

基于 BLE 的室内指纹定位优化技术

陶佳峰, 杨晓洪, 王剑平, 张 果 (昆明理工大学信息工程及自动化学院, 云南昆明 650500)

摘要 针对 RSSI 的室内定位技术的功耗高和精度低的问题, 采用蓝牙 4.0 作为节点, 应用具有低功耗、远距离和成本低等优点的 BLE 技术, 通过在离线阶段采用高斯-均值算法对指纹数据库进行优化和在现阶段改进的跳变自适应卡尔曼算法进行数据滤波研究, 并且通过蓝牙 4.0 无线网络系统进行试验。结果表明, 优化后的指纹库和自适应卡尔曼定位算法, 在复杂的环境中比传统的定位算法更加稳定和准确。

关键词 蓝牙低功耗技术; 高斯-均值滤波; 跳变自适应卡尔曼滤波; 室内指纹定位
中图分类号 TP391 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)08-289-04

Indoor Fingerprint Location Optimization Technology Based on BLE
TAO Jia-feng, YANG Xiao-hong, WANG Jian-ping et al (Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650504)

Abstract Aiming at the problem of high energy consumption and low accuracy of RSSI indoor positioning technology, using Bluetooth 4.0 as a node, BLE technology with advantages of low energy consumption, long distance and low cost was adopted. Data filter was studied through optimizing fingerprint database by using Gauss-mean method and improved hopping adaptive Kalman algorithm, the experiment was carried out in Bluetooth 4.0 wireless network. The results showed that in a complex environment, the optimized fingerprint database and adaptive Kalman location algorithm is more stable and accurate than traditional positioning method.

Key words Bluetooth low energy technology; Gauss-mean filter; Hopping adaptive Kalman filter; Indoor fingerprint location

随着移动设备和无线局域网的普及, 定位服务越来越成为人们生活中必不可少的功能。相比于目前已经很成熟的户外 GPS 地图定位, 室内位置信息的获取, 特别是在场地复杂的公共场所比如大型超市、商场、机场、博物馆等环境中, 也成为日益需求的服务, 并且具有较为广阔的应用前景。蓝牙低功耗(BLE)技术是低成本、长距离、高速启动和互连、可互操作的鲁棒性无线技术^[1], 这些特点对于室内定位都是非常有利的, 而且在最近几年里, 蓝牙 4.0 模块已广泛应用于手机及平板电脑中, 对于室内定位的推广是很有利的。以上这些都保证了蓝牙低功耗技术在室内定位的实用性和可行性。

由于在复杂室内环境中, 信道信号的的传播容易受到多径效应、反射、散射等干扰, 这也是给定位带来较大误差的主要因素。应用典型的参数化室内测距技术有基于信号到达角度模型(AOA)、基于接收信号强度指示模型(RSSI)^[2]、基于信号到达时间模型(TOA)^[3]、基于信号达到时间差模型(TODA)^[4]等; 但是由于室内物体的遮挡会造成比较严重的多径效应干涉以及反射、散射等现象^[5], 信号到达角与 RSSI 值等信息不能精确地描述两点之间的位置关系^[6], 故需要对 RSSI 信号值进行滤波处理, 才能达到理想的定位效果。

由于基于 RSSI 的距离测量技术是一种新型低成本和低成本实现复杂度的距离测量技术, 并且在室内定位领域有着广泛的应用, 故该研究也提出基于 RSSI 的蓝牙 4.0 指纹定位优化技术。室内指纹定位技术主要分为 2 个阶段^[7]: ①离线阶

段, 在所需要定位的区域内预定坐标点, 然后在每个坐标点上采集每个信标节点的 RSSI 值, 存入到相应坐标点的数组中, 最后建立 RSSI 指纹库; ②在线阶段, 通过接收每个信标节点的 RSSI 值, 在线匹配指纹数据库中的 RSSI 信息, 实时显示所处的坐标位置。笔者分别对这 2 个阶段进行算法的改进, 首先, 离线阶段指纹库建立的准确与否直接关系到在线定位的精度, 故通过高斯-均值滤波算法对采集的信号数据进行优化处理, 然后再存到指纹库中; 在在线定位阶段, 对采集的定位信息数据进行跳变自适应卡尔曼滤波算法处理, 得到实时的信息数据, 然后采用 K-加权最近邻算法进行实时定位, 从而达到精度较高的室内定位效果。

1 指纹库数据优化

离线指纹库建立的精确与否对在线定位的精度有着较大影响, 所以建立一个较为准确的指纹库是提高定位精度的基础。大量研究表明, 采集的 RSSI 数据的随机分布是近似符合高斯分布模型的。使用高斯滤波模型^[8]可以比较好地拟合 RSSI 在实际环境中的分布, 从而消除那些小概率噪声干扰, 然后通过均值滤波, 得到稳定、平滑的 RSSI 值。具体滤波设计的过程: 首先在数组中存储采样中的一组 RSSI 信号数据, 采集的 RSSI 数据量为 m ; 然后利用公式求解所要拟合的高斯滤波模型的均值和方差, 求出其密度函数 $f(RSSI)$ 。公式如下:

$$\mu = \frac{1}{m} \sum_i^m RSSI_i \tag{1}$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{(m-1)} \sum_{i=1}^m (RSSI_i - \mu)^2 \tag{2}$$

$$f(RSSI) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{RSSI - \mu}{\sigma}\right)^2} \tag{3}$$

式(2)根据均值 μ 和方差 σ^2 确定 RSSI 的有效范围, k 为密度函数取值区间 $[k, 1]$ 的下限值, 通过设置 k 的数值设置, 可以得到采集数据保留的样本数。如果 k 过大, 则说明保留

基金项目 国家自然科学基金项目(61364008); 云南省应用基础研究重点项目(2014FA029); 云南省教育厅重点基金项目(2013Z127); 昆明理工大学复杂工业控制学科方向团队建设项目。
作者简介 陶佳峰(1990-), 男, 安徽萧县人, 硕士研究生, 研究方向: 实时运动控制。
收稿日期 2016-02-07

的数据少,有可能会对 RSSI 数据的真实性造成破坏;若 k 过小,会提高保留的样本数,保证数据的真实性,但这样对小概率事件滤波效果下降,所以 k 值的正确选取有助于提高计算速度和更好地排除突变的小概率数据。高斯滤波可以有效地剔除偏离真实值的数据,但并不能消除数据的波动。为了达到 RSSI 的样本数据的平滑、稳定的输出,该研究采用均值算法继续对样本数据进行处理。

通过大量数据分析,选择临界值在 0.6 时效果最佳,具体公式如下:

$$0.6 < \int_{\text{MIN_RSSI}}^{\text{MAX_RSSI}} f(\text{RSSI}) d\text{RSSI} < 1 \quad (4)$$

式(4)对筛选后的 RSSI 求其均值,然后存入指纹库中。

2 在线定位优化算法

2.1 卡尔曼滤波算法 由于室内环境复杂,信号信道受到的干扰因素比较多,那么未知节点接收到的信号数据仍然会有很大的波动,对于定位将是很不利的。卡尔曼滤波器能有效去除数据中的突变数据和噪声波动,实现值的准确、平滑输出。卡尔曼滤波算法分为预测和修正 2 个阶段^[9-10]。

2.1.1 时间更新(预测阶段)。

(1) 计算先验状态估计值:

$$x(k|k-1) = F \cdot x(k-1|k-1) + B \cdot u(k) + w(k) \quad (5)$$

(2) 计算先验状态估计值的协方差:

$$P(k|k-1) = F \cdot P(k-1|k-1) \cdot F^T + Q \quad (6)$$

式(5)、(6)初始值分别为 $x(0)$ 、 $P(0)$ 。

2.1.2 测量更新(修正阶段)。

(1) 计算加权矩阵(卡尔曼增益):

$$Kg(k) = H \cdot P(k|k-1) \cdot H^T + R \quad (7)$$

(2) 对预测值进行修正:

$$x(k|k) = x(k|k-1) + Kg(k) \cdot [Z(k) - H \cdot x(k|k-1)] \quad (8)$$

(3) 更新修正值的协方差:

$$P(k|k) = [1 - Kg(k) \cdot H] \cdot P(k|k-1) \quad (9)$$

式中, I 为 1 的矩阵,对于单模型单测量时, $I = 1$ 。式(7)~(9)中, $x(k)$ 是 k 时刻的系统状态, $u(k)$ 是 k 时刻对系统的控制量, $P(k|k-1)$ 是 $x(k|k-1)$ 对应的协方差。 F 和 B 是系统参数,对于多模型系统,他们是矩阵。 $Z(k)$ 是 k 时刻的测量值, H 是测量系统的参数,对于多测量系统, H 为矩阵。 $w(k)$ 表示过程噪声,被假设成高斯白噪声,其协方差是 Q ,这里假设 $W(k)$ 不随系统状态变化而变化。

2.2 卡尔曼滤波算法的优化 但是实时定位的过程中,在采集的 RSSI 值在小范围波动的时候,卡尔曼滤波算法可以比较好地及时跟踪这些变化,调整 RSSI 的估计值,定位较为准确,但是,当未知节点移动较大位置后,此滤波算法得到的估计值只能较为缓慢地接近真实值,表现的收敛速度是很慢的,这对 RSSI 的准确估计是很不利的。

由于卡尔曼滤波算法在 RSSI 信号跳变应用中存在的不足,该研究提出了一种对 RSSI 信号出现跳变有自适应能力的优化卡尔曼滤波算法(简称跳变自适应卡尔曼滤波算法)。此算法能通过前几次接收的 RSSI 观测值快速的判断出 RSSI

是否发生了跳变,如果发生了跳变,这时可以及时修改卡尔曼滤波的相关参数,从而有效地降低此滤波算法对发生跳变前的状态估计值的信任度,可以在消除室内环境干扰的前提下,提高此算法对出现 RSSI 跳变情况后的再次收敛快速性,进而使此算法在室内复杂环境下的自适应能力显著增强,提高采集的 RSSI 值的准确度。

跳变自适应卡尔曼滤波算法是在卡尔曼滤波算法的基础上,增加了 RSSI 跳变时候的判断函数,具体公式如下:

$$\psi(k) = \frac{z(k) + (k-1) \cdot \psi(k-1)}{k} \quad (10)$$

$$\Phi(k) = \left| \frac{\sum_{i=k+1-\alpha}^k [x(i|i) - \psi(k)]}{\alpha} \right| - \beta \cdot P(k-1) \quad (11)$$

$$\begin{cases} k=0, \\ P(k|k)=6, \text{当 } \Phi(k) > \gamma \text{ 时} \\ \psi(k)=0 \\ \text{保持参数不变,其他} \end{cases} \quad (12)$$

式(11)~(12)中, $\psi(k)$ 为从 $k(k \geq \alpha)$ 时刻起前 k 次观测值的迭代均值。 $\Phi(k)$ 为 RSSI 是否发生跳变的判定函数,反映的是最近 α 次观测值和估计值的均值近似程度。其中, α 的值需要依据实际 RSSI 的波动情况进行具体设定(当 α 的值过小时,利用当前观测值进行跳变判定时很容易受到突变现象的影响,从而将影响到跃变判定的准确性;但当 α 的值过大时,就会对算法跃变判定的反应灵敏度产生影响); $P(k-1)$ 是 $k-1$ 时刻的误差协方差,所以当算法趋于收敛时, $P(k-1)$ 的值会变得较小。由 $P(k-1)$ 和 β 可以使算法在对连续发生的跳变进行判定时,有效地避开上一次 RSSI 跳变处理造成的数据波动的阶段,使跳变判定过程在上一次的 RSSI 跳变处理趋于收敛后能够再次生效,也就防止跳变判定过程进入死循环中。其中 γ 是 RSSI 跳变判定的临界值,当 $\Phi(k) > \gamma$ 时,则可认为信号强度 RSSI 发生了跳变。通过分析可知, γ 若越小,则算法越容易在外界突变干扰的影响下出现跳变误判, γ 若越大,则可能使算法跃变判定的灵敏度下降,因此, γ 的值需要根据所处的具体实验环境分析而定。

跳变自适应卡尔曼滤波算法是通过基础式(5)~(9)和改进式(10)~(12)来实现,使卡尔曼滤波算法由实测、预测、校正的 3 步迭代方法,进而扩展为实际测量、跳变判定、预测、参数校正的 4 步迭代方法。此改进算法的流程见图 1。

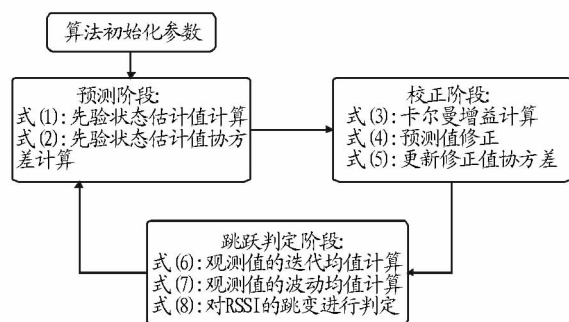


图1 跳变自适应卡尔曼滤波算法流程

Fig.1 Flow of hopping adaptive Kalman filter algorithm

通过试验数据分析,得到较为满意的滤波算法的参数,参数设置为: $R=0.3, Q=0.005; \alpha=8, \beta=4, \gamma=0.5$ 。故改进后的对 RSSI 数据处理的效果见图 2。

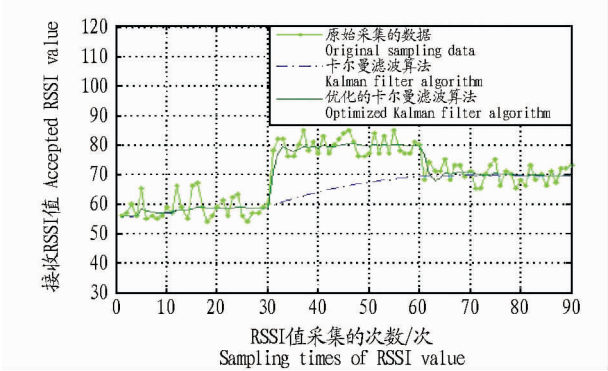


图 2 改进后的对 RSSI 处理的效果

Fig.2 Processing effect of RSSIT after improvement

3 K 加权最近邻定位算法

基于 RSSI 的位置指纹定位算法主要包括:最近邻法 (Nearest Neighbor, NN)、K 最近邻法 (K-Nearest Neighbor, KNN)、K 加权最近邻法 (WKNN) 等。目前采用较多的是 K 加权最近邻法,此算法是在前两个定位算法上进行的改进,定位精度更好,所以本位也采用此算法进行定位。

当移动终端进入定位区域后,会实时采集来自 n 个定位节点的 RSSI 信号强度值,设为 $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]$,选取指纹库中一组指纹数据,设为 $X_i = [S_{i1}, S_{i2}, \dots, S_{iN_i}]$,通过对比实时信号的位置指纹 Z 和指纹库中的 X 的距离,以此来计算未知节点和定位节点之间的欧式距离;然后将加权和作为待定位节点的最终目标,具体公式如下:

$$L = \arg \min_{i \in [1, N]} \| Z - X_i \| \tag{13}$$

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \frac{\sum_{i=1}^K \frac{L_i(1+\sigma)}{\sum_{j=1}^K \frac{1}{L_j(1+\sigma)}} (x_i, y_i) \quad (K \geq 2) \tag{14}$$

式中, $i \in [1, N_r], N_r$ 为指纹库中的记录数; N_i 表示指纹库中第 i 个指纹点检测到的信号值, $\| Z - X_i \|$ 为 Z 和 X_i 之间的欧拉距离; L_i 为待定位节点与第 i 个指纹点之间的欧氏距离; (x_i, y_i) 表示所选取第 i 个指纹参考点的坐标; $(\hat{x}, \hat{y})$ 表示最终的定位坐标, K 表示所选择的最优匹配的指纹参考点数目; σ 为了防止分式分母为 0 的情况发生,在此取值为 0.000 001。通过试验对上述优化算法进行验证,证明所提出方案对提高室内定位精度的可行性。优化的指纹定位算法过程见图 3。

4 仿真试验和数据分析

此次试验的硬件系统选取有 Ti 公司的 CC2541 芯片集成的蓝牙 4.0 低功耗模块,选取 1 m×6 m 实验室作为试验区域。在离线指纹库建立阶段,选取两个节点之间的距离为 1 m,为了适合实验室的环境,选取总共 40 个指纹点。通过 Matlab 对改进的定位优化算法进行仿真分析,结果表明,该研究采取的改进算法的定位精度比传统定位算法有显著提高,下面对部分仿真结果进行显示和分析。此优化算法的实

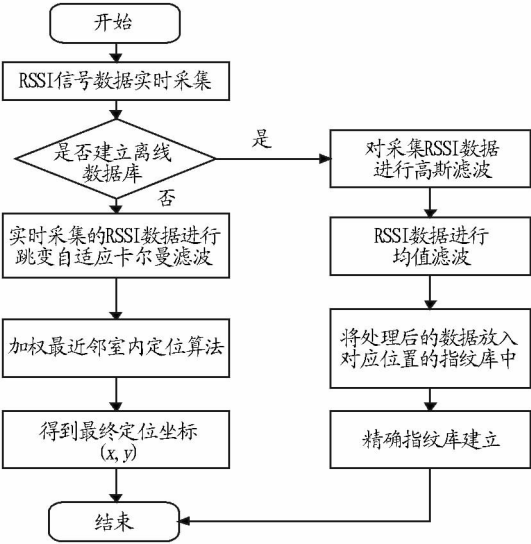


图 3 室内指纹定位算法优化过程

Fig.3 Optimization process of indoor fingerprint positioning algorithm
时定位显示见图 4。

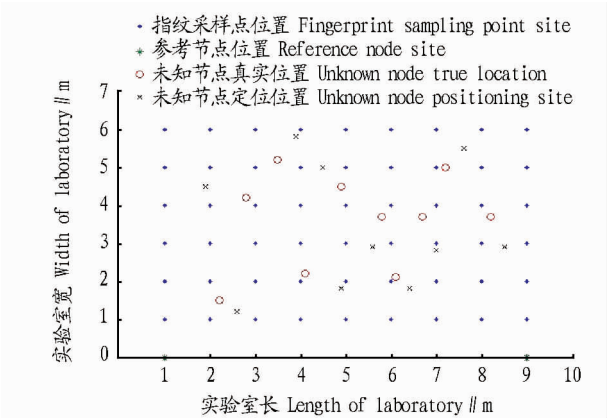


图 4 优化算法定位实时显示仿真结果

Fig.4 Real-time display simulation results of the optimized algorithm location

通过 3 组实验验证优化算法的有效性,试验一只采用均值滤波建立离线库,然后采用 K 加权最近邻进行定位;试验二采用高斯-均值滤波建立指纹库,然后采用 K 加权最近邻进行定位;试验三也就是该研究采用的优化算法,是在试验二的基础上,增加了对在线采集的 RSSI 数据进行跳变自适应卡尔曼滤波,然后通过 K 加权最近邻算法完成最终定位。3 组试验定位结果对比分析见表 1。

表 1 3 组试验定位结果对比分析

Table 1 Comparative analysis of three groups of experimental positioning results

试验组	最大误差	平均误差
Test group	Maximum error	Mean error
试验一 Test 1	2.72	2.23
试验二 Test 2	2.14	1.71
试验三 Test 3	1.42	1.15

由表 1 可知,试验二定位精度比试验一有一定的提高,

说明指纹库的优化能有效地降低最终的定位误差;试验三和试验二的对比结果显示,通过对现在定位阶段采集的 RSSI 数据的实施滤波处理,进一步提高了实时定位的准确度,验证了所提出的优化技术的可行性和实用性。

5 结论

该研究分析了基于低功耗蓝牙 4.0 室内无线传感器网络通过 RSSI 进行指纹定位的性质。针对 RSSI 信号在建立离线库阶段容易受到环境干扰,采用高斯-中值滤波对采集的数据进行处理,然后在保存到指纹库中,保证了指纹库的真实性,为后面的实时定位提供良好的前提;为了使在线定位阶段降低 RSSI 值受到的干扰,采用卡尔曼滤波算法进行处理,但是随着未知节点的移动,为了达到卡尔曼滤波算法的快速收敛,提出了改进的跳变自适应卡尔曼滤波算法,不仅提高了滤波收敛的快速性,而且保障了 RSSI 值的平稳输出,最后通过试验和 Matlab 仿真验证了室内定位优化算法的可行性。该研究还采用了低功耗蓝牙技术,通过蓝牙 4.0 作为节点的高精度室内指纹定位技术有广阔的应用前景。

(上接第 263 页)

键环节,政府应当引入低耗能、可恢复、可持续的生态旅游配套设施,如景区垃圾的回收再处理设施,景区的生态恢复设施等。

3.7 培养专业旅游产业人才队伍,提升服务质量 高度重视人力资源开发与管理,培养高素质的专业旅游产业人才队伍,是小兴安岭生态旅游产业健康、可持续发展的关键。政府部门应充分认识到缺乏专业旅游产业人才是制约小兴安岭生态旅游产业发展的重要因素之一,在各方面给予适当的支持,提高对旅游人力资源的开发意识,优化与高校的旅游人才培养方式,出台更加有效的配置政策,吸引更多的旅游产业专业人才进入旅游行业相关企事业单位工作。同时,政府可以组织小兴安岭生态旅游产业相关的从业人员进行在岗培训,更深入了解小兴安岭生态旅游产业的发展进程,提高在岗工作人员自身素质。最为重要的是,完善已建立的旅游教育体系,加强与合作高校的交流,为小兴安岭生态旅游产业的高素质、高层次人才和紧缺人才的培养搭建良好的平台,不断提升小兴安岭生态旅游的服务质量,吸引更多的游客,促进生态旅游产业的进一步发展。

3.8 鼓励社区参与,增强居民的生态意识 生态旅游产业

参考文献

- [1] 李娟娟,张金艺,张秉煜,等. 蓝牙 4.0 标准规范下的模糊指纹定位算法[J]. 上海大学学报(自然科学版),2013,19(2):126-131.
- [2] GIROD L,BYCHKOVSKIY V,ELSON J,et al. Locating tiny sensors in time and space:A case study[C]//International Conference on Computer Design (ICCD 2002). Freiburg:IEEE Computer Society,2002: 214-219.
- [3] ALA V I B,PAHLAVAN K. Modeling of the TOA-based distance measurement error using uwb indoor radio measurements[J]. Communications letters,IEEE,2006,10(4):275-277.
- [4] CURRAN K,FUREY E,LUNNEY T,et al. An evaluation of indoor location determination technologies[J]. Journal of location based services,2011,5(2):69-78.
- [5] 詹杰,刘宏立,刘述钢,等. 基于 RSSI 的动态权重定位算法研究[J]. 电子学报,2011,39(1):82-88.
- [6] 容晓峰,杨娜. RSSI 位置指纹的定位误差分析与仿真[J]. 西安工业大学学报,2010,30(6):574-578.
- [7] YOUSSEF M A,AGRAWALA A,UDAYA SHANKAR A. WLAN location determination via clustering and probability distributions[C]//Proceedings of the First IEEE International Conference on. IEEE,2003:143-150.
- [8] 詹杰,吴伶俐,唐志军. 无线传感器网络 RSSI 测距方法与精度分析[J]. 电讯技术,2010,50(4):83-87.
- [9] 刘静,姜恒,石晓原. 卡尔曼滤波在目标跟踪中的研究与应用[J]. 信息技术,2011,15(10):74-77.
- [10] 彭丁聪. 卡尔曼滤波的基本原理及应用[J]. 软件导刊,2009,8(11):32-35.

的发展必然伴随着利益的产生,但也是以消耗资源地的自然资源为代价的。资源地的社区居民是重要的生态旅游产业的利益相关者,也是利益的既得者和损失的承受者^[3]。伊春市政府在开发生态旅游的同时,一定要考虑到社区居民的相关利益,正确处理好相关部门、旅游企业与当地居民在生态旅游开发中的产生的相应矛盾。并且,应当给予当地的社区及居民一些扶植性政策,促进当地居民的就业和创业,鼓励居民参与小兴安岭生态旅游产业的发展建设。同时,也应该组织相应的宣传活动,增强居民的生态意识,使其自觉保护小兴安岭自然保护区的生态环境。

生态旅游并非固定、静止的模式,而是一个向着可持续发展方向逐步迈进的发展过程。小兴安岭生态旅游产业转型是一个长期的过程,在转型过程中会出现一些问题,针对存在的问题,及时调整政府方向,发挥政府行为的积极作用,才能更好地实现小兴安岭生态产业转型。

参考文献

- [1] 唐智. 西藏生态旅游发展中的政府行为研究[D]. 拉萨:西藏大学,2014.
- [2] 程占红,孔德安. 生态旅游概念的再认识[J]. 山西大学学报(哲学社会科学版),2005(2):24-26.
- [3] 汤焰,王磊,代勋,等. 三江口自然保护区生态旅游资源开发的 SWOT 分析[J]. 安徽农业科学,2014(21):7114-7116.