

基于平面波谱理论的目标散射特性近场成像方法

樊红社¹, 李 萍², 许家栋²

(1 九江学院 电子工程学院, 江西 九江 332005; 2 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出了在微波暗室内基于平面波谱展开理论重构目标散射二维图像的方法, 探讨了该方法的成像原理, 建立成像算法流程, 最后通过了计算机数值仿真实验验证, 仿真结果表明了方法的正确性和有效性。

关键词: 平面波谱; 散射成像; 近场测量

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2010)01-0046-03

Scattering Imaging Method Based on Plan Wave Spectrum

FAN Hong-she¹, LI Ping², XU Jia-dong²

(1 School of Electronics Engineering, Jiujiang College, Jiujiang 332005, China;

2 Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Two-dimensional scattering distribution imaging approaches in near-field measurement are studied in the paper. Continuous-wave flat plane scanning method is proposed to get the coronal imaging. The acceptance signal is decomposed to a set of plan wave, which radiate in all directions. The phase of each wave is shifted according to its spreading angle so as to recover the original field on the coronal region, and synthesized together to reconstruct the scattering distribution. Computer simulation results show that the algorithm is effective and correct.

Key words: plan-wave spectrum; scattering imaging; near field measurement

1 引言

研究目标特性及武器隐身技术通常需要运用成像技术对目标的后向散射场进行计算处理, 从而获取目标在空间的散射信息, 如散射幅度、相位及极化等, 以此为依据进行散射问题分析和隐身故障诊断等。目标散射特性的传统测量一般是在远场条件下进行的, 它是利用增加散射体与照射源之间的距离来实现球面波到平面波的转换, 其主要缺陷是受外界环境影响大, 且随着目标尺寸的不断变大, 测试距离太远致使散射信号微弱, 易被非理想环境下各种杂散干扰电平所淹没。紧缩场法是利用偏馈抛物面产生平面波, 工程上也称模拟平面波法, 它对主反射面的机械加工精度有着很严格的要求, 造价很高。为了克服这些问题, 出现了目标散射特性的室内近场测量。

散射的近场测量是在辐射近场测量的基础上发

展起来的^[1-3], 它的优点是大大缩短了测试距离, 扩展了满足菲涅耳区暗室允许测试的目标最大尺寸, 有望实现大尺寸目标的散射内场测量。

文中从平面波谱展开的研究角度入手, 对目标散射特性的近场二维冠状面成像原理进行探讨, 建立近场条件下的二维散射冠状面像成像算法。最后通过计算机数值仿真实验验证了成像原理的正确性以及成像算法的有效性。

2 冠状面像的成像原理

建立如图 1 所示的系统坐标系, 被测目标放置于支架上, 支架平台的中心为坐标系的原点, 目标到扫描架的方向为 z 轴的正向, 沿竖直方向且背离地面指向的是 y 轴的正向, 右手螺旋可确定 x 轴。以 xoy 平面描述的的目标散射二维图像为冠状面像。

扫描架支撑的收发探头天线沿 x 、 y 两个方向进行散射测量, 记录各采样位置的散射回波信号。最

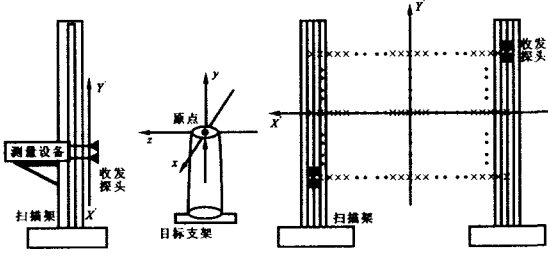


图1 冠状面成像系统空间几何关系示意图

终输出矩阵形式的数据,每个矩阵元素对应一个采样坐标点的散射回波信号.冠状面成像的基础任务就是对采样回波数据进行处理得到目标散射图像.

2.1 平面波谱展开

目标冠状面图像可近似认为是目标在 $z = 0$ 平面的散射强度分布 $E(x, y, z = 0)$, 目标散射场在采样面 $z = z_0$ 上各采样位置点的测量量可以表示为 $E(x, y, z = z_0)$, 它是散射场 $E(x, y, z = 0)$ 沿 $+z$ 方向传播 z_0 距离产生的.

由于场方程的线性性, 散射场可以表示为沿任意传播方向的平面波的线性组合, 即展开为平面波谱^[4]. 若令 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 表示沿任意方向传播平面波的幅度, 即空间波谱, k 表示波矢量的模, k_x, k_y, k_z 分别表示波矢量沿三个坐标方向的分量, 则 $z = z_0$ 平面的散射采样信号可以展开为下面形式:

$$E(x, y; z = z_0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y; z = z_0) \cdot \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z_0)] dk_x dk_y \quad (1)$$

且

$$k_z = \begin{cases} \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} & k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \\ -j\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2} & k_x^2 + k_y^2 > k^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, k_z 取实数对应着沿 $+z$ 方向传播的均匀平面波部分; 虚数取值对应非均匀平面波部分(隐失波)^[4-5], 它们随着 z 值的增大迅速衰减. 相应的, 空间波谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 存在下面关系等式:

$$F(k_x, k_y; z = z_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y; z = z_0) \times \exp[j(k_x x + k_y y + k_z z_0)] dx dy \quad (3)$$

冠状像平面 $z = 0$ 上散射场 $E(x, y, z = 0)$, 同样进行平面波谱展开, 可以写成

$$E(x, y; z = 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} F(k_x, k_y; z = 0) \times \exp[-j(k_x x + k_y y + k_z z_0)] dk_x dk_y \quad (4)$$

散射采样信号 $E(x, y; z = z_0)$ 代入式(1)可计算其空间谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$; 而成像待求量 $E(x, y; z$

$= 0)$ 又可以由 $z = 0$ 时的空间谱 $F(k_x, k_y; z = 0)$ 计算得到. 至此, 成像问题转化为由采样信号的空间谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 求解像平面对应的空间谱值 $F(k_x, k_y; z = 0)$.

2.2 空间波谱的传播

下面探讨测量位置的空间波谱与目标冠状面像对应的空间波谱之间的关系, 即如何从 $z = z_0$ 处的空间谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 计算得到 $z = 0$ 处的空间谱 $F(k_x, k_y; z = 0)$.

已知自由空间中, 电场满足下面形式的亥姆霍兹方程^[4-6]:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (5)$$

对式(5)沿 x, y 方向进行二维傅里叶变换, 得到其空间谱域的表达式:

$$(k_x^2 + k_y^2 + \frac{\partial}{\partial z^2}) F(k_x, k_y, z) - k^2 F(k_x, k_y, z) = 0 \quad (6)$$

由色散关系, 式(6)可以重写为:

$$\frac{\partial}{\partial z^2} F(k_x, k_y, z) - k_z^2 F(k_x, k_y, z) = 0 \quad (7)$$

只考虑沿 $+z$ 方向传播的场, 式(7)具有下面通解形式:

$$F(k_x, k_y, z) = F(k_x, k_y, z = 0) \cdot \exp(-jk_z z) \quad (8)$$

依据上面等式, 就可以由散射场在 $z = z_0$ 时的空间谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 计算得到 $z = 0$ 像平面的空间谱 $F(k_x, k_y; z = 0)$, 然后傅里叶反变换得出目标二维冠状面像. 至此就完成了目标散射特性冠状面成像原理的讨论.

3 近场冠状面成像的算法处理流程

依据近场冠状面成像原理, 可以给出目标散射特性近场冠状面成像的算法处理流程:

(1) 对近场采样的回波信号沿采样方向作二维傅里叶逆变换(式(3)), 获取采样信号的空间谱值 $F(k_x, k_y; z = z_0)$;

(2) 对上面计算得到的空间谱域数据进一步处理(式(8)), 获取冠状像平面上散射场的空间谱 $F(k_x, k_y; z = 0)$;

(3) 对冠状面像的空间谱进行二维傅立叶变换(式(4)), 获取冠状面图像所对应的目标散射强度值 $E(x, y, z = 0)$, 画出二维冠状面散射图像.

4 数值仿真验证

下面将通过数值仿真实验对平面采样的冠状面

成像算法进行验证. 仿真的成像系统和目标模型如图 2 所示, 采样面大小 $2\text{m} \times 2\text{m}$, 距原点 1.9m , 仿真信号频率 3GHz , 仿真采样间隔 0.018m .

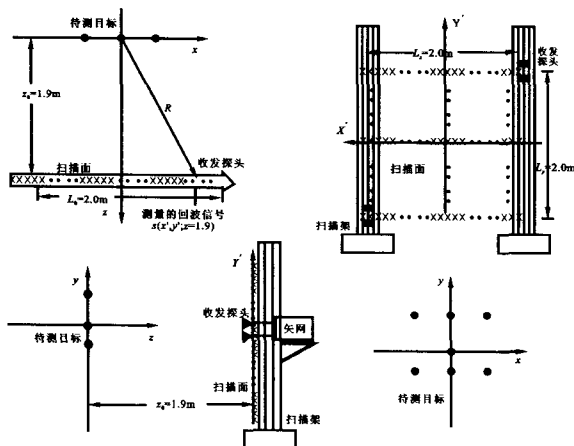


图 2 目标模型与成像位置关系示意图

4.1 仿真的目标模型

目标模型包含了多个散射目标点, 它们不均匀地散落于坐标 xoy 平面上, 坐标位置分别为 $(0,0)$, $(0.3, -0.15)$, $(0.3,0.3)$, $(-0.3, -0.15)$, $(-0.3,0.3)$, $(0, -0.1)$, $(0,0.2)$, 七个散射点的散射强度一致.

4.2 回波信号仿真结果分析

目标散射系数、发射功率及天线增益等常数量均归一化为 1, 图 3 中幅度信息是相对量. 图 3(a) 为采样信号 $E(x, y; z = z_0)$ 在采样面上的幅度分布, 从图中可以看出信号幅度随坐标起伏很大, 变化很快. 这种变化体现了七个散射中心回波信号矢量叠加的作用效果. 右图为采样信号通过平面波谱展开得到的空间谱 $F(k_x, k_y; z = z_0)$ 的幅度分布.

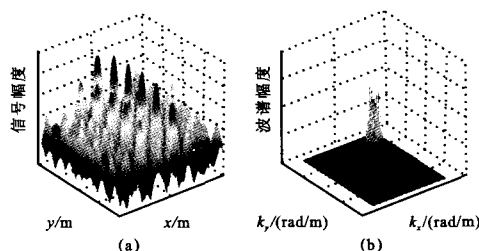


图 3 回波信号仿真结果

4.3 散射图像仿真结果分析

图 4 和图 5 描述的是冠状面散射图像的相关量.

图 4(a) 给出的是冠状面像的空间谱分布 $F(k_x, k_y; z = 0)$, 颜色代表幅度信息, 需要注意的是, 此时波谱的支撑区域是一个圆域, 圆域内信号空间谱值与图 3(b) 相同, 圆域外信号空间谱值为零, 等

效于图 3 中采样信号的空间谱通过了一个图 4 中右图所示的圆域空间频率滤波器. 空间谱值为零的这部分信号代表了不满足实数色散关系的隐失波, 也就是式(2)中 k_z 为虚数的部分.

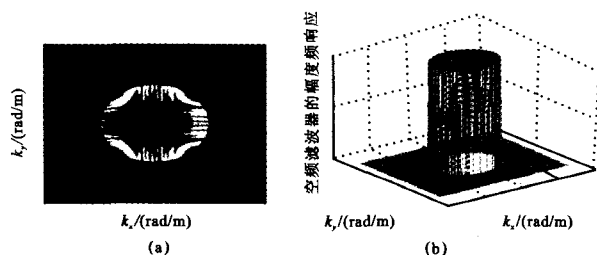


图 4 冠状面像的空间谱分布仿真结果

图 5(a) 和图 5(b) 分别是三维脉冲和二维平面形式描述的成像结果, 图像中各散射中心位置与设定一致, 各散射中心的散射强度也基本相同.

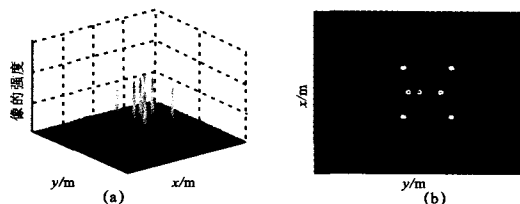


图 5 冠状面像的成像仿真结果

5 结束语

针对室内近场的目标散射特性成像问题, 文中基于平面波谱理论, 采用连续波平面均匀采样目标散射场的方法实现了目标散射特性的冠状面二维成像. 将测量的散射场回波信号表示成一组沿任意方向传播的平面波相叠加的形式, 得到散射信号的空间谱分布, 经过处理计算目标像的空间谱分布, 然后经傅里叶变换得到目标散射图像. 最后通过了数值仿真的实验验证.

参考文献:

- [1] Mensa D L. High resolution radar imaging[M]. Norwood, MA: Artech House, 1991.
- [2] Ivan J Lahaie, Edward L Lebaron, Joseph W Burns. Far field radar cross section predictions from planar near field measurements[C]// IEEE AP - S Symposium. USA: Chicago, 1992: 1542 - 1545.
- [3] 张福顺, 毛乃宏. 用近场测量研究目标散射特性的一种新方法[J]. 西安电子科技大学学报, 1997, 24(6): 217 - 220.
- [4] 方大纲. 电磁理论中的谱域方法[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1995.
- [5] 陈军. 光学电磁理论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

(下转第 52 页)

比,如图 3 所示.

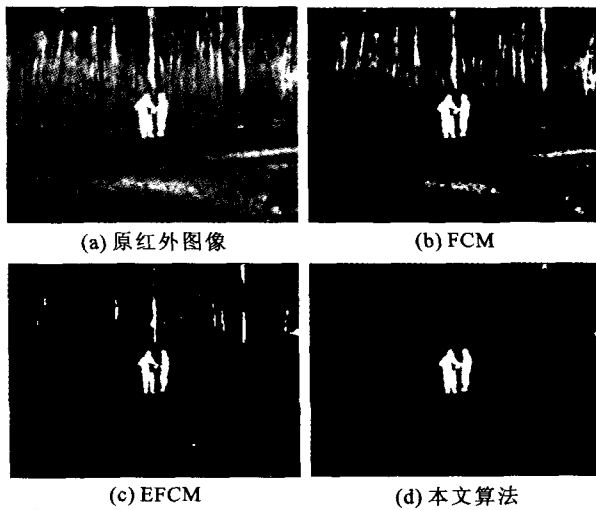


图 3 仿真结果

从图 3(b)可以看出,FCM 方法分割结果受噪声干扰明显,而且背景区域与目标区域难以得到准确区分;图 3(c)所示的 EFCM 分割算法虽然能部分克服噪声对分割结果的干扰,但是难以有效抑制背景像素对目标区域的影响;文中提出的 Type-2 IEFM 聚类分割算法,由于采用了新的度量方式,可以将目标区域较为准确的分割出来,目标区域的轮廓信息保持也较为完整,而且能较好克服噪声和背景对目标区域的影响,从分割的结果中可以较为准确的判断出目标,取得了较好的红外图像分割精度.

5 结束语

文中提出了一种新的基于 L_1 度量的二型熵模糊聚类红外图像分割算法,从一种更为自然的角度的研究模糊聚类在红外图像分割中的应用.从实验仿真结果中看出,较传统的分割算法,文中算法准确完整地分割出了目标,抑制了背景对目标区域分割的影响,而且能克服噪声和背景的干扰,达到了令人满

意的效果.文中探讨了二型模糊在模糊聚类红外图像分割中的应用,从实验结果看出,该算法具有良好的应用前景,如何结合红外图像的空间信息将是进一步研究的方向.

参考文献:

- [1] 胡双演,李俊山,李旭辉,等.基于模糊聚类的视频对象分割[J].微电子学与计算机,2008,25(7):1-4.
- [2] Wu Jin, Li Juan, Liu Jian, et al. Infrared image segmentation via fast fuzzy C-means with spatial information [C]// International Conference on Robotics and Biomimetics. China: Shenyang, 2004:742-745.
- [3] 李朝锋,居红云,王琪.基于 QPSO 的模糊 C 均值聚类算法[J].微电子学与计算机,2008,25(7):194-197.
- [4] 张敏,于剑.基于划分的模糊聚类算法[J].软件学报,2004,15(6):858-869.
- [5] Takata O, Miyamoto S, Umayahara K. Fuzzy clustering of data with uncertainties using minimum and maximum distances based on L_1 metric [C]// 20th NAFIPS. North America, 2001: 2511-2516.
- [6] Ghorbani M. Maximum entropy-based fuzzy clustering by using L_1 -norm space[J]. Turk J Math, 2005(29): 431-438.
- [7] Cheul Hwang, Frank ChungHoon Rhee. Uncertain fuzzy clustering: interval type-2 fuzzy approach to C-means [J]. IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2007, 15(1): 107-120.
- [8] Zeng Jia, Xie Lei, Liu Zhiqiang. Type-2 fuzzy gaussian mixture models [J]. Pattern Recognition, 2008, 41(12): 3636-3643.

作者简介:

张俊峰 男,(1967-),博士,副教授.研究方向为图像处理、模式识别.

景伟娜 女,(1977-),硕士,讲师.研究方向为图像处理及数据库技术等.

(上接第 48 页)

[6] Joseph W Goodman. 傅立叶光学导论[M]. 秦克诚,刘培森,译.北京:电子工业出版社,2006.

作者简介:

樊红社 男,(1974-),硕士,讲师.研究方向为电子与通信

技术.

李萍 女,(1979-),博士后.研究方向为系统仿真、微波应用技术.

许家栋 男,(1949-),教授,博士生导师.研究方向为计算电磁场、目标散射特性、天线技术.