

文章编号:1671-251X(2015)06-0078-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.06.019

田子建,朱元忠,张向阳,等.非视距误差抑制方法在矿井目标定位中的应用[J].工矿自动化,2015,41(6):78-82.

非视距误差抑制方法在矿井目标定位中的应用

田子建¹, 朱元忠², 张向阳¹, 刘雨洋¹

(1.中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院,北京 100083;

2.北京工业职业技术学院电气与信息工程学院,北京 100042)

摘要:分析并指出电磁波非视距传播时延造成的测距误差是影响矿井定位精度的主要原因,针对基于到达时间的矿井目标定位方法,提出了一种能量检测非视距误差抑制方法。该方法通过实测矿井巷道信道特征,统计分析得出直达路径的门限值和信号截取的时间长度,构造相应的鉴别参量,在截取的信号段中提取直达路径能量块的到达时间,以此鉴别出非视距信号。测试结果表明,该方法能够达到较高的测距和定位精度。

关键词:矿井;目标定位;测距;基于到达时间;非视距误差;位置估算;能量检测

中图分类号:TD655/67 文献标志码:A 网络出版时间:2015-05-29 15:06

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150529.1506.019.html>

Application of non line-of-sight error suppression method in mine target location

TIAN Zijian¹, ZHU Yuanzhong², ZHANG Xiangyang¹, LIU Yuyang¹

(1.School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China; 2.School of Electrical of Information Engineering, Beijing Polytechnic College, Beijing 100042, China)

Abstract: It was analyzed and pointed out that distance ranging error caused by non line-of-sight transmission delay of electromagnetic wave was the main reason of reducing mine location precision. For mine target location method based on time of arrival, a non line-of sight error suppression method based on energy detection was proposed. In the method, threshold of direct path and length of signal intercept time are analyzed and counted by testing channel characteristics of coal mine tunnel. In order to identify non line-of-sight signal, arrival time of direct path energy blocks is presented in extracted signal segment by constructing corresponding identification parameters. The experimental testing result shows the method achieves higher range and location precision.

Key words: mine; target location; ranging; rime of arrival; non line-of-sight error; location estimation; energy detection

0 引言

矿井目标定位经历了射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)、电磁波测距技术

2个不同的阶段^[1,2]。早期的人员定位系统采用RFID技术,系统主要由读卡器和识别卡组成,其定位精度由2个相邻读卡器之间的距离决定。目前,采用电磁波测距技术的矿井定位系统已逐渐成为主

收稿日期:2014-12-07;修回日期:2015-04-20;责任编辑:李明。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(51134024);国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA062203);国家自然科学基金资助项目(U1261125)。

作者简介:田子建(1964—),男,湖南望城人,教授,博士,博士研究生导师,主要研究方向为矿井监控与通信,E-mail:tianzj0726@126.com。

流产品^[3-5]。电磁波测距定位技术通过测量目标节点到参考节点的距离,再根据参考节点的位置信息建立方程组,进而求得目标节点的位置信息。

电磁波测距定位技术主要包括到达角度(Angle of Arrival, AOA)、接收信号强度(Receive Signal Strength, RSSI)、到达时间(Time of Arrival, TOA)、到达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)等。其中 AOA 技术硬件复杂,安装维护苛刻,目前煤矿井下定位系统没有采用 AOA 技术的产品。RSSI 技术硬件组成最简单,但矿井电磁噪声干扰会影响 RSSI 定位精度^[6]。TOA 和 TDOA 技术的基本原理是测量电磁波从目标节点到参考节点的传播时间,由此得到目标节点到参考节点的距离,在已知参考节点位置坐标的条件下,通过求解联立方程得到目标节点的位置^[7-9]。将电磁波传播时间换算为距离,需要系统硬件有很强的处理能力。随着电子技术的飞速发展,芯片的处理能力有了快速提高,频率为百 GHz 级芯片的推出和应用,为基于 TOA 和 TDOA 的定位方法应用于煤矿井下提供了技术保障。

煤矿井下无线传输多径效应较严重,基于 TOA 测距方法应用于井下时面临的主要困难是对非视距传播时延进行鉴别和抑制。针对该问题,本文在分析非视距误差产生原因的基础上,提出一种能量检测非视距误差抑制方法。

1 TOA 测距原理

TOA 技术通过测量 2 个(或多个)已知参考节点与目标点之间的信号传播时间,分别得出目标点与参考节点之间的估计距离,然后以各参考节点位置为圆心,以测得的估计距离为半径画圆,得到 2 个(或多个)圆,这些圆的交点从理论上讲就应该是目标节点的位置。至少要有 3 个参考节点才能准确得出目标节点的位置信息,如图 1 所示。

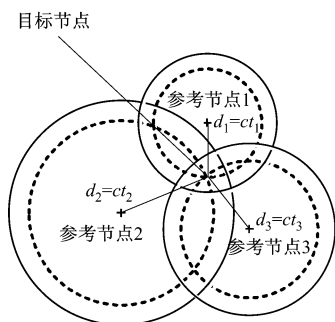


图 1 TOA 方法测距原理

设各参考节点位置为 (x_i, y_i) , $i=1, 2, 3$, 目标

节点位置为 (x, y) , 建立方程组:

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 = c^2 t_1^2 \\ (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 = d_2^2 = c^2 t_2^2 \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 = d_3^2 = c^2 t_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_i ($i=1, 2, 3$) 为目标节点与各参考节点的距离; c 为电磁波传播速度; t_i ($i=1, 2, 3$) 为参考节点发射的定位测量信号到达目标节点的时间。

求解式(1), 即可计算出目标节点的位置 (x, y) 。

TDOA 技术通过测量电磁波在 2 个参考节点和目标节点之间到达时间的差值, 建立 2 个方程, 得出目标节点与参考节点之间的距离。

TOA 和 TDOA 技术都要求解方程组, 定位精度最高。以 TOA 为例, 在理想情况下, 3 个定位圆相交于一点, 如图 1 中虚线所示。但当存在误差时, 3 个定位圆不能汇聚到一点, 如图 1 中实线所示, 这时利用式(1)无法得到目标的唯一解。实际巷道出现误差是难免的, 会出现定位圆不能汇聚到一点的情况, 目标定位问题演变成求解方程组最小值的非线性规划问题。目前, 求解非线性问题的主要位置估算方法^[10-11]: ① 泰勒级数展开线性化最小二乘位置估计算法(TS-LS)。TS-LS 是最基本的位置迭代估计算法, 其简单、适用环境范围广, 但需要迭代初值, 初值选择不当容易陷入局部最小点, 导致算法不收敛。② 具有闭合解的 Fang 算法、球面相交 SX 算法、球面插值 SI 算法和 Chan 两步加权最小二乘最大似然位置估计算法。上述方法都希望测距误差尽可能小, 使得位置估计精确度高。下面讨论井下巷道中基于到达时间测距方法误差产生的主要原因。

2 非视距误差

在井下巷道中, 电磁波直线传播的路径称为 DP (Direct Path, 直达路径) 或 LOS (Line of Sight, 视距)。当有障碍物阻挡时, 电磁波经反射到达接收端, 为 NLOS (Non Line of Sight, 非视距) 传播, 由此给测量值带来的误差称为 NLOS 误差。NLOS 对定位的影响如图 1 所示。对于基于到达时间的测距方法, 无论是 TOA 还是 TDOA, 测距误差主要是由电磁波 NLOS 传播造成的^[12-13], 因此需要研究 NLOS 误差消除或减弱的方法。

NLOS 传播情况下会对时间参数的估计带来很大误差。以 TOA 为例, 设 τ_i 为目标节点和第 i 个参考节点之间的时间参数估计结果, 则

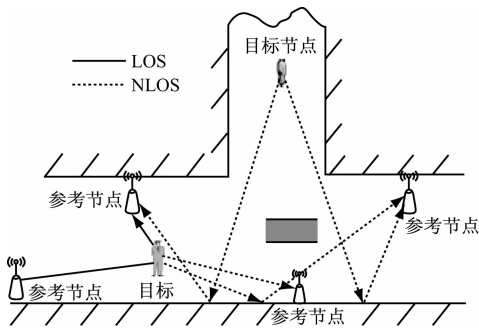


图2 NLOS对定位的影响

$$\tau_i = \tau_i^0 + n_i + \delta(I_i - 1)b_i \quad (5)$$

式中： τ_i^0 为 LOS 情况下时间参数估计值； n_i 为系统误差； I_i 为 NLOS 状态标志参量，当目标节点与参考节点 i 之间的 LOS 传播路径上存在障碍物时， I_i 为 1，否则为 0； b_i 为障碍物引起的 NLOS 误差，其值恒为正。

由式(5)可看出，如果定位模块不经过任何处理就进行定位估计，会导致定位精度降低。因此在使用测距结果之前，需要对测距信道的 NLOS 状态进行鉴别，然后根据鉴别结果赋予各距离估计结果不同的权值，消减 NLOS 误差效应，以提高定位精度，如图 3 所示，其中 r_i 为来自基站 i 的测距接收信号， $\hat{d}_i$ 为与基站 i 的距离估算结果。

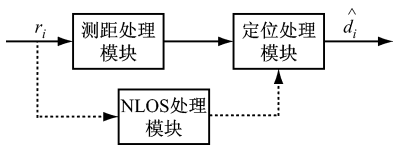


图3 NLOS处理原理

对于基于到达时间定位方法，最有价值的时延参数是首达路径或 DP 对应的时间参数。为避免复杂的信道估计，以所选取的参考节点定位时间参数测量值为依据，研究一种从接收信号的输出采样信号中进行特征提取的 NLOS 鉴别方法，原理如图 4 所示。在 1 帧长度的输出采样中，仅截取一段信噪比足够高且包含 NLOS 信息的信号段，通过矿井巷道测量、统计得出 DP 的门限值和信号截取的时间段，并在截取的信号段中提取 DP 和 SP(Strongest Path) 的特征，构造相应的鉴别参量，鉴别出 NLOS 信号。

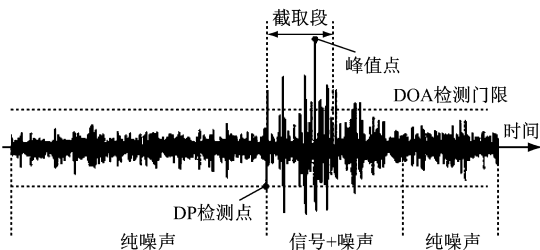


图4 信号截取原理

3 能量检测非视距误差抑制方法

采用基于非信道估计的方式，直接对接收信号进行采样，依据定位时间参数测量值，提取特征参量进行 NLOS 鉴别。根据鉴别结果，结合相应的非视距误差统计模型，对数据进行加权，实现视距重构。

信号采样采用基于能量检测估计算法，其原理是将接收到的信号通过平方器后再进行积分采样，以获得信号的能量采样序列。设积分周期为 T_b ，则 1 帧内能量块数为

$$N_b = \lceil T_f / T_b \rceil \quad (6)$$

式中： T_f 为帧周期。

则第 j 个帧中，采样序列为

$$Y_{n,j} = \int_{(j-1)T_f + (n-1)T_b}^{(j-1)T_f + nT_b} |r(t)|^2 dt, n = 1, 2, \dots, N_b \quad (7)$$

式中： $r(t)$ 为能量块。

由式(7)可看出，将 1 帧数据分为多个能量块进行采样，采样率明显降低，从而降低了复杂度。为使采样序列 Y_n 更趋于统计特性，在多帧内采集能量，即

$$Y_n = \sum_{j=1}^{N_b} Y_{n,j} \quad (8)$$

将能量采样序列与设定的门限值 θ 进行比较，认为第 1 个超出门限的能量块为 DP 所在的采样块，即

$$\begin{cases} \hat{\tau} = [\hat{n}_{DP} - 0.5]T_b \\ \hat{n}_{DP} = \min\{n \mid Y_n > \theta\} \end{cases} \quad (9)$$

式中： $\hat{\tau}$ 为 DP 到达目标节点的时间； $\hat{n}_{DP}$ 为 DP 所在的能量块。

由于 DP 所在的能量块门限与具体巷道的信道特性有关，所以选择门限时应充分考虑巷道的实际情况。门限 θ 的值依据能量采样的最大值和最小值计算：

$$\theta = \theta_{\text{norm}} [\max\{Y_n\} - \min\{Y_n\}] + \min\{Y_n\} \quad (10)$$

式中： θ_{norm} 为门限因子。

不同信噪比、不同信道的门限值不同，需要在矿井巷道进行实地测量，以获得门限值的统计信息。

确定了 DP 所在的能量块之后，以 DP 的检测点为截取起点，截取接收信号，如图 4 所示。由于 DP 及峰值单径 SP 的幅值与 NLOS 有直接关系，因此截取的信号段需要同时包括 DP 和 SP。截取长度根据特定信道环境下 DP 与 SP 的到达时间差 δ 的统计结果来设定，因此需通过实测得到。

为确定 DP 门限 θ 及 DP 与 SP 的到达时间差 δ , 在煤矿井下进行现场测试, 测量原理如图 5 所示。

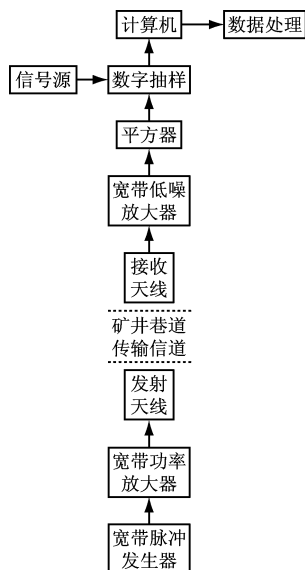


图5 测量原理

宽带脉冲发生器产生的脉冲信号经过宽带功率放大器放大, 通过射频天线发出, 信号经过矿井巷道传输信道后被接收天线接收, 然后经宽带低噪放大器和平方器后由数字抽样进行抽样采集, 被存入计算机进行统计分析, 测定 DP 的门限值和截取信号段的时间; 将测定值加入到 NLOS 鉴别算法中, 重新进行测量, 对测定值进行实验验证和修正, 最终确定 DP 门限值和截取信号的长度后, 构造 NLOS 鉴别参量。

在截取的接收信号中, 选取 DP 与 SP 的相对能量乘积作为 NLOS 鉴别的参量:

$$\phi = \frac{s_1 \max(s_n)}{\left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N s_n\right)^2} = \frac{N^2 s_1 \max(s_n)}{\left(\sum_{n=1}^N s_n\right)^2} \quad (11)$$

式中: $\{s_n\}$ 为截取信号的采样序列; $\{s_1\}$ 为 DP 采样序列; N 为截取信号中的能量块数。

当截取信号能量大于鉴别参量时, 接收信号为视距信号, 否则为非视距信号。

在不同的信道环境下, NLOS 时延误差可认为服从指数分布、均匀分布或 Delta 分布, 煤矿巷道的 NLOS 时延误差函数根据实地测量进行统计分析。

以指数分布为例进行分析。NLOS 时延误差分布:

$$p(t_{\text{nlos}}/\tau_{\text{rms}}) = \begin{cases} \frac{1}{\tau_{\text{rms}}} \exp\left(-\frac{t_{\text{nlos}}}{\tau_{\text{rms}}}\right) & t_{\text{nlos}} > 0 \\ 0 & t_{\text{nlos}} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_{nlos} 为 NLOS 情况下定位信号到达目标的时间;

τ_{rms} 为由信道环境决定的均方根时延扩展, 为服从对数正态分布的随机变量, $\tau_{\text{rms}} = T_1 d^\epsilon y$, T_1 为 d 处延时扩展的中值, ϵ 取值为 $0.5 \sim 1$, y 为一个标准差为 σ 的对数正态分布随机变量, σ 取值由信道环境决定。

最后, 根据实测得到的 NLOS 时延误差分布进行视距重构, 即利用 $r' = r_i - \tau'_{\text{rms}} c$ 重构近似 LOS 下距离测量值。采用 N 阶多项式对距离测量值 r_i 进行平滑处理, 最终得到较为精确的距离值。

4 测距与定位误差分析

为了对提出的非视距误差抑制方法的性能进行评估, 进行了实验测试。以一个相对封闭的楼道模拟矿井巷道环境, 射频信号在楼道内传输时会存在反射、散射、墙壁吸收等情况, 与电磁波在巷道内传输有很大的相似性, 因此采用实验楼道模拟矿井巷道可行。实验场景配置如图 6 所示, 实验楼道的长、宽、高分别为 30, 4, 4 m, 参考节点沿实验楼道的一侧线性部署, 相邻参考节点的水平距离为 8 m。

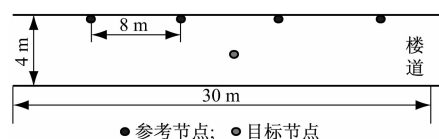


图6 实验场景配置

采用基于能量检测非视距误差抑制的 TOA 定位方法对参考节点和目标节点之间的距离进行估计, 重复多次测量得到一组距离估计值。将该组距离估计值与参考节点和目标节点之间的实际距离进行比较, 计算出相应的测距误差, 得出测距误差的累积概率分布函数, 如图 7 所示, 可看出采用本文算法估算 DP 到达时间时, 95% 的测距误差小于 1 m, 可达到较高的测距精度。

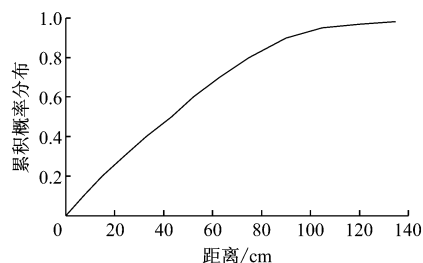
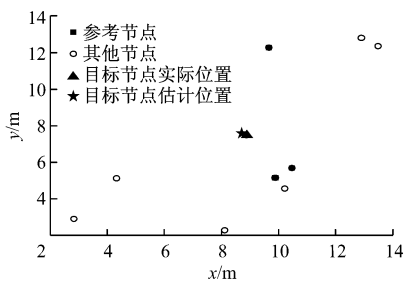


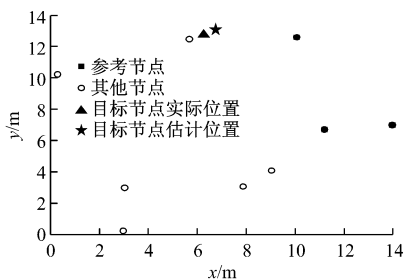
图7 基于能量检测非视距误差抑制的 TOA 方法测距误差的累积概率分布函数

采用 Matlab 仿真软件对测距误差与定位误差之间的关系进行分析, 结果如图 8 所示。可看出, LOS 情况下测距误差的标准差为 5.69 cm, 即方差 $\sigma^2 = 0.0032$ 时, 定位误差为 0.23 m^2 ; NLOS 情况下

测距误差的标准差为 10.45 cm,即方差 $\sigma^2=0.0110$ 时,定位误差为 0.65 m^2 。可见基于 TOA 位置估算得益于 TOA 的精确测距。



(a) LOS 情况下测距方差 $\sigma^2=0.0032$



(b) NLOS 情况下测距方差 $\sigma^2=0.0110$

图 8 不同情况下的位置估计

5 结论

(1) 研究了基于到达时间方法在矿井目标定位中的应用,分析了基于到达时间方法的测距误差产生的原因,提出对于基于到达时间的测距定位,定位误差主要由电磁波非视距传播时延造成,提出了基于到达时间测距的矿井目标定位非视距鉴别方法。

(2) 分析研究得出基于到达时间的矿井定位方法中的传输时延参数是由 DP 能量块的到达时间决定的,提出根据实测矿井巷道信道特征,统计分析得出 DP 的门限值和信号截取的时间长度,构造相应的鉴别参量,在截取的信号段中提取直达路径能量块的到达时间,以此鉴别出 NLOS 信号。

(3) 通过实验测试及误差分析,表明了本文算法可达到较高的测距和定位精度。

参考文献:

[1] 孙继平. 煤矿井下人员位置监测技术与系统[J]. 煤炭

科学技术,2010,38(11):1-5.

[2] 李靖,樊晓明. 基于 RFID 技术的井下人员定位管理系统的应用[J]. 工矿自动化,2011,37(5):85-87.

[3] 彭霞. 基于矿井 WiFi 通信系统的混合定位方法研究[J]. 工矿自动化,2013,39(8):28-31.

[4] 蒋磊,于雷,王振翀,等. 基于 WiFi 和 ZigBee 的井下人员无线跟踪与定位系统的设计[J]. 工矿自动化,2011,37(7):1-5.

[5] 孙继平,王帅. 基于信号强度的改进型井下测距算法研究[J]. 煤炭学报,2013,38(11):2072-2076

[6] 武丹琛,丁青青,刘志高,等. 基于 RSSI 方法的井下人员定位系统原理与设计[J]. 工矿自动化,2010,36(11):76-79.

[7] 孙继平,李晨鑫. 基于 WiFi 和计时误差抑制的 TOA 煤矿井下目标定位方法[J]. 煤炭学报,2014,39(1):192-197.

[8] 孙继平,李晨鑫. 基于 TOA 技术的煤矿井下人员定位精度评价方法[J]. 煤炭科学技术,2014,42(3):66-68.

[9] 孙继平,李晨鑫. 基于卡尔曼滤波和指纹定位的矿井 TOA 定位方法[J]. 中国矿业大学学报,2014,43(6):1127-1133.

[10] WANN C D, CHIN H C. Hybrid TOA/RSSI wireless location with unconstrained nonlinear optimization for indoor UWB channels [C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Hong Kong,2007:3940-3945.

[11] 杨维,周嗣勇,乔华. 煤矿安全检测无线传感器网络节点定位技术[J]. 煤炭学报,2007,32(6):652-656.

[12] TIAN Zijian, WANG Baoao, LI Ming, *et al.* A UWB mixed positioning method based on the pattern matching in underground mines [J]. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2013,48(3):1714-1722.

[13] VENKATESH S, BUEHRER R M. Non-line-of-sight identification in ultra-wideband systems based on received signal statistics [J]. IET Microwaves, Antennas and Propagation,2007,1(6):1120-1130.