

· CWSN 2016 推荐论文 ·

DOI:10.15961/j.jsuese.201601193

后向散射通信的动态帧和充电时长调整策略

李燕君, 胡绍利

(浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要:针对后向散射通信广泛采用的 EPC Gen2 协议在传输大量数据时效率较低,且不能很好适应能量捕获条件和信道质量变化的问题,首先对 EPC Gen2 协议原有流程进行了优化,采用突发传输减少空闲等待时隙,引入纠错码减少确认帧等待时延;接着,推导了特定能量捕获条件和信道条件下的有效吞吐量表达式,归纳出有效吞吐量最大化问题,通过穷举法得到帧长、编码冗余度和充电时间理论最优值;然后,提出一种动态帧和充电时间在线调整策略,在运行时根据阅读器端的吞吐量测量反馈调整帧长及编码冗余度,控制充电时间,并设计了相应的数据帧和确认帧格式;最后,为验证本文方法的有效性,设置了不同能量捕获条件和信噪比条件,通过仿真得到本文所提方法采用的帧长、编码冗余度、达到的有效吞吐量和消耗的能量,与 EPC Gen2 协议固定帧长方案和通过数值分析得到的理论最优值进行了比较。仿真结果表明,本文所提方法相比 EPC Gen2 协议固定帧长方案能显著提高有效吞吐量,且吞吐量性能接近理论最优值。可见,本文对协议流程的优化及动态调整帧长及编码冗余度的策略在改善系统吞吐量性能方面是有效的。

关键词:后向散射通信;有效吞吐量;帧长;充电时间;编码冗余度

中图分类号: TN926

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2017)02-0169-08

Dynamic Frame and Charging Time Adaptation Scheme for Backscatter Communication

LI Yanjun, HU Shaoli

(School of Computer Sci. and Technol., Zhejiang Univ. of Technol., Hangzhou 310023, China)

Abstract: The widely-used EPC Gen2 protocol for backscatter communication is inefficient in dealing with transferring a large amount of buffered data to RFID reader. Furthermore, it is not adaptable to dynamic energy harvesting and channel condition. In order to solve these problems, firstly, the original logic of EPC Gen2 protocol was optimized by adopting burst transmission to reduce the idle slots and introducing erasure code to avoid waiting for the ACK. Secondly, the expression of the throughput under specific energy harvesting and channel conditions was derived. Then the throughput maximization problem was formulated, which was solved by the method of exhaustion. The optimal combination of the frame length, the number of redundant frames and the charging time were obtained. Thirdly, a dynamic frame and charging time adaptation (DFCTA) scheme was proposed, which increased or decreased the frame length and the number of redundant frames at runtime based on the throughput measurement at the reader. Finally, simulations were conducted under different energy harvesting and channel conditions to evaluate the frame length, the number of redundant frames, the achieved throughput and the energy cost of the proposed DFCTA scheme. Simulation results showed that by DFCTA scheme, the throughput performance was remarkably improved compared with current fixed-frame-length scheme in EPC Gen2 protocol and it was quite close to the theoretical optimum. Consequently, the optimization of the protocol logic and the proposed DFCTA scheme were proved to be effective in improving the throughput performance.

Key words: backscatter communication; throughput; frame length; charging time; coding redundancy

可计算 RFID (computational radio frequency identification, CRFID) 是一种捕获射频能量^[1]工作

的无源传感节点。它们沿袭了 RFID 的后向散射通信模式,即从阅读器发出的射频信号中获取能量,将

收稿日期:2016-10-27

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY17F020020);国家自然科学基金重点项目资助(61432015)

作者简介:李燕君(1982—),女,副教授,博士。研究方向:无源感知网络。E-mail: yjli@zjut.edu.cn

http://jsuese.ijournals.cn http://jsuese.scu.edu.cn

编码数据调制在接收的信号中反射回阅读器。典型的 CRFID 系统有 Intel 和华盛顿大学联合开发的 WISP (Wireless Identification and Sensing Platform)^[2] 和密歇根大学在 WISP 基础上开发的 UMASS Moo^[3] 等。本文考虑的场景是 CRFID 用于移动感知,当运动到阅读器附近时,将缓存的数据通过后向散射通信传输给阅读器。CRFID 在移动过程中其能量捕获条件和信道质量都处于动态变化中。当能量捕获条件较差时,CRFID 需要经历较长的充电时间才能达到工作电压;当信道质量较差时,容易发生比特误码,导致数据帧被丢弃,CRFID 需要再次充电重传。目前,后向散射通信普遍使用的 EPC Gen2 协议是为读取大量标签的少量数据(标识符)设计的,但在本文考虑的少量 CRFID 节点需要传输大量缓存数据的场景下效率较低,不能应对能量捕获条件和信道质量的变化。

针对 EPC Gen2 协议在移动感知场景下传输大量缓存数据时效率不高的问题,已有文献提出了改进方案。文献[4]提出链路层协议 Blink,设计了信道监测算法,通过对丢包率和信号强度的估计自适应调整数据传输速率和选择信道,从而优化吞吐量。文献[5]提出 Flit 协议,采用突发传输提高信道利用率,采用协调算法降低 CRFID 间的冲突,相比 EPC Gen2 协议提高了吞吐量和能量效率。实际上,Blink 和 Flit 这 2 个协议可以与本文提出方案的配合使用,进一步提高吞吐量。文献[6]与本文的研究动机相似,他们设计了一种特殊的通信协议,将数据帧切割成非常小的数据单元,以适应能量极弱的环境。然而该项工作并没有考虑信道质量较差而发生比特误码及重传的情况,当他们在通过改变帧长最大化吞吐量时,没有考虑包括帧首、帧尾和 ACK 等控制帧在内的通信开销,而实际上这些通信开销在选择帧长较短时是不可忽略的。

动态调整帧长和纠错码技术被以往很多文献证明可以在恶劣信道条件下有效增强传输可靠性,提高系统吞吐量。IEEE 802.11 标准中采用固定长度的分片阈值,当上层交付的数据超过该阈值则进行分片,该方案显然不能适应动态变化的信道。文献[7]提出根据信道质量动态改变分片阈值,吞吐量得到提高。文献[8]提出一种适用于传感器网络的动态帧长度控制策略,可以降低通信开销,提高能量利用率。文献[9]提出基于纠错码的数据包传输策略 SolarCode,通过调整纠错码的编码冗余度来充分利用捕获的过剩能量,从而优化能量利用率和提高

数据传输可靠性。文献[10]提出基于 Reed-Solomon 码的数据收集策略。通过优化传感数据个数、编码冗余度和数据链路层重传次数这几个参数,使得在事先给定的数据收集率和时延约束条件下收集数据的能耗达到最低。上述研究工作表明,动态改变帧长度和编码冗余度能有效适应变化的环境。受此启发,本文在优化 EPC Gen2 协议传输流程的基础上,提出通过调整帧长、编码冗余度和充电时间提高吞吐量的思想。本文引入突发传输和纠错码对 EPC Gen2 协议原有流程进行了优化;推导了特定能量捕获条件和信道条件下的有效吞吐量表达式,归纳出有效吞吐量最大化问题,得到帧长、编码冗余度和充电时间理论最优值;提出一种动态帧和充电时间在线调整策略,在运行时根据阅读器端的吞吐量测量反馈调整帧长及编码冗余度;通过仿真得到本文所提方法在不同能量捕获条件和信道条件下采用的帧长、编码冗余度、达到的有效吞吐量和消耗的能量,与 EPC Gen2 协议固定帧长方案和通过数值分析得到的理论最优值进行了比较。

1 吞吐量优化问题描述

1.1 对 EPC Gen2 协议流程的改进

EPC Gen2 协议从读取数据需要经历多个通信周期,传输时延较大,吞吐量较低。本文借鉴了 Flit 协议针对 EPC Gen2 通信流程的优化方案,其核心思想是让某个标签在有数据要传输时占用所有的通信时隙进行突发传输。此外,为了应对数据帧的误码情况,本文引入纠错码来减少 ACK 时延。主要思想是将 N 个源数据帧编码为成 $N+M$ 个帧,其中, M 为冗余帧个数,每个帧只发送一次,阅读器成功接收任意 N 个帧就可以解码还原出原始数据,无需对每个帧进行确认;如果数据帧发生误码的次数超过 $M+1$ 次,则表示数据还原失败。改进后的工作流程如图 1 所示。其中,Query、QueryRep 命令用于初始化数据请求,设置相关参数。RN16 数据帧包含 CRFID 标签产生的 16 位随机数,发送给阅读器后阅读器将其作为 ACK 的一个字段返回给标签,同意标签的数据发送请求。然后标签在每个工作周期根据当前能量捕获条件选择最佳充电时间和连续发送数据帧个数,进行相应的睡眠充电和突发传输,重复上述工作周期操作,直至标签将本轮数据全部发完或等到阅读器返回 QueryRep 帧,进行下一轮发送请求。

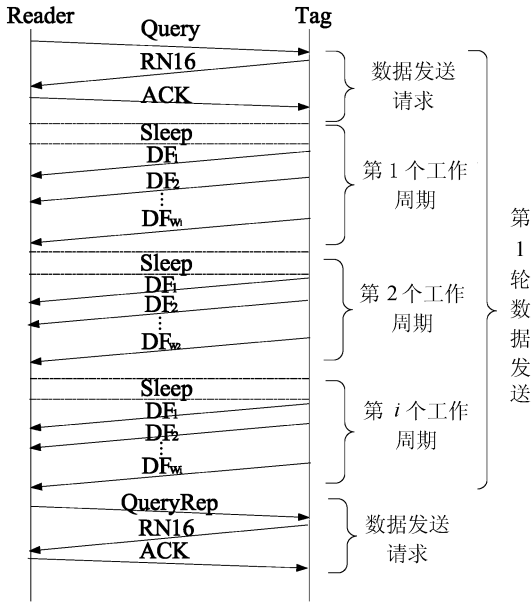


图1 协议工作流程

Fig.1 Operating procedure

1.2 吞吐量分析和优化

CRFID 节点的工作周期是一系列充放电过程,如图2所示,节点休眠一段时间捕获阅读器射频能量,电压上升,电容充电;然后醒来发送数据,电容放电,电压下降。以 WISP 为例,其 CPU 工作电压是 1.8 V,但是唤醒无线电工作的电压是 1.9 V。因此, WISP 节点需要充电一段时间,当电压上升至 1.9 V,才能唤醒无线电发送数据,当电压降至 1.8 V,无线电则会进入休眠状态。充电 t 时间后的电压 $U(t)$ 为:

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

式中, $U(0)$ 表示初始电压值, τ 为 RC 电路时间常数, $U_{\max}$ 表示当前能量捕获条件下电容可达到的最大电压。当捕获条件改变时, $U_{\max}$ 和 τ 的值都随之改变。图3显示了不同能量捕获条件下,随着充电时间增大的电压变化情况。当能量捕获条件较差时, $U_{\max}$ 减小, τ 增大,使得 CRFID 节点需要更长的充电时间才能达到无线电工作电压。为了适应不同的能量捕获条件,本文提出让 CRFID 节点动态选择帧长和充电时间。动态选择帧长的另一个优势是可以适应变化的信道质量。通过联合优化帧长、编码冗余度和充电时间,提高后向散射通信的吞吐量。

首先,推导特定能量捕获条件和信道条件下的有效吞吐量表达式。充电时间为 t 时, CRFID 节点捕获射频能量 $E(t)$ 为:

$$E(t) = \frac{1}{2}C(U^2(t) - U_{\text{dd}}^2) \quad (2)$$

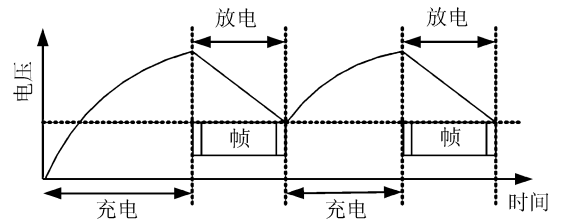


图2 能量捕获过程

Fig.2 Energy harvesting process

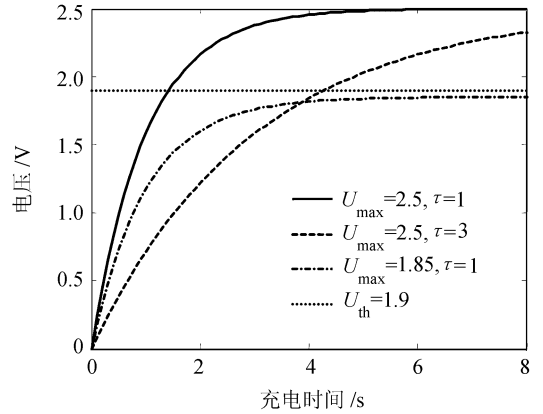


图3 不同捕获条件下电压随充电时间的变化

Fig.3 Voltage versus charging time under different harvesting conditions

其中, C 是电容大小, U_{dd} 为 CRFID 节点最小工作电压。假设节点发送或接收单位比特数据平均消耗的能量为 e_{bit} , 用 l_p 和 l_h 分别表示数据帧载荷部分和头部(包括尾部 FCS 校验位)的长度, 那么发送一个帧所需的能量为:

$$E_{\text{frame}} = e_{\text{bit}} \times (l_p + l_h) \quad (3)$$

用 w_k 表示第 k 个工作周期内突发传输的数据帧个数, 由于捕获能量不能小于发送帧所需的能量, 有以下不等式成立:

$$E(t_k) \geq w_k E_{\text{frame}} \quad (4)$$

根据式(4)得到第 k 个工作周期内突发传输数据帧个数满足以下不等式:

$$w_k \leq \min \left\{ \left\lfloor \frac{E(t_k)}{E_{\text{frame}}} \right\rfloor, N + M - \sum_{i=1}^{k-1} w_i \right\} \quad (5)$$

式中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整, $\sum_{i=1}^{k-1} w_i$ 表示前 $k-1$ 个工作周期突发传输数据帧总数。将式(2), 式(3)代入式(4), 并令式(2)中 $U(0) = U_{\text{dd}}$, 可以得到第 k 个工作周期的充电时间 t_k 满足以下不等式:

$$t_k \geq -\tau \ln \frac{\sqrt{2w_k e_{\text{bit}} (l_p + l_h)/C + U_{\text{dd}}^2} - U_{\max}}{U_{\text{dd}} - U_{\max}} \quad (6)$$

根据式(6)可得第 k 个工作周期内每个帧的平

均充电时间为:

$$\bar{t}_k = \frac{t_k}{w_k} \quad (7)$$

用 p_e 表示比特误码率, 可得一个数据帧的成功传输概率为:

$$p = (1 - p_e)^{l_p + l_h} \quad (8)$$

按照本文提出的编码策略, N 个数据帧发送成功和失败的情况下, 期望发送帧个数分别由式(9)和式(10)表示:

$$\psi_s = \sum_{i=N-1}^{N+M-1} (i+1) C_i^{N-1} p^N (1-p)^{i-N+1} \quad (9)$$

$$\psi_F = \sum_{i=M}^{N+M-1} (i+1) \times C_i^M \times p^{i-M} \times (1-p)^{M+1} \quad (10)$$

式中, N 个数据帧发送成功, 实际发帧个数的概率分布满足:

$$\Pr\{X = z\} = C_{z-1}^{N-1} (1-p)^{z-N} \times p^N, \quad (11)$$

$$z = N, N+1, \dots, N+M$$

根据式(11)的概率分布, 可以得到编码后成功收包概率为:

$$P_s = \sum_{i=N}^{N+M} C_{i-1}^{N-1} (1-p)^{i-N} p^N \quad (12)$$

联合式(5)和(7)可得第 k 个工作周期的平均时延为:

$$D_k = w_k (\bar{t}_k + t_f) \quad (13)$$

式中, t_f 为一个帧的传输时延。由此可得有效吞吐量的表达式为:

$$G = N l_p P_s / \sum_{k=1}^K D_k \quad (14)$$

式中, K 为一轮数据传输经历的周期总数。最后, 归纳如下优化问题:

$$\begin{aligned} \max G &= N l_p P_s / \sum_{k=1}^K D_k, \\ \text{w. r. t.} \quad &l_p, M \\ \text{s. t.} \quad &\begin{cases} t_k \geq -\tau \ln \frac{\sqrt{\frac{2w_k e_{\text{bit}}(l_p + l_h)}{C}} + U_{\text{dd}}^2 - U_{\text{max}}}{U_{\text{dd}} - U_{\text{max}}}, \\ \sum_{k=1}^K w_k = \psi_F + \psi_s \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

上述优化问题有 2 个约束条件, 第 1 个约束条件由式(6) 决定, 第 2 个约束条件表示本轮传输的帧个数与期望传输帧个数相等。数据帧载荷长度 l_p 和编码冗余帧个数 M 是待优化的变量, 这 2 个变量都有取值范围, 其中, 数据帧载荷长度 l_p 在 EPC

Gen2 协议中规定取值范围为 16 ~ 496 bit, 并且为 16 bit 的整数倍, 目前设备仅支持 96 bit。考虑到传输效率, 冗余帧个数也有上限, 因此该优化问题的可行解空间为 $L \times M_{\text{max}}$, 其中, L 为载荷长度的选择空间, M_{max} 为冗余帧个数的选择空间, 理论上可以通过穷举法得到使得吞吐量最大的 l_p 和 M 的组合。然而在实际中, 与能量捕获条件和信道质量相关的参数 U_{max} 、 τ 和 p_e 是动态变化的, 需要通过在线估计得到。其中, U_{max} 和 τ 可以通过跟踪电容的电压得到, 而获取 p_e 需要频繁监测信道, 会带来额外通信开销, 这对于能量匮乏的 CRFID 系统来说是一个较大的负担。为了减少通信开销, 本文提出运行时动态帧和充电时间调整策略 DFCTA。

2 动态帧和充电时间调整策略 DFCTA

2.1 DFCTA 设计思路

DFCTA 的主要思想是在运行时根据阅读器端的吞吐量测量反馈调整帧长及编码冗余度, 控制充电时间, 从而提高吞吐量。具体思路如下: CRFID 节点周期性跟踪电容的电压, 估算 U_{max} 和 τ 值。当 CRFID 节点移动到阅读器附近且缓存中有数据要发时, 从缓存中提取 N 个长度为 l_p 的源数据帧, 编码成 $N+M$ 个帧, 初始帧长设置为 16 bit, 按照图 1 的通信流程与阅读器进行数据传输。阅读器监听接收到的帧, 当完成一轮数据传输时, 阅读器记录所用时间, 得到这段时间内的有效吞吐量, 将本轮吞吐量和上一轮进行比较。如果本轮吞吐量相较于上一轮吞吐量提高, 则返回 ACK 告知 CRFID 节点增加发送帧长度; 反之则减少发送帧长度, 且每次增加或减少帧长度的单位为 8 bit。为了避免频繁更改帧长度, 引入调节参数 θ ($0 \leq \theta \leq 0.1$), 如果吞吐量提高或降低的比例不超过 θ , 则不改变帧长度。同时, CRFID 节点在接收到阅读器指定的帧长度后, 根据当前能量捕获条件, 选择当前工作周期内突发传输的帧个数, 发送完毕后进入休眠充电状态, 等待下一个工作周期发送数据, 直到本轮数据帧全部发完或等到阅读器发送 QueryRep 帧。在一轮发送结束后, 阅读器统计本轮发送成功情况下实际发送冗余帧个数, 若发送失败时发送冗余帧个数为 M , 按照式(16) 对下一轮冗余帧个数进行更新。

$$M_{\text{next}} = \lceil (1 - \alpha) \times M_{\text{avg}} + \alpha \times M_{\text{cur}} + M_{\text{min}} \rceil, \quad (16)$$

$$\alpha \in (0, 1), M_{\text{next}} \in (M_{\text{min}}, M_{\text{max}})$$

式中, M_{avg} 表示历史平均发送冗余帧个数, M_{cur} 表示本轮发送冗余帧个数, M_{min} 和 M_{max} 分别表示冗余帧

个数可取的最小值和最大值, α 是权重系数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

具体地, CRFID 节点的工作流程如下:

第1步: 如果缓存不为空且接收到阅读器的 Query 或 QueryRep 帧, 返回 RN16 帧。

第2步: 如果接收到阅读器的 ACK 帧, 且 ACK 中包含与 RN16 帧相同的 16 位随机数, 则从缓存区提取 N 个 l_p 长度的源数据, 编码成 $N + M$ 个帧, 其中, M 和 l_p 的值从阅读器的 ACK 帧中携带的信息获得。

第3步: 工作周期 k 的初始时刻, 跟踪电容电压, 估计 $U_{\max}$ 和 τ 值。

第4步: 根据式(5) 计算第 k 个工作周期的最大突发传输帧个数 W_k , 分别根据式(7) 和(6) 计算当前工作周期的最优突发传输帧个数 $w_k^{\text{opt}} = \arg \min_{w_k \in \{1, 2, \dots, W_k\}} t_k(w_k)$ 和最优充电时间 $t_k^{\text{opt}} = t_k(w_k^{\text{opt}})$ 。

第5步: 充电 t_k^{opt} 时间后, 连续发送 w_k^{opt} 个数据帧。如果当前工作周期收到阅读器的 QueryRep 帧, 立即放弃传输, 执行第一步; 否则, 执行第3步, 直至将所有 $N + M$ 个数据帧发送完毕。

阅读器端的工作流程如下:

第1步: 发送 Query 帧, 请求 CRFID 节点数据, 如果接收到 CRFID 节点的 RN16 帧, 返回 ACK 帧, ACK 帧中包含与 RN16 帧中相同的随机数和 CRFID 节点接下来传输采用的帧长 l_p 及冗余帧个数 M 等信息, l_p 的初始值为 16 bit, M 的初始值为 $M_{\min}$ 。

第2步: 缓存数据个数 V 、正确接收帧个数 R 和误码帧个数 F 均置零。

第3步: 如果接收到 CRFID 节点的数据帧, 令 $V = V + l_p$, 如果数据帧正确, 令 $R = R + 1$; 否则, 令 $F = F + 1$; 进一步判断如果 $R = N$, 则解码恢复出 N 个源数据, 执行第4步; 如果 $F = M + 1$, 本轮传输失败, 执行第4步; 否则, 继续执行第3步。

第4步: 计算本轮有效吞吐量 $G = V/\Delta t$, 其中, Δt 为本轮传输时间, 由阅读器测量得到, 并进行以下操作: 如果 $G > G'(1 + \theta)$ 且 $l_p < l_p^{\max}$, 令 $l_p = l_p + 8$; 如果 $G < G'(1 - \theta)$ 且 $l_p > l_p^{\min}$, 令 $l_p = l_p - 8$; 否则不改变数据帧帧长, 其中 G' 是上一轮有效吞吐量。根据式(16) 计算下一轮传输的冗余帧个数。

第5步: 发送 QueryRep 帧, 请求 CRFID 节点数据, 如果接收到 CRFID 节点的 RN16 帧, 返回 ACK 帧, ACK 帧中包含与 RN16 帧中相同的随机数和第4步中计算得到的 CRFID 节点接下来传输采用的帧

长及冗余帧个数等信息, 执行第2步。

2.2 帧格式

采用的数据帧格式与 EPC Gen2 协议的数据帧格式相似, 如图4所示。EPC Gen2 协议中数据载荷长度是由协议控制(PC) 字段中的 EPC 长度字段定义, 取值范围为 16 ~ 496 bit, 并且为 16 bit 的整数倍, 因此该字段每位表示 16 bit。而由于本文中每次增加或减少帧长度的单位为 8 bit, 因此修改该字段使得每位表示 8 bit, 考虑到目前设备仅支持 96 bit, 取该字段最大值为 96 bit, 即 01100; EPC Gen2 协议规定的 ACK 帧格式由 2 bit 命令位和 16 bit 随机数位 2 个部分组成。然而在本文的算法中, 帧长度和冗余帧个数需要根据信道条件和捕获条件来调整, 该信息由阅读器通过 ACK 帧反馈给 CRFID 节点。因此, 额外添加了 2 个 5 bit 命令位在 ACK 中, 分别表示下一轮的帧长和冗余帧个数, ACK 帧格式如图5所示。

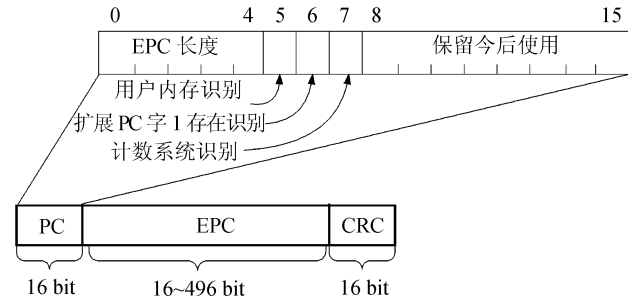


图4 数据帧格式

Fig.4 Format of the data frame

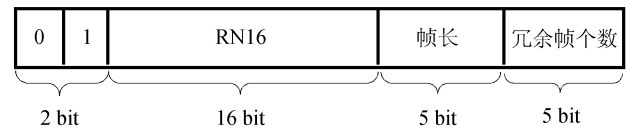


图5 ACK帧格式

Fig.5 Format of the ACK frame

3 性能评价

3.1 信道模型和参数设置

误码率主要取决于接收端的调制方案和信噪比。EPC Gen2 协议采用 FM0 码或 Miller 码调制技术。图6显示了 Miller 码调制的误码率与 E_b/N_0 的函数关系曲线图。其中, Miller 码调制的误码率 p_e 可表示为^[11]:

$$p_e = 2Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)\left[1 - Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)\right] \quad (17)$$

式中, $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$, E_b/N_0 为归一化信噪比。

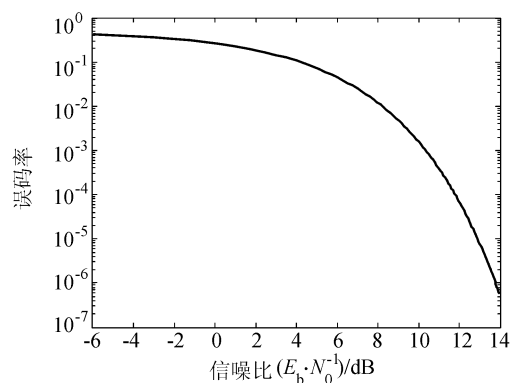


图 6 误码率与 E_b/N_0 的关系

Fig.6 Bit error rate as a function of E_b/N_0 采用的其他仿真设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Tab.1 Simulation parameters

参数	取值
RN16 帧长度 l_r/bit	16
ACK 帧长度 l_a/bit	28
数据载荷长度 l_p/bit	16 ~ 96
PC + CRC l_h/bit	32
电容大小 $C/\mu\text{F}$	10
最小工作电压 U_{dd}/V	1.8
RC 电路时间常数 τ	1.2
初始数据帧个数 N	5
权重系数 α	0.25
最小冗余帧个数 M_{min}	1
最大冗余帧个数 M_{max}	20

3.2 数值分析和仿真实验

假设 CRFID 节点有 6 400 bit 缓存数据需要发送给阅读器。对 DFCTA 策略进行仿真实验,得到吞吐量性能和相应的帧长和冗余帧个数,与用穷举法求解式(15)得到的理论最优解及 EPC Gen2 采用的固定 96 bit 帧长度策略进行比较。

图 7 显示了在 $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$ 的能量捕获条件下,3 种方案的吞吐量随信噪比增大的变化情况。随着信噪比增大,吞吐量逐渐升高,最后趋于平稳。图 7 中通过穷举法得到的吞吐量理论值大于 DFCTA 方案和固定帧长方案,但理论值依赖精确的信道质量和充电条件估计,在实际中估计信道质量需要额外的通信开销。本文提出的 DFCTA 策略无需估计信道质量,通过阅读器对吞吐量的测量值反馈给节点帧长和冗余帧长度,其吞吐量性能接近理论最优值,远高于

EPC Gen2 协议固定 96 bit 帧长度的策略。

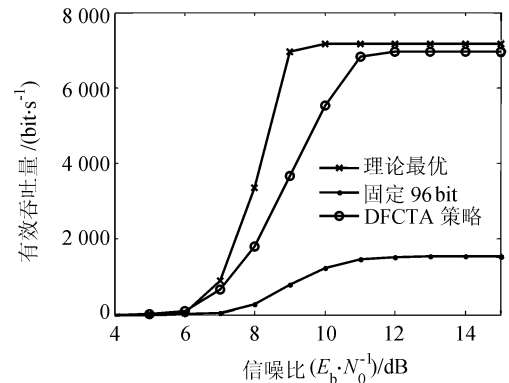


图 7 $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$ 的能量捕获条件下,3 种方案的吞吐量随信噪比增大的变化情况

Fig.7 Throughput performance of the three schemes under the condition $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$

图 8 和 9 分别显示了在与图 7 相对应的信噪比条件下,理论方法和 DFCTA 策略采用的载荷长度和冗余帧个数。

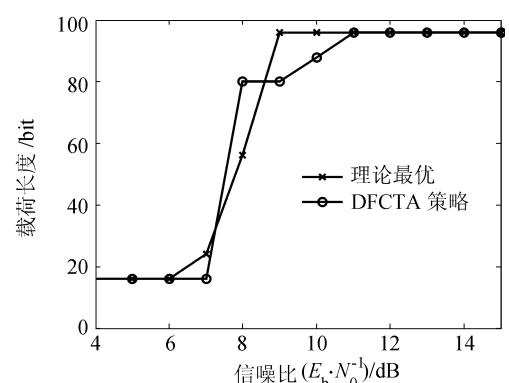


图 8 $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$ 的能量捕获条件下,载荷长度随信噪比增大的变化情况

Fig.8 Adopted payload length under the condition $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$

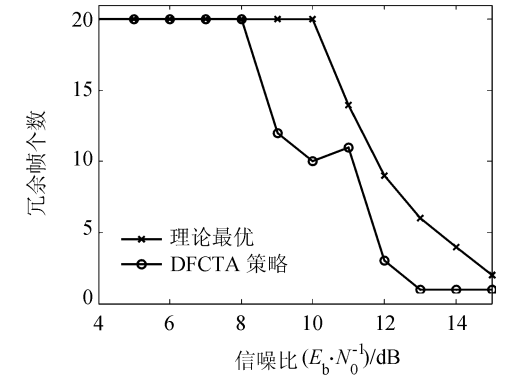


图 9 $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$ 的能量捕获条件下,冗余帧个数随信噪比增大的变化情况

Fig.9 Number of redundant frames with increase of E_b/N_0 under the condition $U_{\text{max}} = 5 \text{ V}$, $\tau = 1$

由图 8、9 可以看出,当信噪比较小,信道质量较差,因此采用的载荷长度较小、冗余帧个数较多;反之当信噪比较大时,采用的载荷长度较大、冗余帧个数较少。提出的 DFCTA 方案与理论值较为接近,但由于 DFCTA 方案采用的在线测量吞吐量反馈给节点改变相应的载荷长度和冗余帧个数,曲线存在一定的波动。

图 10~12 显示了在 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 的能量捕获条件下,3 种方案的吞吐量、载荷长度以及冗余帧个数变化情况。与图 7~9 相比,将 CRFID 节点最大可充电电压下降为 4 V,RC 电路时间常数 τ 设置为 2,使能量捕获条件降低。总体上,图 10 与 7 相比吞吐量变化情况趋势相同,但是由于能量捕获条件变差,使得总体吞吐量比图 7 小。根据图 10 和 11 可以看出,增加帧长并不能无限提高吞吐量。这是因为在信道条件较好,能量捕获条件较差的情况下,充电时间成为了主要影响吞吐量的主要因素。因此,在该条件下,用更长的充电时间的代价来获取更大的发送帧长,可能反而会导致吞吐量下降。

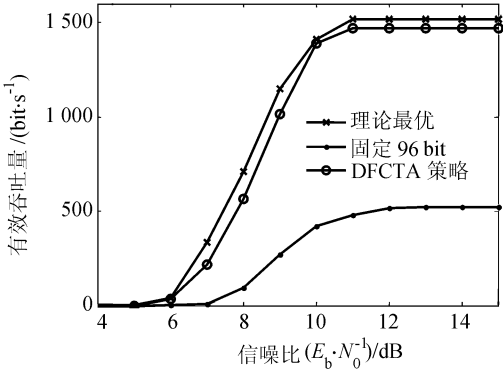


图 10 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 的能量捕获条件下,3 种方案的吞吐量随信噪比增大的变化情况
Fig. 10 Throughput performance of the three schemes with increase of E_b/N_0 under the condition $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$

图 13 为 DFCTA 策略和固定帧长策略在 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 条件下的通信能耗。由图 13 可以看出,在信噪比较差的情况下,DFCTA 策略比固定帧长策略能耗高,而在信噪比较高的情况下,DFCTA 策略能耗较低。这是因为在信噪比较差时,DFCTA 策略通过增加冗余包个数保证成功收包率,使得传输量增大;而在信噪比较好时,冗余包个数降低,并且突发传输机制无需每帧返回确认,节省了相应的能耗。值得一提的是本文没有考虑计算能耗,这是因为与通信能耗相比,计算能耗的数量级较小;并且,本文采用的 DFCTA 策略的核心算法在阅读器端运行,

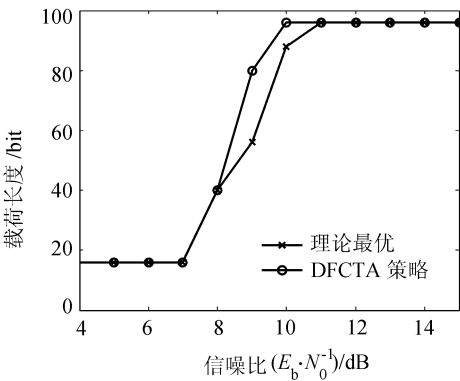


图 11 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 的能量捕获条件下,载荷长度随信噪比增大的变化情况

Fig. 11 Adopted payload length with increase of E_b/N_0 under the condition $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$

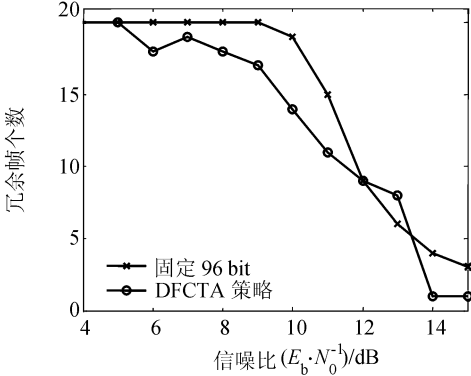


图 12 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 的能量捕获条件下,冗余帧个数随信噪比增大的变化情况

Fig. 12 Number of redundant frames with increase of E_b/N_0 under the condition $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$
CRFID 端计算量较小。总的来说,CRFID 节点的能量都是从阅读器捕获,所以能耗指标并非本文关注的重点。

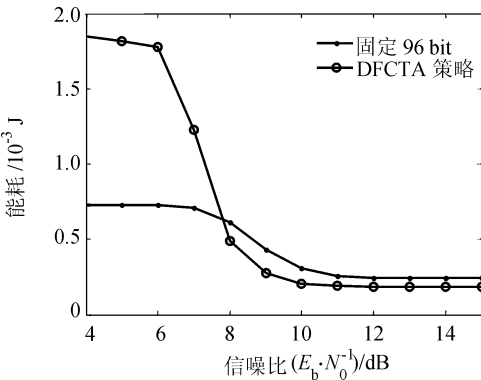


图 13 $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$ 的能量捕获条件下,通信能耗随信噪比增大的变化情况

Fig. 13 Communication energy consumption under with increase of E_b/N_0 the condition $U_{\max} = 4\text{ V}$ 、 $\tau = 2$

图 14 给出了不同能量捕获条件下,提出的 DFCTA 策略的吞吐量性能随信噪比增大的变化。通过

改变 $U_{\max}$ 的值来表征不同的能量捕获条件。从图 14 中可以看出在相同信道条件下,随着能量捕获条件提高,吞吐量也随之提高。这是由于当能量捕获条件较好时,充电时间减少,且 CRFID 节点在一个工作周期能够捕获更多能量来发送更多的数据帧,最终提高吞吐量。

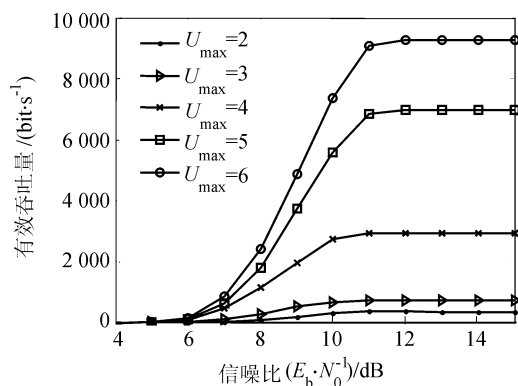


图 14 不同能量捕获条件下吞吐量变化曲线

Fig. 14 Throughput performance under different energy harvesting conditions

4 结 论

提出了一种动态帧和充电时间调整策略 DFCTA,根据阅读器端的吞吐量测量反馈调整帧长及编码冗余度,控制充电时间,从而提高吞吐量。仿真结果验证了提出的 DFCTA 策略相对 EPC Gen2 协议固定帧长的方案在吞吐量性能上更加优越,且接近理论最优值。本文的研究工作可以使得以后向散射通信方式工作的无源感知网络适应动态变化的能量捕获和信道环境,促进其在移动感知计算领域的应用。

未来的研究工作将考虑进一步考虑多个 CRFID 节点与阅读器通信的场景下,如何保证数据传输优先级和提高系统吞吐量的问题。

参考文献:

- [1] Kim S, Vyas R, Bito J, et al. Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms[J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102: 1649 – 1666.
- [2] Sample A P, Yeager D J, Powledge P S, et al. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2608 – 2615.

- [3] Fu K. UMass Moo: A programmable RFID-scale sensor device[EB/OL]. (2015 – 04 – 13) [2016 – 12 – 24]: <https://spqr.eecs.umich.edu/moo/>.
- [4] Zhang P, Gummesson J, Ganesan D. BLINK: A high goodput link layer for backscatter communication[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2012: 99 – 112.
- [5] Gummesson J, Zhang P, Ganesan D. Flit: A bulk transmission protocol for RFID-scale sensors[C]//Proceedings of the 10th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services. New York: ACM, 2012: 71 – 84.
- [6] Zhang P, Ganesan D. Enabling bit-by-bit backscatter communication in severe energy harvesting environments [C]//Proceedings of the 11th USENIX Conference on Networked Systems Design and Implementation. Seattle: USENIX Association, 2014: 345 – 357.
- [7] Kim B S, Fang Y, Wong T F, et al. Goodput enhancement through dynamic fragmentation in wireless LANs [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(4): 1415 – 1425.
- [8] Dong W, Liu X, Chen C, et al. Dynamic packet length control in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(3): 1172 – 1181.
- [9] Yang Y, Su L, Gao Y, et al. SolarCode: Utilizing erasure codes for reliable data delivery in solar-powered wireless sensor networks[C]//Proceedings of the 29th Conference on Information Communications. Piscataway: IEEE, 2010: 1 – 5.
- [10] Zhu Yihua, Xu Ji, Tian Xianzhong, et al. Energy-efficient low-delay reliable data gathering scheme applying simple Reed-Solomon code for wireless sensor network [J]. Chinese Journal of Computer, 2015, 38(10): 2106 – 2124. [朱艺华, 徐骥, 田贤忠, 等. 无线传感器网络应用简单 Reed-Solomon 编码的低能耗和低时延可靠数据收集方案[J]. 计算机学报, 2015, 38(10): 2106 – 2124.]
- [11] Simon M, Divsalar D. Some interesting observations for certain line codes with application to RFID [J]. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(4): 583 – 586.

(编辑 赵 婧)

引用格式: Li Yanjun, Hu Shaoli. Dynamic frame and charging time adaptation scheme for backscatter communication[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(2): 169 – 176. [李燕君, 胡绍利. 后向散射通信的动态帧和充电时长调整策略[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(2): 169 – 176.]