

文章编号:1671-251X(2015)12-0040-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.12.011
刘晓阳,何赞.基于CSS的井下精确定位服务系统设计[J].工矿自动化,2015,41(12):40-44.

基于 CSS 的井下精确定位服务系统设计

刘晓阳, 何赞

(中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083)

摘要:针对目前无线传感器网络定位系统存在定位精确度不高的问题,提出了一种基于 CSS 的井下精确定位服务系统设计方案,介绍了该系统的硬件构成、CSS 精确定位算法和系统的具体工作过程等。该系统通过基于 TDOA 的 CSS 精确定位技术准确地定位终端位置,并通过 WCDMA 的 3G 通信模块发送数据到云计算服务平台,以便用户在任何能使用 Web 浏览器平台的地点获取终端位置信息。仿真实验结果表明,相比其他井下定位系统,该系统可大大提高定位精度,减少定位误差。

关键词:井下无线通信;精确定位;CSS 测距;云计算平台;投票平均联合滤波法;WCDMA;TDOA
中图分类号:TD655 文献标志码:A 网络出版时间:2015-12-04 15:40

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20151204.1540.011.html>

Design of underground precise positioning service system based on CSS

LIU Xiaoyang, HE Yun

(School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of
Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In view of problem of low positioning accuracy of wireless sensor network positioning system, a design scheme of underground precise positioning service system based on CSS was presented. The hardware structure, CSS precise positioning algorithm and specific work process of the system were introduced. The system uses CSS precise positioning technology based on TDOA, and can accurately locate the position of terminal, and send data via WCDMA 3G communication module to cloud computing services platform, so that users can use any Web browser platform to obtain the terminal location information. The simulation experiment results indicate that the system can improve positioning accuracy greatly and reduces error compared with other underground positioning systems.

Key words: underground wireless communication; precise positioning; CSS ranging; cloud computing platform; vote on average filtering algorithm; WCDMA; TDOA

0 引言

随着通信技术的发展,无线通信逐渐成为煤矿井下的通信方式,井下无线传感器网络主要通过无线方式实现节点间的信息交换和定位。目前,现有的无线传感器网络定位方法根据是否要测距分为基于测距的定位方法和无需测距的定位方法。常用的基于测距的定位方法包括 RSSI、TOA、TDOA 和

AOA。基于 RSSI 的定位方法虽然满足低功率、低成本的要求,但有可能产生较大的测距误差;基于 TOA 的定位方法要求节点有精确的时间同步,很难应用于大规模的无线传感器网络定位;TDOA 定位方法受到超声波传播距离和非视距问题的限制;AOA 定位方法需要额外的硬件,在成本和功耗上受到限制,而且还受外部环境的影响。无需测距的定位方法,如质心和凸规划等,具有成本低、受环境影

收稿日期:2015-09-09;修回日期:2015-11-20;责任编辑:张强。

基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(51134024);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2009KJ03)。

作者简介:刘晓阳(1968—),女,山西临汾人,副教授,博士,现主要从事矿井监控与通信方面的研究工作,E-mail:liuxy1225@163.com。

响小等优点,但其存在测距误差积累、定位精度低等问题。在3G通信网中,常用的定位方法还有GPS辅助定位技术,但该技术仅适用于室外无遮挡的环境,在井下以及有遮盖阻挡的环境下无法使用,且具有功耗大、成本高等缺点,无法应用于能量受限的无线传感器网络中。而且煤矿井下工作环境复杂,工作环境中有易燃易爆的瓦斯等气体,无线信号电磁干扰严重。最近,一种应用于无线传感器网络定位的新型技术——线性调频扩频技术(Chirp Spread Spectrum, CSS)应运而生,其在中短距离内具有良好的定位精度和稳定性,不仅支持低的能量消耗,还支持精确测距,非常适合应用于井下、室内等无线传感器网络节点定位^[1]。针对煤矿井下复杂多变的环境,本文提出了一种基于CSS的井下精确定位服务系统,可以准确地定位终端的位置,并且通过WCDMA的3G通信模块将数据发送到服务器,使得用户可在任何能使用Web浏览器平台的地点获取终端位置信息。

1 系统硬件架构设计

基于CSS的井下精确定位服务系统的硬件架构包括CSS定位基站系统和便携式智能终端。CSS定位基站系统包括CSS收发器、4根基站天线和单片机CPU主板,如图1所示。

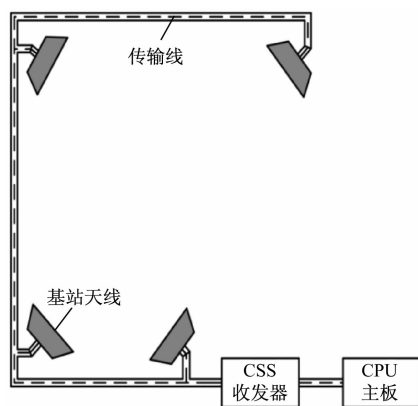


图1 CSS定位基站系统构成

便携式智能终端由CSS收发天线、功率放大器、CSS脉冲收发模块、单片机和WCDMA无线通信模块组成,如图2所示。CSS收发天线通过功率放大器连接CSS脉冲收发模块的输入端,CSS脉冲收发模块的输出端连接单片机的输入端;单片机的输出端通过WCDMA无线通信模块与服务器通信连接;服务器包括网络接口和Web接口,网络接口用于连接3G网络,并接收智能终端发送的实时地理坐标信息;Web接口用于用户从服务器上获取实

时地理坐标信息。

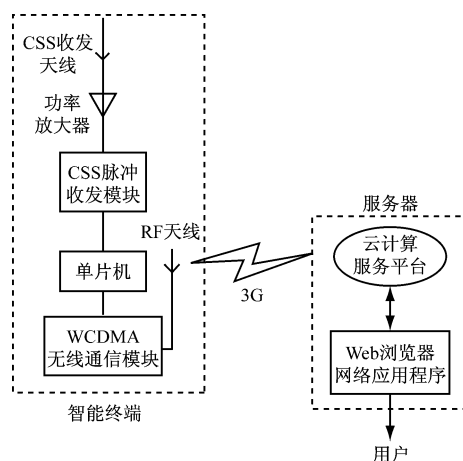


图2 便携式智能终端构成

2 系统具体工作过程

基于CSS的井下精确定位服务系统的具体工作过程^[2]如图3所示。

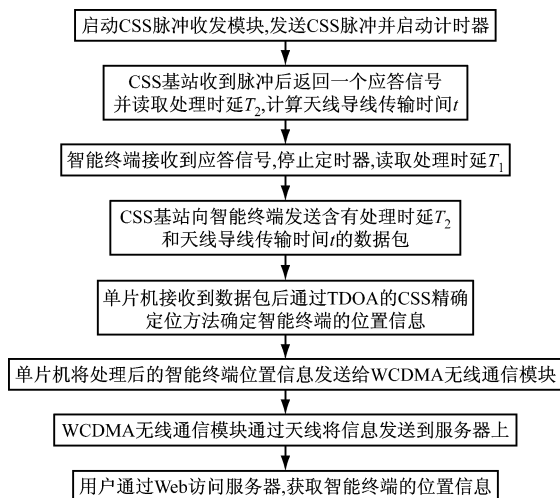


图3 基于CSS的井下精确定位服务系统的具体工作过程

启动智能终端的CSS脉冲收发模块,向外发送CSS脉冲,并启动定时器。CSS定位基站系统的基站天线收到CSS脉冲信号经传输线传送到其后台CPU,后台CPU接收到脉冲信号后,启动自己的定时器。同时基站天线自动返回一个应答信号并停止定时器,读取处理时延 T_2 并计算测试信号在传输线上的传输时间 t 。智能终端通过CSS收发天线接收应答信号后停止定时器,读取处理时延 T_1 ;由CSS定位基站系统再向智能终端发送信号,该数据包中包含了处理时延 T_2 和天线导线传输时间 t ,智能终端的单片机接收到数据包后,可计算得到接收应答信号的实际时间 $T = \frac{T_1 - T_2 - 2t}{2}$ 。根据无线信号在空气中的传播速度是光速 c ,可得到待定位

节点与每个参考节点之间的距离 $\bar{d}_f = cT$,单片机采用CSS精确定位算法确定智能终端的位置信息,并将处理后的实时地理坐标信息发送给WCDMA无线通信模块^[3]。WCDMA无线通信模块将接收到的实时地理坐标信息进行转换,并通过3G网络发送到Web服务器上,所以用户可以在任何能用Web上网的地方访问Web服务器,获取终端坐标信息。

3 系统精确定位算法的实现

井下精确定位服务系统采用CSS精确定位算法,移动终端向CSS定位基站发送测试信号,CSS定位基站的各基站天线在接收到测试信号后,分别发送应答信号给移动终端。移动终端根据接收到应答信号的实际时刻及无线信号在空气中的传播速度,得到待定位节点与每个参考节点之间的距离测量值。采用上述测量方法, N 次测量待定位节点与各参考节点之间的距离,获得该待定位节点与对应参考节点的 N 个测距值^[4]。然后使用投票平均联合滤波算法分别对这 N 个测距值进行干扰处理,即通过高斯概率分布函数计算每个测距值的投票概率,当投票概率小于设定的置信值时,CSS就抛弃该测距值,否则就保留。利用动态误差修正算法对保留下来的测距值进行动态修正,对修正后的测距值取平均值,然后使用TDOA的三维定位算法,求得待定位节点的位置坐标,最终实现精确定位。

目前井下定位存在以下问题:周围恶劣环境导致测距样本准确度低、滤波算法复杂;不同节点和环境导致了测距误差模型方程的差异;存在因基站和移动终端不在一个平面而导致的高程差等,造成定位不精确。本系统通过以下技术手段,实现准确定位终端的位置,从而大幅度提高了定位精度,抑制了定位误差。

3.1 CSS测距样本准确度的保证

采用CSS精确定位算法 N 次测量待定位节点与各参考节点之间的距离,然后通过高斯概率分布函数计算每个测距值的投票概率,当投票概率小于设定的置信值时,CSS就抛弃该测距值,否则保留;对保留下来的测距值利用动态误差修正算法进行动态修正,去除了因周围恶劣环境影响而导致的测距样本污染,保证了CSS测距样本的准确度。

3.2 最佳测距误差模型的利用

矿井目前视距范围内减少误差的方法一般是取测距测试所拟合的测距误差模型方程作为修正方程

对测量结果进行修正,即在整个定位中不考虑节点和环境不同等导致测距误差模型方程的差异^[5],而采用同一方程对结果进行修正的静态误差修正算法,导致最终定位精度不高。为了解决此问题,本系统采用动态误差修正算法进行修正^[6]。

先设定最小定位单位,即一个待定位节点与4个参考节点,然后利用最小定位单位的待定位节点与4个参考节点的4组 m 个测距值,根据距离约束方程找出每一组测距值对应的最佳测距误差模型,利用这个最佳测距误差模型对每一组的 m 个测距值进行修正。

找出最佳测距误差模型的具体步骤如下:

(1) 视距环境下CSS定位的测距误差数学模型为

$$d_f = a\bar{d}_f + b \quad (1)$$

式中: d_f 为待定位节点到4个参考节点的真实距离, $f=0,1,2,3$; $\bar{d}_f$ 为待定位节点到4个参考节点的测量距离; a, b 为线性方程系数, $a \in [a_1, a_2]$, $b \in [b_1, b_2]$, a_1, a_2, b_1, b_2 是定位前对最小定位单位进行测距测试并通过最小二乘法对测距测试拟合后,与所得系数 a, b 对应的一个较小取值区间的上下限界值。

(2) 定义测量误差 $\epsilon_f: \epsilon_f = d_f^2 - \bar{d}_f^2$,结合式(1)可得

$$\epsilon_f = (a_2 - 1)\bar{d}_f^2 = 2ab\bar{d}_f + b^2 \quad (2)$$

最佳测距误差模型的选取原则:取距离约束方程 $f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ 最接近0的一组解作为最佳测距误差模型的系数,即

$$f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = \mathbf{\epsilon}^T \mathbf{Q} \mathbf{\epsilon} + \mathbf{\epsilon}^T \mathbf{a} + \lambda = 0 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{\epsilon} = [\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3]$; $\mathbf{Q}$ 为 3×3 阶矩阵; $\mathbf{a}$ 为 3×1 阶矩阵; λ 为一实数。

将 ϵ_f 代入距离约束方程式 $f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3)$ 中,得到关于 a, b 的函数,记为

$$\begin{aligned} F(a, b) = f(\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3) = & f[(a^2 - 1)\bar{d}_0^2 + \\ & 2ab\bar{d}_0 + b^2, (a^2 - 1)\bar{d}_1^2 + 2ab\bar{d}_1 + b^2, \\ & (a^2 - 1)\bar{d}_2^2 + 2ab\bar{d}_2 + b^2, \\ & (a^2 - 1)\bar{d}_3^2 + 2ab\bar{d}_3 + b^2] \end{aligned} \quad (4)$$

(3) 在 $a \in [a_1, a_2]$, $b \in [b_1, b_2]$ 内, $F(a, b)$ 值最接近0时所对应的一组系数就是测距误差模型的最佳系数估计,从而求解方程:

$$\begin{cases} \min F(a, b)^2 \\ a_1 \leq a \leq a_2 \\ b_1 \leq b \leq b_2 \end{cases} \quad (5)$$

得到最优系数 a^*, b^* , 确定最佳测距误差模型为

$$d_f = a^* \bar{d}_f + b^* \quad (6)$$

3.3 待定位节点的位置坐标获取

对使用动态误差修正算法^[7]处理的测距值取平均值, 然后对得到的平均值使用 TDOA 三维定位算法^[8]求得待定位节点的位置坐标, 最终实现精确定位。该算法很好地解决了现实中各个基站和移动终端不在一个平面时, 高程差对定位精度的影响问题。

TDOA 三维定位算法具体过程如下:

设 4 个参考节点的位置坐标分别为 (x_0, y_0) , (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , 待定位节点的位置坐标为 (x, y) , $\bar{d}_0, d\bar{d}_1, d\bar{d}_2, d\bar{d}_3$ 分别为待定位节点到 4 个参考节点的距离, 待定位节点到参考节点 (x_0, y_0) 和待定位节点到其他 3 个参考节点 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) 的距离差为 $\Delta \bar{d}_k (k=1, 2, 3)$, 则定位方程为

$$\begin{cases} \bar{d}_0 = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \\ \bar{d}_k = \sqrt{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2 + (z-z_k)^2} \\ \Delta \bar{d}_k = \bar{d} \\ \Delta \bar{d}_k = d_0 - \bar{d}_k \end{cases} \quad (7)$$

化简式(7)可得

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{B} \quad (8)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 - x_0 & y_1 - y_0 & z_1 - z_0 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \end{bmatrix}; \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}; \mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} P_1 + \Delta \bar{d}_1 \bar{d}_0 \\ P_2 + \Delta \bar{d}_2 \bar{d}_0 \\ P_3 + \Delta \bar{d}_3 \bar{d}_0 \end{bmatrix}, P_i = \frac{1}{2} (\bar{d}_i^2 - \Delta \bar{d}_i^2 - \bar{d}_0^2), \bar{d}_i^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, i=1, 2, 3.$$

将式(8)看作为带参数 $\bar{d}_0$ 的 x, y, z 线性方程组, 可采用迭代法求解。化简式(8)得

$$\begin{cases} x = n_1 \bar{d}_0 + m_1 \\ y = n_2 \bar{d}_0 + m_2 \\ z = n_3 \bar{d}_0 + m_3 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{式中: } n_j = \sum_{k=1}^3 a_{jk} \Delta \bar{d}_k; m_j = \sum_{k=1}^3 a_{jk} p_k, j=1, 2, 3.$$

将式(9)中 $\bar{d}_0$ 看作已知量, 并将其代入式(7)中 $\bar{d}_0$ 表达式, 经化简得

$$\bar{d}_0 = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} a = n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 - 1 \\ b = 2n_1(m_1 - x_0) + 2n_2(m_2 - y_0) + 2n_3(m_3 - z_0) \\ c = (m_1 - x_0)^2 + (m_2 - y_0)^2 + (m_3 - z_0)^2 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10), 当求得 $\bar{d}_0$ 的值为正一负时, 取 $\bar{d}_0 > 0$ 的解; 如果 $\bar{d}_0$ 的 2 个值皆为正值, 则根据时间差的正负或者借助其他约束条件消除定位模糊; 最后, 将符合条件的 $\bar{d}_0$ 代入式(9)可求得待定位节点的位置信息。

4 仿真实验及结果分析

为了对本系统所依据的 CSS 精确定位方法的性能进行评价, 本文采用 Matlab 对该算法进行仿真。

仿真环境参数: 4 个参考节点被随机分布在 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的方形区域的 4 个顶点位置, 栅格单位长度为 1 m , 中间没有障碍物。待定位节点采用随机移动模型, 随机地在这个方形区域选择目的位置和停留时间。假定待定位节点的移动速度为 $0 \sim 50 \text{ m/s}$, 节点间的通信半径为 10 m , 样本数量 $N=30$ 。误差模型使用平均定位误差模型。仿真实验中分别对 CSS 精准定位算法和静态误差修正的 TDOA 二维定位算法(即没有考虑测距误差方程的差异性以及基站和终端的高程差的影响)仿真 30 次, 最后取平均定位误差得到最终仿真结果, 如图 4 所示。

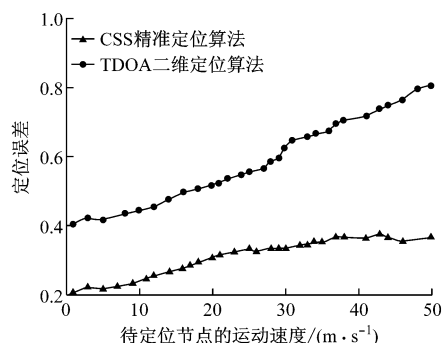


图4 定位算法仿真结果

平均定位误差 δ 的计算公式如式(12)所示:

$$\delta = \frac{1}{30} \sum_{l=1}^{30} \sqrt{(x_{zs} - x_l)^2 + (y_{zs} - y_l)^2 + (z_{zs} - z_l)^2} \quad (12)$$

式中: (x_{zs}, y_{zs}, z_{zs}) 为待定位节点的真实位置坐标; (x_l, y_l, z_l) 为待定位节点分别在上述 2 种算法下的计算坐标。

从图 4 仿真结果可以看出,随着待定位节点运动速度的增大,其可能位置的分布区域也会随之加大,从而使得 TDOA 三维定位算法的定位误差加大,定位精度下降;然而采用本文的 CSS 精确定位算法的平均定位精度在 96%以上,说明 CSS 定位算法是一种准确度较高的定位算法。

5 结语

CSS 定位技术在中短距离的定位中具有良好的定位精度和稳定性,不仅支持低的能量消耗,还支持精确测距,因而成为了无线传感器网络井下定位的首选技术。基于 CSS 的井下精确定位服务系统充分利用了 CSS 无线定位的高精度特性,能准确地定位出智能终端的位置,并通过 WCDMA 的 3G 通信模块发送数据到云计算平台,使得用户能够在任何能使用 Web 浏览器的地方实时地获取终端位置信息,是一种较好的井下精确定位服务系统解决方案,定位精度明显优于其他定位系统。

参考文献:

[1] 杨清玉,于宁. 无线传感器网络线性调频扩频测距方

法研究[J]. 传感技术学报,2010,23(12):1761-1765.

[2] 卢东亮,俞庆生,梁广玲,等. CSS 定位技术的研究与应用[J]. 无线互联科技,2012(8):159-160.

[3] 张晓光,李军. 无线通信系统在煤矿的应用分析[J]. 工矿自动化,2013,39(6):25-28.

[4] 刘世森,汤朝明,吴畏. 无线传感器网络中的 TOA 测距方法研究[J]. 工矿自动化,2012,38(3):32-33.

[5] MAO G, FIDAN B, ANDERSON B D O. Wireless sensor network localization techniques[J]. Computer Networks,2007,5(10):2529-2553.

[6] 席通专,丁希仑. 基于线性调频扩频定位的动态误差修正算法[J]. 机械制造与自动化,2013,42(1):89-92.

[7] 欧汉杰. 基于 Chirp 扩频技术的超宽带井下定位技术研究[J]. 大众科技,2010(5):16-17.

[8] 刘俊辉,李娜. 基于 TDOA 的移动目标定位系统研究[J]. 郑州牧业工程高等专科学校学报,2007,27(1):42-44.