

# 基于 UHF RFID 的三维位置感知算法设计\*

曾孝平\*\*<sup>1</sup> 王峰<sup>1</sup> 熊东<sup>1</sup> 杨学敏<sup>1</sup> 赵宇<sup>1</sup> 朱周贤<sup>2</sup> 张慧敏<sup>2</sup>

(1. 重庆大学通信工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

**摘要:**研究了基于 UHF RFID 的三维位置感知算法。首先,介绍了位置感知的原理,在理论上分析了可行性。然后针对标签与阅读器之间 PDOA 测距的误差问题,提出了改进的方法,有效减小了测距的误差。定位算法避开了直接解方程组可能由于测距误差导致无解的情况,采用了梯度下降法迭代求解,并通过优化初值,对算法进行了改进,加快了算法的收敛速度。最后,通过仿真验证了改进测距方法和定位算法正确性和改进效果。

**关键词:**位置感知;射频识别;到达相位差;梯度下降法

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1006-6055.2013.02.010

## Design of 3-D Location Aware Algorithm Based on UHF RFID\*

ZENG Xiaoping\*\*<sup>1</sup> WANG Feng<sup>1</sup> XIONG Dong<sup>1</sup> YANG Xuemin<sup>1</sup> ZHAO Yu<sup>1</sup> ZHU Zhouxian<sup>2</sup> ZHANG Huimin<sup>2</sup>

(1. College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030;

2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331)

**Abstract:** 3-D location aware algorithm is researched based on UHF RFID. Firstly, the principle of location aware is introduced, with the feasibility analyzed in theory. Then, an improved method is proposed, decreasing ranging error efficiently on account of the error problem of the ranging between the tag and the reader. With the location algorithm, the situation resulting of solving system of equation with no solution as a result of ranging error is avoided, adopting gradient descent to iterate, and accelerating the convergence speed by improving this algorithm by optimizing the starting value. At last, the exactness and improved effect of the improved ranging method and location algorithm are verified through simulation.

**Key words:** location aware; RFID; PDOA; gradient descent method

### 1 引言

随着物联网技术的飞速发展,产生对精确的位置感知服务应用的需求。位置感知,是对物体的位置进行精确定位技术。目前已有的一些较为成熟的定位技术可以使用,GPS 作为目前应用广泛的定位技术,被应用于各种场合,但在室内等卫星信号无法准确视距传播的范围内,GPS 无法达到较高的定位精度,甚至失效<sup>[1]</sup>。RFID 技术是一种较为成熟的识别技术,也是物联网的关键技术之一,它具有非接触,携带方便,数据容量大,具有唯一标识物体的 ID 等优点,因而被广泛应用到各个领域。RFID 定位技术是目前室内小范围定位研究的热点,工作于 UHF 频段的无源 RFID 系统识别距离可以达到 10 米以上,基本符合室内定位环境,并且无源标签的成本相对较低,因此,在物联网的室内位置感知中采用无源 UHF RFID 技术是一个非常合适的方法。

目前采用 UHF RFID 实现定位的研究大多数都是在二维空间,对目标的位置进行定位,而在三维空间的定位则研究不多。在很多应用中,都需要精确的获取目标的三维位置,因此,研究基于 UHF RFID 技术的三维定位具有重要的应用价值。

### 2 位置感知原理

在给定坐标系空间,要根据已知点的坐标来确定目标的

坐标,主要有测角和测距两种方法<sup>[2]</sup>。基于测角的技术对天线的方向要求严格,天线的设计较为复杂,因此在实际应用中,大多都采用基于测距的方法。下面将介绍基于测距的位置感知方法的原理。

首先,在二维空间中,在测得待定位标签与已知坐标位置的阅读器之间的距离之后,采用三边测量法<sup>[3]</sup>对待定位标签的坐标进行计算。三边测量法的几何原理如图 1 所示。

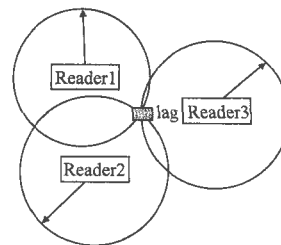


图 1 三边测量法的原理

Figure 1 The theory of trilateration

图 1 中,3 个读写器与标签之间的距离为  $R_i (i=1,2,3)$ , 每个读写器的位置的坐标为  $(x_i, y_i) (i=1,2,3)$  已知,于是有如下关系式:

$$\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2} = R_i, (i=1,2,3) \quad (1)$$

然后联立方程就可以唯一确定待定位标签的位置坐标  $(x_0, y_0)$ 。

在三维空间中,阅读器  $i$  与标签之间的距离关系可以表示为:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = R_i^2 \quad (2)$$

式(2)是一个球面方程,因为标签是一个公共点,根据几何关系可知,以两条有一个公共点的线段为直径的球面相交于一

\* 中央高校基本科研业务费 (CDJZR10160008, CDJRC11160002), 重庆市教委科学技术研究项目 (KJ122203) 资助

\*\* E-mail: zxp@ccee.cqu.edu.cn

个圆或者一点,第三个有相同公共点的球面再相交于一点或者2个点,需要第四个球面来唯一确定一个点。因此需要四个阅读器才能唯一的确定待定位标签的位置。由此可以得到如下方程组:

$$\begin{cases} (x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2=R_1^2 \\ (x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_2)^2=R_2^2 \\ (x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2=R_3^2 \\ (x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2=R_4^2 \end{cases} \quad (3)$$

只要能够准确的获取标签与阅读器之间的距离,就可以由式(3)计算出标签的位置的坐标(x,y,z)。但是,当标签与阅读器之间的距离获取不准确的时候,式(3)可能无解,此时只能求出一个使得式(3)近似成立的解。另外,根据前文讨论的几何关系,式(3)不存在有多个解的情况。

### 3 三维位置感知算法

#### 3.1 距离的获取方法

RFID测距的技术主要有基于到达信号强度(RSSI),信号到达时间(TOA),信号到达时间差(TDOA),信号到达相位差(PDOA)等方法。RSSI受传播环境影响较大,精度低;室内定位传播距离较短 TOA 和 TDOA 对硬件要求太高,因此难于实现;由于阅读器向标签发送信号的过程中,载波给标签充电,同时标签通过反向散射方式将载波反射回去<sup>[2]</sup>,阅读器根据标签反向散射的信号相位差就可以得到距离信息,即使在较复杂的传播环境中,只要能够读取到标签都能够得到较高的测距精度<sup>[4]</sup>,因此采用 PDOA 方法对标签进行测距较适合室内环境的测距。

假设读写器发送出的信号为s(t),在不考虑标签调制和噪声影响的情况下,读写器接收到的标签反射回来的信号可以写为<sup>[6]</sup>:

$$y(t) = \rho \cdot s(t) \cdot e^{-j\varphi} \quad (4)$$

其中,ρ与传播距离相关的幅度,φ是接收到的信号的相位。于是,标签与阅读器之间的距离可以表示为:

$$d = \frac{c \cdot \varphi}{4\pi f} \quad (5)$$

由于UHF RFID的频段是900 MHz左右,波长大约是33cm左右,而对于室内的定位环境,一般是几米到几十米,因此,相位φ存在2π的相位模糊,从而导致测距不准确,采用双频率可以消除相位模糊<sup>[5]</sup>。

假设,读写器分别以2个频率f<sub>1</sub>和f<sub>2</sub>发送信号,对应的标签反射回来的信号的相位分别为φ<sub>1</sub>和φ<sub>2</sub>,如果这2个相位产生的相位模糊的周期一样,将这2个相位相减就可以消除式(2)的相位模糊问题,于是可得:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 4\pi d \cdot (f_2 - f_1) / c \quad (6)$$

从而得到距离d的值为:

$$d = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4\pi\Delta f} \quad (7)$$

上述中,相位差获取是由一个单独的硬件模块来实现,在阅读器运行防撞算法并选定了标签之后,开始读写信息,在第一次开始读写信息的时候,硬件模块才开始获取标

签反射回来信号的相位差,并将这个差值暂存在该硬件模块的寄存器中供处理器读取,这样就避免了运行两次防撞算法时间不同的问题。

综上所述,采用双频率 PDOA 测距可以在一定范围内有效的消除相位模糊的问题,只要根据测量最大距离选定相应的频率差,就可以在无相位模糊的情况下较准确测量标签与阅读器之间的距离。

#### 3.2 改进的 PDOA 测距技术

##### 3.2.1 PDOA 测距的误差分析

在式(7)中,当Δφ的取最大值2π时,距离和最大不模糊频率差的关系如图2所示。

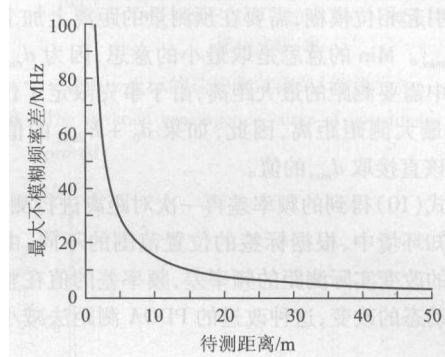


图2 待测距离和最大不模糊频率差的关系

Figure 2 The relationship between the distance to be measured and the maximum unambiguous frequency difference

由图2可知,待测量的距离越大,最大不模糊的频率差就越小,通常选定频率差的方法是,根据需要位置感知环境的最大需要测距的距离来确定一个最大频率差<sup>[2]</sup>。例如,如果位置感知环境中需要测量的最大距离是15 m,由式(4)可以得最大不模糊频率差为10 MHz。

系统获取的相位总存在一定的误差,假如系统获取的相位的误差为E<sub>φ</sub>,那么,由式(7)得最终测距的误差为:

$$E_d = \frac{c \cdot E_\varphi}{4\pi\Delta f} \quad (8)$$

由式(8)可以得知,当E<sub>φ</sub>的值一定,测距的误差和测距时选定的频率差成反比例关系。但由于实际不知道标签和读写器之间的距离,如果按照位置感知环境的最大需要测量的距离来选择频率,则选择的频率差会较小,从而导致最终的误差较大。这样,在待测量距离较小的时候,使得相对误差较大。假设实际待测距离为d<sub>0</sub>,则相对误差表示为:

$$\delta_{E_\varphi} = \frac{c \cdot E_\varphi}{4\pi\Delta f \times d_0} \times 100\% \quad (9)$$

由式(9)知,当实际距离较小时,得到距离的相对误差就会较大。因此,如果能按照图2中的距离和频率差的关系来选择频率差,就可以减小相对误差,即,在测量距离较小时,选定较大的频率差,即式(9)中的Δf较大,相对误差也较小。Li Xin等人提出了用多频率和中国余数定理(CRT)来确定频率差的选择<sup>[4]</sup>。该方法能够有效扩大待测的最大距离,但多读写器频繁的发送信号,必然会造成测距时间较长。

##### 3.2.2 改进的 PDOA 测距技术

由式(8)和(9)可知,在相同的相位检测误差的条件下,

减小测距所用的频率差可以同时减小绝对误差和相对误差。由图2可知,不同的距离都对应一个最大频率差,因此,可以根据距离范围的不同采用不同的频率差来进行测距,关键在于这个距离范围的获取。另一方面,在PDOA测距中,直接选择位置感知需要的最大测距距离对应的频率差 $\Delta f_m$ 只是误差较大,故可以先用 $\Delta f_m$ 进行测量获得一个距离 $d_0$ ,然后根据获得的 $d_0$ 可以由式(7)中令 $\Delta\varphi = 2\pi$ 得到新的频率差为:

$$\Delta f_i = \frac{c}{2 \times \text{Min}[(d_0 + E_{d_{\max}}), d_{\max}]} \quad (10)$$

式中,由于用 $\Delta f_m$ 估算的距离会有误差,为了保证所得到的频率差不引起相位模糊,需要在预测量的距离上加上一个最大误差 $E_{d_{\max}}$ 。Min的意思是取最小的意思,因为 $d_{\max}$ 是位置感知环境中需要测距的最大距离,由于事先限定了位置感知环境中的最大测距距离,因此,如果 $d_0 + E_{d_{\max}}$ 的值超过了 $d_{\max}$ 时,应该直接取 $d_{\max}$ 的值。

根据式(10)得到的频率差再一次对距离进行测量,在整个位置感知环境中,根据标签的位置范围的不同,由预估算法来动态的改变实际测距的频率差,频率差的值在整个感知环境中是动态的改变,这种改进的PDOA测距法减小了测距的误差。

### 3.3 三维定位算法

根据第2部分的原理描述,在三维空间中,要精确的获得待定位目标的三维坐标,需要解一个由4个球面方程组成的方程组,如果,每个阅读器与标签之间的距离的测量都是准确的,并且假定阅读器放置的位置是在空间中的各个角落(如长方体的顶点)以防止3个或4个阅读器和标签在一条直线,则式(2)必有唯一解。但是,实际上阅读器与标签之间的距离的计算不一定是准确的,式(2)中的四个球面方程也就不一定有交点,即式(2)可能无解。因此,需要采用数值计算的方法来计算使得式(2)近似成立的解。这是一个求非线性方程组的数值解的问题,可以采用梯度下降法,最小二乘法,混合遗传算法等数值方法。但由于梯度下降法,计算量较小,收敛速度较快<sup>[2]</sup>,因此,本文选用的定位算法为梯度下降法,其流程如图3所示:

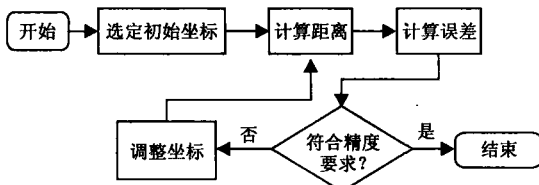


图3 位置感知算法流程

Figure 3 Location aware algorithm flow

首先,在定位区域内选定一个初始的坐标,然后分别计算每个读写器与初始的坐标点间的距离:

$$R_{0i} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (11)$$

将实际测得的标签与第*i*个阅读器之间的距离 $R_i$ 与 $R_{0i}$ 相减得到误差 $e_{0i} = R_i - R_{0i}$ ,如果误差较大则通过式(12)调整误差:

$$\begin{cases} x_0(j+1) = x_0(j) + \Delta x_0(j) \\ y_0(j+1) = y_0(j) + \Delta y_0(j) \\ z_0(j+1) = z_0(j) + \Delta z_0(j) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\Delta x_0(j)$ 、 $\Delta y_0(j)$ 、 $\Delta z_0(j)$ 为修正值<sup>[7]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta x_0(j) = \alpha_x x_0 \delta_{0i} \\ \Delta y_0(j) = \alpha_y y_0 \delta_{0i} \\ \Delta z_0(j) = \alpha_z z_0 \delta_{0i} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$ 分别是*x*、*y*、*z*轴的调节速率, $\delta_{0i}$ 是第*i*个阅读器的梯度,可以表示为:

$$\delta_{0i} = R_{0i} \times e_{0i} \quad (14)$$

标签与四个阅读器之间距离的均方根误差可表示为:

$$\varepsilon_0 = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^4 \left( \frac{R_{0i} - R_i}{R_{0i}} \right)^2}{4}} \quad (15)$$

通过上面的步骤逐渐调整坐标值,直到均方根误差符合要求为止。通常梯度下降法迭代收敛的速度和初值的选择有关,因此,本文通过在的位置感知环境的情况,在初值的选择上对梯度下降法进行改进。一般初值选择都是选择在零点附近,或者随机选择,但在一个布置了阅读器的位置感知环境中,标签通常都不会在零点,要使迭代过程的收敛速度足够快,应使得初始点的选择大多数都尽量接近标签的实际位置。因此,本文将选择定位环境的中心点作为初始点,可以采用式(16)计算:

$$\begin{cases} x_c = \frac{(x_H + x_L)}{2} \\ y_c = \frac{(y_H + y_L)}{2} \\ z_c = \frac{(z_H + z_L)}{2} \end{cases} \quad (16)$$

其中, $x_H$ 、 $x_L$ 、 $y_H$ 、 $y_L$ 、 $z_H$ 、 $z_L$ 分别表示定位环境中标签可能的最大和最小*x*、*y*和*z*坐标。

## 4 仿真与分析

本文以下的仿真采用Matlab 7.6进行,主要针对改进的PDOA技术的效果和三维定位算法的效果进行了仿真实验。

### 4.1 改进的PDOA技术的效果仿真

假设PDOA测距的中相位获取的最大绝对误差 $E_p = 4^\circ$ 。由改进的PDOA测距原理以及式(7~9)可得PDOA测距和改进的PDOA测距的绝对误差和相对误差如图4所示。

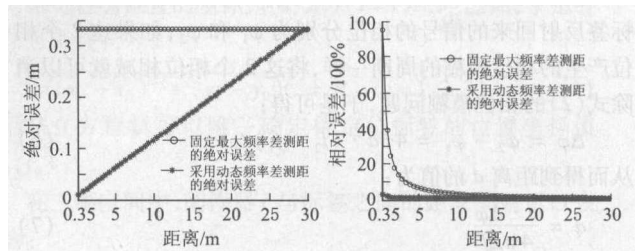


图4 测距的绝对误差和相对误差

Figure 4 The absolute and relative error of ranging

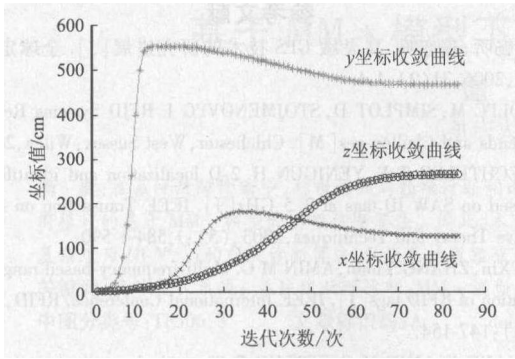


图 5 坐标的迭代收敛曲线

Figure 5 The iteration convergence curve of coordinate

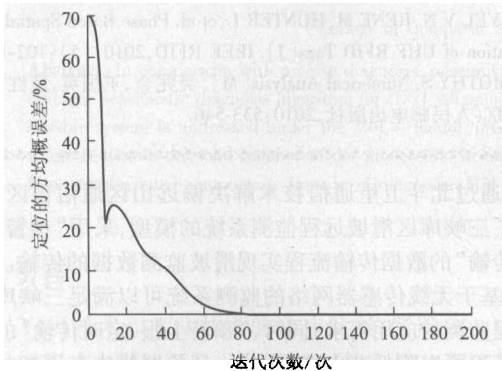


图 6 定位算法的方均根误差收敛

Figure 6 RSM error convergence of location algorithm

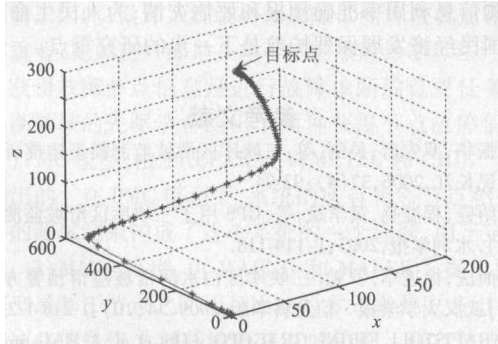


图 7 定位算法的迭代收敛过程

Figure 7 The iteration convergence procedure of localization algorithm

从图 4 中可以得知,使用了动态频率差测距方法产生的绝对误差总是比不使用动态频率差测距方法产生的绝对误差要小,只有在距离接近最大测距距离时才和不使用动态频率差的方法的绝对误差逐渐接近。从距离较小时,没有使用动态频率差测距方法的相对误差最大可达 90%,而使用了动态频率差测距方法的相对误差则在不超过 5% 的一个小的范围内,而且随着测距距离的增大,很快降低。由此可见,本文提出的动态频率差测距的方法可以有效的减小测距中的误差,从而可以提高系统位置感知的精度。

### 4.2 三维定位算法的仿真

为了验证本文的定位算法及其改进的效果,下面将在一个长宽均为 8 m,高度为 5 m 的一个立体空间里对算法进行验证。待定位标签的三维坐标为(125,466,266),迭代的初

始坐标采用(1,1,1),根据定位环境的具体情况,采用试错法来确定  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$  的值,都采用  $1 \times 10^{-6}$ 。通过对算法的仿真得出算法的收敛情况,如图 5~7 所示。

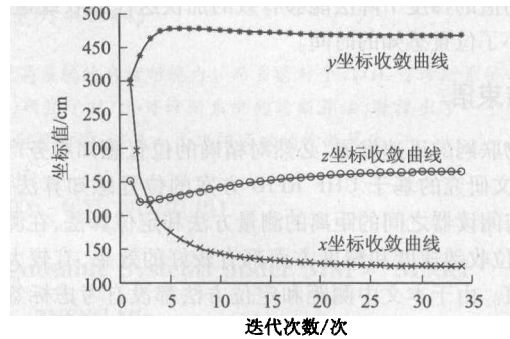


图 8 坐标的迭代收敛曲线(改进后)

Figure 8 The iteration convergence curve of coordinate (after improved)

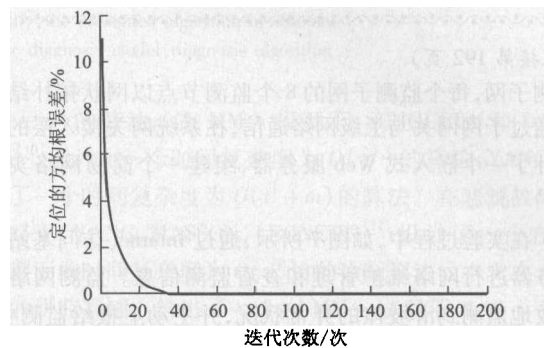


图 9 定位算法的方均根误差收敛(改进后)

Figure 9 RSM error convergence of location algorithm (after improved)

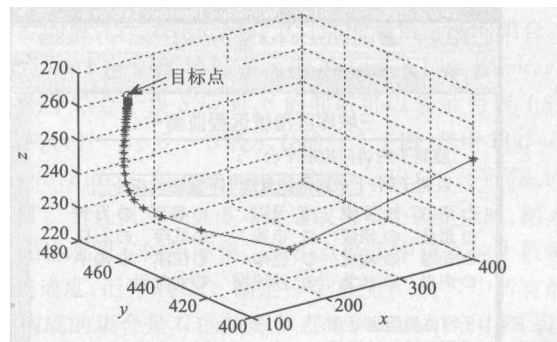


图 10 定位算法的迭代收敛过程(改进后)

Figure 10 The iteration convergence procedure of localization algorithm (after improved)

图 5 说明算法是完全收敛的,经过若干次迭代  $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标最终都逼近了准确值。图 6 表示算法的方均根误差通过迭代也收敛到了一个很小的值。图 7 表示了整个迭代过程,迭代一步,坐标就逐渐向标签的准确位置靠近直到足够靠近为止。上述说明了本文算法的正确性。

通过选择初值,可以使得算法有更快的收敛速度,本文采用中心点法选择迭代的初始值,其他参数和改进前的一样,仿真得出算法的收敛情况如图 8~10 所示。

从图 9 可以看出,算法收敛的速度明显比没有采用初值

改进的收敛要快得多,同时均方根误差也很快就收敛到了很小的值。图10显示了迭代的坐标变化的过程,从图中可以看出,迭代坐标的确很快就靠近了准确的坐标。上述说明,改进初值的梯度下降法能够有效的加快迭代的收敛速度,从而减小了位置感知的的时间。

### 5 结束语

物联网的迅速发展,必然对精确的位置感知服务产生需求,本文研究的基于UHF RFID方案的位置感知算法,包括标签与阅读器之间的距离的测量方法和定位算法,在测距精度,定位收敛速度和精度方面都有较好的效果,有较大的实用价值。由于本文中测距和定位方法都没有考虑标签和阅读器之间有障碍物的情况,如果有障碍物,实际测得的距离应该是电磁波信号通过衍射或者是绕射到达的,从而使得定位精度误差较大,因此,将在下一步的工作中分析这种情况的精确位置感知的算法。

(上接第192页)

监测子网,每个监测子网的8个监测节点以网状拓扑结构连接通过子网网关与上级网络通信,在系统网关接入层的基站设计了一个嵌入式Web服务器,组建一个简易网络实验平台。

在实验过程中,如图7所示,通过Internet访问基站Web服务器进行网络维护管理和查看监测信息。监测网络可以有效地监测到滑坡体的异常状况,并主动上报给监测中心,提供有效的参考数据。监测子网内的无线传感器节点绝大多数时间都处于休眠(未进行信息传输和信息采集)状态,可以大幅降低节点能量消耗,有效延长网络的生存周期。

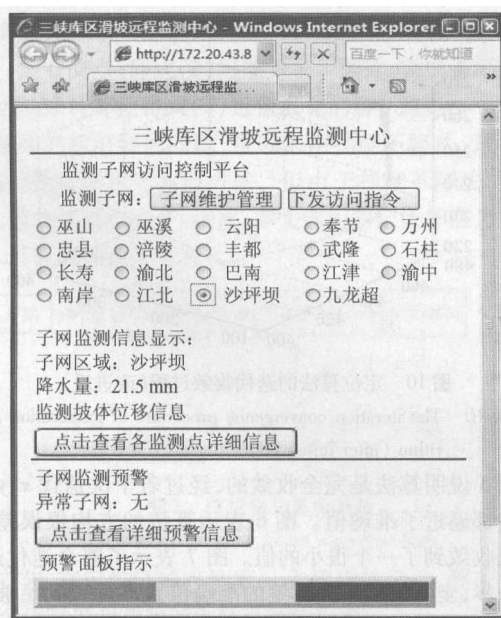


图7 监测中心软件平台  
Figure 7 Monitoring center software platform

### 7 结论

本文将无线传感器网络引入到三峡库区滑坡远程监测

### 参考文献

- [1] 蔡畅听,皮亦鸣. 高灵敏 GPS 技术的研究进展[J]. 全球定位系统, 2006, 31(2): 1-4.
- [2] BOLFC M, SIMPLOT D, STOJMENOVIC I. RFID Systems Research Trends and Challenges[M]. Chichester, West Sussex; Wiley, 2010.
- [3] BECHTELER T F, YENIGUN H. 2-D localization and identification based on SAW ID tags at 2.5 GHz[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2003, (5): 1 584-1 590.
- [4] LI Xin, ZHANG Yimin, AMIN M G. Multi-frequency-based range estimation of RFID tags[J]. IEEE International Conference. RFID, 2009, (3): 147-154.
- [5] AHAND F, AMIN M G, SETLUR P. Through-the-wall target localization using dual-frequency CW radars[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6201: 1-12.
- [6] PAVEL V N, RENE M, HUNTER L, et al. Phase Based Spatial Identification of UHF RFID Tags[J]. IEEE RFID, 2010, (5): 102-109.
- [7] TIMOTHY S. Numerical Analysis[M]. 吴兆金, 王国英, 范红军, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 533-546.

中,并通过北斗卫星通信技术解决偏远山区通信盲区问题,构建了三峡库区滑坡远程监测系统的模型,采用“预警上报,定时传输”的数据传输流程实现滑坡监测数据的传输。实验表明:基于无线传感器网络的监测系统可以满足三峡库区滑坡远程监测的应用需求;同时,“预警上报,定时传输”的数据传输流程可以降低节点能量消耗,延长网络生存周期。滑坡监测是一项庞杂的系统工程,除了监测信息采集和传输外还包括信息分析预报和评估等。如何通过改进监测手段和提高监测信息利用率准确预报和评估灾情,为人民生命财产安全和国民经济发展保驾护航是下一步的研究重点。

### 参考文献

- [1] 张振华,罗先启,吴剑,等. 三峡库区滑坡监测模型建模研究[J]. 人民长江, 2006, 37(4): 93-94.
- [2] 徐绍铨,程温鸣,黄学斌,等. GPS 用于三峡库区滑坡监测的研究[J]. 水利学报, 2003, 1: 114-118.
- [3] 王尚庆,徐进军,罗勉. 三峡库区白水河滑坡险情预警方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(10): 1 218-1 221.
- [4] KARAPISTOLI, EIRINI, GRAGOPOULOS, et al. A MAC protocol for low-rate UWB wireless sensor networks using directional antennas[J]. Computer Networks, 2009, 53(7): 961-972.
- [5] ARORA A, DUTTA P, BAPAT S, et al. A line in the sand: A wireless sensor network for target detection, classification, and tracking[J]. Computer Networks, 2004, 46: 605-634.
- [6] FARKAS K, HEIDEMANN J, IFTODE L. Vehicular communication[J]. IEEE Pervasive Computing, 2006, 5(4): 55-62.
- [7] 仲元昌,郭开林,徐保桂,等. 面向三峡库区水环境监测的混合网络构建[J]. 世界科技研究与发展, 2010, 32(6): 737-740.
- [8] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1 104-1 112.
- [9] 谢洁锐,刘才兴,胡月明,等. 无线传感器网络的部署[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(1): 4-7.
- [10] 缪新颖,褚金奎,杜小文. 基于大坝监测的无线传感器网络结构的设计[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(9): 100-103.
- [11] POTTIE G, KAISER W. Wireless sensor networks[J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 551-558.