

基于DCT的探地雷达频率波数偏移优化算法

申家全^{1,2}, 闫怀志²

(1. 防空兵学院作战指挥系 郑州 450052; 2. 北京理工大学计算机网络攻防对抗技术实验室 北京 海淀区 100081)

【摘要】目前探地雷达频率波数偏移算法中插值运算涉及复数运算,且对所有频率波数域内的数据进行运算,易引起复数寄生量和计算量大的问题。由此在分析离散余弦变换特点的基础上,引入离散余弦变换代替傅里叶变换用于频率波数偏移算法,以实变换代替复数变换,解决复数寄生量的问题;利用离散余弦变换能量集中的性质,仅对部分主要的离散余弦分量对应的数据进行插值偏移处理,减少计算复杂度以实现插值算法优化。实测数据表明,该文所提的优化方法效果明显。

关键词 算法优化; 离散余弦变换; 频率波数偏移; 探地雷达

中图分类号 TN955.1

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.004

Optimization Algorithm Based on DCT in Domain of Frequency-Wave Number Migration on Ground Penetrating Radar

SHEN Jia-quan^{1,2} and YAN Huai-zhi²

(1. Department of Command and Control, CPLA Air Defense Forces Academy Zhengzhou 450052;

2. Lab for Computer Network Defense Technology, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081)

Abstract Fourier transform is usually used in the domain of frequency-wave number transformation in ground penetrating radar. But the interpolation algorithm needs all the data in the domain of frequency migration. So discrete cosine transform (DCT) is presented to replace Fourier transform to do migration. According to the character of the concentration of energy of DCT, the interpolation processing is applied only to the data related with main components on DCT in the domain of frequency. Test result shows that DCT can be a good substitute to Fourier transform and suggested optimization algorithm has less computation and no plural parasitic data.

Key words algorithm optimization; discrete cosine transform; frequency-wave number migration; ground penetrating radar

偏移算法又称为合成孔径算法,常用于目标的成像处理,在探地雷达信号处理中有着重要的应用。在各种偏移算法中,由于采用快速傅里叶变换(FFT),频率波数偏移算法^[1-2]明显比微波全息等时域偏移算法高效^[3]。但在进行stolt插值^[4]时,需要对所有的频率波数范围内的数据进行处理,数据量大会影响算法效率;另外,由于涉及复数运算,在频率波数域进行偏移处理时,若插值方法选择不当,经反变换后会出现复数寄生量,影响偏移处理效果。

离散余弦变换(DCT)是一种特殊的傅里叶变换,属于傅里叶变换关于原点对称的扩展,具有良好的数据压缩性能,在数据编码、数据压缩^[5]等方面应用广泛。与傅里叶变换不同,DCT具有良好的能量集中性,其变换后的能量主要聚集在部分低频分量^[6]中。另外由于其为实数变换,若进行偏移处理,

不会存在复数寄生量。因此,本文引入离散余弦变换代替傅里叶变换,使频率波数偏移算法在实数域进行,克服了插值方法不当产生的复数寄生量的问题,利用其能量集中的特点,使用部分主要的低频分量进行偏移处理,实现了对频域波数偏移算法的优化。

1 算法原理

1.1 频率波数偏移算法原理

根据惠更斯原理,探测背景媒质上每个点的回波信号 $\mathbf{X}(x, z, t)$, 满足电磁波的波动方程^[7]为:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right] \mathbf{X}(x, z, t) = 0 \quad (1)$$

对式(1)进行傅里叶变换,可得:

$$\left[k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{v^2} \right] \mathbf{F}_X(k_x, k_z, \omega) = 0 \quad (2)$$

式中, k_x 、 k_z 分别为方向变量 x 、深度变量 z 的波数; ω 为角频率; v 为媒质中的波速; $\mathbf{F}_X(\cdot)$ 为作用于 $\mathbf{X}(x, z, t)$ 的傅里叶变换算子。一般采用FFT快速算法, 由 $\mathbf{F}_X(k_x, k_z, \omega) \neq 0$ 可得:

$$k_x^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{v^2} = 0 \quad (3)$$

由式(3)可以求取 ω 与 k_x 、 k_z 的关系。因电磁波回波时间为双程走时, 实际波速按一半计算, 则有:

$$\omega = \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \quad (4)$$

$$d\omega = \frac{vk_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} dk_z \quad (5)$$

式(4)和式(5)实现了频率波数域 $\omega \rightarrow k_z$ 变换。一般用插值的方法实现该变换, 称为stolt插值^[8-9]。采用的stolt插值方法不同, 合成孔径算法的效果也不同, 不合适的插值将产生新的寄生量, 影响聚焦效果。常用的插值方法有几何插值法、sinc函数插值^[10]法等, 其中sinc函数插值效果较好, 即有:

$$F'_{n+\Delta n} = \text{sinc}(\Delta n) \exp(-i\pi\Delta n) \times [(1-\Delta n)F_n] + \Delta n F_{n+1} \quad (6)$$

式中, Δn 为频率分量的增量; F' 为插值点; F_n 和 F_{n+1} 分别代表频域内的两相邻点的值, $n \in Z$ 。

1.2 离散余弦变换

离散余弦变换(DCT)是一种正交变换, 是离散傅里叶变换的关于原点对称的扩展, DCT与其反变换过程是实数运算, 没有复数变换。

对于 $M \times N$ 的矩阵 \mathbf{X} , 其DCT与DFT分别为:

$$D(p, q) = a_p a_q \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X(m, n) \times \cos \frac{\pi(2m+1)p}{2M} \cos \frac{\pi(2n+1)q}{2N} \quad (7)$$

$$F(p, q) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} X(m, n) e^{-j\frac{2\pi p}{M}m} e^{-j\frac{2\pi q}{N}n} \quad (8)$$

式中, $m, p = 0, 1, \dots, M$; $n, q = 0, 1, \dots, N$; a_p 和 a_q 分别为DCT变换的系数, 且有:

$$a_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M} & p = 0 \\ \sqrt{2/M} & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \quad (9)$$

$$a_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N} & q = 0 \\ \sqrt{2/N} & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases} \quad (10)$$

在式(7)中有:

$$\frac{\pi(2m+1)p}{2M} = \frac{2\pi p}{M} \left(\frac{1}{2}m + \frac{1}{4} \right) \quad (11)$$

$$\frac{\pi(2n+1)q}{2N} = \frac{2\pi q}{m} \left(\frac{1}{2}n + \frac{1}{4} \right) \quad (12)$$

由上述可知, DCT与DFT有关, 可以用 \mathbf{X} 进行2倍线性对称扩展后的DFT进行计算。DCT是傅里叶变换的特殊情况, 能够直接从FFT算法中求得, 不同的是一个实数信号的DCT是实数值, 所以DCT也提供了有关信号在频域的信息。

1.3 基于DCT的频率波数偏移优化算法

式(11)和式(12)说明DCT与DFT一样具有频率和波数信息, 且DCT的频率和波数分别是DFT的频率与波数的1/2。同理, 距离 z 的波数 k_z 也是DFT中对应波数 k_z 的1/2。因此, 表现频率-波数域 $\omega \rightarrow k_z$ 变换的式(4)和式(5)同样适应于DCT变换。

探地雷达B-scan数据为 x - t 域的采样数据, 可以用 $\mathbf{X}(x, t)$ 表示。设 ω 为频率, k_x 为 x 的波数, 引入波数 k_x 和频率 ω , 结合式(7), 则有:

$$D(k_x, \omega) = a_{k_x} a_\omega \sum_{k_x} \sum_{\omega} \mathbf{X}(x, t) \times \cos k_x \left(\frac{1}{2}x + \frac{dx}{4} \right) \cos \omega \left(\frac{1}{2}t + \frac{dt}{4} \right) \quad (13)$$

式中, $D(k_x, \omega)$ 到 $D(k_x, k_z)$ 的偏移可以用DCT反变换实现。参照DFT偏移方法, 则有:

$$\mathbf{X}(x, z) = a_{k_x} a_{k_z} \sum_{k_x} \sum_{k_z} \frac{vk_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \times D \left(k_x, \frac{v}{2} \sqrt{k_x^2 + k_z^2} \right) \times \cos k_x \left(\frac{1}{2}x + \frac{dx}{4} \right) \cos k_z \left(\frac{1}{2}z + \frac{dz}{4} \right) \quad (14)$$

因此, 在频率波数域中的DCT与DFT类似, 即可直接由式(4)、式(5)实现 $\omega \rightarrow k_z$ 的偏移, 具体过程如图1所示。

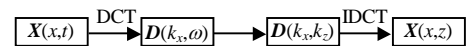


图1 DCT频率波数偏移算法实现流程图

由图1可知, DCT变换的一个突出优点是能量集中性优于DFT变换。经二维DCT变换后, 图像的能量主要集中在部分DCT低频分量上^[6], 即变换后频域能量谱图像的左上角; 可以选取部分主要的低频分量(能量谱图像左上角正方形区域内的分量)进行DCT反变换, 重构原目标信号, 即可用部分主要的低频分量近似代替整体分量。因此, 在使用DCT进行频率波数偏移时, 仅对部分主要的低频主要分量进行插值, 而其余部分均置0, 以减少插值运算量实

现算法的优化。应依据实际信号进行低频分量范围的选取。为保证图像聚焦效果, 通常选取能量谱图像左上角, 正方形区域的边长(采样点数表示)可取值为时间采样点数的1/5。另外, 在进行探地雷达实时数据采集时, 可仅存储DCT变换后的主要低频分量, 在实现数据压缩的同时可方便对数据进行偏移处理。

1.4 合成孔径算法的图像熵评价指标

合成孔径算法效果评价, 常用图像熵^[11-12]为指标, 则有:

$$Q = \frac{\left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 \right]^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}^4} \quad (15)$$

式中, m 为测点数; n 为时间采样点数; x_{ij} 表示第 i 个测点第 j 个时间采样点的数据, 且 $m, n, i, j \in Z$ 。图像熵越小, 探地雷达B-scan图像聚焦效果越好, 即合成孔径效果越好。

2 实验及结果分析

为了验证所提优化算法的效果, 本文使用瑞典MALA公司的RAMAC型CUIII主机的探地雷达进行以下两个实测实验。

实验 1 在混凝土墙体实验构件内预置5根钢筋, 钢筋深度为0.05 m, 直径为0.01 m, 间距约为0.1 m, 测点间距为0.002 m, 时间采样点数为312, 探测方向垂直于钢筋竖向由左向右。

实验 2 在砖墙内预置一个深为0.13 m, 大小为0.1 m×0.1 m×0.1 m的空洞, 空洞内放置0.08 m×0.08 m×0.08 m的方铁盒, 测点间距为0.002 m, 时间采样点数为240, 探测方向为水平由左向右。

由实验1所得的一个剖面数据及用3种方法处理后的效果如图2所示。使用DFT的快速算法FFT, 采用文献[10]的sinc函数插值法, 波速采用 1.2×10^8 m/s, 经偏移处理后, 发现经FFT偏移后的数据中存在复数寄生量; 对偏移处理后的数据取模, 5根钢筋的双曲线形状聚集为点状目标, 位置较为准确。而后使用DCT进行偏移处理, 波速和插值方法与FFT相同, 发现经DCT偏移处理后的图像为实数, 不存在复数寄生量, 聚集效果较为清晰, 目标位置准确。最后选取DCT变换后图像左上角正方形区域的数据, 正方形边长约为时间采样点数的1/5左右, 即仅对DCT变换后矩阵左上角点(1,1)和点(60,60)形成的正方形区域内的频率进行偏移处理, 其余置0。聚焦后的效

果与优化前的效果基本一致。

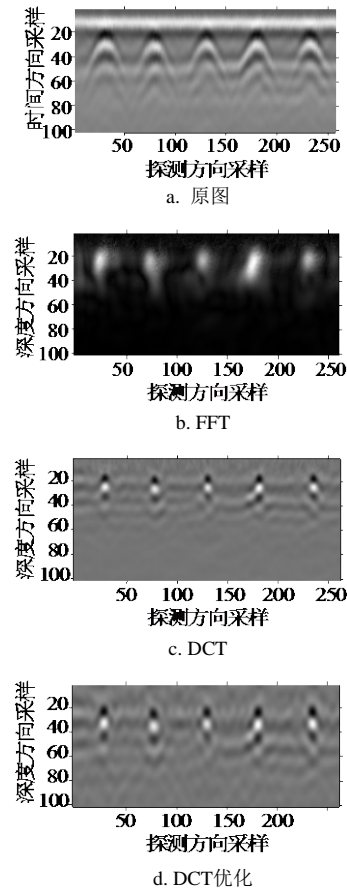


图2 原图及各种算法处理效果

另外, 本文以图像熵为指标, 分别计算FFT、DCT、DCT优化等3种算法的图像熵, 比较3种算法的聚焦效果。经计算可得, 3种算法的图像熵非常接近, 分别为0.040 4、0.069 8、0.049 5, 说明3种方法聚集效果相近。其中, FFT熵最小, DCT优化前的熵大于优化后的熵, 说明在优化时, 去掉的分量中大部分属于对目标聚焦有干扰的成分, 从另一个方面证明了优化算法的有效性。

最后, 本文从算法过程进行分析, 除变换方法不同外, 本文的算法与FFT偏移算法在插值过程有明显的差别: 在采用相同插值时, 本文的DCT偏移优化算法进行的是实数运算, 而FFT偏移算法进行的是复数运算。以式(6)的插值方法为例, 由于要对频域内相邻两点进行运算, 故在一次插值过程中, DCT偏移算法比FFT偏移算法少两次乘法运算和一次加法运算。另外, 由于减少了频域内插值的点, 其算法复杂度为优化前的1/25(频域各分量数选取为原分量数的1/5)。因此在插值过程中, 本文的DCT优化算法优于FFT算法。

实验2获得的数据及经DCT优化处理后的效果

如图3所示,其中波速和插值算法同实验1。由图3可知,经DCT优化方法偏移处理后,原图中的双曲线聚焦近似成为一个线状目标,说明目标顶部平整,与真实的目标特征相似,图像效果优于FFT算法,进一步说明了DCT优化算法的有效性。

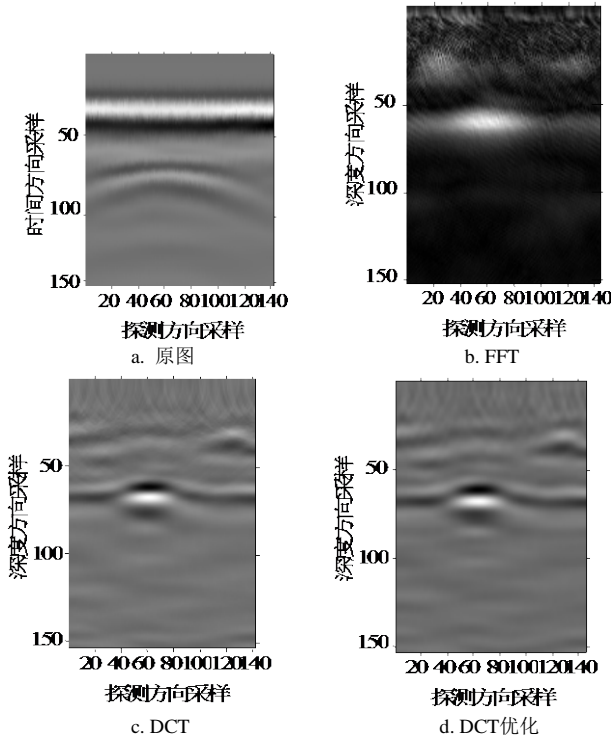


图3 墙体内部空腔预置方铁盒

3 结论

综上所述,离散余弦变换可以代替傅里叶变换应用于频率波数偏移算法,效果较好,没有复数寄生量;如果选用离散余弦变换分量得当,仅利用部分频域数据进行插值,即可以实现对算法的优化;在聚焦效果相近的情况下,插值过程的计算复杂度明显减少。另外,DCT优化算法的图像熵有时会小于优化前的图像熵,说明仅对部分主要分量插值,在实现数据压缩的同时,也去掉了不少的干扰信号,反而可使聚焦效果更好。

参考文献

- [1] 樊勇,周正欧,徐嘉莉.前视探地雷达波速估计及合成孔径成像研究[J].电子科技大学学报,2009,38(4):517-620. FAN Yong, ZHOU Zheng-ou, XU Jia-li. Research on velocity estimation and SAR imaging in forward-looking ground penetrating radar[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(4): 517-620.
- [2] 修志杰,陈洁,方广有,等.基于F-K偏移及最小熵技术的探地雷达成像法[J].电子与信息学报,2007,29(4):827-

330.

- XIU Zhi-jie, CHEN Jie, FANG Guang-you. Ground penetrating radar imaging based on F-K migration and minimum entropy method[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(4): 827-330.
- [3] 张春城,孔令讲,周正欧.实现浅地层探地雷达快速合成孔径成像的一种有效方法[J].现代电子技术,2006,239(24):111-114. ZHANG Chun-cheng, KONG Ling-jiang, ZHOU Zheng-ou. An effective method for realizing fast synthetic aperture imaging of shallow subsurface ground penetrating radar[J]. Modern Electronics Technique, 2006, 239(24): 111-114.
- [4] CHEN Hao, WU Ren-biao, LIU Jia-xue, et al. GPR migration imaging algorithm based on NUFFT[J]. Piers Online, 2010, 6(1): 16-19.
- [5] LIU Wen-liang, QIAN Jian-qiang, LI Yuan. Image auto-zoom technology for AFM automation[J]. Optoelectronics Letters, 2009, 5(2): 143-146.
- [6] 蒋建国,卢晓红,齐美彬,等.基于H.264的子带DCT快速算法[J].电子与信息学报,2009,31(2):391-395. JIANG Jian-guo, LU Xiao-hong, QI Mei-bin, et al. Fast algorithm of subband discrete cosine transform based on H.264[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(2): 391-395.
- [7] XU Xiao-yin, MILLER E L. A statistical method to localize buried landmines from GPR array measurement[C]//SPIE. Cambridge, MA, USA: SPIE, 2001.
- [8] STOLT R. Migration by Fourier transform techniques[J]. Geophysics, 1978, 43(1): 49-76.
- [9] 李志平,何国瑜.基于STOLT插值聚焦的二维近场微波成像[J].电波科学学报,2007,22(1):47-52. LI Zhi-ping, HE Guo-yu. Two-dimensional near-field microwave imaging based on stolt-interpolation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(1): 47-52.
- [10] 张春城,周正欧.基于stolt偏移的探地雷达合成孔径成像研究[J].电波科学学报,2004,19(3):316-320. ZHANG Chun-cheng, ZHOU Zheng-ou. Ground penetrating radar synthetic aperture imaging based on stolt migration[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(3): 316-320.
- [11] XU Xiao-yin, MILLER E L. Entropy optimized contrast stretch to enhance remote sensing imagery[C]//IEEE 16th International Conference on Pattern Recognition. Quebec, Canada: IEEE, 2002.
- [12] 张春城,周正欧.浅地层探地雷达自动目标与定位研究[J].电子与信息学报,2005,27(7):1065-1068. ZHANG Chun-cheng, ZHOU Zheng-ou. Research on automatic target detection and orientation of ground penetrating radar in shallow subsurface application[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(7): 1065-1068.

编辑 黄莘