

引用格式:靳晖,柴晶,赵菊敏,等. 无源感知系统中的能量管理和通信优化研究[J]. 微电子学与计算机,2019,36(12):42-47.
[JIN H, CHAI J, ZHAO J M, et al. The research on energy management and communication optimization in passive sensing system[J]. Microelectroncs & Computer, 2019, 36(12): 42-47.]

无源感知系统中的能量管理和通信优化研究

靳 晖¹, 柴 晶¹, 赵菊敏¹, 李灯熬²

(1 太原理工大学 信息与计算机学院, 山西 晋中 030600;

2 太原理工大学 大数据学院, 山西 晋中 030600)

摘 要: 可计算无线射频识别(CRFID)标签与阅读器通信过程中,常因能量不足以执行完所有任务,导致任务错过截止期,大量数据传输失败,造成时间和能量的浪费. 针对这一问题,建立了 CRFID 标签的能量接收和消耗模型,提出可预测能量的任务调度算法 PE-EDF. 该算法将能量管理和任务调度相结合,大大减少了数据传输失败的概率,可靠性至少提高 55%. 又针对阅读器和多个 CRFID 通信过程中存在的冲突问题,通过求解阅读器最佳停留位置,提出无碰撞通信算法 CFC,使得总通信时间减少 25%,优化二者之间通信碰撞.

关键词: 可计算无线射频识别; 能量管理; 能量预测; 任务调度; 通信碰撞

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2019)12—0042—06

The research on energy management and communication optimization in passive sensing system

JIN Hui¹, CHAI Jing¹, ZHAO Ju-min¹, LI Deng-ao²

(1 College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi, 030600, China;

2 College of Data Science, Taiyuan University of Technology, Jinzhong, Shanxi, 030600, China)

Abstract: In the process of communication between CRFID and reader, if the energy is insufficient, the task may miss the deadline, and large amounts of data transmission fails, resulting in waste of time and energy. In response to this problem, this paper established the energy receiving and consumption model of WISP tags, and then proposed a predictive energy task scheduling algorithm called PE-EDF. The algorithm combined energy management with task scheduling, greatly reducing the probability of data transmission failure, and improving reliability by at least 55%. Further, we considered the conflicts between a reader and multiple CRFIDs, and proposed corresponding Collision-Free Communication algorithm called CFC based on optimize the stop position of the reader. The total communication time is reduced by 25%, which greatly optimizes communication conflict.

Key words: CRFID; energy management; energy prediction; task scheduling; communication conflict

1 引言

传统的 RFID 自身无法编程加密,数据缺乏安全性. WSN 节点自身携带电池,一旦电池能量耗

尽,整个网络将面临瘫痪. 二者的不足衍生了无线识别和感知平台 WISP (Wireless Identification and Sensing Platform). WISP^[1] 是一种可编程的,无源感知和计算平台,利用能量捕获模块从环境中获能.

收稿日期: 2019—03—21; 修回日期: 2019—05—08

基金项目: 国家自然科学基金(61572346,61772358,61572347); 山西省国际科技合作项目(201603D421012)

然而,WISP 标签也受到能量的约束,首先,WISP 获取环境能量效率有限;其次,WISP 使用 $10 \mu\text{F}$ 的电容存储能量,而电容供电周期短、功率低、容量小,分配给标签的任务若因能量问题无法在一个工作周期内完成,将导致任务执行中断而影响整个系统运行。因此如何对 WISP 标签能量进行管理极为重要。

Jeremy Gummesson 等人^[2]提出 Blink 协议,以最大限度地增大通信吞吐量,从而提高能量利用率。Michael Buettner 等人^[3]采用软件轮询方法对电容进行采样,当达到所需电压时传输数据。在 WSN 方面有诸多工作,但更多应用于传统的无线传感网络节点。

上述工作并未细致考虑 WISP 能量模型,且对任务调度问题关注较少。本文将能量管理和任务调度综合考虑,对能量模型进行细致优化并对 WISP 可获取的能量进行预测,提出更贴合 WISP 的可预测任务调度算法;最后,提出无碰撞通信算法,解决阅读器位置带来的 NP-hard 问题,从而优化多标签通信碰撞。

2 能量模型优化

2.1 能量接收模型

WISP 借助自身的偶极子天线,从阅读器发出的无线电波捕获能量,存储于电容器中。当电磁波在空中传播时,理想的传播模型为弗里斯公式^[4],可表示为:

$$P_r = G_s G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 P_0 \quad (1)$$

式中, d 为阅读器和标签的距离; P_r 为接收功率; P_0 为发射功率; G_s 为源天线增益; G_r 为接收天线增益; λ 为入射波波长。然而阅读器和 WISP 标签通信的过程中,弗里斯公式存在偏差。根据实际应用环境不同,本文引入三个参数: β 、 L_p 、 η ,对弗里斯公式进行修正。其中 β 为传输参数,表征电磁波在短距离传输时存在的尺度衰减、多径效应; L_p 为极化损失,代表阅读器发射功率到达 WISP 标签的偶极子天线的功率损失; η 为整流器效率,表示 WISP 射频前端进行整流升压时电路的能耗。因此,可得 WISP 充电遵循的模型如下:

$$P_r = \frac{G_s G_r \eta}{L_p} \left(\frac{\lambda}{4\pi(d+\beta)} \right)^2 P_0 \quad (2)$$

式中,发射功率 P_0 为 30 dBm,对应波长 λ 为 0.33 m。发射天线增益 G_s 为 6 dBi;接收天线增益 G_r 为 2 dBi (偶极天线的标准增益数字); β 、 L_p 因具体环境而变化,可通过实际测量得出。利用修正后的能量接收模

型即可得出不同距离下 WISP 所接收到的功率值。

2.2 能量消耗模型

WISP 通过反向散射和阅读器进行通信,同时标签集成了微处理器 MSP430 和各种传感器,可以进行感知计算等功能,本节通过公式推导和实验分别对通信、感知和计算进行分析建模,更为细致地量化 WISP 能量消耗。

2.2.1 标签通信分析与建模

WISP 通过改变晶体管通断改变自身天线阻抗,可以产生不同的反射波强度,借助反向散射技术和阅读器进行通信。当硬件电路中的开关置 1,标签阻抗失配,多数入射波被反射,反射系数 Γ_1 为:

$$\Gamma_1 = \frac{Z_a^* - Z_{L1}}{Z_a + Z_{L1}} \quad (3)$$

式中, Z_a 为天线的阻抗; Z_{L1} 为导通负载的阻抗。雷达截面 σ_1 可以表示为:

$$\sigma_1 = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_s G_r \Gamma_1 \quad (4)$$

因此,WISP 反射功率 P_{r1} 表示为:

$$P_{r1} = \frac{P_0 G_s G_r \lambda^2 \sigma_1}{(4\pi)^3 d^4} \quad (5)$$

2.2.2 标签计算分析与建模

WISP 标签通过 MSP430 进行基本计算,在固定的时钟频率下,随着计算次数不同,计算能耗也不同。实验中,让标签进行 1 000 次基本计算,可以得到计算次数和计算功率 P_c 的关系如下:

$$P_c = 0.000213x + 0.05621 \quad (6)$$

2.2.3 标签感知分析与建模

WISP 标签的传感器模块在 MSP430 控制下感知外界信息。在实验中,让 WISP 标签进行循环感知,可以得到感知次数和感知功率 P_s 的关系如下:

$$P_s = 0.005483x + 0.02548 \quad (7)$$

此外,WISP 微处理器 MSP430 还可以连接其他低功耗传感器,须满足如下关系式:

$$V_{dl} (I_s + I_w) T \geq \frac{1}{2} C (V_{reg}^2 - V_{dl}^2) \quad (8)$$

式中,传感器和 WISP 的电流消耗分别为 I_s 和 I_w ; C 是存储电容器的电容; T 是有效操作的总时间; V_{reg} 为整流电压; V_{dl} 为所需工作电压。

3 能量管理和通信优化

3.1 能量预测

能量收集率对吞吐量具有显著影响,较高的收获率可以在充电周期内收获更多的能量用于数据传输。在能源管理中,最重要的问题是下一个时刻的能

量预测,具体过程用以下四个步骤进行描述:

(1) 根据修正后的能量接收模型,将 P_0 、 G_s 、 G_r 、 λ 代入公式(2),通过实际测量,得到不同距离下 WISP 的接收功率 P_r ,可计算得出 L_p 、 β 和 η 的值,便可得到接收功率 P_r 和距离 d 的关系;

(2) 在阅读器和标签之间距离固定的情况下,测量电容器两端的电压变化. 电容器的充电过程遵循方程式:

$$U(t) = U(0) + (U_{\max} - U(0))(1 - e^{-t/\tau}) \quad (9)$$

式中, t 是充电时间; $U(0)$ 为电容器初始电压; $\tau = RC$ 表示 WISP 电路参数; $U_{\max}$ 是电容器充电可达的最大电压. 通过实验可求得最大电压 $U_{\max}$.

(3) 建立能量预测模型,随着阅读器和 WISP 的距离 d 的变化, $U_{\max}$ 和 τ 的值随之变化, WISP 的能量收集率 $H(t_s)$, 如下所示:

$$H(t_s) = C \times U_{\max}^2 \times \tau^{-1} (1 - e^{-t_s/\tau}) e^{-t_s/\tau} \quad (10)$$

(4) 在固定的能量收集率下,对 $H(t_s)$ 积分即可预测下一时间段 t_s 内 WISP 可捕获的能量 $E^h(t)$, 求解公式如下所示:

$$E^h(t) = \int_0^t H(t_s) d(t_s) = \int_0^t C \times U_{\max}^2 \times \tau^{-1} (1 - e^{-t_s/\tau}) e^{-t_s/\tau} d(t_s) \quad (11)$$

3.2 任务调度算法

实时系统中先进先出 FIFO (First-In-First-Out) 和最早截止时间优先 EDF (Earliest Dead Line First) 调度算法都有广泛的应用^[5]. 然而,两个算法都没有涉及到任务执行能量,不适用于可充电的 WISP 标签. 考虑到 WISP 与阅读器具体交互过程,在授权一个任务执行之前, WISP 能量不足会导致任务执行中断,数据传输失败. 本文提出可预测能量任务调度算法 PE-EDF (Predictable Energy early Deadline First), 保证任务不会因能量不足执行中断,避免时间和能量的浪费.

3.2.1 算法模型

(1) 任务模型

首先考虑一组任务集,各个任务之间相互独立, $\Psi = \{T_i \mid T_i = (A_i, C_i, D_i, E_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 每个任务都包含四个参数: A_i 表示任务到达时间; C_i 表示任务执行时间; D_i 表示任务最晚截止时间; E_i 表示任务最坏情况下执行所消耗的能量.

(2) 能量模型

使用修正后弗里斯公式作为 WISP 标签的充电模型,电容器储能范围为 $E_{\min}$ 到 $E_{\max}$, 当前时刻 t 的

能量用 $E(t)$ 表示, $E(t)$ 的大小可由公式(2)求得. 在时间 $[m, n]$ 之间可获取能量 $E_s(m, n)$ 可由能量预测模型求出,表示为 $\int_m^n H(t) dt$, 其中 $H(t)$ 表示能量获取率.

3.2.2 算法描述

首先定义一个基本概念: 盈余能量, 表示 WISP 执行给定时间段 $[m, n]$ 的任务可消耗的最大能量, 同时仍然满足时间段内所有任务的执行时间和能量需求. 结合上述的能量模型, $[m, n]$ 时间段内 WISP 盈余能量表示为:

$$E_{m,n} = E(t) + \int_m^n H(t) dt - \sum_m^n E_i \quad (12)$$

PE-EDF 算法不仅考虑当前时刻的能量值, 进一步考虑执行任务的能耗以及任务执行过程中可获取的能量. 算法执行过程用三个步骤描述:

①在任务等待状态, 首先进行负载判断, 若能量未过载, 开始对选定任务集 T 进行调度; 执行步骤③; 否则执行步骤②;

②此时判断盈余能量不足以执行就绪状态的任务, 盈余能量为负, 将 WISP 休眠相应时间进行充电, 直至满足能量执行条件;

③选择截止期限最靠前的任务进入就绪状态, 执行步骤④;

④此时盈余能量非负, 可以执行任务, 按照 EDF 顺序进行执行;

⑤若有随机性任务突然到来, 调度器根据上述步骤重新进行调度.

3.3 无碰撞通信算法

在 WRSN 中, WISP 标签从 RFID 阅读器发射的电磁波中捕获能量. 从上述建立的能量模型中易知, 若标签和阅读器进行一对一通信, 因为多径效应以及阅读器距离的限制, 标签可获取的最大能量有限, 可能因为任务过载无法执行导致任务失败. 因此, 可用多个 WISP 标签协同完成任务调度, 进而解决任务执行失败的问题. 然而区域内部署大量标签之后, 根据 ALOHA 协议^[6] 每个标签在其电压充电到工作级别后和阅读器进行数据传输, 多个标签同时和阅读器进行通信会造成大量的通信碰撞, 冲突标签的数据无法正确被阅读器解码.

为了解决这一问题, 可以通过优化阅读器停留位置来消除 WISP 标签存在的通信碰撞. 阅读器位置问题可以规约为 TSP (Traveling Salesman Problem) 问题, TSP 属于经典的 NP-hard 问题, 无法在

有限的时间内直接解决,本文提出无碰撞通信算法 CFC(Collision-free communication),采用数学几何方法来寻找阅读器最佳停留位置,降低 TSP 问题带来的无穷时间复杂度,同时解决多标签通信碰撞,减少总通信时间。

3.3.1 算法模型

假设 N 个 WISP 标签部署在二维平面上,阅读器在平面上移动对标签进行充电. 通过几何关系公式可以证明充电源的最佳停留位置一定在包含范围内标签的最小外接圆中. 单个标签 W_i 达到固定电压阈值的充电能量表示为 E_i ,相应的充电时间表示为 T_i . 从上述充电模型中可知标签 W_i 充电时间可以表示为:

$$T_i = \frac{E_i (d_i + \beta)^2}{\delta} \quad (13)$$

式中, δ 是由 $P_0, \lambda, G_s, G_r, L_p$ 和 η 所约束的常数参数. 因此,对于任意两个标签 W_i 和 W_j , W_j 的充电时间大于 W_i 并且它们之间的差异小于阈值 θ , W_i 在这个帧时隙内和阅读器通信的同时, W_j 也将和阅读器进行数据交互,两个标签必定会发生通信碰撞. 因此当且仅当满足以下条件时,两个标签不会发生通信碰撞:

$$|T_i - T_j| > \theta \quad (14)$$

为了求解标签碰撞区域,首先用两个标签说明. W_1 和 W_2 坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) , 距离 $D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, 阅读器 R 的位置坐标用 (x_R, y_R) 表示. 那么 W_1 和 W_2 的碰撞区域必须满足下式:

$$\left| \frac{(\sqrt{(x_R - x_1)^2 + (y_R - y_1)^2} + \beta)^2}{(\sqrt{(x_R - x_2)^2 + (y_R - y_2)^2} + \beta)^2} - 1 \right| < \frac{\theta \delta}{E} \quad (15)$$

经过计算和推导,生成的标签对碰撞区域如图 1 所示,用渐近线定义的区域替换精确的碰撞区域,这样近似的碰撞区域是一个宽度为 $\frac{\theta \delta}{ED}$ 的垂直二分区域,且区域外的任何位置对于两标签都是无冲突的。

3.3.2 算法描述

无碰撞通信算法的目标是最小化总通信时间,等价于最小化和阅读器相对距离最大的 WISP 标签距离. 最小化最大充电距离用数学模型可表述如下:

$$\min_R \max_i d(R_i, W_i) \quad (16)$$

$$d(R_i, W_i) = \sqrt{(x_R - x_i)^2 + (y_R - y_i)^2} \quad (17)$$

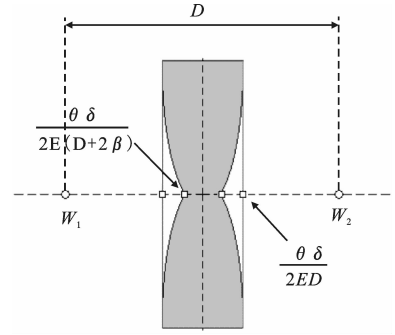


图 1 标签碰撞区域模型

此模型可以规约为典型的 NP-hard 问题,它无法在多项式算法的时间内得到结果,是具有无限多个候选位置的非线性目标函数。

3.3.3 算法分析

本文采用一种最优的几何方案,它可以大大降低搜索位置空间带来的多项式算法的时间复杂度,并找到阅读器最佳停留位置。

① 减少阅读器候选位置

根据上述建立的标签碰撞区域模型,用 $P = \{P_{i,j}, P_{j,i}, i < j, \forall i, j\}$ 表示所有冲突区域边界的集合, $Q = \{Q_{i,j}, Q_{j,i}, i < j, \forall i, j\}$ 表示所有无碰撞区域的集合. 对于 N 个标签来说,每组集合的元素数量大小为 $N^2 - N$. 如果阅读器 R 停留在由 k 个 WISP 标签构成的无碰撞区域 Q_k 之内,那么阅读器范围内的标签通信将不会发生冲突。

通过 Q 中每个标签对无碰撞区域的交点可以获得所有无碰撞区域. 因此,可以定义映射函数:

$$\varphi(W_k) \triangleq \operatorname{argmax} d(W_i, Q_k) \quad (18)$$

$d(W_i, Q_k)$ 表示 WISP 标签到无碰撞区域的相对距离, $\varphi(W_k)$ 返回距离阅读器位置 $R \in Q_k$ 最近的标签 W_i , 那么 $d(R_K, \varphi(W_K))$ 可表示阅读器在无碰撞区域 C 中的位置 R_k 到所有标签的最大距离. 结合 CFC 算法思想,阅读器最佳停留位置 $R^\#$ 即为最小化距离阅读器最远标签的位置,位置函数表示如下:

$$R^\# \triangleq \operatorname{argmin} d(R_K, \varphi(W_K)) \quad (19)$$

因此,可以将阅读器无限个停留位置缩小到有限个无碰撞区域之内。

② 求解最佳停留位置

借助如上的映射函数 $\varphi(W_k)$ 和位置函数 $R^\#$, 可以得到引理 1 和引理 2.

引理 1: 对给定范围内 k 个标签构成无碰撞区域 Q_k 的任一位置, $\varphi(W_k)$ 值的大小始终保持相同。

对引理 1 进行推广,只要阅读器位于任意一个无碰撞区域且只在此无碰撞区域内移动,那么构成

这个无碰撞区域的 k 个标签相对距离保持不变,即可进一步缩小阅读器停留区域,得出引理 2.

引理 2: 阅读器的最佳停留位置 $R^\#$ 必然位于无碰撞区域的边界上.

用 $B = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ 表示无碰撞区域的顶点集合, $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 表示标签对的连线与无碰撞区域的交点集合. 阅读器位置函数等价于:

$$R^\# \triangleq \min \{B^\#, C^\#\} \quad (20)$$

$$B^\# \triangleq \arg \min_{B_i} \max d(W_i, B_i) \quad (21)$$

$$C^\# \triangleq \arg \min_{C_i} \max d(W_i, C_i) \quad (22)$$

因此,不必再获得精确的无碰撞区域集,只需比较有限个数量的顶点和交点集,即可获得最佳阅读器停止位置,进一步缩小了计算复杂度.

3.3.4 算法应用

接下来通过实例说明 CFC 算法. 对于图 2 所示的三个 WISP 节点 W_1, W_2 和 W_3 , 首先建立所有无碰撞区域的边界线集, 共有六条线, 边界线为节点对的垂直平分线, 由三角形定理可知, 边界线相交于一点. 然后对于每个顶点 B_i , 可以找到与 B_i 距离最大的节点 W_i , 表示为 $d(B_i, \varphi(B_i))$. 通过比较所有 $d(B_i, \varphi(B_i))$ 找出最小值, 即为顶点合集的最小值 $B^\#$, 同理可以找到具有最佳距离 $d(C_i, \varphi(C_i))$ 的最佳交点 $C^\#$. 比较顶点和交点的最小值即为阅读器最佳停止位置.

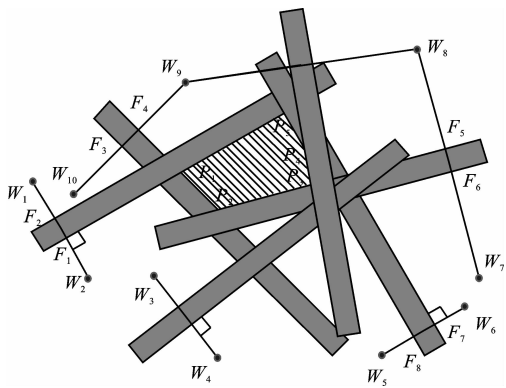


图2 阅读器最佳位置

4 实验分析

4.1 PE-EDF 算法实验分析

将 PE-EDF 算法的性能分别从任务执行时间和可靠性上与 FIFO、EDF 算法进行比较.

(1) 任务执行时间: 阅读器和 WISP 距离固定, 执行不同的任务数量, 比较三个算法任务执行时间. 从图 3 可以看出, 任务数量成倍增加时, PE-EDF 算

法执行时间明显优于二者, 较 FIFO 减少 71%, 较 EDF 减少 55%. 这是因为两个算法存在多次能量不足导致任务执行中断的情况, 再次重新执行任务必然会导致总体执行时间的增加.

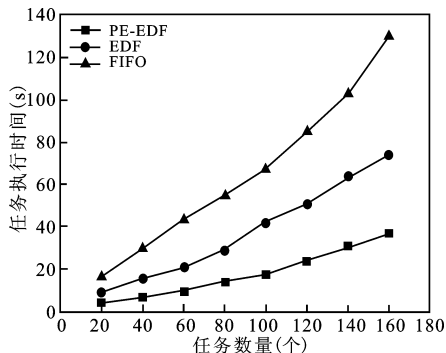


图3 任务执行时间对比

(2) 可靠性: 阅读器和 WISP 相对距离从 1 m 增加到 4 m, 执行相同的任务数量, 对比三种算法执行任务的可靠性. 从图 4 可以看出随着距离的增大, FIFO 和 EDF 算法可靠性逐渐降低, PE-EDF 算法并未出现大幅度的降低, 且趋于稳定. 相对其他算法, 可靠性高, 鲁棒性好.

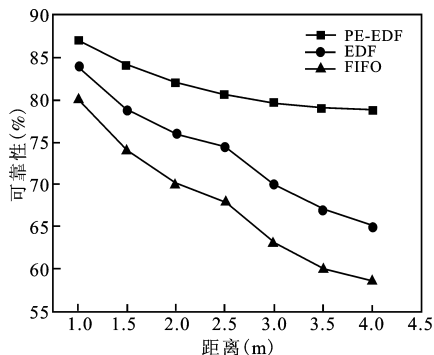


图4 可靠性对比

4.2 CFC 无碰撞通信算法

将 CFC 算法与基于动态帧时隙算法 DFSA 和动态二进制树搜索算法 DBTS 进行比较. 对于 DBTS 和 DFSA 算法, 阅读器试图覆盖每个停留位置的最大标签数, 因此每次停留位置为阅读器最大范围对应的最大包围圈的中心. CFC 算法中, 阅读器停留在最佳充电位置, 减少标签通信碰撞.

(1) 通信阈值 θ : 让三组标签分别执行三种算法, 从图 5 中可以看出随着 θ 的增大, 碰撞区域变大, DFSA 和 DBTS 算法下的标签更容易碰撞, 执行 CFC 算法的标签总通信时间较之减少 27%.

(2) 标签数量: 如图 6 所示, 标签数从 40 增加到 100. 两个基线算法通信时间相差不大, CFC 算法较

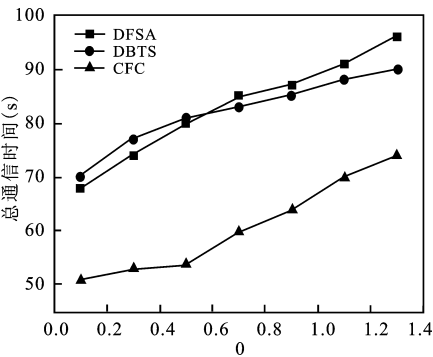


图 5 通信阈值比较

之两者总通信时间减少 26%。

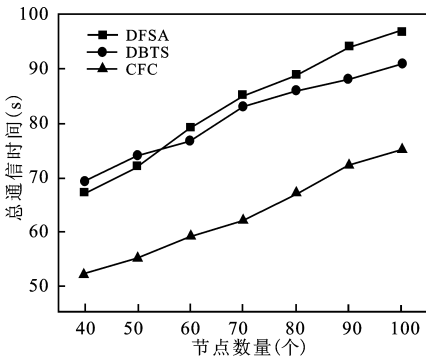


图 6 标签数量对比

(3)阅读器能量 Φ :如图 7 所示,随着阅读器功率的增加,标签充电时间缩短,总通信时间随着减少.相比于 DBTS 和 DFS A 算法,CFC 算法效果更好,总通信时间较之两者减少 27%。

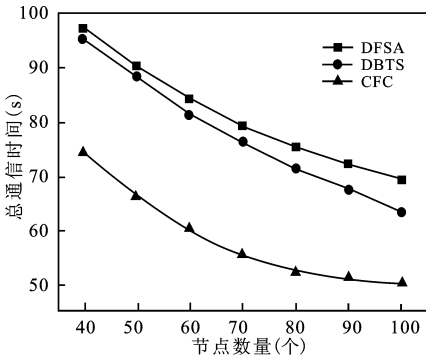


图 7 阅读器能量变化图

5 结束语

本文针对 WISP 的能量利用效率不高、储能能

力有限问题,优化能量接收和能量消耗模型,并通过代数运算对下一时段的可用能量进行预测,提出一种更适用于 WISP 的可预测能量任务调度算法 PE-EDF,效率提高 55%.此外,进一步考虑多标签和阅读器的通信碰撞问题,提出了无碰撞通信算法 CFC 解决了二者之间的通信碰撞,并求解阅读器位置带来的 NP-Hard 问题,总通信时间相比原算法减少 27%.实验结果表明,本文提出的两种算法能有效地避免能量浪费,提高 WISP 能量利用率.尽管本文已经有了显著的改进,但仍存在一些实际问题,并没有考虑多阅读器和多标签通信带来的潜在冲突问题,接下来会继续深入研究.

参考文献:

[1] Wirelessly powered sensor networks and computational RFID[M]. Springer Science & Business Media, 2013.

[2] ZHANG P, GUMMESON J, GANESAN D. Blink: A high throughput link layer for backscatter communication[C]//Proceedings of the 10th international conference on Mobile systems, applications, and services. ACM, 2012: 99-112.

[3] BUETTNER M, GREENSTEIN B, WETHERALL D. Dewdrop: an energy-aware runtime for computational RFID [C] // Proc. USENIX NSDI. 2011: 197-210.

[4] SHAW J A. Radiometry and the Friis transmission equation[J]. American journal of physics, 2013, 81 (1): 33-37.

[5] BIONDI A, SUN Y. On the ineffectiveness of 1/m-based interference bounds in the analysis of global EDF and FIFO scheduling[J]. Real-Time Systems, 2018, 54(3): 515-536.

[6] SHIH D H, SUN P L, YEN D C, et al. Taxonomy and survey of RFID anti-collision protocols[J]. Computer communications, 2006, 29(11): 2150-2166.

作者简介:

靳 晖 男,(1994—),硕士研究生.研究方向为 RFID 和无源感知系统.

赵菊敏(通讯作者) 女,(1976—),博士,教授.研究方向为信息物理系统和弱信号处理.

E-mail:zhaojumin@tyut.edu.cn