文章编号:1671-251X(2020)09-0064-05　　DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2019050056

基于差分误差抑制优化方法的井下目标定位

宋运忠[1]，　王仁辉[1,2]

(1.河南理工大学 电气工程与自动化学院，河南 焦作　454000；
2.国网安徽省电力有限公司 颍上县供电公司，安徽 阜阳　236200)

扫码移动阅读

摘要:针对基于时间测距即到达时间、单程测距、双程测距、对称双边双程测距(SDS-TWR)等定位方法的定位精度受节点间时钟未同步、计时器频率偏移、设备时延等计时误差因素干扰的问题,提出了一种基于差分误差抑制优化方法的井下目标定位方法。该方法结合 SDS-TWR 定位方法,利用目标节点既是发射节点又是接收节点的特点,将传输时间及长度关系联立求解,通过矩阵形式,消除计时器频率偏移、设备时延等无关变量,得到未知目标节点的坐标仅与实测时间有关,从而有效消除计时误差对目标节点定位结果的影响,达到精确定位的目的。仿真结果表明,与单程测距、双程测距方法相比,差分误差抑制优化方法可有效抑制设备时延和计时器频率偏移等对基于时间测距的定位方法的影响,能对未知节点进行精确定位,定位精度高,测距误差区间仅为[−0.036 9 m,0.037 7 m],是单程测距误差的 0.012%,双程测距误差的 0.061%。

关键词:井下目标定位;到达时间;计时误差;差分误差抑制;单程测距;双程测距;对称双边双程测距;TOA

中图分类号:TD655　　文献标志码:A

Underground target positioning based on differential error suppression optimization method

SONG Yunzhong[1],　WANG Renhui[1,2]

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Yingshang County Power Supply Company, State Grid Anhui Power Co., Ltd., Fuyang 236200, China)

Abstract: In view of problem that positioning accuracy of positioning methods based on time ranging, namely arrival time, one-way ranging, two-way ranging and symmetrical double-sided two-way ranging (SDS-TWR) is disturbed by timing error factors such as clock asynchronization between nodes, timer frequency offset and equipment delay, an underground target positioning method based on differential error suppression optimization method was proposed. Combining with SDS-TWR positioning method, the method uses characteristics of target node as both transmitting node and receiving node to solve relationship between transmission time and length simultaneously. Irrelevant variables such as timer frequency offset and equipment delay are eliminated through matrix form and coordinates of unknown target node are only related to the measured time, so as to effectively eliminate influence of timing error on the positioning result of the target node, and achieve purpose of precise positioning. The simulation results show that compared with the one-way ranging and two-way ranging methods, the differential error suppression optimization method can effectively suppress influence of equipment delay and timer frequency

收稿日期:2019-05-21;**修回日期**:2020-07-12;**责任编辑**:张强。

基金项目:国家自然科学基金项目(61340041,61374079);河南省自然科学基金项目(182300410112)。

作者简介:宋运忠(1968－),男,河南民权人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为复杂系统分析与控制,E-mail:songhpu@126.com。通信作者:王仁辉(1992－),男,河南信阳人,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制,E-mail:wangrenhuixue@163.com。

引用格式:宋运忠,王仁辉.基于差分误差抑制优化方法的井下目标定位[J].工矿自动化,2020,46(9):64-68.
SONG Yunzhong, WANG Renhui. Underground target positioning based on differential error suppression optimization method[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(9): 64-68.

offset on the positioning method based on time ranging, and can accurately locate the unknown node with high positioning accuracy, the range of ranging error is only [−0.036 9 m, 0.037 7 m], which is 0.012% of one-way ranging error and 0.061% of two-way ranging error.

Key words: underground target positioning; arrival time; timing error; differential error suppression; one-way ranging; two-way ranging; symmetrical double-sided two-way ranging; TOA

0　引言

在煤矿井下目标定位中,为了满足事故应急救援、井下作业人员管理、煤矿物联网建设的需求,需要根据不同的场景建立不同的定位方法[1-2]。基于时间测距的定位方法所需定位设备较少,原理简单,定位精度只与发射设备和接收设备之间信号传输时间有关,且受巷道及支护中导体和设备的影响较小,因此在煤矿井下目标定位中得到了较广泛的应用。基于时间测距的定位方法主要包括到达时间(Time of Arrival,TOA)、单程测距、双程测距、对称双边双程测距方法(Symmetrical Double-Sided Two Way Ranging,SDS-TWR)等。TOA 定位方法,即从目标发出信号开始计时,到接收器接收到信号时停止计时,根据传输时间进行定位,对发射设备和接收设备时钟精度要求非常高,并且要求同步校准[3]。单程测距方法利用信号在发射节点和接收节点之间传播的时间计算距离,实现目标节点定位,在理想状况下,系统同步时延为零,此时为无误差测距;当同步时延不为零时,随着同步时延的增长,所测距离误差也同步增大,因此同步时延的大小对目标位置的精确度影响极大。双程测距通过双向信号传输实现测距,其定位精度受处理时延和计时器频率偏移的影响较大。SDS-TWR 是在双程测距过程基础上再进行一次双向信号传输过程实现测距。许多学者对基于时间测距的定位方法进行了大量研究,陈莉等[4]研究了双向单程测距中由相位噪声引起的测距误差,重点分析了双星时标偏差与相位噪声耦合效应对测距精度的影响,得出相噪测距误差与频率源相位噪声及时标偏差之间的定量关系,进而提出了对时钟偏移、频率偏移等误差进行抑制的方法。张健等[5]提出了一种改进的无线传感器网络到达时间定位算法,该算法无需额外的硬件支撑,以接收节点回复时间信息的方式消除时间同步误差,采用多次测量结果取平均值的方式削弱随机噪声的影响,但该算法采用平均值方法进行求解,当异常数据较大、较多时,存在较大误差。张林山等[6]分析了影响 TOA 定位精度的误差源,即定位过程中存在处理时延、频率偏移系数、温度、湿度等干扰因素,这些干扰因素在定位过程中如果不加以抑制,将存在较大定位误差。以上基于时间测距的定位方法由于没有进行有效的时钟同步及误差抑制,导致定位结果存在较大误差。鉴此,为有效抑制时钟未同步、设备时延、频率偏移系数等计时误差,本文结合 SDS-TWR 定位方法[7-8],定义目标节点既是发射节点又是接收节点,提出了基于差分误差抑制优化方法的井下目标定位方法。仿真分析验证了该方法的正确性。

1　差分误差抑制优化方法

SDS-TWR 方法通过计算信号在发射节点与接收节点双程往返传播的时间进行定位,其距离计算公式为

$$d = c\frac{t_1 - \mu_1 t_1 - (t_2 - \mu_2 t_2)}{2} = c\frac{t_1 - t_2 - (\mu_1 t_1 - \mu_2 t_2)}{2} \tag{1}$$

式中:c 为光速;t_1 为发送节点从发出信号开始至接收到接收节点发出反馈信号为止所用的时间;t_2 为反应时间,即接收节点从接收到发送节点的信号起,到接收节点发出反馈信号的时间;μ_1 为发送节点内部频率偏移系数;μ_2 为接收节点内部频率偏移系数。

由式(1)可知,$-(\mu_1 t_1 - \mu_2 t_2)$为双程测距误差,其误差值由 t_1,t_2,μ_1,μ_2 决定,其中 t_1 和 t_2 无法避免,为系统误差;μ_1 和 μ_2 为发送节点和接收节点内部存在的频率偏移,对测量结果精确度影响较大。如要在一维系统中进行精确定位,必须克服设备时延和计时器频率偏移等计时误差[9-10]。基于设备时延、计时器频率偏移、节点时钟未同步等干扰因素,本文主要考虑一维巷道间的定位问题。SDS-TWR 方法原理如图 1 所示。

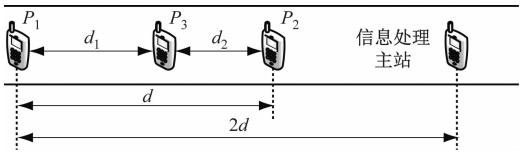

图 1　SDS-TWR 方法原理

Fig. 1　Principle of SDS-TWR method

设未知节点为 P_3,已知节点为 P_1,P_2 和信息处

理主站，在节点 P_1，P_2 和 P_3 都装设一个光传感器和计时器。当每次发送节点与接收节点之间处理时延大小相等时，SDS-TWR 定位方法能够有效抑制计时误差；当时延不一致时，此方法不能有效抑制计时误差。为此，在 SDS-TWR 定位方法的基础上提出了差分误差抑制优化方法。该方法设置目标节点既是发射节点又是接收节点，从而可有效避免节点间时钟未同步带来的误差，并在 SDS-TWR 定位方法基础上加以扩展创新，将传输时间及长度关系联立求解，通过矩阵形式，消除设备时延、计时器频率偏移等无关变量，得到未知目标节点的坐标仅与实测时间值有关的距离公式，从而达到精确定位的目的。

由图 1 可知，节点 P_1 和 P_2 之间的距离为 d，P_1 和信息处理主站之间的距离为 $2d$，为已知值。设 P_1 和 P_3 之间的距离为 d_1，P_2 和 P_3 之间的距离为 d_2，为待测值。节点 P_1，P_2 和 P_3 使用相同型号的计时器和处理器，这样可以减少无关因素的影响。在 SDS-TWR 定位方法的基础上，利用如图 2 所示的发送节点和接收节点之间的信号收发方式和计时方式，得出一维通道中相应时间值 t_{13}，t_{12}，t_{21}，t_{23}，t_{31}，t_{32}。

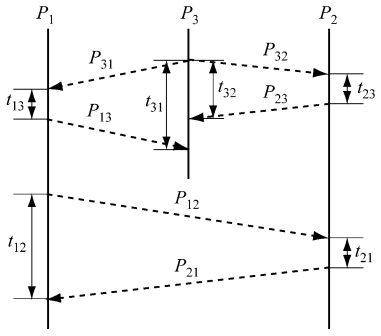

图 2 信号收发及计时方式

Fig. 2 Signal receiving and transmission and timing method

(1) 节点 P_3 分别向节点 P_1 和 P_2 发出信号 P_{31} 和 P_{32}，开始记录时间，记为 t_{31} 和 t_{32}。

(2) 当节点 P_2 收到信号 P_{32} 时，向节点 P_3 回复信号 P_{23}，计时为 t_{23}。

(3) 当节点 P_1 收到来自节点 P_3 的信号 P_{31} 时，向节点 P_3 回复信号 P_{13}，计时为 t_{13}。

(4) 当节点 P_3 收到信号 P_{23} 和 P_{13} 时，结束计时，记录时间为 t_{32} 和 t_{31}。

(5) 节点 P_1 向节点 P_2 发送信号 P_{12}，开始记录时间，记为 t_{12}。

(6) 当节点 P_2 收到信号 P_{12} 时，向节点 P_1 回复信号 P_{21}，计时为 t_{21}。

(7) 当节点 P_1 收到信号 P_{21} 时，结束计时，记时为 t_{12}。

(8) 节点 P_3 和节点 P_2 分别将所测时间 t_{32}，t_{31} 和 t_{23}，t_{21} 发送至节点 P_1。

在节点 P_1 和 P_2 之间计算时间 t_{12} 时，通过距离、速度、频率偏移的关系可以构建如下等式关系：

$$t_{12} = \frac{3d}{c} + t_{21}^{*} + \mu_1 t_{12} \tag{2}$$

$$t_{21} = t_{21}^{*} + \mu_2 t_{21} \tag{3}$$

式中 t_{21}^{*} 为节点 P_2 处理来自节点 P_1 的信号 P_{12} 的净延迟。

IEEE802.11 中规定，各个设备的时钟频率偏移不允许超过 $\pm 25\times 10^{-6}$，本文经过多次计算和测试，最终选择频率偏移范围为 $\pm 1\times 10^{-6}$。

距离、速度、频率偏移存在如下函数关系：

$$\mu_1(t_{12}-t_{21}) \approx \mu_1 \frac{3d}{c} \ll \frac{3d}{c} \approx t_{12}-t_{21} \tag{4}$$

$$t_{12}-t_{21} = \frac{3d}{c} + \mu_1 t_{12} - \mu_2 t_{21} - \mu_1(t_{12}-t_{21}) \tag{5}$$

$$t_{12}-t_{21} = \frac{3d}{c} + (\mu_1-\mu_2)t_{21} \tag{6}$$

同理可知，节点 P_3 与节点 P_1，P_2 之间的传输时间关系为

$$t_{31}-t_{13} = \frac{2d_1}{c} + (\mu_3-\mu_1)t_{13} \tag{7}$$

$$t_{32}-t_{23} = \frac{2d_2}{c} + (\mu_3-\mu_2)t_{23} \tag{8}$$

式中 μ_3 为已知节点 P_3 的频率偏移系数。

由图 1 可知，节点 P_1，P_2 和节点 P_3 之间存在以下位置关系：

$$d = d_1 + d_2 \tag{9}$$

联立式(6)—式(9)可得

$$\begin{bmatrix} t_{21} & -t_{21} & 0 & 0 & 0 \\ -t_{13} & 0 & t_{13} & \frac{2}{c} & 0 \\ 0 & -t_{23} & t_{23} & 0 & \frac{2}{c} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \mu_3 \\ d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{12}-t_{21}-\frac{3d}{c} \\ t_{31}-t_{13} \\ t_{32}-t_{23} \\ d \end{bmatrix} \tag{10}$$

联立消去 μ_1、μ_2 和 μ_3 可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -\frac{t_{13}}{t_{23}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{c}{2}t_{13}\left(\frac{t_{31}}{t_{13}} - \frac{t_{32}}{t_{23}} + \frac{t_{12}-t_{21}}{t_{21}}\right) - \frac{3}{2}d\frac{t_{13}}{t_{21}} \\ d \end{bmatrix} \tag{11}$$

联立式(9)和式(11)可得到差分误差抑制优化方法的距离计算公式为

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\dfrac{t_{13}}{t_{13}+t_{23}}\left(1-\dfrac{3t_{23}}{2t_{21}}\right)+\dfrac{c}{2(t_{13}+t_{23})}\left(t_{31}t_{23}-t_{13}t_{32}-t_{13}t_{23}+t_{13}t_{23}\dfrac{t_{12}}{t_{21}}\right) \\ d\dfrac{t_{23}}{t_{13}+t_{23}}\left(1+\dfrac{3t_{13}}{2t_{21}}\right)+\dfrac{c}{2(t_{13}+t_{23})}\left(t_{13}t_{32}-t_{31}t_{23}+t_{13}t_{23}-t_{13}t_{23}\dfrac{t_{12}}{t_{21}}\right) \end{bmatrix} \tag{12}$$

由式(12)可知,差分误差抑制优化方法中,距离 d_1 和 d_2 与各个节点频率偏移系数 μ_1,μ_2,μ_3 及同步时延和处理时延无关,仅与各个节点所测时间 t_{13},t_{12},t_{32},t_{31},t_{23},t_{21} 和速度 c 有关,从而达到了误差抑制的效果。

2　仿真与分析

为了验证差分误差抑制优化方法定位结果的可靠性,在 Matlab 仿真软件中进行了实验。选择如图 3 所示的远距离传输塑料管道模拟煤矿巷道,以避免干扰噪声的影响。本文模拟测试煤矿井下未知目标节点位置的初始数据如下:$d=4\ 000$ m,同步时延小于 $\pm1\times10^{-6}$ s,计时器频率偏移不超过 $\pm1\times10^{-6}$,处理时延[11]小于 4 μs。在同一环境下比较计时误差对单程测距、双程测距和差分误差抑制优化方法定位结果的影响,每种定位方法在 Matlab 仿真软件中都重复模拟 1 000 次,仿真结果如图 4 所示。仿真实验得出计时误差对单程测距、双程测距与差分误差抑制优化方法影响的误差区间最值见表 1。

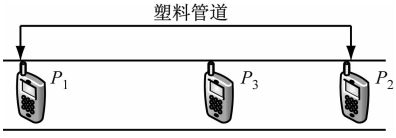

图 3　测试环境

Fig. 3　Test environment

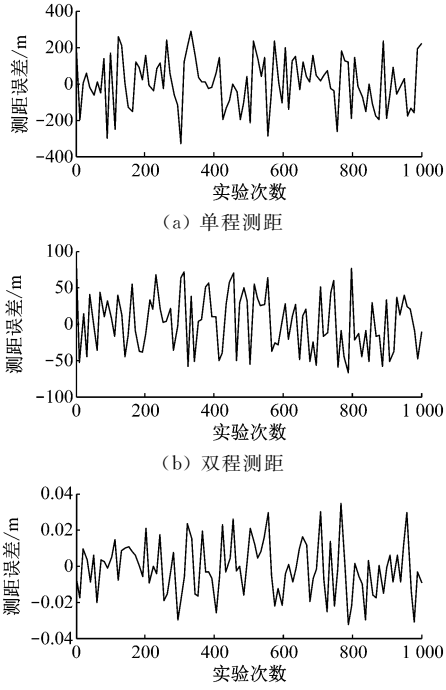

图 4　计时误差抑制优化结果仿真

Fig. 4　Simulation of timing error suppression results

表 1　误差区间最值

Table 1　Maximum error range

测距方法	误差区间最值下限/m	误差区间最值上限/m
单程测距方法	−320.351 2	298.564 2
双程测距方法	−59.988 7	61.877 9
差分误差抑制优化方法	−0.036 9	0.037 7

由图 4、表 1 可知,单程测距误差最值区间为[−320.351 2 m,298.564 2 m],最大误差值比较大,严重影响测距结果,很难满足现实精度要求,造成误差有两方面原因:一方面是因为系统存在较大同步时延,另一方面是因为忽略了系统频率偏移的影响。双程测距误差最值区间为[−59.988 7 m,61.877 9 m],误差最值相较于单程测距误差大大减小,可以满足大部分对测试环境误差要求不高的场景,但是对精度要求比较高的环境中,还远远不能达到要求。差分误差抑制优化方法的测距误差最值区间仅为[−0.036 9 m,0.037 7 m],大大缩小了测距误差,误差是单程测距误差的 0.012%,是双程测距误差的 0.061%。

差分误差抑制优化方法的实测结果如图 5 所示。在实验中每间隔 3 m 通过使用差分误差抑制优化方法进行若干次测量并求取平均值,从最值区间可以得出,使用差分误差抑制优化方法可以精确定位出未知节点的坐标。

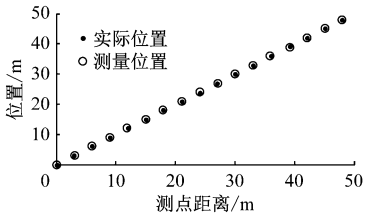

图 5　实测结果

Fig. 5　Measured results

3　结论

(1) 基于时间测距的定位方法的定位精度主要受到节点间时钟未同步、计时器频率偏移、设备时延等计时误差的影响。为了有效抑制计时误差对基于时间测距定位方法的影响,提出了基于差分误差抑制优化方法的井下目标定位方法,该方法将到达时间及长度关系联立求解,通过矩阵形式,消除计时误差,得到未知目标节点的坐标仅与实测时间值有关

的距离公式，从而达到精确定位的目的。

（2）仿真测试结果表明，差分误差抑制优化方法能够有效抑制计时误差对基于时间测距定位方法的影响，能从根本上消除同步时延、处理时延、频率偏移系数对定位结果的干扰，能对未知节点进行精确定位，定位精度高，测距误差区间仅为[−0.036 9 m，0.037 7 m]，是单程测距误差的0.012%，双程测距误差的0.061%，可满足远场井下定位精度的要求。

参考文献(References)：

[1] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术[J]. 煤炭学报，2010，35(11)：1925-1929.
SUN Jiping. Technologies of monitoring and communication in the coal mine[J]. Journal of China Coal Society，2010，35(11)：1925-1929.

[2] 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 coal mine underground wireless sensor networks[J]. Journal of China Coal Society，2010，35(7)：1229-1233.

[3] 孙哲星. 基于时间测距的矿井人员定位方法研究[J]. 工矿自动化，2018，44(4)：30-33.
SUN Zhexing. Research on mine personnel positioning method based on time range[J]. Industry and Mine Automation，2018，44(4)：30-33.

[4] 陈莉，王跃科，张传胜. 相位噪声引起的双向单程测距误差研究[J]. 电子测量与仪器学报，2013，27(2)：99-104.
CHEN Li，WANG Yueke，ZHANG Chuansheng. Research on the phase-noise-induced error in dual one-way ranging [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument，2013，27(2)：99-104.

[5] 张健，李鸥，刘广怡. 改进的无线传感器网络到达时间定位算法[J]. 计算机工程，2009，35(19)：129-131.
ZHANG Jian，LI Ou，LIU Guangyi. Improved TOA positioning algorithm for wireless sensor networks [J]. Computer Engineering，2009，35(19)：129-131.

[6] 张林山，苏应敢，姚建，等. 无线传感器网络测距误差分析[J]. 云南电力技术，2015，43(增刊2)：85-86.
ZHANG Linshan，SU Yinggan，YAO Jian，et al. Ranging error analysis of wireless sensor network [J]. Yunnan Electric Power，2015，43(S2)：85-86.

[7] 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)：31-34.
LIU Shisen，TANG Chaoming，WU Wei. Research of TOA ranging method in wireless sensor network[J]. Industry and Mine Automation，2012，38(3)：31-34.

[8] IEEE Std 802.11-2007 IEEE standard for information technology telecommunications and information exchange between systems-local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11：wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications[S].

[9] 张学广，王瑞，刘鑫龙，等. 改进的主动频率偏移孤岛检测算法[J]. 电力系统自动化，2012，36(14)：200-204.
ZHANG Xueguang，WANG Rui，LIU Xinlong，et al. Improved active frequency drift anti-islanding algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems，2012，36(14)：200-204.

[10] 刘世明，郭韬，吴聚昆，等. 适用于频率偏移情况下同步相量测量的DFT算法研究[J]. 电网技术，2016，40(5)：1522-1528.
LIU Shiming，GUO Tao，WU Jukun，et al. Study of DFT algorithm for synchrophasor measurement under frequency offset[J]. Power System Technology，2016，40(5)：1522-1528.

[11] 刘教民，赵建利，王震洲，等. 智能变电站报文处理时延的不确定性研究[J]. 河北科技大学学报，2012，33(1)：56-60.
LIU Jiaomin，ZHAO Jianli，WANG Zhenzhou，et al. Uncertainty of delay caused by the emergency of queuing up phenomenon in the buffer of substation main unit[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology，2012，33(1)：56-60.