

一种基于智能手机传感器的行人室内定位算法

周 瑞, 罗 磊, 李志强, 桑 楠

(电子科技大学 信息与软件工程学院, 成都 610054)

摘 要: 智能手机及其内置惯性传感器的普及可实现室内行人航位推算, 但是由于人行走的随意性以及智能手机内置传感器精度不高, 使定位精度难以满足应用要求。为此, 在分析行人行走模式的基础上, 基于智能手机传感器提出一种新的行人航位推算算法。对采集到的原始加速度数据进行预处理, 采用基于有限状态机的行走状态转换方法识别行走周期并进行计步, 利用卡尔曼滤波, 结合步长-加速度关系以及连续两步步长之间的关系对步长进行估计。实验结果表明, 该算法能够准确计算步数和步长, 从而获得精确的室内定位结果。

关键词: 室内定位; 行人航位推算; 智能手机传感器; 卡尔曼滤波; 步数; 步长

中文引用格式: 周 瑞, 罗 磊, 李志强, 等. 一种基于智能手机传感器的行人室内定位算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(11): 22-26.

英文引用格式: Zhou Rui, Luo Lei, Li Zhiqiang, et al. An Indoor Pedestrian Positioning Algorithm Based on Smartphone Sensor[J]. Computer Engineering, 2016, 42(11): 22-26.

An Indoor Pedestrian Positioning Algorithm Based on Smartphone Sensor

ZHOU Rui, LUO Lei, LI Zhiqiang, SANG Nan

(School of Information and Software Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

[Abstract] Advances on smartphones and built-in inertial sensors have given rise to pedestrian dead reckoning using smartphone sensors. However, an accurate Pedestrian Dead Reckoning (PDR) system using smartphone sensors is not available yet, for smartphone sensors are not accurate enough and pedestrians have natural swings during walking. Based on the analysis of pedestrian walking patterns, a new PDR algorithm using smartphone sensors is proposed. The algorithm first preprocess the original acceleration data, then uses a finite state machine to detect walking gait and thereby counts steps. Step length is estimated by using the relationship between step length and acceleration as well as that between two consecutive steps. And the estimated result is smoothed by Kalman filtering. Experimental results show that the proposed algorithm is able to provide accurate step counts and step length, thus providing accurate location service.

[Key words] indoor positioning; Pedestrian Dead Reckoning (PDR); smartphone sensor; Kalman filtering; step number; step length

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.11.004

0 概述

关于定位和导航研究, 学者们一直在寻求精确可用的室内定位解决方案, 如 WiFi 定位^[1]、射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)定位^[2]、超宽带(Ultra Wideband, UWB)定位^[3]等。由于需要搭建专门的定位设施, 这些方法并未获得广泛应用。基于广泛部署的 WiFi 网络, WiFi 定位是目前室内定位的常用方法, 能够达到 2 m ~ 5 m 的平均精度, 但是不稳定, 采样阶段耗时耗力。智能手持设备及传

感技术的发展为进行室内行人航位推算(Pedestrian Dead Reckoning, PDR)提供了可能。行人航位推算算法根据惯性传感器数据对行走步数、步长和方向进行计算, 获得用户的行走距离和方向。在初始位置已知的情况下, 能够计算出人在任一时刻的位置^[4]。早期行人航位推算算法将惯性传感器固定在人的脚上^[5-6]或躯干上^[7-9], 非常不灵活。基于智能手机的行人航位推算是现今研究的热点, 但是由于人行走的随意性以及手机持握方式的多样性, 基于智能手机的行人航位推算存在更多复杂问题。研究

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAH44F00)。

作者简介: 周 瑞(1974—), 女, 副教授、博士, 主研方向为物联网、无线定位; 罗 磊、李志强, 硕士研究生; 桑 楠, 教授。

收稿日期: 2015-09-10 **修回日期:** 2016-01-12 **E-mail:** ruizhou@uestc.edu.cn

人员提出各种算法来应对这些问题:Agila等人^[10]使用加速度计和电子罗盘来定位行人,并将其与期望的路径相匹配以纠正航位推算的错误;Alzantot等人^[11]使用有限状态机来计步,并通过多类层次支持向量机根据步态变化计算步长;Susi等人^[12]提出一个运动模式识别算法,并据此选择自适应的步数统计算法;Niu等人^[13]使用隐马尔科夫模型对室内行人的行走模式建模,通过识别预定义的行走模式来跟踪行人,以减轻人行走的随意性和周围磁干扰带来的影响。但目前仍缺少精确的基于智能手机的行人航位推算方法。

本文在分析人体行走模式和惯性导航原理的基础上,提出一种基于智能手机的行人航位推算算法,以降低人行走随意性和传感器非精确性带来的负面影响。首先对测得的原始加速度数据进行平滑以降低噪声,然后采用基于有限状态机的行走状态转换方法识别行走周期并进行计步,将卡尔曼滤波结合步长和加速度的关系以及相邻两步步长之间的关系对步长进行估计,而方向的计算则通过加速度传感器和磁力计进行。

1 基于智能手机的行人航位推算算法

1.1 数据预处理

人行走的随意性、智能手机传感器的非精确性以及手机和人体的松散连接会产生噪声。为降低这些干扰数据的影响,行人航位推算算法首先对原始加速度数据进行预处理,采用简单移动平均法(Simple Moving Average method, SMA)来平滑数据。假设移动窗口大小为 N ,SMA算法将当前测量值的前 $(N-1)$ 个测量值的平均作为当前预测值,然后和当前测量值结合得到当前的实际平滑值。假设 a_k 是当前 k 时刻测得的原始加速度,使用SMA算法得出的平滑后的当前加速度 a_k^{SMA} 为:

$$a_k^{\text{SMA}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} a_{k-i} \quad (1)$$

在移动窗口中,每当测量得到新的加速度数据时,就将这个新数据加入,同时去除一个最旧的加速度数据,从而得到新的平滑值。令 a_{k-1}^{SMA} 表示 $(k-1)$ 时刻的平滑值,则 a_k^{SMA} 随时间的更新公式为:

$$a_k^{\text{SMA}} = a_{k-1}^{\text{SMA}} + \frac{a_k - a_{k-N}}{N} \quad (2)$$

1.2 行走周期识别及步数统计

本文提出根据实时加速度数据进行行走状态划分,通过行走状态之间的转换来识别行走周期,状态转换的参数根据加速度的实时变化动态设定。一个行走周期可以分成静止、波峰和波谷3种状态。人首先处于静止状态;开始迈步时人的躯干向上向前

运动,对应波峰状态;当人在垂直和水平方向的速度达到最大后进入波谷状态开始减速,直到迈出的脚和地面接触。此时人经历了一个完整的行走周期,可以计步一次。整个行走周期内的状态转换如图1(a)所示。行走状态的判断根据状态阈值决定,包括静止状态阈值 T_s 、波峰状态阈值 T_p 和波谷状态阈值 T_l 。实际情况下,由于噪声和人不规律动作的影响,可能会出现错误的状态转换,如图1(b)所示。例如:在静止时噪声可能使加速度值向下超过波谷状态阈值而进入波谷状态;行走中步态的明显变化可能使加速度曲线整体上移或下移,造成将波谷或波峰状态误判成静止状态。

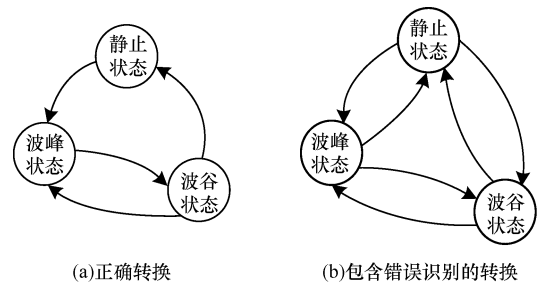


图1 行走周期内的状态及其转换

本文提出根据加速度曲线的变化动态设定状态阈值。假设 T_d 表示动态设定的状态阈值,可代表静止状态阈值 $T_{s,d}$ 、波峰状态阈值 $T_{p,d}$ 和波谷状态阈值 $T_{l,d}$, T 表示固定的状态阈值,可代表 T_s 、 T_p 和 T_l ,则:

$$T_d = R_0 + T \quad (3)$$

其中, R_0 为动态设定的零参考值,其值根据加速度数据的实时变化动态设置,每个行走周期的零参考值组成零参考轴代替原来的零轴。状态阈值则根据零参考值而动态变化,以减少图1(b)中的状态转移错误,同时更加准确地确定每个行走周期的起止时间,提高步长计算的精度。零参考值 R_0 取本周期所有状态的状态分界值的平均:

$$R_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} b_i \quad (4)$$

其中, n 为本周期的状态数; b_i 为状态 i 的状态分界值。如果当前是静止状态,则状态分界值为本状态中所有加速度的均值;如果当前是波峰状态,则状态分界值为本状态加速度峰值和前一状态加速度谷值的平均;如果当前是波谷状态,则状态分界值为本状态加速度谷值和前一状态加速度峰值的平均。

1.3 基于卡尔曼滤波的步长计算

目前步长计算的主要算法是通过建立人体行走模型获得步长和行走中躯干的垂直位移之间的关系,进而得到行走周期中 z 轴加速度和步长的非线性关系。本文采用的步长计算的基础算法均基于这种思想。假设 l 代表步长, h 为常数, N 为一个周期

内加速度样本数, a_i 表示第 i 个加速度样本, a_{\max} 和 a_{\min} 分别为该周期中加速度的峰值和谷值, 本文分别采用文献[7-9]提出的方法进行步长计算:

$$l = h \cdot \sqrt[4]{a_{\max} - a_{\min}} \quad (5)$$

$$l = h \cdot \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N |a_i|}{N}} \quad (6)$$

$$l = h \cdot \frac{\sum_{i=1}^N |a_i|}{N} - a_{\min} \quad (7)$$

人行走速度的变化是一个逐渐变化的过程。在这个过程中前后两步之间的步长会不同, 但差异不大。因此, 在步长计算时, 可以在使用式(5)~式(7)计算步长的基础上, 结合前一步步长对计算结果进行微调。本文提出采用卡尔曼滤波^[14]结合基础算法进行步长计算。假设 X_k 是第 k 步时的系统状态, Z_k 是第 k 步时的量测值, 卡尔曼滤波的系统状态方程和量测方程分别为:

$$X_k = \Phi X_{k-1} + \Gamma U_{k-1} + W_{k-1} \quad (8)$$

$$Z_k = H X_k + V_k \quad (9)$$

其中, Φ 为系统状态转移矩阵; U_{k-1} 为对系统的控制量; Γ 为系统控制矩阵; W_{k-1} 为系统噪声; H 为量测矩阵; V_k 为量测噪声。在步长计算中, 可将步长作为待估计的系统状态 X_k , 将基础算法得到的步长作为量测值 Z_k 。由于人行走的速度变化是一个逐渐的过程, 随之的步长变化也是一个逐渐变化的过程, 因此可以假设第 k 步步长 X_k 和第 $(k-1)$ 步的步长 X_{k-1} 相等, 步长的逐渐变化使用系统噪声 W_k 来表示, 这样, 系统转移矩阵 $\Phi = 1$ 。系统没有控制输入, U_{k-1} 为 0。由于量测值代表的也是步长, 因此量测矩阵为 1, 量测噪声用来表示基础步长算法的计算误差。系统状态方程式(8)和量测方程式(9)可改写为:

$$X_k = X_{k-1} + W_k \quad (10)$$

$$Z_k = X_k + V_k \quad (11)$$

1.4 方向确定

方向确定使用加速度传感器和磁力计共同完成^[15]。磁力计可以测得手机的三轴磁场强度, 但由于手机持握的随意性, 需要将这些基于手机坐标系的磁场强度转换到大地坐标系中, 然后由 y 轴和 z 轴方向的磁场强度计算出人的行走方向。首先通过加速度向量 $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$ 和重力加速度 g 计算出手机的俯仰角 γ 和翻滚角 θ :

$$\gamma = \sin^{-1}(a_y/g) \quad (12)$$

$$\theta = \tan^{-1}(a_x/a_z) \quad (13)$$

然后通过式(14)将基于手机坐标系的磁场强度向量 $\mathbf{m}^p = (m_x^p, m_y^p, m_z^p)$ 转换成基于大地坐标系的磁

场强度向量 $\mathbf{m}^h = (m_x^h, m_y^h, m_z^h)$:

$$\begin{bmatrix} m_x^h \\ m_y^h \\ m_z^h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta\sin\gamma & -\sin\theta\cos\gamma \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ \sin\theta & -\cos\theta\sin\gamma & \cos\theta\cos\gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x^p \\ m_y^p \\ m_z^p \end{bmatrix} \quad (14)$$

使用大地坐标系中 x 和 y 方向的磁场强度 m_x^h 和 m_y^h , 即可确定行人方向 α :

$$\alpha = \tan^{-1}(m_y^h/m_x^h) \quad (15)$$

1.5 初始位置确定

行人航位推算中要确定人的当前位置, 还必须知道其初始位置。可以把行人航位推算的初始位置设在建筑入口处, 也就是室内室外的衔接处。由于卫星定位系统的信号在从室外进入室内后会迅速减弱或消失, 因此可以通过卫星信号的变化获悉用户目前处于建筑入口位置^[16], 并将其作为行人室内航位推算的初始位置。这种方法要求用户进入室内之前开启航位推算和卫星定位功能。

2 实验与结果分析

本文的主要贡献在于对步数统计和步长计算算法的改进, 方向确定采用已有算法。因此, 本文针对步数统计和步长计算进行对比实验, 之后进行行人定位跟踪实验。实验设备为搭载 Android 4.1.2 的三星 GT-I9103 手机。

2.1 步数统计对比实验

本实验设置 3 组算法: A 组算法不进行加速度数据预处理, 通过判断加速度曲线是否穿过零轴进行计步; B 组算法经过 SMA 算法对加速度数据进行平滑后, 通过判断加速度曲线是否穿过零轴进行计步; C 组算法是本文提出的步数统计算法, 即经过 SMA 算法平滑后, 采用基于有限状态机的行走状态转换以及动态设置转换参数来进行步数统计。对比实验包含人在不同步态(正常步速、快速行走、跑动、变速行走)下行走 100 步的情况。每次行走同时使用 3 组算法对 z 轴加速度数据进行步数统计, 结果如表 1 所示, 表中数据代表统计步数和实际步数的差值, 可以看出正常行走时 3 种算法的计步误差都不大, 但随着人行走速度的加快或人行走速度发生变化, 3 种算法的计步误差都随之增加。但算法 A 的计步错误最多且对行走速度的变化最敏感; 算法 B 计步结果的变化趋势和算法 A 相似, 但计步错误率比算法 A 减少 30% 以上, 证明了 SMA 算法去除噪声的有效性; 算法 C 的计步效果最好且最稳定, 计步错误率仅为 1% 且对人的速度变化不敏感, 计步效果明显优于算法 A 和算法 B。

表 1 采用 z 轴加速度数据不同步态下的步数统计结果

算法	正常	快速	跑动	变速
A 组算法	2	3	4	9
B 组算法	1	2	2	4
C 组算法	0	0	0	1

2.2 步长计算对比实验

本文提出的步长计算算法是利用卡尔曼滤波对已存在的基础步长计算算法的改进。通过比较实际行走距离和算法估计距离的差值来判断算法的优劣。实验采用本文提出的步数统计算法并使用 z 轴加速度数据作为数据源。基础算法为文献[7-9]提出的 3 种步长计算算法,本文采用卡尔曼滤波对它们进行改进。实验中以接近匀速和变速分别行走 40 m,使用 3 种基础算法和它们的改进算法分别计算出行走距离,并计算它们和实际距离的误差。表 2 和表 3 给出了采用卡尔曼滤波对 3 种基础步长计算算法改进后的精度提高效果,其中提高率为 30% 左右,改进后的 Scarlett 算法精度最高。

表 2 卡尔曼滤波改进前后的精度提高效果(匀速行走)

算法	改进前 误差/m	改进后 误差/m	精度提高率 /%
文献[7]算法	2.29	1.59	30.1
文献[8]算法	3.51	2.41	31.3
文献[9]算法	1.74	1.23	29.3

表 3 卡尔曼滤波改进前后的精度提高效果(变速行走)

算法	改进前 误差/m	改进后 误差/m	精度提高率 /%
文献[7]算法	3.45	2.23	35.4
文献[8]算法	7.39	5.42	26.7
文献[9]算法	2.80	1.88	32.9

2.3 室内定位跟踪综合实验

综合提出的步数统计算法、基于卡尔曼滤波改进的文献[9]步长计算算法和已有的方向确定算法,进行了 2 组室内行人定位跟踪实验。实验区域大小为 64 m × 14 m。实验结果如图 2 所示,其中,图 2(a)显示的是直线行走实验结果,实线是真实轨迹,最左侧是起点位置,接近匀速行走走到走廊尽头结束,圆圈线是本文算法的估计轨迹;图 2(b)显示的是曲线行走实验结果,实线是真实轨迹,最右侧是起点位置,经过走廊和 4 个房间,最后停在左下角房间内,整个过程也是接近匀速,圆圈线是本文算法的估计轨迹。直线行走实验的平均定位精度为 2.6 m,曲线行走实验的平均定位精度为 2.8 m。

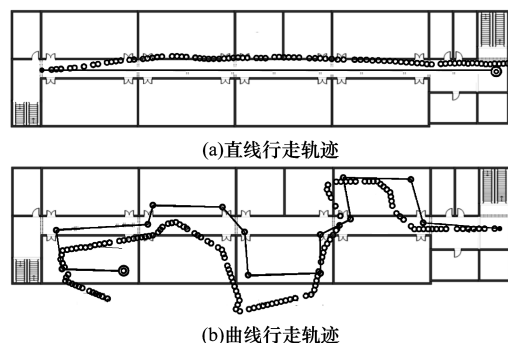


图 2 航位推算算法绘制的行走轨迹和真实行走轨迹对比

本文提出的航位推算算法在行走过程中计步错误较少,这是航位推算具有较高精度的首要保证。同时使用卡尔曼滤波改进后的步长计算算法能够更加准确地计算出行走步长,进一步减少了航位推算定位的误差。但是,行人航位推算仍然存在误差累积的现象,前面产生的误差会进一步导致后面的定位结果不准确,而算法不能进行动态调整。反映在图中,航位推算的圆圈线在开始时和真实路径比较重合,到后面分离的程度逐渐增大,在拐弯处由于折返会抵消一部分误差。

3 结束语

高精度低成本室内定位一直是研究人员努力解决的问题。由于能够在不依赖外部信息的情况下连续自主定位,基于智能手机传感器的行人航位推算已成为室内定位的主流技术。但是人行走的随意性以及传感器的非精确性会引入一定误差,因此,本文首先对传感器采集的原始加速度数据进行平滑以降低噪声干扰,然后通过识别行走状态的变化确定行走周期并进行计步,而识别状态变化的参数则是根据加速度的实时变化动态设定的,以降低人行走随意性特别是步态变化带来的负面影响,从而更加准确地确定行走周期和步数。实验结果表明本文算法对正常行走、快速行走、跑动和变速行走的计步精确率均能达到 99%。为提高步长计算的精度,本文利用行走中相邻两步步长差异不大的关系,使用卡尔曼滤波对文献[9]步长计算算法进行优化,实验结果表明,经过卡尔曼滤波优化后步长计算的精度提高了 30% 左右。室内定位跟踪综合实验表明本文算法能够比较精确地进行室内行人定位且无额外成本。但是该算法在方向计算方面还存在一定误差,因此在后续的研究中,笔者拟结合磁力计和陀螺仪进行更精确的方向估算,同时考虑结合室内地图进行用户位置和轨迹的约束和矫正。

参考文献

- [1] Bahl P, Padmanabhan V N. RADAR: An In-building RF-based User Location and Tracking System [C]//Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2000: 775-784.
- [2] Ni L M, Liu Yunhao, Lau Y C, et al. LANDMARC: Indoor Location Sensing Using Active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710.
- [3] Gezici S, Tian Zhi, Giannakis G B, et al. Localization via Ultra-wideband Radios: A Look at Positioning Aspects for Future Sensor Networks [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2005, 22(4): 70-84.
- [4] Harle R. A Survey of Indoor Inertial Positioning Systems for Pedestrians [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(3): 1281-1293.
- [5] Foxlin E. Pedestrian Tracking with Shoe-mounted Inertial Sensors [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2005, 25(6): 38-46.
- [6] Park S K, Suh Y S. A Zero Velocity Detection Algorithm Using Inertial Sensors for Pedestrian Navigation Systems [J]. Sensors, 2010, 10(10): 9163-9178.
- [7] Weinberg H. Using the ADXL202 in Pedometer and Personal Navigation Applications [EB/OL]. [2015-11-25]. <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/513772624AN602.pdf>.
- [8] Kim J W, Jang H J, Hwang D H, et al. A Step, Stride and Heading Determination for the Pedestrian Navigation System [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2004, 3(1/2): 273-279.
- [9] Scarlett J. Enhancing the Performance of Pedometers Using a Single Accelerometer [EB/OL]. [2015-11-25]. http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/47076299220991AN_900.pdf.
- [10] Ágila J, Link B, Smith P, et al. FootPath: Accurate Map-based Indoor Navigation Using Smartphones [C]//Proceedings of 2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. Guimaraes, Portugal: [s. n.], 2011: 1-8.
- [11] Alzantot M, Youssef M. UPTIME: Ubiquitous Pedestrian Tracking Using Mobile Phones [C]//Proceedings of 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 3204-3209.
- [12] Susi M, Renaudin V, Lachapelle G. Motion Mode Recognition and Step Detection Algorithms for Mobile Phone Users [J]. Sensors, 2013, 13(2): 1539-1562.
- [13] Niu Xiaoguang, Li Meng, Cui Xiaohui, et al. WTrack: HMM-based Walk Pattern Recognition and Indoor Pedestrian Tracking Using Phone Inertial Sensors [J]. Personal and Ubiquitous Computing, 2014, 18(8): 1901-1915.
- [14] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
- [15] 李 艳, 管 斌, 王成宾, 等. 电子磁罗盘航向角误差推导及分析 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(7): 1566-1572.
- [16] Alzantot M, Youssef M. CrowdInside: Automatic Construction of Indoor Floorplans [C]//Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems. New York, USA: ACM Press, 2012: 99-108.

编辑 金胡考

(上接第 21 页)

- [4] Sgora A, Vergados D J, Vergados D D. A Survey of TDMA Scheduling Schemes in Wireless Multihop Networks [J]. ACM Computing Surveys, 2015, 47(3): 1-39.
- [5] Dang Kui, Shen Jizhong, Dong Lida, et al. A Graph Route-based Superframe Scheduling Scheme in Wireless HART Mesh Networks for High Robustness [J]. Wireless Personal Communications, 2013, 71(4): 2431-2444.
- [6] Han S, Zhu X, Mok A K, et al. Reliable and Real-time Communication in Industrial Wireless Mesh Networks [C]//Proceedings of IEEE Real-time & Embedded Technology & Applications Symposium. Washington D. C., USA: IEEE Computer Society, 2011: 3-12.
- [7] Li Y, Zhang H, Huang Z, et al. Optimal Link Scheduling for Delay-constrained Periodic Traffic over Unreliable Wireless Links [C]//Proceedings of IEEE INFOCOM'14. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 1465-1473.
- [8] 何之栋. 工业无线网络路由及通信调度的实现与优化 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] IEEE. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks—Part 15. 4: Low-rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC Sublayer: IEEE Std 802. 15. 4—2012 [S]. Washington D. C., USA: IEEE Standard for Information Technology, 2012: 9-15.
- [10] Palattella M R, Accettura N, Dohler M, et al. Traffic Aware Scheduling Algorithm for Reliable Low-power Multi-hop IEEE 802. 15. 4e Networks [C]//Proceedings of the 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2012: 327-332.
- [11] Palattella M R, Accettura N, Grieco L A, et al. On Optimal Scheduling in Duty-cycled Industrial IoT Applications Using IEEE802. 15. 4e TSCH [J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 3655-3666.
- [12] Watteyne T, Mehta A, Pister K. Reliability Through Frequency Diversity: Why Channel Hopping Makes Sense [C]//Proceedings of the 6th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks. New York, USA: ACM Press, 2009: 116-123.
- [13] 郑义成, 袁 茵, 邓 勇, 等. 基于 Pareto 前沿粒子群优化的卫星资源调度算法 [J]. 计算机工程, 2016, 42(1): 193-198.
- [14] Yoon S U, Murawski R, Ekici E, et al. Adaptive Channel Hopping for Interference Robust Wireless Sensor Networks [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2010: 1-5.
- [15] Kim T S, Lim H, Hou J C. Understanding and Improving the Spatial Reuse in Multihop Wireless Networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(10): 1200-1212.
- [16] Bondy J A, Murty U S R. Graph Theory [M]. Berlin, Germany: Springer, 2008.
- [17] TEXAS Instruments. CC2430 Data Sheet (rev. 2. 1) SWRS036F [EB/OL]. (2008-08-25). <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/cc2430.pdf>.

编辑 陆燕菲