

# 无线传感器网络中基于可调发射功率的能量空洞避免

曾志文 陈志刚 刘安丰

(中南大学信息科学与工程学院 长沙 410083)

**摘 要** 无线传感器数据收集网络的多对一收集特征容易导致网络局部区域的能量消耗较高,形成能量空洞,从而导致整个网络过早死亡.文中通过分析无线传感器网络的数据分发特征,得到传感器网络的能量消耗分布情况、不同区域节点的寿命及其引起的数据传送延迟.在此基础上,在保证应用延迟需求前提下,提出了网络寿命最大化的求解算法.然后,依据数据传输率、能量消耗与延迟之间的相互影响,对可能形成能量空洞的区域选择一定比例的数据以较短的发射半径发送到能量消耗低的区域,以进一步提高网络性能.理论分析与模拟实验结果表明,该策略可延长网络寿命达17%.

**关键词** 无线传感器网络;能量消耗均衡;功率控制;能量空洞;网络寿命

中图法分类号 TP393 DOI号: 10.3724/SP.J.1016.2010.00012

## Energy-Hole Avoidance for WSN Based on Adjust Transmission Power

ZENG Zhi-Wen CHEN Zhi-Gang LIU An-Feng

(College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083)

**Abstract** The many-to-one characteristic of the data collection in Wireless Sensor Network (WSN) often leads to high energy consumption in local network, which will result in energy hole problem so as to make the WSN dying prematurely. The paper analyses the characteristics of data distribution in WSN. Some results are obtained from the analysis including the distribution of energy consumptions, the lifetime of each node in different localities and the data transferring delay corresponding to the node's lifetime. Considering the delay requirements in applications, the paper presents the algorithm for maximizing the network lifetime. Furthermore, a scheme is presented according to the correlation among data transfer rate, energy consumption and delay. In the potential energy hole area, the scheme selects data in proper proportion, then transmits those data to the low energy consumption area in order to improve the performance. Theoretical analysis and simulations show that the scheme adapts to the situations of energy consumptions and delays well. Moreover, the network lifetime in the network adopting the scheme can be extended to 17% more than that in other networks without the scheme.

**Keywords** wireless sensor network; energy consumption balance; power control; energy hole; network lifetime

## 1 引 言

无线传感器网络的主要功能是对周边环境信息

进行采集和管理,并将感知到的数据发送到基站进行进一步的处理<sup>[1-3]</sup>,传感器节点上的能量非常有限,通常运行在人无法接近的恶劣甚至危险的远程环境中,能源无法替代.因此,如何提高能量的使用

收稿日期:2009-07-15;最终修改稿收到日期:2009-09-22. 本课题得到国家自然科学基金(60873082)、湖南省自然科学基金(09JJ6095)及湖南省科技计划(2008FJ3213)资助. 曾志文,男,1968年生,博士研究生,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、并行与分布式计算. E-mail: zengliu@2188.cn. 陈志刚,男,1964年生,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为网络计算、无线网络. 刘安丰,男,1971年生,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络、Web服务.

效率从而延长网络寿命成为主要的研究问题。

在 MAC 层、网络层、应用层方面降低传感器网络的能量消耗,以提高网络寿命已经有相当多的研究<sup>[1-3]</sup>. 现在已经有很多工作利用调制速率的缩放技术来达到节能的目的<sup>[4-5]</sup>. 其原理是:无线传感器网络传输数据所需要的功率和发送数据的速率呈指数关系<sup>[4-5]</sup>,在满足应用时延的前提下,适当延长数据包的传输时间可以显著降低所需要的功率. Yang 等人<sup>[6]</sup>研究了能量与延迟折中(Energy-Latency Tradeoffs),提出了静态计算与动态规划两种算法,类似的研究还有文献<sup>[7-8]</sup>. 国内的相关研究主要有 DEER (Delay constrained Energy Efficient Routing) 算法<sup>[9]</sup>. DEER 算法的核心思想是将路由选择和传输速率控制相结合,算法首先采用概率分析方法,估计出最优的总跳数以及相应的传输速率;然后再逐跳选择出后续节点,构成整条路径。

但这些研究很少考虑到无线传感器中的一个特有的情况:“能量空洞”(Energy Hole)现象<sup>[10]</sup>. 文献<sup>[11]</sup>模拟实验表明如果采用节点均匀分布策略,由于能量空洞现象,当网络失效时,网络中还有高达 90% 的能量未能被利用. 因此,避免或延缓能量空洞的出现,是提高网络寿命与能量利用效率的有效方法。

为避免能量空洞,本文的主要工作如下:(1) 建立传感器网络的能量消耗模型,给出网络中不同区域节点承担的数据量、能量消耗以及延迟情况.(2) 根据能量消耗及延迟的分析,给出了满足应用延迟前提下使网络寿命最长的节点发射功率的选择算法. 算法主要思想为:(1) 将发往高能量消耗区域节点的一部分数据提前转发到能量消耗较低的区域,均衡网络中节点间的数据承担量与能量消耗.(2) 让能量消耗低的节点以较高的数据发送率、能量消耗高的节点以较低的数据发送率发送数据,使能量消耗均匀且延迟不增加。

本文第 2 节是网络结构模型与问题描述;第 3 节论述网络节点的数据转发特征、能量消耗特征以及延迟特征;第 4 节阐述节点发射功率选择算法;第 5 节设计综合的优化算法;第 6 节是实验仿真结果;第 7 节是本文结论及进一步的研究。

## 2 网络模型与问题描述

### 2.1 网络模型

本文研究数据收集无线传感器网络,这种网络

广泛应用于各种监测领域. 设网络监测的区域为图 1 所示圆形区域,网络中的节点需要定时地对被监测对象进行监测,并将所采集的数据发送到基站。

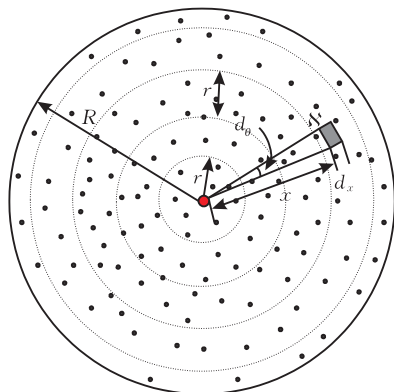


图 1 网络结构图

不失一般性,本文使用的网络模型基于如下假设:

(1) 一个传感器网络由一个基站(sink)和分布于半径为  $R$  的圆形平面上的  $n$  个传感器节点组成,其密度为  $\rho$ . 每个节点都有唯一的标识,  $\{V_i; i=1, 2, \dots, n\}$ , 并设 sink 节点的编号为  $V_0$ . 节点没有冗余,且所有传感器节点在部署之后不再移动。

(2) 传感器节点是能量受限的,初始能量为  $E$ . 而基站的能量是无限的. 传感器节点的无线发射功率可控,即节点可以根据接收者的距离来调整其发射功率<sup>[6]</sup>. 例如, Berkeley Motes 节点具有 100 个发射功率等级<sup>[12]</sup>. 而且每一种能量级别都可以选择多种调制级数(发送速率),即采用不同码速率来传送数据<sup>[6]</sup>. 比如 2-QCAM, 4-QCAM, 8-QCAM 等。

(3) 网络以周期性的方式工作. 一个节点在一个周期内完成对被监测对象的数据采集,并将所获得的数据包发往基站。

(4) 与文献<sup>[6]</sup>一样,假设冲突已经通过空分、多包接收技术(Multi-Packet Reception, MPR)或者码分多址方法得到解决,因此模型中不考虑冲突的问题(assumes no MAC layer interference). 依据这个假设,传感器网络在物理层能够保证传感器节点以低于一定的传输速率( $\mathfrak{R}$ )以发射半径  $r_i$  向前传送数据。

(5) 假定 MAC 协议、路由协议等能够足够快地传输数据,数据传输延迟决定于节点发送数据所需要的时间. 减少此发送时间,就能减少时延。

### 2.2 能量消耗模型

我们采用与文献<sup>[13]</sup>相同的无线通信能量消耗模型. 节点发射  $S$  比特的数据到距离为  $d$  的位置,消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分

组成,即

$$\begin{cases} E_{\text{member}} = sE_{\text{elec}} + s\epsilon_{\text{fs}}d^2, & d < d_0 \\ E_{\text{member}} = sE_{\text{elec}} + s\epsilon_{\text{amp}}d^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $E_{\text{elec}}$  表示发射电路损耗的能量. 若传输距离小于阈值  $d_0$ , 功率放大损耗采用自由空间模型; 当传输距离大于等于阈值  $d_0$  时, 采用多路径衰减模型.  $\epsilon_{\text{fs}}, \epsilon_{\text{amp}}$  分别为这两种模型中功率放大所需的能量. 节点接收  $S$  比特的数据消耗的能量为

$$E_{\text{Rx}}(l) = sE_{\text{elec}} \quad (2)$$

另外, 依据文献[6], 如果节点采用正交调幅机制 N-QCAM, 以码速率  $\mathfrak{R}$  发送  $S$  比特数据, 则发送时间  $\tau$  如式(3), 发送所需的能量  $w(\tau)$  如式(4):

$$\tau = \frac{s}{b \cdot \mathfrak{R}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} w(\tau) &= [C \cdot (2^{\frac{s}{b \cdot \mathfrak{R}}} - 1) + F] \cdot \tau \cdot \mathfrak{R} \\ &= [C \cdot (2^b - 1) + F] \cdot \frac{s}{b} \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $b$  是每码包含的 bit 位数;  $C$  由发送的质量决定(用误码率表示, Bit Error Rate), 并且与发送距离  $d$  有关, 它与发送距离  $d$  的关系如式(5)所示;  $F$  是与设备相关的发射电路能量消耗参数.

$$C = C_{\text{base}} \cdot \left(\frac{d}{\rho}\right)^\alpha \quad | \rho \in (0-1] \quad (5)$$

$\rho$  是连接参数(connectivity parameter), 依据前面假设的无冲突、无丢包的通信线路, 则  $\rho=1$ . 这样可以得到式(6).

$$C = C_{\text{base}} \cdot d^\alpha \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得到式(7)

$$\begin{aligned} w(\tau) &= [C \cdot (2^b - 1) + F] \cdot \frac{s}{b} \\ &= \left[ C_{\text{base}} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} d^\alpha + \frac{F}{b} \right] \cdot s \end{aligned} \quad (7)$$

依据文献[10],  $C_{\text{base}}$  是信号放大器的放大倍数,  $\alpha$  是由无线信道决定的常量, 在发送距离  $d$  较近( $d < d_0$ )时, 适用自由空间信道模型, 取  $\alpha=2$ , 这时的  $C_{\text{base}}$  取值为  $C_e$ ; 而当发送距离较远( $d \geq d_0$ )时, 适用多径衰落信道模型, 取  $\alpha=4$ , 这时的  $C_{\text{base}}$  取值为  $C_l$ ,  $d_0$  的取值为  $\sqrt{\frac{C_e}{C_l}}$ . 式(1)和(7)都是发射  $S$  位数据所消耗的能量, 两式相等, 式(2)为式(1)中与距离无关的部分, 比较式(1)、(2)和(7), 可以得到用  $F, b$  来表达的接收数据所消耗的能量公式. 这样, 我们得到综合发送距离与发送速率的能量消耗模型式(8):

$$\begin{cases} w(\tau)_t = [C \cdot (2^{\frac{s}{b \cdot \mathfrak{R}}} - 1) + F] \cdot \tau \cdot \mathfrak{R} \\ \quad = \left[ C_{\text{base}} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} d^\alpha + \frac{F}{b} \right] \cdot s, & // \text{发送数据所消耗的能量} \\ w(\tau)_r = \frac{F}{b} \cdot s, & // \text{接收数据所消耗的能量} \\ \tau = \frac{s}{b \cdot \mathfrak{R}}, \quad u = b \cdot \mathfrak{R}, & // \tau \text{为传输所用时间, } u \text{为数据传输速率} \\ \text{if } d < d_0 \text{ then } C_{\text{base}} = C_e, \alpha = 2 \\ \text{else } C_{\text{base}} = C_l, \alpha = 4 \end{cases} \quad (8)$$

式中  $w(\tau)_t$  表示节点发送  $s$  位数据到距离为  $d$  的节点所需的能量,  $w(\tau)_r$  表示接收  $s$  位数据所需的能量消耗,  $\tau$  表示节点发送  $s$  位数据所需时间,  $u$  是节点的数据发送速率. 常量  $C, F$  只取决于网络的系统参数, 依据文献[14]可以计算得到  $F=1 \times 10^{-8}$ ,  $C \approx 7 \times 10^{-9}$ . 其它参数如  $C_{\text{base}}$  的取值见实验部分的表 1. 由模型可以看出: 对于同样大小的数据, 当  $\mathfrak{R}$  固定时, 如果节点的数据发送速度越大, 则  $b$  值越大, 所需发送时间就越小, 但所需的能量消耗越大; 在同样的发送速率下, 如果节点间的发送距离越大, 则所需的能量消耗大. 其中发送 1bit 数据的时间与能量消耗之间的关系如图 2, 发送距离与能量消耗的关系如图 3 所示.

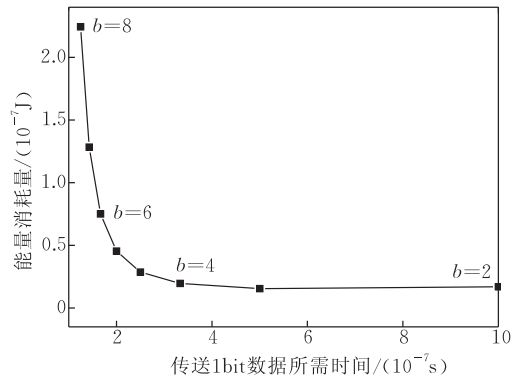


图 2 发送 1bit 数据所需能量与时间的关系(长程通信)

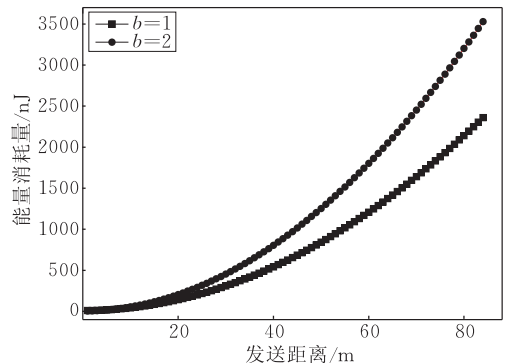


图 3 发送 1bit 数据所需能量与距离的关系

### 2.3 问题描述

无线传感器网络的重要目标就是在满足应用需求的前提下,尽可能长时间地对周围环境进行监测. 这样本文要解决的问题为

(1) 最小化能量消耗最大节点所消耗的能量:  $\min(\max E(i))$ , 使得网络寿命最长, 即  $\max(\text{life})$ .

(2) 满足数据收集的最大延迟小于上限. 数据延迟指的是数据从节点  $v_i$  传送到 sink 节点的累计延迟, 即数据所经过的路径(path)上节点引起的延迟的累加:  $\sum_{i \in \text{path}} t_i$ . 即  $\max(\sum_{j \in \text{path}} t_j) < \Gamma$ .

这样本文研究的目标可用式(9)来表示.

$$\begin{cases} \max(\text{life}) \\ \max(\sum_{j \in \text{path}} t_j) < \Gamma \end{cases} \quad (9)$$

## 3 节点承担的数据量、能量消耗与延迟特征分析与优化

在本节中,我们对网络中节点承担的数据量以及在确定发射功率下的能量消耗特征进行分析,为后续能量空洞避免,网络寿命优化提供理论基础.

### 3.1 节点的数据分发特征

如图 1 所示网络,设节点的发射半径为  $r$ .  $r$  与网络半径  $R$  的关系可用式(10)来表示,则网络最多划分为  $(a+1)$  个圆环.

$$\begin{cases} R = ar + b \mid b \leq r \\ a = \lfloor R/r \rfloor \end{cases} \quad (10)$$

设网络节点密度为  $\rho$ ,在一轮数据收集中,每个节点产生 1 个单位数据,则对于节点需要接收与转发的数据量有定理 1.

**定理 1.** 设圆环内任意一节点  $X$ ,它位于第  $i+1$  环内,到  $(i+1)$  环内边界距离为  $x$ ,则其到 sink 节点的距离  $D=ir+x \mid i \in \{0..(a-1)\}$ .  $X$  节点接收与发送的数据量如式(11)

$$\begin{cases} \text{Data}_i^r = 1 + \{(a-1-i)x + (a-i-1)(a+i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{b..r\} \quad // \text{数据发送} \\ \text{Data}_i^r = \{(a-1-i)x + (a-i-1)(a+i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{b..r\} \quad // \text{数据接收} \\ \text{Data}_i^r = 1 + \{(a-i)x + (a+i+1)(a-i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{0..b\} \quad // \text{数据发送} \\ \text{Data}_i^r = \{(a-i)x + (a+i+1)(a-i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{0..b\} \quad // \text{数据接收} \end{cases} \quad (11)$$

证明. 最外层的环不需要转发数据. 不失一般性,取网络中任意一个位置,它离 sink 的距离为  $D=ir+x \mid i \in \{0..(a-1)\}$ ; 该位置宽度为  $dx$  的圆环带  $\phi$  的面积为  $\phi_s = 2\pi(ir+x)dx$ , 则  $\phi$  内节点数目为  $2\pi Ddx\rho$ , 该圆环带接收并转发所有离它为  $r$  整数倍处宽度为  $dx$  的圆环带区域的数据, 设这些区域面积的和为  $\phi_{rs}$ .

$$\begin{aligned} \text{若 } D=ir+x \mid i \in \{0..(a-1)\}, x \in \{0..b\}, \text{ 则} \\ \phi_{rs} = 2\pi((i+1)r+x)dx + 2\pi((i+2)r+x)dx + 2\pi \\ ((i+3)r+x)dx + \dots + 2\pi(ar+x)dx \\ = 2\pi dx \left( (a-i)x + \left( \frac{(i+1+a)(a-i)r}{2} \right) \right). \end{aligned}$$

$\phi$  接收的数据为:  $\phi_r = \phi_{rs} \rho = 2\pi dx \left( (a-i)x + \left( \frac{(i+1+a)(a-i)r}{2} \right) \right) \rho$ ,  $\phi$  本身产生的数据为  $2\pi(ir+x)dx\rho$ , 因为网络空间对称,且  $dx$  为无穷小量,所以可认为  $\phi$  内节点平均接收与转发数据,即节点接收的数据量为  $\text{Data}_i^r = \phi_r / (\phi_s \rho) = \{(a-i)x + (a+i+1)(a-i)r/2\} / (ir+x)$ , 节点需发送接收到的数据与自身所产生的数据,所以  $\text{Data}_i^r = 1 + \{(a-i)x + (a+i+1)(a-i)r/2\} / (ir+x)$ . 同理可得

$$\begin{cases} \text{Data}_i^r = 1 + \{(a-1-i)x + (a-i-1)(a+i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{b..r\} \quad // \text{数据发送} \\ \text{Data}_i^r = \{(a-1-i)x + (a-i-1)(a+i)r/2\} / (ir+x), \\ D=ir+x \mid i \in \{0..a\}, x \in \{b..r\} \quad // \text{数据接收} \end{cases}$$

证毕.

依据定理 1 得到了如图 4 所示的节点在一轮数据收集中所承担数据量与发射半径  $r$  的关系图,从图 4 可以看出,节点离 sink 节点越近,其承担的数据量越多,而且随着发射半径  $r$  的增长,节点承担的数据量减少.

### 3.2 网络的能量消耗特征

得到了到 sink 距离  $D=ir+x$  的节点转发的数据量,依据式(8),可以得到其能量消耗.

**推理 1.** 到 sink 距离为  $D=ir+x$  的节点的能量消耗为式(12).

依据推理 1 得到了如图 5 和图 6 所示的节点在一轮数据收集过程中能量消耗与发射半径  $r$  的关系图. 从图 5 可以看出,节点的能量消耗总趋势是:节点的能量消耗随着与 sink 的距离增长而下降. 但是,在  $(0, r)$  范围,能量消耗随  $r$  的增大而增大,这是由于节点发送距离小,能量消耗小;距离超过  $r$  后,由于传送的距离都是  $r$ ,而发送的数据量是随着  $r$  的增大而减小的. 这样,使得  $r$  附近的能量消耗最

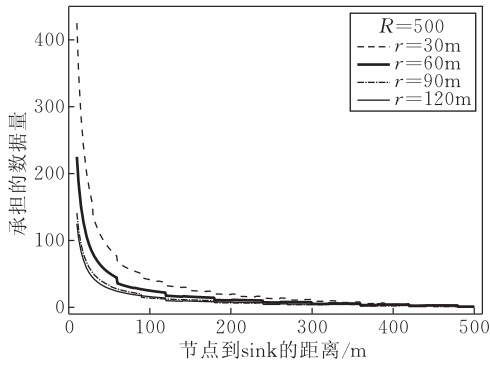
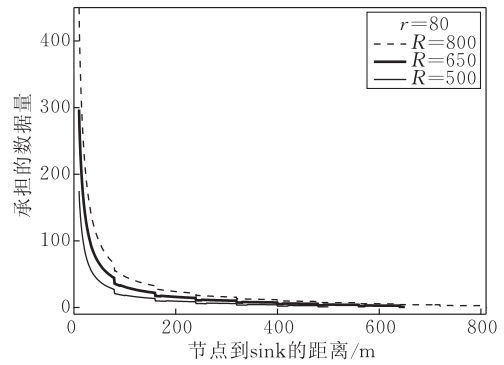


图4 节点发送的数据量与节点到 sink 的关系



高. 因此, 要提高网络的寿命就是要降低  $r$  附近的能量消耗. 图 6 表示是在不同数据发送速率情况下节点的能量消耗情况, 可以看出当数据发送速率高时 (即每码包含的 bit 位数 ( $b$ ) 高) 节点能量消耗高.

$$E = \begin{cases} Data_i^x \left\{ C_{efs} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} x^2 + \frac{F}{b} \right\} + (Data_i^x - 1) \frac{F}{b}, & x \leq d_0 \text{ 且 } i=0 \\ Data_i^x \left\{ C_{camp} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} x^4 + \frac{F}{b} \right\} + (Data_i^x - 1) \frac{F}{b}, & x > d_0 \text{ 且 } i=0 \\ Data_i^x \left\{ C_{efs} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} r^2 + \frac{F}{b} \right\} + (Data_i^x - 1) \frac{F}{b}, & r \leq d_0 \text{ 且 } i \neq 0 \\ Data_i^x \left\{ C_{camp} \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} r^4 + \frac{F}{b} \right\} + (Data_i^x - 1) \frac{F}{b}, & r > d_0 \text{ 且 } i \neq 0 \end{cases} \quad (12)$$

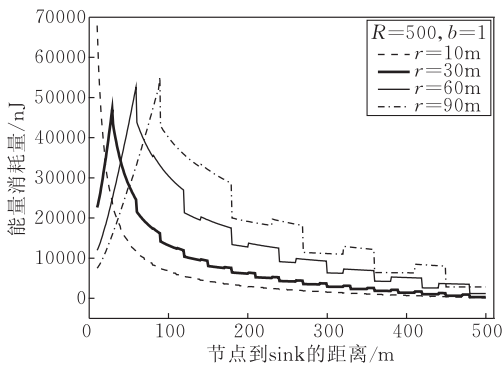
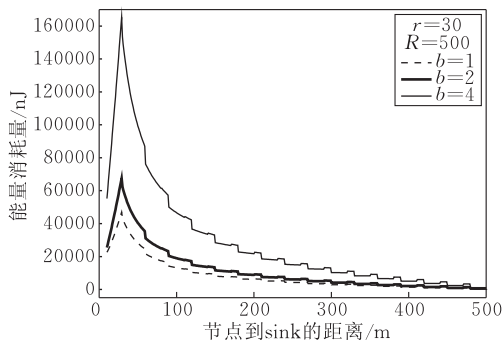


图5 不同发送半径下节点的能量消耗

图6 不同发送速率  $b$  下的节点的能量消耗

在没有节点冗余时, 可以定义网络寿命是网络中第一个死亡节点的时间<sup>[3]</sup>, 要使得网络寿命最长, 就是要最小化能量消耗最大节点所消耗的能量. 下一节我们主要研究如何选择最优的圆环半径  $r$  (也就是节点的能量发射级别  $k$ ), 使得网络中能量消耗最大的节点能量消耗最小.

### 3.3 网络的延迟量特征分析

假设网络中所有节点都采用同样的传送速率  $u = b \cdot R$ , 依据式 (8) 与定理 1, 可以得到其延迟特征. 对此有如下推理 2.

**推理 2.** 到簇头节点距离  $D = ir + x$  的节点产生的数据包到达 sink 的最大延迟时间为  $\Gamma_i^x = \sum_{j=0}^i \tau_j^x = \sum_{j=0}^i \frac{Data_j^x}{b \cdot R}$ .

证明. 依据定理 1, 节点转发的数据量  $\lambda_i = Data_i^x$ , 又节点的数据传输速率  $u = b \cdot R$ , 所以数据包在节点处的最大延迟时间为

$$\tau_i^x = \frac{Data_i^x}{b \cdot R},$$

$D = ir + x$  处数据包到达 sink 节点需经过  $(i+1)$  次中继, 因此它的延迟等于  $(i+1)$  次中继节点的延迟之和:

$$\Gamma_i^x = \sum_{j=0}^i \tau_j^x = \sum_{j=0}^i \frac{Data_j^x}{b \cdot R}.$$

证毕.

依据推理 2 得到了如图 7 所示的节点的延迟量与发射半径  $r$  的关系图. 从图 7 中可以看出, 总体来说网络延迟随着发射半径  $r$  的增大而减少, 这是因为发射半径  $r$  越大, 中继的次数越小, 而且发射半径  $r$  越大节点中继的数据量也少, 故转发所需时间也少. 图中出现的波浪形的延迟曲线的原因是: 第一个发射半径  $r$  内的数据量最大, 而且越近 sink 数据量越大. 第一个发射半径  $r$  内的数据传输延迟占了总延迟量的主要部分, 因此网络延迟主要取决于第一个发射半径  $r$  内的延迟. 而第一个发射半径  $r$  内的

延迟量是随到 sink 的距离越远而减少的,而在第二个发射半径  $r$  内,由于其延迟主要由第一个发射半径  $r$  内的延迟决定,因此,也表现出刚刚开始时高,然后下降的趋势,形成如图 7 所示的波浪形. 图 8 表示了不同发送速率下的延迟量,显示发送速率越大,延迟越少.

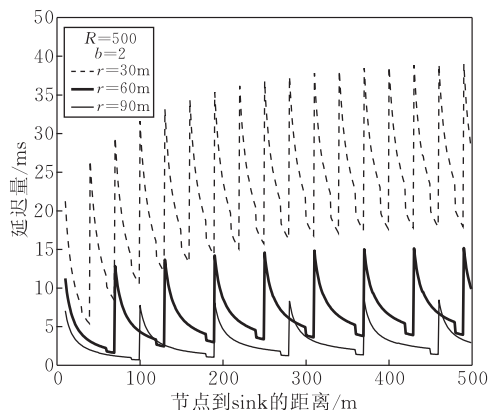


图 7 不同发送半径  $r$  下的节点延迟量

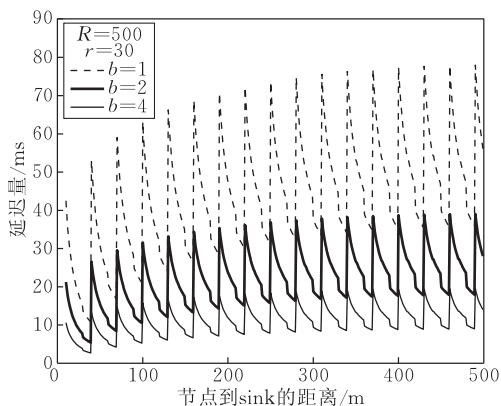


图 8 不同发送速率  $b$  下的延迟量对比

## 4 网络寿命与延迟的约束求解

在第 3 节,我们通过分析得到了网络中节点承担的数据量特征、能量消耗特征、延迟特征. 本节将它们综合在一起进行优化,以期得到满足网络应用延迟条件下的最大网络寿命.

### 4.1 网络寿命与发射半径的关系

网络寿命取决于网络中第一个死亡节点的寿命,那么实际上是由网络中能量消耗最大的节点决定的. 从 3.2 节可知,固定发送速率,能量消耗最大节点所消耗的能量随发射半径变化. 由于节点的能量发射级别是属于  $\{1..A\}$  的一个有限集合<sup>[6]</sup>,所以,可以从这有限的集合中,挑选出能量消耗最小的发射级别,即节点的发射半径. 方法如下: 依次取  $\{1..A\}$  中的每个值,得到其数据传送半径为  $r_k$ ,依据

推理 1 计算每个发射半径  $r_k$  下节点的能量消耗,选取  $r_k$  所对应的最大的能量消耗  $E_{\max}^k$ ,从  $A$  个最大值中取最小值  $\min_{k \in \{1..A\}} (E_{\max}^k)$ . 该最小值所对应的  $k$  就是使得整个网络能量消耗最大、节点能量消耗最小的发射级别,也就对应使得网络寿命最长的能量发射半径  $r_k$ . 不同发射半径下的能量消耗情况如图 9,不同发射速率下网络的寿命如图 10.

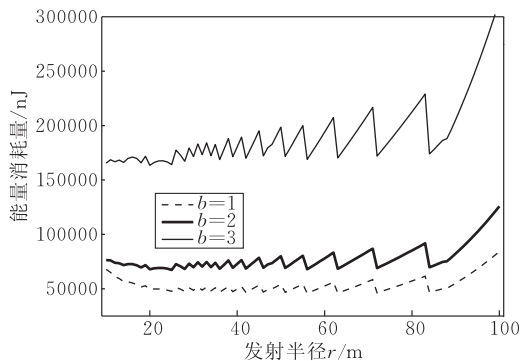


图 9 不同发射半径下能量消耗最大节点所消耗能量

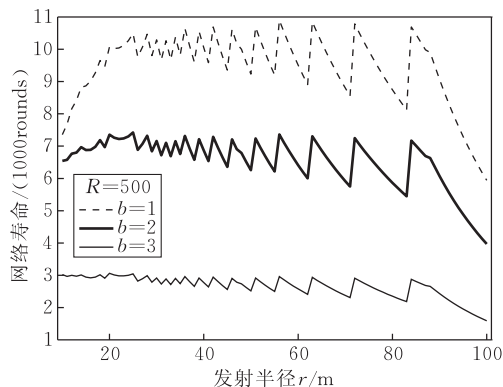


图 10 不同发射速率  $b$  下的网络寿命

### 4.2 网络延迟与发射半径的关系

同样,根据推理 2,对每一个发射半径,取不同的  $b$  值计算,可以得到在此半径下网络的最大延迟,这样就可以得到节点的发射半径与网络最大延迟的关系如图 11 和图 12 所示.

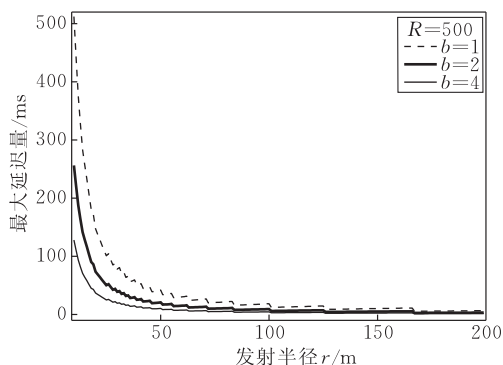
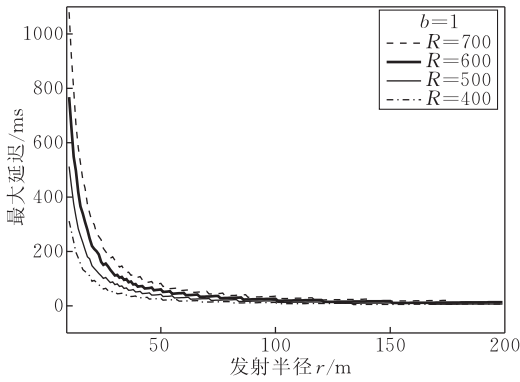


图 11 不同发射速率  $b$  下的延迟量

图 12 不同  $R$  下的延迟量

### 4.3 网络延迟与网络寿命的初步综合优化

根据传感器本身所提供的参数( $b$  值的取值范围, 可选的发射功率)计算网络的寿命, 即对每个  $b$  值, 由 4.1 节、4.2 节的方法, 对每个发射级别, 计算出该级别下所有节点的能量消耗与节点产生数据的延迟, 从所有消耗能量值与延迟时间中选取最大的, 作为该发射级别的能量消耗与数据延迟. 然后, 从这些最大值中选取满足延迟条件的最小能量消耗对应的  $b$  值与发射级别来发送数据. 具体过程如算法 1.

#### 算法 1. 网络寿命与延迟的综合优化取值.

输入: 网络半径  $R$ , 码速率为  $\mathfrak{R}$ , 应用允许的最大延迟时间  $\Gamma$ , 节点初始能量  $E_{\text{init}}$  及相关能量模型参数.

输出: 满足网络最大延迟  $\Gamma$  下的节点发射半径的值  $r$ , 以及网络寿命  $life$ .

1. 取最小的数据发送速率  $b$
2. 依次取节点发射功率  $\{1..A\}$  中的每一个功率  $k$ , 得到其发射半径为  $r_k$ ;
3. 对每一个发射半径  $r_k$ , 依据推理 1, 计算出网络中节点的能量消耗;
4. 对每一个发射半径  $r_k$ , 依据推理 2, 计算机网络中节点的延迟量;
5. 对该  $b$  值, 取每个发射半径下的最大能量消耗  $E_{\text{max}}^{b,k}$  与最大延迟  $\Gamma_{\text{max}}^{b,k}$ ;
6. 依次取下一个数据发送速率  $b$ , 转到步 2, 如无下一次数据发送速率  $b$ , 则转步 7;
7. 从上述计算结果中取使得延迟小于等于  $\Gamma$ , 而能量消耗  $E_{\text{max}}^{b,k}$  最小时所对应的网络参数  $r, b, life = E_{\text{init}}/E_{\text{max}}^{b,k}$  为所求.
8. End.

图 13 展示了算法 1 的求解方法. 设节点有 3 种发送速率 ( $b=[1, 2, 4]$ ), 若干个发射半径, 则得到 3 条能量消耗曲线与 3 条延时曲线. 用“ $\blacktriangle$ ”标示的曲线, 表示的是“ $b=1$ ”时, 不同发射半径下的最大延时. 如: 该曲线上的点 (30, 78.07) 表示节点以发送速率“ $b=1$ ”, 发射半径“ $r=30\text{m}$ ”发送数据, 则网络的

最大延迟为 78.07ms. 用“ $*$ ”标示的曲线表示“ $b=1$ ”时, 不同发射半径下网络中能量消耗最大节点所消耗的能量, 该能量决定网络的寿命  $life = E_{\text{init}}/E_{\text{max}}^{b,k}$ . 例如: 若要求延时量  $\Gamma \leq 100\text{ms}$ , 则画一条 100ms 的水平线, 延时线上在该水平线以下的点都满足延时要求. 每个点都表示一对网络可选的参数  $b, r$ ; 而每对  $b, r$  都在能量线上有一个对应的点, 从能量线上取出能量最低点, 该点所表示的  $b=1, r=28$  即为所求参数, 对应能量消耗为 47.77nJ, 延时为 85.15ms. 若节点初始能量为 0.5J, 则  $life = E_{\text{init}}/E_{\text{max}}^{b,k} = (0.5 \times 10^6)/47.77 = 10466$  轮.

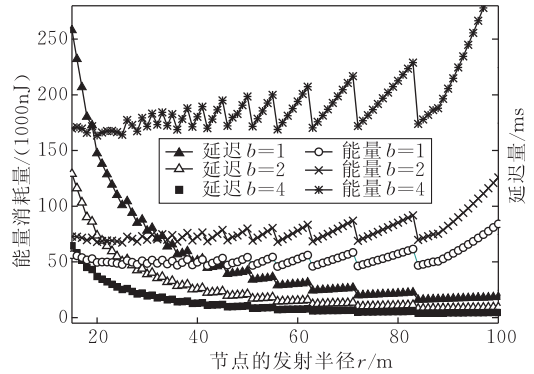


图 13 不同发射半径下的能量消耗延迟量

## 5 基于可调发射速率的网络寿命与延迟优化策略

在前面, 我们详细论述了传感器网络的能量消耗特征、延迟特征. 通过算法 1, 我们可以得到满足应用延迟条件的较优网络寿命. 本节, 我们将调整  $r$  附近节点的数据转发量, 进一步减少能量消耗大的节点的能量消耗.

从算法 1 并结合图 4 和图 5 可以看出, 当网络取得较优的网络寿命与较小的网络延迟时,  $r$  处的能量消耗最高, 它决定了整个网络的寿命, 而远离 sink 区域节点的能量消耗较小. 近 sink 节点的数据传输量最高, 延迟量最大. 因此, 可以采用如下策略同时提高网络寿命与降低网络延迟: 将  $r$  附近处的部分数据以小于原来的发送距离发送到能量消耗较低的区域, 这样可以降低  $r$  附近的能量消耗, 提高网络寿命. 另外, 远离 sink 的节点能量消耗小, 节点剩余能量较多. 因此, 可让剩余能量较多的节点提高数据发送速率, 这样虽然提高了其能量消耗, 但只要其能量消耗不超过系统中能量消耗最大节点的能量消耗, 其网络寿命并不会减少, 但却能够减少数据传送

的延迟。

可见综合网络寿命与延迟优化策略的措施主要有两个:(1)减少  $r$  附近节点的部分数据的发送距离,以延长网络寿命;(2)提高剩余能量较多节点的数据发送速率,降低网络延迟。当  $r$  附近区域的节点将比率为  $\vartheta$  的数据量发往另一区域时,另一区域增加的数据量如定理 2 所示。

**定理 2.** 网络中到 sink 距离为  $l$  的所有节点,每个节点转发的数据量为  $s$ ,若每个节点将比例  $\vartheta$  的数据发往离 sink 近且到 sink 距离为  $f$  的区域 ( $f < l$ ),则  $f$  处每个节点增加的数据量为  $\frac{s\vartheta l}{f}$ 。

证明. 网络中节点密度为  $\rho$ ,分别在  $l, f$  处取一个宽度为  $dx$  的环形区域  $A, B$ ,如图 14 所示。则区域  $A$  的面积为  $2\pi l dx$ ,节点个数为  $2\pi l dx \rho$ ;整个区域  $B$  的节点个数为  $2\pi f dx \rho$ 。那么  $A$  发往  $B$  区域的数据量为  $s 2\pi l dx \rho \vartheta$ ,则区域  $B$  每个节点增加的数据量为  $\frac{s 2\pi l dx \rho \vartheta}{2\pi f dx \rho} = \frac{s\vartheta l}{f}$ 。证毕。

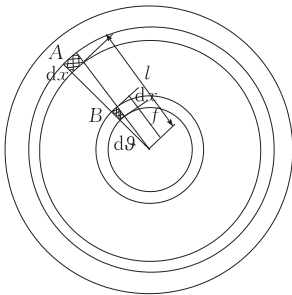


图 14 区域 A 向区域 B 转数据量的关系图

在给出速率与延迟综合优化算法之前,本节先给出一个具体的实例来说明。对一个网络半径为 500m 的传感器网络,节点的发射半径为 30m,将距基站  $3r/4$  到  $5r/4$  区域 30% 的数据发到距基站  $r/4$  到  $3r/4$  区域。这样,距基站 0 到  $r/4$  的区域承担的数据量就减少了,而距基站  $r/4$  到  $3r/4$  区域的数据就增加了,其它区域的数据量保持不变。得到如图 15 所示的节点承担的数据量图。依据节点承担的数据量以及节点的发送距离,可以得到网络中节点的能量消耗情况,如图 16 所示,从图 16 中可以看出,其最大能量消耗降低了很多,意味着网络寿命得到了较大提高。同时,由于延迟主要决定于转发数据量最大的节点,这样就使得 0 到  $r/4$  的区域承担的数据量就减少,也就减少了总的延迟。从图 17 中可以看出,网络的最大延迟减少了 35% 以上。

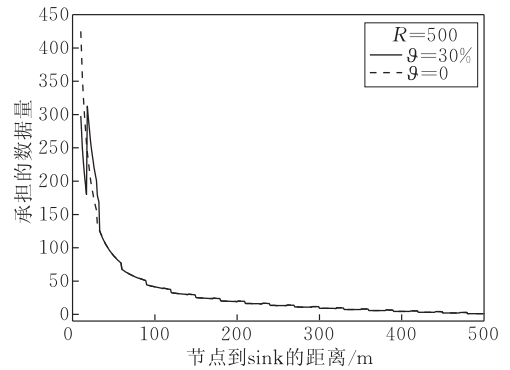


图 15 一部分数据转发前后的数据量对比

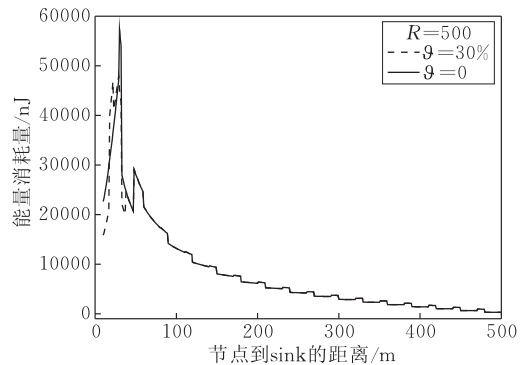


图 16 采用不同的数据转发策略前后的能量消耗对比

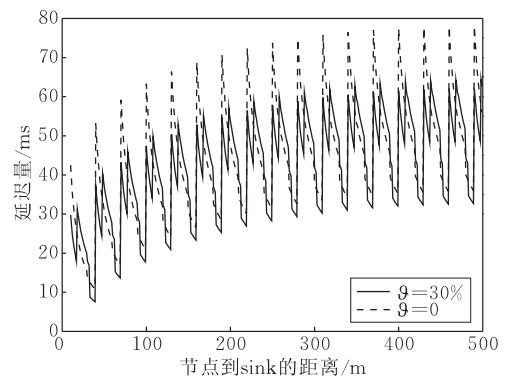


图 17 采用不同的数据转发策略前后的延迟对比

为进一步降低网络延迟,对能量消耗大的区域采取较小的数据发送速率以节省能量,对能量消耗小的区域采用较大的数据发送速率,在图 18 中对  $[0-3r]$  的区域采用一倍的数据发送速率,对于  $[3r-4r]$  的区域采用 2 倍的数据发送速率,对于  $>4r$  的区域采用 4 倍的数据发送速率。这样网络延迟又可进一步降低,最大延迟约为没有优化前的一半左右,如图 18 所示。图 19 展示了这时的能量消耗情况,图 19 中可以看出网络的最大能量消耗没有升高,意味着网络寿命没有改变,但减少了延迟。

由示例可以看出,将距基站  $3r/4$  到  $5r/4$  区域 30% 的数据发到距基站  $r/4$  到  $3r/4$  区域后,能极大地延长网络寿命与减小数据延迟。但比率取多大合



适呢?算法 2 就是要找出最佳的发送比率  $\vartheta$ , 并得到网络不同区域节点的数据承担量、能量消耗量、数据发送速率.

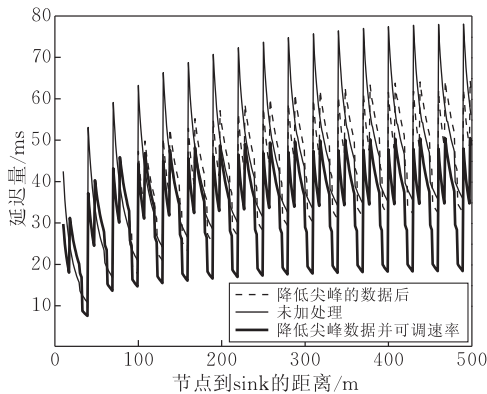


图 18 网络不同区域采用不同数据传送率的延迟量对比

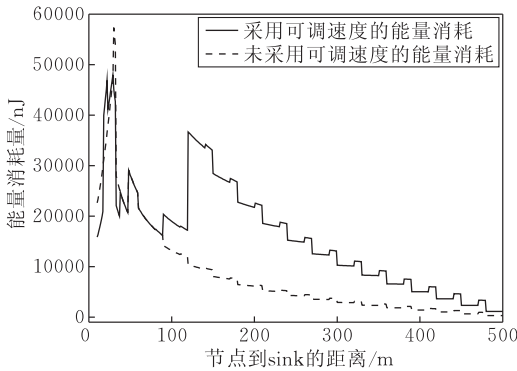


图 19 网络的能量消耗图

### 算法 2. 网络寿命与延迟的先进优化算法.

输入: 网络半径  $R$ , 码速率为  $\mathfrak{R}$ , 应用允许的最大延迟时间  $\Gamma$ , 及相关能量模型参数.

输出: 满足网络最大延迟  $\Gamma$  下的节点发射半径的值  $r$ , 以及网络寿命 life.

1. 依据算法 1 计算得到最优的节点发射半径的值  $r$ . 这时的最大能量消耗为  $E_0$ .
2. 取一较小的概率  $\vartheta$  的值.
3. 将距基站  $[3r/4, 5r/4]$  区域  $\vartheta$  的数据以半径  $r/2$  分别发送到距基站  $[r/4, 3r/4]$  区域.
4. 依据定理 2 计算  $[r/4, 3r/4]$  区域的数据量, 并计算  $[0, r/4]$  区域减少的数据量;
5. 重新按照能量计算公式计算所有节点的能量消耗为  $E_c$ , 并记录最小的值为  $E_{\min}$  和  $\vartheta_{\min}$ .
6. if  $E_c < E_0$  then  
 $\vartheta = \vartheta + \Delta$  go 3  
else go 7
7. 得到转发的数据量与能量消耗图; 返回其网络寿命.
8. 从第 2 个  $r$  开始, 对每一个区域, 选取这样的  $b$ , 使其能量消耗比最大能量消耗刚好小的那个  $b$ .
9. 按算法 1 计算并返回其网络延迟.
10. End

## 6 实验仿真结果

仿真实验场景为随机均匀部署的圆形传感器网络, 如图 1 所示, 网络半径  $R=600$ , 在每个周期内所有节点均匀产生一个数据包, 并发送到 sink, 数据包平均长度为 100bits. 依据 2.2 节的能量消耗公式可以得到发送  $s$  比特所需的能量消耗公式, 接收  $s$  比特所需的能量消耗公式如式(13)所示.

$$\begin{cases} \omega(\tau)_t = [C \cdot (2^{\frac{s}{\mathfrak{R}}} - 1) + F] \cdot \tau \cdot \mathfrak{R} \\ = [C_e \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} d^2 + \frac{F}{b}] \cdot s, d < d_0 \\ \omega(\tau)_r = [C \cdot (2^{\frac{s}{\mathfrak{R}}} - 1) + F] \cdot \tau \cdot \mathfrak{R} \\ = [C_l \cdot \frac{(2^b - 1)}{b} d^4 + \frac{F}{b}] \cdot s, d > d_0 \\ \omega(\tau)_r = \frac{F}{b} \cdot s \end{cases} \quad (13)$$

实验中所采用的网络参数如表 1 所示.

表 1 网络参数

参数	值	参数	值
$d_0/m$	87	$C_e/(pJ/(bit \cdot m^2)^{-1})$	333
$r_s/m$	15	$C_l/(pJ/(bit \cdot m^4)^{-1})$	0.04329
$F/(nJ \cdot bit^{-1})$	50	$E_{\min}/J$	0.5

依据算法 1 可以得到图 20(该图的说明见图 13 的说明); 依据图 20, 如果应用给出一个时延迟要求, 必能够从图中选取一个最佳的节点发射半径以及数据发送速率.

当选取最优的半径  $r=40$ , 数据发送速率  $b=1$  时. 这时网络中不同区域所承担的数据量如图 21 中红色“■”标示线所示, 采用算法 2 将部分数据发送到能量消耗较低的区域后, 所得到网络中承担数据的分布如图 21 中黑色“▲”标示线所示. 这时的能量消耗如图 22 所示. 从图 22 可以看出, 此时最大能量消耗降低了约 2000nJ. 图 22 中“·”标示的曲线, 表示对远离 sink 区域的节点采用按算法 2 选定的发送率的发送数据时不同位置的节点的能量消耗, 此时, 最高能量并没有下降, 即网络寿命没有得到提高, 但从图 23 可以发现, 网络的最大延迟减少了.

至此, 我们通过数据仿真过程验证了本文提出算法对传感器网络性能的改善. 下面, 分析本文算法与其它算法的对比情况. 文献[9]提出了一种满足延迟限制且能量消耗小的路由算法 DEER<sup>[9]</sup>算法, 并通过实验验证了 DEER 算法优于 PARO 算法<sup>[15]</sup>、SP-power 算法<sup>[16]</sup>. 文献[9]已经证明: 当某节点  $s$  到

sink 的距离为  $l$ , 需要构建一条最优的到 sink 的路由路径. 这时的总能量消耗下界是所有节点应该等距离地出现在源节点与目的节点的连线上. 为此文献[9]依次试探性地测试  $s$  节点到 sink 的跳数为  $i \in 1..n$  时的网络延迟. 选择刚好使总跳数的延迟达到应用需求, 而总能量消耗小的跳数  $i$ , 即理想传送方案为节点以  $l/i$  为发射半径传送数据. 对发射级别有限的传感器, 该半径必定从传感器所提供的发射半径中选取; 本文算法 1 实际上是穷尽了传感器所提供的所有的发射半径, 从中取刚好能满足应用延迟要求且能量消耗最小的发射半径. 因此, 算法 1 对网络性能的提高, 至少应该等价于 DEER 算法, 从而也优于 PARO 算法与 SP-power 算法. 算法 2 对性能的进一步提高, 至少是在 DEER 算法上的进一步提高. 采用表 1 所提供的参数, 我们得到如表 2 的实验结果. 从表中可以看出, 算法 2 对能量消耗降低的比例达到了 17.48%, 也就说可提高网络寿命为 17.48%. 而在提高网络寿命的同时, 网络最大延迟提高了约 34.76%.

表 2 算法的性能对比表

对比指标	节点承担的最大数据量	最大能量消耗	最大延迟量
算法 1	650.00	88275.155	125.48394
算法 2	476.45	72840.450	81.37848
性能提高比例/%	26.7	17.48	34.76

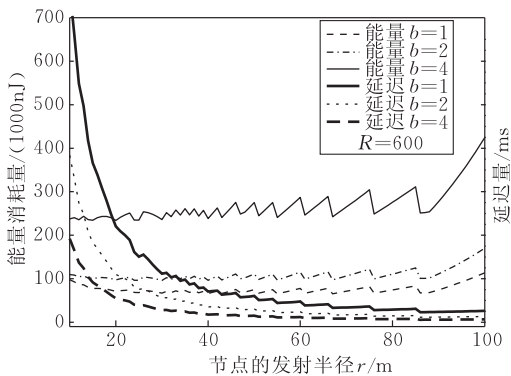


图 20 节点发射半径  $r$  与网络能量消耗、延迟量关系图

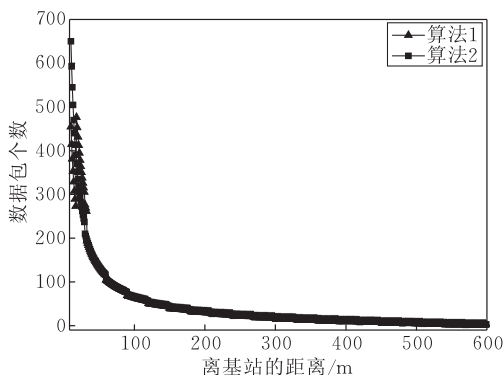


图 21 采用不同的数据转发策略前后的数据承担量对比

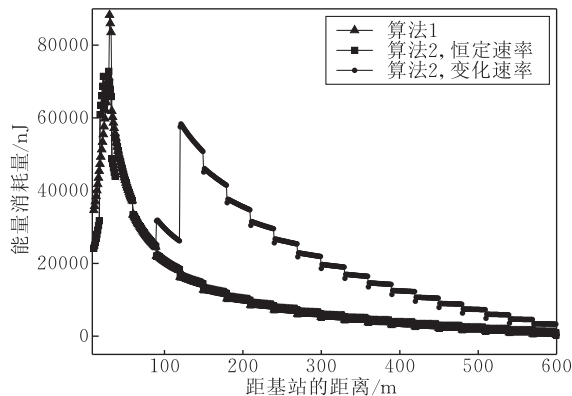


图 22 网络的能量消耗图对比

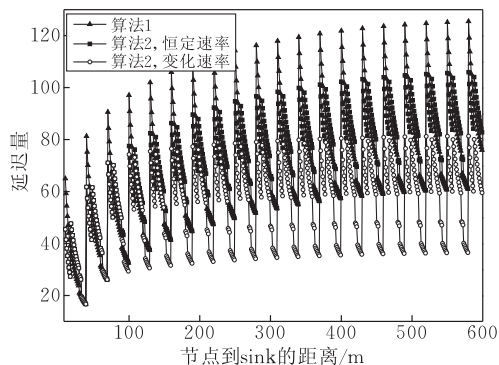


图 23 网络不同区域采用不同数据传送率的延迟量对比

## 7 结束语与进一步研究

无线传感器网络特有的能量空洞现象往往造成部分节点提早死亡, 从而导致整个网络过早失效. 本文详细地分析了无线传感器网络中数据转发的规律, 得到了网络中不同区域数据转发量与发射半径  $r$  之间的关系, 从而推导出网络不同区域间的能量消耗情况. 在此基础上, 在保证应用网络延迟需求的条件下, 给出求解网络寿命最大的算法 1. 然后, 均衡  $r$  附近的数据量, 提出进一步减小能耗与延迟的算法 2, 极大地提高了网络寿命. 在本文中并没有考虑节点数据传送间的冲突关系, 是一种理想的信道情况. 因此, 下一步的研究中, 我们准备将能量消耗模型与传输模型不做更多的假设, 考虑较为实际情况下的网络寿命与延迟优化的情况.

## 参 考 文 献

[1] Tang X, Xu J. Optimizing lifetime for continuous data aggregation with precision guarantees in wireless sensor networks. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2008, 16 (4): 904-917

[2] Younis O, Fahmy S. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: A hybrid, energy-efficient approach//Proceedings

- of the IEEE INFOCOM'04. Hong Kong, China, 2004; 629-640
- [3] Kang I, Poovendran R. Maximizing network lifetime of broadcasting over wireless stationary ad hoc networks. *Mobile Networks and Applications*, 2005, 10(6): 879-896
- [4] Berry R, Gallager R. Communication over fading channels with delay constraints. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2002, 48(5): 1135-1149
- [5] Rajan D, Sabharwal A, Aazhang B. Delay bounded packet scheduling of bursty traffic over wireless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(1): 125-144
- [6] Yang Yu, Krishnamachari B. Energy-latency tradeoffs for data gathering in wireless sensor networks//*Proceedings of the INFOCOM 2004*. Prasanna V K, 2004, 1: 7-11
- [7] Li J, Mohapatra P. Analytical modeling and mitigation techniques for the energy hole problems in sensor networks. *Pervasive and Mobile Computing*, 2007, 3(3): 233-254
- [8] Zhu Jun-Hua, Chen Shan, Bensaou B. Tradeoff between lifetime and rate allocation in wireless sensor networks: A cross layer approach//*Proceedings of the INFOCOM 2007*. 2007, 1: 267-275
- [9] Yu Rong, Sun Zhi, Zhou Hai-Jun et al. QoS and energy aware routing algorithm for wireless sensor networks. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2007, 47(10): 1634-1637 (in Chinese)  
(余荣, 孙智, 周海军, 梅顺良. 保证服务质量的最小能量无线传感器网络路由算法. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(10): 1634-1637)
- [10] Song Chao, Liu Ming, Gong Hai-Gang et al. ACO-based algorithm for solving energy hole problems in Wireless Sensor Networks. *Journal of Software*, 2009, 20(10): 2729-2743 (in Chinese)  
(宋超, 刘明, 龚海刚, 陈贵海, 王晓敏. 基于蚁群优化解决传感器网络中的能量洞问题. *软件学报*, 2009, 20(10): 2729-2743)
- [11] Lian J, Naik K, Agnew G. Data capacity improvement of wireless sensor networks using non-uniform sensor distribution. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2006, 2(2): 121-145
- [12] Hill J, Szewczyk R, Woo A, Hollar S, Culler D E, Pister K S J. System architecture directions for networked sensor. *ACM SIGPLAN Notices*, 2002, 11(35): 93-104
- [13] Chen G, Li C F, Ye M, Wu Jie. An unequal cluster-based routing strategy in wireless sensor networks. *Wireless Networks (JS)*, 2009, 15(2): 193-207
- [14] Raghunathan V, Schurgers C, Park S, Srivastava M B. Energy aware wireless microsensor networks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, 19(2): 40-50
- [15] Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M et al. PARO: Conserving transmission power in wireless ad hoc networks//*Proceedings of the 9th International Conference on Network Protocols*. Riverside, CA, 2001; 24-34
- [16] Stojmenovic I, Lin X. Power-aware localized routing in wireless networks. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2001, 12(11): 1122-1133



**ZENG Zhi-Wen**, born in 1968, Ph. D. candidate, associate professor. His research interests include wireless sensor network and distributed computing.

**CHEN Zhi-Gang**, born in 1964, Ph. D., professor, Ph.D. supervisor. His research interests are in network computing and wireless network.

**LIU An-Feng**, born in 1971, Ph. D., associate professor. His research interests include wireless sensor network and grid Web services.

## Background

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) under grant No. 60873082, Hunan Provincial Natural Science Foundation of China under grant No. 0966095, Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China under grant No. 20090162120074. These foundations cover a lot of research topics, while all of them study performance of sensor network, which is the research topic of this work.

Energy hole has serious influence to the wireless sensor network. It exists in both planar WSN and heterogeneous WSN. The group has already being researching the energy

hole of WSN for a period of time. In prophase, those works are mostly on how to avoid energy hole and how to improve life and performance of network. In anterior works, the authors are more and more interested in the problems that for the influence of energy hole, how long the life of WSN and where are the regions of energy hole on earth. This paper analyses the characteristics of data distribution in WSN. Some results are obtained from the analysis including the distribution of energy consumptions, the lifetime of each node in different localities and the data transferring delay corresponding to the node's lifetime.