

[智能接地线]

基于Teager-Kaiser的输电线路智能接地线精确定位方法

文/王晓磊 李孝春 曹成发 安东 马伟荣
国网青海省电力公司西宁供电公司

为解决传统接地线智能化程度低、定位准确度不高的问题，设计一种新型智能接地线装置。该装置采用模块化设计理念，集成数据传输、GPS/BDS定位和悬挂状态感知等多个功能模块，实现对接地线的智能化管理。在GPS/BDS定位方面，Teager-Kaiser算子与MEDLL算法相结合，通过引入Teager-Kaiser阈值对多径信号进行评估，有效降低计算复杂度，并显著提升参数估计的准确度和运算效率。此方法利用预设的检测门限，能够迅速且精确地确定多径信道的数量及各项关键参数，如信号强度、时间延迟以及相位信息，进而增强系统的实时响应能力和定位精准度。

当前，电力行业经历了显著的变革，特别是随着智能电网概念的兴起，对于确保设备运行的高度可靠性和安全性的需求达到前所未有的高度。这一趋势促使操作安全规范和标准不断升级，强调更为严格和精细的管理要求，以应对日益复杂的电网结构和提升整体系统的稳定性与效率。当输电线路停电维护时，挂接地线是确保生命安全的最重要项目。特别是在执行电力系统的维护任务，如拆除和安装接地线时，操作的复杂性显著增加。考虑到每次断电维护都涉及到临时接地线的部署，而面对众多需处理的线路，这一过程变得尤为繁琐。在某些情况下，接地线的组合可能多达数十组，加之维护作业区域广阔，导致接地线的布置位置极为分散，这无疑加剧了工作的执行难度和管理挑战。因此，准确定位接地线的连接状态和位置是提高接地线操作效率和提高电气设备安全可靠性的关键。

智能接地线的结构设计

复杂电网的继电保护系统需要处理大量高维数据，包括电压、电流、功率和频率等多种电气信息。

为提升电力系统接地设备的安全性及稳定性，研发了一款创新型的智能接地线装置。这款装置不仅具有紧凑的体积和低功耗的特点，还融合了多种功能以及复杂的模块设计。

1. 智能接地线的功能组成

这个设计方案的目标是打造一个便携式的设备，具备以下主要功能：能够产生和接收信号、提供用户交互界面（例如按键输入）、具备通信能力、进行数据存储和管理、优化电源使用以及通过LCD显示屏展示信息。

- 1) 无需接地桩即可检测接地电阻。
- 2) 采用电池供电，并具备智能电源管理系统。
- 3) 设备集成人机交互界面，用户可以通过按键与设备进行互动，并通过LCD点阵显示屏查看检测结果。
- 4) 具备自动连接状态感知功能。
- 5) 电阻检测范围为 $0 \sim 30 \Omega$ ，电阻分辨率为 0.1Ω ，准确度为 $\pm (1\% + 0.1 \Omega)$ 。
- 6) 具备GPS/BDS双星定位功能，水平定位准确度小于 1 m 。

7) 具备先进的通信能力。能够实现与多组接地线设备的快速连接和切换。当存在多组接地线设备时,系统会自动优先连接到距离最近的一组设备。此外,设备还集成定位功能,可以精确确定设备的位置。设备支持4G/5G网络传输,能够将检测结果实时上传至云端服务器,确保数据的即时性和可靠性。

2. GPS/BDS定位模块

智能接地线配备有GPS/BDS定位模块。安装在线路每个点的智能接地线可以实时接收GPS/BDS双星发送的位置信息,并通过4G/5G传输模块将位置信息传输到Web终端进行分析,从而实现对智能接地线的实时定位。GPS/BDS定位过程如图1所示。

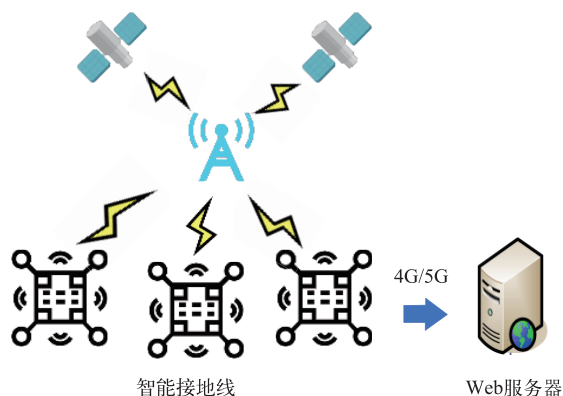


图1 GPS/北斗定位过程

基于改进MEDLL的精确定位方法

BDS/GPS组合单频RTK定位技术是一种结合BDS和GPS的实时动态定位技术(Real-Time Kinematic, RTK),该技术具备高度的实时性、广泛的适用性和卓越的准确度。然而,由于大气条件变化、环境遮挡和多路径传播等因素的影响,定位的结果可能受到干扰,使其稳定性下降,甚至出现位置漂移或突变的情况。

1. 基于GPS/BDS的RTK定位原理

BDS和GPS在操作模式和系统编码方面有许多相似之处,但由于卫星星座选择的不同,它们在坐标和时间上有一些差异,这可以有效解决参考卫星测量误差的问题。在北斗卫星导航系统(BDS)和全球定位系统(GPS)中,为了提高定位准确度,通常会选择仰角较高且信号强度较大的卫星作为基

准卫星。假设在一个时间点上,两个观测站能够共同看到的卫星数量为 N 。通过结合双差观测方程、双差载波相位以及伪距观测方程,可以构建出适用于BDS/GPS单频实时动态定位(RTK)的定位方程为

$$\begin{cases} \nabla \Delta \rho_B^{i,1} = \nabla \Delta r_B^{i,1} + \nabla \Delta \varepsilon_{\rho,B} \\ \nabla \Delta \rho_B^{i,N} = \nabla \Delta r_B^{i,N} + \nabla \Delta \varepsilon_{\rho,B} \\ \nabla \Delta \phi_B^{i,1} = \lambda_B^{-1} \nabla \Delta r_B^{i,1} + \nabla \Delta N_B^{i,1} + \nabla \Delta \varepsilon_{\phi,B} \\ \nabla \Delta \phi_B^{i,N} = \lambda_B^{-1} \nabla \Delta r_B^{i,N} + \nabla \Delta N_B^{i,N} + \nabla \Delta \varepsilon_{\phi,B} \\ \nabla \Delta \rho_G^{i,1} = \nabla \Delta r_G^{i,1} + \nabla \Delta \varepsilon_{\rho,G} \\ \nabla \Delta \rho_G^{i,N} = \nabla \Delta r_G^{i,N} + \nabla \Delta \varepsilon_{\rho,G} \\ \nabla \Delta \phi_G^{i,1} = \lambda_G^{-1} \nabla \Delta r_G^{i,1} + \nabla \Delta N_G^{i,1} + \nabla \Delta \varepsilon_{\phi,G} \\ \nabla \Delta \phi_G^{i,N} = \lambda_G^{-1} \nabla \Delta r_G^{i,N} + \nabla \Delta N_G^{i,N} + \nabla \Delta \varepsilon_{\phi,G} \end{cases} \quad (1)$$

式中,下标B和G分别代表BDS和GPS系统; $\nabla \Delta$ 为双差算子; ϕ 为伪距观测值; φ 为载波相位观测值; ε 为观测噪声, r 为卫星与接收器之间的实际距离。

在卫星信号传输过程中,由于多路径效应、接收信号衰减、延迟扩展和相位偏移的影响,导致卫星定位误差较大。为解决多路径干扰问题,在这方面进行了改进,有效减少多路径干扰的影响,提高卫星定位准确度。

2. 基于Teager-Kaiser的改进MEDLL方法

通过引入Teager-Kaiser(TK)算子和MEDLL算法,分析TK算子的能量特征,可以判断信号是否受到多路径传播的影响。进一步处理这些信号可以帮助识别信号的具体来源及其传播路径,全面估计多路径信号,减少计算量,提高定位准确度。

假设 $x(t)$ 是一个复数信号,TK算子计算公式为

$$\psi_{lc}(t) = \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \frac{d^2 x^*(t)}{dt^2} - \frac{1}{2} \left[\frac{d^2 x(t)}{dt^2} x^*(t) + x(t) \frac{d^2 x^*(t)}{dt^2} \right] \quad (2)$$

多路径信号的相关函数为

$$R(t) = \sum_{i=0}^M \alpha_i \Delta(t - T_i, T_c) e^{j\phi_i} \quad (3)$$

式中, T_i 、 α_i 和 ϕ_i 分别为第 k 条多路径信号的时间延迟、信号幅度和相位分别表示为特定参数,其中 i 和 T_c 代表伪码的符号周期。

将式(2)代入式(3)可得

$$\begin{aligned} \psi_c[R(t)] &= \frac{1}{T_c^2} \{ [\sum_{i=0}^M \alpha_i \text{sign}(t - \tau_i) \prod(t - \tau_i, T_c) \cos \phi_i]^2 + \\ &[\sum_{i=0}^M \alpha_i \text{sign}(t - \tau_i) \prod(t - \tau_i, T_c) \sin \phi_i]^2 \} + \\ &\frac{1}{2T_c} \{ R^*(t) [\sum_{i=0}^M \alpha_i \delta(t - \tau_i) e^{j\phi_i}] + R(t) [\sum_{i=0}^M \alpha_i \delta(t - \tau_i) e^{-j\phi_i}] \} \end{aligned} \quad (4)$$

由式（4）可以看出，每个时间延迟的多路径信号可以在单位脉冲处有效识别。通过使用TK算子优化MEDLL算法的整体性能，可以更准确地估计多路径信号，减少运算量，大大提高估计准确度和计算效率。

仿真验证

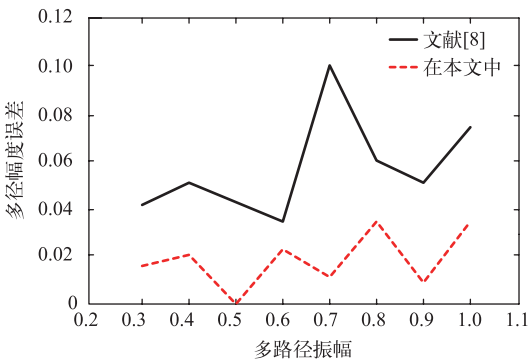
1. 对比实验

为了验证所提出方法的准确性，将实验结果与文献[4]中的方法进行比较。以一个直接信号和两个多路径信号为例，实验数据包括信号幅度、延迟时间以及延迟相位的设置，见表1。

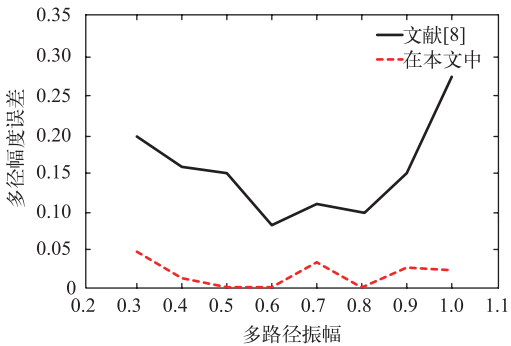
表1 实验参数设置

错误类型	振幅	延迟时间	延迟相位
直接的信号	1	0	0
第一个路径	0.55	0.32	$\pi/6$
第二条道路	0.2	0.52	$3\pi/4$

在表1的实验参数设置下，分别对所提出的方法与文献[5]进行测试，计算不同多路径幅度下的幅度误差和时间延迟差异，比较结果如图2所示。



(a) 不同多路径幅度的平均幅度误差



(b) 不同多路径幅度的平均时间延迟误差

图2 不同多路径幅度的平均幅度和延迟误差

从多路径估计参数的评估中可以看出，所提出方法的误差小于0.04，多路径延迟误差的平均值小于0.05，两者均优于文献[6]中提出的方法。实验结果表明，本文提出的方法在估计准确度上具有显著优势。在计算复杂度方面，假设有 M 个多路径信号，最大迭代次数为 $N_{\max}$ 。如果采用最大似然法来估计一个多路径信号，其计算次数为 $(1+2+\cdots+M)N_{\max}$ ；而本文提出的方法仅需 $M \cdot N_{\max}$ 次计算，从而大幅降低计算的复杂性。将上述结果代入式（4）计算东、北和高度方向的定位误差。结果见表2。

表2 不同方法的定位准确度

方法类型	东方向错误/m	北取向错误/m	海拔方向错误/m
文献[8]	0.346	0.417	0.894
在本文中	0.031	0.026	0.143

根据表2，本文提出的方法在东向和北向的定位误差低于0.04 m，在高度方向的定位误差小于0.15 m，显著优于文献[6]。可以看出，本文提出的方法具有更高的定位准确度。

2. 不同信噪比下的实验结果

为进一步验证所提出方法在不同信噪比下的适用性，将信噪比设置为60 dB和30 dB，信号残差比阈值设置为104。具体实验参数设置见表3。

表3 实验参数设置

错误类型	振幅	延迟时间	延迟相位
直接的信号	1	0	0
第一个路径	0.6	0.2	$4\pi/3$
第二条道路	0.45	0.35	$\pi/3$
第三条道路	0.3	0.56	π

根据表1中的实验参数，分别在60 dB和30 dB的信噪比下进行了实验。结果见表4和表5，定位误差见表6。

表4 信噪比60 dB下的参数估计误差

错误类型	振幅误差	延迟时间错误/(芯片)	延迟相位误差(°)
直接的信号	0.004 25	0	0.001 33
第一个路径	0.003 74	0	0.013 24
第二条道路	0.000 50	0	0.010 43
第三条道路	0.001 09	0	0.003 31

(下转第123页)

护提供基础数据支持。

(4) 数字化流程管理

对工器具出入库状态、出库时间和入库时间等工器具使用记录信息进行管理，工器具关联物联网远程监控信息，可查看任务借出具体工器具。

(5) 数字化信息维护

对工器具检修日期、是否过期、临时天数和使用状态等信息进行维护。当有临期或破损的工器具时，系统会提示工作人员及时更换对应的工器具。

(6) 物联网远程监控

用于查看检修工人携带工器具使用情况、实时位置等信息，并反馈具体使用情况信息给工作人员。

结束语

本文研究出电力安全工器具高射频感知集中监控方法，并开发电力安全工器具集中监控系统，本方法为电力安全工器具运行维护的提供报警机制，使工作人员能及时收到相关工器具的运行维护信

息，以确保电力安全工器具的正常使用。本办法为电力安全工器具集中监控管理实现流程化控制提供有效的技术手段，具有广泛的应用前景。未来将进一步深入研究，以提高电力安全工器具管理和全状态监控，管理和使用流程全自动化记录，推动数字化应用于生产实际紧密结合，并探索其在其他领域的应用，为信息化建设做出更大的贡献。EA

(收稿日期：2024-10-12)

参考文献

- [1] 唐峥. 某电力系统安全工器具智能管理系统设计与实现[D]. 成都：电子科技大学，2019.
- [2] 负鹏，卫迎波，李晋峰，等. 基于新型物联网模式下的集控性安全工器具远程监控管理技术研究[J]. 2021(21): 53-54.
- [3] 李文亮，王明，吕田浩，等. 超、特高压带电作业工器具智能监控系统的研究[J]. 电工技术，2023(8): 152-154.

(上接第48页)

表5 信噪比30 dB下的参数估计误差

错误类型	振幅误差	延迟时间 错误/(芯片)	延迟相位 误差(°)
直接的信号	0.027 97	0.005	0.016 82
第一个路径	0.027 21	0.005	0.021 24
第二条道路	0.025 64	0.01	0.003 09
第三条道路	0.020 10	0.01	0.069 50

表6 不同信噪比下的定位误差

信噪比/dB	东方向错误/m	北取向错误/m	海拔方向错误/m
60	0.081	0.102	0.231
30	0.156	0.174	0.483

根据表4，本文提出的方法在60 dB的信噪比条件下，能够准确地估计出直接信号及两条多路径信号的各项参数。具体而言，延迟时间的估计误差为零，而信号幅度和延迟相位的估计误差则维持在一个较小的范围内。表5显示，本文提出的方法在30 dB的信噪比条件下，依然能够实现相对准确的参数估计。然而，与60 dB信噪比环境相比，估计准确度会有所下降，这表明信噪比对信号参数的准确估计存在一定的影响。从表6可以看出，在30 dB和60 dB的信噪比下，本文提出的方法在东向和北向的定位误差小于0.2 m，高度方向的定位误差小于0.5 m，能够满足实际应用中智能接地线的要求。

结束语

为保障电力工作人员在停电检修和电网工程建设期间的个人安全，必须采取一系列有效的安全措施，本文对接地电阻测量、4G/5G传输和GPS/BDS定位等进行了改进和创新。在GPS/BDS精准定位中，通过引入TK算子的优化，MEDLL算法的整体性能得到显著提升。EA

(收稿日期：2024-12-15)

参考文献

- [1] ZHANG Xuebing, QIN Yuxiang, LI Yaoyao. A GPR 2D Teager-Kaiser energy operator based on the multivariate variational mode decomposition[J]. Remote Sensing Letters, 2023(1): 30-38.
- [2] 尹国明，陈克绪，高云鹏，等. Teager-Kaiser能量算子Blackman-Harris窗三谱线插值的电压闪变参数检测[J]. 电测与仪表，2019(4): 8-14.
- [3] 刘立红，冷文，王安国. 基于改进Teager-Kaiser算子的来波时间估计[J]. 电子测量技术，2014(10): 50-54, 58.