

# 一种射频能量捕获无线传感器网络的分层分步数据收集策略

田贤忠 林初超

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘要** 在射频能量捕获无线传感器网络中,采用多跳的方式将数据发送给网络中的 Sink 节点能够减少节点间的通信距离,从而减少能量的消耗,但增加了转发节点的收发数据量。为了减少网络中转发节点的负载,延长网络的生命周期,提出了一种分层分步的数据收集方法(Layer-Step Data Collection, LSDC)。通过对网络中节点能量进行捕获和在能量消耗过程进行建模,得到节点的剩余能量。通过运用多次“跳”命令的方式通知网络中的传感器节点分步地将采集到的数据传递给 Sink 节点。在传递节点的选择上,以能量状况最佳的节点作为传递节点,最终达到高效地将网络中的数据全部收集到 Sink 节点进行处理的目的。理论分析与仿真实验结果表明,与采用逐层收集数据的方法(Layer-By-Layer Data Collection, LDC)相比,所提方案更节能,能量消耗更均衡,能够延长网络的生命周期。

**关键词** 无线传感器网络,能量捕获,数据收集,生命周期

中图分类号 TP393 文献标识码 A

## Layer-step Data Collection Scheme for RF Harvesting Wireless Sensor Network

TIAN Xian-zhong LIN Chu-chao

(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

**Abstract** In RF harvesting wireless sensor network, adopting multi-hop to send data to the Sink can reduce the communication distance between nodes and then reduce energy consumption, but increases sending and receiving data of relay nodes. In order to reduce the network load of relay nodes and prolong the network lifetime, a layer-step data collection (LSDC) approach was proposed. By modeling the process of energy harvesting and energy consumption, this paper got the residual energy of nodes. Through the use of multiple “hop” command, this paper notified sensor nodes to transfer the collected data to the Sink step-by-step in the network. This paper chose the node which has best energy status as relay node, and ultimately all the data in the network were collected and processed by Sink efficiently. Theory analysis and emulation test show that our algorithm obtains more energy efficiently, prolongs the network lifetime, and energy consumption is more balanced than layer-by-layer data collection (LDC) approach.

**Keywords** Wireless sensor network, Energy harvesting, Data collection, Lifetime

## 1 引言

在无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)中,传感器节点一般由电池供电。一旦电池的能量耗尽,节点就不能正常工作。近年来,通过捕获环境中的能量来为传感器节点供电逐渐成为了研究热点,特别是射频能量,由于其能源的稳定性和可控性,正成为理想的能量源<sup>[1]</sup>。射频能量捕获传感器网络(Radio Frequency Energy Harvesting Wireless Sensor Network, RF-EHN)的传感器节点带有捕获环境射频能量的装置,能够捕获环境中的射频能量,可广泛应用于现代化农业、工程控制、环境监控以及国防军事等方面<sup>[2]</sup>。

对 RF-EHN 的研究目前已取得了一些成果。在射频能量捕获方面, Nader 等人<sup>[3]</sup>提出射频能量捕获传感器网络的 2D 和 3D 能量模型,并对网络可用能量与捕获能量的分配问题进行了分析。Flint 等人<sup>[4]</sup>使用随机几何方法分析了由环境射频能量供电的无线传感器网络的性能。

在数据采集方面, Tian 等人<sup>[5]</sup>优化了 RFID 阅读器的位置来避免通信的碰撞。Li 等人<sup>[6]</sup>提出捕获使用和捕获存储两个相关的方案来提高网络的能量效率。Erol-Kantarci 等人<sup>[7]</sup>通过调整网络中能量发射器的位置,使节点在完成任务的同时收到最多的能量,采用了整数线性规划模型来寻找能量发射器的最佳部署位置。

在网络节点不能移动的情况下, Chen 等人<sup>[8]</sup>运用压缩感知技术在数据收集树结构的无线传感器网络中权衡传输消耗和网络生命周期的关系。Li 等人<sup>[9]</sup>运用马尔科夫决定过程和部分可见的马尔科夫决定过程分别优化了完整网络状态和部分网络状态两种情况的传递调度问题。Bao 等人<sup>[10]</sup>提出了一种启发式的路由算法,使网络有更大的吞吐量和较低的端对端时延。Imon 等人<sup>[11]</sup>在基于树形的无线传感器网络中提出了一个最大化生命周期的随机转化算法,通过平衡无线传感器网络的负载来扩展网络的生命周期。Martinez 等人<sup>[12]</sup>则提出了一个在线最大化网络生命周期的效用方程,用

本文受国家自然科学基金(61672465),浙江省自然科学基金(LY15F020027)资助。

田贤忠(1968—),男,博士,教授,CCF 会员,主要研究方向为网络编码、移动计算、无线网络协议、算法、性能分析与优化, E-mail: txz@zjut.edu.cn (通信作者);林初超(1992—),男,硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

来在一个存在多个任务的无线传感器网络中寻找最大化整个网络剩余能量和最大化网络节点最小能量之间的平衡,从而提高网络的生命周期。Yao 等人<sup>[13]</sup>提出了一个基于权重的源速率优化方法 WOSRO,该方法根据数据包的权重进行排序,允许无线传感器系统采用控制源编码速率的方法来选择最有价值的数据包。

与本文直接相关的是文献<sup>[14]</sup>。它提出了通过由 Sink 节点发送“跳”命令到网络中其他节点的方式进行时间同步并传递相应的命令,所提出的数据传递策略能够优化对捕获能量的利用。

上述数据传递策略虽然在一定程度上提高了网络的生命周期,但是在数据传递时没有考虑到从节能和能量消耗均衡两个方面来优化网络性能,提高网络的生存时间。本文的工作将充分考虑上述两个方面,提出一种分层与分步的数据收集算法。

## 2 系统模型

### 2.1 网络模型

本文采用射频能量捕获的无线传感器网络结构与文献<sup>[14]</sup>类似。如图 1 所示, Sink 节点既能作为射频能量源向网络中的传感器节点发送射频能量,也能作为汇聚节点接收网络中其他传感器节点发送给它的信息,还能够发送信标信号同步节点的时钟和发送特定的命令让网络中的传感器节点执行任务。Sink 节点连接有源能量源,即 Sink 节点的能量是稳定且持久不变的。网络中的其他传感器节点(这里称为非 Sink 节点)感知周围的信息,通过直接(一跳)或间接(多跳)的方式把感知的信息发送给 Sink 节点。非 Sink 节点的能量是由捕获 Sink 节点的射频能量获得的。根据非 Sink 节点的通信半径,网络被分为  $N$  层,层号  $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,其中最外层为层 1,最内层为层  $N$ 。另设每层的节点数为  $\mu_k$ 。

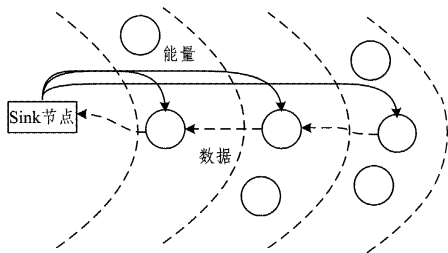


图 1 RF-EHN 结构图

### 2.2 能量捕获模型

在一个自由空间中,无线传感器天线接收到的射频能量功率可用如下的弗林斯传输公式表示<sup>[15]</sup>:

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R}\right)^2 \quad (1)$$

其中,  $P_t$  为发射端的功率,  $G_t$  为发射端的天线增益,  $G_r$  为接收端的天线增益,  $\lambda$  为波长,  $R$  为发射端与接收端之间的距离。若射频能量转化为直流电的转化效率为  $\eta$ , 则无线传感器节点的实际能量捕获功率为:

$$P_h = \eta P_r \quad (2)$$

### 2.3 能量消耗模型

本文采用了自由空间路径损耗的能量消耗模型<sup>[16]</sup>,无线传感器节点发送一个数据包消耗的能量为:

$$E_{tx} = L \times E_{de} + L \times \rho \times d^2 \quad (3)$$

其中,  $E_{tx}$  表示发送数据包消耗的能量;  $d$  表示两个传感器之

间的距离;  $E_{de}$  表示传感器处理单位长度数据所要消耗的能量; 每一个数据包有固定的长度  $L$ ;  $\rho$  是常量,由系统的具体情况决定。

无线传感器接收一个数据包消耗的能量为:

$$E_{rx} = L \times E_{de} \quad (4)$$

## 3 算法基本思想

为便于分析,我们把图 1 的 RF-EHN 结构图简化为如图 2 所示的三节点 RF-EHN 结构图。节点 A, B 发送数据给 Sink 节点有两种方案: 1) 节点 A, B 直接发送数据到 Sink 节点; 2) 节点 A 先发送数据包给节点 B, 再由节点 B 转发数据包给 Sink 节点, 节点 B 自己的数据包则直接发送给 Sink 节点。相对于第一种方案, 第二种方案节点 A 发送的距离缩小了, 所需消耗的能量也有所降低, 而对于节点 B, 虽然需额外发送节点 A 发送来的数据, 但节点 B 距离 Sink 节点更近, Sink 节点捕获到的能量也更多, 故方案二的能量消耗更均衡。换句话说, 通过分层转发较好地解决了“能量多的节点消耗的能量少, 而能量少的节点消耗的能量反而多”这一问题。

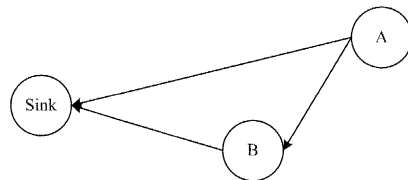


图 2 三节点 RF-EHN 结构图

分层转发虽然在一定程度上使得节点能量消耗更均匀, 但如果数据收集过程中部分节点转发数据量过大, 即使节点能够捕获一定能量, 节点依然容易因能量耗尽而停止工作。我们将用分步收集的方法来解决这个问题。

LSDC 的基本思想是在分层收集数据的基础上以多次“跳”命令的方式, 分步地将网络中的数据收集到 Sink 节点, 以达到分散节点的数据收发量, 平衡网络节点的能量状况, 延长网络的生命周期的目的。LSDC 算法的具体步骤如下:

(1) 根据非 Sink 节点的通信半径, 把网络分成  $N$  层, 同一层的节点之间可以互相直接通信。

(2) Sink 节点向网络中的其他传感器节点发送射频能量。

(3) Sink 节点向网络中的节点发送第 1 次“跳”命令, 初始层 1 中的节点向第 2 层的节点广播自身采集的数据, 第 2 层中的节点在收到由上层节点发来的数据后, 结合自身的剩余能量状况, 选择能量最多的节点转发收到的数据包, 并将自己感知的数据包一并广播给下一层节点。

(4) 同理, 下层节点在收到上层广播的数据包后, 选择能量最多的最佳节点转发数据包, 并将自己感知的数据包一并广播给下一层节点。以此类推, 直到数据传输到 Sink 节点。

(5) 然后, Sink 节点向网络中的节点发送第 2 次“跳”命令, 重复执行步骤(2)–(4), 把未收集数据的最外层节点数据以及内层转发节点数据收集到 Sink 节点。

(6) 重复步骤(5), 直至把网络中所有节点的数据都传输到 Sink 节点。

(7) 结束。

## 4 算法的具体实现

从上面的分析可以看出, LSDC 需要解决以下几个问题:

1) 如何根据“跳”命令的次数获得每次数据收集的初始层;

2)根据节点的剩余能量选择最佳转发节点;3)数据包格式的设计。

#### 4.1 数据收集初始层的确定

在 Sink 节点对网络中的节点进行时钟同步和分层后, Sink 节点就获取了网络中所有节点的初始状态信息。设  $N$  为网络分层后的网络总层数,  $k$  为层号, 每层的节点数为  $\mu_k$ ,  $a_k$  为第  $k$  层的节点是否需要一次“跳”命令来收集数据。 $a_k$  为 1 则表示第  $k$  层节点需要一个“跳”命令来收集数据;  $a_k$  为 0 则表示在执行前面的“跳”命令时第  $k$  层中的节点的数据已经全部被“捎带”到 Sink 节点, 不需要单独的一次“跳”命令来收集数据。由于网络的第一层节点必然需要第一次“跳”命令来收集数据, 即  $a_1 = 1$ , 而对第  $k$  ( $k > 1$ ) 层节点来说, 前面的每次“跳”命令会带走一个节点中的数据, 因此如果前面的“跳”命令次数大于或等于  $\mu_k$ , 则这层数据不需要单独的“跳”命令来收集, 即  $a_k = 0$ , 否则还需一次“跳”命令, 即  $a_k = 1$ , 因此有:

$$a_k = \begin{cases} 1, & \mu_k \geq \sum_{k=1}^{k-1} a_k + 1 \\ 0, & \mu_k < \sum_{k=1}^{k-1} a_k + 1 \end{cases} \quad (5)$$

而“跳”命令执行的次数就是  $a_1$  到  $a_N$  值的和, 即:

$$t = \sum_{k=1}^N a_k \quad (6)$$

下面计算 Sink 节点每次发送“跳”命令的初始层。“跳”命令次数为  $p \in \{1, 2, \dots, t\}$ , 为了得到 Sink 节点发送的第  $p$  次“跳”命令的初始层, 用度量  $D_k$  表示网络的第  $k$  层至内层, 已经有多少连续层的节点数据被 Sink 节点收集。当  $D_k = 0$  时, 表示第  $k$  层仍需要一次“跳”命令来收集数据; 当  $D_k = 1$  时, 表示第  $k$  层的节点数据已被前面的“跳”命令收集; 当  $D_k = n$  时, 表示第  $k$  层至  $k+n-1$  层的节点数据已被前面的“跳”命令收集。因为当  $a_k = 1$  时  $D_k = 0$ , 故  $D_k$  可以表示为:

$$D_k = \begin{cases} 0, & a_k = 1 \\ 1 + D_{k+1}, & a_k = 0 \end{cases} \quad (7)$$

以  $I_p$  表示第  $p$  次“跳”命令的初始层, 第一次“跳”命令的初始层  $I_1 = 1$ , 则第  $p$  次跳命令的初始层可以表示为:

$$I_p = I_{p-1} + 1 + D_{I_{p-1}+1} \quad (8)$$

#### 4.2 最佳转发节点的选择

由 LSDC 算法可知, 内层节点收到外层节点广播的数据包后, 需要选择一个最佳节点来转发数据包。换句话说, 要选择一个能量最多的节点来转发数据包。虽然每个节点都能感知自己的剩余能量, 但并不知道同层其他节点的剩余能量, 因此如何在同层节点之间互相协调, 让能量最多的节点转发数据是亟需解决的问题。

我们采用类似于 802.11 的 MAC 层协议中的分布式协调功能来决定同层节点中的转发节点, 整个过程如图 3 所示。同层的多个节点收到外层的数据后并不马上发送数据包, 而是先等待 DIFS (DCF Interframe Space) 时间, 然后标准的 802.11 的 MAC 层分布式协调机制是再等待一个随机产生的延迟发送时间  $T_{wait}$ , 而本方法的不同之处在于每个节点的延迟发送时间不再是随机产生, 而是由节点的剩余能量所决定, 节点的剩余能量为节点当前能量加上发送数据时能够捕获的能量再减去发送数据到下一层节点所消耗的能量, 节点的剩余能量越大, 则延迟发送的时间越短。这样, 能量最充足的节点就会获得优先转发权。

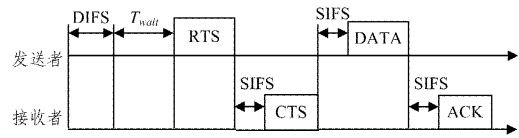


图 3 MAC 层协议分布式协调功能过程图

每个节点的剩余能量  $E_i$  不同, 其延迟发送的  $T_{wait}$  也不同。根据节点的剩余能量越大, 延迟发送的时间越短的特性,  $T_{wait}$  可以表示为:

$$T_{wait} = \frac{C}{E_i} \quad (9)$$

其中,  $C$  是常量, 表示能量与时间转化的比例系数。每个节点可以根据自己的剩余能量得到延迟发送时间, 而延迟发送时间最短的节点最终获得发送时隙。

#### 4.3 数据包结构

节点发送的数据包需要遵循一定的格式以保证数据包能够准确地收发。LSDC 算法中包含两类数据包: “跳”命令数据包和数据收集数据包。“跳”命令主要告知节点本次“跳”命令的数据收集的初始层, 因此数据包只需包括两个字段: 类型和初始层。类型值为 0 表示“跳”命令数据包, 其值为 1 表示数据收集数据包。数据收集数据包的格式如图 4 所示, ID 是指数据包自身的编号, 用以区分不同的数据包; 类型是指数据包的类型, 用以区分“跳”命令数据包和数据收集数据包; 层号是指数据包来自第几层节点的数据, 防止同层或其他层的节点错误地接收了数据; 源节点 ID 是指数据包是由哪个节点产生的; 目标层 ID 是指需要接收本数据的节点的层号; 最后是数据包的具体数据。这样的数据包结构可以帮助数据准确地发送到目标层的节点。

ID	类型	层号	源节点ID	目标层ID	数据
----	----	----	-------	-------	----

图 4 数据包结构

## 5 性能分析

本节主要对 LSDC 算法进行性能分析。我们将从节能和节点剩余能量均衡这两个方面来分析 LSDC 的性能。

### 5.1 节能分析

我们选取网络的一个区域来分析节点通过其他节点转发数据的能耗情况, 网络中其他区域情况类似。如图 5 所示, 节点 A 距离 Sink 节点的距离为  $d_3$ , 节点 A 距离节点 B 的距离为  $d_2$ , 节点 B 距离 Sink 节点的距离为  $d_1$ , 节点 B 处的夹角为  $\theta$ 。节点 A 可以有两种方案将数据发送到 Sink 节点, 一种为直接发送到 Sink 节点(称方案 1), 另一种为先将数据发送到节点 B, 再由节点 B 转发数据到 Sink 节点(称方案 2)。我们将分析两种方案的能耗情况。

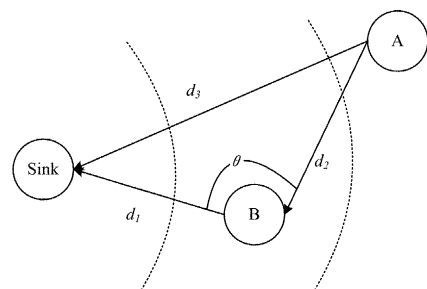


图 5 网络部分区域示意图

**定理 1** 在图 5 所示的网络中,方案 2 比方案 1 节能的条件为:

$$\theta \geq \arccos\left(-\frac{E_{de}}{\rho d_1 d_2}\right) \quad (10)$$

证明:根据三角形的余弦公式,边角的关系可以表示如下:

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \theta \quad (11)$$

若方案 2 更加节能,即节点 A 的数据发送到节点 B 消耗的能量、节点 B 接收节点 A 的数据消耗的能量和节点 B 发送这些数据到 Sink 节点消耗的能量之和不大于节点 A 直接发送数据到 Sink 节点所消耗的能量,根据自由空间路径损耗的能量消耗模型中的式(3)、式(4)可以得到如下关系:

$$L(E_{de} + \rho d_3^2) + LE_{de} + L(E_{de} + \rho d_1^2) \leq L(E_{de} + \rho d_2^2) \quad (12)$$

进一步简化为:

$$\rho d_3^2 \geq \rho d_2^2 + \rho d_1^2 + 2E_{de} \quad (13)$$

结合式(11)可得式(10)。得证。

式(10)说明当  $\theta$ (在  $0^\circ \sim 180^\circ$  之间)越大,方案 2 比方案 1 越节能,即节点 A 通过节点 B 转发数据到 Sink 节点所消耗的能量比直接发送数据到 Sink 节点更少,这与直观情况相符。特别地,由于式(10)右括号中是一个负值,因此  $\theta > 90^\circ$ ,即  $\theta$  至少要在  $90^\circ$  以上。而上述 3 个节点位于 3 个不同的层,因此大多数情况下是满足式(10)的要求的。

**定理 2** 在图 5 所示的网络中,当  $d_3 = d_1 + d_2$  时,方案 2 比方案 1 更节能。

证明:方案 2 的能耗为:

$$\begin{aligned} & L(E_{de} + \rho d_3^2) + LE_{de} + L(E_{de} + \rho d_1^2) \\ & = 3LE_{de} + \rho Ld_1^2 + \rho Ld_2^2 \end{aligned}$$

方案 1 的能耗为:

$$L(E_{de} + \rho d_3^2) = LE_{de} + \rho Ld_1^2 + \rho Ld_2^2 + 2\rho Ld_1 d_2$$

因在节点能量消耗过程中,发射能耗比接收能耗高,即  $\rho d_1^2 > E_{de}$ 。假设  $d_1 < d_2$  (反之亦然),则方案 1 能耗为:

$$\begin{aligned} & L(E_{de} + \rho d_3^2) > LE_{de} + \rho Ld_1^2 + \rho Ld_2^2 + 2\rho Ld_1^2 \\ & > 3LE_{de} + \rho Ld_1^2 + \rho Ld_2^2 \end{aligned}$$

得证。

## 5.2 能量均衡分析

我们仍然采用如图 5 所示的网络,首先 Sink 节点传输  $T$  时间的射频能量给节点 A 和节点 B,然后 Sink 节点发“跳”命令收集数据,节点 A 和节点 B 再发送数据给 Sink 节点。我们分析 5.1 节两种方案的剩余能量情况。

**定理 3** 方案 2 比方案 1 能量更均衡的条件为:

$$\begin{aligned} & \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + LE_{de} - \frac{1}{2} L\rho(d_3^2 + d_2^2 - \\ & 3d_1^2) < 0 \end{aligned} \quad (14)$$

证明:

1) 经过  $T$  时间后,由式(1)、式(2)可知节点 A 和节点 B 捕获的能量分别为:

$$E_{Ah} = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_3}\right)^2 \quad (15)$$

$$E_{Bh} = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1}\right)^2 \quad (16)$$

其中,  $E_{Ah}$  和  $E_{Bh}$  分别表示节点 A 和节点 B 捕获的能量,其他参数的含义与式(1)、式(2)相同。

2) 方案 1 节点剩余能量方差计算。由于方案 1 中节点 A

和节点 B 都直接发送数据给 Sink 节点,可以得到节点 A 的剩余能量为:

$$\begin{aligned} E_{A1} & = E_{Ah} - L(E_{de} + \rho d_3^2) \\ & = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_3}\right)^2 - L(E_{de} + \rho d_3^2) \end{aligned} \quad (17)$$

节点 B 的剩余能量为:

$$\begin{aligned} E_{B1} & = E_{Bh} - L(E_{de} + \rho d_1^2) \\ & = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1}\right)^2 - L(E_{de} + \rho d_1^2) \end{aligned} \quad (18)$$

此时节点 A 与节点 B 的剩余能量的方差为:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{4} \left[ \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) - L\rho(d_3^2 - d_1^2) \right]^2 \quad (19)$$

3) 方案 2 节点剩余能量方差计算。节点 A 将数据发送到节点 B,此时节点 A 的剩余能量为:

$$E_{A2} = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_3}\right)^2 - L(E_{de} + \rho d_2^2) \quad (20)$$

节点 B 接收节点 A 发送过来的数据,并转发给 Sink,消耗能量为:

$$LE_{de} + L(E_{de} + \rho d_1^2) \quad (21)$$

节点 B 发送自身数据消耗的能量为:

$$L(E_{de} + \rho d_1^2) \quad (22)$$

此时,节点 B 的剩余能量为:

$$\begin{aligned} E_{B2} & = E_{Bh} - LE_{de} - L(E_{de} + \rho d_1^2) - L(E_{de} + \rho d_1^2) \\ & = \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d_1}\right)^2 - 3LE_{de} - 2\rho Ld_1^2 \end{aligned} \quad (23)$$

则节点 A 与节点 B 剩余能量的方差为:

$$\begin{aligned} \sigma_2^2 & = \frac{1}{4} \left[ \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + 2LE_{de} + L\rho \right. \\ & \quad \left. (2d_1^2 - d_2^2) \right]^2 \end{aligned} \quad (24)$$

比较采用两种方法后节点剩余能量的方差大小:

$$\Delta = \sigma_1^2 - \sigma_2^2 = (\sigma_1 + \sigma_2)(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (25)$$

将其代入式(19)、式(24)可得:

$$\begin{aligned} \Delta & = \frac{1}{4} \left[ 2\eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + 2LE_{de} + L\rho(3d_1^2 - \right. \\ & \quad \left. d_2^2 - d_3^2) \right] \times [L\rho(d_2^2 - d_3^2 - d_1^2) - 2LE_{de}] \end{aligned} \quad (26)$$

已知  $d_3$  大于  $d_2, d_1$ , 由  $d_2^2 - d_3^2 - d_1^2 < 0$ , 可得  $L\rho(d_2^2 - d_3^2 - d_1^2) - 2LE_{de} < 0$ , 这样,要使  $\Delta > 0$ , 即方案 2 比方案 1 能量更均衡,只需式(26)第一个括号中的值小于 0, 即

$$2\eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + 2LE_{de} + L\rho(3d_1^2 - d_2^2 - d_3^2) < 0$$

得证。

**推论** 当  $d_3 = 2d_1 = 2d_2$  时,方案 2 比方案 1 能耗更均衡。

证明:设

$$\Phi = 2\eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + 2LE_{de} + L\rho(3d_1^2 - d_2^2 - d_3^2)$$

要使方案 2 比方案 1 能耗更均衡,根据定理 3 只需  $\Phi < 0$ , 当  $d_3 = 2d_1 = 2d_2$  时,有:

$$\begin{aligned} \Phi & = 2\eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \left(\frac{1}{d_3^2} - \frac{1}{d_1^2}\right) + 2LE_{de} + L\rho(3d_1^2 - \\ & \quad d_2^2 - d_3^2) \\ & = -\frac{3}{2} \eta TP_i G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2 \frac{1}{d_1^2} - 2(L\rho d_1^2 - LE_{de}) \end{aligned}$$

因为发射能耗远远大于接收数据能耗,所以  $L\rho d_1^2 - LE_{de} > 0$ , 故  $\Phi < 0$ , 得证。

### 6 仿真实验

我们用 MATLAB 仿真工具进行仿真实验。首先针对图 5 的网络结构验证算法的节能和能量均衡情况,其基本参数设置如表 1 所列。

表 1 基本参数设置

参数名称	参数值
发射端的功率 $P_t$	3W
发射端天线增益 $G_t$	2dBi
接收端天线增益 $G_r$	8dBi
波长 $\lambda$	0.328m
能量转化效率 $\eta$	0.5
数据包长度 $L$	500byte
单位数据消耗功率 $E_{cde}$	50nJ/bit
系统常量 $\rho$	10nj/bit/m <sup>2</sup>

首先比较方案 1 与方案 2 的能量消耗情况。这里  $d_3$  设置为 8m( $d_3$  固定不变的目的是使方案 1 的能量消耗固定不变),结果如图 6 所示。其中横坐标表示  $d_1$  与  $d_2$  的夹角  $\theta$ ,纵坐标是节点的能量消耗。从图 6 中可以看出,当夹角大于  $90^\circ$  时,方案 2 能量消耗开始低于方案 1(这与 5.1 节的分析结果相符),即通过转发的方式发送数据所消耗的能量低于直接发送的方式消耗的能量,并且随着夹角的增大,节能效果更好。再比较方案 1 与方案 2 的能量均衡情况。 $d_3$  依然为 8m,  $d_1$  与  $d_2$  之和等于  $d_3$ (即  $d_1$  与  $d_2$  的夹角  $\theta$  的值为  $180^\circ$ ),能量捕获时间  $T$  为 400s,  $x$  轴为  $d_1$  的值,  $y$  轴为方案 1 与方案 2 的方差,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出:1)当  $d_1 < 4.6$ m 时,方案 2 的方差小于方案 1 的方差,这个结果与定理 3 相符;2)随着  $d_1$  长度的增大,方案 1 的方差逐渐减小,这是因为  $d_1$  越大表示越接近  $d_3$ ,所以两节点捕获的能量也越接近,发送数据消耗的能量也越接近,剩余能量也越接近,故方差越小,剩余能量均衡性越好;3)随着  $d_1$  长度的增大,方案 2 的方差先是逐渐减小,在 3m 时到达最小,而后逐渐增大。这是因为起先节点 B 接收的能耗比节点 A 大,而发送数据消耗的能耗却比节点 A 小,虽然承担部分转发任务,但因为  $d_1$  长度小,消耗能量不多,所以方差大。随着  $d_1$  长度的增大,节点 B 接收的能量越来越小,而发送数据消耗的能耗却越来越多,承担转发任务的能量消耗也越来越多,而节点 A 因为离节点 B 越来越近,消耗的能量越来越少,所以节点 B 与节点 A 的剩余能量越来越接近,方差逐渐减小;当  $d_1 > 3$ m 后,节点 B 接收的能量更小,发送数据消耗的能耗却更多,承担转发任务的能量消耗越多,节点 A 消耗的能量越少,节点 B 的剩余能量已经比节点 A 的剩余能量还少,且差距越来越大,因此方差又越来越大了。

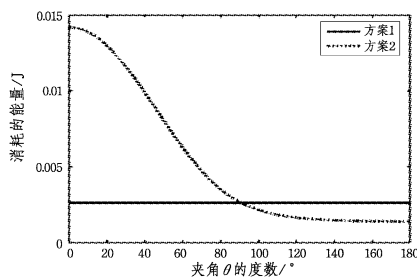


图 6 夹角的度数与消耗的能量

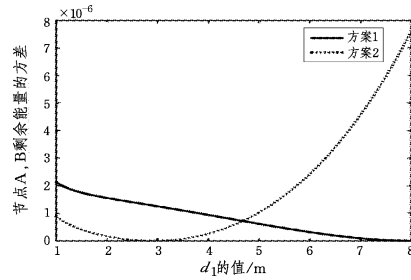


图 7  $d_1$  的值与节点 A, B 剩余能量的方差

我们再比较 LSDC 算法与逐层收集 (Layer Data Collection, LDC) 算法对整个网络能量均衡性的影响。实验采用图 1 的网络结构,包含 1 个 Sink 节点和 7 个无线传感器节点,每个节点的具体参数如表 2 所列。

表 2 基本参数设置

节点编号	节点层号	节点与 Sink 节点的距离/m
1	3	5
2	3	6
3	2	10
4	2	12
5	1	15
6	1	16
7	1	17

首先比较在节点采集数据量不同的情况下,两种算法的节点剩余能量的均衡情况,能量捕获时间为 400s,结果如图 8 所示。其中横坐标表示节点采集的数据量,纵坐标是节点剩余能量的方差。从图 8 中可以看出,LSDC 算法的方差一直低于 LDC 算法,即采用本文的算法使网络中节点的剩余能量更均衡,并且随着节点采集数据量的增加,LSDC 算法对网络能量均衡性的影响效果更好。再比较在能量捕获时间不同的情况下,两种算法的节点剩余能量的均衡情况,节点采集数据量为 1,结果如图 9 所示。其中横坐标表示节点捕获能量的时间,纵坐标是节点剩余能量的方差。从图 9 中可以看出,LSDC 算法的方差同样一直低于 LDC 算法,并且随着节点能量捕获时间的增加,两种算法的方差都越来越大,这是由于网络中每个节点距离 Sink 节点的距离不同,捕获能量速率也不同,随着捕获能量时间的增加,节点之间的能量差距也会增大。

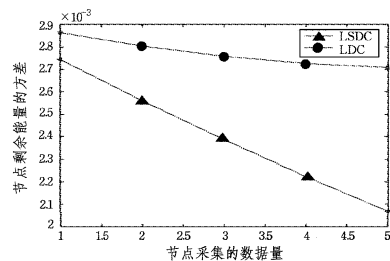


图 8 节点采集的数据量与剩余能量的方差

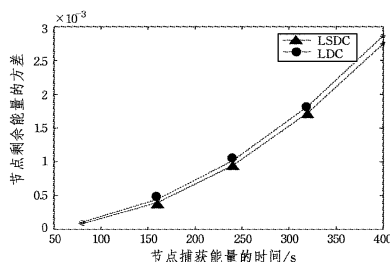


图 9 节点捕获能量的时间与剩余能量的方差

- wide in 2014 [OL]. <http://www.strategyanalytics.com/default.aspx?mod=reportabstractviewer&a0=10539>.
- [2] ENCK W, ONGTANG M, MCDANIEL P. On lightweight mobile phone application certification[C]//Proc. of the 16th ACM Conf. on Computer and Communications Security (CCS 2009). 2009:235-245.
- [3] LIU X, LIU J Q. A Two-layered Permission-based Android Malware Detection Scheme[C]//2014 2nd IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering. 2014:142-148.
- [4] GUO C K, XU J, LIU L, et al. MalDetector-Using Permission Combinations to Evaluate Malicious Features of Android App [C] // Software Engineering and Service Science (ICSESS). 2015:157-160
- [5] ZHAO Z B, OSONO F C C. Trustdroid: Preventing the use of smartphones for information leaking in corporate networks through the used of static analysis taint tracking[C]//7th International Conference on Malicious and Unwanted Software (MALWARE). 2012:135-143
- [6] FRITZ C, ARZT S, RASTHOFER S, et al. Highly Precise Taint Analysis for Android Applications[J]. *Cs. ucdavis. edu*, 2013, 3 (2):151-157.
- [7] KLIEBER W, FLYNN L, BHOSALE A, et al. Android taint flow analysis for app sets [C] // ACM Sigplan International Workshop on the State of the Art in Java Program Analysis. 2014:1-6
- [8] QIN Z Y, YANG Z Y, DI Y X, et al. Detecting repackaged android applications [J]. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2014, 277:1099-1107.
- [9] ZHENG M, SUN M S, LIU C S. Droid Analytics: A Signature Based Analytic System to Collect, Extract, Analyze and Associate Android Malware[C]//proceedings of the 12th IEEE International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Melbourne, VIC, Australia, 2013:163-171.
- [10] ZHOU Y, JIANG X. Dissecting Android Malware: Characterization and Evolution in [C] // Proceedings of 33rd IEEE Symposium on Security and Privacy. 2012:95-109.

(上接第 285 页)

显然, LSDC 算法能更好地提高网络的稳定性, 延长网络的生命周期。

**结束语** 本文提出一种射频能量捕获无线传感器网络分层分步数据收集算法, 对网络进行分层, 并以分步的方式逐层地将节点中的数据全部收集到 Sink 节点, 选择能量状况最佳的节点作为传递节点。本算法从节能和能量消耗均衡两个方面来提高网络的稳定性, 延长网络的生命周期。理论分析和仿真实验都充分证明了这一点。

### 参 考 文 献

- [1] LU X, WANG P, NIYATO D, et al. Wireless Networks With RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2):757-789.
- [2] Riquelme J A, SOTO F, SUARDAZ J, et al. Wireless sensor networks for precision horticulture in southern Spain [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 68(1):25-35.
- [3] NADERI M Y, CHOWDHURY K R, BASAGNI S. Wireless sensor networks with RF energy harvesting: energy models and analysis [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. New York: IEEE Press, 2015:1494-1499.
- [4] FLINT I, LU X, PRIVAULT N, et al. Performance analysis of ambient RF energy harvesting: A stochastic geometry approach [C] // Proc of the Global Communications Conf. New York: IEEE Press, 2014:1448-1452.
- [5] TIAN Y L, CHENG P, HE L, et al. Optimal reader location for collision-free communication in WRSN[C]//Proc of the Global Communications Conf. . New York: IEEE Press, 2014:4418-4423.
- [6] LI T, FAN P Y, CHEN Z C, et al. Optimum transmission policies for energy harvesting sensor networks powered by a mobile control center [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7):6132-6145.
- [7] EROL-KANTARCI M, MOUFTAH H T. Mission-aware placement of RF-based power transmitters in wireless sensor networks [C]//Proc. of the Computers and Communications. New York: IEEE Press, 2012:12-17.
- [8] CHEN X, HE C, JIANG L G. The tradeoff between transmission cost and network lifetime of data gathering tree in wireless sensor networks [C] // Proc. of the Communications. New York: IEEE Press, 2013:1790-1794.
- [9] LI H J, JAGGI N, SIKDAR B. Relay scheduling for cooperative communications in sensor networks with energy harvesting [J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*, 2011, 10(9):2918-2928.
- [10] BAO X C, DING G Q. An routing algorithm for maximizing network performance in energy harvesting wireless sensor network [C]//International Conference on Information Science and Control Engineering. New York: IEEE Press, 2016:1267-1270.
- [11] IMON S K A, KHAN A, DI FRANCESCO M, et al. Energy-Efficient randomized switching for maximizing lifetime in tree-based wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2015, 23(5):1401-1415.
- [12] MARTINEZ G, SHUFANG L, CHI Z. Multi-commodity online maximum lifetime utility routing for energy-harvesting wireless sensor networks [C] // Proc. of the Global Communications Conf. . New York: IEEE Press, 2014:106-111.
- [13] YAO R N, WANG W, SOHRABY K, et al. A weight-optimized source rate optimization approach in energy harvesting wireless sensor networks [C] // IEEE Global Communications Conference. New York: IEEE Press, 2012:1789-1793.
- [14] SEAH W K G, OLDS J P. Data delivery scheme for wireless sensor network powered by RF energy harvesting [C]//Proc. of the Wireless Communications and Networking Conf. . New York: IEEE Press, 2013:1498-1503.
- [15] BALANIS C A. *Antenna Theory: Analysis and Design*[M]. John Wiley & Sons, 2012.
- [16] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. *IEEE Trans. on Wireless Communications*, 2002, 1(4):660-670.