

# 大规模农田传感器网络通信能耗模型

肖德琴<sup>1,2</sup> 王景利<sup>1</sup> 罗锡文<sup>2</sup>

(华南农业大学信息学院 广州 510642)<sup>1</sup>

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术省部共建教育部重点实验室 广州 510642)<sup>2</sup>

**摘要** 将无线传感器网络应用于农业中,构成农田监控网络,是实现农业信息化、自动化、智能化的重要手段。然而,农田无线传感器网络具有超大规模、超低成本、拓扑变化复杂等特点,这些特征对网络通信设计提出了更加苛刻的要求。从 Heinzelman 的无线传输能量模型出发,建立了一个适用于大规模农田传感器网络的通信能耗模型,该能量模型考虑了部署间距、传输半径以及数据包大小对系统总能耗的影响,获得了在传输间距  $x$  确定情况下,求最佳传输半径  $R$  的计算方法。同时,仿真分析了不同部署半径、不同网络规模对全网查询能耗的影响。

**关键词** 无线传感器网络,能量模型,传输半径

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Communication Energy Model for Large Scale Fields Sensor Networks

XIAO De-qin<sup>1,2</sup> WANG Jing-li<sup>1</sup> LUO Xi-wen<sup>2</sup>

(College of Informatics, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)<sup>1</sup>

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment Ministry of Education, South China

Agricultural University, Guangzhou 510642, China)<sup>2</sup>

**Abstract** It is an important technique to achieve agricultural informationization, automatization and intelligentize that wireless sensor networks is used in agriculture as a monitoring network. Farmland wireless sensor network has the characteristics of ultra-large-scale, ultra-low-cost and complex topological changing which brings the network protocol rigorous requirements. In this paper, a communication energy model for large-scale fields' sensor network was proposed based on Heinzelman's energy model, which takes the interaction with disposal space distance, transmission semi-diameter, packet size as well as the impact of components into account. Furthermore, a math method to calculate best transmission semi-diameter was presented while the disposal space distance was given. And then, the important factors of the disposal space distance and network scale in the model effect query energy consumption were attained by fitting the simulation results.

**Keywords** Wireless sensor networks, Energy model, Transmission semi-diameter

## 1 引言

随着移动通信技术、嵌入式计算技术和传感器技术的飞速发展和日益成熟,具有感知能力、嵌入式计算能力、分布式信息处理和无线通信能力的无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSNs)逐渐引起了人们的关注,已广泛应用于军事、监控、应急、环境、防空、保健、交通等领域。随着精细农业的发展,无线传感器网络在农田监控中的应用也显得日益重要,通过在农田中部署一定数量的无线传感器节点,就可以对农田水分、温度、湿度、虫害等状况进行实时监控,从而为精确灌溉、精确施肥、精确喷雾等提供基础<sup>[1]</sup>。

单个传感器节点处理能力、存储能力、通信范围、能量有限等诸多问题,使得合理使用有限能量资源成为实施无线传

感器网络的核心问题<sup>[2]</sup>。在过去几年里,研究者多从协议角度研究低能耗传感器网络通信协议以节省能量。文献[3,4]中提出用于稀疏网络拓扑的最小能量路由由分布式算法,文献[5,6]中提出基于覆盖区域节点离散化的近似方法。文献[7]中提出能量预测方法,利用剩余能量选择从汇聚节点到事件区域的路由,但没有考虑信息在网络中传输的最短距离,容易造成信息传输时延和能量浪费。事实上,在无线系统中,传输距离长短直接与能量消耗大小有关,从而直接影响到传感器网络的部署。

无线传感器网络部署拓扑的合理性在很大程度上影响高层通信协议的执行和网络的运行能耗。在大规模农田监测应用中,具有超大规模、低成本、自组织、随机部署、环境复杂、网络拓扑易变等特点,这些特点使能量问题和拓扑控制成为更

到稿日期:2008-09-18 返修日期:2008-11-26 本文受广东省自然科学基金(8151064201000037),广东省科技计划(2008B021300014),国家863重点项目(2006AA10A307)资助。

肖德琴(1970-),女,博士生,教授,硕士生导师,主要研究方向为计算机网络与无线传感器网络,E-mail:deqin\_x@163.com;王景利(1983-),男,研究生,主要研究方向为无线传感器网络;罗锡文(1945-),男,教授,博士生导师,主要研究方向现代农业机械与装备。

大的挑战。在农田中部署无线传感器网络时,传统做法是将节点成方格状部署在农田中,然后以直线直通方式向会聚节点传送数据。这种做法不仅消耗了大量节点能量,降低了整个网络的吞吐量,而且在大规模部署中这种直通方式有时根本不可能实现。

下面从 Heinzelman 的无线传输能量模型出发<sup>[8]</sup>,建立了一个适用于传输受限的农田传感器网络部署的通信能耗模型,该模型考虑了部署间距、传输半径以及数据包大小对系统总能耗的影响,重点论述了传输半径的能耗衰减模型,得出了在不同部署半径下的能量公式。然后仿真确定了部署半径、网络规模对全网查询能耗的影响,通过对仿真结果的拟合得出模型中的参数,获得了在传输间距  $x$  确定的情况下,求最佳传输半径  $R$  的计算方法。

## 2 工程背景

本文所针对的工程背景是在农田中部署水分传感器网络,实时监测农田水分情况,从而实现对农田的精确灌溉。其工作硬件节点如图 1 所示,实验所用通信方案采用 CC1000 通信模块。为便于描述,本文假定农田成矩形分布(实际上,即使田间不规则,传感器节点也可以规则部署,该假定不影响本方案的可操作性),同时传感器感知与通信范围均为圆形,为了均匀部署,保证感知范围的覆盖性与网络的连通度,将无线传感器网络以大小相同的静态网格方式部署于矩形农田中。基站位于网格外部,所有数据最终都传送到基站中,从而实现对整个农田水分的远程监控。网格分布如图 2 所示。



图 1 农田水分传感器节点

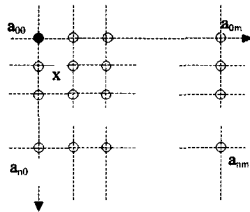


图 2 农田水分传感器网络简化部署模型

其中,  $a_{ij}$  表示网内的传感器节点,  $i$  表示节点所处的行数,  $j$  表示节点所处列数 ( $0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq M$ );  $a_{00}$  表示基站节点(sink)。根据实验基地实际应用背景,可为基站供电的环境位于田间一侧,所以对系统的假定如下:(1)基站固定在  $a_{00}$  位置;(2)所有节点同构,在开始时都装载了相同的能量;(3)所有节点都是静止的,不可移动;(4)节点不感知自身能量值;(5)节点知道自身坐标值,从而了解自身于网络中的具体位置;(6)每个节点都具有数据融合计算的能力;(7)所有节点都是无人值守的;(8)传感器网络按规则网格形部署,每一格是边长为  $x$  的正方形;(9) $R$  为传感器节点的传输半径,  $R \geq x$  为传感器网络传输正常工作的必要保证。

针对上述系统工程模型,无线传感器网络依据梯度层次传递数据是比较理想的选择<sup>[9]</sup>。梯度层次场的物理意义是通过节点的级别刻画该点与基站通信所需的最小跳数和数据传输方向。传感器节点根据自己到达汇聚节点的跳数会形成拓

扑层次,同一梯度层次内部的节点具有相同的跳数,如节点  $i$  的梯度层次为 3,就是指节点  $i$  至少需要 3 跳才能与基站通信。数据的传播方向是沿着梯度层次级别减小的方向。当节点采用固定通信范围  $R$ ,梯度层次从另一方面也可以刻画源节点到基站的物理距离。传感器节点必须通过低层次中的转发节点转发数据。梯度层次有一定的宽度与形状,主要由传感器节点的有效通信距离  $R$  与网络的分布模型决定。因此,在工程实施中,需要获得在精准部署间距  $x$  确定的情况下发射半径  $R$  对系统总能耗的影响,通过建立  $x, R$  及数据包尺寸对总能耗的关系模型可以求导出最佳的部署模型,从而对工程实施进行指导。

## 3 信道能耗衰减模型

在无线传输中,发射功率随着传输距离的增加而呈指数衰减。Heinzelman 等人提出了两种信道模型:自由空间衰减(frees pace)模型和多路径衰减(multi-path fading)模型<sup>[8]</sup>。一个  $l$  比特数据传输距离为  $d$ ,射频电路的发送和接收能耗分别是:

$$E_{Tx}(l, d) = E_{Tx-dec}(l) + E_{Tx-amp}(l, d) = \begin{cases} lE_{dec} + l\epsilon_{fx}d^2, & d < d_0 \\ lE_{dec} + l\epsilon_{amp}d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(l) = E_{Rx-dec}(l) = lE_{dec} \quad (2)$$

$E_{Tx}(l, d)$  是传输  $l$  比特数据在距离  $d$  时耗损的能量,由发射电路损耗  $E_{Tx-dec}(l)$  和功率放大损耗  $E_{Tx-amp}(l, d)$  两部分构成。功率放大损耗则根据收发距离分别采用自由空间模型和多路径衰减模型。其中  $E_{dec}$  为电子器件的功耗,  $\epsilon_{fx}$  为近距离衰减放大器的系数,  $\epsilon_{amp}$  为远距离衰减放大器的系数。当发送节点与接收节点的距离  $d$  小于某个阈值  $d_0$  时,采用自由空间模型,发射功率呈  $d^2$  衰减;否则采用多路径衰减模型,发射功率呈  $d^4$  衰减。临界值  $d_0$  的设置为:

$$d_0 = \frac{4\pi \sqrt{Lh_r h_t}}{\lambda} \quad (3)$$

其中,  $L$  表示传输损耗,  $h_r$  表示接收者天线高度,  $h_t$  表示发送者天线高度,  $\lambda$  表示波长。

$E_{Rx}(l)$  表示接收  $l$  比特长数据需要的能耗,接收数据的耗能主要在于接收电路损耗  $E_{Rx-dec}(l)$ 。

此外,考虑到数据融合的需要,令  $E_{da}$  为融合单个节点单位比特所消耗的能量,则转发节点融合  $n$  个节点  $l$  比特所消耗的能量为:

$$E_{DA} = nlE_{da} \quad (4)$$

## 4 大规模农田传感器网络通信能耗模型

为实现节能的农田采集网络信息传送目标,在部署间距  $x$  确定的情况下,显然节点传输半径直接影响了网络的梯度层次,决定了网络的生命周期,也决定了网络的拓扑结构。拓扑半径成为部署网络的关键问题。在农田传感器网络模型中,网内网络边长  $x$  值与传输半径  $R$  的关系直接影响网络梯度层次场的形成,  $x$  固定时,  $R$  越大,则网内梯度层次越少,节点经过更少的跳数就能到达基站。将网络中所有节点的梯度层次数  $L$  值相加所得的跳数总和  $S_{sum,L}$  反映了网络规模与传输半径的关系,是衡量能耗的重要因素。跳数总和与总能耗之间的关系由性质 1 得到保证。

**性质 1(衰减能耗模型)** 在图 2 所示的网络中,设传输半径为  $R$ ,网络部署成  $N$  行、 $N$  列的网络结构。

(1)当  $R \leq d_0$  时,采用自由空间衰减模型,则能耗  $E_f$  与跳数总和  $S_{um\_L}$  的关系为:

$$E_f = (N^2 + S_{um\_L}) \times (2E_{dec} + \epsilon_{fx} d^2) \quad (5)$$

(2)当  $R \geq d_0$  时,采用多路径衰减模型,则能耗  $E_m$  与跳数总和  $S_{um\_L}$  的关系为:

$$E_m = (N^2 + S_{um\_L}) \times (2E_{dec} + \epsilon_{amp} d^4) \quad (6)$$

性质 1 描述了系统总能耗与网络规模、总跳数呈正相关关系,发射半径到达阈值  $d_0$  后的增长呈指数级递增关系(由 2 次指数幂升到 4 次指数幂)。性质 1 可以由跳数总和的定义及式(1)、式(2)很容易推导得到,详细证明从略。

$$Sum\_L = \begin{cases} \frac{7N(N-1)(N-2)}{24} + \frac{N(5N-4)}{2} + \sum_{j=1}^{\lfloor \frac{2N-1}{2} \rfloor} 3(\frac{N}{2} + j)(\frac{N}{2} - 3j) & (\sqrt{5}x \leq R < 2\sqrt{2}x, N \bmod(2) = 0) \\ \frac{7N(N-1)(N+1)}{24} + \sum_{j=0}^{\lfloor \frac{2N-1}{2} \rfloor} 3(\frac{N+1}{2} + j)(\frac{N+1}{2} - 3j - 2) & (\sqrt{5}x \leq R < 2\sqrt{2}x, N \bmod(2) \neq 0) \end{cases}$$

$$Sum\_L = \begin{cases} \frac{N(N-1)(N-2)}{3} + \frac{N(2N-1)}{2} & (2\sqrt{2}x \leq R < 3x, N \bmod(2) = 0) \\ \frac{N(N-1)(N+1)}{3} & (2\sqrt{2}x \leq R < 3x, N \bmod(2) \neq 0) \end{cases} \quad (7)$$

性质 2 通过几何画图分析不难得出,详细分析从略。性质 2 刻画出跳数总和与网络规模的递增关系,但是随着部署间距  $x$  的取值范围不同,这二者的制约关系也不尽相同,这多个计算模式就潜在隐含了在不同部署间距  $x$  下,势必存在一个较佳的传输半径  $R$  计算公式,使总跳数  $S_{um\_L}$  适中,而总能耗最少。由性质 1,2 可以看出,未必是直觉的发射半径越大,总跳数越少,总能耗就越少,后面的实例仿真分析也印证了这一点。

在进行数据融合的拓扑控制中,传送的数据分为两部分:可聚合压缩部分与不可聚合压缩部分。一次完全融合的数据采集,数据都是由高梯度层次的节点向低梯度层次的节点传送,低梯度层次节点将数据与自身数据融合后,再传给更低梯度层次的节点。这样,在一次完全融合的数据采集过程中,可聚合压缩部分的收发次数为每个节点 1 次,而不可聚合压缩部分的收发次数则与节点梯度层次数一致。

**性质 3(数据融合能耗模型)** 在采集数据包格式中,包头部分占  $m_h$  byte,数据占  $m_d$  byte。包头部分可以聚合,两个数据包融合后只需要 1 个包头部分,令一次全网的网内完全融合采集消耗的能量为  $E$ ,则有:

$$E = N^2 \times \text{收发能耗} \times (m_h + m_d) + S_{um\_L} \times \text{收发能耗} \times m_d \quad (8)$$

性质 3 由数据融合定义和式(1)、(2)和(4)迭代即可得到。性质 3 刻画了数据融合能耗与数据包长度及网络规模的关系。显然,网络规模越大,融合后节能效果越明显。

## 5 仿真分析

### (1)参数确定

根据 NS2 中无线扩展模块的设定和业界对无线传感器网络频率的建议,无线电频率为 914MHz,其他参数值为  $G_r = G_t = 1, h_t = h_r = 1.5m, L = 1$ (系统无损耗)。其中  $G_r$  表示发

而跳数总和与梯度层次密切相关,梯度是由传输半径和节点间距决定的,在工程实践中,传输半径的设定与跳数总和有很大的关系,其间的关系可由性质 2 进行描述。

**性质 2(传输半径模型)** 在农田传感器网络中,设网络部署成  $N$  行、 $N$  列的网络结构,在发送半径为  $R$  的情况下,当  $2 \leq N \leq \infty$  时。跳数总和  $S_{um\_L}$  与  $N, R, x$  的关系模型满足式(7):

$$\begin{aligned} Sum\_L &= N^2(N-1) \quad (x \leq R < \sqrt{2}x) \\ Sum\_L &= \frac{N^2(N-1)}{2} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{i(i+1)}{2} \quad (x \leq R < \sqrt{2}x) \\ Sum\_L &= \frac{N^2}{4}(2N-1) \quad (2x \leq R < \sqrt{5}x) \end{aligned}$$

送天线增益,  $G_r$  表示接受方增益。由这些参数值可以计算得到:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{914 \times 10^6} = 0.328m$$

将参数值代入式(3),得到  $d_0 = 86.2m$ 。

式(1)、(2)需要的参数值设置如表 1 所列。

表 1 能耗模型参数值

参量	值
$E_{elec}$	50nj/bit
$\epsilon_{fx}$	10pj/bit/m <sup>2</sup>
$E_{da}$	5pj/bit/single
$\epsilon_{amp}$	0.0013 pj/bit/m <sup>4</sup>

### (2)实例分析

假定农田传感器网络中网格边长  $x$  取 50m,  $m_h = m_d = 3byte$ 。根据性质 2,传感器节点传输半径  $R$  取满足与  $x$  关系的最小值,则有下面 5 种情况:

- (1)  $R = x = 50m$ ;
- (2)  $R = \sqrt{2}x = 50\sqrt{2}m = 70.71m$ ;
- (3)  $R = 2x = 100m$ ;
- (4)  $R = \sqrt{5}x = 50\sqrt{5}m = 111.8m$ ;
- (5)  $R = 2\sqrt{2}x = 100\sqrt{2}m = 141.42m$ 。

由上推理,显然可以得出如下两条性质:

**推论 1** 当  $R \leq 86.2m$  时,采用自由空间衰减模型,则能耗为:

$$E_f = (N^2 + S_{um\_L}) \times (2E_{dec} + \epsilon_{fx} d^2) \quad (9)$$

**推论 2** 当  $R \geq 86.2m$  时,采用多路径衰减模型,能耗为:

$$E_m = (N^2 + S_{um\_L}) \times (2E_{dec} + \epsilon_{amp} d^4) \quad (10)$$

式(9)与式(10)的能耗单位为 24nj。由此,根据性质 1—性质 3,得到在不同网络规模下,一次全网的网内完全融合采集消耗能量的仿真对比如图 3 所示。图 3 显示了网络规模与一次全网查询耗能对比情况。由图可见,随着网络规模的增大,各种传输半径情况的一次全网查询能耗都不断增大。其中  $R = 141.42m$  时,能耗最大,增长速度也最快。其次是  $R = 50m$ ,再到  $R = 111.8m$ 。  $R = 70.71m$  与  $R = 100m$  相差不大,两条曲线几乎重合。在相同的网络规模下,  $R = 100m$  比  $R =$

70.71m 略大。由此可得,当  $x$  的值为 50m 时,  $R$  取 70.71m 最好。而且由推论 1 可得,对单个节点而言,传输半径越大(当大于 86.2m 时),进行一次收发所消耗的能量更大(将用式(10)进行能耗计算,增长更快),所以  $R$  取 70.71m。为了消除传输半径内的过渡区间的影响,应消除与处于传输半径边缘的节点通信的不稳定性。在工程实施中,取  $R$  值为 75m,实施效果较为理想。

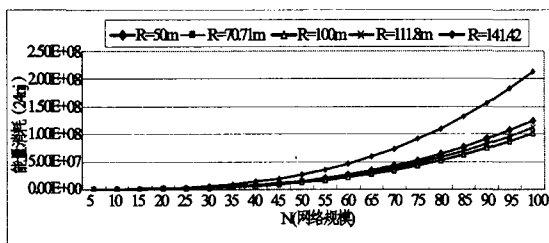


图3 网络规模与一次全网查询能耗关系图

**结束语** 本文以信道能耗衰减模型、传输半径模型和数据融合能耗模型 3 个性质定理形式给出了在大规模农田部署中的能耗计算办法。通过这些模型可以对部署间距  $x$ 、传输半径  $R$  及数据包尺寸对网络总能耗的影响进行理论计算,得出在部署间距  $x$  确定的情况下,通过性质 2 的不同计算模式的  $S_{min}$  最小值分析,结合性质 1、性质 3 的能耗总量计算,可以求解出最佳的发射半径。实例分析得出了在本文的工程背景下,若部署间距为 50m,则发送半径取 75m 为最佳的结论。这些理论计算所得的能耗模型和传输特性能够为部署能量有效的无线传感器网络拓扑提供指导,为实现无线传感器网络的高层通信协议提供理论基础,类似情况的传感器网络也可以参考本文方法进行部署规划。

此外,值得一提的是,本文的融合模型仅考虑包头融合,未考虑数据本身的融合,如果再对数据进行必要的融合传输,可以进一步节约能耗,延长整个网络的生命周期。同时,关于阈值  $d_0$  的计算,我们也仅考虑了比较理想的情形,随着实际情况的变化,尤其需要针对无线发射装置的变化改变各项参

数的设置。而且需要注意的是,实际与理论计算有一定的误差,需要在应用中进行标定和修正。

## 参考文献

- [1] Wang Ning, Zhang Naiqian, Wang Maohua. Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2006, 50(1): 1-14
- [2] Ephremides A. Energy concerns in wireless networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2002(8): 48-59
- [3] Rodoaplu V, Meng T H. Minimum Energy Mobile Wireless Networks [J]. IEEE J. Select. Areas Communications, 1999, 17(8): 1333-1334
- [4] Li L, Halpern J Y. Minimum Energy Mobile Wireless Networks Revisited [C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), 2001. <http://www.cs.cornell.edu/Info/People/halpern/papers/icc01.ps>
- [5] Wattenhofer R. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless AdHoc Networks [C]// IEEE INFOCOM, 2001. <https://eprints.kfupm.edu.sa/35651/1/35651.pdf>
- [6] Li L. Analysis of a Cone-based Distributed Topology Control Algorithm for Wireless Multihop Networks [C]// ACM Symposium on Principle of Distributed Computing (PODC), 2001. <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [7] Lin K, Zhao H. Energy Prediction and Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks [J]. Journal on Communications, 2006, 27(5): 21-23
- [8] Wang A, Heinzelman W B, Sinha A, et al. Energy-scalable protocols for battery-operated microsensor networks [J]. Journal of VLSI Signal Processing, 2001, 29(3): 223-237
- [9] 朱红松, 孙利民, 徐勇军, 等. 基于精细化梯度的无线传感器网络汇聚机制及分析 [J]. 软件学报, 2007, 18(5): 1138-1151
- [10] Fixes [C]// Proceedings of the 2005 International Workshop on Mining Software Repositories [C]. 2005: 1-5
- [11] Nagappan N, Ball T, Zeller A. Mining Metrics to Predict Component Failures [C] // Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering. 2006: 452-461
- [12] Weibull C, Premraj R, Zimmermann T, et al. How Long Will It Take to Fix This Bug [C] // Proceedings of the Fourth International Workshop on Mining Software Repositories. 2007: 1-8
- [13] Boetticher G D. Nearest neighbor sampling for better defect prediction [J]. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2005, 30(4): 1-6
- [14] Hooimeijer P, Weimer W. Modeling bug report quality [C] // Proceedings of the Twenty-second IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering. 2007: 34-43
- [15] Livshits B, Zimmermann T. DynaMine Finding Common Error Patterns by Mining Software Revision Histories [C] // Proceedings of 13th International Symposium on Foundations of Software Engineering (ESEC/FSE'05). 2005: 296-305
- [16] Ko A J, Myers B A, Chau D H. A Linguistic Analysis of How People Describe Software Problems [C] // Proceedings of the Visual Languages and Human-Centric Computing. 2006: 127-134
- [17] Weissgerber P, Diehl S. Mining Version Histories to Guide Software Changes [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 2005, 31(6): 429-445
- [18] 韩京宇, 徐立臻, 董逸生. 数据质量研究综述 [J]. 计算机科学, 2008, 35(2): 1-5
- [19] Anvik J, Hiew L, Murphy G C. Who Should Fix This Bug [C] // Proceedings of the 28th International Conference on Software Engineering. 2006: 361-370
- [20] Schroeder P J, Korel B. Black-box test reduction using input-output analysis [C] // Proceedings of the 2000 ACM SIGSOFT International Symposium on Software Testing and Analysis. 2000: 173-177
- [21] Śliwerski J, Zimmermann T, Zeller A. When Do Changes Induce

(上接第 25 页)