

基于无迹卡尔曼滤波估计的无线传感器网络时钟分辨率优化

何 灏* 易卫东 陈永锐 王 喆

(中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100041)

摘 要: 在无线传感器网络(WSN)节点的无线电关闭期间,用以维护系统时钟的硬件定时器中断请求(IRQ)是微控制单元(MCU)能耗的重要来源,此时中断频率对WSN节点总能耗影响较大。该文提出一种基于无迹卡尔曼滤波(UKF)估计的时钟分辨率优化方法,根据协议的时间特性来切换中断高低频率。在休眠期间切换到低分辨率,需要唤醒时先通过UKF获得高分辨率计时开始时间的最优估计,再通过分辨率渐变的定时器中断的线性组合来进入高分辨率计时。对Tmote平台的ContikiMAC协议进行的仿真实验中,在无线电占空比(RDC)为0.53%的情况下,所提方法比原始协议总能耗下降28.85%。

关键词: 无线传感器网络; 无线电占空比; 定时器中断请求; 能量节约; 无迹卡尔曼滤波

中图分类号: TN393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0687-07

DOI: 10.11999/JEIT171049

WSN Timer Resolution Adjustment Based on UKF Approach

HE Hao YI Weidong CHEN Yongrui WANG Zhe

(School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100041, China)

Abstract: During the radio-off periods of Wireless Sensor Network (WSN) node, the timer Interrupt ReQuest (IRQ) which used to maintain the system clock become an important energy consumption source of Micro Controller Unit (MCU), thus the IRQ frequency has a great influence on WSN node total energy consumption. A timer resolution adjustment method based on Unscented Kalman Filter (UKF) approach is proposed, which switches high and low IRQ frequencies according to the characteristics of the protocol. Being at a low frequency during sleep period, if a node needs to switch to wake-up period, it will first obtain the optimal estimation of the start time of high resolution timing period by UKF, then enter the high resolution timing period after a linear combination of a group of gradual-changing resolution timer IRQ. The simulations of ContikiMAC protocol on the Tmote platform are conducted. When the Radio Duty Cycle (RDC) is 0.53%, the proposed method reduces the total power consumption by 28.85% compared to the original protocol.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); Radio Duty Cycle (RDC); Timer Interrupt ReQuest (IRQ); Energy conservation; Unscented Kalman Filter (UKF)

1 引言

受网络节点的体积和成本等资源制约,能源问题成为无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)的一大挑战。能量节约技术是研究主流,基本思想是减少单位时间内的能耗,延长网络生命周期。一个WSN节点的能耗来源主要包括:无线电

模块、微控制单元(Micro Controller Unit, MCU)和各类外设(如传感器)。无线电模块和MCU为WSN不可缺少的部分,而各类外设由具体应用决定,本文不展开讨论。通常,无线电模块的工作电流比MCU高约3个数量级(无线电模块的流耗单位一般是mA,而MCU的流耗单位一般是 μA)。相同时间内,节点无线电的能耗远大于MCU,通过降低无线电模块的能耗可以有效降低节点的总能耗,因此如何降低无线电占空比(Radio Duty Cycle, RDC)或发射能耗一直是WSN节能的研究热点。对于MCU节能,其节能技术大多仅针对MCU本身,很少与WSN协议特性结合。

从WSN协议角度来看,不同层有着各自的无

收稿日期: 2017-11-13; 改回日期: 2018-12-19; 网络出版: 2018-12-24

*通信作者: 何灏 hehao_12@163.com

基金项目: 国家科技支撑计划(Y2140161A5), 国家863计划(OS12041A04)

Foundation Items: The National Science and Technology Support Program (Y2140161A5), The National 863 Program of China (OS12041A04)

线电能耗控制方法,主要目标是降低RDC和发射功率:网络层有能量感知路由和重传控制机制等;介质访问控制层有介质访问控制(Media Access Control, MAC)/RDC协议;物理层则有无线电发射功率动态调节机制。由于活动时段内的无线电开销远大于其他开销,MAC^[1,2]协议是能耗控制的一个重要研究方向,通过周期性地将节点在休眠与活动状态间切换,降低RDC。但在低RDC^[3]的情况下,节点空闲时段的能耗在整体能耗中占比增大,而空闲时段的能耗主要来自MCU。在能量控制的综述^[4,5]里,提到了CPU的动态电压、频率调节(Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS)^[6,7]和动态电源管理(Dynamic Power Management, DPM)^[8],其基本思想是动态调整CPU电压和时钟等参数。Gutnik等人^[9]证实了该方法可以节省30%~50%的能耗。这些方法对于硬件有较高要求,实现算法也相对复杂。文献^[10]指出定时器中断请求(IRQ)是MCU能耗开销的一个重要因素。系统使用硬件定时器IRQ来周期性地更新操作系统中的软件时钟,也称作操作系统时钟。操作系统时钟的分辨率比硬件定时器低,可被系统中的各应用访问,以维持正常的工作调度。

由于每一次IRQ都会消耗能量,所以MCU的能耗与IRQ的频率有关。当定时器IRQ频率越高,中断间隔越小,操作系统时钟分辨率越高,MCU能耗也越大。因此,在空闲时段内,如果节点仅仅等待下次唤醒或通信而不需要精确进行其他调度,就可通过降低定时器中断请求的频率来节约能耗,即低分辨率模式;在活动时段内,切换到较高中断频率来给软件时钟提供精确计时,即高分辨率模式。据目前所知,依据WSN协议的时间特性来对MCU进行节能的研究几乎没有。因此,本文根据WSN协议的时间特性,提出一种用于MCU节能的时钟分辨率优化方法,降低整体能耗。

本文第2节介绍MCU定时器IRQ和系统时钟关系模型,引出高低分辨率切换存在的问题;第3节在此基础上,提出基于无迹卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)估计的前置切换时间渐变分辨率计时方法,减少前置切换时间时长,以及减少前置切换时间内的定时器中断次数,进而降低能耗;第4节通过4组实验,从不同角度、不同条件考察本文方法的节能效果;第5节对本文内容进行总结。

2 问题描述

大多数硬件手册都使用流耗来衡量电子器件的能耗。一个WSN节点的能耗可以分为两类:活动时段开销与空闲时段开销。本文查看了一些主流

WSN节点的参数^[11-13],它们在通信时的典型流耗一般为10~30 mA,而空闲时段MCU低功耗模式的开销一般为0.5~10 μ A。两者流耗相差了2,3个数量级,这往往让人认为空闲时段节能并不重要。但随着WSN协议的发展和RDC的降低,节点通信的等效流耗降低,空闲时段能耗所占比例上升。例如,如果一个协议的RDC为10%,主流节点通信的等效流耗为1~3 mA。

在空闲时段,无线电模块与MCU都处于待机状态,此时能耗主要包括3部分:无线电模块的流耗、MCU内核的流耗和定时器中断产生的流耗。待机的无线电模块和MCU内核的流耗基本恒定,主要取决于具体型号,例如德州仪器的CC2420芯片在待机模式下的流耗为1 μ A,而Tmote-sky节点MCU的待机流耗为5.1 μ A。如图1所示,由于每一次定时器中断请求(IRQ)都会消耗能量,所以MCU的流耗在不同的IRQ频率下会有很大不同。通过测量运行Contiki OS^[14,15]的Tmote-sky平台,可以发现:当操作系统以不同的定时器IRQ频率运行时,MCU在待机状态的流耗并不固定。如表1所示,IRQ频率越高,流耗越大。随着MCU定时器中断频率的降低,MCU在待机状态下流耗也逐渐降低,并且存在 $I_{mc} = I_{kn} + I_{IQ} / T_R$ 的线性关系。其中, I_{mc} 代表MCU的流耗; I_{kn} 代表MCU内核的流耗; I_{IQ} 表示1次定时器中断的流耗; T_R 为时钟分辨率, T_R 越小,分辨率越高。假设有一段1000 ms的空闲时间,1 ms与8 ms的时钟分辨率都能够准确进入下一个活动时段,但相比1 ms,8 ms的分辨率可以使平均能耗降低108 μ A。

由于MCU可通过降低IRQ频率来降低能量开销,所以可根据WSN协议的时间特性改变节点在不同时段内的定时器中断频率。这样既可以满足在

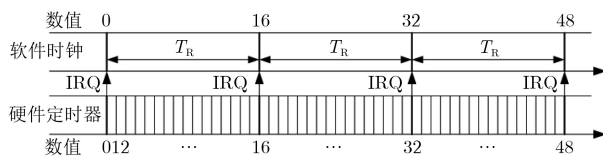


图1 使用硬件定时器中断周期性更新操作系统软件时钟

表1 不同中断频率时, Tmote-sky的MCU在待机状态的流耗

定时器IRQ频率(Hz)	时钟分辨率(ms)	MCU流耗(μ A)
1024	1	130
512	2	68
128	8	22
16	64	8
1	1000	6

活动时段内对时间分辨率的要求，又可以降低在空闲时段内MCU的能耗。一般的WSN协议只有在保护时间、同步、通信等调度时才需要较高的时间分辨率，而调度事件通常有着特定的周期性时间规律。因此如图2所示，将一段特定时间(可以是1帧)内的时间划分为活动时段与空闲时段，同时将分辨率模式分为高分辨率模式(HR)与低分辨率模式(LR)。

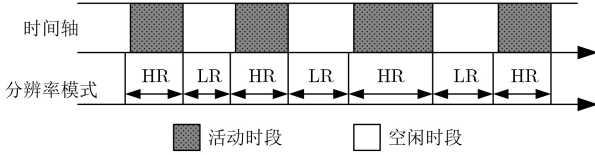


图2 不同时段的高低分辨率切换

当WSN协议即将进入活动时段时，MCU提前将分辨率切换至HR模式，以保证计时的准确性。这段提前切换的时间称之为前置切换时间(pre-switch period)，用来防止错过正常的调度事件，如图3所示。如果保护时间段内的时钟分辨率太低，当事件触发条件满足时，通过中断更新的系统时钟可能已经超过了预先设定的保护时间。如果在 T_1 时刻没有进行计时模式切换，那么在活动时段内，MCU在 $T_1 + T_{LR}$ 时刻才进入HR模式。当 T_{LR} 变大时，超过保护时间的风险升高，可能造成调度事件不能被及时触发。

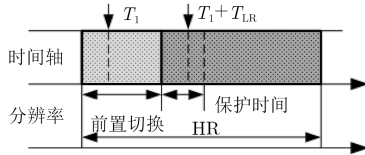


图3 前置切换时间

为确保在活动时段开始时，准确地进行HR计时，前置切换时间应不小于 T_{LR} ，这里取 T_{LR} (T_{LR} 为LR模式下的最小计时单位)，并将分辨率直接切换至HR模式。于是，空闲时段的流耗为

$$I_1 = \frac{nI_{HR}T_{LR} + I_{LR}[T_c - (nT_{LR} + T_w)]}{T_c - T_w} \quad (1)$$

其中， T_{LR} 是LR模式定时器中断的间隔， T_{HR} 是HR时段定时器中断的间隔， T_c 为1帧的长度， T_w 代表1个特定周期内的活动的总时长， n 表示1个周期内的唤醒次数。代入表1的线性关系可以得到

$$I_1 = \{nI_{HR}T_{LR} + [(I_{HR} - I_{kn})T_{HR}/T_{LR} + I_{kn}] \cdot [T_c - (nT_{LR} + T_w)]\} T_c \quad (2)$$

式中，第1项前置切换时间被设为 T_{LR} 并且以HR方式进行计时。由于活动时段的时长并不确定，进入

空闲时段的时长也不确定，将 T_{LR} 作为前置切换时间，提前进入HR计时的方法可以确保在活动时段开始的那一刻已经处于HR计时状态。然而，随着 T_{LR} 的变大，前置切换时间增加，HR计时的能耗也随之上升。此外，随着唤醒次数增多，其间HR计时的能耗也会增加。

综上，直接切换方法中存在两个问题：(1)前置切换时间的时长。前置切换时间依赖于LR大小，采用 T_{LR} 的时长相对保险，但浪费能量。若能准确估计出空闲时长，就可以缩短前置切换时间。不但能减少前置切换时间中HR中断的次数， T_{LR} 也可以进一步增加，两者都可减少中断能耗。(2)前置切换时间中的分辨率。前置切换时间中，使用HR计时并非必要，只需在活动时段开始的时间点处于HR即可，保护时间也有一定容错能力。所以，本文考虑采用一种高低分辨率渐变的方法来过渡，降低前置切换时间中的中断能耗。

3 基于UKF估计的前置切换时间渐变分辨率计时

为解决上述两个问题，本文提出一种基于无迹卡尔曼滤波(UKF)估计的前置切换时间渐变分辨率计时方法。首先，使用UKF来准确估计HR计时的开始时间，缩短前置切换时间；再通过分辨率渐变的中断的线性组合来进入HR计时，减少前置切换时间中的能耗开销。本方法根据调度的精度要求来选择合适的分辨率中断频率，可在不影响节点正常工作调度的情况下，通过降低定时器中断频率来降低空闲时段内MCU的能耗。

3.1 基于UKF估计的前置切换时间

由于每次通信的时间并不总是确定的，而时间点读数也可能存在误差，所以前置切换时间并不确定。并且由于外部环境和WSN协议的不同，系统可能表现出非线性的行为。为对这种系统进行处理，本文引入无迹卡尔曼滤波^[16-22]方法，以无迹变换(Unscented Transformation, UT)^[23]为基础，采用卡尔曼线性滤波框架，使用UT来处理均值和协方差的非线性传递，通过状态转换矩阵预测下一点。UT的一个重要思想是，近似一种概率分布比近似任意一个非线性函数或非线性变换更容易，用一组确定的采样点来近似后验概率 $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{Z}_k)$ 。这里 \mathbf{Z}_k 是 k 时刻为止，所有测量值的集合； \mathbf{x} 是状态变量。

已知一个离散过程系统，该系统的状态方程和观测方程可以用差分方程来表示

$$\mathbf{X}(k) = g[\mathbf{U}(k-1)] + \mathbf{W}(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{Z}(k) = h[\mathbf{X}(k-1)] + \mathbf{V}(k) \quad (4)$$

其中, $\mathbf{X}(k)$ 为 k 时刻的系统状态, 此处即为通信时间 T_{cm} , $\mathbf{U}(k)$ 是 k 时刻的系统控制变量, $\mathbf{Z}(k)$ 是 k 时刻的观测值。 $\mathbf{W}(k)$ 和 $\mathbf{V}(k)$ 分别表示过程噪声和测量噪声, 协方差分别为 \mathbf{Q} 和 \mathbf{R} , 假设其为不相关高斯白噪声。系统的过程模型 g 和观测模型 h 都是非线性的。

(1)状态初始条件:

$$\bar{\mathbf{x}}_{0|0} = \mathbf{E}(\mathbf{x}_{0|0}) \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_{0|0} = \mathbf{E}\left[(\mathbf{x}_{0|0} - \bar{\mathbf{x}}_{0|0})(\mathbf{x}_{0|0} - \bar{\mathbf{x}}_{0|0})^{\text{T}}\right] \quad (6)$$

(2)Sigma点采样:

$$\chi_{i,k-1|k-1} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \\ \bar{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \left(\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k-1|k-1}}\right)_i^{\text{T}} \\ \bar{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} - \left(\sqrt{(n+\lambda)\mathbf{P}_{k-1|k-1}}\right)_i^{\text{T}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, i 代表第 i 列。

(3)预测: 通过过程模型变换Sigma点

$$\chi_{i,k|k-1} = g[\chi_{i,k-1|k-1}] \quad (8)$$

计算变换后的Sigma点的均值和协方差

$$\bar{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_m^{(i)} \chi_{i,k|k-1} \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_{\chi\chi,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_c^{(i)} \left[(\chi_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \cdot (\chi_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{x}}_{k|k-1})^{\text{T}} \right] + \mathbf{Q}_{k-1} \quad (10)$$

其中, $\chi_{i,k|k-1}$ 是矩阵 $\chi_{k|k-1}$ 的第 i 列, $i=0, 1, \dots, 2n$ 。 \mathbf{Q}_{k-1} 是过程噪声协方差。

(4)观测更新: 通过观测模型变换Sigma点

$$\mathbf{z}_{i,k|k-1} = h[\chi_{i,k|k-1}] \quad (11)$$

变换后Sigma点的预测观测值

$$\bar{\mathbf{z}}_{k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_m^{(i)} \mathbf{z}_{i,k|k-1} \quad (12)$$

计算状态量和观测值之间的协方差

$$\mathbf{P}_{\chi z,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_c^{(i)} (\chi_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \cdot (\mathbf{z}_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{z}}_{k|k-1})^{\text{T}} \quad (13)$$

计算新息序列的协方差

$$\mathbf{P}_{zz,k|k-1} = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_c^{(i)} (\mathbf{z}_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{z}}_{k|k-1}) \cdot (\mathbf{z}_{i,k|k-1} - \bar{\mathbf{z}}_{k|k-1})^{\text{T}} \quad (14)$$

UKF中其余的更新过程方程

$$\mathbf{K}_{g_k} = \mathbf{P}_{\chi z,k|k-1} \mathbf{P}_{zz,k|k-1}^{-1} \quad (15)$$

$$\bar{\mathbf{x}}_{k|k} = \bar{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_{g_k} (\mathbf{z}_k - \bar{\mathbf{z}}_{k|k-1}) \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = \mathbf{P}_{k|k-1} - \mathbf{K}_{g_k} \mathbf{P}_{zz,k|k-1} \mathbf{K}_{g_k}^{\text{T}} \quad (17)$$

以上便是UKF算法过程。其中, $\bar{\mathbf{x}}$ 为状态量均值, $\bar{\mathbf{z}}$ 为观测值均值; $\mathbf{P}_{\chi\chi}$, $\mathbf{P}_{\chi z}$, \mathbf{P}_{zz} 分别代表 χ 与 χ 之间, χ 与 z 之间, z 与 z 之间的协方差矩阵; \mathbf{K}_g 为卡尔曼增益。本文通过把上一次的通信时间作为观测值 ($\chi_{i,k|k-1}$) 输入, UKF每次更新都会递推均值 $\bar{\mathbf{x}}_{k|k}$ 和协方差 $\mathbf{P}_{k|k}$, 并且获得本次通信时间 T_{cm} 的最优估计 ($\bar{\mathbf{z}}_{k|k-1}$), 进而获得当前前置切换时间

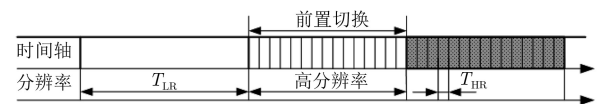
$$T_{\text{ps}}(k) = [T_{\text{pi}}(k) - T_{\text{cm}}(k)] \% T_{\text{LR}} \quad (18)$$

其中, T_{pi} 是发包间隔。容易看出, 得到的 T_{ps} 的上限是 T_{LR} , 即 $T_{\text{ps}} < T_{\text{LR}}$ 。这也意味着 T_{ps} 时长的定时器中断次数少于 T_{LR} 时长的中断次数, 更少的定时器中断次数意味着更低的能耗开销。即通过UKF获得的 T_{ps} 相比 T_{LR} 更加精确, 期间能耗更低, 这也是本文引入UKF方法的意义所在。

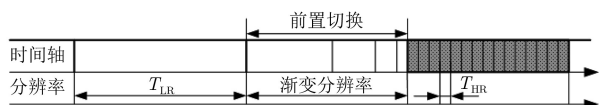
3.2 前置切换渐变分辨率计时

在得到本次前置切换时间的最优估计后, 就可通过一组分辨率逐渐增加的中断的线性组合来逼近这段时间, 越接近下次活动时段开始时间, 分辨率越高。如图4(a)所示, 用较少的中断次数, 让时钟在下次活动时段开始的时间点进入高分辨率计时。作为对比, 图4(b)为直接切换方法。在硬件上实现时, 节点MCU的定时器中断通过一定的定时器分频机制来实现不同频率, 中断频率通常是 2^n 。例如在Contiki OS中, 默认定时器中断频率为128 Hz, 一般不超过1024 Hz。这样, 可以用 $T_{\text{R}} = f_t / f_{\text{IQ}}$ 计算分辨率。其中, f_t 为硬件定时器计数频率, f_{IQ} 为定时器中断频率, T_{R} 为时钟分辨率, 即两次中断之间的定时器计数值。

前置切换时间可以通过不同分辨率的线性组合得到 $T_{\text{ps}} = \sum_{k=1}^N C(k) T_{\text{R}}(k)$ 。由于中断频率是 2^n ,



(a) 渐变切换, 前置切换时间内使用渐变分辨率



(b) 直接切换, 前置切换时间内使用高分辨率(HR)

■ 活动时段 □ 空闲时段

图4 前置切换时间的不同定时器中断模式

存在一个整数 a ，前置切换时间满足 $2^a \leq T_{ps} \leq 2^{a+1}$ 。其中， T_{ps} 时间内的中断次数小于 $a+1$ ；而采用直接切换的方法，中断次数为 T_{LR}/T_{HR} 。在 T_{HR} 一定时， T_{LR} 越大，前置切换时间中节约的能量越多。

3.3 前置切换时间估计的置信区间

假设通信时长服从正态分布 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ ，样本为 $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ 。为保证估计具有一定的置信度，需要均值 μ 的置信区间长度满足一定条件。考虑1000个样本，99.99%置信度时候的情形。根据正态分布相关公式， μ 的置信区间长度 Δ 为

$$\begin{aligned} \Delta &= (\bar{X} + u_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n}) - (\bar{X} - u_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n}) \\ &= 2u_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n} \end{aligned} \quad (19)$$

其中， $u_{\alpha/2}$ 为标准正态分布在置信区间内的面积， σ 为标准差， n 为样本数。当置信度满足一定要求时，可以得到 $u_{\alpha/2}$ 的值，进而计算出置信区间长度 Δ 的值。需注意的是，如果通信时长变化较大， σ 也会增大，置信区间也会随之增加。可以通过延长保护时间来确保满足置信度要求。

4 实验与分析

为验证所提方法的节能效果，本文在Tmote Sky平台上进行了对比实验。操作系统为Contiki OS，硬件定时器频率为32 kHz，MAC协议为Con-

tikiMAC。ContikiMAC协议参数配置灵活，适合观察本文方法在不同条件下对不同协议整体能耗的影响，可以通过改变发包间隔或改变LPL速率等方法来改变RDC。

实际运行中，Tmote节点的定时器IRQ取1024次/s作为HR频率，再高系统就可能出现不可预知的异常。对比未切换到低分辨率计时的原始协议、直接切换分辨率和本文基于UKF的时钟分辨率渐变优化方法的能耗情况。由于无法直接实时获取无线模块和MCU内部流耗，本实验基于Tmote Sky硬件手册数据，使用Contiki的Energest模块和示波器等测量仪器帮助统计，以通信时长、唤醒周期、发包间隔、不同分辨率能耗等实测数据为基础在计算机中仿真MCU能耗，取1000次采样数据平均值。根据置信区间的计算公式 $\Delta = 2u_{\alpha/2} \cdot \sigma / \sqrt{n}$ ，计算ContikiMAC采样样本得到的标准差 σ 为4.21，当 $1 - \alpha = 99.99\%$ 时， $u_{\alpha/2}$ 为4.0，可计算出置信区间长度 Δ 的值应该至少为1.07 ms，因此将保护时间设为2 ms。

本文进行了4组实验：在HR一定的情况下，分别对比不同LR，不同唤醒次数，不同发包间隔，不同RDC条件下的整体平均能耗，考察不同参数对于几种方法整体能耗的影响。所得结果均以等效总流耗表示，具体参数如表2所示。

表2 实验参数

实验	HR频率(Hz)	LR频率(Hz)	唤醒次数 n	发包间隔(s)	RDC(%)
不同低分辨率	1024	4, 8, 16, 32, 64, 128, 256	2	4	-
不同唤醒次数	1024	32	2, 4, 6, 8, 10, 12	4	-
不同发包间隔	1024	16	1	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16	-
不同RDC	1024	16	-	-	0.53, 1.07, 2.14, 4.27, 8.55

(1)不同LR实验：将两次发包之间唤醒次数为2，对不同LR的能耗进行对比，LR频率为4~256 Hz，发包间隔均为4 s。实验结果如图5所示，对于直接切换，LR频率为32 Hz时候，整体能耗最低。因为LR频率降低，前置切换时间中的HR计时能耗增加；而LR频率升高，空闲时段中的能耗又会增加。基于UKF的渐变切换能耗随着LR频率升高而增加，LR频率小于256 Hz时，能耗低于其他方法；大于256 Hz之后，能耗大于直接切换法，但LR一般不高于256 Hz。典型地，当LR中断频率64 Hz，发包间隔内2次唤醒时，本文UKF渐变切换方法的能耗为66.8 μ A，相比没有分辨率切换的方法总能耗106.4 μ A，平均总能耗下降37.22%。如果LR中断频率为32 Hz，优化后能耗为62.9 μ A，平均总能耗可以下降40.88%。

(2)不同唤醒次数实验：将LR频率设为32 Hz，发包间隔为4 s，对两次发包之间不同唤醒次数 n 进行对比， n 为2~12。如图6所示，直接切换在唤醒次数递增情况下能耗逐渐升高。基于UKF的渐变

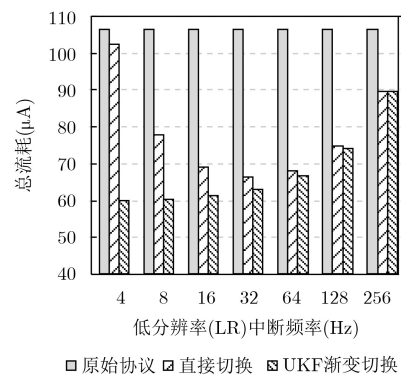


图5 ContikiMAC不同LR时的能耗

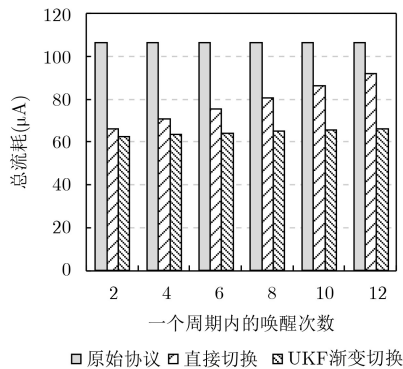


图6 ContikiMAC不同唤醒次数的能耗

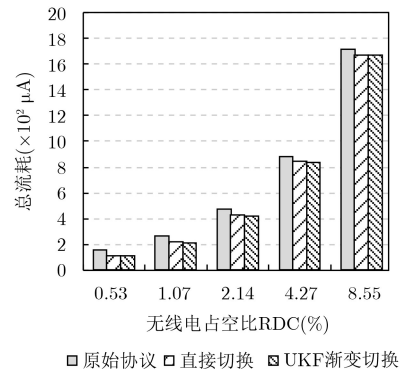


图8 ContikiMAC不同RDC的能耗

切换方法随着唤醒次数递增, 能耗逐渐升高; 相比直接切换, 其前置切换时间中的中断次数少, 能耗低。

(3)不同发包间隔实验: 将LR频率设为16 Hz, 对不同发包间隔进行对比, 发包间隔为2~16 s, 唤醒间隔为2 s 1次。如图7所示, 3种方法能耗随着发包间隔增加, 空闲时间增加, LR的能耗也随之减少。直接切换相比原始协议具有更低能耗, 基于UKF切换的渐变切换方法在各个发包间隔下都有着最低的能耗。

(4)不同RDC实验: 将HR频率设为1024 Hz, LR设为16 Hz。通过改变发包间隔来改变RDC大小, 对不同RDC进行对比。为达到表2中所示的RDC, ContikiMAC可以通过LPL速率来控制RDC, LPL间隔为 125×2^p (ms), 其中 p 为0~4。如图8所示, 3种方法能耗随着RDC增加而增大。基于UKF的渐变切换方法在各个RDC下都有着最低的能耗。对于ContikiMAC协议, 整体能耗比没有分辨率切换的低了大约 $45.7 \mu\text{A}$ 。当RDC为8.55%时, 基于UKF的渐变切换方法比没有分辨率切换的原始协议功耗下降2.46%; 而当RDC为0.53%时, 本方法比原始协议整体能耗下降28.85%。当其他条件固定时, RDC越小, 空闲时段所占比例越高, 节能效果越明显。

通过上述4组实验, 对本文所提方法进行验证。

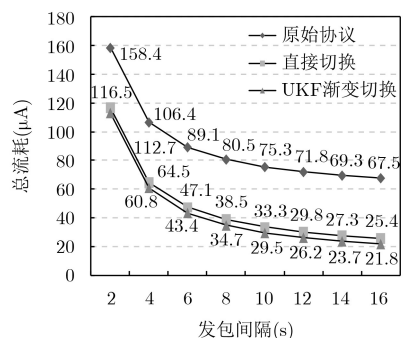


图7 ContikiMAC不同发包间隔的能耗

实验结果显示, 本文基于UKF的渐变分辨率切换方法在常用配置下降低了ContikiMAC协议总能耗。具体节能多少和协议的时间特性有关, 其中有3个因素对能耗影响较大: 定时器中断的低分辨率频率, 唤醒或通信次数, 以及RDC大小。一般说来, 低分辨率频率决定了空闲时段的定时器中断的能耗, 唤醒次数决定了前置切换时间的次数及其能耗, 而RDC大小决定了空闲时段能耗在整体能耗中所占比例。

5 结束语

本文分析了定时器IRQ频率对节点能耗的影响, 提出一种基于时钟分辨率优化的WSN节能方法。其基本思想是在活动时段中采用高分辨率计时, 在空闲时段中切换成低分辨率计时。本文方法通过UKF来估计高分辨率计时的开始时间, 再通过分辨率渐变的线性组合来进入高分辨率计时, 可在不影响节点正常工作调度的情况下, 通过降低定时器中断频率来降低空闲时段内MCU的能耗。本文的主要贡献在于: (1)时钟分辨率优化, 根据WSN协议的时间特性调整时钟分辨率, 以节约空闲时段能耗; (2)分辨率切换优化, 渐变分辨率切换是一个基于时钟分频机制的分辨率线性组合, 可以进一步降低IRQ次数以及前置切换时间内的MCU能耗。通过4组实验, 分别从不同的低分辨率频率, 不同的通信次数, 不同的发包间隔, 以及不同的RDC几个角度验证了本文基于UKF的渐变分辨率切换方法对于减少空闲时段的定时器中断能耗的有效性。对于ContikiMAC协议, 在RDC为0.53%的情况下, 本文方法比原始协议总功耗下降28.85%。当其他条件固定时, 协议的RDC越低, 节能的百分比越高。未来研究可以从减少估计算法复杂度的角度展开。

参考文献

- [1] DJIROUN F Z and DJENOURI D. MAC protocols with

- wake-up radio for wireless sensor networks: A review[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 19(1): 587–618. doi: [10.1109/COMST.2016.2612644](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2612644).
- [2] OLLER J, DEMIRKOL I, CASADEMONT J, *et al.* Has time come to switch from duty-cycled mac protocols to wake-up radio for wireless sensor networks?[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, 24(2): 674–687. doi: [10.1109/TNET.2014.2387314](https://doi.org/10.1109/TNET.2014.2387314).
- [3] DUQUENNOY S, ELSTS A, NAHAS B A, *et al.* TSCH and 6TiSCH for Contiki: Challenges, design and evaluation[C]. International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, New York, USA, 2018: 11–18. doi: [10.1109/DCOSS.2017.29](https://doi.org/10.1109/DCOSS.2017.29).
- [4] PANTAZIS N A and VERGADOS D D. A survey on power control issues in wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2007, 9(4): 86–107. doi: [10.1109/COMST.2007.4444752](https://doi.org/10.1109/COMST.2007.4444752).
- [5] ZHURAVLEV S, SAEZ J C, BLAGODUROV S, *et al.* Survey of energy-cognizant scheduling techniques[J]. *IEEE Transactions on Parallel & Distributed Systems*, 2013, 24(7): 1447–1464. doi: [10.1109/TPDS.2012.20](https://doi.org/10.1109/TPDS.2012.20).
- [6] AKRAM S, SARTOR J B, and EECKHOUT L. DVFS performance prediction for managed multithreaded applications[C]. IEEE International Symposium on PERFORMANCE Analysis of Systems and Software, Uppsala, Sweden, 2016: 12–23. doi: [10.1109/ISPASS.2016.7482070](https://doi.org/10.1109/ISPASS.2016.7482070).
- [7] VARTZIOTIS F, KAVOUSIANOS X, CHAKRABARTY K, *et al.* Time-division multiplexing for testing DVFS-based SoCs[J]. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2015, 34(4): 668–681. doi: [10.1109/TCAD.2015.2394462](https://doi.org/10.1109/TCAD.2015.2394462).
- [8] LI Xin and LIU Qiang. Multi-time-segment dynamic power management for environmentally embedded systems[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(1): 147–152. doi: [10.7652/xjtuxb201701023](https://doi.org/10.7652/xjtuxb201701023).
- [9] GUTNIK V and CHANDRAKASAN A P. Embedded power supply for low-power DSP[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration Systems*, 1997, 5(4): 425–435. doi: [10.1109/92.645069](https://doi.org/10.1109/92.645069).
- [10] CHEN Yongrui, YI Weidong, SUN Hao, *et al.* Tunable time resolution: An energy saving mechanism for wireless sensor networks[J]. *IEEE Communications Letters*, 2015, 19(7): 1201–1204. doi: [10.1109/LCOMM.2015.2430858](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2015.2430858).
- [11] YAN Yan, OSWALD E, and TRYFONAS T. Cryptographic randomness on a CC2538: A case study[C]. IEEE International Workshop on Information Forensics and Security, Rennes, France, 2016: 1–6.
- [12] ZHENG Kan, WANG Huijian, LI Hang, *et al.* Energy-efficient localization and tracking of mobile devices in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(3): 2714–2726. doi: [10.1109/TVT.2016.2584104](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2584104).
- [13] WU Yafeng, LIU K S, STANKOVIC J A, *et al.* Efficient multichannel communications in wireless sensor networks[J]. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 2016, 12(1): 1–23. doi: [10.1145/2840808](https://doi.org/10.1145/2840808).
- [14] DUNKELS A, GRONVALL B, and VOIGT T. Contiki — A lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors[C]. IEEE International Conference on Local Computer Networks, Tampa, USA, 2004: 455–462. doi: [10.1109/LCN.2004.38](https://doi.org/10.1109/LCN.2004.38).
- [15] RAZA S, MISRA P, HE Zhitao, *et al.* Building the internet of things with bluetooth smart[J]. *Ad Hoc Networks*, 2017, 57: 19–31. doi: [10.1016/j.adhoc.2016.08.012](https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2016.08.012).
- [16] WANG Gang, CHEN Hongyang, LI Youming, *et al.* On received-signal-strength based localization with unknown transmit power and path loss exponent[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, 1(5): 536–539. doi: [10.1109/WCL.2012.072012.120428](https://doi.org/10.1109/WCL.2012.072012.120428).
- [17] WANG Jie, GAO Qinghua, WANG Hongyu, *et al.* Robust tracking algorithm for wireless sensor networks based on improved particle filter[J]. *Wireless Communications & Mobile Computing*, 2012, 12(10): 891–900. doi: [10.1002/wcm.1024](https://doi.org/10.1002/wcm.1024).
- [18] CHEN Hongyang, GAO Feifei, MARTINA M, *et al.* Accurate and efficient node localization for mobile sensor networks[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2013, 18(1): 141–147. doi: [10.1007/s11036-012-0361-7](https://doi.org/10.1007/s11036-012-0361-7).
- [19] CHEN Hongyang, LIU Bin, HUANG Pei, *et al.* Mobility-assisted node localization based on TOA measurements without time synchronization in wireless sensor networks[J]. *Mobile Networks & Applications*, 2012, 17(1): 90–99. doi: [10.1007/s11036-010-0281-3](https://doi.org/10.1007/s11036-010-0281-3).
- [20] CHEN Hongyang, SHI Qingjiang, TAN Rui, *et al.* Mobile element assisted cooperative localization for wireless sensor networks with obstacles[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2010, 9(3): 956–963. doi: [10.1109/TWC.2010.03.090706](https://doi.org/10.1109/TWC.2010.03.090706).
- [21] CHEN Hongyang, WANG Gang, WANG Zizhuo, *et al.* Non-line-of-sight node localization based on semi-definite programming in wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(1): 108–116. doi: [10.1109/TWC.2011.110811.101739](https://doi.org/10.1109/TWC.2011.110811.101739).
- [22] CHEN Hongyang and SEZAKI K. Distributed target tracking algorithm for wireless sensor networks[C]. IEEE International Conference on Communications, Kyoto, Japan, 2011: 1–5. doi: [10.1109/icc.2011.5962613](https://doi.org/10.1109/icc.2011.5962613).
- [23] EMAMI K, FERNANDO T, IU H C, *et al.* Application of unscented transform in frequency control of a complex power system using noisy PMU data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(2): 853–863. doi: [10.1109/TII.2015.2491222](https://doi.org/10.1109/TII.2015.2491222).
- 何 灏: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为无线传感器网络、图像处理。
- 易卫东: 男, 1959年生, 教授, 研究方向为物联网技术。
- 陈永锐: 男, 1978年生, 副教授, 研究方向为无线传感器网络、跨技术通信。
- 王 喆: 女, 1992年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络。