

射频供能无线传感器 网络高效数据收集方案

邱树伟¹, 石海燕², 池凯凯¹, 程 珍¹, 朱艺华¹

(1. 浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江杭州 310023; 2. 绍兴文理学院机械与电气工程学院, 浙江绍兴 312000)

摘 要: 在射频供能无线传感器网络中, 提高网络能效和吞吐率是一个重要的研究问题. 该文统筹考虑信道分配、节点的能量阈值以及 MAC (Medium Access Control) 帧分块重传机制, 提出高效和高吞吐率的数据收集方案; 推导了节点的充电时间、节点传输一个 MAC 帧的平均能耗和平均时延、网络能效和吞吐率, 定义了网络效用函数, 形成了最大化网络效用的优化问题. 通过调整效用系数并求解优化问题, 可以获得使网络能效和吞吐率最大化的最优能量阈值和 MAC 帧最优分块个数. 仿真结果表明, 所提方案的能效和吞吐率高于已有方案.

关键词: 射频供能通信网络; 无线传感器网络; 数据收集; 吞吐率; 能效

中图分类号: TP 393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)09-2238-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.09.027

Energy-Efficient Data Collection Scheme for Radio Frequency Powered Wireless Sensor Network

QIU Shu-wei¹, SHI Hai-yan², CHI Kai-kai¹, CHENG Zhen¹, ZHU Yi-hua¹

(1. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaoxing University, Shaoxing, Zhejiang 312000, China)

Abstract: In radio frequency powered wireless sensor network (RFP-WSN), improving network energy efficiency and throughput is an important topic. A data collection scheme with high energy-efficiency and high throughput is proposed in this paper, which integrates channel allocation, energy threshold and MAC (Medium Access Control) frame block-level retransmission mechanism. In addition, the charging time of nodes, the average energy consumption and the average delay for transmitting a MAC frame, and the energy efficiency and throughput of the network are derived. The network utility function is defined, and the optimization problem (OP) of maximizing network utility is formed. By adjusting the utility coefficient and solving the OP, the optimal energy threshold and the optimal number of blocks per MAC frame can be obtained to maximize the energy efficiency and throughput. The simulation results show that the energy efficiency and throughput of the proposed scheme are higher than that of the existing schemes.

Key words: radio-frequency powered communications network; wireless sensor network; data collection; throughput; energy efficiency

1 引言

在无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 中, 节点由电池供电, 更换电池不便, 能量捕获技术能克服这一不足. 射频供能无线传感器网络 (Radio Frequency Powered Wireless Sensor Network, RFP-WSN) 中的节点

配备了“射频-电能”转换电路, 能够从射频信号中捕获能量.

在传输数据之前, RFP-WSN 节点通过捕获射频能量为电容器充电, 当其剩余能量达到能量阈值之后, 开始传输数据 (放电); 当其剩余能量低于能量下限时, 又开始充电. 于是, 当能量阈值较高时, 节点充电时间较

收稿日期: 2017-08-28; 修回日期: 2017-09-25; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 61432015); 国家自然科学基金面上项目 (No. 61772470, No. 61472367); 浙江省自然科学基金项目 (No. LY15F020029)

长,捕获到的能量较多,持续工作时间也较长;相反,当能量阈值较低时,节点充电时间较短,捕获到的能量较少,持续工作时间也随之变短.总之,能量阈值的设定影响到充电时间和节点持续工作时间,从而对网络吞吐率产生很大的影响.

再者,由于节点捕获到的射频能量比较微弱,节点传输数据时使用的发射功率也相应较小,这会导致通信链路误码率较高,在数据包出现误码时,节点需要采用可靠数据传输机制,如采用自动请求重传(Automatic Repeat-Request, ARQ).可是,重传会带来额外的能耗和时延^[1],降低了网络能效和吞吐率.

可见,要提高能效和吞吐率,需整合节点能量阈值的设定和数据传输机制,此乃本文的主要动机.

在射频能量捕获方面, Kim 等人^[2]设计了一个 98 μW 457.5 MHz 的射频供能收发器,该收发器支持输出功率为 -22 dBm. Parks 等人^[3]从相距 4.2 km 的电视塔所发射的信号中捕获能量,其捕获功率为 62.5 μW.文献^[4]中采用全向天线以 1 W 的功率向低功耗设备发射射频信号,这些设备的能量捕获功率为 mW 级.

在数据传输方面,朱等人^[5]提出了累积无误码数据块(Gathering Error-free Block, GEB)传输方案,在该方案中,接收方能够在一些出错的数据包中累积无误码的数据块以重组数据包. Park 等人^[6]提出基于块确认的数据分片方案(Data Fragmentation Scheme with Block ACK, DFSBA),在 DFSBA 中,节点将数据包分割成小数据包并传输给接收方,在传输完成之后,发送方仅重传那些出错的小数据包. Huang 等人^[7]提出了以接收方为中心的 MAC 协议(Receiver-Centric MAC, RC-MAC),在该协议中,接收方在 ACK(Acknowledgment)中指定下一个发送数据的节点,减少了节点之间因竞争信道所产生的开销.

本文提出了适用于单跳 RFP-WSN 的射频供能数据收集方案(Radio Frequency powered Data Collection Scheme, RF-DCS),该方案整合了信道分配、节点能量阈值设定和数据传输机制,提高了网络能效和吞吐率.

2 系统模型

2.1 RFP-WSN 模型

单跳 RFP-WSN 包含 1 个 sink 和 n 个节点,以 A_i 表示第 i 个节点($i = 1, 2, \dots, n$),它与 sink 之间直接通信. sink 有外接电源,节点从 sink 发射的射频信号中捕获能量.每个节点配备一根天线,捕获能量和收发数据不能同时进行.

2.2 信道模型

以 d_i 表示 A_i 与 sink 之间的距离,以 $\langle A_i, \text{sink} \rangle$ 表示 A_i 与 sink 之间的通信链路.在采用直序扩频(Direct Se-

quence Spread Spectrum, DSSS)和偏移正交相移键控调制方式(Offset Quadrature Phase Shift Keying, O-QPSK)的信道中,链路 $\langle A_i, \text{sink} \rangle$ 的误码率为^[8]:

$$b_i = Q(\sqrt{2\Psi(d_i)B_N/R}) \quad (1)$$

其中, $Q(x) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$, $x \geq 0$, B_N 是噪声带宽, R 是数据速率, $\Psi(d_i)$ 是接收信噪比,有 $\Psi(d_i) = P_i - P_{\text{lost}}(d_0) - 10\eta \log_{10}(d_i/d_0) - P_{\text{th}}$, 其中, P_i 是节点的发送功率, $P_{\text{lost}}(d_0)$ 是单位距离下的功率损耗, $d_0 = 1 \text{ m}$, η 是功率衰减系数, P_{th} 是接收功率阈值.

2.3 能耗模型

本文采用文献^[9]的能耗模型,即相距为 d_i 的收发双方传输一个长度为 l 比特的数据包时,发送方和接收方的能耗分别为 $l(\varepsilon_0 + \varepsilon_1 d_i^\gamma)$ 和 $l\varepsilon_0$, 其中, ε_0 是编码和调制 1 比特时电路的能耗, ε_1 是发送 1 比特时放大器的能耗, γ 是路径衰减系数.

2.4 能量捕获模型

利用 Friis 方程可得 A_i 的能量捕获功率为^[10]:

$$P_i^{(h)} = \mu \frac{G_s G_r}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi d_i} \right)^2 P_s \quad (2)$$

其中, G_s 和 G_r 分别表示发送方和接收方的天线增益, λ 是电磁波波长, P_s 是发送方的发送功率, L_p 是路径功率损耗, μ 是充电效率系数.

3 RF-DCS 方案

3.1 充电阶段

在 sink 为网络中所有节点充电的过程中,节点达到能量阈值的时间不同步.先达到能量阈值的节点不能立刻将数据传输给 sink,因为 sink 正在为尚未达到能量阈值的节点充电.只有当充电阶段结束(即所有节点的能量均已达到能量阈值)之后, sink 才开始收集数据.因此,需要为节点选择一个合适的能量阈值(见 4.3 节).由于充电时间由 sink 根据后述式(4)计算而得,因此,节点无需通知 sink 何时完成充电.

3.2 传输数据阶段

3.2.1 信道分配

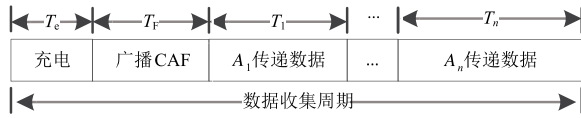
充电结束之后, sink 立即向节点广播信道分配帧(Channel Assigning Frame, CAF).节点在接收到 CAF 之后,按其中的指示信息传输数据. CAF 的结构与 IEEE 802.15.4 标准兼容,如图 1 所示,它由帧头 MHR(MAC Header)、帧身(MAC Payload)以及帧尾 MFR(MAC Footer)组成.帧头和帧尾的含义见文献^[11], MAC Payload 由域“Command Frame Identifier(CFI)”、“Number of Nodes(NoN)”和(NodeID, T_i , N_i)三元数组组成, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, 其中, CFI 表示命令帧识别符, NoN 表示参与分配信道的节点总数, NodeID 表示节点标识, T_i 表示允

许 A_i 持续传输数据的时间(当 T_i 时间用完时, A_i 立即停止发送), N_i 表示 A_i 中 MAC 帧的分块个数. 在 4.3 节将讨论 sink 如何得出参数 T_i 和 N_i .

Bits:56	8	8	8	4	4	...	8	4	4	16
MHR	CFI	NoN	NodeID	T_1	N_1	...	NodeID	T_n	N_n	MFR
MAC Payload										

图1 信道分配帧的结构

综上所述,每个数据收集周期被划分为 $n+2$ 个时段,以 T_e 表示充电时间,以 T_f 表示 sink 广播 CAF 的时间,则 RF-DCS 的数据收集周期如图 2 所示.



3.2.2 分块重传机制

分块重传机制如下: A_i 先将 MAC 帧的有效载荷分割成 N_i 个数据块,每个数据块包含数据 D_j 和块尾部 C_j ($j=1,2,\dots,N_i$). 如图 3 所示,其中, HCS (Header Check Sequence) 表示头部校验序列. 当 sink 接收到来自 A_i 的 MAC 帧之后,先采用 FCS (Frame Check Sequence) 对帧进行校验. 若正确,则向 A_i 回复 ACK. 否则,采用 HCS 对头部进行校验. 若头部错误,则丢弃该帧,等待 A_i 重传原 MAC 帧;若头部正确,则依次采用 C_1, C_2, \dots, C_{N_i} 对各数据块进行校验,若所有数据块均正确,则向 A_i 回复 ACK,若存在数据块错误,则向 A_i 回复 NACK (Negative Acknowledgement) 并在 NACK 中指明哪些数据块出错. A_i 收到 NACK 之后按图 3 生成新 MAC 帧(有效载荷中只包含上次发送出错的数据块)并重传给 sink. 如此反复,直到 sink 正确收到所有数据块或传输次数达到上限为止.

Bits:56	8	variable						16
MHR	HCS	D_1	C_1	...	D_{N_i}	C_{N_i}	MFR	
MAC Payload								

图3 MAC 帧的结构

3.3 RF-DCS 的操作流程

假设 sink 向 A_i 发送的 CAF、ACK 或 NACK 不发生丢包. 下述操作流程中, e_{th} 表示能量阈值.

Sink 操作流程如下:

步骤 1: 根据后述式(21)求解能量阈值 e_{th} 和 N_1, N_2, \dots, N_n 的最优值;根据式(4)计算充电时间 T_e ;根据式(17)计算 T_1, T_2, \dots, T_n 的值;

步骤 2: 向节点发送射频(即供电) T_e 秒;

步骤 3: 按图 1 生成 CAF 并向节点广播;

步骤 4: 按分块重传机制接收和处理来自 A_i 的

MAC 帧($i=1,2,\dots,n$);

步骤 5: 结束.

节点 A_i ($i=1,2,\dots,n$) 操作流程如下:

步骤 1: 将来自 sink 的射频信号转化为电能并为电容器充电,持续时间为 T_e 秒;

步骤 2: 接收来自 sink 的 CAF;

步骤 3: 按图 3 生成含 N_i 个数据块的 MAC 帧;

步骤 4: 按图 2 计算传输数据的起始时刻,采用分块重传机制将数据传输给 sink,持续时间为 T_i 秒;

步骤 5: 结束.

4 RF-DCS 的数学模型

4.1 充电时间和节点的剩余能量

以 e_0 表示节点的初始能量, e 表示节点的能量下限,当节点的剩余能量低于 e 时,节点进入休眠状态并捕获能量, $e_{th} > e \geq e_0$. 以 t_i 表示 A_i 从初始能量 e_0 开始充电直至其剩余能量达到 e_{th} 所持续的时间,利用式(2)可得:

$$t_i = \frac{e_{th} - e_0}{P_i^{(h)}} = 16 \frac{L_p \pi^2 d_i^2}{\mu G_s G_r \lambda^2 P_s} (e_{th} - e_0) \quad (3)$$

由上式可知, t_i 与 d_i^2 成正比,即距离 sink 越远,节点的充电时间越长. 以 d_{max} 表示节点与 sink 之间的最远距离,易知, sink 为网络中所有节点充电的时间

$$T_e = \max \{ t_i \mid i=1,2,\dots,n \} \\ = 16 \frac{L_p \pi^2 d_{max}^2}{\mu G_s G_r \lambda^2 P_s} (e_{th} - e_0) \quad (4)$$

以 \bar{e} 表示电容器容量的上限, e_i 表示 A_i 经历充电时间 T_e 之后的剩余能量,则

$$e_i = \min \{ \bar{e}, e_0 + P_i^{(h)} T_e \} \\ = \min \{ \bar{e}, e_0 + \left(\frac{d_{max}}{d_i} \right)^2 (e_{th} - e_0) \} \quad (5)$$

4.2 节点传输一个 MAC 帧的平均能耗和平均时延

以 L_{MAC} 表示 MAC 帧的长度(单位为 bit), L_{MHR} 、 L_{HCS} 和 L_{FCS} 分别表示头部、头部校验序列以及尾部的长度. 以 l_i 表示 A_i 中每个数据块的长度,可得:

$$l_i = \lfloor (L_{MAC} - L_{MHR} - L_{HCS} - L_{FCS}) / N_i \rfloor \quad (6)$$

根据式(1),可得到 A_i 通过链路 $\langle A_i, \text{sink} \rangle$ 传输一个 MAC 帧至 sink 时,头部传输成功的概率

$$q = (1 - b_i)^{L_{MHR} + L_{HCS}} \quad (7)$$

和每个数据块传输成功的概率

$$p = (1 - b_i)^{l_i} \quad (8)$$

以 S_j 表示 A_i 处于“传输包含 j 个数据块的 MAC 帧”这一状态, $j=1,2,3,\dots,N_i$, 则 A_i 的状态空间为 $\{S_0, S_1, S_2, \dots, S_{N_i}\}$. A_i 每次传输可能会改变其所处的状态. 以 $P_{a,b}$ 表示 A_i 从状态 S_a 转移到状态 S_b 的概率,如式(9)所示. 易知, A_i 从状态 S_j 转移到状态 S_{j+s} ($s \in Z^+$) 是

不可能发生的,因为 A_i 所重传的 MAC 帧长度不可能大于上一次传输的 MAC 帧长度.

$$P_{a,b} = \begin{cases} qC_a^b(1-p)^b p^{(a-b)}, a \neq b; \\ a = 1, 2, \dots, N_i; b = 0, 1, 2, \dots, a-1; \\ (1-q) + q(1-p)^a, a = b; \\ 0, a < b \end{cases} \quad (9)$$

显然, $P_{0,0} = 0$, 这意味着一旦 A_i 进入状态 S_0 , 它的状态就不会改变. 状态 S_0 说明 sink 已正确接收到 MAC 帧, A_i 无需再发送任何数据块了.

以 $P_{a,b}^{(k)}$ 表示 A_i 从状态 S_a 经过 k 次传输之后处于状态 S_b 这个事件的概率, 将 $P_{a,b}^{(k)}$ 称为 k 步状态转移概率, 易知, $P_{a,b}^{(1)} = P_{a,b}$. 事实上, 在第 1 次传输时, A_i 处于状态 S_{N_i} , 在经历 k 次传输之后, A_i 进入状态 S_b ($b \in \{0, 1, \dots, N_i\}$), 即 A_i 在 k 次传输之后, 还可能需要再传输包含 b 个数据块的 MAC 帧. 需要指出的是, A_i 从状态 S_{N_i} 开始经过 k 次传输之后进入状态 S_b 这个事件等价于 A_i 在 $(k-1)$ 次传输之后处于状态 $S_b, S_{b+1}, \dots, S_{N_i}$ 中的任意一个, 然后在第 k 次传输之后进入状态 S_b . 因此, 可得到

$$P_{N_i,b}^{(k)} = \sum_{j=b}^{N_i} P_{N_i,j}^{(k-1)} P_{j,b}, \quad k = 2, 3, \dots, K; b = 0, 1, \dots, N_i \quad (10)$$

其中, K 是 MAC 帧的最大传输次数.

由式(9)和(10)可以得到 A_i 所有的状态转移概率. 以 \mathbf{P} 表示 1 步状态转移矩阵, 易知, 它是一个 $(N_i + 1) \times (N_i + 1)$ 矩阵, 其元素由 $P_{a,b}$ 组成, $P_{a,b}$ 是矩阵中的第 $(a+1)$ 行第 $(b+1)$ 列元素. 即

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ P_{1,0} & P_{1,1} & 0 & \dots & 0 \\ P_{2,0} & P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{N_i,0} & P_{N_i,1} & P_{N_i,2} & \dots & P_{N_i,N_i} \end{pmatrix} \quad (11)$$

因此, 对于 $k \geq 2$ 来说, 从式(10)和(11)可得:

$$(P_{N_i,0}^{(k)}, P_{N_i,1}^{(k)}, \dots, P_{N_i,N_i}^{(k)}) = (P_{N_i,0}^{(k-1)}, P_{N_i,1}^{(k-1)}, \dots, P_{N_i,N_i}^{(k-1)}) \mathbf{P} \quad (12)$$

其中, $P_{N_i,0}^{(k)}$ 就是 A_i 经过 k 次传输之后将包含 N_i 个数据块的 MAC 帧传递给 sink 的成功概率.

不难证明: 定义为 $\mathbf{P}^{(k)} \equiv (P_{a,b}^{(k)})_{(N_i+1) \times (N_i+1)}$ 的 k 步状态转移矩阵是 1 步状态转移矩阵 \mathbf{P} 的 k 次方, 即 $\mathbf{P}^{(k)} = \mathbf{P}^k$. 于是, A_i 所有的状态转移概率 $P_{N_i,b}^{(k)}$ ($b \in \{0, 1, \dots, N_i\}, k = 2, 3, \dots, K$) 都能够在矩阵 \mathbf{P}^k 中找到.

对于一个给定的 MAC 帧, 第 k 次传输发生的前提条件是前 $(k-1)$ 次传输均失败, 而前 $(k-1)$ 次传输均失败的概率是 $1 - \sum_{j=1}^{k-1} P_{N_i,0}^{(j)}$, 因此, A_i 第 k 次传输时平均

发送的比特数为:

$$L_i^{(k)} = \sum_{b=1}^{N_i} (L_{\text{MHR}} + L_{\text{HCS}} + L_{\text{FCS}} + bL_i) \frac{P_{N_i,b}^{(k-1)}}{1 - \sum_{j=1}^{k-1} P_{N_i,0}^{(j)}}, k = 2, 3, \dots, K \quad (13)$$

易知, A_i 在第 1 次传输时所发送的比特数为 $L_i^{(1)} = L_{\text{MHR}} + L_{\text{HCS}} + L_{\text{FCS}} + N_i L_i$.

于是, A_i 传输一个 MAC 帧的期望能耗为:

$$E_i = P_{N_i,0}^{(1)} (L_i^{(1)} \theta_1 + L_A \theta_0) + \sum_{k=2}^K P_{N_i,0}^{(k)} \left[\sum_{j=1}^k L_i^{(j)} \theta_1 + \left(\sum_{j=1}^{k-1} \frac{q - P_{N_i,0}^{(j)}}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} L_N + L_A \right) \theta_0 \right] + \left(1 - \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)} \right) \left[\sum_{j=1}^K L_i^{(j)} \theta_1 + \left(\sum_{j=1}^K \frac{q - P_{N_i,0}^{(j)}}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} L_N \right) \theta_0 \right] \quad (14)$$

其中, L_A 和 L_N 分别表示 ACK 和 NACK 的长度, θ_1 和 θ_0 分别表示节点发送和接收 1 比特的能耗. 式(14)中, 右边第一项表示第 1 次传输成功的概率与所对应能耗的乘积, 第二项表示第 k ($k = 2, 3, \dots, K$) 次才传输成功的概率与所对应能耗的乘积, 第三项表示 K 次传输之后失败的概率与所对应能耗的乘积.

同理, A_i 传输一个 MAC 帧的期望时延为:

$$\tau_i = P_{N_i,0}^{(1)} \frac{L_i^{(1)} + L_A}{R} + \sum_{k=2}^K P_{N_i,0}^{(k)} \left[\frac{\sum_{j=1}^k L_i^{(j)} + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{q - P_{N_i,0}^{(j)}}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} L_N + L_A}{R} + \sum_{j=1}^{k-1} \frac{1-q}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} \sigma_T \right] + \left(1 - \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)} \right) \left[\frac{\sum_{j=1}^K L_i^{(j)} + \sum_{j=1}^K \frac{q - P_{N_i,0}^{(j)}}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} L_N}{R} + \sum_{j=1}^K \frac{1-q}{1 - P_{N_i,0}^{(j)}} \sigma_T \right] \quad (15)$$

其中, σ_T 表示节点等待重传的时间.

4.3 网络吞吐率、能效和效用

以 L_{CAF} 表示 CAF 的长度, 以 Q_i 表示 A_i 向 sink 传输数据包的平均个数, 则

$$Q_i = (e_i - e - L_{\text{CAF}} \theta_0) / E_i \quad (16)$$

式中, 分子表示 A_i 经历充电时间 T_e 以及接收 CAF 之后的可用能量. 由此, 可得到 A_i 在传输数据阶段中的平均传输时间

$$T_i = Q_i \tau_i \quad (17)$$

由于 A_i 的 MAC 帧中每个数据块的有效数据量为

$(l_i - L_C)$ 比特, L_C 表示块尾部的长度. 根据图 2 并结合式(4)、(15)和(17), 可得到网络吞吐率

$$f(e_{th}, N_i) = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i N_i (l_i - L_C) \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)}}{T_e + \frac{L_{CAF}}{R} + \sum_{i=1}^n T_i}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n Q_i N_i (l_i - L_C) \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)}}{\frac{16L_b \pi^2 d_{max}^2}{\mu G_s G_r \lambda^2 P_s} (e_{th} - e_0) + \frac{L_{CAF}}{R} + \sum_{i=1}^n Q_i \tau_i}$$
(18)

此外, 根据式(5)、(14)和(16), 可得到网络能效

$$g(e_{th}, N_i) = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i N_i (l_i - L_C) \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)}}{\sum_{i=1}^n (L_{CAF} \theta_0 + Q_i E_i)}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n Q_i N_i (l_i - L_C) \sum_{k=1}^K P_{N_i,0}^{(k)}}{\sum_{i=1}^n \min \{ \bar{e}, e_0 + (\frac{d_{max}}{d_i})^2 (e_{th} - e_0) \} - n \underline{e}}$$
(19)

进一步, 定义网络效用函数为网络能效与网络吞吐率的加权平均值, 其表达式如下:

$$h(e_{th}, N_i) = \alpha \times f(e_{th}, N_i) + (1 - \alpha) \times g(e_{th}, N_i), \alpha \in [0, 1]$$
(20)

其中, α 是效用系数. 通过调整 α 的取值可以使该效用函数适用于不同的应用需求.

从式(20)可知, 网络效用与 e_{th} 和 N_i 有关, 可以通过优化 e_{th} 和 N_i 的取值使网络效用最大化. 于是, 可得到以下优化问题:

$$\begin{aligned} & \max h(e_{th}, N_i) \\ & \text{w. r. t. } e_{th}, N_i \\ & \text{s. t. } \begin{cases} e_{th} \in [e, \bar{e}]; \\ N_i \in \{1, 2, \dots, N_{max}\}; \\ i \in \{1, 2, \dots, n\}. \end{cases} \end{aligned}$$
(21)

式中, e 和 \bar{e} 是给定的常数, N_{max} 是 N_i 的取值上界. 为了便于实现 RF-DCS, 可设置每个节点的 MAC 帧分块个数相同 (即 $N_1 = N_2 = \dots = N_n$). 以 M 表示 e_{th} 可能取值的元素个数, 易知, 求解式(21)的时间复杂度为 $O(M N_{max})$. 从下面第 5 节中所给出的 N_i 和 e_{th} 的取值范围可知, 式(21)只有 $5 \times 11 = 55$ 个可行解, 于是, sink 通过穷举搜索即可得到 e_{th} 和 N_i 的最优值.

5 仿真与性能分析

为了观察 RF-DCS 的性能, 采用 MATLAB 进行仿真, 所用参数值如表 1 所示.

表 1 参数设置

参数名	值	参数名	值
P_T	1 dBm	μ	0.3
P_{th}	-98 dBm	P_s	30 W
$P_{loss}(d_0)$	65 dB	\bar{e}	0 J
η	2	e_0	0 J
B_N	30 kHz	\underline{e}	0.1 J
R	50 kbps	L_{MHR}	7 B
ε_0	50 nJ	L_{HCS}	1 B
ε_1	10 pJ/bit/m ²	L_{MAC}	100 B
γ	2	L_{FCS}	2 B
λ	0.33 m	L_A	5 B
G_s	8 dBi	L_N	5 B
G_r	2 dBi	L_{CAF}	100 B
L_p	3 dB	L_C	1 B
K	4	σ_T	33960 μ s

在式(21)中, 为了保证传输效率, 令 MAC 帧中的数据块长度不小于 L_{MHR} 与 L_{HCS} 之和. 根据表 1 中的参数值可计算得出 $N_{max} = 11$, 即 $N_i \in \{1, 2, \dots, 11\}$. 此外, 取 $e_{th} \in \{0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1\}$ J.

取节点的通信半径分别 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m. 对于一个给定的通信半径, 每个节点与 sink 之间的距离在通信半径之内随机选取. 取节点的个数 n 分别为 5, 10, 15, 20, 25. 将仿真重复做 1000 次, 再对结果取平均值.

我们比较了 RF-DCS 与 GEB^[5]、DFSBA^[6] 和 RC-MAC^[7] 等数据传输方案的能效和吞吐率. 仿真结果如图 4 ~ 图 7 所示, 其中, GEB、DFSBA 和 RC-MAC 等方案所采用的能量阈值 e_{th} 在各子图有不同的取值. 图标题中的 RadioCoverage 表示通信半径.

从图 4 和图 6 可以看出, 在节点个数不变 ($n = 15$) 的情况下, 随着通信半径的增加, 网络能效和吞吐率逐渐下降. 这是因为当通信半径增加时, 根据式(1), 链路 $\langle A_i, \text{sink} \rangle$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 的误码率会随之增加, 导致 MAC 帧传输的成功率下降, 从而产生更多的 MAC 帧重传能耗和时延, 因此, 能效和吞吐率均呈现下降的趋势.

此外, 从图 5 中可以看出, 在通信半径不变 (RadioCoverage = 20) 的情况下, 随着节点个数的增加, 网络能效没有明显变化, 这是因为网络能效所反映的是网络中平均每焦耳能量能够成功传输的有效数据量, 当节点个数增加时, sink 所能接收到的有效数据总量增加了, 但是, 网络的总能耗也随之同步增加, 因此, 网络能效基本不变. 从图 7 可以看出, 随着节点个数的增加, 网络吞吐率也随着增加. 这是因为节点个数越多, sink 所能接收到的总有效数据量就越多, 而数据收集时间 (含充电时间) 的增加并不明显, 因此, 吞吐率随节点个数的增加而增加.

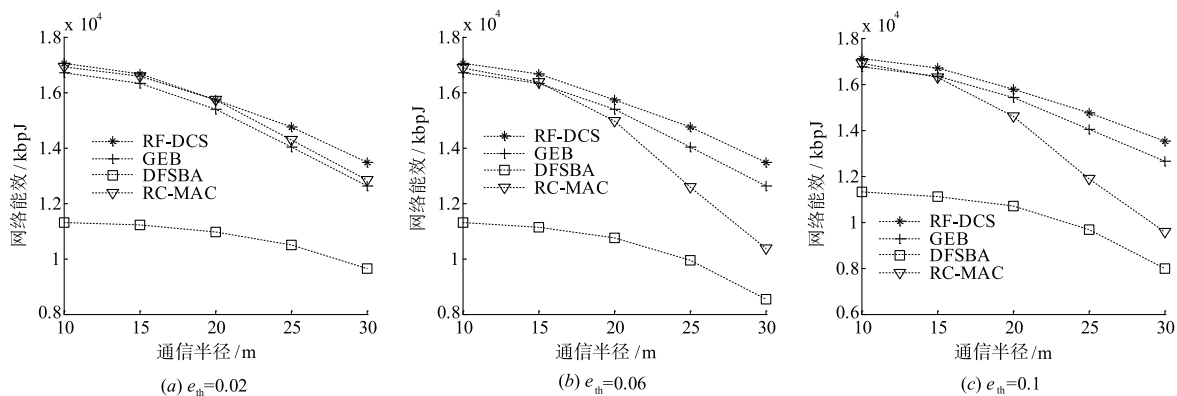


图4 能效性能评估($\alpha=0, n=15$)

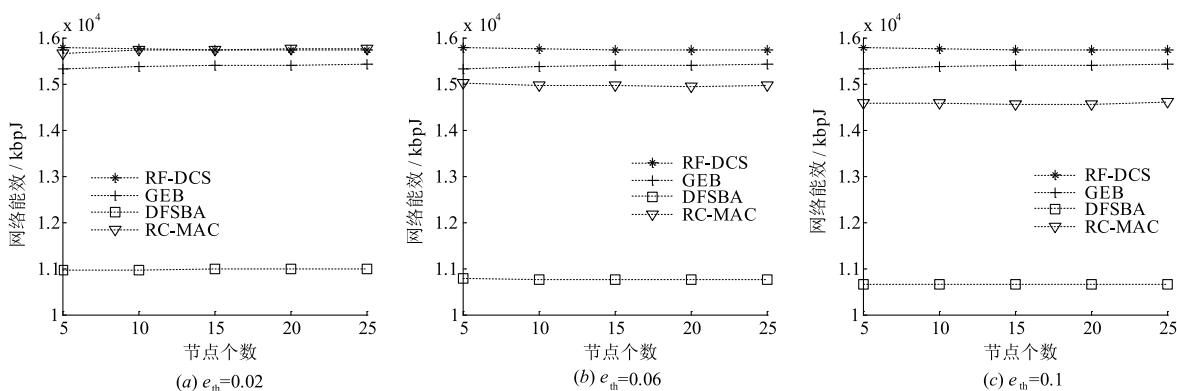


图5 能效性能评估($\alpha=0, \text{RadioCoverage}=20$)

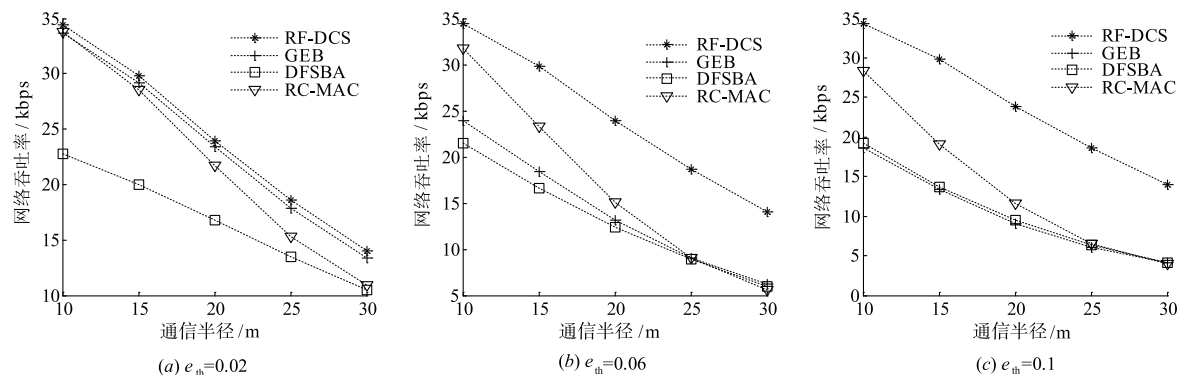


图6 吞吐量性能评估($\alpha=1, n=15$)

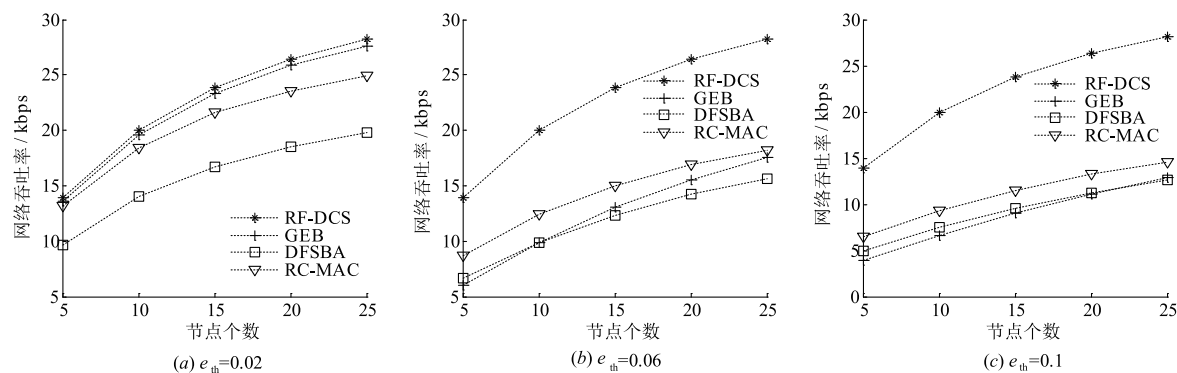


图7 吞吐量性能评估($\alpha=1, \text{RadioCoverage}=20$)

从图 4 ~ 图 7 可知,RF-DCS 优于其他方案,主要原因是 RF-DCS 不仅对与充电时间紧密相关的能量阈值

进行优化,同时也对与重传数据的能耗和时延有关的 MAC 帧分块个数进行优化.前者有助于合理控制充电

时间,后者有助于降低重传数据所产生的能耗和时延,从而有利于提升网络的能效和吞吐率.

6 结语

对物理世界的的数据收集^[12]是物联网得以有效运行的基础条件,设计低能耗^[13]且可靠的数据收集方案是极为重要的.本文提出一种面向单跳 RFP-WSN 的收集方案,该方案通过 sink 的 CAF 实现对信道的分配;采用分块重传机制降低由 MAC 帧重传所引起的能耗和时延;对能量阈值和 MAC 帧分块个数进行联合优化提升了网络能效和吞吐率.

参考文献

- [1] 徐骥,朱艺华,田贤忠,等.无线传感器网络中利用随机网络编码的低能耗可靠机会路由[J].电子学报,2016,44(8):1799-1805.
XU Ji, ZHU Yi-hua, TIAN Xian-zhong, et al. Energy-efficient reliable opportunistic routing applying random network coding for wireless sensor network [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(8): 1799-1805. (in Chinese)
- [2] Young-Joon Kim, Hansraj S Bhamra, Jithin Joseph, et al. An ultra-low-power RF energy-harvesting transceiver for multiple-node sensor application [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2015, 62(11): 1028-1032.
- [3] Aaron N Parks, Joshua R Smith. Sifting through the airwaves: efficient and scalable multiband RF harvesting [A]. Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID) [C]. Orlando: IEEE, 2014. 74-81.
- [4] Suzhi Bi, Rui Zhang. Placement optimization of energy and information access points in wireless powered communication networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(3): 2351-2364.
- [5] Yi-hua Zhu, Hui Xu, Kai-kai Chi, et al. Accumulating error-free frame blocks to improve throughput for IEEE 802.11-based WLAN [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(2): 743-752.
- [6] Park Y T, Sthapit P, Lee D H, et al. Data fragmentation scheme with block ACK in wireless sensor networks [A]. Proceedings of the 2011 Fifth FTRA International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering [C]. Loutraki: IEEE, 2011. 79-83.
- [7] P Huang, C Wang, L Xiao. RC-MAC: A receiver-centric MAC protocol for event-driven wireless sensor networks [J]. IEEE Trans Computers, 2015, 64(4): 1149-1161.
- [8] M A Landolsi, W E Stark. On the accuracy of Gaussian approximations in the error analysis of DS-CDMA with OQPSK modulation [J]. IEEE Transactions on Communi-
cations, 2002, 50(12): 2064-2071.
- [9] W B Heinzelman, A P Chandrakasan, H Balakrishnan. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [10] Yanjun Li, Lingkun Fu, Min Chen, et al. RF-based charger placement for duty cycle guarantee in battery-free sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(10): 1802-1805.
- [11] IEEE 802.15.4 Standard for Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [S]. 2011.
- [12] Luo B, Sun Z. Enabling end-to-end communication between wireless sensor networks and the internet based on 6LoWPAN [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(3): 633-638.
- [13] 陈珍萍,黄友锐,唐超礼,等.物联网感知层低能耗时间同步方法研究[J].电子学报,2014,44(1):193-199.
CHEN Zhen-ping, HUANG You-rui, TANG Chao-li, et al. Research on low energy consumption time synchronization method for internet of things' perception layer [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 44(1): 193-199. (in Chinese)

作者简介



邱树伟 男,1979 年生于广东潮州,博士生,研究方向为无源感知网络.
E-mail: city-qsw@163.com



石海燕 女,1977 年出生于诸暨,讲师,硕士生.研究方向为无线网络协议、算法、性能分析与优化等.
E-mail: cssh@usx.edu.cn

池凯凯 男,1980 年生于浙江永康,博士,教授,研究方向为物联网、5G 网络等.

E-mail: kkchi@zjut.edu.cn

程珍 女,1981 年出生于湖北蕲春,博士,副教授,研究方向为纳米网络.

E-mail: chengzhen@zjut.edu.cn

朱艺华(通信作者) 男,1961 年生于浙江玉环,博士,教授,研究方向为无线网络、物联网、无源感知网络和无线局域网等.

E-mail: yhzhu@zjut.edu.cn