即可导出单跳

分组成功传输概率。

考虑无线信号传输经历了瑞利衰落,转发节点 B 收到来自节点 A 的有用信号功率可表示为:

$$P_0 = P_t r_0^{-\alpha} u \quad (4)$$

其中, r_0 为节点 A 至节点 B 的距离, α 为路径损耗指数, u 表示瑞利衰落导致的功率损耗因子,其概率密度函数可表示为:

$$f_U(u) = \exp(-u) (0 \leq u < \infty) \quad (5)$$

所以,节点 B 收到的有用信号平均功率为:

$$\bar{P}_0 = \int_0^{\infty} u f(u) du \int_0^R P_t r_0^{-\alpha} f(r_0) dr_0 \quad (6)$$

同理, j 个干扰节点对 B 的干扰功率总和可表示为:

$$Y = \sum_{i=1}^j P_t r_i^{-\alpha} u \quad (7)$$

若能分析得到 r_0 的概率密度函数 $f(r_0)$,则可由式(6)获取有用信号功率 P_0 的均值.下面推导 r_0 的概率密度函数 $f(r_0)$.

设传感器网络采用图 1 所示的最近转发路由策略 (Nearest Forward Progress, NFP),则依此路由策略选定的转发节点 B 为图 1 所示阴影区域内距离节点 A 最近的激活节点.节点 A 与 B 间的距离 r_0 也称为一跳前进距离.取 ε 为转发方向的限制角度,实际的转发角度 θ 在 $[0, \varepsilon/2]$ 内

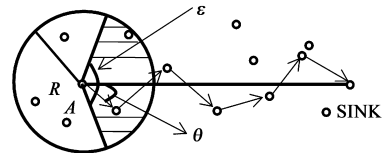


图1 NFP路由策略示意图

服从均匀分布,且独立于 r_0 .由于节点以参数为 λ 的泊松点过程随机分布于二维平面,考虑到网络节点激活率 ρ ,网络节点密度为 $\lambda\rho$;那么,在面积为 S 的区域中存在 k 个节点的概率可以表示为:

$$P[k \text{ in } S] = \frac{e^{-\lambda\rho S} (\lambda\rho S)^k}{k!} \quad (8)$$

不失一般性,假设发送节点 A 位于圆心,忽略边缘效应,由式(8)可得 r_0 的负累积分布函数为 (即在半径为 r_0 ,角度为 ε 的扇形区域内,节点 A 没有一个邻居节点的概率):

$$\bar{F}_{R_0}(r_0) = \exp(-\lambda\rho\varepsilon r_0^2/2) (0 < r_0 \leq R) \quad (9)$$

则 r_0 的概率密度函数为:

$$f_{R_0}(r_0) = -\frac{d\bar{F}_{R_0}}{dr_0} = \lambda\rho\varepsilon r_0 \exp(-\lambda\rho\varepsilon r_0^2/2), (0 < r_0 \leq R) \quad (10)$$

将式(10)代入式(6),即可解出接收节点 B 处的有用信号功率均值.下面分析节点 B 收到的干扰功率总和的均值.由于节点以泊松点过程分布于二维平面,那么在半径为 R 的单跳覆盖区域内,干扰节点到接收节点 B 的距离可认为服从均匀分布,其概率密度函数可

表示为:

$$f_{R_i}(r_i) = \begin{cases} 2r_i/R^2 & , r_i \leq R \\ 0 & , r_i > R \end{cases}, i = 1, 2, \dots, j \quad (11)$$

排除节点 A 和 B , 考虑到分组发送概率 p , 节点 B 传输范围内的干扰节点数目 j 为 $p(\lambda\rho\pi R^2 - 2)$; 由式(7) 可求得节点 B 收到的干扰功率之和的均值为:

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= E\left[\sum_{i=1}^j P_{r_i}^{-\alpha} u\right] = jE[P_{r_i}^{-\alpha} u] \\ &= p(\lambda\rho\pi R^2 - 2) \int_0^\infty uf(u)du \int_0^R P_{r_i}^{-\alpha} f(r_i) dr_i \quad (12) \end{aligned}$$

这样, 节点 B 处的平均信号干扰比可表示为:

$$\gamma = \frac{\bar{P}_0}{N_0 + \bar{Y}} \quad (13)$$

其中, N_0 为加性高斯噪声的平均功率. 对于 Mica2 型传感器节点^[12], 采用 2FSK 调制方式和非相干解调, 其单跳传输的误比特率为:

$$P_{BER} = \frac{1}{2 + \gamma} \quad (14)$$

结合式(13)与式(14), 有:

$$P_{BER} = \frac{N_0 + \bar{Y}}{2(N_0 + \bar{Y}) + P_0} \quad (15)$$

如果数据分组长度为 n , 对每个分组进行 BCH 差错控制编码以提高传输可靠性, 编码方案取 (n, l, t) , l 为有效负载比特数, t 为编码纠错能力, 那么, 采用差错控制后单跳的分组成功传输概率为:

$$P_{link} = \sum_{i=0}^l \binom{n}{i} (P_{BER})^i (1 - P_{BER})^{n-i} \quad (16)$$

3.2 单跳传输时的分组时延

数据分组在单跳传输过程中的时延主要由以下部分组成: 一是分组在节点内等待发送时的排队时延, 二是分组时长, 三是传播时延. 相对于前两者, 传播时延通常可以忽略不计.

节点中等待发送的分组有两类, 一类是节点自身产生的分组, 另一类是为其它节点转发的分组, 可以认为两类分组的产生相互独立. 假设两类分组产生的速率分别服从参数为 λ_g 和 λ_r 的泊松分布, 考虑到休眠节点不能为其它节点转发分组, 节点的分组到达速率可表示为:

$$\lambda_a = \rho(\lambda_g + \lambda_r) + (1 - \rho)\lambda_g = \lambda_g + \rho\lambda_r \quad (17)$$

若给定激活率 ρ , 则节点的分组到达率服从参数为 λ_a 的泊松分布. 假定等待发送的数据分组在节点的发送队列中排队, 按照先入先出的规则被节点调度发送, 且缓存队列无穷大, 不会导致数据分组溢出队列. 考虑到分组发送速率为 R_b/n , 而分组发送概率为 p , 那么平均分组发送速率 μ 为 pR_b/n ; 又因分组到达速率服从参数为 λ_a 的泊松分布, 所以, 分组在每个节点中的发送过

程可以被建模成一个 $M/D/1/\infty$ 排队模型. 由排队论 Little's 定理^[13], 可得分组单跳分组时延:

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{2 - \lambda_a/\mu}{2\mu(1 - \lambda_a/\mu)} \\ &= \frac{2 - (\lambda_g + \rho\lambda_r)/(pR_b/n)}{2pR_b/n(1 - (\lambda_g + \rho\lambda_r)/(pR_b/n))} \quad (18) \end{aligned}$$

此时, 若能分析得到邻居节点分组的平均到达速率 λ_r , 则可由式(18)导出单跳分组时延.

考虑到节点传输范围内同时传输的平均节点数为 $p\lambda\rho\pi R^2$, 如果能够分析得到节点被邻居节点选作分组转发节点的平均概率 p_f , 则邻居节点分组平均到达速率 λ_r 应该满足:

$$\lambda_r = (p\lambda\rho\pi R^2) \mu p_f = p\lambda\rho\pi R^2 \frac{R_b}{n} p_f \quad (19)$$

下面分析节点被邻居节点选作分组转发节点的平均概率 p_f . 如图 2 所示, 发送节点 Q 位于半径为 R 的圆

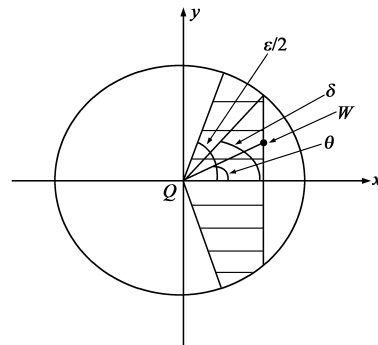


图2 分组转发节点选择示意图

中心, 节点 W 为节点 Q 传输范围内的邻居节点, 取转发角度限制为 ϵ . 线段 QW 的长度为 r_0 , 与 X 轴的夹角为 θ , S 为阴影区域面积. 注意到, 当节点 W 满足 NFP 路由转发策略的要求, 即节点 W 为阴影区域内

距离节点 Q 最近的节点时, 节点 W 才被节点 Q 选作下一跳转发节点. 若节点 W 为阴影区域内距离节点 Q 最近的邻居节点, 则阴影区域内不存在其它活动节点. 所以, 节点 Q 选择节点 W 作为下一跳转发节点的概率为:

$$p_f = \int \exp(-\lambda\rho S) dS \quad (20)$$

其中, $S = \epsilon R^2/2 - \delta R^2 + R^2 \sin\theta \cos\theta$, $R \cos\delta = r_0 \cos\theta$. 将式(20)代入式(19), 可得邻居节点分组的平均到达速率:

$$\lambda_r = p\lambda\rho\pi R^2 \frac{R_b}{n} \int \exp(-\lambda\rho S) dS \quad (21)$$

将式(21)代入式(18)可得单跳平均分组时延:

$$T_n = \frac{2npR_b - (n^2\lambda_g + p\lambda\rho^2\pi R^2 R_b p_f)}{2(pR_b)^2 - 2(n\lambda_g + p\lambda\rho^2\pi R^2 R_b p_f)pR_b} \quad (22)$$

4 基于 NFP 路由策略的多跳传输性能

本节在第 3 节分析网络单跳性能的基础上, 依据 NFP 路由策略导出端到端平均路由跳数, 进而统计分析端到端平均分组成功传输概率、平均分组时延和能耗

的表达式.

式(10)为一跳前进距离 r_0 的概率密度函数,由此可得分组一跳前进距离的期望值:

$$\bar{r}_0 = \int_0^R r_0 f_{R_0}(r_0) dr_0 \approx \left(\frac{\pi}{2\lambda\alpha\epsilon} \right)^{1/2} \quad (23)$$

如图 1 所示,令 D 为源节点 A 到 SINK 节点的直线距离,实际的转发角度 θ 在 $[0, \epsilon/2]$ 内服从均匀分布,且独立于一跳前进距离 r_0 . 如果将 r_0 投影在源节点与 SINK 节点的直线路径上,则一跳有效前进距离为 $r_0 \cos\theta$;那么,数据分组从源节点 A 传输至 SINK 节点的平均路由跳数可以表示为:

$$m = \frac{D}{E[r_0 \cos\theta]} = \frac{D}{\bar{r}_0 E[\cos\theta]} = \frac{\sqrt{2\lambda\alpha\epsilon} D}{2\sqrt{\pi} \sin(\epsilon/2)} \quad (24)$$

式(16)为单跳分组成功传输概率,将式(16)、(24)代入式(2),可得端到端平均分组成功传输概率:

$$p_s = \left[\sum_{i=0}^m \binom{m}{i} (p_{BER})^i (1 - p_{BER})^{m-i} \right]^{\frac{\sqrt{2\lambda\alpha\epsilon} D}{2\sqrt{\pi} \sin(\epsilon/2)}} \quad (25)$$

考虑到端到端平均分组时延 T_{ete} 由多跳时延组成,结合式(22)和式(24)可得:

$$T_{ete} = mT_n = \frac{\sqrt{2\lambda\alpha\epsilon} D}{2\sqrt{\pi} \sin(\epsilon/2)} \cdot \frac{2npR_b - (n^2\lambda_g + p\lambda\rho^2\pi R^2 R_b p_f)}{2p^2(R_b)^2 - 2(n\lambda_g + p\lambda\rho^2\pi R^2 R_b p_f)pR_b} \quad (26)$$

相应的,将式(24)代入式(3),可得端到端平均分组能耗:

$$E_p = \frac{P_t n \sqrt{2\lambda\alpha\epsilon} D}{2R_b \sqrt{\pi} \sin(\epsilon/2)} \quad (27)$$

本文已经导出了端到端平均分组成功传输概率、分组时延和分组能耗的表达式. 将式(25)、(26)、(27)代入式(1),即可导出单位能耗所支持的端到端数据成功传输的平均速率 η 的表达式.

5 数值结果

在前文理论推导的基础上,本节以单位能耗所支持的端到端数据成功传输的平均速率 η 为网络性能度量,给出了相应的数值结果,深入讨论主要参数对 η 优化值的影响. 除特别说明外,数值计算中主要参数取值如下: $P_t = 0.001\text{W}$, $\lambda_g = 1 \text{ packet/s}$, $\alpha = 4$, $R = 50\text{m}$, $n = 128\text{bit}$, $R_b = 16\text{kb/s}$, $D = 300\text{m}$, $\lambda = 2.5 \times 10^{-3}$.

5.1 编码纠错能力 t 对网络性能的影响

图 3、4、5 分别比较了编码纠错能力对端到端平均分组成功传输概率、分组时延和 η 的影响. 从图 3 可得结论:给定分组发送概率 p , p_s 随 t 的增大而提高;给定 t , p_s 随 p 的增大而降低(这是由于 p 增大,干扰节点数目增多,干扰功率随之增高,进而导致 p_s 降低). 从图 4 可以看出: T_{ete} 随 p 的增大迅速降低;这是由于 p 增大,

平均分组服务速率 μ 增高,导致分组排队时延降低. 如图 5 所示当 $t=9$ 时, η 的优化值最大,这是由于分组长度 n 固定时, t 增大, E_p 和 T_{ete} 保持不变, p_s 变大,但是有效负荷 l 变小了,由式(1)可知 η 并不一定得到提高. 可得结论:给定 t , 以最大化 η 为目标,存在优化的分组发送概率 p ; 此外,就最大化 η 而言,存在优化的编码纠错能力 t .

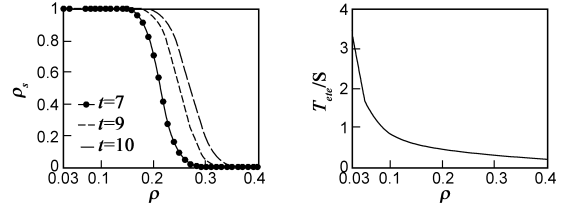


图3 t 对 p_s 的影响($\epsilon=\pi/2$, $\rho=0.3$) 图4 p 对 T_{ete} 的影响($\epsilon=\pi/2$, $\rho=0.3$)

5.2 路由转发角度限制 ϵ 对网络性能的影响

图 6 比较了路由转发角度限制 ϵ 对 η 的影响. 显然, ϵ 增大, η 的优化值变小,优化的 p 值变大. 这是由于 ϵ 增大,发送节点的路由转发区域变大,候选的中继节点数目增多,由式(23)可知 NFP 路由策略导致平均一跳前进距离变小,有用信号接收功率的期望值变大,因而接收节点可以忍受更多的干扰节点(即可以忍受更高的分组发送概率 p).

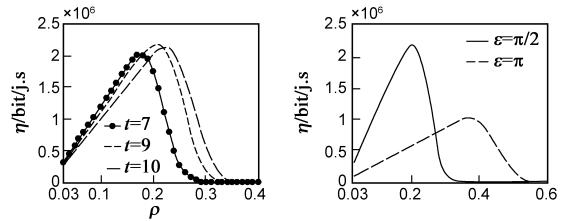


图5 t 对 η 的影响($\epsilon=\pi/2$, $\rho=0.3$) 图6 ϵ 对 η 的影响($t=9$, $\rho=0.3$)

5.3 优化参数取值的方法

依据 5.1 和 5.2 节的仿真结果和前文的理论推导,在给定网络节点密度 $\lambda\rho$ 和路由转发角度限制 ϵ 时,参数取值可以按照以下方法进行:第一步,在满足数据传输可靠性 p_s 的前提下,选择合适的物理层参数 t ,并确定分组发送概率 p 的最大值;第二步,在满足应用层时延需求的前提下,确定分组发送概率 p 的最小值;第三步,在前两步确定 p 的取值范围的基础上,以最大化 η 为目标,导出优化的分组发送概率 p . 该方法既能满足应用层时延需求和端到端数据传输可靠性,又能提高能量效率. 虽然该方法不能够保证每跳的性能最优,但是却在统计意义上保证了网络端到端性能的优化.

5.4 分组产生速率和激活率对网络性能的影响

取 $t=9$, $\epsilon=\pi/2$. 本小节分析分组产生速率 λ_g 和激活率 ρ 对网络性能的影响. 如图 7、8 所示:给定 $\rho=0.3$,在轻流量条件下, T_{ete} 缓慢增加, η 缓慢降低,当分组产生速率到达临界点 19 时, T_{ete} 迅速增加, η 迅速降

低.这是由于 λ_g 增大, λ_r 随之增大,而分组服务速率不变,导致排队时延不断增大,进而导致 T_{ete} 不断增大、 η 不断降低.此外, ρ 增大,由式(24)可知平均路由跳数变大,因此 T_{ete} 变大, η 变小,流量提前到达饱和的临界点.

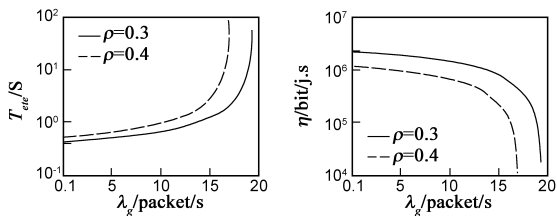


图7 λ_g 对 T_{ete} 的影响($t=9, \epsilon=\pi/2$) 图8 λ_g 对 η 的影响($t=9, \epsilon=\pi/2$)

6 结论

本文提出以单位耗能所支持的端到端数据成功传输平均速率 η 为网络性能量度,综合考虑路由策略、接入机制、以及物理层传输技术对 η 的影响,导出了 η 的表达式,分析并优化了 WSN 的端到端性能,在此基础上提出一种优化参数取值的新方法.仿真结果表明:(1)以 η 最大化为目标,存在优化的分组发送概率和编码纠错能力;(2)路由转发角度限制 ϵ 对分组发送概率和 η 的优化值有重要影响;(3) η 随分组产生速率的增大缓慢降低,当分组产生速率增大到临界点时 η 迅速降低.

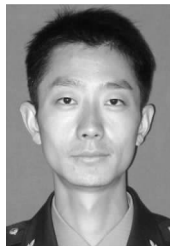
本文的理论模型主要涉及到“最近转发路由协议”,对于“最远转发路由协议”,可以导出相应的分组一跳前进距离 r_0 的概率密度函数,进而得到网络单跳和多跳性能,即可对网络性能进行优化.虽然不同的路由协议会导出不同的网络性能,但是分析网络性能的思路和方法类似.下一步,我们将在现有研究成果基础上,加快进行实验验证.

参考文献:

- [1] Akyildiz I F, Su W, Sankarasubramaniam Y, et al. Wireless sensor networks: A survey [J]. Computer Networks, 2002, 38 (4): 393 – 422.
- [2] Florens C, Sharif M, McEliece R J. Random sensory networks: A delay analysis [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(4): 1650 – 1664.
- [3] Ye W, Heidemann J, Estrin D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493 – 506.
- [4] Vuran M C, Akyildiz I F. Spatial correlation-based collaborative medium access control in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 4(2): 316 – 329.
- [5] Yu M, Leung K K, Malvankar A. A dynamic clustering and energy efficient routing technique for sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8): 3069 – 3079.

- [6] Gunasekaran R, Qi H. XLRP: Cross layer routing protocol for wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC) [C]. Las Vegas: IEEE press, 2008. 2135 – 2140.
- [7] 宋震, 周贤伟, 林亮. 链路可靠的无线传感器网络组播路由协议 [J]. 电子学报, 2008, 36(1): 64 – 69.
Song Zhen, Zhou Xian-wei, Lin Liang. Reliable link Multicast routing protocol for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1): 64 – 69. (in Chinese)
- [8] Deng J, Han Y S, Chen P N, Varshney P K. Optimal transmission range for wireless Ad Hoc networks based on energy efficiency [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 55(9): 1772 – 1782.
- [9] Zhang L L, Soong B H. Energy efficiency analysis of channel aware geographic-informed forwarding (CAGIF) for wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(6): 2033 – 2038.
- [10] Luo J, Jiang L G, He C. Finite queuing model analysis for energy and QoS tradeoff in contention-based wireless sensor networks [A]. Proceedings of IEEE International Communications Conference [C]. Korean: IEEE press, 2007. 3901 – 3906.
- [11] 解培中, 郑宝玉. 一维无线传感器网络簇通信方案能量效率研究 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 933 – 936.
Xie Pei-zhong, Zheng Bao-yu. Research on energy efficiency of clustered communication schemes in one-dimensional wireless sensor networks [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(4): 933 – 936. (in Chinese)
- [12] Crossbow Corp. Mica2 datasheet [EB/OL]. <http://www.xbow.com>, 2008.
- [13] Kleinrock L. Queuing System [M]. New York: Wiley, 1975.

作者简介:



王绍青 男, 1982 年生于河南新乡, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络.
E-mail: wangwangsq666@sohu.com



聂景楠 男, 1962 年生于山西太谷, 教授、博士生导师, 1997 年于东南大学获博士学位, 中国电子学会高级会员, 出版学术专著 1 部, 主要研究方向为无线传感器网络、移动通信中的信号处理.
E-mail: jinnie66@yahoo.com.cn