

消防员应急救援三维定位技术^①

刘高平, 张金燕

(浙江万里学院 EDA 重点实验室, 宁波 315100)

摘要: 研究了一种在火灾现场对被困消防员进行应急救援的三维定位方案。该方案采用线性调频扩频(CSS)技术与其独有的对称双边两路测距(SDS-TWR)机制, 并结合 BMP085 气压传感器测量高度, 实现对消防员的三维定位。由于火灾现场复杂的环境加强了 Chirp 信号传输时的多径效应, 因此采用卡尔曼滤波法滤除坐标突变值, 能够将定位误差控制在 1m 以内。

关键词: 线性调频扩频; 对称双边两路测距; 消防救助; 三维定位; 卡尔曼滤波

3D Positioning Technology for Firefighters' Emergency Rescue

LIU Gao-Ping, ZHANG Jin-Yan

(EDA Key Laboratory, Zhejiang Wanli University, Ningbo 315100, China)

Abstract: This paper researches a three-dimensional positioning scheme for emergency rescue of trapped firefighters at the fire scene. This scheme adopts Chirp Spread Spectrum (CSS) and its particular Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging (SDS-TWR). Combining BMP085 pressure sensor to measure altitude, it can implement three-dimensional positioning of firefighters. Due to the complex environment of the fire scene would cause multipath effect when Chirp signal being transmitted, this scheme uses Kalman filtering method to filter out mutative coordinate value, thus the positioning error can be controlled within 1 m.

Key words: chirp spread spectrum; symmetric double-sided two-way ranging ranging; fire rescue; 3D positioning; Kalman filter

由于人们消防意识的欠缺, 越来越多关于年轻消防员救火牺牲的新闻见诸报端。本文研究的定位技术能够记录每一位消防员在火灾现场的运动轨迹, 有助于对被困消防员进行应急救援, 强有力的保障消防员的人身安全。由于大多数火灾都发生在室内, GPS 卫星的信号在室内容易被遮挡, 而 CSS 技术能够很好地解决室内定位的精度问题。线性调频扩频技术(Chirp Spread Spectrum, CSS)是采用 Chirp 信号实现扩频的通信技术。CSS 技术通过对载波进行调制以增加信号的发射带宽, 并在接收时实现脉冲压缩, 具有抗衰减能力强、传输距离远、功耗低等优点^[1-3]。CSS 技术其特有的对称双边两路测距 (SDS-TWR, Symmetric Double-Sided Two-Way Ranging)机制是一种基于到达时间(Time of Arrival, TOA)的测距方法, 根据无线信

号从发射端到达接收端的传输时间计算出基站与定位目标之间的距离, 并通过一定的定位算法实现对消防员的定位。

1 CSS技术测距原理

1.1 Chirp 信号特征

Chirp(啁啾)信号是一种频率调变的脉冲, 在 T 的时间区间里面, 其频率随着时间做线性变化, 而且呈单调递增或递减的趋势。Chirp 信号的数学表达式为^[4]:

$$s(t) = \text{rect}(t/T) \cos(2\pi f_0 t \pm \pi \mu t^2) \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(t/T)$ 是 Chirp 信号的包络, T 为脉冲宽度, f_0 为载频, $\mu=B/T$ 为线性调频斜率, B 为信号调频带宽。表达式中“+”表示正向线性调频脉冲(Up-Chirp), “-”表示反

^① 基金项目:浙江省公益技术应用研究计划项目(2015C33023);宁波市社会发展科技攻关项目(2014C50022)

收稿时间:2015-07-08;收到修改稿时间:2015-09-21

向线性调频脉冲(Down-Chirp).

1.2 Chirp 信号脉冲压缩原理

CSS 在接收数据时采用脉冲压缩原理, Up-Chirp 信号与 Down-Chirp 信号相互正交, 有良好的自相关性, 因此可以互相作为其匹配滤波器的冲击响应, 进行相干匹配滤波.

以上升频信号为例, Up-Chirp 信号经过匹配滤波后的最终表达式为:

$$y(t) = \sqrt{BT} \cos(2\pi f_0 t) \frac{\sin[\pi Bt(1 - |t|/T)]}{\pi Bt} \quad |t| < T/2 \quad (2)$$

由上式可知, 输出波形具有尖锐的时域特性, 幅度为 1 的 Chirp 信号经过压缩后成为 sinc 函数, 包络幅度放大为原来的 \sqrt{BT} 倍, 且能量集中在宽度为 $2/B$ 的时间段内^[5]. Chirp 信号的一个重要指标是时间带宽积, 即 BT 积. 由于 Chirp 信号的 BT 积远大于 1, 因此 Chirp 信号具有较强的抗干扰能力.

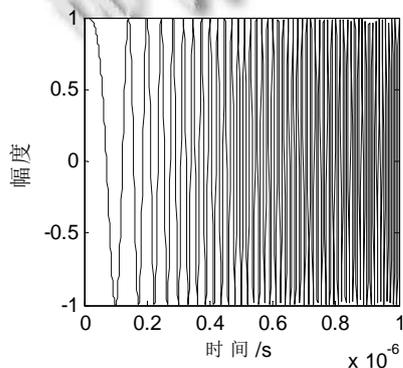
1.3 Chirp 信号时延估计及仿真

在复杂的室内环境中, 发射出去的信号受到障碍物的遮挡, 经过反射、折射后形成多条路径到达接收站, 实际接收到的信号是多条路径的叠加, 这就是多径效应. 不同路径到达接收站都具有一定的时差, 该时差通常在 ns 级^[6]. 对 Chirp 信号经过匹配滤波后, 通过峰值检测会得到多个时延估计值, 将最强径所对应的时延估计值作为信号的实际传输时间.

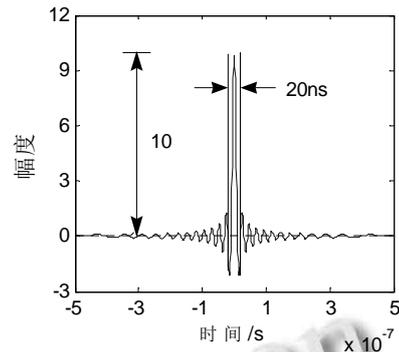
设接收端的 Chirp 信号相对于发送端时延为 t_0 , 匹配滤波器的增益为 $\sqrt{4\mu}$, 那么匹配滤波器的输出为:

$$y(t) = \sqrt{4\pi}(T - |t - t_0|) \text{sinc}[\mu(t - t_0)(T - |t - t_0|)] \cdot \exp\{j[2\pi f_0(t - t_0)]\} \quad (3)$$

用 Matlab 软件对 Chirp 信号进行仿真, 假设 Chirp 信号的中心频率 $f_0=2\text{GHz}$, 脉冲宽度 $T=1\mu\text{s}$, 信号带宽 $B=100\text{MHz}$, 斜率 $\mu=B/T=100\text{MHz}/\mu\text{s}$, 该 Chirp 信号的时域波形及自相关波形如图 1 所示.



(a) Chirp 信号时域波形



(b) Chirp 信号自相关波形

图 1 Chirp 信号的时域波形及自相关波形图

假设信号是从距离发射端 15m、30m、60m 的位置反射回来, 接收端进行匹配滤波后检测到不同的峰值, 其对应的到达时延分别为 100ns、200ns、400ns. Chirp 信号经脉冲压缩后的时延估计波形如图 2 所示.

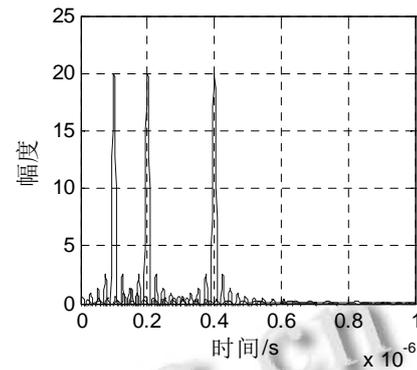


图 2 脉冲压缩时延估计波形

1.4 对称双边两路测距机制

CSS 技术采用对称双边两路测距机制, 只需满足各基站之间保持时钟同步即可^[7], 该方法能够有效地避免晶振漂移, 它有两数据交换的过程, 其原理如图 3 所示^[8].

节点 A 向节点 B 发送数据包并接收节点 B 发送的应答, 计算出从发出数据包到接收到应答的传输延时 t_{roundA} , 节点 B 从接收到数据包开始计时, 一直到发送出应答, 得到处理延时 t_{replyB} . 节点 A 接收到由节点 B 发送的包含 t_{replyB} 的应答数据包后完成第一次数据交换. 通过两次数据交换, 计算出信号传输的时间 t_p , 从而得出节点之间的距离计算公式如下, 其中 c 为信号的传播速率, 约为光速.

$$d = c(t_{\text{roundA}} - t_{\text{replyB}} + t_{\text{roundB}} - t_{\text{replyA}}) / 4 \quad (4)$$

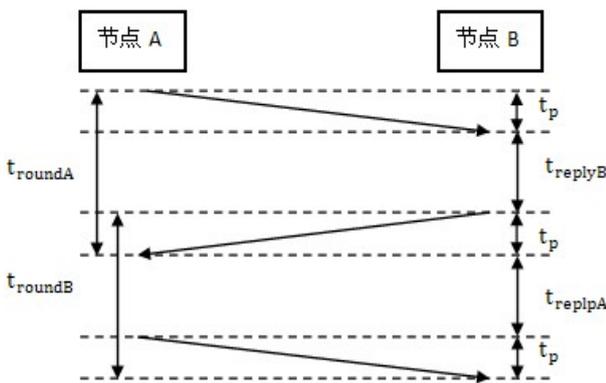


图 3 对称双边两路测距原理

2 三维定位算法及误差补偿

2.1 系统架构

应急救援定位系统在紧急情况(如火灾)下架设,一般由移动标签(Tag)、位置固定的基站(Anchor)和监控终端(PAD、PC 或笔记本电脑)组成。

移动标签是整个系统的最底层,负责测量与各个固定基站之间的距离,并以广播包的形式将定位数据包发送给各个基站。移动标签安装在移动节点(如消防员)上,并在规定时限内定时将位置送到监控终端,实现移动标签的实时定位。

一种典型的移动标签的内部结构框图如图 4 所示。其中气压传感器用于标签的高度测量。近来利用气压传感器进行高度测量的应用研究很多,如文献[9-11],本文不再赘述。

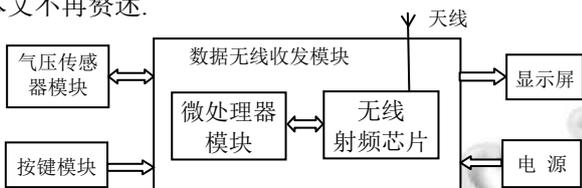


图 4 典型的移动标签硬件框图

基站的位置是固定不变的,可以看成是已知坐标的定位节点,它用于接收从标签发送来的定位数据包,并利用 CSS 技术测距原理计算出基站与标签之间的距离。基站的数目根据应急现场的情况设置而定,可以为 2 个、3 个或者 4 个,一般将基站临时安装在应急现场(如大楼、仓库等)的周围,并根据基站的位置设定其坐标。其中一个基站与监控终端相连,输出接收到的数据给监控终端,基站的硬件框图基本上与移动标签类似。

监控终端的作用是接收各移动标签发送来的位置

与环境信息,利用下文 2.2 中的三维定位算法计算出移动标签的坐标,并对基站输出的数据进行滤波处理与修正;在定位软件的图形界面上实时显示出当前时刻各基站、标签的三维位置。

2.2 三维定位算法

各基站与移动标签之间的距离、以及它们相对于地平面的高度知道后,就可以通过几何计算得出移动标签的位置。

假设 z_i 为基站 $i(i \in [1, N])$, 其中 N 为基站总数)到地面的高度,即基站 i 的 z 坐标值,通过气压-高度转换得到标签与基站 i 的海拔高度^[9-11], 分别为 h 、 h_i , 则标签坐标 z 的计算公式如下:

$$z = |h - h_i| + z_i \tag{5}$$

由于各基站并不严格地处于同一水平面,因此需要将基站及标签都投影到水平面。在此记标签与基站 i 之间的实际距离为 r_i , 则 r_i 在地面的投影为:

$$d_i = \sqrt{r_i^2 - (z_i - z)^2} \tag{6}$$

1) 当 $N=2$ 时

在此情况下,基站部署时必须保证标签在两个基站连线的同一侧,如图 5 为二基站式三维定位示意图。其中 P_1 、 P_2 为固定基站,其坐标为 (x_i, y_i) , $(i=1,2)$; T 为移动标签,通过几何计算有两种可能的坐标,分别设为 T_a 、 T_b , 其坐标分别为 (x_{ta}, y_{ta}) 和 (x_{tb}, y_{tb}) 。

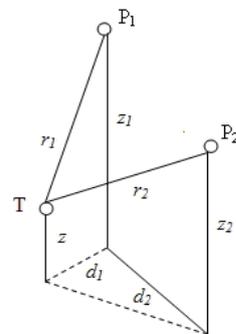


图 5 二基站式三维定位示意图

计算第一种可能的移动标签坐标, d_1 与横坐标的夹角 θ 为:

$$\theta = \alpha - \left(90^\circ - \arccos \frac{y_2 - y_1}{d_{1,2}} \right) \tag{7}$$

移动标签的纵坐标为:

$$y_{ta} = y_1 + d_1 \sin \theta \tag{8}$$

若 $x_1 < x_2$, 则移动标签的横坐标为:

$$x_{ta} = x_1 + d_1 \cos \theta \quad (9)$$

若 $x_1 > x_2$, 则移动标签的横坐标为:

$$x_{ta} = x_1 - d_1 \cos \theta \quad (10)$$

计算第二种可能的移动标签坐标, d_1 与横坐标的夹角 θ 为:

$$\theta = \alpha + 90^\circ - \arccos \frac{y_2 - y_1}{d_{1,2}} \quad (11)$$

移动标签的纵坐标为:

$$y_{tb} = y_1 - d_1 \sin \theta \quad (12)$$

若 $x_1 < x_2$, 则移动标签的横坐标为:

$$x_{tb} = x_1 + d_1 \cos \theta \quad (13)$$

若 $x_1 > x_2$, 则移动标签的横坐标为:

$$x_{tb} = x_1 - d_1 \cos \theta \quad (14)$$

在两个基站实际部署时, 事先知晓标签位于连线的侧位, 因此, 可以选取正确的坐标值.

2) 当 $N=3$ 时

图 6 为三基站式三维定位的示意图. 将 3 个基站两两组合, 共有 3 组, 即: (P_1, P_2) 、 (P_1, P_3) 、 (P_2, P_3) . 每组 2 个基站, 与标签构成类似于图 5 的情况. 对于一个组, 通过上述(1)的定位计算方法, 可以得出两种可能的坐标 (x_{ta}, y_{ta}) 和 (x_{tb}, y_{tb}) . 然后, 分别计算这两个坐标与另外一个基站的距离, 选取距离较短的点为标签坐标. 最后, 将三组分别计算的标签坐标求平均值, 即为移动标签的位置.

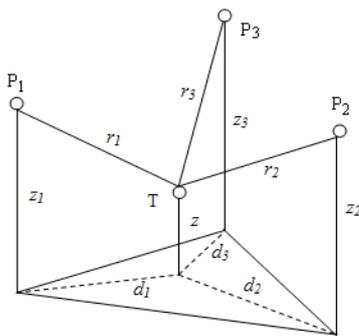


图 6 三基站式三维定位示意图

3) 当 $N=4$ 时

图 7 为四基站式三维定位的示意图. 将 4 个基站两两组合, 共有 6 组, 即: (P_1, P_2) 、 (P_1, P_3) 、 (P_1, P_4) 、 (P_2, P_3) 、 (P_2, P_4) 、 (P_3, P_4) . 每组 2 个基站, 与标签构成类似于图 5 的情况. 对于一个组, 通过上述(1)的定位计算方法, 可以得出两种可能的坐标 (x_{ta}, y_{ta}) 和 (x_{tb}, y_{tb}) . 然后, 分别计算这两个坐标与另外 2 个基站的距离之

和, 选取距离之和较小的点为标签坐标. 最后, 将 6 组分别计算的标签坐标求平均值, 即为移动标签的位置.

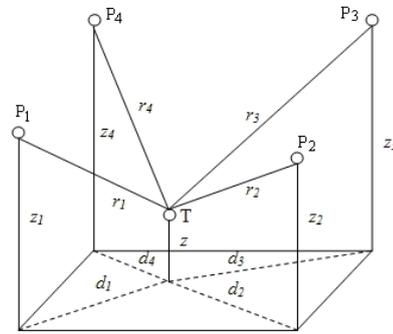


图 7 四基站式三维定位示意图

2.3 卡尔曼滤波法消除突变值

卡尔曼滤波法是一种线性最小均方差估计, 它采用迭代算法, 根据前一次估计值和当前输入值计算得到当前的估计值. 卡尔曼滤波器主要由两个方程实现^[12]:

状态方程:

$$s(k+1) = As(k) + w(k) \quad (15)$$

测量方程:

$$z(k) = Gs(k) + v(k) \quad (16)$$

以上两式中, $s(k)$ 、 $z(k)$ 分别是 k 时刻的状态向量和测量向量, A 和 G 分别是状态转移矩阵和测量矩阵, $w(k)$ 及 $v(k)$ 是加性噪声分量.

由于实际情况下物体运动轨迹的连续性和不可突变性, 测量值也应该是连续不可突变的. 当相邻两个时刻的估计值差异超过某一特定门限时, 就表示该时刻获得的测量值误差较大, 如火灾室内现场杂物(如铁门)对无线电波的阻挡, 造成移动标签在运动过程中短时不能通过直接路径与基站通信, 引起标签的位置突变. 这些突变的位置前后时间是不可预测也是不相关的, 可以视为是在测量过程中高斯噪声引起的误差. 此时, 需要对 k 时刻的估计值加以修正, 而卡尔曼滤波法的速度估计性能提供了有效的修正方法, 即

$$r(k) = r(k-1) + \Delta r(k-1) \quad (17)$$

其中 $\Delta r(k-1)$ 表示 $k-1$ 时刻物体的移动速度. 通过这一步卡尔曼滤波, 测量值中的误差得到了有效抑制. 采用卡尔曼滤波法消除突变值的具体步骤如下.

第 1 步. 计算当前时刻计算出的标签点与上一时刻计算出的标签点之间的水平距离 $d(k)$, 以及两者之

间的高度差 $h(k)$:

$$d(k) = \sqrt{(x(k) - x(k-1))^2 + (y(k) - y(k-1))^2} \quad (18)$$

$$h(k) = |z(k) - z(k-1)| \quad (19)$$

第2步. 计算标签点相对于上一时刻所在位置的
水平移动速度 $v(k)$ 和高度变化速度 $u(k)$:

$$v(k) = d(k) / (t(k) - t(k-1)) \quad (20)$$

$$u(k) = h(k) / (t(k) - t(k-1)) \quad (21)$$

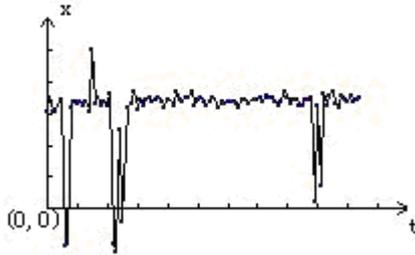
第3步. 若 $v(k) > v_{max}$ 或 $u(k) > u_{max}$, 即该坐标值为突
变值, 则对该坐标值进行修正:

$$x(k) = \frac{x'(k) - x(k-1)}{v(k-1)} \times v_{max} + x(k-1) \quad (22)$$

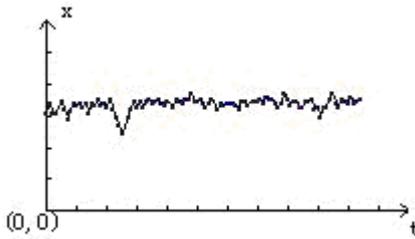
$$y(k) = \frac{y'(k) - y(k-1)}{v(k-1)} \times v_{max} + y(k-1) \quad (23)$$

$$z(k) = \frac{z'(k) - z(k-1)}{u(k-1)} \times u_{max} + z(k-1) \quad (24)$$

其中 $x'(k)$ 、 $y'(k)$ 、 $z'(k)$ 分别为 x 、 y 、 z 在时刻 k 时
实际测量获得的值. 比如, 卡尔曼滤波前后的 x 坐标
值波形如图8所示, 从图中可见, 滤波后的波形相对
更加平滑, 有效地提高了定位精度.



(a) 滤波前的 x 坐标波形



(b) 滤波后的 x 坐标波形

图8 滤波前后的 x 坐标波形对比

3 定位实验测试与结果

3.1 系统实现

基站与标签的微处理器采用 STM32F103CB, 无
线射频芯片采用 NA5TR1. NA5TR1 采用对称双边两
路测距(SDS-TWR)机制, 通过测量不同节点间的信号
传输延时, 可实时计算出基站与移动标签间的距离.

NA5TR1 是 Nanotron 公司推出的基于 CSS 技术的无线
收发芯片, 该芯片的工作频段为 2.4G 的免授权 ISM 频
段(2.4~2.4835 GHz), 采用频点为 2.44 GHz, 具有功
耗低、精度高, 抗干扰能力强、传输距离远等优点, 能
有效地应用于室内移动物体定位^{[13][14]}. NA5TR1 典型
的最小应用系统如图9所示.

气压传感器采用 BMP085, 用于测量基站与标签
的绝对高度^[9,11]. BMP085 数字气压传感器由电阻式压
力传感器、模数转换器和带有 E²PROM 的控制单元组
成, 控制单元通过 I²C 总线与 STM32F103CB 连接.

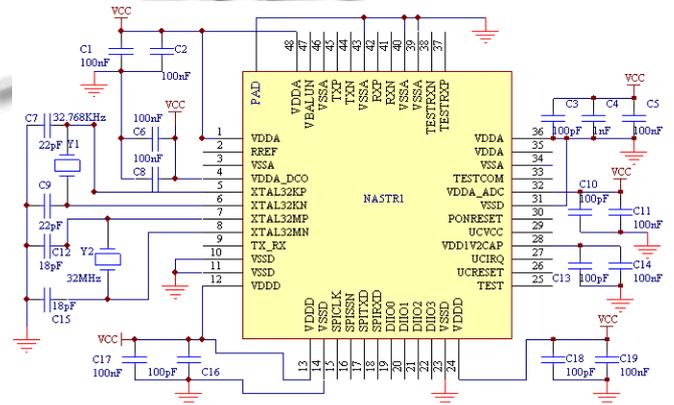


图9 NA5TR1 最小系统

3.2 测试情况

定位实验在实验室环境下进行. 将基站1、基站2、
基站3、基站4的坐标分别设置为(0.0,0.0,1.4)、
(0.0,13.2,1.6)、(15.4,13.2,2.6)、(15.4,0.0,1.6), 将标签放
置到(9.4,7.6,1.4)的位置. 实验结果如图10所示.

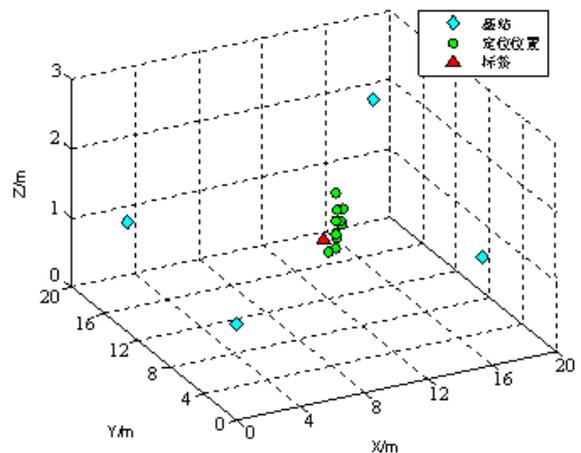


图10 三维定位实验结果

定位误差如图11所示, 误差表示标签坐标计算值

与真实位置之间的距离. 10 次测试中定位误差最大值为 0.63m, 最小值为 0.24m, 误差平均值为 0.51m. 经过多次实验, 定位误差大多能控制在 1m 以内.

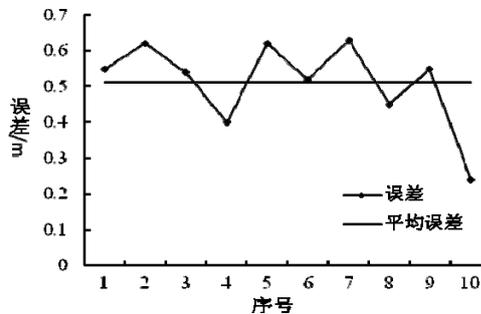


图 11 定位误差

4 结语

本文针对目前火灾现场消防员的人身安全得不到保障的问题, 研究了适用于室内火灾现场的三维定位技术. 本文介绍了 Chirp 信号脉冲压缩原理, 对 Chirp 信号时延估计进行了仿真, 并介绍了 CSS 技术特有的对称双边两路测距原理; 重点提出了一种三维定位算法, 并采用卡尔曼滤波法对坐标突变值进行滤波, 有效地提高了定位精度. 最后通过定位实验验证定位精度能达到 1m 以内, 能够精确定位被困消防员, 因此研究本技术对被困消防员应急救援具有深远的现实意义.

参考文献

- 1 Röhrig C, Iaeng M, Lategahn J, Müller M, Telle L. Global localization for a swarm of autonomous transport vehicles using IEEE 802.15.4a CSS. In: Ao SI, ed. Proc. of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists 2012. Hong Kong. International Association of Engineers. 2012. 828–833.
- 2 Kang H, Seo Gw, Lee J. Error compensation for CSS-based Localization System. In: Ao SI, ed. Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco: International Association of Engineers, 2009: 696–701.
- 3 Yang ZW, Wu Q, Lu YQ, Hou YH, Peng M. Enhanced ALOHA algorithm for chirp spread spectrum positioning. In: Zu QH, ed. Pervasive Computing and the Networked World. Berlin. Springer Berlin Heidelberg. 2013. 891–903.
- 4 万磊. Chirp 超宽带系统的同步技术研究[硕士学位论文]. 成都: 解放军信息工程大学, 2010.
- 5 陆侃. 基于线性调频信号的定位技术研究[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- 6 王明. 基于 Chirp 超宽带通信技术的研究与实现[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- 7 彭宇, 王丹. 无线传感器网络定位技术综述. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(5): 389–399.
- 8 张岩, 魏书田, 张守祥. 啁啾扩频超宽带技术的测距定位研究. 计算机工程与应用, 2012, 48(28): 130–134.
- 9 王俊彩, 王福平, 侯瑞峰, 王成. 基于 BMP085 的一种便携式海拔高度测量系统设计. 传感器与微系统, 2011, 30(12): 123–125.
- 10 梁胜展, 郭雪梅, 余晓填. 基于 BMP085 气压传感器及 BP 算法的高度测量研究与实现. 传感技术学报, 2013, 26(5): 654–659.
- 11 张金燕, 刘高平, 杨如祥. 基于气压传感器 BMP085 的高度测量系统实现. 微型机与应用, 2014, 33(6): 64–67.
- 12 黄清明, 刘璐. 基于卡尔曼滤波的测量值重构及定位算法. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1551–1555.
- 13 谷战垒, 何诚, 宁月松. 基于 NA5TR1 的无线定位节点的设计. 电子设计工程, 2011, 19(9): 189–192.
- 14 巩家昌, 张军. Nanotron 技术在无线测距系统中的应用. 现代电子技术, 2011, 34(3): 56–58.