

基于时间反转矩阵理论的障碍物形态数据的确定

刘玉英

沈阳航空航天大学图书馆, 沈阳 110136

摘要 针对经典多重信号分类法(MUSIC)算法存在图像重建包含目标信息较少的问题,引入时间反转矩阵推导建立确定散射物图像的理论方法,分析改进 MUSIC 算法的定位精确性及其与阵元间距、信噪比、信号入射角度差间的关系。应用 Ipswich 数据集,试验得出改进算法实现了较好的数据图像重建,为算法在确定障碍物形状上的优势提供依据。通过对非对称的双圆形金属柱体对比试验,得出算法在高频情况下可以较好的完成图像重建,且频率越高图像重建的特征值越小,分辨率越高。

关键词 MUSIC 算法;时间反转矩阵;定位精确;Ipswich 数据集;微波

中图分类号 TN911.73

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.23.004

Determination of Morphological Data of Obstacles Based on Time Reversal Matrix Theory

LIU Yuying

Shenyang Aerospace University Library, Shenyang 110136, China

Abstract Image reconstruction using classic multiple signal classification (MUSIC) algorithms contains little target information. To solve this problem, time reversal matrix theory was adopted to obtain the image of scattering objects. The positioning accuracy of the modified MUSIC algorithm and its relationship with array element space, signal-to-noise ratio, and difference of signal incident angle were analyzed. Ipswich experimental datasets indicate that the improved image reconstruction algorithm realized better image reconstruction, providing evidence for advantages of the algorithm and other algorithms in determination of the morphology of obstacles. Comparative experiment on non-symmetric double-circle metal cylinder shows that the algorithm achieved better image reconstruction in high frequency conditions, and the higher the frequency, the smaller the eigenvalue of image reconstruction, and the higher the resolution.

Keywords MUSIC algorithm; time reversal matrix; positioning accuracy; Ipswich datasets; microwave

电磁波传播时,如果介质有突变或者不均匀的情况发生,就会发生散射,其逆过程就是电磁逆散射。随着科技不断地高速发展,使得逆散射的研究有了明显的应用价值与突破^[1]。当前通过应用多传感器测量手段和计算机技术,可以高效的采集到很多的电磁逆散射数据信息,并且进行保存。进而采用科学的技术手段将这些数据进行处理以呈现出最终结果信息。多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法是20世纪80年代Schmidt团队提出的关于空间

谱估计算法^[2];1986年Lincoln实验室设计实现了RST-DFT系统^[3];Roy团队在1989年提出ESPRIT(estimating signal parameters via rotational invariance techniques)算法实现了采用阵列特性完成函数求解^[4];1996年Siemens完成了电子空间谱估计^[5];21世纪初Lincoln实验室实现了更完善阵列空间谱估计系统^[6]。相关研究人员以MUSIC为基础,不断提出基于各种理论参数估计算法,如ROOT-MUSIC算法^[7]、最小范数算法^[8]、TLS-ESPRIT^[9,10]算法等。其中与逆散射相关比较有代表

收稿日期:2014-02-20;修回日期:2014-05-19

作者简介:刘玉英,工程师,研究方向为计算机技术及应用,电子信箱:liuyuyin197905@163.com

引用格式:刘玉英.基于时间反转矩阵理论的障碍物形态数据的确定[J].科技导报,2014,32(23):33-38.

性研究有:在20世纪90年代左右,Wang等^[11]提出了一种解决了Born近似与Rytov近似的二维逆散射问题的有效方法,即是Born迭代法和变形Born迭代法。20世纪90年代中期,Lin等研究了在衍射层析成像以及等效源的背景下的一种逆散射方法,能够确定二维导体柱的几何形状与方位^[12]。该算法使得空间谱估计算法迈入了新的阶段,是空间谱估计理论体系的核心算法^[13]。但是近20年这一领域在具体的实际项目中却一直未能有很好的突破,极易出现获取数据的不准确性等问题^[14,15]。

本研究基于沈阳航空航天大学实验条件与研究基础,引入时间反转矩阵进行MUSIC算法的改进,实现更为精确的理想和扩展散射物图像数据的确定。

1 点数射体算法及验证

1.1 时间反转算法的理论模型

时间反转矩阵在任意一个格林函数向量的复共轭中都有运用。复共轭和噪音子空间是相互正交的。若存在任意一个点 r^p ,生成的导向矢量 $\{g\}_p$ 为

$$\{g\}_p = [G(r^1 - r^p, \omega), G(r^2 - r^p, \omega), \dots, G(r^N - r^p, \omega)]$$

其中 $G(r - r^p, \omega)$ 是二维情况下的格林函数, r^n 是第 n 条天线的位置。该导向矢量实质是格林函数因目标。若测试地点 r^p 与散射体位置相同,则有

$$D(r^p) = \sum_{n_0=M+1}^N \left| \left\langle \{\mu\}_{n_0}^*, \{g\}_p \right\rangle \right|^2 = 0 \quad (1)$$

其中, $\{\mu\}_{n_0}$ 表示含零特征值的时间反转矩阵 T 的特征向量。因此可利用绘制数量,获取散射体物图像

$$\chi(r^p) = \frac{1}{|D(r^p)|} = \frac{1}{\sum_{n_0=M+1}^N \left| \left\langle \{\mu\}_{n_0}^*, \{g\}_p \right\rangle \right|^2} \quad (2)$$

最后的计算结果处于散射体的最高位置。

1.2 改进算法的特性分析

MUSIC算法的基本思想则是对任意阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解,从而得到与信号分类相对应的信号子空间和与信号分量相正交的噪声子空间,引入1.1的时间反演算法的模型改进MUSIC算法,改进后算法特征如下。

1.2.1 算法DOA估计谱的模拟验证

图1为改进MUSIC算法的DOA(direction of arrive)估计谱。模拟2个独立窄带信号,各自以 20° 、 70° 方向入射进入到均匀线阵上,信号之间没有关联,和噪声无关,信噪比是20 dB。该噪声是理想的高斯白噪声,阵元之间的间隔是入射信号波长的一半,阵元数依次是10、50、100,快拍数是200,得到的仿真结果数据见图1。

从图1可知,若满足预设的条件,使用改进MUSIC算法可以产生针状的谱峰,能较好的预测到入射信号的数目以及方位。与此同时,还能成功地预测到独立信号源的DOA,若模型准确,预测DOA的精度就非常高,解决了以往测向定位精

度不够的问题。改进算法能让密集的信号空间里多辐射源的分辨率和测向定位的准确度都提升到较高的程度。由此可知超分辨率的改进算法不仅能够有较高的测向准确度以及敏感度,能分辨出多信号,而且其性能较强,效率高,还有很高的分辨率,可以很准确的确定预估角。这使得改进MUSIC算法在实际项目中有着重要价值。

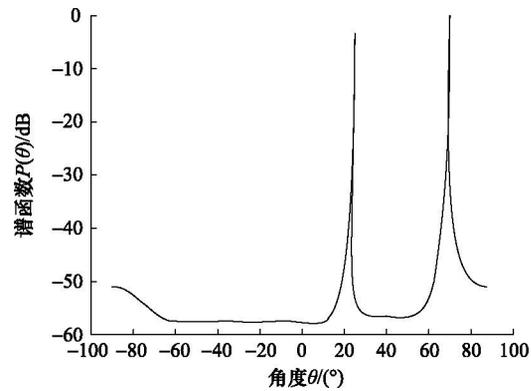


图1 DOA估计谱的模拟

Fig. 1 Simulation of DOA estimation spectra

1.2.2 改进算法DOA估计与阵元间距的关系

模拟2个独立窄带信号,各自以 20° 、 60° 方向入射进入到均匀线阵上,信号之间没有关联,和噪声无关,信噪比是20 dB。该噪声是理想的高斯白噪声。阵元之间的间隔是入射信号波长的 $1/6$ 、 $1/2$ 、 1 ,阵元数是10,快拍数是200,得到的仿真结果数据见图2。

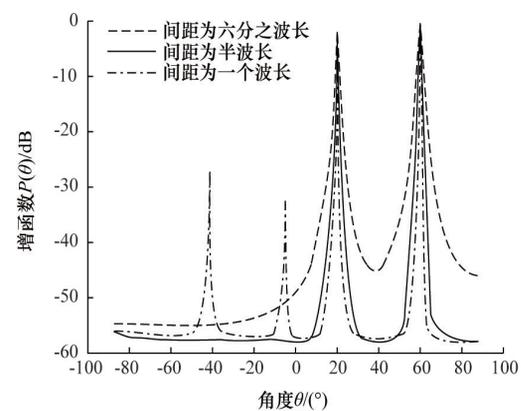


图2 阵元间距不同时改进算法的DOA估计谱

Fig. 2 DOA estimation spectra of the improved algorithm with different array element distance

从图2可知,若其他条件保持不变时,而阵元间距又小于半波长,如果阵元之间的距离慢慢变大,DOA预测谱的波束宽度逐渐变小,阵列的指向更加清晰。换言之,改进MUSIC算法的分辨力会因阵元之间的距离变大而变高。如果阵元之间的距离比半波长大,预测谱在信号源处没有产生虚假谱峰,但在别的方向都有虚假谱峰,这样便不能准确预估。所

以,在实际项目应用时,应特别的注意阵元之间的距离,其最大值一定要小于或等于半波长,距离设为波长的一半为最佳。

1.2.3 改进算法 DOA 估计与信噪比的关系

模拟2个独立窄带信号,各自以20°、60°方向入射进入到均匀线阵上,信号之间没有关联,和噪声无关,信噪比依次是-10、0、20 dB。该噪声是理想的高斯白噪声。阵元之间的间隔是入射信号波长的一半,阵元数是10,快拍数是200,得到的仿真结果数据见图3。

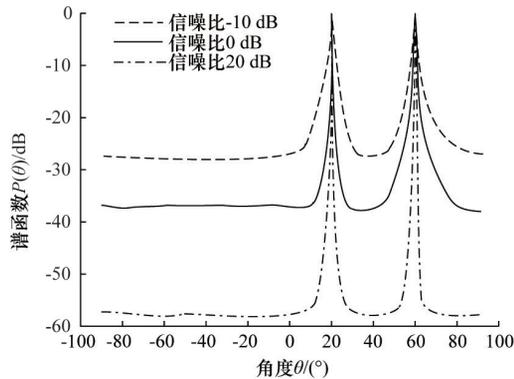


图3 信噪比不同时改进算法的DOA估计谱

Fig. 3 DOA estimation spectra of the improved algorithm with different signal-to-noise ratio

从图3可知,若别的条件保存不变时,当信噪比逐渐变大,DOA预测谱的波束宽度变小,阵列的指向性更加清晰,即改进MUSIC算法的分辨力增加。信噪比会关系到超分辨方位预测算法的性能。当信噪比值较小,算法的性能很低,所以处于低信噪比时要尽可能的让预测性能变高,也是超分辨DOA算法需要解决的问题。

1.2.4 MUSIC算法DOA估计与信号入射角度差的关系

模拟2个独立窄带信号,信号之间没有关联,和噪声无关,信噪比依次是20 dB。该噪声是理想的高斯白噪声。信号入射角度差依次是5°、10°、40°。阵元之间的间隔是入射信号波长的一半,阵元数是20,快拍数是200。得到的仿真结果数据见图4。

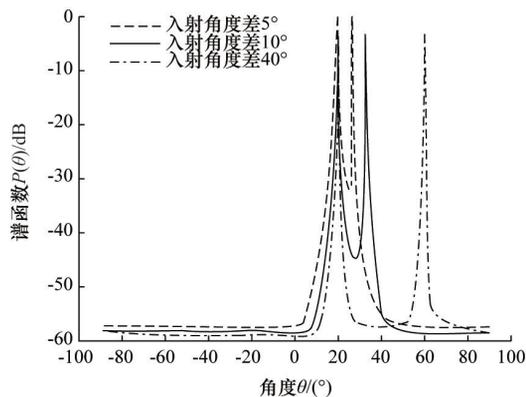


图4 角度间隔不同时改进算法的DOA估计谱

Fig. 4 DOA estimation spectra of the improved algorithm with different incident angle difference

从图4可知,若别的条件不变时,当信号入射角度差逐渐变大,DOA预测谱的波束宽度变小,阵列的指向性更加清晰,即改进算法的分辨力增加。如果信号来波的方向之间差角较小,就无法正确的预测到信号源的数目。一般情况下,对阵列信号源的数目进行预估的方法,均是在角度差较大时做的预测。所以,如果角度差比较小时,传统方法都不能准确预估。

2 扩展散射体的改进算法的应用设计

理想的点散射体应用改进MUSIC算法得出的结果非常好。然而,面向扩展目标物质散射体时,得出的结果还需验证。理论研究表明,矩阵图的结果以及特征值的数量决定了重建图像的结果。

2.1 Ipswich数据集的应用重建

在Ipswich和Massachusetts,美国的电磁测量设施得到了16个目标的电磁散射数据。在这些目标中,前面的3个目标数据较少,无法用来重建成像;最后的3个目标里有合成数据,也无法用来重建成像。因此,只剩下10个目标可以进行分析研究,即ips004至ips013。Ipswich数据是单一频率的远电场数据。它的波长 $\lambda=30$ mm,发射器和接收器分别处于半径为3.7 m和3 m的圆上。在半径为3.7 m的圆上有36个发射器,每个发射器之间都间隔10°。此时,接收装置在半径为3 m的圆上,有1800个接收器,每个接收器之间都间隔0.2°。而物体的折射率无法知晓。因为发射器与接收器距离散射体很远,可视为入射场在无穷远处发射,散射场在无穷远处散射,则有

$$\phi_n^{\text{in}} = (\mathbf{r}^n, \mathbf{r}^p, \omega) \mathbf{e}^{-jk_0 \mathbf{r}^n \cdot \mathbf{r}^p} \quad (3)$$

其中 \mathbf{r}^n ,第 n 条发射天线矢量的位置; ω ,发射天线的角度; \mathbf{r}^p ,散射体位置。将目标ips010和目标ips009预测为大小一样的树脂玻璃三角形。把目标ips011预测为 $R=60$ mm即半径是2倍波长的圆形铝洞。该洞从135°到225°结束。将ips010与ips011进行组合,得到目标ips012,多重静态响应矩阵图见图5(a),该目标的特征值图见图5(b),重建见图5(c)。由于Ipswich数据需要一个确切的时间实现数据假设,通常会出现的数据重建的模糊。从图中看出,矩形图的主瓣较窄,目标特征值的数量增加优势明显,重构图的分辨率较好,噪声水平较低,这些结果表明了改进算法在Ipswich数据应用中不仅保证了MUSIC算法的快速性,还改进了重建结果的图像质量,显然这样结构对于确定障碍物形状具有明显的参考价值。

2.2 非均匀的介质目标图像重建的算法应用

双圆形金属柱体(图6),图采用的显示面积是0.3 m×0.3 m,显然这是一类非均匀的介质目标。TE(transverse electric)波在4 GHz下的多重静态响应矩阵图,见图7(a),此时的多收发接收机数目静态响应比较清晰,可以较为明确的确定存在目标信息。此目标在4 GHz时的特征值图见图7(b),X轴

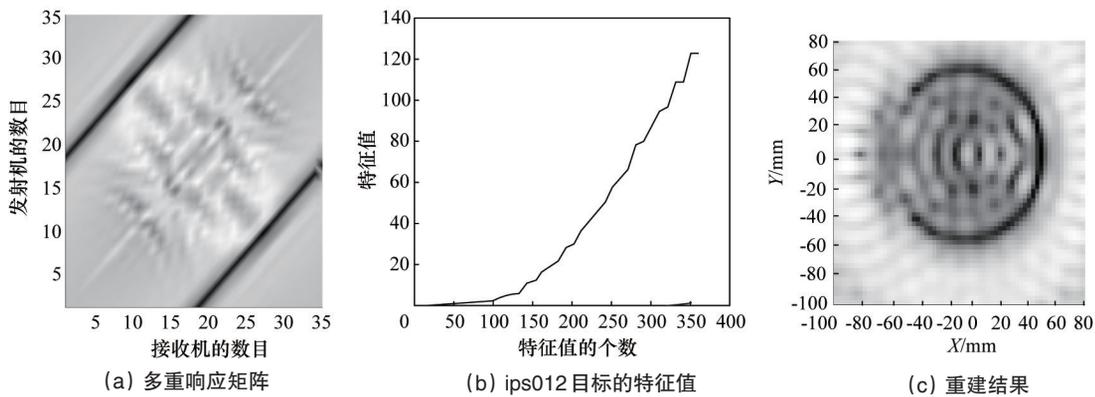


图5 图像重建

Fig. 5 Image reconstruction

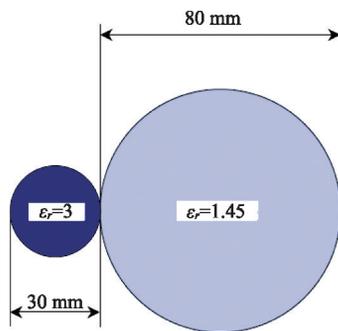


图6 双圆形金属柱体

Fig. 6 Double-circular metal cylinder

方向代表特征值数量, Y轴方向代表特征值, 结果看出此时目标特征值维持在350个左右, 这一数量使得确定双圆形金属柱体图像成为了可能。4 GHz频率下采取扩展改进MUSIC算法得到的重建结果图见图7(c), 显示的面积为75 mm×75 mm, 此时重建的结果并不清晰, 但依然可确定一定数量的目标信息, 相比经典算法还是具备一定优势。

TE波在8 GHz下的多重静态响应矩阵图见图8(a), 此时多收发接收机数目与图7(a)相比有一定的下降, 但依然足够明确的存在目标信息。该目标在8 GHz下特征值图见图8(b), 此时特征值个数未发生变化, 然而特征值大小却下降了大约1个数量级, 显然这对于目标数据的精确具有一定的意义。在8 GHz频率下用扩展的改进MUSIC算法得到的重建结果图见图8(c), 显示面积也为75 mm×75 mm, 此时较大圆柱重建的结果已经较为清晰了, 此时包含的目标信息的数量有了明显的提高, 说明这一条件下可以较好的实现80 mm大小的图像重建。

TE波在18 GHz下的多重静态响应矩阵图见图9(a), 此时的多收发接收机数目进一步变窄。该目标在18 GHz时的特征值图见图9(b), 此时特征值个数未发生变化, 然而特征值大小却下降了大约40倍, 这一大小对于明确较小的目标信息提供了可能。在18 GHz频率下用扩展的MUSIC算法得到的重建结果图见图9(c), 显示面积为75 mm×75 mm, 此时2个非对称圆柱信息重建的结果已经基本清晰, 基本包含对应的目标信息, 这一结果说明算法实现了目标信息重建, 可以进行障碍物数据的确定。

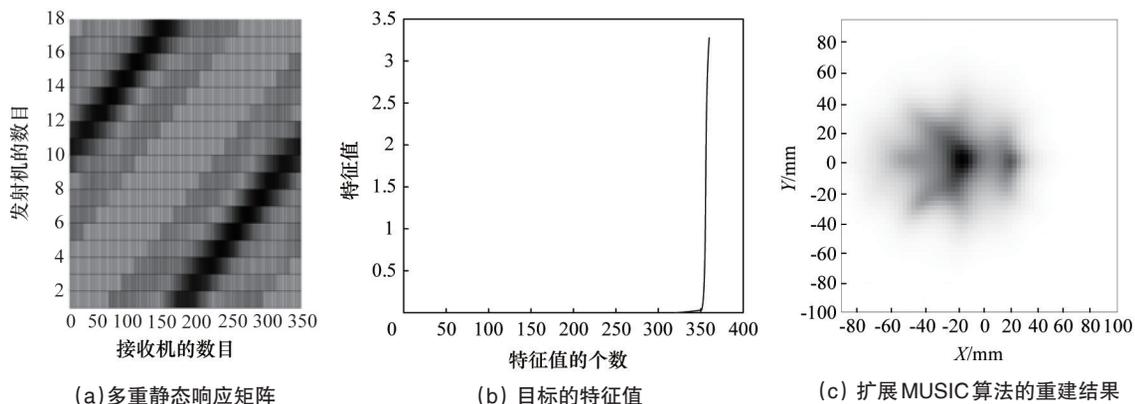


图7 4 GHz MUSIC算法的重建

Fig. 7 Reconstruction of 4 GHz MUSIC algorithm

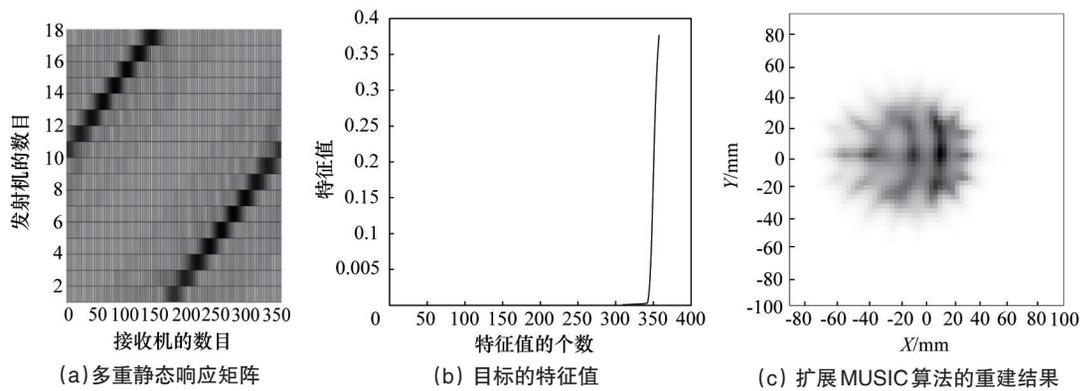


图8 8 GHz MUSIC算法的重建

Fig. 8 Reconstruction of 8 GHz MUSIC algorithm

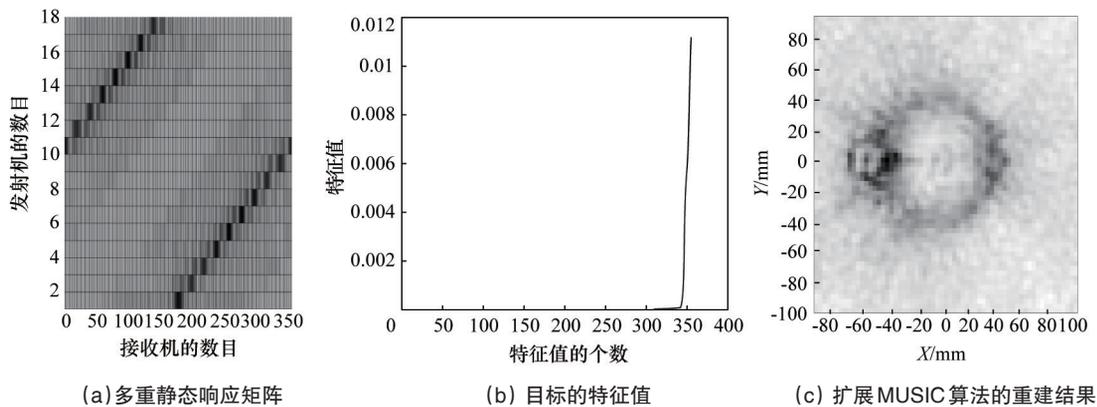


图9 18 GHz MUSIC算法的重建

Fig. 9 Reconstruction of 18 GHz MUSIC algorithm

由3种不同条件下的重建结果看出,算法在高频18 GHz条件下当特征值在0.01左右时可以很好地实现30 mm的数据重建,在8 GHz是只能实现80 mm数据图像重建,而低频时包含的目标信息不多。这一非对称介质的图像重建试验应用结果表明:引入时间反演矩阵理论的算法改进了经典算法的目标信息缺乏的问题,同时在相应的高频条件时可以基本实现图像重建。

3 讨论

经典的MUSIC算法尽管能够实现“准实时成像”的快速性,但其在重建质量及目标信息包含方面劣势明显。本研究引入了时间反演矩阵理论实现障碍物形态数据的确定改进MUSIC算法,在分析了改进算法DOA估计特性之后,首先完成了Ipswich数据的试验验证,利用特征值大小、数量和重构图的分辨率看出,改进算法实现了较好的Ipswich数据重建,这为算法与其他算法在确定障碍物形状上的优势提供了依据。最后对非对称的双圆形金属柱体进行了4、8、18 GHz条件下的实验对比,结果看出18 GHz时可以实现30 mm的数据图像重建,8 GHz能够实现80 mm数据图像重建,这为明确算

法的应用范围提供了依据,与此同时在3种条件下都包含了一定数量的目标信息,显然改进了经典算法目标信息极少的问题。改进的MUSIC算法具备图像重建的快速性,非对称数据图像重建的实现为MUSIC算法应用发展提供了一个方向,然而深入分析发现,算法在改进重建的图像质量中所包含的目标信息依然十分有限,特别是低频条件下,需要进一步完善算法的特性。

4 结论

采用时间反演矩阵改进MUSIC算法,分析了定位精确性与阵元间距、信噪比、信号入射角度差间的特性关系,利用Ipswich数据重建给出了改进算法在障碍物形状确定上的参考,在对非对称的双圆形金属柱体的图像重建试验中,发现了算法在高频情况下可以较好的完成图像重建,且频率越大图像重建的特征值越小,分辨率越高。

尽管算法相比于经典MUSIC在目标信息包含方面有了较好的改进,但依然需要更加完善的处理,从而实现目标信息更清晰、完整性重构。总的来说,这一研究对于图像技术的推广应用具有明显的借鉴价值。

参考文献 (References)

- [1] 欧阳华, 吴正国, 尹为民. dq变换和MUSIC算法在谐波检测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 24(5): 83-87.
Ouyang Hua, Wu Zhengguo, Yin Weimin. Application of dq transform and MUSIC algorithm in interharmonic detection[J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities, 2013, 24(5): 83-87.
- [2] Schmidt R. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [3] Haber F, Zoltowski M. Spatial spectrum estimation in a coherent signal environment using an array in motion[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 3(5): 301-310.
- [4] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1989, 37(8): 984-995.
- [5] Krim H, Viberg M. Two decades of array signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996, 13(4): 67-94.
- [6] Chargé P, Wang Y, Saillard J. An extended cyclic MUSIC algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2003, 51(7): 1695-1701.
- [7] Kirsch A. The MUSIC-algorithm and the factorization method in inverse scattering theory for inhomogeneous media[J]. Inverse Problems, 2002, 18(4): 1025.
- [8] Tsakalides P, Nikias C L. The robust covariation-based MUSIC (ROC-MUSIC) algorithm for bearing estimation in impulsive noise environments[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(7): 1623-1633.
- [9] Ammari H, Iakovleva E, Lesselier D. A MUSIC algorithm for locating small inclusions buried in a half-space from the scattering amplitude at a fixed frequency[J]. Multiscale Modeling & Simulation, 2005, 3(3): 597-628.
- [10] 刘剑, 于红旗, 黄知涛, 等. 基于二阶预处理的共轭扩展MUSIC算法[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(1): 57-60.
Liu Jian, Yu Hongqi, Huang Zhitao, et al. Conjugate extended MUSIC algorithm based on second-order preprocessing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2008, 30(1): 57-60.
- [11] Wang Y M, Chew W C. An iterative solution of the two-dimensional electromagnetic inverse scattering problem[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 1989, 1(1): 100-108.
- [12] Lin C Y, Kiang Y W. Inverse scattering for conductors by the equivalent source method[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1996, 44(3): 310-316.
- [13] Hua Y. A pencil-MUSIC algorithm for finding two-dimensional angles and polarizations using crossed dipoles[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1993, 41(3): 370-376.
- [14] 杨鹏, 杨峰, 聂在平, 等. MUSIC算法在柱面共形天线阵DOA估计中的应用研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 288-291.
Yang Peng, Yang Feng, Nie Zaiping, et al. DOA estimation of cylindrical conformal array by MUSIC algorithm[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(2): 288-291.
- [15] 何轲, 相敬林, 韩鹏, 等. 空间任意阵的MUSIC算法性能研究[J]. 计算机测量与控制, 2010(3): 688-690.
He Ke, Xiang Jinglin, Han Peng, et al. Performance analysis of MUSIC for arbitrary array[J]. Computer Measurement & Control, 2010 (3): 688-690.

(编辑 陈华姣)

·学术动态·



中国全面启动人类蛋白质组计划

2014年6月10日,“中国人类蛋白质组计划(CNHPP)”在北京召开第一次工作部署会,科学技术部、总后勤部相关领导及全国40多个科研单位的70余名院士、专家出席。

“人类蛋白质组计划(HPP)”是继“人类基因组计划”之后,人类全面探索自我奥秘征程中又一科技工程,是21世纪第一个国际大型科技合作计划。中国科学家率先倡导并领衔了人类第一个器官(肝脏)国际蛋白质组计划(HLPP),开中国引领国际大型科技合作计划之先河,所形成的理论框架、整体策略和技术标准被国际同行认可和应用,为人类蛋白质组计划的全面展开发挥了示范和指导作用。构建了人类第一个器官(肝脏)蛋白质组图谱,出版人类首个器官蛋白质组“百科全书”,相关数据得到国际著名专业机构等认同及广泛使用,成为人类蛋白质百科全书主体内容之一。近4年,中国在该领域国际核心期刊发文量直线上升,跃居世界第二。在乙酰化新的代谢通路调控机制、炎症诱发肿瘤、骨形成调节、疾病易感性等方面取得系列原创成果,被国际权威评为重大突破性进展。

“中国人类蛋白质组计划”产生的大数据将全景式地揭示人体蛋白质组成及其调控规律,解读人类基因组这部“天书”。构建的人类蛋白质组生理和病理图谱,将准确呈现各种病理状态下蛋白质组的变化,揭示疾病的发病机制和病理过程,发现系列新型诊断标志物、治疗靶点和创新药物,为全面提高疾病防治水平提供新策略新手段。

详见中国新闻网 <http://www.chinanews.com/gn/2014/06-10/6265206.shtml>。