

# 能量捕获传感网中吞吐量最大化的占空比方案

池凯凯 林一民 李燕君 程 珍

(浙江工业大学计算机科学与技术学院 杭州 310023)

**摘 要** 对于以超级电容为储能设备且工作在占空比模式下的能量捕获传感网,其节点的平均能量捕获速率和吞吐量均很大程度上取决于节点开始休眠时的电容电压和醒来工作时的电容电压。首先,通过理论分析证明传感器节点的能量捕获速率很大程度上取决于电容的即时电压值;然后,对节点的最大吞吐量问题进行建模;最后,提出一种最优方案来确定开始休眠时的电容电压和醒来工作时的电容电压的最佳取值,从而最大化节点的吞吐量。实验表明,所提方案的吞吐量比已有占空比方案的吞吐量有明显的提高。

**关键词** 能量捕获无线传感网,占空比,能量捕获速率,吞吐量最优化

中图分类号 TP311 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.06.017

## Duty Cycle Scheme Maximizing Throughput in Energy Harvesting Sensor Networks

CHI Kai-kai LIN Yi-min LI Yan-jun CHENG Zhen

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

**Abstract** For energy harvesting wireless sensor networks (EH-WSNs) working under the extremely low-duty-cycle mode and using the super capacitor as energy storage device, both the average energy harvesting rate and the throughput of node greatly depend on the capacitor voltage when it begins to sleep and wakes up. This paper firstly demonstrated that the energy harvesting rate significantly depends on the instant capacitor voltage through the theoretical analysis, then formulated the maximal node throughput problem and finally provided an approach to solve this problem for obtaining the optimal values of capacitor voltage to start sleeping and capacitor voltage to wake up. Numerical results show that the throughput of the duty-cycle-optimized scheme is significantly larger than that of the available duty-cycle schemes.

**Keywords** Energy harvesting wireless sensor networks, Duty cycle, Energy harvesting rate, Throughput optimization

## 1 引言

能量捕获无线传感网(Energy Harvesting Wireless Sensor Networks, EH-WSN)由能够从光、振动、电磁波等中捕获能量的传感器节点组成<sup>[1-2]</sup>。由于具有从环境中捕获能量的能力, EH-WSN 理论上可以永久地工作,因此受到学术界和企业界越来越多的重视。目前,已有很多学者对其进行了研究。文献[3]总结了 EH-WSN 研究领域在发送调度和能量使用、接入控制、节点间能量传输等方面的最新进展。文献[4]介绍了在捕获射频能量的无线传感网领域的最新研究进展,探讨了值得进一步深入研究的问题。Dong 等人<sup>[5]</sup>提出了基于分簇的 EH-WSN 高效路由方案。Kosunalp 等人<sup>[6]</sup>综述了 EH-WSN 的 MAC 协议。

虽然 EH-WSN 可以捕获环境中的能量,但是在很多应用场景中,传感器节点的能量捕获速率(Energy Harvest Rate, EHR)在毫微瓦级之间,比传感器节点工作时的平均所需功

率 3~6 个数量级,因此传感器节点通常工作在极低的占空比模式下,也就是说,节点经过长时间的休眠(称为充电时间,定义为  $t_c$ )来给储能设备充电,然后再工作一小段时间(称为工作时间,定义为  $t_w$ )来感知数据、处理数据以及接收或传输数据,其中充电时间  $t_c$  比工作时间  $t_w$  要长很多。

对于低占空比的 EH-WSN 来说,由于传感器节点的 EHR 很低,其吞吐量也非常低。如何提高传感器节点的吞吐量,是一个非常重要且具有挑战性的问题。

本文探讨了具有星型拓扑结构的低占空比 EH-WSN。星型拓扑结构具有节点无需中继数据包,节点能量需求低,网络吞吐量高等优点,非常适合传感节点距离汇聚节点较近的 EH-WSN,可应用于人体的生理指标监测等重要场景。每个传感器节点都有一个容量为  $C$  的超级电容器作为节点的能量存储容器。在 EH-WSN 中,为了使储能设备拥有较长的使用寿命,通常使用超级电容器而不是传统的电池。

考虑如下 EH-WSN 场景:给超级电容器充电用的能量捕

到稿日期:2017-03-10 返修日期:2017-07-19 本文受国家自然科学基金(61472367,61432015,61379124)资助。

池凯凯(1980—),男,博士,教授,主要研究方向为无线网络, E-mail:kkchi@zjut.edu.cn(通信作者);林一民(1992—),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络;李燕君(1982—),女,博士,副教授,主要研究方向为无线传感器网络;程 珍(1981—),女,博士,副教授,主要研究方向为网络安全。

获电路所产生的输出电压是比较稳定的,用  $U_{\max}$  来表示该电压值;传感器节点工作于固定占空比模式。如图 1 所示,当传感器节点的电容电压到达门限值  $U_{th1}$  (如文献[7]中采用的是 1.9V)时,节点清醒并工作,同时传输数据给一跳范围内的汇聚节点;而当电容电压降到门限值  $U_{th2}$  时,节点就开始进入休眠状态。电容不能同时充电和放电。

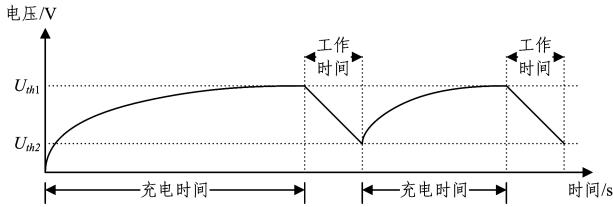


图 1 充放电过程示意图

Fig. 1 Illustration of charge-discharge process

值得注意的是,虽然超级电容器在 EH-WSN 中被广泛使用,但现有的多数研究都采用了过于简单的模型,即仅将超级电容器作为一个理想状态下的设备,认为它的 EHR 仅仅取决于能量源产生的电压强度大小  $U_{\max}$  [8]。而在实际应用中,给定恒定电压输出的能量源,超级电容器的 EHR 会随着电容电压的变化而发生明显的改变。因此,节点的平均 EHR 很大程度上取决于  $U_{th1}$  和  $U_{th2}$  的具体数值。传感器节点在电容电压  $[U_{th2}, U_{th1}]$  区间内进行能量捕获。

基于上述认知,为了使节点的平均 EHR 更大,从而捕获更多的能量来传输更多的数据,理论上,应该使  $U_{th1}$  和  $U_{th2}$  尽可能地接近最优电容电压  $U^*$  (该电压所对应的 EHR 最大)。但是这样设置会导致组装成的数据包过小,因为每段充电时间内所能捕获的能量为  $0.5C(U_{th1}^2 - U_{th2}^2)$ ,当  $U_{th1}$  和  $U_{th2}$  比较接近  $U^*$  时,  $0.5C(U_{th1}^2 - U_{th2}^2)$  较小,仅能够支持非常短小的数据包的传输。需要注意的是,由于每个数据包都包含头部、FCS 等固定的开销字段(其比特长度表示为  $L_o$ ),因此当数据包太小时,开销所占的比例将会较大,节点的有效吞吐量必将极其有限。

Zhang 等人[9]首次提出了将  $U_{th1}$  设置为  $U^*$  并且使数据包尽可能大,以减少开销字段在数据包中所占的百分比,也就是将  $U_{th2}$  设置为所需工作电压  $V_{dd}$  (小于这个电压,传感器节点将无法工作),即工作的电压区间为  $[V_{dd}, U^*]$ 。然而,这种设置会带来一些问题:首先,在某些情况下,节点的 EHR 达到最大时的电容电压(即  $U^*$ )小于  $V_{dd}$ ,从而导致该占空比方案无法应用。例如,若  $U^*$  仅为 1.5V,则该设置无法应用于装有  $V_{dd} = 1.8V$  的低功耗 MSP430 微控制器的节点。其次,在  $U^*$  远大于  $V_{dd}$  的情况下,当电容电压下降为  $V_{dd}$  时,节点的 EHR 是很低的,从而使得节点在充电时间内的平均 EHR 较低。

目前,关于  $U_{th1}$  和  $U_{th2}$  的最佳设置还未有相关研究。本文旨在最优化这两个参数的取值,从而最大化节点的吞吐量。本文的主要贡献为:首先通过理论分析可知,展现节点的 EHR 很大程度上取决于电容的即时电压;然后对最大化节点吞吐量问题进行建模;最后为解决这个最优化问题提出一种方案,从而有效确定  $U_{th1}$  和  $U_{th2}$  的最佳取值。

## 2 EHR 与电容器电压之间的关系

当传感器节点利用能量捕获电路模块进行充电时,节点的电容电压  $U(t)$  可以表示为:

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

其中,  $\tau = RC$  表示电路时间常数,  $U(0)$  表示开始时刻的电压。图 2(a) 给出了  $C = 10\mu F, \tau = 1, U_{\max} = 3.0V, U(0) = 0V$  时充电过程中的  $U(t)$  值。

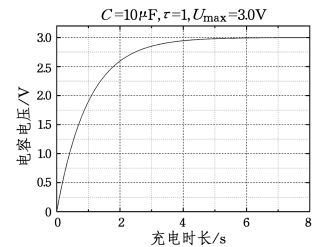
电容器中存储的能量大小为:

$$E(t) = 0.5CU^2(t) \quad (2)$$

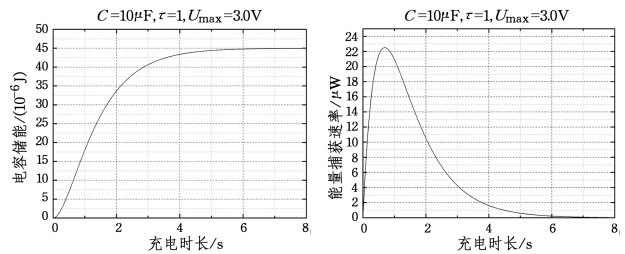
图 2(b) 给出了  $C = 10\mu F, \tau = 1, U_{\max} = 3.0V, U(0) = 0V$  时充电过程中的电容储能值。

$$H(t) = \frac{dE(t)}{dt} = \frac{C[U_{\max} - U(0)]}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \times \{U_{\max} + [U(0) - U_{\max}]e^{-\frac{t}{\tau}}\} \quad (3)$$

图 2(c) 给出了  $C = 10\mu F, \tau = 1, U_{\max} = 3.0V, U(0) = 0V$  时充电过程中的 EHR。



(a) 电容电压与充电时间之间的关系曲线



(b) 储能能量大小与充电时间之间的关系曲线 (c) 能量捕获速率与充电时间之间的关系曲线

图 2 能量捕获速率的动态变化图

Fig. 2 Dynamic change diagram of energy harvesting rate

如前文所述,定义  $U^*$  为节点达到最大 EHR 时的电容电压值,其可以通过以下推导得出。

对于  $U(0) = 0V$  的场景,根据式(3)可得:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{CU_{\max}^2}{\tau^2} e^{-\frac{t}{\tau}} (2e^{-\frac{t}{\tau}} - 1) \quad (4)$$

由  $\frac{dH(t)}{dt} = 0$  可得  $t = \tau \ln 2$ 。因此在  $t = \tau \ln 2$  时,  $H(t)$  的值是最大的,最大值为:

$$H^* = H(\tau \ln 2) = 0.25 \frac{CU_{\max}^2}{\tau} \quad (5)$$

然后,将  $t = \tau \ln 2$  代入式(1),可以得到 EHR 达到最大值时的电容电压值:

$$U^* = U(\tau \ln 2) = 0.5U_{\max} \quad (6)$$

例如在图 2 中,  $U^* = 0.5U_{\max} = 1.5V$ 。可以看出,当图 2(a) 中电容器的电压从 0V 增大到  $0.5U_{\max}$  (即 1.5V) 时,

图2(c)中节点的EHR快速增加;当电容器的电压再持续增加时,节点的EHR就会逐渐减小。

### 3 吞吐量分析与问题建模

#### 3.1 网络模型

假设给超级电容器充电的能量捕获电路模块所产生的输出电压是稳定的,该电压表示为 $U_{\max}$ 。此外,传感器模块消耗的能量比通讯模块消耗的能量少很多,这类传感器模块包括光传感器、温度传感器等。因此,感知操作所消耗的能量是微不足道的。同时,与通讯能耗相比,数据处理所消耗的能量也很少,通常可以忽略不计<sup>[10]</sup>。与传输时间相比,数据感知和数据处理的时间较小,可以忽略不计。

#### 3.2 吞吐量分析

当节点电压降到 $U_{th2}$ 从而开始休眠(即开始充电)时,根据式(1)可知电压 $U(t)$ 与充电时间 $t$ 的关系为 $U(t)=U_{\max}+(U_{th2}-U_{\max})e^{-t/\tau}$ 。当电压 $U(t)$ 达到 $U_{th1}$ 而醒来时所经历的充电持续时间 $t_c$ 可通过求解:

$$U_{th1}=U_{\max}+[U_{th2}-U_{\max}]e^{-t_c/\tau} \quad (7)$$

得出,其值为:

$$t_c=\tau \ln \frac{U_{\max}-U_{th2}}{U_{\max}-U_{th1}} \quad (8)$$

在每段充电时间内捕获到的能量为:

$$E_h=0.5C(U_{th1}^2-U_{th2}^2) \quad (9)$$

之后节点开始发送数据,数据发送持续时长 $t_w$ 为:

$$t_w=E_h/P=\frac{C}{2P}(U_{th1}^2-U_{th2}^2) \quad (10)$$

其中, $P$ 为数据发送功率。那么,在工作时间 $t_w$ 内传输的数据包长度 $L_T$ 为:

$$L_T=\lfloor t_w \cdot r \rfloor=\lfloor \frac{rC}{2P}(U_{th1}^2-U_{th2}^2) \rfloor \quad (11)$$

其中, $r$ 为比特传输速率。

定义 $L_o$ 为每个数据包中开销字段的比特长度,这是一个固定的数值,不随数据包总长度的改变而变化。因此,在每个数据包中的数据长度为:

$$L_d=L_T-L_o=\lfloor \frac{rC}{2P}(U_{th1}^2-U_{th2}^2) \rfloor-L_o \quad (12)$$

由于每秒有 $1/(t_c+t_w)$ 个周期,每个周期内将传输一个数据包,且数据包的成功传递率为 $(1-\rho)^{L_T}$ ( $\rho$ 为比特错误率),因此节点的吞吐量为:

$$R=\frac{1}{t_c+t_w}L_d(1-\rho)^{L_T} \\ =\frac{(1-\rho)^{\lfloor rC(U_{th1}^2-U_{th2}^2)/(2P) \rfloor}}{\tau \ln \frac{U_{\max}-U_{th2}}{U_{\max}-U_{th1}}+\frac{C}{2P}(U_{th1}^2-U_{th2}^2)} \times \left[ \frac{rC}{2P}(U_{th1}^2-U_{th2}^2) \right]-L_o \quad (13)$$

#### 3.3 问题建模

基于上述分析,可以对最大化节点吞吐量(Maximal Node Throughput,MNT)问题进行如下建模:

最大化: $R$

优化变量: $U_{th1}, U_{th2}$

满足约束:

$$1) V_{dd} < U_{th1} \leq U_{\max};$$

$$2) V_{dd} \leq U_{th2} < U_{\max};$$

$$3) U_{th2} < U_{th1}.$$

### 4 最佳占空比方案

现在考虑解决MNT问题的实际方案。首先考虑汇聚节点和感知节点中哪一者更适合解决这个问题。由于该问题的复杂性较高,而且感知节点的能量捕获速率非常有限,因此感知节点并不适合解决这个问题。然而,汇聚节点有足够多的能量以及较强的计算能力,可以通过接收控制包或其他方式得知感知节点的 $C, P, e$ 等参数,因此在汇聚节点上解决这个问题是比较实际的,以便获取 $U_{th1}$ 和 $U_{th2}$ 的最佳取值。

其次,考虑解决MNT问题的算法。一些典型的算法(比如内点法)可能可以用来解决这个问题。但是,由于 $V_{dd}$ 并不是很小(比如WISP节点的电压为1.8V),而且 $U_{\max}$ 通常不大(比如从阅读器中捕获射频能量时其输出电压一般都低于5.3V<sup>[3]</sup>),一个获取 $U_{th1}$ 和 $U_{th2}$ 的近似最优值的有效方案就是检测每一组可能的数值, $U_{th2}=V_{dd}+i\Delta U, U_{th1}=V_{dd}+j\Delta U$ ,其中 $\Delta U$ 是一个很小的值(如0.001), $0 \leq i < \frac{U_{\max}-V_{dd}}{\Delta U}, i <$

$j \leq \frac{U_{\max}-V_{dd}}{\Delta U}$ 。因此,本文给出 $U_{th1}$ 和 $U_{th2}$ 的最优取值寻找算法,具体如算法1所示。

#### 算法1 $U_{th1}$ 和 $U_{th2}$ 的最优取值算法

Input:  $U_{\max}, V_{dd}, p, r, C, P, \tau$

Output: values of  $U_{th1}^*$  and  $U_{th2}^*$

1.  $R_{\max} \leftarrow 0$
2. for  $i=0$  to  $\lfloor (U_{\max}-V_{dd})/\Delta U \rfloor$  do
3. for  $j=i+1$  to  $\lfloor (U_{\max}-V_{dd})/\Delta U \rfloor$  do
4.  $U_{th2}=V_{dd}+i\Delta U$
5.  $U_{th1}=V_{dd}+j\Delta U$
6. 根据式(13)来计算  $R$
7. if  $R > R_{\max}$  then
8.  $R_{\max} \leftarrow R$
9.  $U_{th1}^* \leftarrow U_{th1}$
10.  $U_{th2}^* \leftarrow U_{th2}$
11. end if
12. end for
13. end for

算法1的复杂度为 $O(((U_{\max}-V_{dd})/\Delta U)^2)$ 。事实上, $\Delta U=0.001$ 已经足够小,已经能够找到近似的最优方案。

### 5 性能评估

本文将所提出的最佳占空比方案与文献[5]中的占空比方案的吞吐量进行了比较。文献[5]方案的 $U_{th1}$ 和 $U_{th2}$ 两个电压参数分别设置为 $U^*$ 和 $V_{dd}$ 。以下参数取值与文献[3]中的参数取值相似: $V_{dd}=1.8V, P=1.12mW, C=10\mu F, L_o=48\text{bits}, r=100\text{Kbps}, \tau=1$ 。选取其他参数取值也能得到下文所给出的类似结论。

表1展现了两种方案在不同的能量捕获电路输出电压 $U_{\max}$ 下的 $U_{th1}, U_{th2}$ 值以及吞吐量。实验场景为 $U_{\max} > 2V_{dd}$ ,

因此  $U^* = 0.5U_{\max} > V_{dd}$ , 即在这种场景下, 已有方案是可以应用的。从表 1 可以看出, 所提方案的  $(U_{th2}, U_{th1})$  与已有方案是不同的。在已有方案中, 节点的工作时间一直持续到其电容电压降低到所需工作电压  $V_{dd}$  (即  $U_{th2} = V_{dd}$ ) 为止, 然后进入休眠状态, 而节点充电时间一直持续到其电容电压达到  $U^*$  为止。然而在提出的方案中, 节点的工作时间一直持续到其电容电压降到  $U_{th2}$  为止, 显然  $U_{th2}$  是大于  $V_{dd}$  的, 而且节点的充电时间一直持续到其电容电压达到  $U_{th1}$  为止, 而  $U_{th1}$  也

是大于  $U^*$  的, 从而实现节点的最大吞吐量。因此, 所提出的方案能够极大地提高节点的吞吐量。如表 1 所列, 两种方案仅在  $U_{\max} = 3.72\text{ V}$  时具有相近的吞吐量, 在其他情况下, 所提出的最佳占空比方案基本上都优于已有方案。通过运用最佳占空比方案可以明显增大节点的吞吐量。例如, 当  $U_{\max} = 3.90\text{ V}$  时, 最佳占空比方案比已有方案的吞吐量提高了 194.25%。另外, 可以清楚看出, 随着  $U_{\max}$  的增加, 最佳占空比方案所带来的性能提高量也快速增加。

表 1 不同  $U_{\max}$  下的吞吐量 ( $p=0.01$ )

Table 1 Throughput under different  $U_{\max}$  ( $p=0.01$ )

$U_{\max}/\text{V}$	$U^*/\text{V}$	已有方案		所提方案		提高量/%
		$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	
3.70	1.85	1.80, 1.85	531.99	1.812, 1.871	564.95	6.20
3.72	1.86	1.80, 1.86	570.54	1.812, 1.871	570.85	0.05
3.74	1.87	1.80, 1.87	553.81	1.831, 1.890	576.80	4.15
3.76	1.88	1.80, 1.88	517.55	1.831, 1.890	582.75	12.60
3.78	1.89	1.80, 1.89	470.70	1.858, 1.915	588.77	25.08
3.80	1.90	1.80, 1.90	420.89	1.878, 1.935	594.83	41.33
3.82	1.91	1.80, 1.91	372.10	1.878, 1.935	600.91	61.49
3.84	1.92	1.80, 1.92	326.35	1.878, 1.935	607.00	85.99
3.86	1.93	1.80, 1.93	284.56	1.932, 1.988	613.12	115.47
3.88	1.94	1.80, 1.94	247.02	1.932, 1.988	619.37	150.74
3.90	1.95	1.80, 1.95	212.61	1.932, 1.988	625.61	194.25

表 2 列出了不同的比特错误率  $p$  下两种方案的吞吐量。从表中可以发现, 只有当  $p$  接近于 0.002 时, 两种方案才有近似的吞吐量。在其他情况下, 最佳占空比方案明显优于已有方案。如当  $p=0.016$  时, 最佳占空比方案比已有方案的吞吐量提高了 123.58%。另外, 可以看出, 随着  $p$  的增加, 最佳占空比方案带来的性能提高量也快速增加。

表 2 不同比特错误率下的吞吐量 ( $U_{\max} = 3.80\text{ V}$ )

Table 2 Throughput under different bit error rate ( $U_{\max} = 3.80\text{ V}$ )

$p$	已有方案		所提方案		提高量/%
	$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	
0.002	1.80, 1.90	1588.18	1.849, 1.955	1596.52	0.53
0.004	1.80, 1.90	1140.65	1.850, 1.930	1171.21	2.68
0.006	1.80, 1.90	818.68	1.853, 1.923	910.45	11.20
0.008	1.80, 1.90	587.20	1.866, 1.928	729.18	24.18
0.010	1.80, 1.90	420.89	1.878, 1.935	594.83	41.33
0.012	1.80, 1.90	301.48	1.846, 1.901	491.69	63.09
0.014	1.80, 1.90	215.80	1.848, 1.900	410.40	90.18
0.016	1.80, 1.90	154.37	1.873, 1.922	345.14	123.58
0.018	1.80, 1.90	110.35	1.866, 1.914	292.10	164.72
0.020	1.80, 1.90	78.82	1.877, 1.923	248.29	214.99

表 3 展现了不同的电容  $C$  对两种方案的吞吐量的影响。从表中可以看出, 随着电容器的电容的增大, 已有方案的吞吐量先增大再减小, 而最佳占空比方案的吞吐量则快速增大。

表 3 不同电容值下的吞吐量 ( $U_{\max} = 3.80, p=0.010$ )

Table 3 Throughput under different capacitance

( $U_{\max} = 3.80, p=0.010$ )

$C/\mu\text{F}$	已有方案		所提方案		提高量/%
	$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	$U_{th2}/\text{V}, U_{th1}/\text{V}$	吞吐量/bps	
5	1.80, 1.90	286.13	1.849, 1.963	302.14	5.60
10	1.80, 1.90	420.89	1.878, 1.935	594.83	41.33
15	1.80, 1.90	309.17	1.887, 1.925	878.79	184.24
20	1.80, 1.90	187.37	1.878, 1.907	1153.84	515.81

总之, 在 EH-WSN 中, 所提方案通过优化  $U_{th1}, U_{th2}$  的取值来改变节点的占空比, 使得在绝大多数情况下, 节点的吞吐量有了明显的提高。

**结束语** 针对能量捕获速率极低且节点内置有超级电容器作为节点能量存储器的能量捕获无线传感网, 本文首先从理论上证明了节点能量捕获速率取决于即时电容器的电压值; 然后对于能量源稳定且节点工作在固定占空比模式下的能量捕获无线传感网, 以工作电压和休眠电压这两个参数为变量, 对最大节点吞吐量问题进行建模; 最后提出了一种解决该问题的最优化方法。数值结果表明, 在绝大多数情况下, 相较于已有方案, 最佳占空比方案的吞吐量有明显的提高, 在某些场景中, 其吞吐量的增加量甚至几倍于原有方案的吞吐量。

### 参考文献

- [1] KANSAL A, HSU J, ZAHEDI S, et al. Power management in energy harvesting sensor networks[J]. ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 2006, 6(4): 1-38.
- [2] BANDYOPADHYAY S, CHANDRAKASAN A. Platform architecture for solar, thermal and vibration energy combining with MPPT and single inductor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(9): 2199-2215.
- [3] ULUKUS S, YENER A, ERKIP E, et al. Energy harvesting wireless communications: A review of recent advances[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360-381.
- [4] BI S, ZENG Y, ZHANG R. Wireless powered communication networks: An overview [J]. IEEE Wireless Communications, 2016, 23(2): 10-18.
- [5] DONG Y, WANG J, SHIM B, et al. DEARER: A Distance-and-

- Energy-Aware Routing With Energy Reservation for Energy Harvesting Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(12): 3798-3813.
- [6] KOSUNALP S. MAC protocols for energy harvesting wireless sensor networks; Survey[J]. ETRI Journal, 2015, 37(4): 804-812.
- [7] SAMPLE A, YEAGER D, POWLEDGE P, et al. Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2608-2615.
- [8] FU L, CHENG P, GU Y, et al. Minimizing charging delay in wireless rechargeable sensor networks[C]// IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Turin: IEEE Press, 2013: 2922-2930.
- [9] ZHANG P, GANESAN D. Enabling bit-by-bit backscatter communication in severe energy harvesting environments[C]// Proceedings of NSDI'14. Seattle: USENIX, 2014.
- [10] RAGHUNATHAN V, SCHURGERS C, PARK S, et al. Energy-aware wireless microsensor networks[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(2): 40-50.

(上接第 75 页)

测大数据, 本文提出了 MAO-DRLS 策略, 并取得了较为满意的实验结果。本文的主要贡献有: 1) 根据海洋监测大数据在周期内的访问频率, 提出以数据副本的热度值来衡量数据受欢迎的程度, 对受欢迎程度高的数据建立较多的副本, 提升了海洋监测大数据的响应速度; 2) 对数据副本的个数范围进行了定义和计算, 在能够保证数据可靠性的前提下保留尽可能少的副本, 有效地避免了由于副本个数过少所导致的数据可用性低以及由于副本个数过多所造成的系统存储空间浪费的问题, 减少了数据冗余度; 3) 综合考虑了存储节点的访问量、节点响应比和节点带宽 3 个关键属性, 采用 TOPSIS 方法对多个属性构造矩阵, 从而找到了最适合的存储节点, 对数据副本进行了合理的布局, 有效地缩短了系统的响应时间。

### 参 考 文 献

- [1] ZHANG Y, CHEN C, FENG D G. Fine-Grained mandatory query access control model and its efficient realization for spatial vector data[J]. Journal of Software, 2011, 22(8): 1872-1883. (in Chinese)  
张妍, 陈驰, 冯登国. 空间矢量数据细粒度强制查询访问控制模型及其高效实现[J]. 软件学报, 2011, 22(8): 1872-1883.
- [2] ZHANG K. Study of ocean visualization parallel computing framework based on GPU-Hadoop[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014. (in Chinese)  
张凯. 基于 GPU-hadoop 的海洋环境信息可视化并行计算框架研究与实现[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [3] STATECZNY A, WLODARCZYK-SIELICKA M. Self-organizing artificial neural networks into hydrographic big data reduction process[C]// International Conference on Rough Sets and Intelligent Systems Paradigms. Springer International Publishing, 2014: 335-342.
- [4] LIU D J, LIU G H, LIU Z Q, et al. On modeling and querying of text corpora[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2015, 36(8): 1711-1716. (in Chinese)  
刘鼎甲, 刘国华, 刘泽权, 等. 面向文本语料库的数据模型及其查询问题[J]. 小型微型计算机系统, 2015, 36(8): 1711-1716.
- [5] FARRINGTON J W. Oil pollution in the marine environment I: inputs, big spills, small spills, and dribbles[J]. Environment, Science and Policy for Sustainable Development, 2013, 55(6): 3-13.
- [6] TAN S, JIA Y, HAN W H. Research and Development of Provable Data Integrity in Cloud Storage[J]. Chinese Journal of Computers, 2015, 38(1): 164-177. (in Chinese)  
谭霜, 贾焰, 韩伟红. 云存储中的数据完整性证明研究及进展[J]. 计算机学报, 2015, 38(1): 164-177.
- [7] LIU X, SAYDAH B, ERANKI P, et al. Pilot-scale data provide enhanced estimates of the life cycle energy and emissions profile of algae biofuels produced via hydrothermal liquefaction[J]. Bioresource Technology, 2013, 148(8): 163-171.
- [8] DEYLAMSALEHI A, AFSHARLAR P, VOKKARANE V M. Real-time energy price-aware any cast RWA in optical data center networks[C]// 2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2016: 1-6.
- [9] LONG S Q, ZHAO Y L, CHEN W. MORM: A Multi-objective Optimized Replication Management strategy for cloud storage cluster[J]. Journal of Systems Architecture, 2014, 60(2): 234-244.
- [10] MAO B, WU S, JIANG H. Improving storage availability in cloud-of-clouds with hybrid redundant data distribution[C]// IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS). IEEE, 2015: 633-642.
- [11] MANSOUR L, MOUSSAOUI S. RDAP: Requested data accessibility protocol for vehicular sensor networks[C]// International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT). IEEE, 2013: 1-5.
- [12] TU M, MA H, XIAO L, et al. Data placement in P2P data grids considering the availability, security, access performance and load balancing[J]. Journal of Grid Computing, 2013, 11(1): 103-127.
- [13] GUAN C, LUH P B, MICHEL L D, et al. Very short-term load forecasting: wavelet neural networks with data pre-filtering[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 30-41.
- [14] VINES T H, ALBERT A Y K, ANDREW R L, et al. The availability of research data declines rapidly with article age[J]. Current biology, 2014, 24(1): 94-97.
- [15] XU J, KONG M, LIN A, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED[J]. Optics Communications, 2016, 369: 100-105.