

# 基于 GPR 的机场跑道钢筋回波检测与抑制

钟羽中 吴仁彪 刘家学

(中国民航大学天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津, 300300)

**摘 要:** 钢筋强反射回波及其多次波严重影响探地雷达在机场跑道灾害目标检测与识别的应用。本文研究机场跑道钢筋回波检测及抑制的方法。首先利用 Hyp-curvelet 变换将 GPR 时空二维回波信号投影到尺度空间, 目标回波的能量将聚集且与其他目标分离, 进而基于尺度空间中的局部峰值进行目标检测。然后结合目标回波的初始相位及时频特征, 在尺度空间中消除钢筋回波分量。最后将数据反变换回时空域, 得到只含有灾害目标回波的数据。仿真实验表明, 本文所提算法在低信噪比的情况下对钢筋回波检测与抑制能取得很好的效果, 重构的结果中灾害目标回波保存完整且钢筋回波罕有残余。

**关键词:** Hyp-curvelet 变换; 双曲线 Radon 变换; 钢筋回波抑制; 目标检测

**中图分类号:** TN959.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)10-1509-06

## Rebar Echo Detection and Suppression in Runway Using GPR

ZHONG Yu-zhong WU Ren-biao LIU Jia-xue

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Strong rebar echo and its multiples will affect the performance of GPR (Ground penetrating radar) in disease target detection and discrimination badly, so they must be eliminated as much as possible. A method for rebar echo detection and suppression is proposed in this paper. First of all, GPR observed data are projected into Hyp-curvelet space by the Hyp-curvelet transform, and echoes from different targets are concentrated but separated with each other. Target can be detected by searching the peak values in Hyp-curvelet space. Rebar can be discriminated from disease target with initial phase of echo and features distribution in time-frequency domain, and then its echo can be eliminated in Hyp-curvelet space. In the end, data are reconstructed back into time-space domain without containing rebar echo. Simulation results show that the proposed method has good performance in rebar echo detection and suppression under the condition of low SNR, and diseases echoes are preserved well and rebar echo is rarely left over in the reconstructed data.

**Key words:** Hyp-curvelet transform; Hyperbola Radon transform; rebar echo elimination; target detection

## 1 引言

近年来,探地雷达(Ground penetrating radar, 简称 GPR)已广泛运用于高速公路、桥梁隧道和机场跑道等的质量检测中,为其使用及养护提供依据,其中脱空与裂缝等隐性灾害是探地雷达探测的主要目标<sup>[1]</sup>。在跑道建设或养护过程中一些区域会铺设钢筋,钢筋的强反射回波及其多次波与灾害目标回波相互混叠,甚至湮没灾害目标回波,严重影响灾害目标的检测与识别。然而如何有效地抑制钢筋回波并最大限度地保留钢筋周围的隐性灾害回波,目前没有成熟的方法。

钢筋回波与灾害目标回波在  $t-x$  域(时间空间域)的特征相似,均呈现近似双曲线特征。目标之间的

距离不够远时,其回波在  $t-x$  域上会发生混叠,因而不能直接从  $t-x$  域上消除钢筋回波。钢筋的干扰问题可借鉴勘探地震学中多次波消除的方法来解决,即首先通过某种变换将 B-scan 数据投影到一个新域,在这个域中各目标的回波彼此分离且各自聚集成团,在新域中滤除钢筋的分量后再将数据反变换回  $t-x$  域,可得到只含有灾害目标回波的数据,具体流程见图 1。双曲线 Radon 变换<sup>[2]</sup>就是这样一种投影变换,它能够将  $t-x$  域中的一条双曲线映射成 Radon 域中的一个点,因此在多目标回波分离领域得到了很好的应用。Hyp-curvelet 变换<sup>[3][4][5]</sup>实质上是多尺度的双曲线 Radon 变换,它能带来大量的冗余信息,在一定程度上能提高了重构数据的精度。

收稿日期: 2011 年 6 月 1 日; 修回日期: 2011 年 9 月 13 日

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 60879019); 民航总局科技基金资助项目(No. MHDR0701)

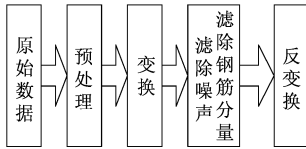


图1 钢筋回波滤除流程

Fig. 1 The procedure of rebar echo elimination

本文针对抑制钢筋干扰的问题提出一种有效的方法,即先采用单尺度 Hyp-curvelet 变换进行目标检测,再结合钢筋识别算法和 Hyp-curvelet 变换抑制钢筋回波。仿真实验结果验证该方法的有效性。

## 2 钢筋回波检测

### 2.1 地下目标回波二维特征

探地雷达沿着测试线扫描时,与目标的相对距离不断变化而导致目标回波信号在  $t-x$  域呈现近似双曲线的形状。目标与雷达的几何关系如图 2 所示。其中  $D$  为目标到雷达天线的距离,  $H$  为目标埋藏的深度,  $x_0$  为目标在水平方向上的位置,  $x$  为雷达天线所处的位置,这时有:

$$D^2 = (x - x_0)^2 + H^2 \quad (1)$$

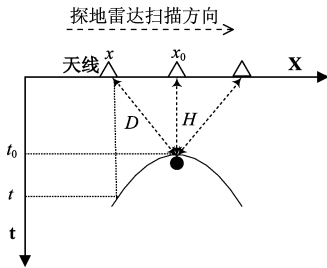


图2 探地雷达目标回波的二维模型

Fig. 2 2D model of target echo obtained by GPR

电磁波从天线到达目标的传播时延  $t$  由双曲线方程(2)给出,其中,  $v$  为电磁波在介质中传播的速度;  $t_0$  为天线处于目标正上方时电磁波的传播时延。

$$t = \frac{2D}{v} = \sqrt{\frac{4(x - x_0)^2}{v^2} + t_0^2} \quad (2)$$

噪声的分布与目标回波不同,它随机地分布在整个  $t-x$  域。

### 2.2 目标检测

由于目标回波在  $t-x$  域上呈现出近似双曲线的形状,所以在  $t-x$  域中的双曲线代表目标的存在。双曲线 Radon 变换是沿着双曲线积分,将其能量聚集成 Radon 域的一个点。Hyp-curvelet 变换实质上是在双曲线 Radon 域的一维小波变换,它延续了双曲线 Radon 变换在描述双曲线奇性上的优越性能,其定义为<sup>[3][4][5]</sup>:

$$W_\gamma(\mathbf{b}) = \psi_a * \mathfrak{R}_{hyp} f(\tau, b) = \langle f, \psi_\gamma \rangle$$

$$= |\mathbf{a}|^{-\frac{1}{2}} \iint f(t, x) \psi_\gamma dt dx \quad (3)$$

其中,“\*”表示卷积运算;  $\mathfrak{R}_{hyp} f(\tau, b)$  为双曲线 Radon 变换结果;  $\psi_a$  为 Marr 小波;  $f$  为待分析的 B-scan 数据; Hyp-curvelet 小波  $\psi_\gamma$  为综合考虑了 GPR 信号的时空域特征和衰减特性后的二维小波,它在二维平面上表现为双曲线的形状,在‘脊’上沿着时间维表现为 Marr 小波,且表示为:

$$\psi_\gamma(t, x) = (a_x a_t)^{-\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[ \frac{t - b_t}{a_t} - \sqrt{\left( \frac{x - b_x}{a_x} \right)^2 + \tau_0^2} \right]^2 \right\} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \frac{t - b_t}{a_t} - \sqrt{\left( \frac{x - b_x}{a_x} \right)^2 + \tau_0^2} \right]^2 - a_0 \left( \frac{x - b_x}{a_x} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

其中,  $\tau_0$  是一个正常数;  $a_t$  和  $a_x$  分别为时间和空间上的尺度参数;  $b_t$  和  $b_x$  分别为时间和空间上的位移参数;  $a_0$  为空间方向上的衰减因子。

Hyp-curvelet 变换在每个尺度下都能将目标回波信号的能量聚集在双曲线的顶点处,因此尺度空间中的局部峰值即代表目标。但对目标检测而言,仅需单尺度变换。由于噪声主要分布在低尺度空间中,信号在高尺度空间中也发生扩散,因此选择在中间尺度空间的信息作为检测结果的依据。当接收数据中无目标回波,噪声的能量不能被累积起来形成局部峰值,如图 3 所示。

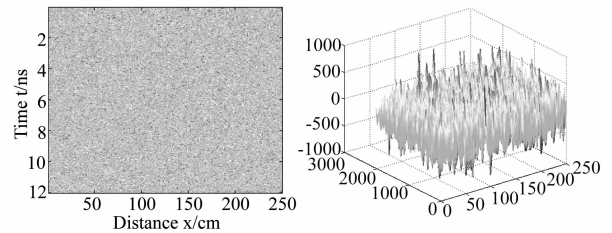


图3 只含噪声的 GPR B-scan 数据(左)及其检测结果(右)

Fig. 3 B-scan data that only contains noise (left) and its detection result (right)

若目标回波湮没于噪声中,经单尺度 Hyp-curvelet 变换后信号的能量被累积起来而形成了局部峰值,但噪声能量聚集不太明显,如图 4 所示。该检测方法显然适用于低信噪比的情况。

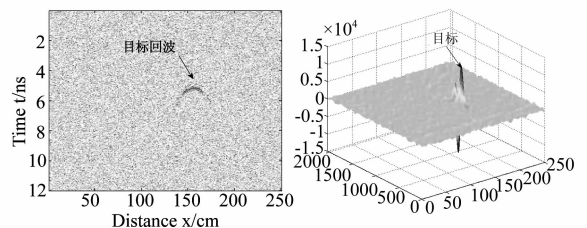


图4 含目标的 GPR B-scan 数据(左)及其检测结果(右)

Fig. 4 B-scan data that contains a target (left) and its detection result (right)

## 2.3 钢筋识别

电磁波在传播过程中遇到不连续的介质就产生回波,并在 B-scan 数据中形成双曲线,需要结合钢筋识别算法才能完成钢筋回波的检测。

如图 5 所示,光密媒质目标的回波与发射波初始相位和极性相反;光疏媒质目标的回波与发射波初始相位和极性相同。钢筋相对跑道面层介质是光密媒质目标,而裂缝与脱空的填充介质多为空气,相对跑道面层介质是光疏媒质目标,因此可利用回波的初始相位信息区分钢筋与灾害目标。

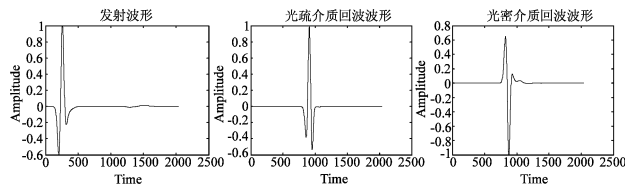


图 5 发射波(左)、光疏媒质目标回波(中)和光密媒质目标回波(右)  
Fig. 5 Transmitted wave (left), Echoes reflected from optically thinner medium target (middle) and from optically denser medium target (right)

若某些脱空被水填充(即水脱空),其回波与发射波初始相位相反,这时需要利用时频分析的方法进行区分。钢筋与灾害目标在形状、大小和属性上的不同会导致它们的时频能量密度分布不同<sup>[6]</sup>。Wigner 分布为最基本的二次项时频分析的方法。水脱空和钢筋的 Wigner 分布如图 6 所示。根据这些差别,可进一步区分钢筋和灾害目标。

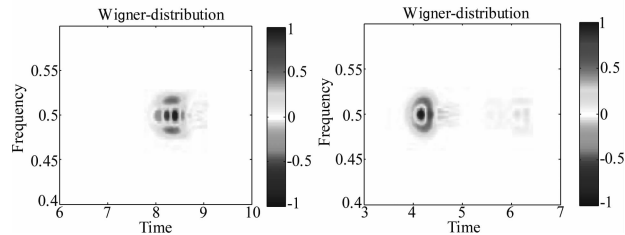


图 6 水脱空(左)与钢筋回波(右)的 Wigner 分布  
Fig. 6 Wigner distribution of water-filled void echo (left) and rebar echo (right)

## 3 钢筋回波抑制及随机噪声去除

### 3.1 钢筋回波抑制

小目标的回波能量远远小于钢筋回波能量,其回波湮没在钢筋回波中,很难被检测到。钢筋回波与目标的回波在  $t-x$  域中相互混叠,而导致目标不能被正确识别。钢筋的强反射回波及其多次波对其周围目标的检测与识别均有严重的影响,需要尽可能地抑制。由于不同的目标回波在尺度空间中是分离的,因此在尺度空间中将钢筋回波分量消除后再反变换回  $t-x$

域,将得到不含钢筋回波的数据。

信号不仅能够通过分解系数  $\langle f(t, x), \psi_\gamma \rangle$  来刻画,而且还能从这个系数中重构出来,即:

$$f(t, x) = \sum_{\gamma \in \Gamma} \langle f(t, x), \psi_\gamma \rangle \tilde{\psi}_\gamma \quad (5)$$

其中,  $(\tilde{\psi}_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$  为  $(\psi_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$  的对偶框架。由于实际情况中框架  $(\psi_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$  一般为近似紧框架,因而  $\tilde{\psi}_\gamma$  可通过迭代的方式求得,即:

$$\tilde{\psi}_\gamma^N = \frac{2}{A+B} \psi_\gamma + R \tilde{\psi}_\gamma^{N-1} \quad (6)$$

其中,  $A$  和  $B$  分别为框架  $(\psi_\gamma)_{\gamma \in \Gamma}$  的上下框架界;  $R$  为残差算子;  $N$  为迭代次数。重构信号  $f$  可表示为<sup>[7]</sup>:

$$f_N = f_{N-1} + \frac{2}{A+B} \sum_{\gamma \in \Gamma} (\langle f_N, \psi_\gamma \rangle - \langle f_{N-1}, \psi_\gamma \rangle) \psi_\gamma \quad (7)$$

本文使用的迭代算法为共轭梯度算法。其优点是不需要知道框架边界且具有指数收敛速率<sup>[8]</sup>。

在抑制钢筋回波的同时无可避免地会损失一些有用信息及残留一些钢筋回波分量和噪声分量。事实上框架元素之间是线性相关的,因此 Hyp-curvelet 变换能带来大量的冗余信息。就信号重构的精度而言,冗余能带来稳健性,也就是在低精度下获得的分解系数却可在相对高的精度下重构信号。尺度空间中的相关信息可互相补偿,因此部分重构也能有效地逼近灾害目标回波,从而达到了抑制钢筋回波的目的。

### 3.2 随机噪声消除

Hyp-curvelet 变换将目标回波和随机噪声同时投影到尺度空间中,噪声仍与目标回波重叠在一起,即:

$$\langle f(t, x), \psi_\gamma \rangle = \langle s(t, x), \psi_\gamma \rangle + \langle N(t, x), \psi_\gamma \rangle \quad (8)$$

其中  $s(t, x)$  为目标回波,  $N(t, x)$  为随机噪声。但是由于 Hyp-curvelet 小波  $\psi_\gamma$  充分考虑了探地雷达信号的特点,因而目标回波的投影  $\langle s(t, x), \psi_\gamma \rangle$  相对噪声的投影  $\langle N(t, x), \psi_\gamma \rangle$  其能量大得多。采用硬阈值去噪的方法,将小分解系数置零,在重构的过程中能压制噪声大部分能量,而损失的部分目标回波可由多尺度带来的冗余信息补偿。

## 4 实验结果与分析

为验证 Hyp-curvelet 变换的适用性,本文将从三个实验展开说明,其中实验 1 的目的是为了验证 Hyp-curvelet 变换的去噪性能,而后两个实验均为验证 Hyp-curvelet 变换在抑制钢筋回波的同时能保持灾害目标回波的完整性。实验均在典型的机场跑道结构模型下进行,且使用的数据均由高保真软件 GPRmax2.0 产生。

框架是否为紧框架不仅与小波的性能有关,而且与尺度参数及位移参数的采样间隔有关。因此在 Hyp-

curvelet 变换中参数设置尤其重要,这影响着框架是否是紧框架,从而影响重构结果的精度以及迭代的收敛速度。综合考虑 GPR 信号特点和其采样间隔,在以下实验中均将框架  $\gamma = \{a_t, a_x, b_t, b_x\}$  离散化为:

$$\gamma \in \Gamma = \{2^J, a_{x0}, m, n\}, J=0, 1, \dots, 5, m=1, 2, \dots, N_t, n=1, 2, \dots, N_x \quad (9)$$

其中,  $a_{x0}$  为一个与电磁波在介质中传播速度有关的常数;  $N_t$  和  $N_x$  分别为 GPR 数据时间空间采样点数,实验中取值分别为 2036 和 250。

#### 4.1 实验 1

实验中使用的 B-scan 数据中含有 4 根钢筋和 1 个脱空灾害目标的回波,如图 7a) 所示。加入了一定量的随机噪声,信噪比为 0dB,如图 7b) 所示。将 B-scan 数据投影到 6 个尺度空间中,如图 9 所示。与小波变换相似,低尺度空间中噪声投影能量分布相对较均匀,而目标回波被湮没在噪声中。随着尺度的增大,噪声投影的能量逐步降低,而目标回波投影的能量相对增强。

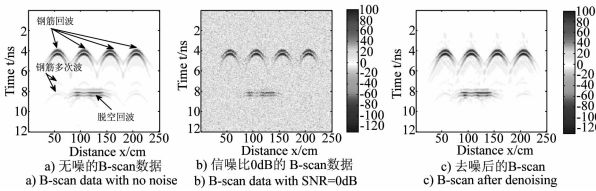


图 7 去噪效果  
Fig. 7 Denoising results

实验中阈值的设定为  $T = \begin{cases} 4\hat{\sigma} & J < 3 \\ 3\hat{\sigma} & J \geq 3 \end{cases}$ , 其中  $\hat{\sigma}$  为噪声估计方差。

由于噪声主要分布在低尺度空间,噪声方差估计值为尺度 0 中所有分解系数平均除以 0.6745。对各尺度空间的投影进行硬阈值切割后重构得到图 7c) 所示结果,噪声得到了有效地抑制。同时利用去噪后的数据与不含噪声数据之间的相关系数  $\rho$  进行定量分析,该实验中  $\rho = 0.9874$  客观说明了该方法去噪效果显著。

#### 4.2 实验 2

本实验的目的是在低信噪比情况下压制钢筋回波并重构脱空回波。实验中使用的数据与实验 1 同。脱空回波能量略小于钢筋回波能量,但其回波波形的失真。如图 8 所示,利用尺度 4 的信息完成目标检测,钢筋和脱空的回波均被累积起来。在这种情况下,钢筋回波虽不影响脱空的检测,但是影响脱空的识别。

根据钢筋的识别结果在各个尺度空间滤除钢筋回波分量,如图 10 所示。滤波后低尺度下仍存在部分噪声,在所有尺度下大部分钢筋回波分量均被消除了,脱空

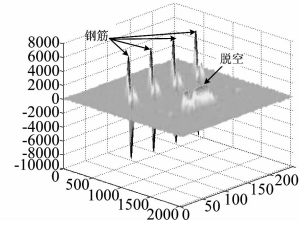


图 8 目标检测结果

Fig. 8 Target detection result

回波分量几乎没有损失。重构的脱空回波结果如图 11 所示,其中钢筋回波及其多次波大部分被抑制了。

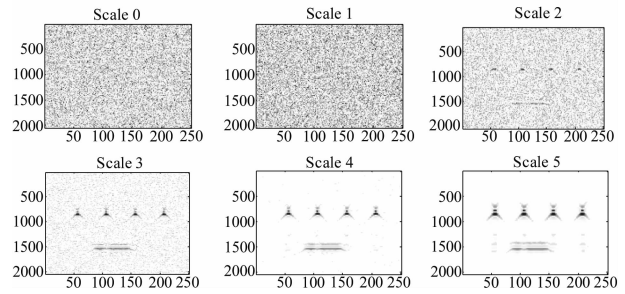


图 9 尺度空间中分解结果

Fig. 9 Decomposing results in Hyp-curvelet space

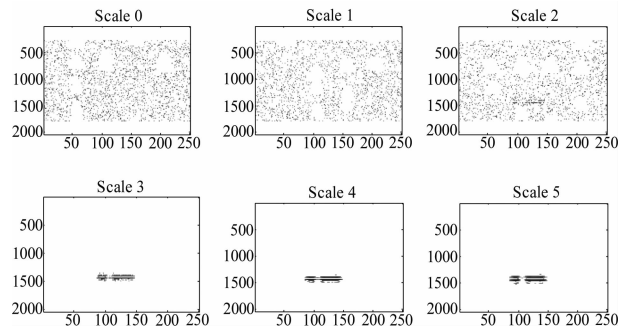


图 10 在尺度空间中滤波的结果

Fig. 10 Filtering results in Hyp-curvelet space

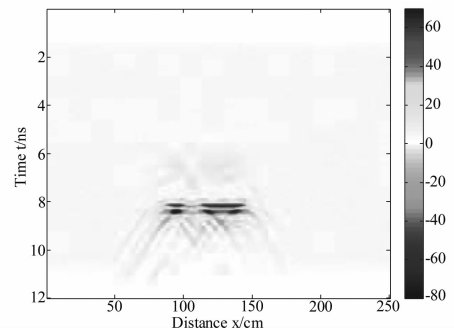


图 11 重构的脱空回波

Fig. 11 Reconstruction echoes that contains void

#### 4.3 实验 3

本实验的目的是抑制钢筋回波并重构裂缝灾害目标回波。实验中使用的 B-scan 数据中含有 4 根钢筋与 2 个灾害目标裂缝的回波,信噪比为 20dB,如图 12 所

示。裂缝的回波能量远远小于钢筋回波能量,而且它们在  $t-x$  域上混叠,波形严重失真,尤其是裂缝 2 回波。利用尺度 4 的信息完成目标检测,裂缝回波形成的峰值远远小于钢筋回波形成的峰值,甚至小于钢筋多次波形成的峰值,如图 13 所示。这种情况下,裂缝很难被检测出来。

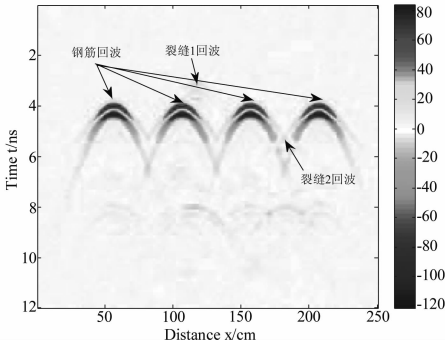


图 12 含有裂缝与钢筋的 B-scan 数据

Fig. 12 B-scan that contains two cracks and rebar

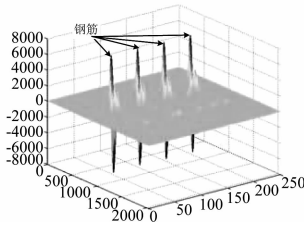


图 13 目标检测结果

Fig. 13 Target detection result

将原始数据投影于 6 个尺度空间中,如图 14 所示。根据钢筋的识别结果在各个尺度空间滤除钢筋回波分量滤波后,各尺度空间中仍残留了部分钢筋回波分量和噪声分量,且裂缝回波有损坏,如图 15 所示。由于尺度空间中的信息是冗余的,各个尺度下残留的干扰、损坏的有用信息不同,其信息可互为补偿。重构裂缝回波如图 16 所示,裂缝数据稍有损坏,钢筋回波稍有残留。但微小的差别不会影响目标检测与识别。

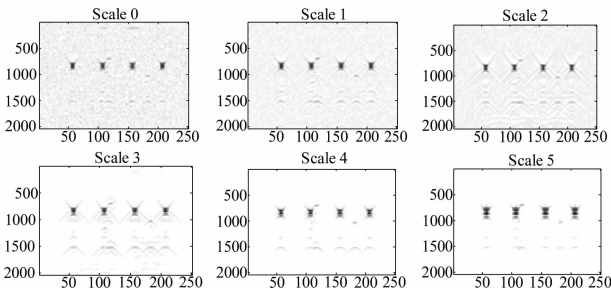


图 14 尺度空间中分解结果

Fig. 14 Decomposing results in Hyp-curvelet space

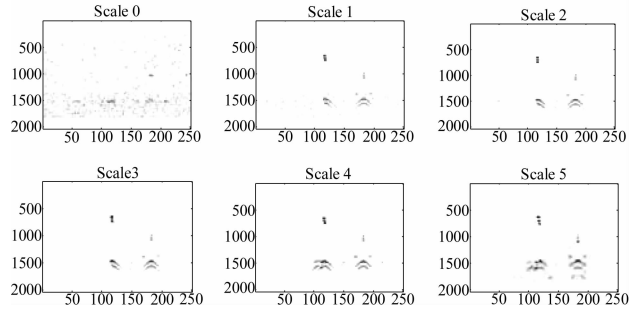


图 15 尺度空间中滤波的结果

Fig. 15 Filtering results in Hyp-curvelet space

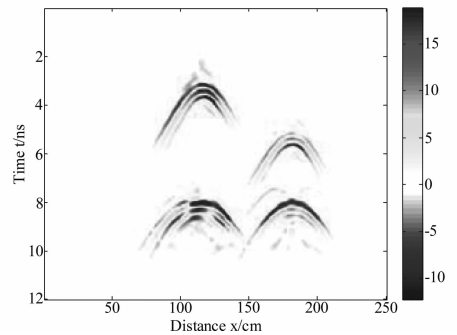


图 16 重构裂缝回波

Fig. 16 Reconstruction echoes that contains cracks

### 5 结论

针对钢筋回波的干扰问题本文提出一种基于 Hyp-curvelet 变换检测及抑制钢筋回波的算法。Hyp-curvelet 变换充分考虑了探地雷达目标回波时空域的特点,在聚集目标回波能量的同时分离不同目标回波,结合钢筋识别算法可抑制钢筋回波分量。仿真实验表明,该算法能有效地检测与抑制钢筋回波。

### 参考文献

[1] 庞希斌,徐进,卢小兵,张爱辉. 地质雷达在机场跑道缺陷检测中的应用——以“5·12”汶川地震后九寨黄龙机场检测为例[J]. 西南民族大学学报. 2008, 34(6):1096-1100.

Pang X. B, Xu J, Lu X. B, Zhang A. H. Application of the ground penetrating radar to the inspection of the air-field runway defect——Taking the detection of Jiuhuang Airport after the 5. 12 Wenchuan earthquake for example [J]. Journal of Southwest University for Nationalities Natural Science Edition. 2008, 34(6):1096-1100. (in Chinese)

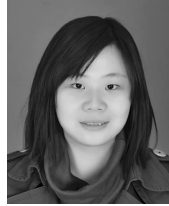
[2] 刘喜武,刘洪,李幼铭. 高分辨率 Radon 变换方法及其在地震信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展. 2004, 19(1):8-15.

Liu X. W, Liu H, Li Y. M. High resolution radon trans-

- form and its application in seismic signal processing. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(1):8-15. (in Chinese)
- [3] 张建贵. Hyp-curvelet 变换与多次波的识别[D], 分离和压制. 长沙:中南大学地球科学与信息物理学院. 2002年7月.  
Zhang J. G. Hyp-curvelet frame and Multiple Waves recognition, Separation and Elimination[D]. Changsha: Department of Geodetection and Information Technology, Central South University, 2002. (in Chinese)
- [4] Zhang R. F, Tadeusz J. Ulrych. Physical wavelet frame denoising[J]. *Geophysics*, 2003, Vol. 68, No. 1, pp. 225-231.
- [5] 孙学文, 陈文超, 高静怀, 包乾宗. 小波域强面波衰减方法研究. *石油地球物理勘探*. 2008, 43(1):22-28.  
Sun X. W, Chen W. C, Gao J. H, Bao Q. Z. Study on attenuation of strong surface wave in wavelet domain[J]. *OGP*, 2008, 43(1):22-28. (in Chinese)
- [6] Timofey Grigorievich Savelyev, Luc van Kempen, and Hichem Sahli, "Investigation of Time-Frequency Features for GPR Landmine Discrimination," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, January 2007, vol. 45, No. 4, pp. 118-129.
- [7] Ingrid Daubechies. *Ten Lectures on Wavelets*[M]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992, 56-102.

- [8] Noor Atinah Ahmad. A Globally Convergent Stochastic Pairwise Conjugate Gradient-Based Algorithm for Adaptive Filtering[J]. *IEEE signal processing letters*, 2009, 15:914-917.

#### 作者简介



钟羽中(1987-),女,中国民航大学硕士研究生,研究方向为探地雷达信号处理。E-mail:zyzc122@163.com



吴仁彪(1966-),男,中国民航大学教授,博士生导师,民航特聘专家,研究方向为自适应信号处理,高分辨率雷达成像与自动目标识别,民航无线电干扰检测与自适应抑制,民航遥感信息处理与应用。E-mail:rbwu@vip.163.com



刘家学(1969-),男,中国民航大学教授,研究方向为雷达信号处理。E-mail:jxliu@cauc.edu.cn