第 52 卷 第 7 期：3315-3326 高电压技术 Vol.52, No.7: 3315-3326
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251612

基于高斯核函数非线性相关估计的传输线故障定位方法

胡 蓓，卫 卓，郭子君，唐 鹏，郭建良，肖梁乐
（中国电力科学研究院有限公司，武汉 430074）

摘 要：线路损耗引起的故障暂态行波信号的高频衰减，导致行波时差法和基于暂态信号线性相关的故障定位方法分辨率和可靠性显著降低。针对该问题，提出一种基于高斯核函数非线性相关估计的故障定位方法。该方法将暂态信号映射至高维希尔伯特空间，利用核函数非线性相关原理放大数据波形中的谐振信息差异。通过调节可控的缩放尺度参数，实现分辨率的增强效果。仿真表明：在埋地电缆、长距离架空线的高损耗传输介质中以及高阻故障下均能保持高分辨率和强鲁棒性，有效克服了线性判据的定位失效和旁瓣干扰问题。10 kV 配电网的实测数据验证了该方法的有效性，定位相对误差仅为 0.85%，距离分辨率达 60 m，相比线性相关法(310 m)提升了近 5 倍。
关键词：故障定位；瞬态信号相关性；核函数；有损传输线；距离分辨率

Fault Location Method for Transmission Lines Based on Nonlinear Correlation Estimation Using Gaussian Kernel Function

HU Bei, WEI Zhuo, GUO Zijun, TANG Peng, GUO Jianliang, XIAO Liangle
(China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: The high-frequency attenuation of the fault transient traveling wave signal caused by line loss significantly reduces the resolution and reliability of the traveling wave time difference method and the fault location method based on the linear correlation of transient signals. To address this issue, this paper proposes a fault location method based on nonlinear correlation estimation using a Gaussian kernel function. The method maps transient fault signals into a high-dimensional Hilbert space, where the kernel correlation principle is employed to amplify the subtle differences in resonant waveform features. By tuning a controllable scale parameter, the proposed method achieves enhanced spatial resolution. Simulation results demonstrate that, in lossy transmission media, such as underground cables and long-distance overhead lines, and under high-resistance fault conditions, the method maintains high resolution and strong robustness, effectively mitigating the resolution degradation and sidelobe interference observed in linear criteria. Field tests on a 10 kV distribution network further validate the approach, achieving a relative location error of only 0.85% and a spatial resolution of 60 m which is approximately five times higher than that of the conventional linear correlation method (310 m).
Key words: fault location; transient signal correlation; kernel function; lossy transmission line; spatial resolution

0 引言

准确、快速的故障定位是保障现代输配电系统安全、可靠运行的关键技术要求。随着可再生能源、分布式电源以及柔性交直流输电技术的广泛应用，现代电网的拓扑结构日益复杂，这给故障检测与定位带来了更为严峻的挑战[1-2]。尤其是在复杂拓扑结构下的城市配电网和风电、光伏等应用场景下的电网系统中，准确可靠地定位故障是一项难度较大的研究课题[3-4]。

行波法是目前应用最广泛的故障定位技术之一[5-7]。该方法依据测量端口数量可分为多端法和单端法，其基本原理是通过测量故障诱发行波的波前到达时差来估算故障距离。然而，当故障距离超过数十公里时，行波的高频分量会受到严重衰减，导致波前上升沿变缓，从而增加了波前到达时刻检测的不确定性。此外，在含有多分支或架空-电缆混合

基金资助项目：中国电力科学研究院有限公司研究开发项目(SZ83-24-002)。
Project supported by Research and Development Project of China Electric Power Research Institute (SZ83-24-002).

线路的配电传输线网络中，基于固定波速的行波法存在引入显著定位错误的风险。

为应对上述挑战，基于暂态全波形分析方法(transient based method，TBM)近年来被提出并广泛应用于传输线故障定位研究中。这些技术包括电磁时间反演(electromagnetic time reversal，EMTR)[8-10]、波形相似度[11-12]以及暂态信号相关性分析[13]等方法。文献[14]提出了基于波形时频联合分析的故障信号全波形相关性分析方法，用于行波的故障保护和定位，文献[15]针对行波的全波形主频分量识别和传播速度计算问题，利用广义 Morse 小波变换和时频分析，实现单端行波定位。在此研究基础上，文献[16]引入了卷积神经网络的方式，基于全景故障特征数据挖掘的方式，尝试进行单端行波定位。

由于暂态全波形分析的方法不依赖于对于行波波头的辨识和提取，它是基于对暂态信号的时域和频域特征进行全局分析，不仅仅依赖于行波波头时差，而更关注于后续回波和线路拓扑引发的波形变化，因此对于波形畸变、波头提取困难和同步误差引起的定位误差具有较好的应用效果。以上几种方法，无论是 EMTR、波形相似度还是信号相关性分析方法，都需要将实测信号与仿真数据库中的预仿真数据进行匹配分析。相比于传统行波方法，它们具备的关键优势在于：可应用于多分支复杂拓扑结构传输线网络，可进行单端定位，适用于频变传输线建模和缆(埋地电缆)-线(架空线)混合线路。

然而，现有的暂态全波形分析方法核心内涵在于定量比较故障暂态电压或电流对于在不同故障位置下的线性相关程度。文献[17]的研究表明，简单地增加测量系统带宽与采样频率无法直接增加定位分辨率及精度。除此之外，在实际的电力系统工程应用场景下，由于电容效应、参数谐振、杂散参数、模态耦合等因素的影响，信号的能量峰值频率与故障位置不相关，从而掩盖了真正与线长相关的故障频率。另外，由于暂态行波信号在介质中传播时损耗衰减的影响，导致相关系数曲线的距离分辨率在长距离故障及高损耗系数场景下迅速下降，且目前缺乏有效的分辨率提升方法。

为解决上述问题，本文提出了一种基于核函数相关性的传输线故障定位距离分辨增强方法。该方法将每个故障距离对应下暂态信号作为数据向量，通过非线性核函数变换映射至高维希尔伯特空间，采用高斯径向基函数作为相关性分析中的核函数，用来放大在原始线性空间中数据向量之间的微小差异，并通过缩放尺度参数来平衡定位分辨率与可靠性，实现不同应用场景下的分辨率调整。

本文首先详细推导了核函数相关性方法(kernel correlation method，KCM)的物联机理和数学内涵，在此基础上从解析的角度分析了其空间分辨特性，揭示了通过调整高斯径向基函数的尺度参数可以灵活控制核函数的距离分辨率，基于这一特性，为解决高损耗、长故障距离下的故障定位距离分辨增强提供了理论依据。

1 基于核函数相关性的传输线故障定位原理

1.1 基于高维空间映射原理的核函数相关性分析

核函数在模式识别中应用较为广泛，尤其在低维空间中线性数据的分类和回归的问题研究中[18-19]。针对在低维空间难以线性分隔的 2 组数据向量 $\boldsymbol{X}$、$\boldsymbol{Y}$，通过非线性映射 ϕ，将这些数据从低维空间映射到高维空间，往往能够使其变得线性可分，从而有效地放大了数据之间的差异[20-22]。这样，原本在低维空间中线性不可分或关系复杂的问题便可在高维空间中被线性区分，如图 1 所示。

基于核函数的相关性是通过计算 2 组数据向量的核函数相关系数来衡量。对于 1 个真实故障数据 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$ 与 1 个仿真数据 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})$，二者的线性相关系数定义为：

$$\rho(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})=\frac{\left\langle \boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\rangle}{\sqrt{\left\langle \boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})\right\rangle}\sqrt{\left\langle \boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\rangle}} \tag{1}$$

式中：x_{f}为真实故障位置；x_{i}为仿真故障位置；$\langle\cdot\rangle$为内积算子。相对应地，投射在高维特征空间中的相关系数，即核函数相关系数定义为：

$$\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})=\frac{\left\langle \boldsymbol{V}'_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}'_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\rangle}{\sqrt{\left\langle \boldsymbol{V}'_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}'_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})\right\rangle}\sqrt{\left\langle \boldsymbol{V}'_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}'_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\rangle}}=\frac{K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}}))}{\sqrt{K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}))}\sqrt{K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}}))}} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{V}'_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$为真实故障数据经过非线性映射 ϕ 后的高维数据向量；$\boldsymbol{V}'_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{i}})$为仿真数据经过非线性映射 ϕ 后的高维数据向量；$K(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$为向量 $\boldsymbol{x}$ 与 $\boldsymbol{y}$ 的核函数值；$K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}))\geq 0$，并且 $K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}}))=K(\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}}),\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}}))$，满足非负性与对称性。常见的核函数及其表达式如表 1 所示。

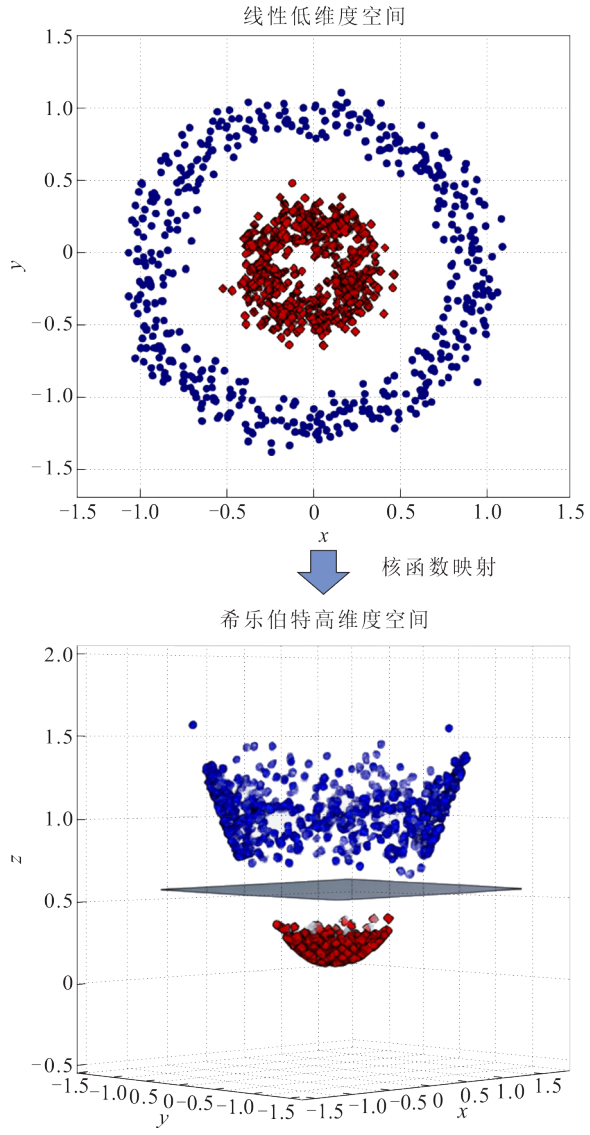


图 1　数据从线性低维空间映射到希尔伯特高维空间示意图

Fig.1　Schematic diagram of data mapping from a linear low-dimensional space to a high-dimensional Hilbert space

表 1　常见核函数及其表达式

Table 1　Common kernel functions and mathematical expressions

核函数名称	表达式
线性核函数	$K(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}$
多项式核函数	$K(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}+r)^{d}$
高斯核函数(RBF)	$K(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})=\exp(-\lVert\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\rVert^{2}/\gamma)$

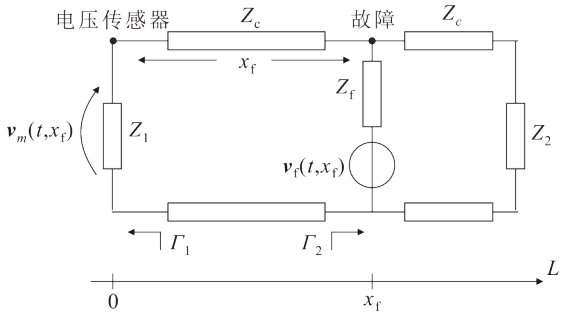
表 1 中，$\boldsymbol{x}$、$\boldsymbol{y}$ 分别为真实故障数据与仿真故障数据向量，r、d 为多项式核函数的 2 个缩放因子，$\lVert\boldsymbol{x}-\boldsymbol{y}\rVert^{2}$ 为 $\boldsymbol{x}$ 与 $\boldsymbol{y}$ 的欧氏距离(Euclidean distance)平方，γ 为高斯核函数的缩放因子。

线性核函数本质上等同于传统意义上的线性相关方法。高阶多项式核函数对数据可能表现出过强的灵活性，也许会导致过度拟合，对数据泛化能力差；多项式核函数在面对噪声干扰时特别是高阶项容易放大输入中的微小扰动，导致其对高噪声数据鲁棒性差。高斯核函数函数值随着距离平方的增大呈指数式快速衰减，使其只关注故障点邻近的范围而忽略较远点，即距离分辨率高；且其可以通过调节 γ 这个缩放因子控制较远点相关性的衰减速度，具体在 2.2 节中展开讨论。因此，本文选用高斯核函数，提出一种新的故障定位判据。

除此以外，核函数和传统线性相关判据都是通过预仿真的方式提前建立暂态故障的数据库。当故障发生时，将实测数据与预仿真数据进行查表和判据系数的计算得出预测位置，并不会额外地增大计算量。核函数相关性方法的一个主要优势是它允许直接通过核函数 $K(\cdot)$ 得到高维特征空间中的内积，而无须显式地计算映射函数，这避免了与显式高维变换相关的计算负担。

1.2　基于核函数相关性估计的定位判据

输电线路接地故障简化模型如图 2 所示。线路特征阻抗为 Z_{c}，首末端等效边界阻抗分别为 Z_1、Z_2。在距离线路左侧电压传感器距离为 x_{f} 处发生接地故障，故障阻抗为 Z_{f}，产生故障电压行波 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{f}}(t,x_{\mathrm{f}})$，该行波从故障点处向线路两端传播，并经过多次折反射，在线路首端传感器测得故障瞬态行波信号为 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{m}}(t,x_{\mathrm{f}})$。



Γ_1、Γ_2—线路前部、后部的反射系数

图 2　传输线发生接地故障电路示意图

Fig.2　Schematic diagram of the circuit with grounding fault in the transmission line

根据线路拓扑以及相关参数，在仿真软件中搭建此输电线路故障模型，将线路按照距离剖分为 N 段，设置 N+1 个仿真故障位置 x_{i}，根据故障类型进行相应仿真，记录仿真模拟故障信号 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{r}}(t,x_{\mathrm{i}})$。

当故障发生后，通过传感器测量并记录 1 组真

实故障信号 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{m}}(t)$。考虑到传输线参数随频率变化，行波在边界处和故障处的多次反射会形成多阶谐振频率，本文采用频域中的故障信号计算相关系数。将真实故障信号 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{m}}(t,x_{\mathrm{f}})$ 与仿真故障信号 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{r}}(t,x_{\mathrm{i}})$ 进行傅里叶变换，得到频域内的故障数据分别为 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$、$\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})$。对 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$ 进行频谱分析，根据其固有谐振频率，得到固有频率 f_{k} 与故障位置的关系为：

$$f_{\mathrm{k}}=\frac{v}{4\pi x_{\mathrm{f}}}(\pi+2k\pi) \tag{3}$$

式中：v 为行波在线路中的传播速度。式(3)可以确定在计算相关系数时所要选取的频率范围 $[f_{\mathrm{L}},f_{\mathrm{H}}]$。在此频率范围内，$\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$ 与 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})$ 二者的高斯核函数相关系数 $\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})$ 为：

$$\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})=\exp\left(-\frac{\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2}{\gamma}\right) \tag{4}$$

将各处 x_{i} 对应的仿真故障数据 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})$ 均与 $\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})$ 计算高斯核函数相关系数后，做出 $\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})$ 关于 x_{i} 的曲线，称为高斯核函数相关系数曲线。则 $\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})$ 取得极大值时，对应的仿真位置 $\hat{x}_{\mathrm{f}}$ 即为故障位置，表示为：

$$\hat{x}_{\mathrm{f}}=\arg\max_{x_{\mathrm{i}}}\left(\rho_{\mathrm{k}}(x_{\mathrm{f}},x_{\mathrm{i}})\right) \tag{5}$$

完整流程如图 3 所示。

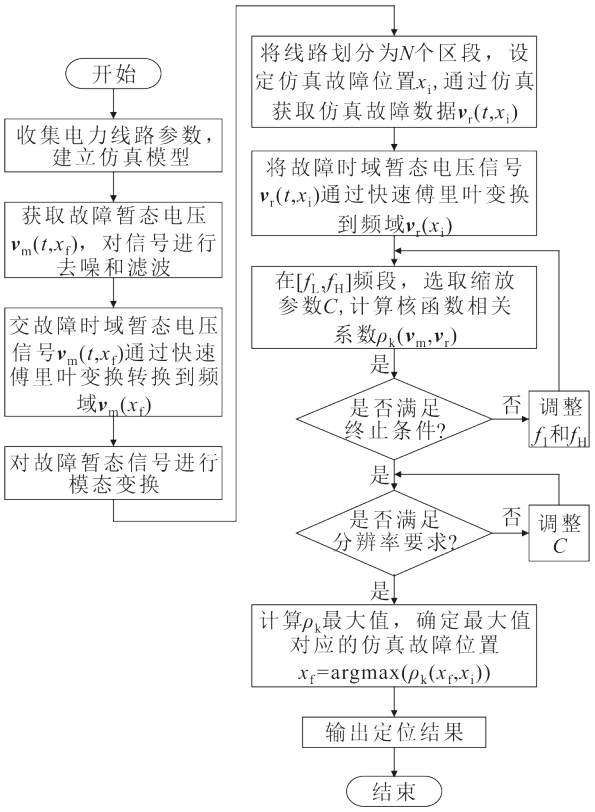


图 3 基于核函数相关性的故障定位方法流程图

Fig.3 Flowchart of fault location method based on kernel correlation

2 基于核函数相关性的超分辨率特性讨论

本章主要讨论基于高斯核函数相关性的传输线故障定位方法对比于基于线性相关性的方法、其定位结果在距离分辨率的优势以及高斯核函数相关系数中缩放因子 γ 对其超分辨率特性的影响，并分析 γ 的选取原则。

2.1 核函数相关性定位方法的超分辨率特性

根据文献[23-24]，距离分辨率被定义为：相关系数为 0.5 倍峰值时对应的距离带宽 D_{c}。对于线性相关系数的定义式(1)，根据文献[17，23]的讨论，可得其距离分辨率 $D_{\mathrm{c}}^{\mathrm{linear}}$ 的表达式为：

$$D_{\mathrm{c}}^{\mathrm{linear}}=\frac{2x_{\mathrm{f}}}{f_{\mathrm{m}}\tau} \tag{6}$$

式中：f_{m} 为故障距离为 x_{f} 时的 m 阶线路谐振频率；τ 为谐振衰减时间常数，表示为：

$$\tau=\frac{2x_{\mathrm{f}}/v}{2\alpha x_{\mathrm{f}}-\ln\Gamma} \tag{7}$$

式中：α 为线路单位长度衰减常数；$\Gamma=\left|\Gamma_1\Gamma_2\right|$。

根据式(6)、(7)，基于线性相关性的定位方法距离分辨率与谐振频率 f_{m}、传播损耗 $2\alpha x_{\mathrm{f}}$ 以及反射损耗 $-\ln\Gamma$ 相关。因此当故障距离增大、线路损耗较高以及反射损耗增大时，均会导致 $D_{\mathrm{c}}^{\mathrm{linear}}$ 增大，从而导致定位结果距离分辨率下降。

由式(4)可知，高斯核函数相关系数利用指数衰减函数来实现对空间中相靠近向量的差异放大，对较远距离处(线性相关系数小)的向量相关系数的抑制实现了所谓的距离超分辨率的效果，即定位分辨率超过了信号最小波长能够达到的距离分辨能力。即当 $\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2$ 较小时，提高欧式距离的变化率 $\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2/(x_{\mathrm{f}}-x_{\mathrm{i}})$，相关系数随距离迅速下降；当 $\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2$ 较大时，抑制了非故障位置处谐振耦合引起的相关系数旁瓣干扰。

2.2 缩放因子的影响以及选取原则

将 RBF 相关系数对 $\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2$ 求导可得：

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{k}}}{\partial\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2}=-\frac{1}{\gamma}\exp\left(-\frac{\left\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\right\|^2}{\gamma}\right) \tag{8}$$

更小的 γ 会增大 ρ_{k} 的变化速率，表现为曲线随

距离变化更陡峭，对不同故障信号的相关性计算更为敏感，从而放大数据间的差异，实现距离分辨率远超信号波长的超分辨效果。

$\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\|^2$ 的具体数值随故障位置和不同故障事件有所差异，不同线路的线损也不尽相同，缩放系数 γ 不应取固定值，而是基于 $\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\|^2$ 的量值来动态调整。本文引入相对缩放系数 C 来实现对 γ 的调节，表达式为：

$$\gamma = Cf_{\mathrm{mean}}\left(\|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\|^2\right) \tag{9}$$

式中：f_{mean} 为平均值函数。

为了验证分析式(9)中 γ 对定位分辨率的影响，在 PSCAD-v5 仿真环境中搭建传输线电路模型——电压等级为 220 kV、长度为 490 km 的三相架空输电线路，电压传感器位于线路首端。仿真模拟距离线路首端 x_{f}=67 km 处发生单相接地故障，接地电阻为 20 Ω，土壤电导率为 10 mS/m。在 MATLAB 环境中完成数据处理与 RBF 定位的频域计算，对比了线性相关系数和 RBF 相关系数的定位结果，如图 4 所示。

在上述线路与故障参数配置下，1 阶谐振固有频率约为 3.2 kHz，固有频率间隔 Δf≈2.2 kHz，主要谐振分量集中在 1~10 kHz 频段。设置频带分别为[10 Hz，500 kHz]，[50 kHz，200 kHz]，[200 kHz，500 kHz]。在所研究的线路范围内，采用[10 Hz，500 kHz]的宽频带，线性相关系数几乎均等于 1，无法实现对线路故障的有效定位。滤除[10 Hz，50 kHz]频带的分量，采用[50 kHz，200 kHz]的低频窄带时定位结果的距离分辨率有所改善，曲线半高宽为 800 m(对应定位分辨率)；在采用[200 kHz，500 kHz]的高频窄带时，虽然分辨率可以达到 200 m，但是会出现极值大于 0.6 的旁瓣干扰，这有可能会导致故障位置的误判。这与 2.1 节所讨论的内容相符，在有损传输线中，当故障位置距离线路首端较远时，基于线性相关性的定位方法分辨率会恶化，且对频率表现出较强的敏感性。当所用故障信号包含对故障距离不敏感的低频分量时，存在定位失效的风险。

当采用高斯核函数相关性判据时，将 C 调整为 0.1，采用[10 Hz，500 kHz]的宽频带即可实现距离分辨率为 300 m 的有效定位，对比 C=1 时 1 400 m 的分辨率提升了近 5 倍；同时，在不同频带下，实现了对旁瓣干扰的抑制。

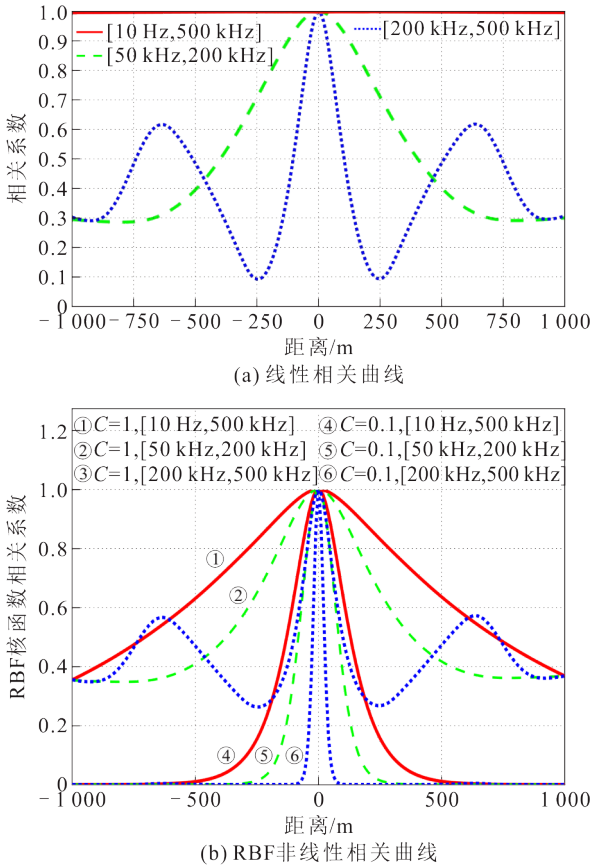


图 4　不同频带中，线性相关系数与不同 C 取值下 RBF 相关系数曲线对比

Fig.4　Comparison of linear correlation coefficients and RBF correlation coefficient curves under different C values across various frequency bands

根据图 4 的结果，结合式(4)、(9)可知，C 越小，意味着 γ 越小，则在非故障位置处，对 ρ_{k} 的衰减加速程度更高，对应定位分辨率越高。但是 γ 和 C 不能无限的小，应有下限值。如果定义测量信号与仿真信号之间的欧式距离平方 D 为：

$$D = \|\boldsymbol{V}_{\mathrm{m}}(x_{\mathrm{f}})-\boldsymbol{V}_{\mathrm{r}}(x_{\mathrm{i}})\|^2 \tag{10}$$

若 α 为线路单位长度衰减常数，为保证在故障位置处的峰值应有足够的信噪比，那么应满足计算式为：

$$\mathrm{e}^{-D/\gamma} \geq 1-\alpha \tag{11}$$

对式(11)进行整理，进而可以得出 $\gamma \geq D/\alpha$，即 D/α 是 γ 取值的下限值；当 γ 低于 D/α 时，会存在 ρ_{k} 的峰值远小于 1 而无法确定故障位置。

当改变所选频带时，采用[50 kHz，200 kHz]的低频窄带得到的定位分辨率约为 200 m，而采用[200 kHz，500 kHz]的高频窄带时分辨率可提升至约

100 m。与宽频带结果相比，分别提升了约 1.5 倍和 3 倍。不同于对频率选择高度敏感的线性相关性方法，基于核函数的相关性方法在不同频带下的定位性能差异较小。通过调整核函数的尺度参数，可有效利用各频段中包含的故障信息。

仿真结果表明，基于 RBF 核函数相关性的故障定位方法相较于传统线性相关方法具有两方面优势：1）能大幅提升有损传输线中远距离故障的定位分辨率，规避定位失效的风险，同时抑制不同谐振频率干涉导致的旁瓣耦合；2）对于不同的计算频带具有较强的鲁棒性，即使在包含低频分量或者非谐振频率分量的条件下，也可以实现相关曲线分辨的优化调整。

3 仿真算例分析

本章利用数值仿真分析了有损输电线路中埋地电缆、长距离架空线路故障以及故障阻抗对定位结果的影响，验证基于 RBF 核函数相关性的故障定位方法在上述情况下的高分辨率性能。

3.1 埋地电缆

同轴结构的埋地电缆具有较大的损耗系数，使高频行波信号在传播的过程中迅速衰减，导致线性判据条件下相关系数曲线非常平坦，距离分辨率下降严重[17]。为此，本文考虑 1 条长为 5 km 的 10 kV 同轴电缆模型，电缆参数见表 2。单相接地故障分别设置在 500 m、1 750 m 和 4 270 m 处，频带采用[0.5 kHz，500 kHz]的宽频带与[0.5 kHz，10 kHz]、[10 kHz，200 kHz]、[200 kHz，500 kHz]的窄频带，分析比较不同故障位置处线性方法(如图 5(a)、(c)、(e)所示)与核函数方法(如图 5(b)、(d)、(f)所示)的定位性能。

表 2 埋地同轴电缆参数

Table 2 Configuration parameters of underground coaxial cable

参数	数值
内导体直径/mm	12.5
绝缘层厚度/mm	4.5
内半导体层厚度/mm	1
金属屏蔽层厚度/mm	0.2
XLPE 外护套厚度/mm	1.8
中心导体电阻率/(Ω·m)	1.724×10^{-8}
XLPE 电阻率/(Ω·m)	10^{15}
外护套电阻率/(Ω·m)	2.84×10^{-8}
绝缘材料相对介电常数 ε_r	2.3

仿真结果表明，在强损耗的电缆介质中，基于线性相关性的定位分辨率随故障距离的增加呈现明显下降趋势。这由信号能量的频域分布不均及各频段信号对故障距离的敏感度不同导致：根据故障激励源的频谱特性和电缆的高损耗特性，绝大部分信号能量集中在 10 kHz 以下的低频段，而该频段的故障信号对距离变化不敏感，数百米的故障位置变化仅会产生极其微小的相位或幅度改变。

采用[0.5 kHz，500 kHz]的宽频带计算相关系数时，上述主导性的低频分量会削弱对故障距离敏感的高频分量的影响，导致所研究的故障距离范围内相关系数均呈现较大值，且曲线非常平坦，如图 5(a)、(c)、(e)实线与点画线所示，距离分辨率极低。而采用[200 kHz，500 kHz]的高频窄带虽然可以改善线性相关的距离分辨率，但会因实际故障暂态信号与非故障位置暂态信号间的不同模态谐振干涉的原因，在远离故障处会产生显著的伪峰，如图 5(a)、(c)、(e)点线所示。

相比于线性相关性的判据，基于 RBF 核函数相关性的方法拥有更好的鲁棒性。当 C=0.01 时，即使故障距离超过 4 km，该方法仍能维持 10~50 m 的距离分辨率，如图 5(b)、(d)、(f)⑤⑥⑦⑧号曲线所示。采用[0.5 kHz，500 kHz]的宽频带进行计算，在强损耗的条件下，该方法通过非线性放大信号微小差异，依然能够实现高距离分辨率的定位，且可以抑制相关系数旁瓣伪峰的影响。

基于 RBF 核函数相关性的方法无须依赖于滤除故障信号中与故障位置敏感性低的低频分量，而是在各个频带中均能充分利用故障信号特征，进行故障定位。且通过合理调整 RBF 的缩放因子 C，可以实现定位结果在距离分辨率与鲁棒性之间的平衡。

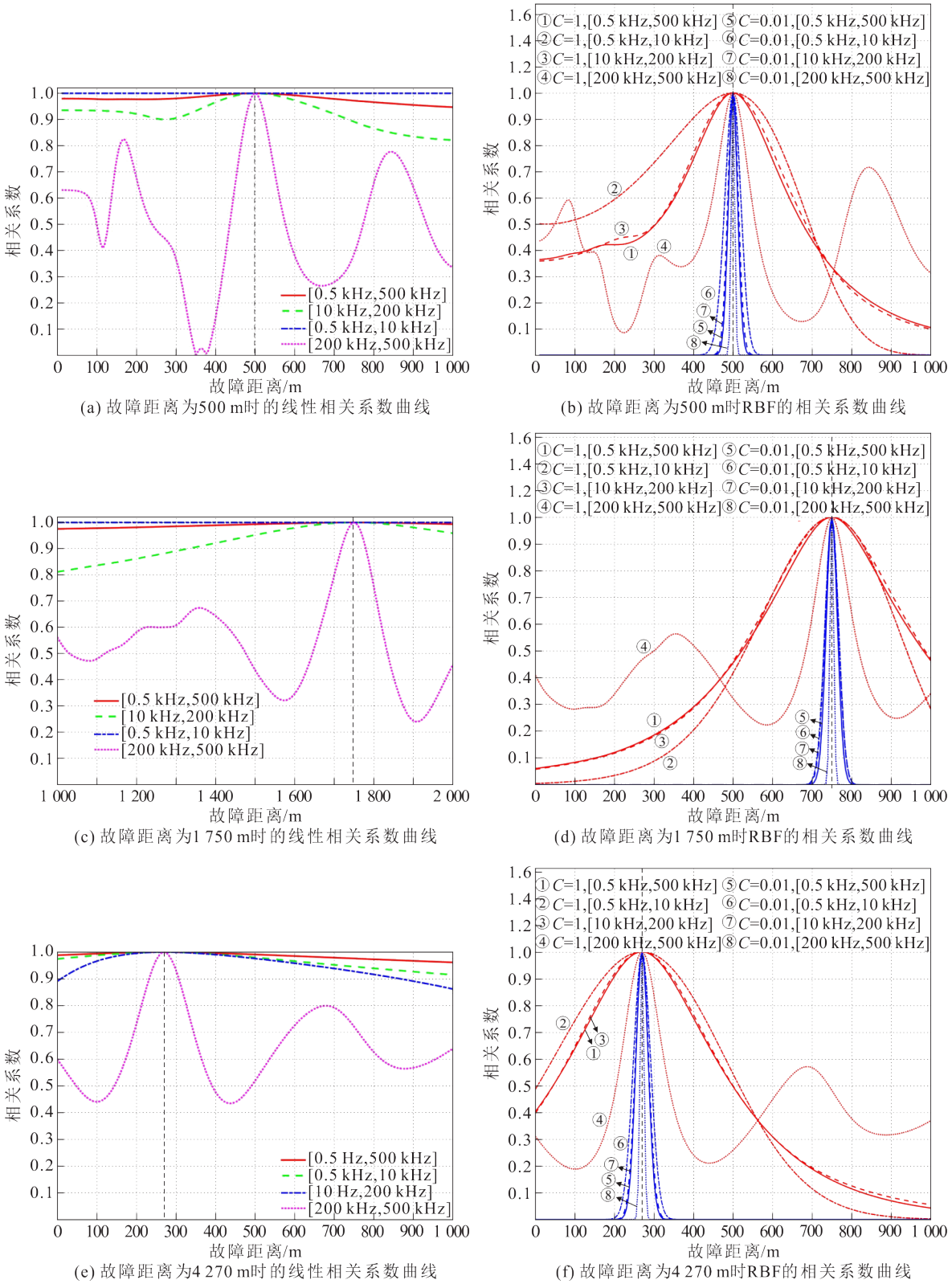
3.2 长距离架空输电线路

架空传输线受大地土壤的影响，故障行波在传播过程中亦受到损耗衰减的影响，其单位长度的衰减系数通常小于电缆。但由于我国输电线路的建设距离一般较长，在长距离故障条件下，信号的高频成分依然严重缺失。

考虑全长为 500 km 的高压直流架空输电线路，电压等级为 500 kV。将全线路按 1 km 间隔切分出 500 个假想故障位置，选取[10 Hz，500 kHz]与[10 kHz，200 kHz]这 2 种计算频带，对比线性相关系数与RBF 非线性相关系数(C取 0.1)在不同故障距离下的分辨率对比，用热图来显示相关系数数值。

横坐标为实际故障位置，纵坐标为估计故障位置，理想情况下，若估计位置与实际位置相符，系数最大值应出现在对角线处，定位结果如图 6 所示。图中颜色代表不同的系数值，对角线的红色区域狭窄，则表示该故障定位结果距离分辨率较高；若对角线区域较宽，表示分辨率较差。

在[10 Hz，500 kHz]宽频带条件下，高频分量损失严重或受噪声影响较大，导致出现图 6(a)中线



(a) 故障距离为500 m时的线性相关系数曲线

(b) 故障距离为500 m时RBF的相关系数曲线

(c) 故障距离为1 750 m时的线性相关系数曲线

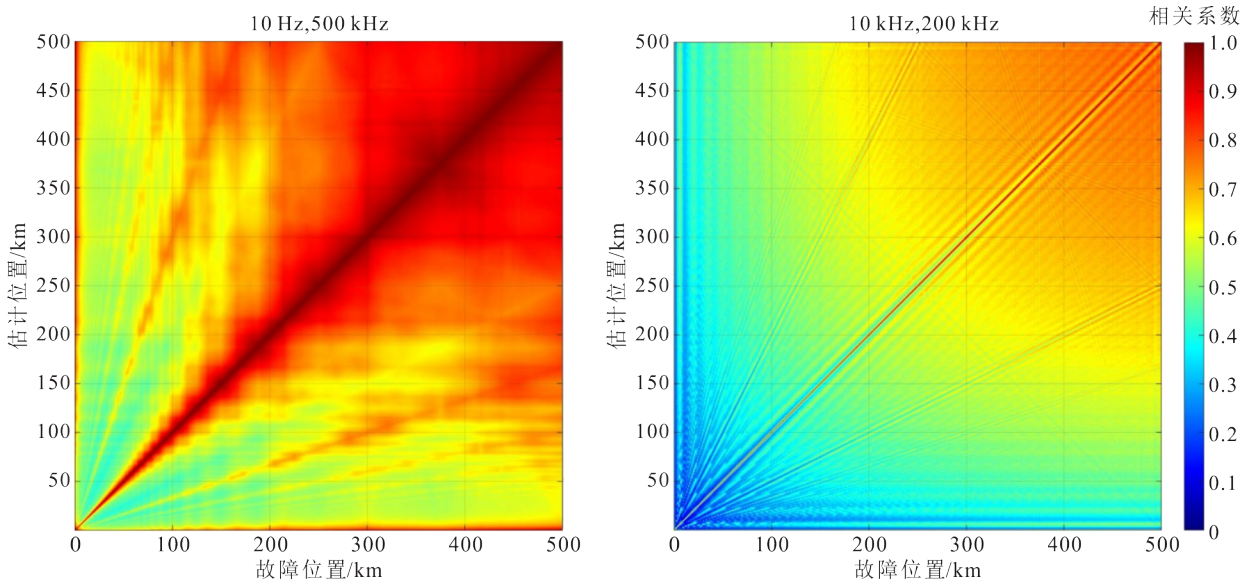
(d) 故障距离为1 750 m时RBF的相关系数曲线

(e) 故障距离为4 270 m时的线性相关系数曲线

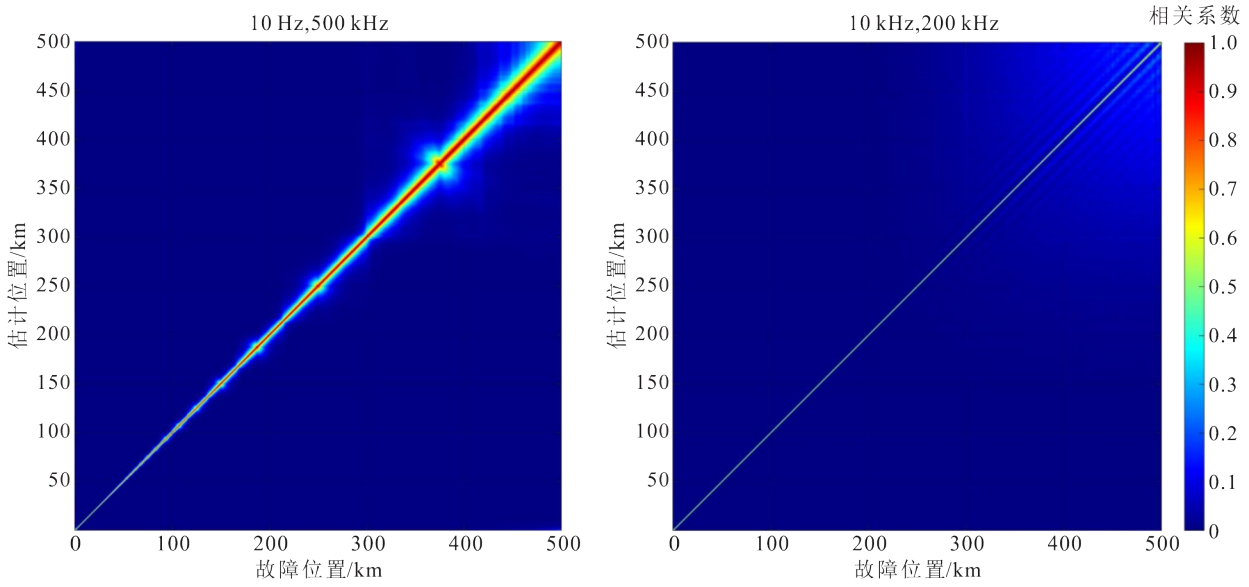
(f) 故障距离为4 270 m时RBF的相关系数曲线

图 5　埋地同轴电缆单相接地故障数据的线性与 RBF 核函数相关系数曲线

Fig.5　Linear and RBF kernel correlation coefficient curves for single-phase-to-ground fault in underground coaxial cable



(a) 采用线性判据的相关系数热图



(b) 采用RBF判据的相关系数热图

图 6 长距离架空输电线路中线性判据与 RBF 非线性判据的分辨率随故障距离的变化对比

Fig.6 Comparison of resolution between the linear criterion and the RBF nonlinear criterion in long-distance overhead power transmission lines with respect to the variation of fault distance

性相关系数三维图像对角线严重模糊的情况(大范围相关系数大于 0.7)，在故障距离为 200 km 及以上时各处相关系数几乎均大于 0.5，且图中几处极值较大的旁瓣也较为明显，难以实现故障的有效分辨。

而 RBF 核函数相关系数三维图像则表现出尖锐的对角线，当故障位置为 490 km 时，分辨率约为 20 km，且未出现明显的旁瓣干扰。

在[10 kHz，200 kHz]频带条件下，线性判据的效果有所优化，旁瓣的相关系数值有所降低；但当故障距离超过 300 km 时，线性相关系数在各个猜测位置处的值均大于 0.5，无法有效确定实际故障位置。而 RBF 相关系数此时的分辨率不受距离的影响，均维持在 1 km 以内。

在实际应用场景下，要根据测量信号的谐振频率成分和介质的衰减系数来综合决定缩放系数值。电缆中的损耗通常大于架空传输线，因此应选择较小的缩放系数 C，以保证足够的定位精度。不同的带宽选择对线性相关系数曲线影响很大，而如果缩放系数 C 足够小的情况下，在不同的带宽条件下，分辨率可以保持在一个较优秀的水平，也就是说，

即使包含了低频成分(10 kHz 及以下频率成分)，RBF 针对不同的计算频带具有较强鲁棒性，分辨率变化不大，这是 RBF 相比线性判据的优点之一。

因此，若想保持一个比较高的分辨率，在线性判据下，应该谨慎地尽量选取高频成分去计算相关系数，来得到一条比较尖锐的曲线，如图 5(a)、(c)、(e)中的点线；而在 RBF 判据下，只需要选取 1 个较小的缩放系数(同时大于下限值，$\gamma \geq D/\alpha$)，不需要额外地进行频带的筛选就可以获得相比线性判据更高的分辨率。

3.3　不同故障阻抗的影响

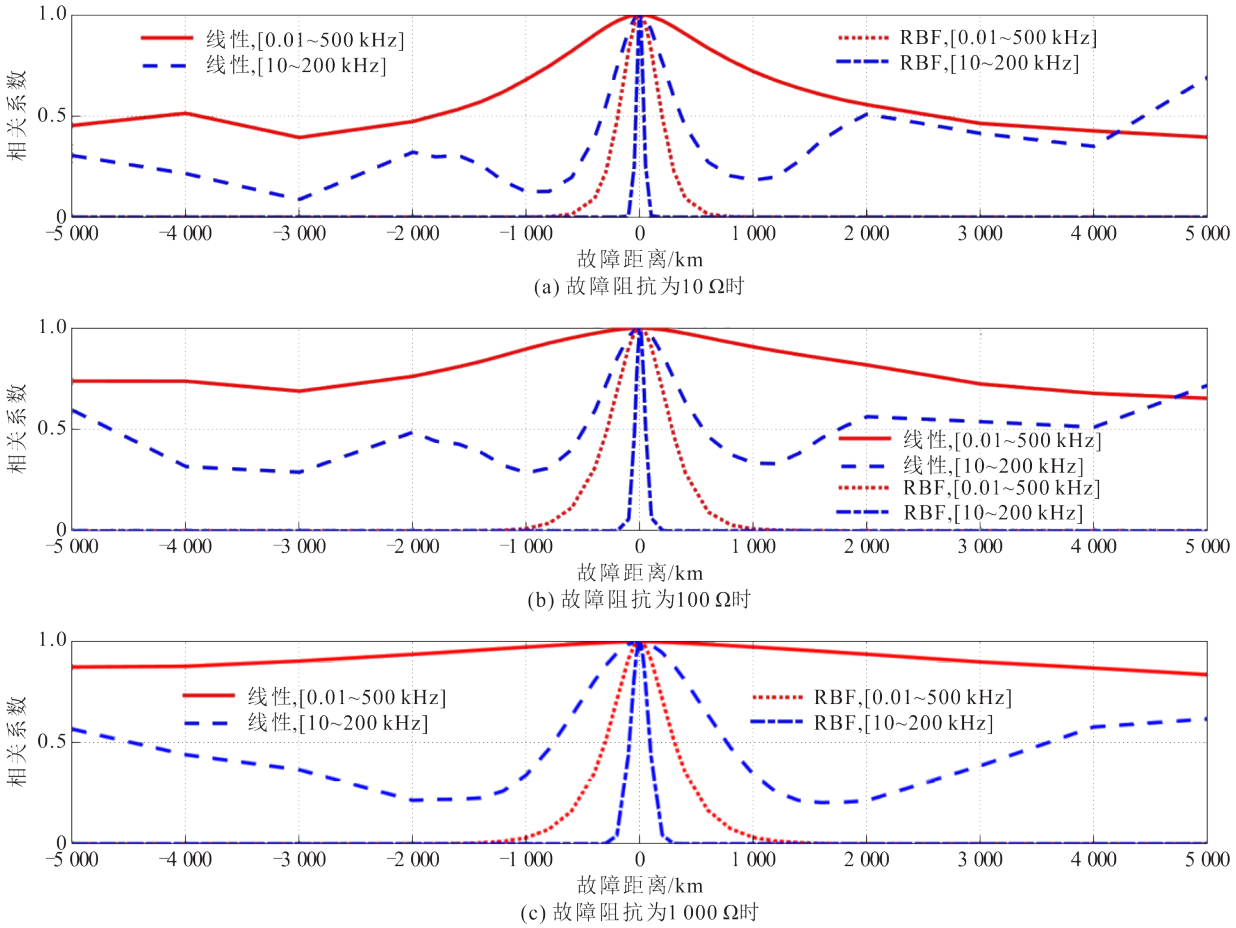
当线路发生短路或接地故障，故障行波信号会在故障点与线路末端(边界处)形成多次的谐振反射。根据文献[23]的研究结果，距离分辨率 D_c 的解析表达式为：

$$D_c = \lambda_m \frac{2\alpha L - \ln\left|\Gamma_1\Gamma_2\right|}{2\pi} \tag{12}$$

式中：λ_m 为 m 阶谐振频率对应的波长；L 为故障距离。由式(10)可知，除了沿线的传播损耗 $2\alpha L$ 以外，边界处的反射损耗 $-\ln\left|\Gamma_1\Gamma_2\right|$ 也是确定定位分辨率的决定因素之一。文献[25-26]研究表明，在高阻故障条件下，反射波突变特征不明显，导致行波法应用困难，同时波形与距离变量的相关性也会变差，影响定位效果。

本文研究了不同故障阻抗对基于核函数相关性的定位方法的影响，考虑架空输电线路全长为 50 km，模拟接地短路故障，故障位置为 6 km 处，故障阻抗分别为 10、100、1 000 Ω，采用不同的频带计算线性相关系数与 RBF 相关系数(C=0.1)，在故障位置附近±5 km 范围内的相关系数曲线如图 7 所示。

不同阻抗下的分辨率统计如表 3 所示。随着故障阻抗的增大，线性相关法的分辨率随故障阻抗和频带选择的影响明显。当故障阻抗≥100 Ω时，采用宽频带的线性相关法在故障点±5 km 范围内的相关系数均高于 0.6，导致其完全丧失了分辨能力。尽管在滤除低频分量后(采用[10 kHz，200 kHz]频带)，LCM 在 1 000 Ω时可获得 1 500 m 的分辨率，但其旁瓣水平过高(存在 0.6 的伪峰)，极易引发定位误判。相比之下，基于核函数相关性的方法



(a) 故障阻抗为10 Ω时

(b) 故障阻抗为100 Ω时

(c) 故障阻抗为1 000 Ω时

图 7　不同故障阻抗条件下线性与 RBF 核函数相关系数曲线

Fig.7　Linear and RBF kernel correlation coefficient curves under different fault impedance conditions

表 3 不同故障阻抗条件下定位结果的距离分辨率

Table 3 Spatial resolution of localization results under different fault impedance conditions

故障阻抗/Ω	频带	线性距离分辨率/m	RBF 距离分辨率/m
10	[1 kHz，500 kHz]	4 300	400
	[10 kHz，200 kHz]	700	80
100	[1 kHz，500 kHz]		650
	[10 kHz，200 kHz]	1 000	100
1 000	[1 kHz，500 kHz]		600
	[10 kHz，200 kHz]	1 500	180

(KCM)对高阻抗表现出强大的鲁棒性。在相同的高阻抗(如 1 000 Ω)和宽频带条件下，KCM 仍可实现不大于 600 m 的有效定位，且能显著抑制旁瓣干扰，避免了伪峰导致的旁瓣干扰现象。

结合图 2 可以看出，故障阻抗影响的是故障处的反射系数，进而影响引起信号反射损耗 $-\ln \Gamma_2$。当故障阻抗越小，损耗绝对值 $\left|-\ln \Gamma_2\right|$ 越小；反之，在高阻情况下，$\left|-\ln \Gamma_2\right|$ 会变大，进而影响定位的分辨率。在高阻条件下，应该将缩放系数 C 根据实际情况调小，来提高 RBF 的距离分辨率和定位精度。

4 针对真实配电线路故障数据的验证分析

为了验证本文所提出的基于核函数相关性的定位方法在真实输电线路中的故障定位效果，本文选取了实际 10 kV 交流配电线路为研究对象，通过行波电流采集传感器采集真实对地短路故障数据，完成定位算法的验证。线路主线全长 9 334.8 m，共计 166 个杆塔，拓扑结构如图 8 所示，包含 1 条主线和 4 条支线。故障类型为 B 相接地故障，位于 1 号支线距离支线首段 1 515 m 处的 15 号杆塔；传感器安装位置为距 1 号支线首端 2 525 m 处的 25 号杆塔处，设备采样频率为 20 MHz，录波时间为 1 ms。

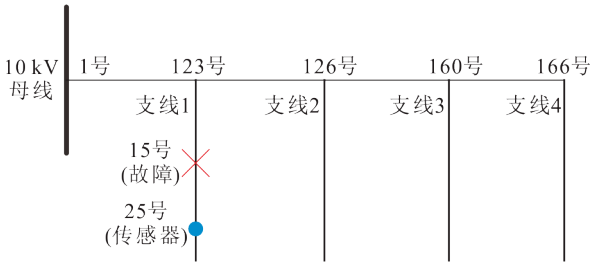


图 8 真实 10 kV 配电线路拓扑、故障位置及传感器位置示意图

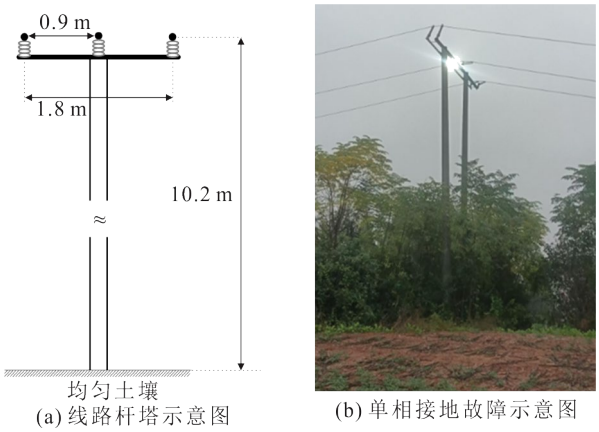
Fig.8 Schematic diagram of actual 10 kV distribution line topology, fault location and sensor placement

杆塔剖面结构图及现场故障引起的放电照片如图 9 所示。

根据图 9 在 PSCAD-v5 软件中搭建线路模型，信号处理及定位算法在 MATLAB 环境中完成，相关系数曲线如图 10 所示。为了与传统行波算法进行定位相关指标的对比，本文采用了行波理论当中广泛采用的自然谐振频率法[27-28]作为类比算法，谐振频率 f_k 表达式为：

$$f_k = \frac{v}{4\pi x_f}(\pi + 2k\pi) \tag{13}$$

将基于线性相关法、核函数相关法与自然谐振频率法的定位结果汇总于表 4 中。谐振频率法采用架空线路的常规波速 2.9×10^8 m / s 时，定位位置最小相对误差为 6.6%；而 2 种基于相关性的方法相对误差为 0.85%，误差提升近 12 倍。核函数相关性的方法在取 $C=1$ 时距离分辨率为 60 m，对比线性相关性方法的 310 m 分辨率有着 5 倍的提升，且可以消除相关系数曲线中 500 m 与 1 900 m 处的伪峰。



(a) 线路杆塔示意图 (b) 单相接地故障示意图

图 9 真实 10 kV 配电线路杆塔及单相接地故障示意图

Fig.9 Schematic diagram of actual 10 kV distribution line tower structure

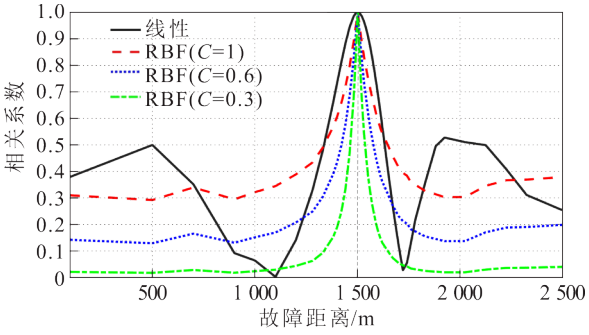


图 10 真实故障数据的线性与 RBF 核函数相关系数曲线

Fig.10 Linear and RBF kernel correlation coefficient curves for actual fault data

表 4　不同定位方法的定位结果

Table 4　Comparison of location results for different methods

定位方法	位置误差/m	相对误差/%	距离分辨率/m
线性相关性	13	0.85	310
核函数相关性 (C=0.1)	13	0.85	60
固有频率法 ($v=3\times10^8$ m/s)	103	8.4	
固有频率法 ($v=2.9\times10^8$ m/s)	67	6.6	
固有频率法 ($v=2.5\times10^8$ m/s)	198	9.6	

5　结论

针对有损输电线路中线性相关法定位分辨率严重下降的问题，本文提出了一种基于高斯核函数非线性相关估计的故障定位方法。通过对不同线路、故障距离及阻抗的仿真和实测数据研究，主要结论如下所述。

1）所提方法利用高斯核函数在高维空间放大信号差异，显著增强了强损耗条件下的距离分辨率，且可通过调整缩放参数灵活适应不同场景。

2）本文方法对不同频带和高故障阻抗具有强鲁棒性，在埋地电缆、长距离线路的低频及高阻条件下仍能获得理想的定位分辨率，并能有效抑制谐振干涉引起的旁瓣干扰。

3）基于 10 kV 配电线路的实测数据验证分析，本方法定位相对误差仅为 0.85%，较传统行波法提升近 12 倍；距离分辨率达 60 m，较线性相关法提升近 5 倍。可有效应用于有损条件下的输电线路及多分支配电网的故障定位场景中。

参考文献　References

[1] STEFANIDOU-VOZIKI P, SAPOUNTZOGLOU N, RAISON B, et al. A review of fault location and classification methods in distribution grids[J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 108031.

[2] 束洪春. 配网选线保护与故障定位[M]. 北京：科学出版社，2016.
SHU Hongchun. Distribution network line selection protection and fault location[M]. Beijing, China: Science Press, 2016.

[3] 詹惠瑜，刘科研，盛万兴，等. 有源配电网故障诊断与定位方法综述及展望[J]. 高电压技术，2023，49(2)：660-671.
ZHAN Huiyu, LIU Keyan, SHENG Wanxing, et al. Review and prospects of fault diagnosis and location method in active distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 660-671.

[4] 冯萧飞，苏盛，李彬，等. 低压配用电系统接地故障感知定位方法研究综述[J]. 中国电机工程学报，2026，46(5)：1868-1886.
FENG Xiaofei, SU Sheng, LI Bin, et al. Review of earth fault perception and location in low-voltage distribution and consumption systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 2026, 46(5): 1868-1886.

[5] 董新洲. 故障行波理论及其应用[M]. 北京：科学出版社，2022.
DONG Xinzhou. Fault traveling wave theory and its application[M]. Beijing, China: Science Press, 2022.

[6] 束洪春. 行波暂态量分析与故障测距[M]. 北京：科学出版社，2016.
SHU Hongchun. Traveling wave transient analysis and fault loca-tion[M]. Beijing, China: Science Press, 2016.

[7] WANG D, LIU J Z, HOU M Q. Novel travelling wave fault location approach for overhead transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109617.

[8] 和少寅，谢彦召，宋宇，等. 基于电磁时间反演传递函数相关性的传输线网络故障定位方法[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1851-1859.
HE Shaoyin, XIE Yanzhao, SONG Yu, et al. Fault location method in transmission line network based on transfer function correlation of electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1851-1859.

[9] HE S Y, XIE Y Z, WANG Z Y, et al. Norm criteria in the electromagnetic time reversal technique for fault location in transmission lines[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1240-1248.

[10] 杨庆，胡逸，崔浩楠，等. 固有频率与电磁时间反演结合的多分支配网故障定位方法[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1103-1113.
YANG Qing, HU Yi, CUI Haonan, et al. Fault location method for multi-terminal distribution network combined with natural frequency and electromagnetic time reversal[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1103-1113.

[11] WANG Z Y, RAZZAGHI R, PAOLONE M, et al. Electromagnetic time reversal similarity characteristics and its application to locating faults in power networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1735-1748.

[12] 聂德志，刘铠滢，蔡桂潮，等. 基于暂态电压波形相似度的输电线路单端故障定位方法[J]. 广东电力，2025，38(1)：63-72.
NIE Dezhi, LIU Kaiying, CAI Guichao, et al. Single-terminal fault location for transmission lines based on transient voltage waveform similarity[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(1): 63-72.

[13] HE S Y, COZZA A, XIE Y Z. Electromagnetic time reversal as a correlation estimator: improved metrics and design criteria for fault location in power grids[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(2): 598-611.

[14] 邓丰，曾祥君，李泽文，等. 故障行波全波形时-频特性分析[J]. 中国电机工程学报，2019，39(11)：3231-3242.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, LI Zewen, et al. Research on characteristics of traveling wave full-waveform in the time and frequency domains[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3231-3242.

[15] 邓丰，祖亚瑞，黄懿菲，等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2156-2167.
DENG Feng, ZU Yarui, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2156-2167.

[16] 邓丰，史鸿飞，冯思旭，等. CNN-LSTM 全景故障特征挖掘的配电网单端定位方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(增刊 1)：114-126.
DENG Feng, SHI Hongfei, FENG Sixu, et al. Single-ended traveling wave location method for distribution network based on CNN-LSTM panoramic fault feature mining[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(Supplement 1): 114-126.

[17] COZZA A, HE S Y, XIE Y Z. Impact of propagation losses on fault location accuracy in full transient-based methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 383-396.

[18] THEODORIDIS S, KOUTROUMBAS K. Pattern recognition[M]. 4th

ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2009.

[19] KUYORO A O, ALIMI S, AWODELE O. Comparative analysis of the performance of various support vector machine kernels[C]//Proceedings of the 5th Information Technology for Education and Development. Abuja, Nigeria: IEE, 2022: 1-7.

[20] CAMASTRA F, VERRI A. A novel kernel method for clustering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2005, 27(5): 801-805.

[21] PEREZ-CRUZ F, BOUSQUET O. Kernel methods and their potential use in signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(3): 57-65.

[22] MAULANA B W, UTOMO S B, ANAM K, et al. Analysis of movement patterns based on electroencephalograph signals using Pearson correlation coefficient[C]//2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications. Surabaya, Indonesia: IEEE, 2023: 593-597.

[23] HE S Y, COZZA A, XIE Y Z. On the spatial resolution of fault-location techniques based on full-fault transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1527-1540.

[24] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W. Discrete-time signal processing[M]. 3rd ed. Upper Saddle River, USA: Pearson, 2010.

[25] 严有祥，吴桐，李振嘉，等. 基于自生成小波变换的配电电缆高阻故障精确定位方法[J]. 高压电器，2025，61(10)：82-93.
YAN Youxiang, WU Tong, LI Zhenjia, et al. precise location method for high impedance faults in distribution cables based on self-generated wavelet transform[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 82-93.

[26] 李淑蓉，王彬江，朱晓光，等. 基于调频连续波的长距离电缆高阻故障定位精度提升研究[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4152-4162.
LI Shurong, WANG Binjiang, ZHU Xiaoguang, et al. Location accuracy improvement research for high impedance fault of long-distance cable based on frequency modulated continuous wave[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4152-4162.

[27] 严尔梅，时磊，刘博迪，等. 基于北斗定位和数据融合的输电线路在线监测应用研究[J]. 电力信息与通信技术，2025，23(6)：23-30.
YAN Ermei, SHI Lei, LIU Bodi, et al. Application research on online monitoring of transmission lines based on beidou positioning and data fusion[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2025, 23(6): 23-30.

[28] HE Z Y, LIAO K, LI X P, et al. Natural frequency-based line fault location in HVDC lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 851-859.



胡　蓓(通信作者)
1986—，男，硕士，教授级高工
从事输变电在线监测装置、互感器等相关技术研究
E-mail: hubei2@foxmail.com

HU Bei
Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-11-13　在线出版日期　2026-04-08　　编辑　曾文君