

文章编号: 1000-582X(2012)01-099-06

## 山体滑坡监测的 RSSI 定位改进算法

卿晓霞<sup>a</sup>, 李文田<sup>b</sup>, 王 波<sup>a</sup>

(重庆大学 a. 城市建设与环境工程学院; b. 计算机学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 针对现有山体滑坡监测技术自动化程度低、系统成本高、实施难度大等问题, 将 RSSI 定位技术用于山体滑坡监测, 提供无需任何一次检测仪器的山体滑坡监测新方法。提出的 RSSI 定位改进算法引入加权调整因子, 通过动态获取路径损耗模型参数和实时计算 WSN 节点间通信距离, 可降低外部环境变化对定位精度的影响, 从而提高山体滑坡定位精度。使用 MATLAB 对改进算法进行的模拟测试结果表明, 与传统 RSSI 固定路径损耗模型定位算法相比, 平均误差显著下降。

**关键词:** 山体滑坡; 位移监测; 无线传感器网络; 接收信号强度指示; 定位算法

**中图分类号:** TP274<sup>+</sup>.5; TP277; TP873; TN919.72 **文献标志码:** A

### An improved localization algorithm based on RSSI for landslide monitoring

QING Xiao-xia<sup>a</sup>, LI Wen-tian<sup>b</sup>, WANG Bo<sup>a</sup>

(a. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering; b. College of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** In order to overcome the existing problems of low automation, high cost and difficult to implement in the area of landslide monitoring, this paper presents a new method of RSSI (Received Signal Strength Indicator) based positioning technology without any one-off instruments to monitor landslide surface displacement. By adding weighted factors, the improved positioning algorithm can estimate the parameters of the path loss model dynamically and calculates the communication distance of network nodes in real-time, which can improve positioning precision and reduce the impact of environmental changes on it. The MATLAB experiments show that, compared with the traditional RSSI based localization algorithm using fixed path loss model, the improved algorithm could significantly reduce the average error.

**Key words:** landslide; displacement monitoring; WSN; RSSI; localization algorithm

由于特殊的地质构造, 山体滑坡成为中国西部地区最为广泛的一种次生地质灾害。山体滑坡监测就是通过各种技术手段来监测山体滑坡的发生和发展, 及时捕捉滑坡灾害的特征信息, 以便能及时采取防灾措施, 避免或减轻灾害损失。目前, 山体滑坡监测主要以位移监测为主, 其监测技术主要有 GPS 技术、大地精密测量技术、BORDER 监测技术、综合自动遥测法(遥感成像技术)等<sup>[1-3]</sup>。上述位移监测技术虽然能从不同角度有效反映滑坡发生的动态信

息, 但分别存在着自动化程度不高, 不能实现实时监测, 实现成本高, 实施难度大等问题。

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)节点定位技术作为一种新兴的定位信息获取手段, 具有成本低廉、可靠性高等诸多技术优势<sup>[4]</sup>。若其定位精度能够满足山体滑坡监测的要求, 则可取代现有山体滑坡监测传感器, 即滑坡现场不需使用任何一次检测仪表即可获取表面位移信息, 为山体滑坡监测提供一种全新有效、经济可行的技术

收稿日期: 2011-07-24

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX07315-001); 重庆大学研究生创新基金个人项目(CDJXS11180012)

作者简介: 卿晓霞(1963-), 女, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事自动控制技术及应用方面的研究,

(E-mail) qxx118@126.com。

途径。

根据定位手段的不同,WSN 节点定位技术可分为基于测距和无需测距 2 类<sup>[5]</sup>,前者是根据节点间的距离或角度等信息实现定位,后者仅仅根据节点间的网络连通性实现定位。基于测距的定位算法有较高的定位准确性,因此在实际中有较大的应用空间。常用的测量节点间距离或角度的技术有 RSSI<sup>[6]</sup> (Received Signal Strength Indicator)、TOA<sup>[7]</sup> (Time of Arrival)、TDOA<sup>[8]</sup> (Time Difference of Arrival)、AOA<sup>[9]</sup> (Angle of Arrival) 等方法,在得到节点间的距离(或角度)后可使用三边测量法、三角测量法多边测量法或双曲线法等来计算未知节点的位置<sup>[10]</sup>。基于网络连通性的定位方法有质心定位算法、APIT (Approximate Point-In-Triangulation test) 定位算法、APS (Ad-Hoc Positioning System) 算法、Amorphous 算法等。

基于 RSSI 的定位算法,其定位思想简单、易于实现,在定位系统中不需要增加额外的硬件设备,成本低廉,只需较少的通信开销<sup>[11]</sup>。然而,由于 RSSI 在传播过程中受环境影响很大,多径反射传播、衍射、绕射、非视距及天线方向等都会对它产生影响<sup>[12-13]</sup>,因此基于 RSSI 的定位算法误差较大(米级误差),如何提高 RSSI 的定位精度是研究的重点与难点问题。

基于 RSSI 的路径损耗理论模型有自由空间传播模型、对数距离路径损耗模型、哈它模型、对数-常态分布模型<sup>[10,14]</sup>等。其中,对数距离路径损耗模型被广泛采用。虽然该模型具有低成本、低复杂度的优点,但是模型参数为固定值,没有考虑外部环境(如气温、气候等)变化造成干扰时与理论模型的不符,在实际应用中存在较大误差<sup>[15,16]</sup>。为解决该问题,笔者提出了一种基于加权调整因子来动态调整路径损耗模型参数,计算节点间通信距离的改进算法,以减少定位误差。

## 1 基于 RSSI 定位技术的山体滑坡监测原理

### 1.1 用于山体滑坡监测的 WSN 网络

图 1 为基于 WSN 的山体滑坡监测系统架构。图 1 中,WSN 网络节点分为锚节点和定位节点 2 种。锚节点是那些位置不变且位置坐标数据已知的节点,起辅助定位的作用;定位节点是那些需要确定其位置的节点。锚节点布置在滑坡体周围的稳定基岩或物体上,定位节点布置在滑坡体上。主节点也属锚节点,但同时还集成有远程无线通信芯片,可通

过远程无线网络(如 2G/3G 等)将定位节点坐标数据远传至监控计算机。

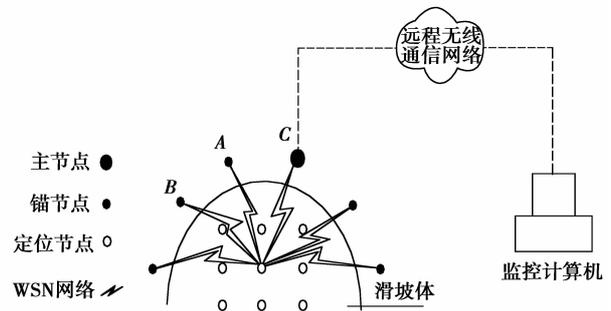


图 1 基于 WSN 的山体滑坡监测系统架构

### 1.2 RSSI 定位原理

研究表明,无线电波在传播过程中的能量损耗跟传播距离存在着特定的关系<sup>[14]</sup>。利用该特性,当有滑坡发生时,图 1 所示 WSN 网络中定位节点与锚节点间的通信能量损耗就会变化。根据该变化了的能量损耗值,即可确定有滑坡发生。监控计算机上保存有各定位节点的原始坐标数据,通过对比分析定位节点坐标数据的变化,可发出地表位移发生时间和位移量等警报信息。

基于 RSSI 的路径损耗理论模型,对数距离路径损耗模型可表示为:

$$PL(d) = PL(d_0) - 10N \lg(d/d_0). \quad (1)$$

考虑随机误差,得到对数阴影模型<sup>[10]</sup>,即

$$PL(d) = PL(d_0) - 10N \lg(d/d_0) - X, \quad (2)$$

式中: $PL(d)$ 表示路径损耗值,dBm; $d_0$ 为近地参考距离,由测试决定,通常定为 1 m; $N$ 为路径损耗指数,表明路径损耗随距离增长的速率,与特定的环境有关; $d$ 为信号发送节点与接收节点间的距离; $X$ 为随机误差,服从均值为 0,标准差为[4,10]范围的高斯分布。

$$RSSI = \text{发射功率}(Pt) + \text{天线增益}(Gr) - \text{路径损耗}(PL(d)), \quad (3)$$

式中,RSSI 可通过测试获得。因此,利用式(2)、(3),即可计算出通信距离  $d$ :

$$d = 10^{\frac{Pt + Gr - RSSI - PL(d_0) - X}{10 \times N}} \times d_0. \quad (4)$$

根据式(4)计算出图 1 中定位节点到各锚节点间的距离,再计算出定位节点的位置坐标,经与定位节点原始坐标数据比较,即可确定是否有滑坡发生,并算出滑坡距离。

## 2 基于模型参数动态获取的改进算法

改进算法在定位过程中,首先利用加权调整因子的模型参数动态获取算法来更新对数距离路径损耗模型中的参数,并计算 RSSI 值,然后根据 RSSI 值计算定位节点到锚节点之间的距离,最后通过极大似然估计算法计算出定位节点坐标,并与其原始坐标比较,最终确定该定位节点产生的位移量,并由此判断山体滑坡是否发生。

### 2.1 基于加权调整因子的模型参数动态获取算法

如图 1 所示,如将 6 个锚节点分为 2 组,每组含 3 个锚节点。对任一组,当其中任 2 个锚节点向另一锚节点发送信息时,都可利用式(5)、(6)计算出该点处的模型参数。

以图 1 中锚节点 A 为例,模型参数计算为

$$\begin{cases} PL(d_{AB}) = PL(d_0) + 10 \times N_A \times \lg\left(\frac{d_{AB}}{d_0}\right) + X_A \\ PL(d_{AC}) = PL(d_0) + 10 \times N_A \times \lg\left(\frac{d_{AC}}{d_0}\right) + X_A \end{cases} \quad (5)$$

令  $\theta_A = PL(d_0) + X_A$ ,则上述公式变为

$$\begin{cases} PL(d_{AB}) = \theta_A + 10 \times N_A \times \lg\left(\frac{d_{AB}}{d_0}\right) \\ PL(d_{AC}) = \theta_A + 10 \times N_A \times \lg\left(\frac{d_{AC}}{d_0}\right) \end{cases} \quad (6)$$

根据式(6)可计算出点 A 的模型参数  $\theta_A$  和  $N_A$ 。同理可得其余各锚节点的模型参数  $\theta_A$  和  $N_i$ 。

一般情况,在众多与定位节点建立通信关系的锚节点中,必定有一个与该定位节点在物理位置上最近,称该锚节点为最优锚节点。最优锚节点的路径损耗模型参数跟定位节点的最为接近。由于最优锚节点与定位节点在物理位置上最为接近,则相互通信时受到环境干扰程度最小,进而测得的 RSSI 值最为稳定、准确。

为求取定位节点到各锚节点的距离,摒弃传统的取各锚节点模型参数平均值的做法,引入了加权调整因子  $e_i$ ,

$$e_i = \frac{PL(d_i) - PL(d_1)}{\sum_{i=1}^n [PL(d_i) - PL(d_1)]}, \quad (7)$$

式中: $n$  为锚节点数( $n > 1$ ),  $0 < e_i < 1$ , ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ );  $PL(d_1)$  为最优锚节点与定位节点通信的路径损耗; $PL(d_i)$  ( $i = 2, 3, \dots, n$ ) 为除最优锚节点外的其余锚节点与定位节点通信的路径损耗。 $e_i$  表示规范化后当前锚节点  $i$  与最优锚节点的路径损耗差异,反映了当前锚节点与最优锚节点的距离差异程度。

可以认为,在一个山体滑坡监测的区域内,由于气温、气象等环境因素相同,可以用同一个路径损耗模型,计算该监测区域内不同节点对之间的路径损耗。因此,引入加权调整因子的路径损耗模型为

$$\theta = \sum_{i=1}^n \frac{1-e_i}{n-1} \times \theta_i, N = \sum_{i=1}^n \frac{1-e_i}{n-1} \times N_i, \quad (8)$$

式中, $\theta_i, N_i$  是由式(6)求得的各锚节点模型参数。由式(8)求得的模型参数实际上是各锚节点模型参数的加权平均值,离定位节点越近的锚节点,其权重越大,反之亦然。

考虑环境的时变性,在每次定位前,先由式(7)、(8)求出不同外部环境条件下的  $e_i, \theta$  和  $N$ ,即可动态获取不同环境条件下的模型参数,使定位计算更加准确。

基于调整因子动态变化的路径损耗模型为

$$PL(d) = \theta + 10N \lg(d/d_0). \quad (9)$$

由式(9)算出各锚节点到定位节点距离后,可根据极大似然估计算法确定定位节点坐标。

### 2.2 极大似然估计算法确定定位节点位置坐标

极大似然估计算法是一种计算节点位置坐标的基本方法<sup>[17]</sup>,该方法可以解决三边定位法因定位误差得不到确定解的问题。

极大似然估计定位原理为:已知各个锚节点坐标,  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ , 设各个锚节点到定位节点的距离为  $d_1, d_2, \dots, d_n$ 。假设定位节点坐标为  $(x, y)$ , 似然估计方程组为

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_2^2 \\ \dots\dots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (10)$$

用方程组中的第  $n-1$  个方程减去第  $n$  个方程 ( $n \geq 1$ ), 得到线性化方程

$$\mathbf{AX} = \mathbf{B}, \quad (11)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \dots\dots & \dots\dots \\ 2(X_{n-1} - X_n) & 2(Y_{n-1} - Y_n) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} X_1^2 - X_n^2 + Y_1^2 - Y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \dots\dots \\ X_{n-1}^2 - X_n^2 + Y_{n-1}^2 - Y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\mathbf{X} = [x \quad y]^T. \quad (14)$$

得到定位节点的坐标

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}. \quad (15)$$

事实上,算法在实际应用中应按照滑坡体的不同运动情况做相应处理:

a) 山体瞬时崩塌。此时滑坡体上的定位网络严重损坏,远端监控计算机失去对现场网络的控制。此种情况下,监控计算机应立即发出滑坡警报。

b) 滑坡持续变化。此时定位节点亦处于运动过程中,定位结果会持续变化,此时,应首先发出滑坡预警信息,随后缩短定位周期,连续多次对滑坡体定位。

c) 滑坡体稳定,即未出现滑坡,或虽然滑坡出现但定位节点定位时滑坡体未运动。此时,按正常周期执行定位算法。

### 3 模拟测试

采用 MATLAB7.0 进行模拟测试,测试范围为  $15\text{ m} \times 10\text{ m}$  的区域。假设定位节点的实际坐标为  $(x_0, y_0)$ , 计算得到的坐标为  $(x, y)$ , 这里  $(x, y)$  取每个定位节点 10 次定位的平均值。定位误差为  $n$  个定位节点的平均定位误差。

#### 3.1 不同锚节点个数的定位效果测试

模拟测试条件设定: 发射功率  $P_t = 40\text{ dB}$ , 发射天线增益  $G_t =$  接收天线增益  $G_r = 1\text{ dB}$ , 路径损耗因子  $N = 2.50$ , 测试结果如图 2 所示。

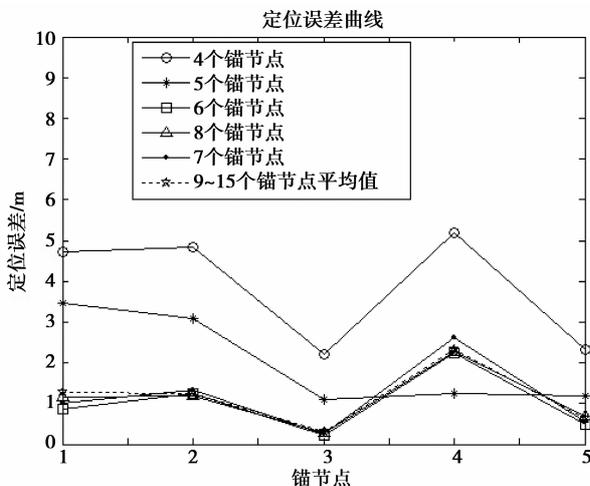


图 2 不同锚节点个数的定位效果

从图 2 可见,锚节点数  $\leq 6$  时,锚节点个数对定位效果产生明显影响,锚节点数越多,定位效果越好。但当锚节点数  $\geq 6$  后,定位误差趋于稳定。因此,在实际应用中,可取锚节点数为 6。

#### 3.2 不同锚节点分布位置的定位效果测试

测试分 4 种情况进行: 试验 1 在测试区域的正上方布置 6 个锚节点; 试验 2 在测试区域的左右两侧各布置 3 个锚节点; 试验 3 在测试区域的正上方和左右两侧各布置 2 个锚节点; 试验 4 在测试区域

正上方布置 4 个锚节点,左右两侧各布置 1 个锚节点。其余测试条件同 3.1。

测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,试验 1 的平均定位误差最大,为  $3.04\text{ m}$ ; 试验 2 的平均定位误差为  $1.62\text{ m}$ ; 试验 3 的平均定位误差为  $0.86\text{ m}$ ; 试验 4 的平均定位误差为  $1.51\text{ m}$ 。可见在锚节点个数不变的情况下,位置变化对定位效果产生较大影响。因此,在实际应用中,应将锚节点均匀分布在滑坡体的上方和左右两侧。

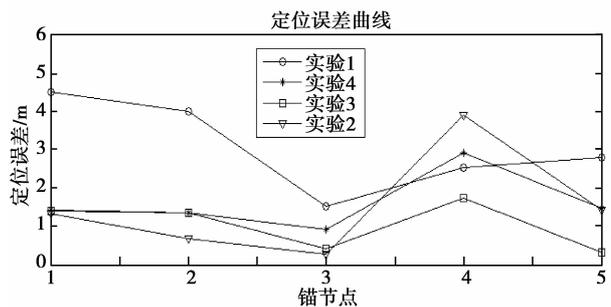


图 3 不同锚节点位置的定位效果

#### 3.3 不同算法的定位效果测试

设锚节点个数为 6, 并均匀分布在滑坡体的上方和左右两侧, 测试条件同 3.1, 测试结果如图 4 所示。

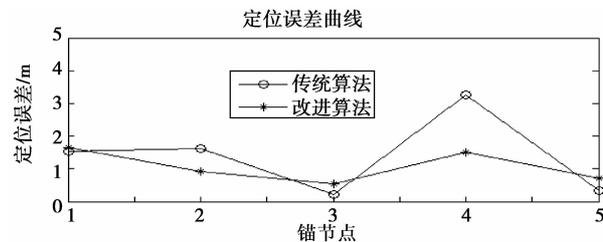


图 4 不同算法的定位效果

由图 4 可知,采用固定路径损耗模型定位算法时,定位误差小于  $1\text{ m}$  的点只有 2 个,最差为第 4 个点,误差达  $3.21\text{ m}$ , 平均定位误差  $1.40\text{ m}$ ; 采用改进算法时,定位误差小于  $1\text{ m}$  的点有 3 个,最优情况出现在第 3 个定位节点,误差仅  $0.57\text{ m}$ , 第 1 个定位节点的效果最差,误差为  $1.73\text{ m}$ , 平均定位误差  $0.93\text{ m}$ 。可见,改进算法明显地提高了定位精度,且稳定性更高。

#### 3.4 不同环境条件下定位效果比较测试

将路径损耗因子  $N$  由  $3.50$  改为  $2.50$ , 模拟外部环境的变化,其余测试条件同 3.1-3.3。图 5 为不同外部环境条件下,固定路径损耗模型定位算法与改进算法的定位效果。

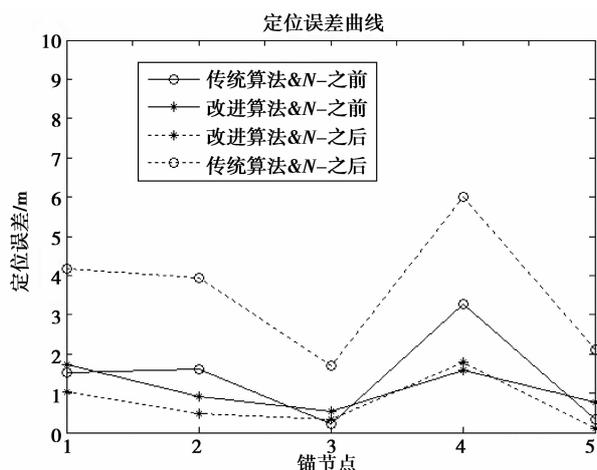


图 5 不同环境下改进算法的定位表现

由图 5 可知,环境改变后,固定路径损耗模型定位算法的平均定位误差明显变大,最大达到 5.76 m 左右,最小也超过 1 m,平均定位误差 3.24 m。说明外部环境的改变使其定位精度下降;改进算法的定位误差并没有随环境改变发生明显变化,保持在 {0.18~1.75} 间,平均定位误差 0.75 m。测试结果表明,自动调整路径损耗模型参数的改进算法,能有效降低外部环境变化对定位精度的影响。

## 4 结 语

与使用固定模型参数的定位算法相比,改进算法通过动态捕捉外部环境的变化,及时改变路径损耗模型参数,显著降低了环境变化对定位精度的影响。对给定的边长  $\leq 20$  m 的矩形滑坡面积实例,使用 MATLAB 对改进算法进行的模拟测试结果表明,可将传统 RSSI 固定路径损耗模型定位算法的米级平均误差降至分米级。

模拟测试结果还表明,锚节点的个数和放置位置对系统定位精度有较大影响。

### 参考文献:

- [1] 全达伟,张平之,吴重庆,等. 滑坡监测研究及其最新进展[J]. 传感器世界, 2005, 11(6): 10-14.  
TONG DA-WEI, ZHANG PING-ZHI, WU CHONG-QING, et al. Research and new development of landslide activity monitoring[J]. Sensor World, 2005, 11(6): 10-14.
- [2] GILI J A, COROMINAS J, RIUS J. Using global positioning system techniques in landslide monitoring[J]. Engineering Geology, 2000, 55(3): 167-192.
- [3] NICHEL J E, SHAKER A, WONG M S. Application of high-resolution stereo satellite images to detailed

landslide hazard assessment [J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2): 68-75.

- [4] CHEN Y C, CHUANG C C, CHANG R, et al. Integrated wireless access point architecture for wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology, February 15-18, 2009, Phoenix Park, Dublin, Ireland. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 713-718.
- [5] HE T, HUANG C D, BLUM B M, et al. Range-free localization schemes for large scale sensor networks[C] // Proceedings of the 9th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, September 14-19, 2003, San Diego, California, USA. [S. l.]: ACM Press, 2003: 81-95.
- [6] ALIPPI C, VANINI G. Wireless sensor networks and radio localization a meteorological analysis of the MICA2 received signals strength indicator [C] // Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, November 16-18, 2004, Tampa, FL, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 1-4.
- [7] CHEUNG K W, SO H C, MA W K, et al. Least squares algorithms for time-of-arrival-based mobile location[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2004, 52(4): 1121-1128.
- [8] CHONG L, ZHUANG W. Hybrid TDOA /AOA mobile user location for wideband CDMA cellular systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 31(1): 439-447.
- [9] NICULESCU D, NATH B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA [C] // Proceedings of the 22nd Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications, March 30- April 3, 2003, Anchorage, AK, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2003: 1734-1743.
- [10] 王福豹,史龙,任丰原. 无线传感器网络中的自身定位系统和算法[J]. 软件学报, 2005, 16(5): 857-868.  
WANG FU-BAO, SHI LONG, REN FENG-YUAN. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [11] YANG F, SHI H S, ZHU L B. An intelligent localization system based on RSSI ranging technique for WSN[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2008, 21(1): 135-139.
- [12] RAPPAPORT T S. Wireless communications: principles and practice [M]. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2006.
- [13] NAFARIEH A, HOW J. A tested for localizing

- wireless LAN devices using received signal strength[C]// Proceedings of the Communication Networks and Services Research Conference, May 5-8, 2008, Halifax, NS, UK. [S. l.]: IEEE Press, 2008: 481-485.
- [14] GOLDSMITH A. Wireless communications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [15] ZANCA G, ZORZI F, ZANELLA A, et al. Experimental comparison of RSSI based localization algorithms for indoor wireless sensor networks[C] // Proceedings of the Workshop on Real-world Wireless Sensor Networks, April 1, 2008, Glasgow, United Kingdom. [S. l.]: IEEE Press, 2008:1-5.
- [16] KUMAR P, REDDY L, VARMA S. Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in wireless sensor networks[C] // Proceedings of the 2009 Fifth International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks, December 15-19, 2009, Allahabad, India. [S. l.]: IEEE Press, 2009:80-83.
- [17] 汪灿. 无线传感器网络定位技术研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2007: 25-26.
- (编辑 郑洁)
- 
- (上接第 98 页)
- [9] 徐云扉, 胡庆昌, 陈玉峰, 等. 低周反复荷载下两跨三层钢筋混凝土框架受力性能的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1986, 7(2): 1-16.  
XU YUN-FEI, HU QING-CHANG, YU HONG, et al. The experimental study of the behavior of a two-bay three-story RC frame under cyclic loading [J]. Journal of Building Structures, 1986, 7(2):1-16.
- [10] 薛伟辰, 程斌, 李杰. 双层双跨高性能混凝土框架抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 37(3):58-65.  
XUE WEI-CHEN, CHENG BIN, LI JIE. Studies on seismic performance of double-story and double-span HPC frames [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(3):58-65.
- [11] 薛伟辰, 胡翔. 四层两跨高性能混凝土框架的抗震性能[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(5):69-79.  
XUE WEI-CHEN, HU XIANG. Seismic performances of four-story two-bay HPC frame [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(5):69-79.
- [12] 杨新磊, 薛伟辰, 窦祖融, 等. 两层两跨现浇柱叠合梁框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6):18-24.  
YANG XIN-LEI, XUE WEI-CHEN, DOU ZU-RONG, et al. Experimental study on seismic behavior of two-story two-bay frame with composite beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6): 18-24.
- [13] 薛伟辰, 杨新磊, 王蕴, 等. 六层两跨现浇柱预制梁框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(6): 25-32.  
XUE WEI-CHEN, YANG XIN-LEI, WANG YUN, et al. Experimental study on seismic behavior of six-story two-bay frame with precast beams and cast-in-place columns [J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(6):25-32.
- [14] 刘振勇. 预制混凝土框架结构抗震性能与智能修复试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [15] 辛立民. 钢筋混凝土异形柱结构抗震性能试验研究与弹塑性时程分析[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [16] 魏春明. 现浇钢筋混凝土框架结构施工缝抗震性能[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [17] 田承昊. 异形柱框架抗震性能试验研究及其有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2005.
- [18] PAULAY T, PRIESTLEY M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [19] SeismSoft Earthquake Engineering Software Solutions. SeismoStruct-a computer program for finite element analysis [EB/OL]. (2010-12-12). <http://www.seismosoft.com/en/HomePage.aspx>.
- [20] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1840-1826.
- (编辑 郑洁)