

基于非视距鉴别的井下精确定位技术研究

温 良

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心,北京 100013)

摘 要: 针对煤矿井下动目标精确定位系统定位精度低且受非视距条件限制严重的问题,研究信号飞行时间 TOF 和信号接收强度指示 RSSI 定位算法的特点及其技术局限性,提出利用已知的锚节点之间的距离,通过 TOF 和 RSSI 方法分别得到 2 组盲节点到 2 个锚节点的距离比公式的方法,并根据时间差和接收信号强度差分别进行测距运算,以提高定位精度;研究 TOF 算法和 RSSI 算法对非视距条件的敏感性,发现 RSSI 算法对非视距条件的敏感性明显高于 TOF 方法,并以此作为鉴别非视距条件的依据,通过仿真和试验方法表明,该方法可以得到小于 5 m 的精确定位误差。

关键词: 精确定位; 煤矿井下; TOF 定位算法; RSSI 算法; 非视距鉴别

中图分类号: TD655 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2016)07-0109-07

Study on accurate positioning technology in underground mine based on non line of sight distinguishment

Wen Liang

(1. China Coal Research Institute Company Limited, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. Beijing Research Center of Mine Safety Engineering and Technology, Beijing 100013, China)

Abstract: According to the low positioning accuracy of the moving objects in the underground mine and serious limited problem by the non line of sight condition, the paper had a study on the features and technical limitations of the TOF and RSSI positioning algorithms. The paper provided that two group of formula of ratio of distance between the blind node and two anchor nodes could be obtained by using TOF and RSSI methods, with the application of the certain distance between the bolting nodes. According to the parameters of the time difference and received signal strength difference, the calculation of the distance measurement could be individually conducted in order to improve the positioning accuracy. The paper had study on the sensitivity of the TOF and RSSI algorithms to the condition of the non line of sight and obtained that the sensitivity of RSSI algorithm to non line of sight condition was obviously higher than that of TOF method, which could be the basis for distinguishing the non line of sight condition. Simulation and experiment have been conducted and results indicated that the accurate positioning error could be less than five meters.

Key words: accurate positioning; underground mine; TOF location algorithm; RSSI algorithm; non line of sight distinguishment

0 引 言

煤矿动目标位置监测系统能够实时感知井下工作人员和移动设备的位置、状态等信息,能够提高煤矿的日常调度管理水平和灾害救援效率,已成为现代化煤矿企业重要的考勤管理系统^[1]。精

确定位系统可以获得盲节点到锚节点的距离,其相对于不具备测距功能的区域定位系统,效率更高,实用性更强。但由于井下电磁环境复杂,非视距(NLOS, Non Line of Sight)干扰严重,精确定位系统的定位精度普遍较低,实际的定位精度约为 10 m,在非视距条件严重的情况下,定位精度大幅度

收稿日期: 2016-03-03; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2016.07.019

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2013BAK06B05)

作者简介: 温 良(1979—)男,辽宁辽阳人,副研究员,硕士,现任煤炭科学技术研究院有限公司装备分院副院长。Tel: 010-84261518

引用格式: 温 良. 基于非视距鉴别的井下精确定位技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 109-115.

Wen Liang. Study on accurate positioning technology in underground mine based on non line of sight distinguishment [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(7): 109-115.

下降,这样的定位效果尚不能满足事故应急救援、井下人员考勤调度、煤矿物联网建设等需求^[2-4]。已有一些文献提出了抑制 NLOS 影响的算法,例如,文献[5]提出了一种能够规避直射路径遮挡现象的三维定位框架,文献[6]提出一种利用高斯混合模型,对含有非视距误差的距离测量信息进行训练,以获得接近真实值,并采用粒子群算法对期望最大化算法进行优化以取得高精度定位效果,文献[7]提出利用卡尔曼滤波器消除 TOA 中非视距误差的算法,以上算法虽能在一定程度上降低 NLOS 条件带来的定位误差,但是算法依赖的运算过于复杂,且针对的非视距条件相对单一,不适合应用于高实时性要求高且非视距条件多变的煤矿井下,因此,针对煤矿井下应用场景的降低非视距条件对定位精度影响的算法研究具有重要的现实意义。

1 井下现有定位算法分析

井下巷道空间狭小,精确定位系统不能大量地铺设定位锚节点,定位考勤对定位系统的实时性要求很高,上位机单位时间处理的数据量不宜过大,这些条件的限制,使得依靠大量铺设锚节点或需要使用大数据量进行大量统计学或高等数学运算的定位算法,不适合应用于井下精确定位系统,因此,国内外诸多文献中提出的诸如三圆交汇法^[8]、双曲线交汇法^[9]、SPA 相对参考算法^[10-12]、Dv-Hop 算法^[13-14]等定位算法不适合应用于煤矿井下精确定位。井下巷道呈条状分布,使得巷道横向(两巷道壁之间)的定位结果参考意义不大^[15-16],因此,煤矿井下适合使用只考虑巷道纵向(巷道的延伸方向)的一维精确定位方案。应用于井下的精确定位算法主要包括基于电磁波传播时间的信号飞行时间法(TOF, Time of Flight Measurement)^[17]和基于电磁波传播衰减的信号接收强度指示法(RSSI, Received Signal Strength Indicator)^[18]。

1.1 TOF 定位算法

TOF 定位算法如图 1 所示,盲节点向锚节点发送 Poll 数据包,锚节点收到 Poll 数据包后发送应答 ACK 数据包回来。 T_{TOT} 表示盲节点从发出 Poll 数据包到收到应答数据包经过的时间, T_{TAT} 表示锚节点收到 Poll 数据包到发出应答数据包经过的时间,无线数据在空气中的传播时间 T_{TOF} 由式(1)计算得出。

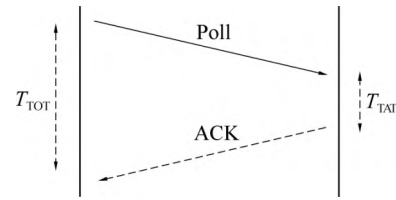


图 1 TOF 定位算法

Fig. 1 TOF positioning method

$$T_{TOF} = \frac{T_{TOT} - T_{TAT}}{2} \quad (1)$$

TOF 测距算法在视距条件下能够得到较可靠的测距值,非视距环境会造成很大的测距误差。但在煤矿井下,除了巷道本身的构型外,人员、车辆、设备等均会造成不可避免的非视距条件。

1.2 RSSI 定位算法

RSSI 定位算法通过选择适当的无线传播路径损耗模型,使用接收信号的强度推导出电磁波传输距离。常用的无线电磁波传播路径损耗模型有:自由空间传播模型、对数距离路径衰减模型、对数-常态分布模型等^[19],考虑井下巷道的实际环境,通常选择对数-常态分布模型。对数-常态分布模型的表达式为

$$P(d) = P(d_0) - 10\delta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (2)$$

式中: $P(d)$ 是盲节点与锚节点之间距离为 d 时的接收信号强度; $P(d_0)$ 为盲节点和锚节点之间的参考距离 d_0 处的接收信号强度。根据信号接收强度可以推出 d , d_0 一般取 1 m; δ 为路径衰减因子,其数值取决于无线信号的传播环境,是一个经验值; X_σ 为标准差为 σ 的零均值正态分布随机变量。

RSSI 算法的主要问题有:

1) 由式(2)可知,RSSI 算法受无线信号传播环境影响非常大,煤矿井下的电磁环境复杂多变,不能得到一个固定的路径衰减因子。

2) 使用能量强度值进行测距,对非视距条件敏感,轻微的遮挡会造成很大的能量衰减,进而造成很大的测距误差。

通过分析上述 2 种定位算法的特点,提出一种基于非视距鉴别的井下精确定位算法。

2 锚节点布设及距离比计算

2.1 锚节点布设

锚节点设备(以下简称锚节点)在巷道内的布设方式如图 2 所示,锚节点外接 2 个定向天线,分别

朝向巷道纵向的前后 2 个方向, 锚节点连接至通信总线, 井下工作人员佩戴盲节点设备(以下简称盲节点)。其中相邻 2 个锚节点之间的距离不大于盲节点信号最大有效传播距离, 以保证在相邻 2 个锚节点之间的盲节点发出的射频信号均能被 2 个锚节点接收到。

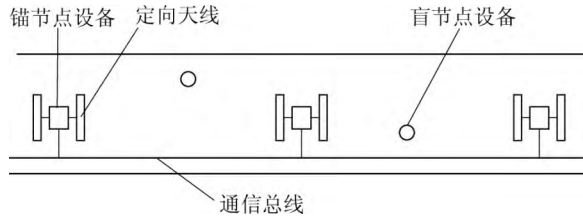


图 2 锚节点设备布置方式

Fig. 2 Layout mode of anchor node equipment

2 个锚节点之间的定位算法如图 3 所示, C 表示盲节点, A 和 B 分别表示 2 个锚节点, 相邻 2 个锚节点之间的距离 d_{AB} 已知, 考虑井下巷道狭长的形状可知 CD 的距离非常短, 同时考虑井下对定位精度的要求, 可认为

$$d_{AC} = d_{AD} \quad d_{BC} = d_{BD} \quad (3)$$

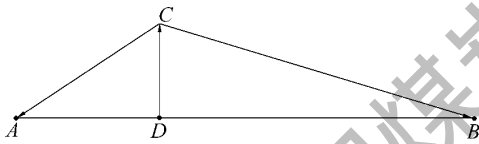


图 3 定位算法示意

Fig. 3 Positioning method schematic diagram

一个定位周期内, 盲节点 C 与锚节点 A 和 B 通信, 锚节点 A 和 B 接收到盲节点 C 发射的射频定位信号, 获得信号接收强度设为 P_A 和 P_B ; 盲节点接收到锚节点 A 和锚节点 B 的反馈信号后, 根据式(1)计算每次射频信号单程传播时间分别为 T_A 和 T_B 。

2.2 距离比公式计算

在视距环境下有

$$c(T_A - T_B) = d_{AC} - d_{BC} \quad (4)$$

联合式(3)和式(4)可得

$$c(T_A - T_B) = d_{AD} - d_{BD} \quad (5)$$

由于

$$d_{AB} = d_{AD} + d_{BD} \quad (6)$$

则根据式(5)和式(6)可得 d_{AD} 和 d_{BD} 的距离比公式:

$$\frac{d_{AD}}{d_{BD}} = \frac{d_{AB} + c(T_A - T_B)}{d_{AB} - c(T_A - T_B)} \quad (7)$$

根据式(6)和式(7)可以计算出 d_{AD} 和 d_{BD} , 实现测距, 其中 c 为电磁波在空气中的传播速度。

根据文献[20-21], 对数-常态分布模型可以使用简化模型逼近, 由式(2)有

$$P(d) = P(d_0) - 10\delta \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (8)$$

在相邻 2 个锚节点之间的距离内, 路径衰减因子可认为相同, 考虑一般情况, 设锚节点接收到盲节点发射的电磁波信号强度为 P_R , 则根据式(8)获得锚节点与盲节点之间的距离为

$$d = d_0 10^{\frac{P(d_0) - P_R}{10\delta}} \quad (9)$$

其中 P_R 为锚节点接收到盲节点发射的电磁波信号强度。则考虑 A 、 B 两个锚节点情况, 根据式(9)有

$$d_{AC} = d_0 10^{\frac{P(d_0) - P_A}{10\delta}}$$

$$d_{BC} = d_0 10^{\frac{P(d_0) - P_B}{10\delta}}$$

则可得:

$$\frac{d_{AC}}{d_{BC}} = 10^{\frac{P_B - P_A}{10\delta}} \quad (10)$$

则根据式(3)和式(10)得 d_{AD} 和 d_{BD} 的距离比为

$$\frac{d_{AC}}{d_{BC}} = 10^{\frac{P_B - P_A}{10\delta}} = \frac{d_{AD}}{d_{BD}} \quad (11)$$

由式(6)和式(11)可计算得 d_{AD} 和 d_{BD} , 实现测距。

上述算法充分利用锚节点之间已知的距离, 可以有效控制测距误差, 以时间差和信号强度差 2 种参量为计算依据, 为定位精度的提高提供了更多的算法选择。

3 非视距鉴别依据和算法

3.1 非视距鉴别依据

根据以下分析, 可找出鉴别非视距条件的依据:

1) 比较式(7)和式(11), 时间变化值和信号强度变化值分别是两式中的变量, 根据变量在式中的位置可以发现, d_{AD}/d_{BD} 的值受信号强度差变化的影响明显大于受时间差变化的影响。

2) 井下人员定位多使用 2.4 GHz ISM 频段, 属于高频频段, 信号绕射能力小, 遇到障碍物时, 大部分能量被反射或吸收^[22-23], 所以遇到障碍物时信号强度衰减很大, 使用三维电磁仿真软件 HFSS 仿真 2.4 GHz 电磁波遇到障碍物时的场景。使用 HFSS 建立的仿真模型如图 4 所示, 2.4 GHz 电磁波从 1

面进入从2面射出,半球形物体的材料分为3层,由内到外分别为 csf(脑脊液)、grey matter(脑灰质)、white matter(脑白质),以模拟人头部对2.4 GHz 电磁波的吸收和反射,方形空间内的介质为空气,频率扫描范围设置为2.400 0~2.483 5 GHz,为 ZigBee 2.4 GHz 频段,仿真得到图5中的散射参数 S 参数(以 $S(2,1)$ 为例)在扫描频段内的分布,通过图5可明显看出在电磁波传输通道中增加人体很小的一部分即会造成输出端电磁波能量的大幅衰减。

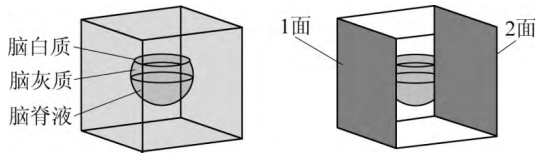


图4 HFSS 仿真模型

Fig. 4 HFSS simulation model

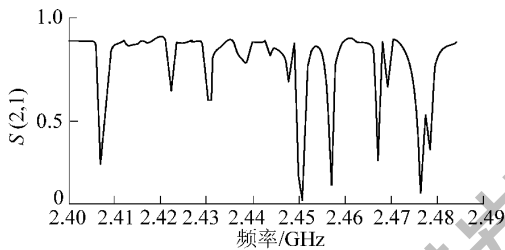


图5 $S(2,1)$ 在扫描频率内的分布

Fig. 5 Distribution of $S(2,1)$ in the scanning frequency

3) 井下巷道呈狭窄条形,电磁波被障碍物遮挡不能进行视距传输时,由于传播速度极快,接近光速,即使经过巷道壁反射传输,传播时间变化也不会太大。

综上所述,RSSI 算法对非视距条件的敏感性高于 TOF 算法,即同样的非视距环境,对 RSSI 算法造成的测距误差高于对 TOF 算法造成的测距误差,这一点可以作为鉴别非视距条件的依据。

3.2 非视距鉴别算法

通过试验验证第3.1节中提出的非视距鉴别依据,并得出非视距鉴别算法。盲节点和锚节点均使用 JN5168 射频芯片, JN5168 可同时支持 TOF 和 RSSI 两种测距算法。本试验使用 ZigBee 组网方式,使用 2.4 GHz 平板定向天线,使用 2 个锚节点和 1 个盲节点,2 个锚节点通过 CAN 总线连接至计算机,2 个锚节点相距 100 m,试验环境选择在楼道内。

设通过 TOF 算法得出 d_{AD}/d_{BD} 的值为 α_{TOF} ,通过 RSSI 算法得出 d_{AD}/d_{BD} 的值为 α_{RSSI} ,试验中盲节点分别位于 d_{AD}/d_{BD} 的实际值为 1/7、1/3、3/5、1/3、3 和 7 处,试验方法如图6所示。

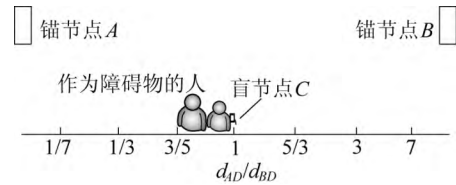


图6 试验方法示意

Fig. 6 Experiment schematic diagram

在每个位置分别进行以下4种情况的试验,每个位置每种情况进行1000次测距,随机取500个测距值进行平均计算:①在盲节点前后无遮挡条件下,盲节点分别进行 TOF 和 RSSI 测距;②在盲节点与 A 锚节点之间加遮挡(人站立),分别进行 TOF 和 RSSI 测距;③在盲节点与 B 锚节点之间加遮挡,分别进行 TOF 和 RSSI 测距;④在盲节点与 B 锚节点之间加遮挡分别进行 TOF 和 RSSI 测距;⑤在盲节点与 A 锚节点和 B 锚节点之间均加遮挡,分别进行 TOF 和 RSSI 测距。

每次加遮挡均使盲节点与锚节点不能进行视距通信,得到 d_{AD}/d_{BD} 与 $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}$ 的关系如图7所示。

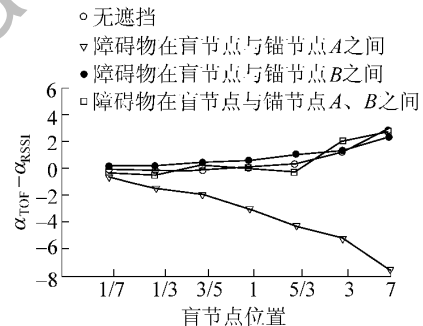


图7 d_{AD}/d_{BD} 与 $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}$ 的关系

Fig. 7 Relationship between d_{AD}/d_{BD} and $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}$

分析图7可以发现:

1) 在各种遮挡情况下,盲节点越靠近锚节点,测距误差越大,需要指出的是,盲节点虽然在 $d_{AD}/d_{BD} = 1/7$ 处时 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}|$ 很小,但不能说明此时的测距误差小,因为此时 α_{TOF} 和 α_{RSSI} 作为被减数和减数本身值就很小,但 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}| / \alpha_{TOF}$ 的值很大。

2) 在盲节点 A、B 两侧无遮挡和 AB 两侧均有遮挡时, $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}$ 的值差别不大。

3) 当 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}| > 0.3$ 时, $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI} < 0$ 时完全判定障碍物在盲节点与锚节点 A 之间, $\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI} > 0$ 时可基本判定障碍物在盲节点与锚节点 B 之间,当 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}| \leq 0.3$ 时,基本可以判定盲

节点两侧均有遮挡或均无遮挡,分歧点主要在靠近一端锚节点的情况,此时可以根据 α_{TOF} 的值进行判断:如果 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}| \leq 0.3$ 且 $\alpha_{TOF} < 0.5$,可判定盲节点距锚节点 A 较近,若 $|\alpha_{TOF} - \alpha_{RSSI}| > 2$,且 $\alpha_{TOF} \geq 3$,可判定盲节点距锚节点 B 较近。

4) 通过比较 α_{TOF} 和 α_{RSSI} 在各种情况下与实际 d_{AD}/d_{BD} 的值,本算法中使用时间差进行测距计算的效果要优于使用信号强度差测距的效果,所以将信号强度差算法仅用于非视距判断。

通过以上分析可得,除盲节点距离 2 个锚节点较近的情况,其他情况下的非视距情况均可得到鉴别,如图 8 所示。针对不同的非视距情况,可以灵活选择测距矫正算法,以提高定位精度。

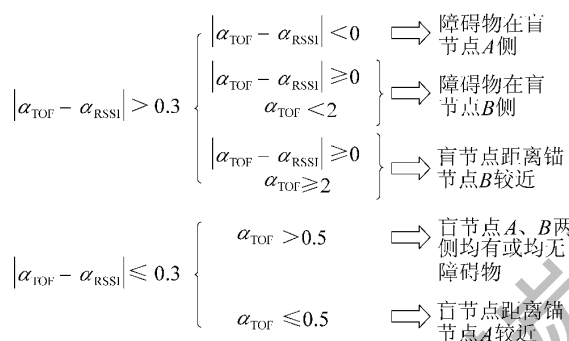


图 8 非视距判别算法

Fig. 8 Methods for identifying NLOS

需要指出的是:本文涉及的试验方法中试验数据是在特定环境中得出,不具备普适性,但试验中获得数据的方法以及分析处理数据的方法具备普适性。

4 基于非视距鉴别的精确定位算法

4.1 获得矫正参数

分析第 3.2 节的非视距鉴别算法可将非视距条件分为以下 3 种分别进行处理。

1) 判定盲节点仅一侧存在障碍物。盲节点发射的电磁波信号被障碍物阻挡,锚节点第一时接收到的的是盲节点发射的电磁波通过最短巷道壁反射路径到达的,由于巷道狭窄,电磁波经过最短反射路径的传输时间与经视距直线传输的时间不会随障碍物与盲节点之间距离不同而大幅度变化,所以在判定某一侧存在障碍物后,可根据经验值,使用统一的矫正参数对测距值进行适当矫正。

2) 判定盲节点两侧均存在障碍物或均不存在障碍物。由于井下造成非障碍视距条件的障碍物时是多为带有盲节点的动目标(其他固定障碍物可以通

过选择锚节点的安装位置来避免形成非视距条件),所以可根据当前锚节点读取盲节点的数量来判断该盲节点前后两侧有无障碍物,如果当前锚节点读到盲节点的数量较大,可判定盲节点两侧均存在障碍物(人),可根据矫正参数对测距值进行矫正;如果当前锚节点读到的盲节点数量较小,可判定盲节点前后两侧均处于视距通信条件,可直接根据式(5)和式(6)计算。

3) 只能判定盲节点位于锚节点较近位置。由于盲节点位于锚节点较近位置的情况占盲节点所有可能位置的比例很小,由于篇幅限制,此处不做过多处理,可直接根据式(5)和式(6)计算,不会影响整个测距算法效果的验证。

使用与第 3.2 节中相同的试验设置,在盲节点与锚节点 A 之间加障碍物进行 1 000 次的测距试验,在盲节点与锚节点 B 侧加障碍物进行 1 000 次的测距试验,求取 d_{AD} 值,最后取平均值,结果见表 1。

表 1 单侧加障碍物试验结果

Table 1 Experiment results with obstacles on one side

障碍物位置	盲节点位置						
	1/7	1/3	3/5	1	5/3	3	7
盲节点与锚节点 A 之间	17.02	30.35	42.64	54.21	65.01	79.26	94.37
盲节点与锚节点 B 之间	7.72	20.49	32.44	47.90	57.35	68.91	81.50

计算在盲节点与锚节点 A 之间加障碍物的平均误差为 +4.72 m,计算在盲节点与锚节点 B 之间加障碍物的平均误差为 -4.83 m,则由于非视距造成总的测距误差为 ± 4.76 m,显然增加非视距条件的一侧会造成测距值加大。在试验楼道内可以使用该值作为矫正参数对非视距情况进行测距矫正。

4.2 验证试验

使用非视距鉴别算法和矫正参数进行楼道内定位试验,20 人携带盲节点在试验楼道内随机移动,锚节点之间距离 100 m,测距周期 5 s,对每个人进行 1 000 次测距,取平均值,重复进行 20 次试验。

图 9 为随机选择 4 次试验的定位误差在巷道(楼道)的分布情况。可以观察到平均定位误差基本控制在 5 m 以内,大部分在 3 m 以内,高误差主要分布在接近锚节点的位置,在远离锚节点的中间很长一段距离内,平均定位误差基本控制在 3 m 以内,

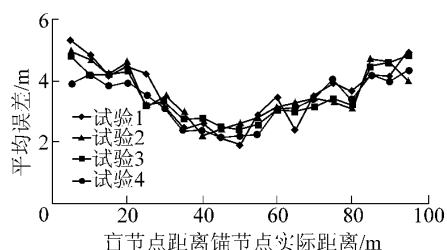


图9 定位误差在巷道(楼道)的分布情况

Fig. 9 Distribution of positioning error in roadway (passageway)

定位效果提升明显。

5 结 论

1) 算法充分利用2个锚节点之间已知的距离,以时间差求解距离,与单纯使用TOF算法进行测距相比,增加了另一个锚节点的约束条件,有助于提高测距精度。

2) 得出RSSI算法比TOF算法对非视距条件的敏感性更高的结论,由此推出非视距鉴别的依据和算法,并提出采用测距矫正值对非视距情况测距结果进行矫正的算法,试验证明该算法在盲节点前后存在类似人员遮挡的非视距条件时,可以明显提高测距精度。

3) 本算法数据处理过程简单,可使系统保持良好的实时性。

参考文献 (References):

- [1] 孟祥瑞,徐雪战,赵光明,等.基于三维可视化与Zigbee技术的真三维煤矿人员定位[J].煤炭学报,2014,39(S1):603-608.
Meng Xiangrui, Xu Xuezhao, Zhao Guangming, et al. True three-dimensional coal mine personnel positioning system based on 3D visualization and Zigbee technology [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 603-608.
- [2] 孙继平.煤矿安全生产监控与通信技术[J].煤炭学报,2010,35(11):1926-1929.
Sun Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(11): 1926-1929.
- [3] 孙继平.安全高效矿井监控关键技术研究[J].工矿自动化,2012(12):1-5.
Sun Jiping. Research of key technologies for mine safety and efficiency monitoring [J]. Industry of Mine Automation, 2012(12): 1-5.
- [4] 孙继平,李晨鑫.基于卡尔曼滤波和指纹定位的矿井TOA定位算法[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1127-1133.
Sun Jiping, Li Chenxin. Mine TOA positioning method based on Kalman filtering and fingerprint positioning [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(6): 1127-1133.
- [5] 肖竹,陈杰,王东,等.严重遮挡非视距环境下的三维定位方法[J].通信学报,2015,36(8):67-75.
Xiao Zhu, Chen Jie, Wang Dong, et al. Three-dimensional localization under severely obstructed NLOS environment [J]. Journal on Communications, 2015, 36(8): 67-75.
- [6] 崔玮,吴成东,张云洲,等.基于高斯混合模型的非视距定位算法[J].通信学报,2014,35(1):99-105.
Cui Wei, Wu Chengdong, Zhang Yunzhou, et al. GMM-based localization algorithm under NLOS conditions [J]. Journal on Communications, 2014, 35(1): 99-105.
- [7] 李静,刘璐.用卡尔曼滤波器消除TOA中NLOS误差的三种方法[J].通信学报,2005,26(1):130-141.
Li Jing, Liu Lu. Three methods of NLOS error mitigation in TOA using Kalman filter [J]. Journal on Communications, 2005, 26(1): 130-141.
- [8] 乔钢柱,曾建潮.信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法[J].煤炭学报,2010,35(7):1229-1233.
Qiao Gangzhu, Zeng Jianchao. Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coalmine underground wireless sensor networks [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7): 1229-1233.
- [9] 郁丰,熊智,屈蕃.基于多圆交汇的天文定位与组合导航算法[J].宇航学报,2011,32(1):88-92.
Yu Feng, Xiong Zhi, Qu Qiang. Multiple circle intersection-based celestial positioning and integrated navigation algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(1): 88-92.
- [10] 杨维,周嗣勇,乔华.煤矿安全监控无线传感器网络节点定位技术[J].煤炭学报,2007,32(6):652-656.
Yang Wei, Zhou Siyong, Qiao Hua. Node localization in wireless sensor networks for coal mine security monitoring [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(6): 652-656.
- [11] 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 Fubao, Shi Long, Ren Fengyuan. Self-localization systems and algorithms for wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2005, 16(5): 857-868.
- [12] Blazevic L, Buttyan L, Capkun S, et al. Self organization in mobile ad hoc networks: the approach of Terminodes [J]. Communications Magazine, IEEE, 2001, 39(6): 166-174.
- [13] Apkun S, Hamdi M, Hubaux J P. GPS-free positioning in mobile ad hoc networks [J]. Cluster Computing, 2002, 5(2): 157-167.
- [14] Niculescu D, Nath B. DV based positioning in ad hoc networks [J]. Telecommunication Systems, 2003, 22(1-4): 267-280.
- [15] Niculescu D, Nath B. Ad hoc positioning system (APS) [C]. Global Telecommunications Conference. GLOBECOM'01. IEEE, 2001.
- [16] 田子健,李宗伟,刘晓阳,等.基于电磁波及超声波联合测距的井下定位算法[J].北京理工大学学报,2014,34(5):490-494.
Tian Zijian, Li Zongwei, Liu Xiaoyang, et al. A positioning method

- in mine tunnel based on joint electromagnetic wave and ultrasonic distance measurement [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology 2014, 34(5) : 490-494.
- [17] Tian Zijian ,Zhang Liya ,Chen Wei.Improved algorithm for navigation of rescue robots in underground mines[J].Computers and Electrical Engineering 2013(39) : 1088-1094.
- [18] Mccrady D ,Doylel ,Forstrom H *et al.* Mobile ranging using low-accuracy clocks[J].IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2000 48(6) : 951-958.
- [19] Girod L ,Bychovskiy V ,Elson J *et al.* Locating tiny sensors in time and space: a case study [C] //2002 IEEE Int'l Conf on Computer Design: VLSI in Computers and Processors ,Freiburg 2002: 214-219.
- [20] 邵丽鹏,朱梅冬,杨 丹.基于 ZigBee 的加权质心定位算法的仿真与实现[J].传感技术学报 2010 23(1) : 149-152.
Gao Lipeng ,Zhu Meidong ,Yang Dan.Simulation and implement of weighted centroid localization algorithm based on ZigBee [J].Chinese Journal of Sensors and Actuators 2010 23(1) : 149-152.
- [21] 刘晓文,王振华,王淑涵,等.基于 RSSI 算法的矿井无线定位技术研究[J].煤矿机械 2009 30(3) : 59-60.
Liu Xiaowen ,Wang Zhenhua ,Wang Shuhan *et al.* Study of WSN localization based on RSSI in coal mine [J].Coal Mine Machinery , 2009 30(3) : 59-60.
- [22] 乔钢柱,曾建潮.信标节点链式部署的井下无线传感器网络定位算法[J].煤炭学报 2010 35(7) : 1229-1232.
Qiao Gangzhu ,Zeng Jianchao. Localization algorithm of beacon nodes chain deployment based on coal mine underground wireless sensor networks [J].Journal of China Coal Society 2010 35(7) : 1229-1232.
- [23] Von Hippel A R. Dielectrics and waves [M]. Inc: John Wiley & Sons ,1962.
- [24] Nerguizian C ,Despins C L. Radio-channel characterization of an underground mine at 2.4GHz [J].IEEE Trans on Wireless Communications 2005 4(5) : 2441-2453.
- (上接第 108 页)
- Global Telecommunications Conference IEEE Honolulu ,HI ,USA , 2009.
- [14] 孙继平,贾 倪.矿井视频图像中人员目标匹配与跟踪方法 [J].中国矿业大学学报 2015 44(3) : 525-533.
Sun Jiping ,Jia Ni. Human target matching and visual tracking method in coal mine [J].Journal of China University of Mining & Technology 2015 44(3) : 525-533.
- [15] 韩睿松,杨 维.基于改进虚拟势场的煤矿井下 WMSN 覆盖增强算法[J].煤炭学报 2015 40(4) : 959-964.
Han Ruisong ,Yang Wei. A coverage-enhancing algorithm based on improved virtual potential field for WMSN in underground coal mine [J].Journal of China Coal Society 2015 40(4) : 959-964.
- [16] Ma Huadong ,Liu Yonghe. Correlation based video processing in video sensor networks [C] //Wireless Networks ,Communications and Mobile Computing 2005 International Conference on IEEE , Hawaii ,USA 2005.
- [17] 张 波,罗海勇,胡广大,等.多媒体传感器网络中被动目标定位算法[J].东南大学学报:自然科学版 2011 41(2) : 266-269.
Zhang Bo ,Luo Haiyong ,Hu Guangda *et al.* Passive target localization algorithm for multimedia sensor networks [J]. Journal of Southeast University: Natural Science 2011 41(2) : 266-269.
- [18] Piccardi M. Background subtraction techniques: a review [C] // Systems ,man and cybernetics. 2004 IEEE International Conference on IEEE ,Hague ,Netherlands 2004.
- [19] Heikkil J ,Silvén O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C] //Computer Vision and Pattern Recognition. Proceeding 1997 IEEE Computer Society Conference on IEEE ,Puerto Rico ,1997.
- [20] Douxchamps D ,Chihara K. High-accuracy and robust localization of large control markers for geometric camera calibration [J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence ,IEEE Transactions on , 2009 31(2) : 376-383.