

文章编号:1671-8879(2009)01-0041-04

路基检测图像方向性增强算法

王卫亚¹, 黄平云², 韩玉会¹

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 理学院, 陕西 西安 710064)

摘要:针对传统离散小波变换图像分解不能完全解读探地雷达图像中路基脱空和裂隙的缺陷, 采用基于映射的二维离散小波变换增强路基检测图像方向性的方法, 实现了对探地雷达路基检测图像的 6 个方位的分解。试验结果表明, 采用这种小波变换技术处理探地雷达图像数据, 具有良好的方向增强性、平移近似不变性和明显的相位信息, 提高了路基检测成像的精度, 更容易发现路基检测中的脱空和裂隙。

关键词:道路工程; 路基检测; 离散小波变换; 映射复小波变换; 图像处理

中图分类号:U416.1; TP31 **文献标志码:**A

Directional enhance algorithm in subgrade detecting image

WANG Wei-ya¹, HUANG Ping-yun², HAN Yu-hui¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To remedy the defect of discrete wavelet transform in direction subgrade of roadbed radar image, this paper proposed a method using projection-based complex wavelet transform to enhance the image direction. The complex wavelet transform can enhance the subgrade radar image in every direction. The test proved that projection-based complex wavelet transform works good in directional enhance with shift-insensitive and explicit phase information in radar subgrade image processing, it has a better results than the one of discrete wavelet transform. 11 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; subgrade detecting; discrete wavelet transform; projection-based complex wavelet transform; image processing

0 引言

由于自然灾害、地质条件变化和公路老化等因素的影响, 路基会出现裂痕或空洞。为了避免公路因为这些因素造成交通事故或者交通中断, 需要对路基进行检测, 查找路基裂痕和空洞, 并进行相应的维护工作。路基检测常用的方法有随机钻孔取芯法

和探地雷达无损检测法等^[1-2]。由于探地雷达监测对路基和路面不会造成破坏, 所以成为最常用的方法之一。探地雷达路基检测是通过雷达扫描, 然后利用成像的方法对扫描结果进行分析, 从中发现存在的问题。图像处理的好坏直接影响到路基检测的结果。针对探地雷达的图像处理, 研究人员提出了很多算法来提高雷达图像处理的准确性, 如离散小

收稿日期: 2008-02-15

基金项目: 陕西省科技攻关项目(2007K04-15)

作者简介: 王卫亚(1964-), 男, 河南陕县人, 副教授, 工学博士, E-mail: weiwang@chd.edu.cn.

波变换^[3,4]、相干数据体算法^[5]等。在众多的探地雷达图像处理算法中,小波变换是应用最多和最成功的算法之一。传统的离散小波变换(DWT)每个尺度空间只能分解为有限的3个方向(水平、垂直和对角方向)。为解决这个问题,Kingsbury^[6]提出了二元树复小波变换(DTCWT),其特点是具有良好的方向性,克服了平移敏感性,并具有清楚的相位信息,在地震资料处理和图像的纹理分析等方面取得了很好的效果。中国一些学者也将其用在指纹等图像处理中^[7],实现了图像的方向性滤波。但是,设计Kingsbury的二元树复小波变换滤波器非常复杂,需要进行反复的迭代运算,还有较大的冗余(对于 m 维信号它有 2^m 的冗余)。为此,本文提出了采用基于影射的复小波变换来增强图像的方向性,弥补DWT平移敏感性以及缺乏相位信息的缺点,以便更有效地检测道路的脱空和裂隙。

1 图像处理的方向性增强算法理论

1.1 相关概念及定义

1.1.1 复小波变换

复小波变换与实小波变换基本相同,不同之处在于复小波变换使用的滤波器系数是复数,输出结果也是复数。在可分离的二维实小波变换中,二维小波滤波器是一行滤波器和列滤波器的乘积,而复小波变换中小波滤波器只在 $[0, \pi]$ 区间内有响应。如果要以相同的方式来构造二维复小波变换滤波器,只能覆盖单位频率单元的第1象限,但是实数图像数据却包含有第1象限和第2象限的非冗余信息。为了不丢失信息,就必须扩展二维可分离操作,使等效滤波器能覆盖负的水平频率轴。为此,至少需要使行、列滤波器中的一个滤波器的系数为共轭复数。

1.1.2 Softy 空间

定义1 令 $V_k(k \in \mathbb{Z})$ 是由长度为 M 的尺度滤波器 h_k 、相对应的尺度系数序列张成的实嵌套空间,其中 \mathbb{Z} 为实数集。设 h^+ 是长度为 N 并满足Flex定义的正反滤波器描述条件的映射滤波器,用 h^+ 将 V_k 中的实尺度系数序列映射到 $V_k^+(k \in \mathbb{Z})$ 中的复尺度系数序列。定义与 h_k 、 h^+ 相关的Softy空间 $S_{M,N}^+$ 为

$$S_{M,N}^+ \triangleq \bigcup_{k \in \mathbb{Z}} V_k^+$$

该定义通过长度为 M 的尺度滤波器 h_k 和长度为 N 的映射滤波器 h^+ 的系数序列创建了一个函数空间标架。为了方便,本文记为 S^+ 。另外,设 f_x^+, g_x^+ 为 S^+ 内的任意两个函数,即

$$f_x^+ = \sum_{n \in \mathbb{R}} c_f^+(n) \varphi(2^k x - n)$$

$$g_x^+ = \sum_{n \in \mathbb{R}} c_g^+(n) \varphi(2^k x - n)$$

式中: $c_f^+(n)$ 、 $c_g^+(n)$ 分别为 f_x^+ 、 g_x^+ 的尺度系数序列,则 $\langle f_x^+, g_x^+ \rangle_+ = \langle c_f^+(n), c_g^+(n) \rangle; \varphi(2^k x - n)$ 为滤波器的参数函数。

1.1.3 Hardy 空间

定义2 若一个复数域的向量空间,当频率小于0时其能量为0,则称这个空间为Hardy空间,即

$$H^2(C) \triangleq \{f \in L^2(R) : F(\omega) = 0 (\omega < 0)\}$$

式中: R 为实数域; n 为滤波器的尺度长度; C 为复数域; f 为频率; $F(\omega)$ 为能量变换函数。

通常Hardy空间认为是复数域中的向量空间,由于在实际的信号处理和图像处理中,用到的信号一般都是实数空间 $L^2(R)$ 中的函数,为了建立 $L^2(R)$ 与 $H^2(C)$ 的联系,将Hardy空间定义在实数域中。在实空间中可以证明 $L^2(R)$ 与 $H^2(C)$ 是同构的,可以建立一一映射关系。从而可将 $L^2(R)$ 内的信号映射到 $H^2(C)$ 内,然后进行DWT变换,从而增强方向性,减少平移敏感性,并可提供清楚的相位信息。这里以 $F^H(\omega)$ 表示 $L^2(R)$ 内的序列 $F(\omega)$ 到 $H^2(C)$ 内的映像,则 $F^H(\omega)$ 可定义为

$$F^H(\omega) \triangleq F(\omega) x_{[0, \infty)}(\omega)$$

其逆映射定义为

$$F(\omega) \triangleq F^H(\omega) + F^H(-\omega)^* - x_{[0, \infty)}(\omega) \cdot \left[\frac{F^H(\omega) + F^H(-\omega)^*}{2} \right]$$

其中, $x_{[0, \infty)}(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega \geq 0 \\ 0 & \omega < 0 \end{cases}$

1.2 映射的复小波变换

复小波变换(CWT)是 $L^2(R)$ 空间函数在Softy空间映像的DWT。因此,从 $L^2(R)$ 到Softy空间的映射滤波器与 $L^2(R)$ 到Hardy空间的映射滤波器较近似,可以采用Hardy空间的映射滤波器进行滤波,由于它是复数域的小波变换,所以输出结果为复数。由于Hardy空间的映射具有良好的增强方向性、减少平移敏感性,并可提供清楚的相位信息,从而CWT也就具有清楚的相位信息、较强的方向性和近似的平移不变性。同时,由于它可选用无冗余的映射滤波器,因而可实现无冗余变换,这就对处理大量的数据非常有用。

映射的复小波变换(Projection CWT)就是在进行离散小波变换之前或之后,采用映射滤波器对数据进行处理,然后再逆映射回原有的空间中,其流

程如图 1 所示。

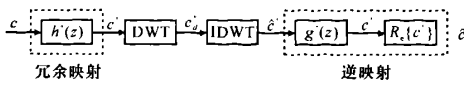


图 1 基于映射的冗余 CWT 及其逆变换

图 1 是一维基于映射的冗余复小波变换的框图,与 Softy 空间的 DWT 相似。它首先将待分析信号 c 从时间域映射到 Softy 空间,然后做 DWT 变换;在时间尺度域中做必要的处理后,再做逆离散小波 (IDWT) 变换;处理完成后,再把信号逆映射回时间域 $R_c\{c^+\}$,最后得到信号 e 。其中, $g^+(z)$ 是 $h^+(z)$ 的逆滤波器。图中, c^+ 为 c 的 $h^+(z)$ 变换信号,其余以此类推。

同样,将无冗余映射用于 DWT,便得到基于映射的无冗余 CWT,图 2 是无冗余 CWT 及其逆变换的框图。 c 通过无冗余映射滤波器得到其 Softy 空间的映像 \tilde{c}^+ , \tilde{c}^+ 的 DWT 变换结果 \tilde{c}_d^+ 就是 c 的无冗余 CWT。如果映射滤波器由一个多相成分的低通滤波器生成, DWT 用正交 DWT,则这个无冗余 CWT 也是正交变换。

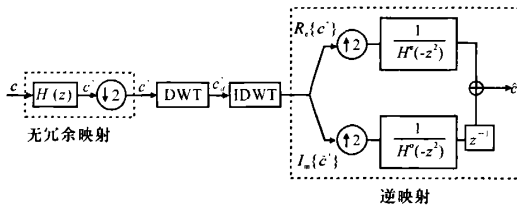


图 2 基于映射的无冗余 CWT 及其逆变换

逆变换是首先计算 \tilde{c}_d^+ 的 IDWT 变换 \tilde{c}^+ , 然后将 \tilde{c}^+ 用图 2 所示的逆映射滤波器变换到时间尺度域中, 得到 e , 则有 $e = c$ 。其中, $H^+(-z^2)$ 、 $H^-(-z^2)$ 分别为系数全通滤波器的偶部和奇部; $\downarrow 2$ 表示采样; $\uparrow 2$ 表示插值; $R_c\{c^+\}$ 、 $I_m\{c^+\}$ 分别为变换信号的实部和虚部。由于 DWT 和无冗余映射都是没有冗余的, 因而这个变换也是无冗余的。与 DTWT 相比, 基于映射的复小波变换的最大优点是实现简单、冗余小。

1.3 二维无冗余 CWT 的逆变换

在信号处理中,经常需要将一个二维信号通过小波变换后的某一个方向的分量重构,而滤除其他方向的分量。二维 DWT(2D DWT) 只能重构出垂直、水平和对角方向的分量,它不能把正负分量区分开来;而采用二维 CWT(2D CWT) 就可实现这个目标。二维无冗余复小波变换的逆变换见图 3。

图 3 中, g_x^+ 、 g_x^- 分别为 h_x^+ 、 h_x^- 滤波器的逆滤波器,而与滤波器 h_x^+ 对应的逆映射,需要用图 4 所示

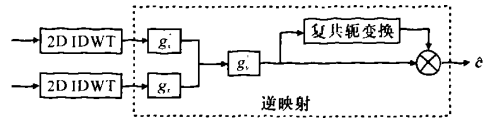


图 3 二维无冗余复小波变换的逆变换

的滤波器组来实现。其中,输入 HH^+ 、 LH^+ 、 HL^+ 、 LL^+ 为滤波器 h^+ 对分析信号 c 的行列在垂直和水平方向产生的正半平面输出; HH^- 、 LH^- 、 HL^- 、 LL^- 为滤波器 h^- 对 c 的行列在垂直和水平方向产生的负半平面的输出; \tilde{S} 为中间变量。

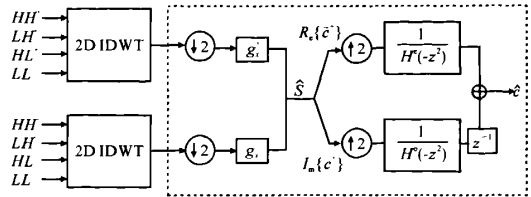


图 4 无冗余二维复小波变换的逆变换

2 算法验证

映射的复小波变换既可以采用前置滤波器,也可以采用后置滤波器,常用的滤波器可以是极大平滑滤波器 $H_{+max,flat}$ 或极小、极大滤波器 $H_{+min,max}$,其频率响应如图 5 所示。 $H_{+max,flat}$ 、 $H_{+min,max}$ 平移 π 后可以得到 $H_{-min,flat}$ 和 $H_{-min,max}$ 滤波器的频率响应。

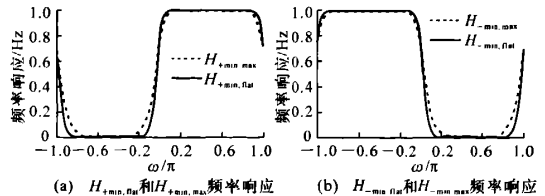


图 5 映射滤波器的频率响应

采用前置滤波器对一个圆盘图像进行处理。首先将图像进行滤波,然后映射到 Softy 空间,再进行逆映射,结果如图 6 所示。从图 6 中可以看出,逆映射和原始变换图像之间误差很小,只有 4.440×10^{-16} ,可见这种映射是可以完全重构的。

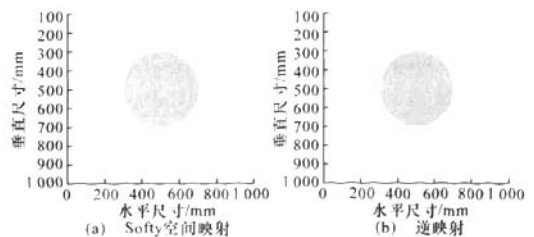


图 6 圆盘图像的 Softy 空间映射和逆映射

图 7 是用前置滤波器对图 6(a)的圆盘图像做二维复小波分解的结果。由图 7 可以明显看出,二维复小波变换增强了图像的方向性。

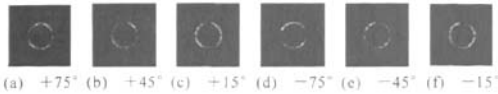


图 7 二维复小波变换对图像 6 个方向的增强

3 应用分析

公路路基检测可以采用探地雷达或其他检测设备对路基进行扫描,扫描得到的图像需要做进一步的分析,可能需要从各个角度分析层序分布情况。传统的离散小波检测只能得到水平、垂直和对角分量,无法进行详细地分析,通过映射复小波变换则完全可以解决这个问题。图 8 为某段路基检测的原始图像,从原始图像中无法看到路基的真实情况。

对原始图像进行 DWT 变换后,可以得到水平、垂直和对角 3 个方向的分量,如图 9 所示。

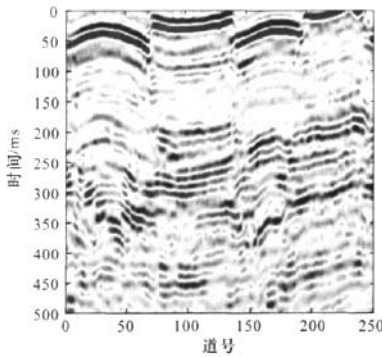


图 8 某段路基检测的原始图像

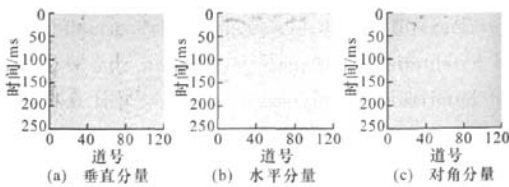


图 9 DWT 分解的 3 个方向的分量

从图 9 可以看出,3 个方向的分量并没有显示出多少有用的信息,也没有反映出路基存在的问题,所以,分析 DWT 对原始图像的处理结果,也很难得出正确结论。如果采用复小波变换,就可得出各个方向上增强的图像。图 10 是采用复小波变换对原始图像进行分解处理,得到 6 个方向的分量: -75° 、 -45° 、 -15° 、 $+75^\circ$ 、 $+45^\circ$ 和 $+15^\circ$ 的 6 个方向分量小波域谱。

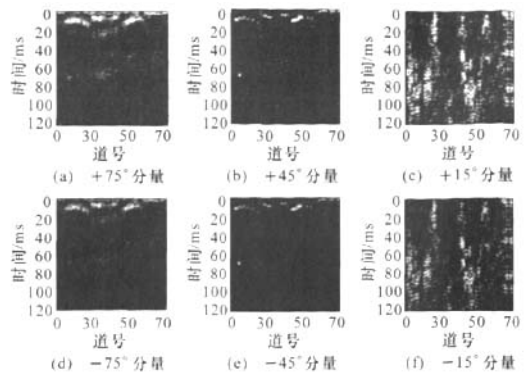


图 10 二维无冗余复小波分解后 6 个方向的分量

通过分析地层分布情况,可以判断出路基特征,特别是能判断出路基是否存在断层或者裂缝,这对道路的维护非常重要。从图 10 中的 6 个方向的分量可以判断出裂缝主要为垂直方向($\pm 15^\circ$),而在水平方向($\pm 75^\circ$)和对角方向($\pm 45^\circ$)则分布很少。图 11 是将 $+15^\circ$ 方向分量进行放大,它清楚地显示出该角度域的几个裂缝。这些裂缝如果只采用 DWT,则无论从原始检测数据还是 DWT 分解得到的 3 个方向分量,都很难判断出路基的层序特征。

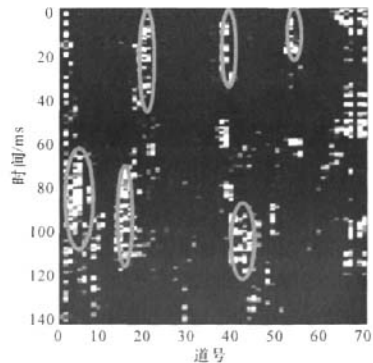


图 11 $+15^\circ$ 方向分量放大显示

4 结 语

(1)应用分析表明,二维无冗余复小波变换可以很好地增强图像的方向性,并且具有平移近似性和明显的相位信息。

(2)二维无冗余复小波变换是可逆的,因此,逆映射和原始图像的差距很小,经过逆映射的图像可以重构。

(3)在公路路基检测探地雷达图像处理中,采用映射复小波变换,可以对检测图像多角度地分析和处理,克服了传统离散小波变换只有水平、垂直和对

(下转第 63 页)

算结果有影响,但影响并不很大,一般在工程误差允许范围内,故在建模时可根据开裂状况以及电脑资源等实际状况,尽量选取小的失效宽度。

(3) 采用本文方法对甘洵河特大桥开裂状态进行分析,在只考虑实际结构中正裂缝的影响时,现有开裂箱梁结构的承载能力仅为原设计状态的80%。

参考文献:

References:

- [1] 李建峰,黄永刚. 钢筋混凝土梁裂缝原因及对策[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(5):71-73.
LI Jian-feng, HUANG Yong-gang. Reasons and countermeasures of cracks in steel reinforced concrete beam[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(5): 71-73.
- [2] 崔军. 混凝土结构性能评估的损伤模型[D]. 西安: 西安公路交通大学, 1999.
- [3] Razaqpur A G, Nofal M, Mirza M S. Nonlinear analysis of prestressed concrete box girder bridges under flexure[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1989, 16(6): 845-853.
- [4] 周世军,朱晔. 钢筋混凝土箱梁的非线性有限元分析及模型试验研究[J]. 土木工程学报, 1996, 29(4): 21-30.
ZHOU Shi-jun, ZHU Xi. Nonlinear finite element analysis and model tests of reinforced concrete box girders[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(4): 21-30.
- [5] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [6] Fukumoto Y, Nishida S. Ultimate load behavior of curved I-beams[J]. ASCE J Eng Mech Div, 1981, 107(2): 367-385.
- [7] 陈惠发, A F 萨里普. 混凝土和土的本构方程[M]. 余天庆, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [8] 彭大文, 林志平, 邓丽琼, 等. 整体式桥台的曲线箱梁剪滞效应研究[J]. 公路, 2006(12): 9-14.
PENG Da-wen, LIN Zhi-ping, DENG Li-qiong, et al. A study on shear lag effect for integral abutment and curved box girders[J]. Highway, 2006(12): 9-14.
- [9] 王钧利, 贺拴海. 高墩大跨径弯桥在悬臂施工阶段刚结构的非线性稳定分析[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 30-34.
WANG Jun-li, HE Shuan-hai. Nonlinear stability analysis of long-span curve bridge with high piers during cantilever construction[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(2): 30-34.
- [10] 方志, 李红芳, 彭波. 体外CFRP预应力钢筋混凝土梁的受力性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(3): 40-47.
FANG Zhi, LI Hong-fang, FENG Bo. Mechanical behaviors of concrete beam of external prestressed CFRP tendons[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(3): 40-47.

(上接第44页)

角3个方向变换的缺陷,提高了路基检测成像分析的精度和准确度,更容易测出路基中的脱空和裂缝。

参考文献:

References:

- [1] 赵茂才,刘德海. 探地雷达在公路工程无损检测中的试验研究[J]. 辽宁交通科技, 2005(7): 1-3.
ZHAO Mao-cai, LIU De-hai. Experiment research on the ground penetrating radar in non-destructive testing of highway engineering[J]. Liaoning Communication Science and Technology, 2005(7): 1-3.
- [2] 潘欣,刘国栋,付军. 探地雷达在公路路基检测中的应用[J]. 交通科技, 2006(2): 51-53.
PAN Xin, LIU Guo-dong, FU Jun. Application of ground penetrating radar in subgrade inspection[J]. Transportation Science & Technology, 2006(2): 51-53.
- [3] 邹海林,宁书年,林捷. 小波理论在探地雷达信号处理中的应用[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 268-275.
ZOU Hai-lin, NING Shu-nian, LIN Jie. Application of wavelet theory in ground penetrating radar signal processing[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 268-275.
- [4] 肖艳军,李建勋. 基于小波变换的信号滤波在探地雷达中的应用[J]. 电波科学学报, 2006, 21(1): 140-145, 149.
XIAO Yan-jun, LI Jian-xun. Signal filtering based on wavelet transform and its application in ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of radio Science, 2006, 21(1): 140-145, 149.
- [5] 王晋国, 宁宇蓉, 田丰, 等. 基于相干数据体的裂隙检测方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 107-110.
WANG Jin-guo, NING Yu-rong, TIAN Feng, et al. Cranny detection methods based on coherence of data cube[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 107-110.
- [6] Kingsbury N G. Image processing with complex wavelets[M]. London: Phil Trans Royal Society, 1999.
- [7] 唐良瑞, 蔡安妮, 孙景鹭. 二元树复小波变换及其在图象方向滤波中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(4): 434-440.
TANG Liang-rui, CAI An-ni, SUN Jing-ao. Dual-tree complex wavelet transform and it's application to directional filter of image[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4): 434-440.