引用格式:李燕,张玉强. 基于最小熵和F-K偏移的GPR钢筋杂波抑制[J]. 延安大学学报(自然科学版),2026,45(3):106-112.[LI Y,ZHANG Y Q. GPR rebar clutter suppression based on minimum entropy and F-K Migration[J]. Journal of Yan'an University(Natural Science Edition),2026,45(3):106-112.] **DOI**:10.13876/J.cnki.ydnse.260047

基于最小熵和F-K偏移的GPR钢筋杂波抑制

李　燕[1],张玉强[1,2*]

(1. 延安大学 物理与电子信息学院;2. 陕西省能源大数据智能处理省市共建重点实验室,陕西 延安 716000)

摘　要:在混凝土结构及其下方目标雷达探测时,结构内部钢筋的强反射会掩盖结构缺陷或下方目标回波信号,这严重影响探测和识别的精度。因此,针对钢筋杂波抑制问题,提出一种基于最小熵的F-K偏移钢筋杂波抑制方法,通过迭代计算不同波速度下钢筋回波的F-K偏移,并以图像熵最小为判据,实现最佳偏移成像。在此基础上,结合连通域检测与动态掩膜窗口精确提取钢筋焦点信号,再进行严格反偏移处理重构钢筋杂波,并将其从原始数据中去除,实现钢筋杂波的抑制。实验结果表明,该方法能够有效抑制复杂环境下的钢筋杂波干扰,显著提升了深层微弱目标的识别。

关键词:探地雷达;F-K偏移;图像熵;杂波抑制

中图分类号:P631.3　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1004-602X(2026)03-0106-07

混凝土结构健康监测与评估是保障基础设施安全运营的基石,无损检测是建筑结构健康检测与评估的重要手段[1-2]。在众多的无损检测技术中,探地雷达(Ground Penetrating Radar,GPR)因其高效、高分辨率等优点在基础设施健康评估领域中发挥着不可代替的作用[3-4]。然而,在混凝土结构检测过程中,混凝土内部密集排列的钢筋不仅会影响雷达信号的穿透性能,而且会产生强烈的电磁反射,严重影响混凝土内结构缺陷及下方目标回波信号的准确提取,从而对缺陷检测和目标识别造成影响[5]。因此,如何有效抑制探地雷达信号中的钢筋杂波是地下目标探测的关键技术之一。

近年来,针对探地雷达数据杂波抑制问题,大致可以分为时频域分析法、子空间分解法、基于波动方程法和基于深度学习的方法等[6]。时频域分析法包括小波变换和频率-波数(Frequency-Wavenumber,F-K)域滤波的方法。如:TERRASSE等[7]基于多尺度和多角度曲波变换对探地雷达数据杂波分离处理;HAYASHI等[8]设计了一种F-K滤波器,利用直接波与目标反射波之间的表观水平速度差,实现了雷达数据中直达波的抑制;张力文等[9]提出了一种基于F-K域全域频谱特征的滤波方法,探地雷达中的线性干扰得到有效压制。子空间分解法主要包括奇异值分解(Singular Value Decomposition,SVD)滤波、主成分分析(Principal Component Analysis,PCA)法和低秩稀疏矩阵分解法(Low-Rank Sparse Matrix Decomposition,LRSD)等[10-11],如:CHEN等[12]应用SVD将回波信号矩阵分解为多个奇异分量,再通过最大化定义的加权目标杂波比(WTCR)杂波子空间。ZHANG等[13]将杂波抑制问题转化为低秩稀疏表示优化,再通过基于低秩稀疏表示技术实现了穿墙雷达杂波的抑制。基于波动方程抑制杂波的方法不同于单纯的信号滤波,而是利用电磁波在介质中的传播规律,通过波场逆时外推将能量收敛到

收稿日期:2026-04-08

基金项目:国家自然科学基金项目(61961041,62361054,62461054,625015194);陕西省自然科学基金(2025JC-YBMS-684)

作者简介:李　燕(2001—),女,硕士研究生,主要从事探地雷达杂波抑制研究。

*通信作者　E-mail:ya_zyq@yau.edu.cn

真实位置，从而实现目标信号与杂波信号的精确分离。如：GE等[14]提出了一种基于迭代F-K偏移的方法，实现了探地雷达图像中钢筋杂波的抑制。随着近年来深度学习技术快速发展，其也被应用到雷达回波信号杂波抑制问题。2022年，WANG等[15]提出了一种基于RCE-GAN的钢筋杂波消除模型，在原始编码器-解码器生成器上增加了注意力模块和扩张中心去除了钢筋杂波信号，提高了隧道衬砌钢筋下空洞病害的识别效果。SUN等[16]使用大规模混合数据集训练残差U-net模型，提高了在实测数据中抑制杂波的效果。

尽管现有各种方法在具体雷达回波数据杂波抑制方面均有出色表现，但也存在一定的不足，如当杂波与目标回波在频域或位置上高度重叠时，传统小波变换方法难以实现杂波的有效分离，深度学习方法虽然表现出了优异的性能和自动化能力，但是其对数据集和计算能力有较高要求。相比之下，F-K偏移[17-18]基于波动方程理论，能够有效的将钢筋绕射波聚集归位[19]，从而显现出目标信号，实现目标信号与杂波信号的分离，使其可以在复杂背景下仍能实现优异的杂波抑制效果，提高图像分辨率。受偏移算法的启发，本文将F-K偏移用于混凝土内钢筋杂波的抑制。同时，为了克服F-K偏移的速度敏感问题，提高杂波抑制的精度，引入图像信息熵[20]的概念，实现了最佳F-K偏移速度的动态估计。另外，在杂波分离阶段，传统方法多采用简单的阈值切割，难以兼顾杂波提取的完整性与背景信号的保真度。因此，本文采用了连通域分析与动态掩膜窗口技术解决杂波与目标回波分离的问题。最后，通过数值模拟计算验证该方法的有效性。

1　最小熵F-K偏移杂波抑制算法

频率-波数（Frequency-Wavenumber，简称F-K）偏移是一种基于波动方程求解的雷达数据偏移成像方法，其核心是通过二维傅里叶变换将时域的雷达数据转换到频率-波数域，并利用波动方程的色散关系对纵向波数进行坐标重映，实现目标的偏移成像。对于混凝土结构雷达探测问题，如果能通过F-K偏移由回波信号混凝土结构中的钢筋偏移成像，然后再从B-Scan图中减去钢筋的偏移图像，即可实现混凝土结构内钢筋回波的抑制。

1.1　F-K偏移原理

根据惠更斯原理，在探地雷达测量中，地下界面的每一个反射点都可以看成一个子波源，各个反射点在$t=0$时刻所发射电磁波在地面被接收，就是地面获取的雷达回波信号。地下目标回波B-Scan图实质上就是地下目标沿水平位置x分布的各个反射点在$t=0$时刻所发射电磁信号随时间的变化。对B-Scan做时间反演，由记录剖面延拓到偏移剖面，实现被探测目标成像的目的。

设记录剖面为$e(x,z=0,t)$，偏移后的剖面为$e(x,z,t=0)$，其中，x是水平坐标，表示水平测点位置；z是垂直坐标，向下为正，表示反射点的深度；t是时间。记录剖面$e(x,z=0,t)$对x、t做二维傅里叶变换，可得

$$E(k_x,z=0,\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}e(x,z=0,t)\,\mathrm{e}^{-\mathrm{j}(k_x x+\omega t)}\mathrm{d}x\mathrm{d}t。\tag{1}$$

在F-K域做波场外推，可得深度z处的波场

$$E(k_x,z,\omega)=E(k_x,z=0,\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_z z}。\tag{2}$$

在探地雷达发射源和接收点共置的情况下，从发射源到反射点和从反射点到接收点的路径是重叠的，电磁波总传播时间是从反射点到接收点传播时间的2倍，因此可以把波速看作波在地下介质中实际传播速度的一半，则k_x、k_z、ω的关系可以表示为

$$\frac{\omega^2}{(v/2)^2}=k^2=k_x^2+k_z^2。\tag{3}$$

深度z处的波场$E(k_x,z,\omega)$对k_x、ω做二维傅里叶逆变换，可得

$$e(x,z,t)=\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}E(k_x,z,\omega)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(k_x x+\omega t)}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}\omega。\tag{4}$$

由式(2)和(3)可知，$E(k_x,z,\omega)$含有k_z分量，ω是k_x和k_z的函数，要知道z处的场，就需要知道波数域的k_z分量。因此，将式(3)代入式(4)并令$t=0$，可得

$$e(x,z,t=0)=\left(\frac{1}{2\pi}\right)^2\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}E\left(k_x,z=0,\frac{v}{2}\sqrt{k_x^2+k_z^2}\right)\cdot\frac{v}{2\sqrt{1+k_x^2/k_z^2}}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_x x}\mathrm{e}^{\mathrm{j}k_z z}\mathrm{d}k_x\mathrm{d}k_z。\tag{5}$$

这样，即可实现将$z=0$面的时间域回波数据转换为$t=0$时刻z处的深度数据，得到偏移后的目标像。

1.2 基于熵的F-K偏移优化

尽管可以通过F-K偏移对目标成像,然而,由于F-K偏移方法对速度变化较为敏感,若速度失配,则会引发“欠偏移”或“过偏移”现象,导致钢筋反射回波收缩不完全或产生虚假拖尾。为了获取高质量的钢筋回波图像,引入图像信息熵,以获得F-K偏移计算时的最佳偏移速度。

设F-K偏移生成的二维图像可以表示为

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1N} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M1} & x_{M2} & \cdots & x_{MN} \end{bmatrix}=[\boldsymbol{X}_1,\boldsymbol{X}_2,\cdots,\boldsymbol{X}_N], \quad (6)$$

其中,x_{ij}表示第j道采集数据的第i个采样点的样本值。则该偏移图像对应的熵被定义为

$$D=-\sum_{j=1}^{N}\sum_{i=1}^{M}z_{ij}\ln z_{ij}, \quad (7)$$

$$z_{ij}=\left|x_{ij}\right|^2/E_t, \quad (8)$$

$$E_t=\sum_{j=0}^{N}\sum_{i=0}^{M}\left|x_{ij}\right|^2, \quad (9)$$

其中,z_{ij}表示每个信号点的相对能量强度,E_t表示采样点的总能量。在图像处理领域,熵值反映了图像的复杂程度与信息含量。熵值越大,表明图像中包含的信息越多、结构越复杂,表现为图像细节丰富但杂乱;熵值越小,则表示图像信息更集中、结构更有序,点目标更加突出,对应的偏移图像成像质量越好。因此,在进行F-K偏移成像时,可以通过选取不同的电磁波传播速度v,分别求得对应的F-K偏移图像和所得图像的信息熵D,再选取最小信息熵所对应的F-K偏移图像,即可获得质量最好的偏移图像。

1.3 迭代F-K偏移杂波抑制算法

传统F-K偏移在进行杂波抑制时,依据介质的介电常数估算恒定偏移速度并进行F-K偏移,再采用阈值分割在偏移剖面图上提取焦点,最后通过反偏移和相干差分处理获得杂波抑制后的目标回波。为进一步改善F-K偏移杂波抑制,引入最小图像熵准则,通过迭代计算不同偏移速度下的成像效果,并结合连通域检测与动态掩膜窗口提取焦点。随后,进行反偏移波场重构,并与原始数据进行差分及二维均值平滑处理,最终实现杂波抑制。具体算法流程如图1所示。

图1中v是电磁波的传播速度,v_0是所取电波传播速度的最小值,Δv是迭代F-K偏移计算时电波传播速度增长步长。迭代F-K偏移计算直到偏移图像的熵达到最小值。

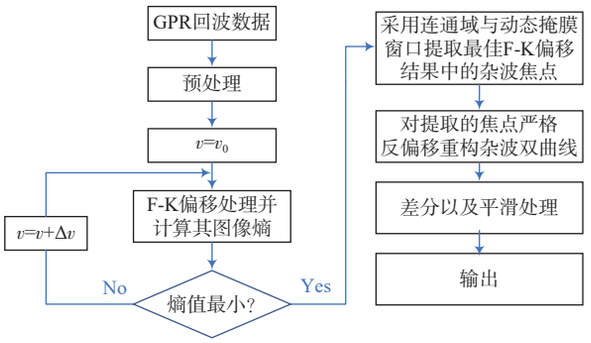


图1 迭代F-K偏移杂波抑制算法流程图

1.4 定量分析

为了更客观地评价迭代F-K偏移杂波抑制方法的性能,分别引入均方误差(MSE)δ_{MSE}、峰值信噪比(PSNR)δ_{PSNR}和结构相似度(SSIM)δ_{SSIM} 3个指标对实验结果进行评价。其中,MSE是指图像或数据中的逐像素点平方差的平均,即

$$\delta_{\mathrm{MSE}}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(I(i)-I_{\mathrm{clean}}(i))^2, \quad (10)$$

其中,$I(i)$表示杂波抑制后图像中像素点i的值,$I_{\mathrm{clean}}(i)$表示理想无杂波图像中像素点i的值。MSE主要用于衡量杂波去除前后的效果,MSE越小,杂波抑制效果越好。PSNR是最大信号能量与噪声能量的比值,即

$$\delta_{\mathrm{PSNR}}=10\cdot\log_{10}\left(\frac{\delta_{\mathrm{MAX}}^2}{\delta_{\mathrm{MSE}}}\right), \quad (11)$$

其中,δ_{MAX}^2表示去杂波后图像中最大的像素值。PSNR用于衡量杂波抑制后图像的质量,PSNR值越高,图像质量越好。SSIM则通过图像之间的亮度、对比度和结构三方面来衡量图像相似性,即

$$\delta_{\mathrm{SSIM}}(I,I_{\mathrm{clean}})=[l(I,I_{\mathrm{clean}})^{\alpha}]\cdot[c(I,I_{\mathrm{clean}})^{\beta}]\cdot[s(I,I_{\mathrm{clean}})^{\gamma}], \quad (12)$$

其中,$l(I,I_{\mathrm{clean}})$、$c(I,I_{\mathrm{clean}})$和$s(I,I_{\mathrm{clean}})$分别代表杂波抑制后图像I与理想无杂波图像I_{clean}的亮度、对比度和结构三方面的相似性。参数α、β和γ分别代表不同的权重,实际计算中都取1。SSIM越接近1,表示两张图像之间的差异越小。

2 实验及其结果分析

2.1 实验过程

为了验证基于迭代F-K偏移杂波抑制算法的性能,建立一个二层混凝土结构模型,上面是空气

层，下面是混凝土层。混凝土中含有埋深和间距都为0.2 m的钢筋层，钢筋层下方0.35 m处有一个半径为0.05 m的空洞。具体位置如图2所示。

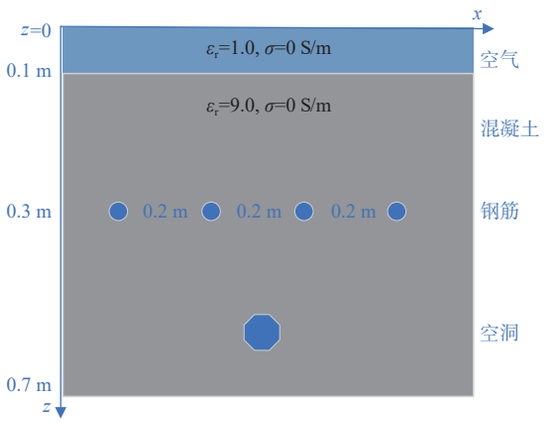


图2　混凝土结构模型

采用开源的gprMax软件进行正演模拟，计算空间1.5 m（d）×0.8 m，空间离散步长0.005 m。激励源和接收器距地面0.01 m，间隔0.04 m，移动步长为0.01 m，共扫描120道数据。采用Ricker激励，激励源频率为1 000 MHz，时窗为18 ns。模拟结果如图3所示。

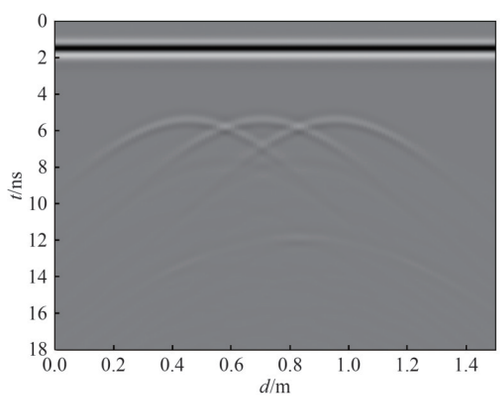


图3　下方含有空洞的混凝土结构B-Scan图

对图3对应的原始数据进行背景去除、增益、反卷积等处理。同时，为确保钢筋杂波可以充分聚焦，进行零点校正。预处理结果如图4所示。

由图4可见，位于混凝土层上方钢筋反射回波的幅度远大于下方空洞的反射回波，严重影响GPR对下方空洞的探测。为减小钢筋反射波对下方空洞探测的影响，需要对钢筋反射回波进行抑制。

首先，通过迭代F-K偏移获取钢筋回波。模型中混凝土的相对介电常数为$\varepsilon_r = 9$，相对磁导率$\mu_r = 1.0$，可得电磁波在混凝土中的传播度估计值为$v = c/\sqrt{\varepsilon_r} = 10^8$ m/s。为尽可能包含最佳偏移速度，将偏移速度范围取为0.98×10^8~1.05×10^8 m/s，速度增加步长1.4×10^5 m/s，迭代做50次F-K偏移计算，同时计算每个速度值对应F-K偏移后图像的熵值，找出最小图像熵对应的速度作为最佳F-K偏移的速度，并用该速度计算出最终的F-K偏移图像。速度-偏移图像熵关系和对应的F-K偏移处理结果分别如图5和图6所示。

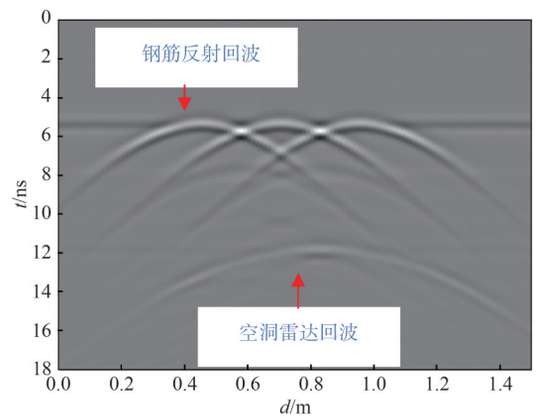


图4　预处理后的B-Scan图

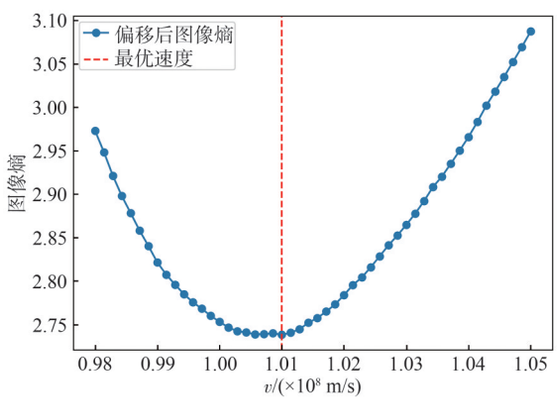


图5　F-K偏移速度-图像熵曲线

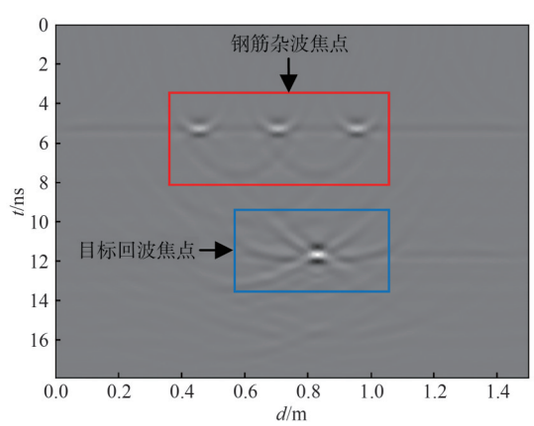


图6　F-K偏移结果

接着，通过连通域分析和动态掩膜提取钢筋焦点。模型中钢筋埋深为0.2 m，为确保完整提取钢筋

回波能量,初步选取行范围200~880对应的时间窗构建初始掩膜。在能量场二值化处理中,空间高斯平滑算子的标准差设为1,动态阈值系数设为0.5,连通域最小面积阈值设为20像素。动态掩膜算子的横向窗口尺寸根据偏移速度与空间采样间隔的比例关系自适应调整。提取到的焦点进行反偏移处理后,与原始数据进行相干差分运算,再采用二维均值滤波进行平滑处理,结果如图7C所示。

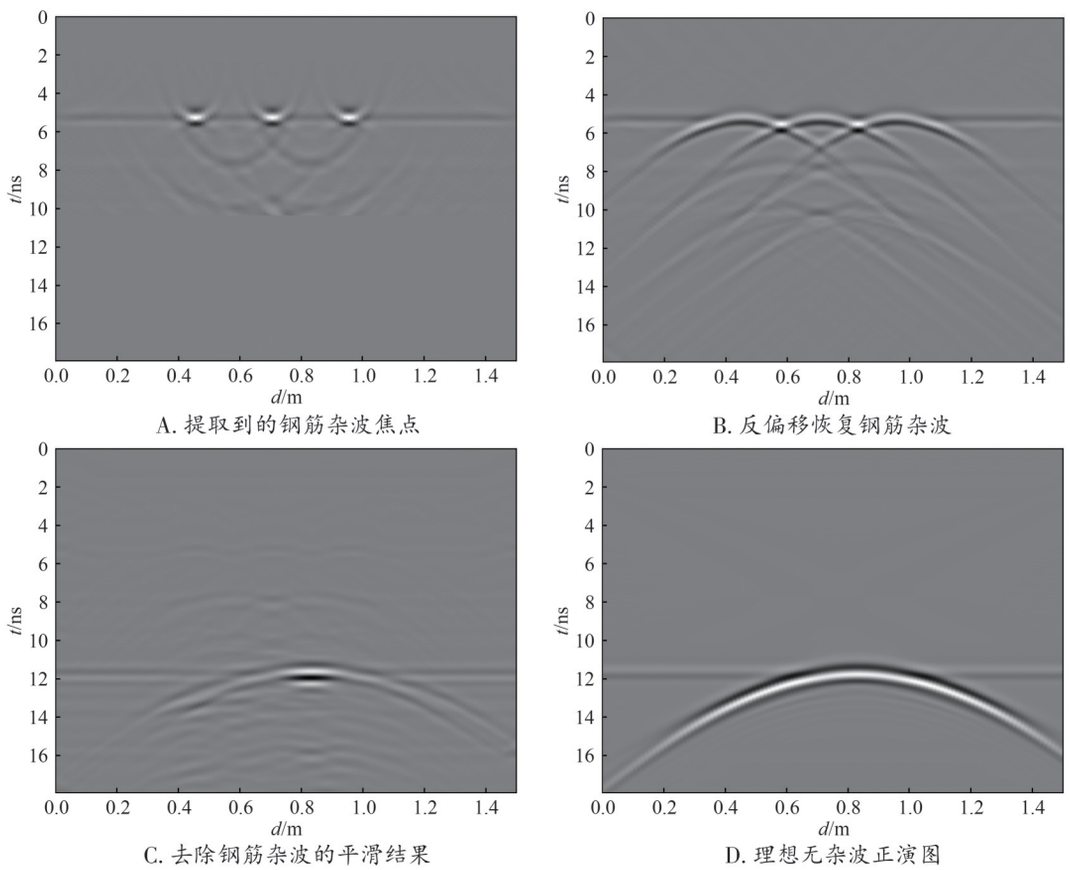


图7 F-K偏移去除钢筋杂波

将去除钢筋杂波并平滑的结果(图7C)与理想无杂波正演图(图7D)进行对比可见,通过迭代F-K偏移处理后的钢筋杂波信号强度明显减弱,且处理之前被钢筋掩盖的空洞回波明显恢复。F-K偏移本质上是一种基于波动方程的反传播过程,其成像效果对传播速度参数具有较高敏感性。通过引入最小图像熵准则,在一系列候选速度下进行F-K偏移计算,并选取使波场能量最为集中的偏移结果,将其对应的速度作为最优偏移速度。这一过程相当于对每一个采样点的相位进行精确校正,使钢筋强反射体的双曲线能量被压缩并集中于其真实位置。随后,通过对钢筋聚焦区域进行提取并重建其对应波场,再与原始数据进行差分处理,相当于对传播路径一致且相位匹配的钢筋散射信号进行相干抵消,从而有效削弱钢筋杂波。同时,由于缺陷目标的回波较弱,且其传播路径和相位特征与钢筋信号存在差异,在上述过程中不会被同步抵消,因此得以保留甚至更加清晰地显现出来。

为了进一步验证所提方法在深层钢筋强遮蔽目标环境下的有效性,通过增加钢筋埋深、半径和数量,构造出钢筋回波与目标回波高度重叠的情况。

如图8所示,首先将原始探地雷达B-Scan图进行去除直达波、零点校正等预处理,再结合最小熵准则进行F-K偏移,随后提取钢筋焦点并对提取到的数据进行反偏移,恢复出钢筋杂波,最后从原始数据中去除钢筋杂波。

如知网增强出版附件图1所示,经杂波抑制算法处理后,深层钢筋强反射能量得到大幅度衰减,被掩盖的空洞回波能量得到了恢复。

2.2 对比实验与分析

为了评估迭代F-K偏移方法在探地雷达钢筋杂波信号抑制任务中的性能,选用深度学习中的DnCNN和GcGAN两种常见的网络进行对比实验。

图9第一行为场景一(常规浅埋单层钢筋场景)通过不同方法进行杂波抑制的结果,第二行为场景

二(深层密集钢筋场景)通过不同方法进行杂波抑制的结果。由图9可以看出,在含有钢筋强反射干扰的情况下,DnCNN钢筋杂波虽然能够抑制部分杂波,但是残留现象明显,无法彻底分离钢筋回波与缺陷目标;GcGAN在杂波抑制方面有所提升,但其重构的缺陷目标回波存在几何畸变,还原不够准确;相比之下,迭代F-K偏移方法在钢筋杂波抑制上表现最优,其结果最接近不含钢筋杂波的真值图像。该方法不仅能够高效抑制密集的钢筋杂波,同时最大限度地保留并修复了缺陷目标的双曲线回波特征。

表1展示了这3种方法对上述两种实验场景进行杂波抑制的平均评价指标数据。可以看出,迭代F-K偏移的3种评价指标均高于其他方法,进一步证明了迭代F-K偏移方法在抑制钢筋杂波任务的有效性。

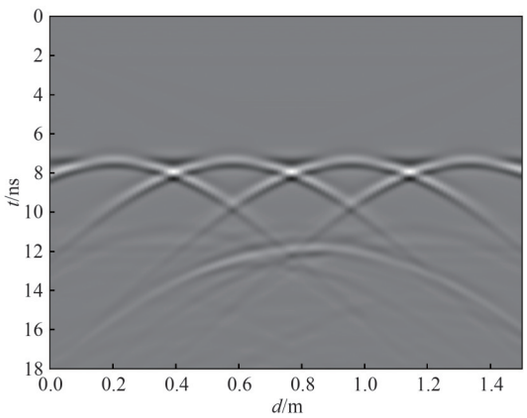


图8　预处理后的B-Scan图

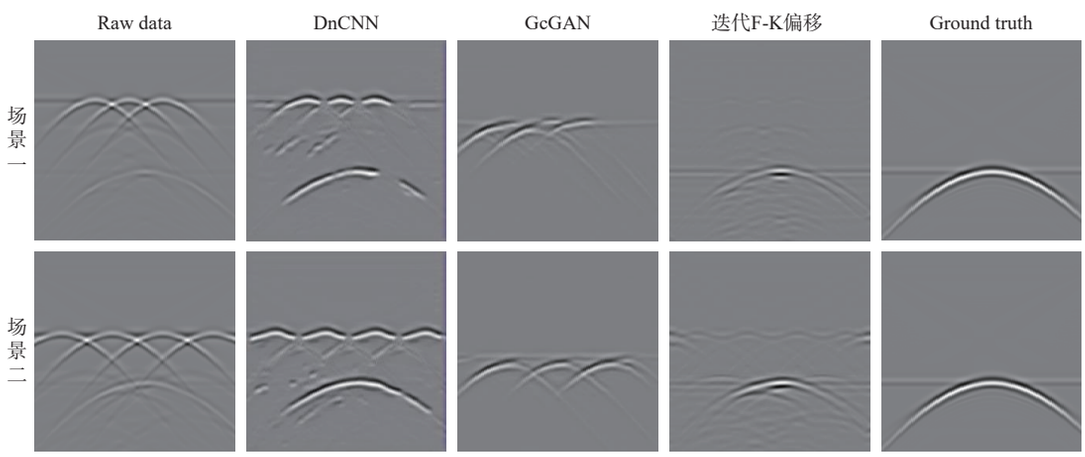


图9　不同方法的杂波抑制结果对比

表1　不同方法评价指标对比

方法	δ_{MSE}	δ_{PSNR}	δ_{SSIM}
DnCNN	0.003 6	24.43	0.825 5
GcGAN	0.004 1	23.91	0.811 0
迭代F-K偏移方法	0.003 4	24.56	0.903 1

3　结束语

针对混凝土结构探测中强钢筋杂波干扰的问题,本文使用了一种基于最小图像熵准则和F-K偏移的钢筋杂波抑制方法。该方法通过构建偏移成像效果与图像熵之间的映射关系,克服了传统偏移算法对介质传播速度高敏感的局限性,实现了钢筋GPR回波信号的精确归位。采用连通域分析与动态掩膜技术,配合严格反偏移与平滑处理,实现了钢筋杂波从焦点到双曲线形态的高精度重构与高效抑制。实验结果表明,该方法能够有效压制钢筋杂波,同时显著提升了雷达图像的分辨率,为混凝土内钢筋杂波的干扰问题提供了解决思路,具有重要的参考价值和工程实践意义。

特别提醒:本文的附件材料见知网增强出版附件。

参考文献:

[1]LI Y, BAO T, XU B, et al. A deep residual neural network framework with transfer learning for concrete dams patch-level crack classification and weakly-supervised localization[J]. Measurement, 2022, 188: 110641.

[2]董是,芮晓芳,左琛,等. 路面破损智能检测与分析算法研究进展[J]. 东南大学学报(自然科学版),2025,55(4):1131-1153.

[3]王大为,吕浩天,汤伏蛟,等. 三维探地雷达道路隐性病害检测分析与数字化技术综述[J]. 中国公路学报,2023,36(3):1-19.

[4]张玉强,郭辉. 渗漏埋地供水管道雷达探测信号特征分析[J]. 延安大学学报(自然科学版),2023,42(3):92-97.

[5]李姝凡. 基于探地雷达的混凝土内钢筋下病害识别方法

研究[D]. 济南:山东大学,2020:1-53.
[6]雷文太,王以明,钟继卫,等. 探地雷达杂波抑制技术研究综述:机理、方法与挑战[J]. 电子与信息学报,2025,47(11):4079-4095.
[7]TERRASSE G, NICOLAS J M, TROUVÉ E, et al. Application of the curvelet transform for clutter and noise removal in GPR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2017, 10(10): 4280-4294.
[8]HAYASHI N, SATO M. F-k filter designs to suppress direct waves for bistatic ground penetrating radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(3):1433-1444.
[9]张力文,聂俊丽. 利用改进的f-k滤波方法压制探地雷达中的线性干扰[J]. 电子学报,2022,50(6):1444-1450.
[10]张书铭,何进荣,张雨蓉. 基于对抗训练的鲁棒主成分分析算法[J]. 延安大学学报(自然科学版),2024,43(4):93-98.
[11]庄子波,陈星,台宏达,等. 基于奇异值分解的激光雷达湍流预警算法[J]. 光学精密工程,2019,27(3):671-679.
[12]CHEN C, HE Z, SONG X, et al. A subspace projection approach for clutter mitigation in holographic subsurface imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 19:1-5.
[13]ZHANG Y, XIA T. In-wall clutter suppression based on low-rank and sparse representation for through-the-wall radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(5):671-675.
[14]GE J, SUN H, LIU R, et al. Removing rebar clutter through iterative Fk migration in GPR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 22:1-5.
[15]WANG Y Z, QIN H, TANG Y, et al. RCE-GAN: A rebar clutter elimination network to improve tunnel lining void detection from GPR images[J]. Remote Sensing, 2022, 14(2):251.
[16]SUN H H, CHENG W, FAN Z. Learning to remove clutter in real world GPR images using hybrid data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60:1-14.
[17]洪文彬,许德鑫,张树仁,等. 基于F-K偏移及模态分解的地质雷达法大坝面板脱空检测技术研究[J]. 水利科学与寒区工程,2022,5(11):147-149.
[18]李光辉,徐汇,刘敏. 基于探地雷达杂波抑制与偏移成像的树木根系定位方法[J]. 农业机械学报,2022,53(3):206-214.
[19]李峰,徐正宣,巨莉,等. 基于分裂Bregman迭代的全变分去噪算法在隧道衬砌探地雷达F-K偏移中的应用[J]. 隧道建设(中英文),2026,46(2):430-436.
[20]WANG J, LAI T, WANG Q, et al. Entropy-based parameterized amplitude and phase correction for MIMO ground-based SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62:1-14.

[责任编辑 毕 伟]

GPR rebar clutter suppression based on minimum entropy and F-K migration

LI Yan[1], ZHANG Yuqiang[1,2*]

(1. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University;
2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Processing for Big Energy Data, Yan'an 716000, China)

Abstract: During the radar inspection of concrete structures and their underlying targets, the intense reflections originating from internal rebars often obscure structural defects or the echo signals of deeper targets, which severely degrades the accuracy of detection and identification. To address this rebar clutter suppression issue, a minimum-entropy-based F-K migration method for rebar clutter mitigation is proposed. The method iteratively computes the F-K migration of rebar echoes under varied wave velocities and employs the minimum image entropy as the criterion to achieve optimal migration imaging. On this basis, spatial connected component labeling is combined with a dynamic mask window to precisely extract the rebar focus signals. A rigorous post-migration (inverse migration) process is subsequently performed to reconstruct the rebar clutter, which is then subtracted from the raw data to achieve clutter mitigation. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively suppress rebar clutter interference in complex environments and significantly improve the identification of deep and weak targets.

Key words: GPR; F-K migration; image entropy; clutter suppression