

文章编号:1001-9081(2012)04-1184-04

doi:10.3724/SP.J.1087.2012.01184

# 对比源反演算法对二维混合目标重建成像的应用

王学静<sup>1\*</sup>, 缪竟鸿<sup>1</sup>, René Marklein<sup>2</sup>

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 卡塞尔大学 电气工程与计算机系, 德国 卡塞尔 D-34121)

(\*通信作者电子邮箱 xuej\_w@163.com)

**摘要:** 针对线性成像精确性有限的缺点, 提出了在非线性算法—对比源反演算法中采用正则化和并行频率方重建在暗室内的金属和电介质柱体构成的混合目标。二维实测微波散射数据采用了多频率、多收发设置的测量方式。通过目标的位置、形状及对比度值得展示, 验证了扩展后的对比源反演算法对复杂的二维混合目标重建成像的精确性。

**关键词:** 对比源反演算法; 正则化; 并行频率; 多重信号分类算法; 时间反演成像

中图分类号: TP722.6 文献标志码:A

## Application of contrast source inversion algorithm to image reconstruction of 2-D hybrid targets

WANG Xue-jing<sup>1\*</sup>, MIAO Jing-hong<sup>1</sup>, René Marklein<sup>2</sup>

(1. School of Electronics and Information and Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Kassel, Kassel D-34121, Germany)

**Abstract:** In view of the limited accuracy of imaging algorithm, the nonlinear Contrast Source Inversion (CSI) algorithm combined with regularization and Concurrent Frequency (CF) was proposed for reconstructing a hybrid target in an anechoic chamber. The experimental data were obtained using multi-frequency multi-bistatic measurements. The reconstructed position, shape and contrast value of the target were presented, verifying the accuracy of the extended CSI algorithm for reconstructing the complicated 2-D hybrid targets.

**Key words:** Contrast Source Inversion (CSI) algorithm; regularization; Concurrent Frequency (CF); Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm; Time Reversal (TR) imaging

微波成像具有非线性和病态特性, 难于求解, 因此迫切需要精确的成像算法, 目前实际应用中采用多是线性算法, 由于采用了近似, 线性算法的重建图像的精确度是非常有限的, 而且从图像中无法获得兴趣目标的物理(材料)参数, 如介电常数、电导率等。非线性算法则可以在迭代过程中逐步改善图像, 如对比源反演(Contrast Source Inversion, CSI)算法, 近年来吸引了众多学者进行研究<sup>[1-3]</sup>。采用正演(仿真)数据来检验成像算法, 只能初步验证算法是否有效, 如要进一步验证算法则需要对实测数据成像, 在本文中使用由法国菲涅耳(Fresnel)研究所提供的微波实测数据<sup>[4]</sup>来检验这些算法重建成像的效果。

## 1 实测数据的实验设置及测量方式

微波实测数据集收集在表1中, 目标是一个由金属和电介质柱体构成的混合目标——“FME”, 如图1所示, 在以均质、各向同性的媒质为背景的方形“兴趣区域”D中存在一个非均质、各向同性的散射体S, 发射天线和发射天线被放置在D周围的一系列的点上, 分别形成圆环形区域T和M。T和M的半径都为1.67 m; 相对在0°的固定发射天线, 接收天线在61°~301°的范围内以每次移动 $\theta_r = 1^\circ$ 的方式来接收数据(共有241个接收位置), 而目标则在0°~360°的范围内旋转, 每次旋转 $\theta_t = 20^\circ$ (共有18个发射位置)。探测目标都是由电介质柱体和金属柱体构成的。用线性和非线性算法重建这

些目标的位置、形状和介电常数及电导率的对比度值。

表1 实测数据集

目标	极化	频带/GHz	频率步进/GHz
FME	横磁场	2~18	1
FME	横电场	2~18	1

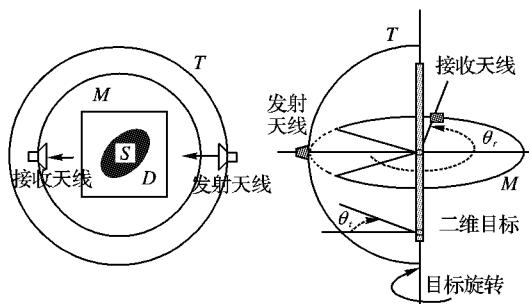


图1 实验设置及数据的测量方式

## 2 算法

首先介绍二维空间的电磁场的域积分方程, 这些积分方程被称为“数据”方程和“目标”方程, 表达式如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^*(\mathbf{r}) = k^2 \iint_{\mathbf{r}' \in D} \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) d^2 r' + \\ \nabla \nabla \cdot \iint_{\mathbf{r}' \in D} \chi(\mathbf{r}') \mathbf{E}(\mathbf{r}') G(\mathbf{r}' - \mathbf{r}) d^2 r' \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期:2011-09-26;修回日期:2011-11-21。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61001042);天津市自然科学基金资助项目(09JCYBJC15500)。

作者简介:王学静(1978-),女,天津人,讲师,硕士研究生,主要研究方向:线性和非线性算法、现代通信网; 缪竟鸿(1976-),男,天津人,副教授,博士,主要研究方向:线性和非线性算法、电磁场理论、电磁逆散射; René Marklein(1964-),男,德国卡塞尔人,博士,IEEE高级会员,主要研究方向:声波、弹性波和电磁波的散射及逆散射。

其中  $r \in M$ 。

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(r) = & \mathbf{E}^{in}(r) + k^2 \iint_{r' \in D} \chi(r') \mathbf{E}(r') G(r' - r) d^2 r' + \\ & \nabla \nabla \cdot \iint_{r' \in D} \chi(r') \mathbf{E}(r') G(r' - r) d^2 r' \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $r \in D$ 。

$\mathbf{E}$  表示总场, 上标“ $sc$ ”和“ $in$ ”分别代表了散射和入射,  $G$  表示在真空中电磁波的二维格林函数,  $k$  为波数,  $\chi$  为对比度值函数(Contrast Function), 本文中的探测目标由金属和电介质柱体构成, 所以可被定义为介电常数和电导率的对比度值函数, 即:

$$\chi(r') = \frac{\varepsilon_r(r')}{\varepsilon_0} - 1 + j \frac{\sigma_r(r')}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (3)$$

其中:  $r' \in D$ ,  $\varepsilon_0$  为真空的介电常数,  $\varepsilon_r(r')$  和  $\varepsilon_r$  分别为目标和背景媒质的相对介电常数,  $\sigma_r(r')$  为目標的电导率, 可以看出实数部分  $\text{Re}(\chi)$  代表了介电常数的对比度值, 虚数部分  $\text{Im}(\chi)$  与角频率  $\omega$  有关, 代表了电导率的对比度值。

二维电磁场可分为横磁场(Transverse Magnetic, TM) 和横电场(Transverse Electric, TE) 这两种极化情况<sup>[5]</sup>。横磁场中的电场只在  $z$  方向上有分量, 式(1)和(2)中包含  $\nabla \nabla \cdot$  算子的那一项不存在。横电场中的电场在  $x$  和  $y$  方向上都有分量, 式(1)和(2)保持不变。

为了能够在算法中紧凑、简洁地表示“数据”和“目标”方程, 需要用积分算子来表示积分方程。针对不同的极化情况, 首先定义“对比源”——对比度值和总场的积, 即:

$$\mathbf{w}(r') = \chi(r') \mathbf{E}(r') \quad (4)$$

这样, 积分算子可写成:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^M \mathbf{w} = & k^2 \iint_{r' \in D} \mathbf{w}(r') G(r' - r) d^2 r' + \\ & \nabla \nabla \cdot \iint_{r' \in D} \mathbf{w}(r') G(r' - r) d^2 r'; r \in M \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{G}^D \mathbf{w} = & k^2 \iint_{r' \in D} \mathbf{w}(r') G(r' - r) d^2 r' + \\ & \nabla \nabla \cdot \iint_{r' \in D} \mathbf{w}(r') G(r' - r) d^2 r'; r \in D \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{M}_\chi \mathbf{w} = \mathbf{w}(r) - \chi(r) \mathbf{G}^D \mathbf{w}; r \in D \quad (7)$$

在两种极化情况下, 与上述积分算子相对应的伴随积分算子可通过以下式子来获得<sup>[6]</sup>, 即:

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{M}_\chi \mathbf{w}, \mathbf{R}^D \rangle_D &= \langle \mathbf{M}_\chi^* \mathbf{R}^D, \mathbf{w} \rangle_D \\ \langle \mathbf{G}^M \mathbf{w}, \mathbf{R}^M \rangle_M &= \langle \mathbf{G}_\chi^M \mathbf{R}^M, \mathbf{w} \rangle_D \end{aligned} \quad (8)$$

为了实现这些线性和非线性算法, 要对上面提到的域、场量和积分算子, 如  $D$ 、 $\mathbf{E}$ 、 $\mathbf{G}^M$  和  $\mathbf{G}^{M*}$  等, 进行离散化<sup>[5]</sup>。

## 2.1 多重信号分类算法

多重信号分类算法(MUSIC)是应用在信号处理的子空间方法<sup>[6-7]</sup>。本文采用多重信号分类算法与时间反演成像法相结合的方法解决二维电磁逆散射成像问题。假定 Born 近似适用并且忽略多重散射的影响, 则式(1)中的“数据”方程可以用来构成一个矩阵  $\mathbf{K}$ ——多基响应(Multi-Static Response, MSR)矩阵, 该矩阵收集了所有天线在相应位置上的散射场数据。用多基响应矩阵和其共轭转置矩阵  $\mathbf{K}^H$  构成一个自我伴随矩阵  $\mathbf{T}$ ——时间反演矩阵, 如下:

$$\mathbf{T} = \mathbf{K} \mathbf{K}^H \quad (9)$$

只要探测目标的数量  $M$  小于天线的数量  $N$ , 则矩阵  $\mathbf{T}$  的秩等于  $M$ , 利用式(10)

$$\mathbf{T} \boldsymbol{\mu}_n = \lambda_n \boldsymbol{\mu}_n \quad (10)$$

计算出矩阵  $\mathbf{T}$  的特征值  $\lambda_n$  和特征向量  $\boldsymbol{\mu}_n$ , 其中  $n = 1, 2, 3,$

$\dots, M, M+1, \dots, N$ 。矩阵  $\mathbf{T}$  的前  $M$  个特征向量的特征值不为 0, 而剩余的  $N-M$  个特征向量的特征值为 0。利用时间反演成像及特征值和特征向量的特性, 就可以重建探测目标<sup>[8]</sup>:

$$\boldsymbol{o}_\chi(r) = \left( \sum_{n=1}^N \frac{|\langle \boldsymbol{\mu}_n^*, \mathbf{g} \rangle|}{\lambda_n} \right)^{-1} \quad (11)$$

其中,  $r \in D$ ,  $\mathbf{g}$  是由格林函数构成的导向矢量, 可表示为:

$$\mathbf{g} = [G(r^1 - r), \dots, G(r^N - r)] \quad (12)$$

其中  $r \in D, r^N \in M$ 。

## 2.2 对比源反演算法(CSI)

对比源反演算法是一种迭代方法, 是由 van den Berg 在 1997 年首先提出的<sup>[9]</sup>。该算法的未知量是对比源  $w_{i,k}^l$  和对比度值  $\chi_k^l$ , 其中下标  $i$  代表了第  $i$  个发射天线, 下标  $k$  为频率指数, 上标  $l$  表示第  $l$  次迭代。该算法将反演问题以最优化问题的方式解决, 在每次迭代中采用标准的共轭梯度法, 通过最小化代价泛函(Cost Functional)的方式获得最佳的对比源和对比度函数值。代价泛函包括两个部分, 即“数据”方程和“目标”方程的失配。使用式(1)和(2), 就可以分别定义两种极化情况下代价泛函。通过反向传播(Back Propagation, BP)方法, 可以得到对比源、对比度值和总场在两种极化情况下的初始值, 如下:

$$\begin{cases} w_{i,k}^0 = \frac{\| G^M \mathbf{E}_{i,k}^{sc} \|_D^2 G^M \mathbf{E}_{i,k}^{sc}}{\| G^M G^{M*} \mathbf{E}_{i,k}^{sc} \|_M^2} \\ \mathbf{E}_{i,k}^0 = \mathbf{E}_{i,k}^{in} + G^D w_{i,k}^0 \\ \chi_k^0 = \frac{\sum_i w_{i,k}^0 \cdot \mathbf{E}_{i,k}^{0*}}{\sum_i |\mathbf{E}_{i,k}^0|^2} \end{cases} \quad (13)$$

在得到了上述几个未知量的初始值后, 就可以计算两种极化情况下的“数据”误差函数  $\mathbf{R}_{i,k}^{M(l)}$  和“目标”误差函数  $\mathbf{R}_{i,k}^{D(l)}$ , 如下:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{i,k}^{M(l)} = \chi_k^{(l)} \mathbf{E}_{i,k}^{sc} - G^M \mathbf{w}_{i,k}^{(l)} \\ \mathbf{R}_{i,k}^{D(l)} = \chi_k^{(l)} \mathbf{E}_{i,k}^{in} - M_\chi^{(l)} \mathbf{w}_{i,k}^{(l)} \end{cases} \quad (14)$$

在对比源反演算法中, 代价泛函可以被这样定义为:

$$\begin{aligned} F^{(l)} = & F_D^{(l)} + F_M^{(l)} = \\ & \sum_i W_k^{D(l)} \| \mathbf{R}_{i,k}^{D(l)} \| + \sum_i W_k^M \| \mathbf{R}_{i,k}^{M(l)} \|_M^2 \end{aligned} \quad (15)$$

其中:  $F_D^{(l)}$  代表了“目标”方程的那一部分代价泛函,  $F_M^{(l)}$  代表了“数据”方程的那一部分代价泛函,  $W_k^{D(l)}$  和  $W_k^M$  为加权因子, 如下表示为:

$$\begin{cases} W_k^{D(l)} = \left( \sum_i \| \chi_k^{(l)} \mathbf{E}_{i,k}^{in} \|_D^2 \right)^{-1} \\ W_k^M = \left( \sum_i \| \mathbf{E}_{i,k}^{sc} \|_M^2 \right)^{-1} \end{cases} \quad (16)$$

算法的迭代过程包括以下三个主要步骤: 1) 通过最小化式(15)中的代价泛函  $F^{(l)}$ , 计算对比源  $(w_{i,k}^{(l)})$ ; 2) 把在第 1 步中得出的对比源的近似值代入到式(2)的“目标”方程中, 计算出“兴趣区域” $D$  中总场  $\mathbf{E}_{i,k}^{(l)}$ ; 3) 通过最小化式(14)中的“目标”误差函数  $\mathbf{R}_{i,k}^{D(l)}$  确定最佳的对比度值  $\chi_k^{(l)}$ 。

### 2.2.1 正则化方法

由于噪声的存在及逆散射问题所固有的病态特性, 造成了解的不稳定。为了提高重建图像的质量, 在对比源反演算法中采用了正则化的方法<sup>[10]</sup>, 这样既加强了解的稳定性, 同时又保持解的特性。因为采用了基于全变差方式的乘法正则化<sup>[11-12]</sup>, 该算法被称为乘法正则化的对比源反演(Multiplicative Regularized Contrast Source Inversion, MR-CSI) 算法, 其代价泛函可以表示为:

$$F^{(l)} = (F_D^{(l)} + F_M^{(l)}) F_D^{TV(l)} (\chi_k^{(l)}) \quad (17)$$

其中,  $F_D^{TV(l)}$  为全变差因子, 可写为:

$$F_D^{TV(l)}(\chi_k^{(l)}) = \frac{1}{V} \iint_{r' \in D} \frac{|\nabla \chi_k^{(l)}|^2 + \delta^2}{|\nabla \chi_k^{(l-1)}|^2 + \delta^2} d^2 r' \quad (18)$$

其中  $V$  代表区域  $D$  的体积,  $\delta^2$  用来保证  $F_D^{TV(l)}$  的可微性, 在两种极化情况下分别表示为:

$$\delta^2 = \frac{\sum_i \|\chi_k^{(l)} \mathbf{E}_{i,k}^{in} - M_\chi^{(l-1)} \mathbf{w}_{i,k}^{(l)}\|_D^2}{\sum_i \|\chi_k^{(l)} \mathbf{E}_{i,k}^{in}\|_D^2} \tilde{\nabla}^2 \quad (19)$$

其中:  $\tilde{\nabla}^2$  代表了区域  $D$  离散化后的网格尺寸的倒数, 即:

$$\tilde{\nabla}^2 = \frac{1}{\Delta x \Delta y} \quad (20)$$

该算法的迭代过程也包括三个主要步骤: 1) 通过最小化式(17)中的代价泛函  $F^{(l)}$ , 计算对比源  $\mathbf{w}_{i,k}^{(l)}$ ; 2) 通过把在第一步骤中得出的对比源的近似值代入到式(2)或式(4)中, 计算出“兴趣区域” $D$  中总场  $\mathbf{E}_{i,k}^{(l)}$ ; 3) 通过最小化式(17)中代价泛函  $F^{(l)}$ , 确定最佳的对比度值  $\chi_k^{(l)}$ 。

### 2.2.2 频率方法

由于实测数据包含了多个频率的散射数据, 可以用算法同时对多个频率数据进行重建, 式(13)~(19)相应地多了一个频率叠加符号  $\sum_k$ , 这样就可以结合不同频率数据包含的信息, 取得更好的重建结果。称这种方法为并行频率(Concurrent Frequency, CF)方法。

## 3 重建结果

使用表 2 中收集的反演参数, 得到如图 2~6 中所示的重建结果。对于所有的结果, “兴趣区域” $D$  的面积为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。对于多重信号分类算法, 域  $D$  被离散为  $128 \times 128$  个子域。对于对比源反演算法和乘法正则化对比源反演算法, 域  $D$  被离散为  $64 \times 64$  个子域。如图 2(a)所示, 目标是由两个不同的柱体构成的混合目标, 其中一个是半径为  $14.25 \text{ mm}$  的金属圆柱体, 另一个是半径为  $40 \text{ mm}$ , 对比度值为  $0.45$  的电介质圆柱体。金属柱体紧贴在电介质柱体外。

表 2 实测数据的反演参数

反演算法	初始 预估值	迭代 次数	计算时间/h		频域方法/GHz	
			TM	TE	SF	CF
MUSIC	—	—	4	—	2, 8, 12	—
CSI	BP	500	4	8	10	4~12
MR-CSI	BP	500	4	8	10	4~12

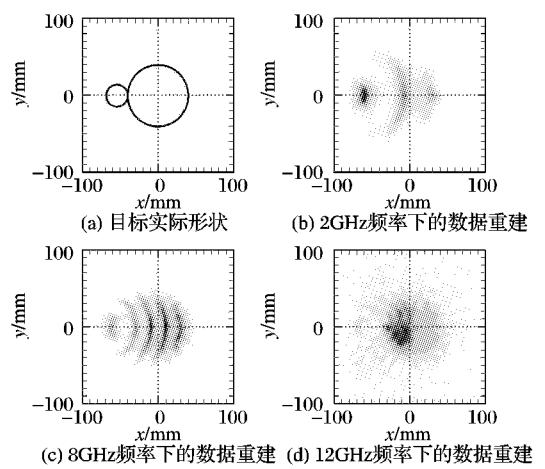


图 2 MUSIC 在单个频率下对“横磁场”实测数据的重建结果

### 3.1 “横磁场”数据

图 2(b)~(d) 分别显示了在频率  $2, 8, 12 \text{ GHz}$  下, 多重信号分类算法对“横磁场”数据(TM)的重建结果。图 3 显示了在频率  $10 \text{ GHz}$  下, 对比源反演算法和乘法正则化对比源反演算法对“横磁场”数据的重建结果。图 4 显示了采用并行频率方法的重建结果。从上述结果中可以看出, 图 4(c) 中有关电介质柱体的重建结果要明显好于图 2 及图 3(c) 中的重建结果, 因此采用正则化和并行频率方法的对比源反演算法的重建结果中, 目标的位置更准确, 形状也更清楚。由于金属柱体“阴影效应”的影响, 电介质柱体的重建形状不是很完整; 有关金属柱体的重建结果在图 3 和 4 的实数和虚数部分中都存在, 而且实数和虚数部分的量值基本相同, 这就会在反演过程中导致模糊。如表 2 所示, 对于单个频率的“横磁场”数据, 多重信号分类算法的计算时间为 4 min, 对比源反演算法和乘法正则化的对比源反演算法的计算时间约为 2 h。使用并行频率方法, 则需要更多的计算时间。

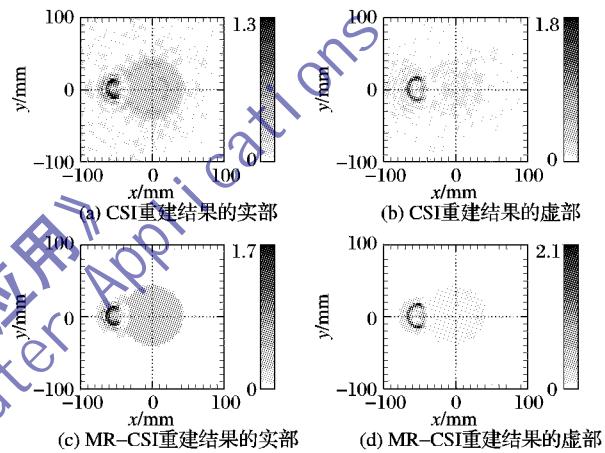


图 3 CSI 和 MR-CSI 在频率  $10 \text{ GHz}$  下对“横磁场”实测数据的重建结果

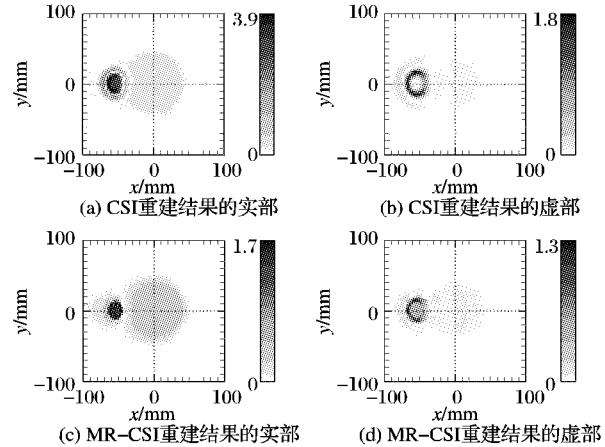


图 4 采用 CF 方法的 CSI 和 MR-CSI 对“横磁场”实测数据的重建结果

### 3.2 “横电场”数据

图 5 显示了频率在  $10 \text{ GHz}$  下, 对比源反演算法和乘法正则化对比源反演算法对“横电场”数据(TE)的重建结果。图 6 显示了采用并行频率方法的重建结果。从上述结果中可以看出, 采用了乘法正则化的对比源反演算法及并行频率方法, 探测目标的形状、位置和对比度值都重建得更好。实数部分代表了电介质柱体, 其重建结果基本正确; 虚数部分代表了金属柱体, 从理论上来讲, 对于金属目标, 算法只能重建目标的边界, 而图 5 和 6 的重建结果并没有显现出这一特性, 因此对比源反演算法和乘法正则化的对比源反演算法对“横电场”实测数据的部分重建结果是错误的, 把导致这一结果的主要

原因归结为是由于“横电场”数据的不完整,因为菲涅耳研究所的科研人员只测量了垂直于径向的那一部分数据<sup>[5]</sup>。如表2所示,对于单个频率的“横电场”数据,由于采用了更复杂的矢量积分算子,对比源反演算法和乘法正则化的对比源反演算法的计算时间约为8 h。

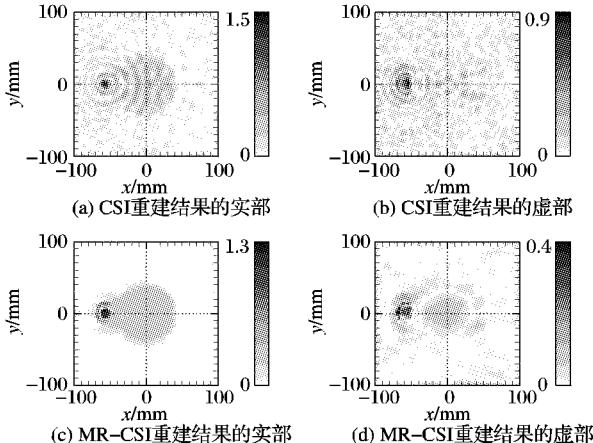


图5 CSI 和 MR-CSI 在频率 10 GHz 下对“横电场”实测数据的重建结果

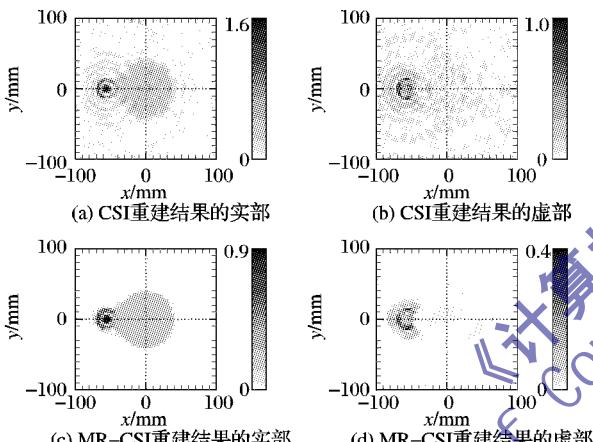


图6 采用CF方法的CSI和MR-CSI对“横电场”实测数据的重建结果

#### 4 结语

从重建结果可以看到,对比源反演算法取得的重建结果明显优于线性多重信号分类算法的重建结果。与对比源反演算法相比,多重信号分类算法的最大优势是能够实现“准实时成像”。但是该线性算法的劣势就是重建结果的图像质量要相对差很多,而且图像所包含的有关目标的信息也有限。本文主要提出了采用时间反演的多重信号分类算法、在对比源反演算法基础上的扩展算法(如乘法正则化和并行频率方

法)对多频、多收发的实测微波数据成像的具体方法,通过比较这些线性和非线性算法的重建结果,表明扩展后的对比源反演算法是精确、有效的成像算法。

#### 参考文献:

- [1] MARKLEIN R, MAYER K, HANNEMANN R, et al. Linear and nonlinear inversion algorithms applied in nondestructive evaluation [J]. Inverse Problems, 2002, 18(6): 1733–1759.
- [2] ABUBARKAR A, van den BERG P M. Iterative forward and inverse algorithms based on domain integral equations for three dimensional electric and magnetic objects [J]. Journal of Computational Physics, 2004, 195(1): 236–262.
- [3] YU C, SONG L P, LIU Q H. Inversion of multi-frequency experimental data for imaging complex objects by a DTA-CSI method [J]. Inverse Problems, 2005, 21(6): S165–S178.
- [4] GEFFRIN J M, SABOUREUX P, EYRAUD C. Free space experimental scattering database continuation: Experimental set-up and measurement precision [J]. Inverse Problems, 2005, 21(6): S117–S130.
- [5] MIAO J. Linear and nonlinear inverse scattering algorithms applied in 2-D electromagnetics and elastodynamics [M]. Kassel: Kassel University Press, 2008: 1–175.
- [6] CHENEY M. The linear sampling method and the MUSIC algorithm [J]. Inverse Problems, 2001, 17(4): 591–595.
- [7] PARK W, LESSELIER D. MUSIC-type imaging of a thin penetrable inclusion from its multi-response matrix [J]. Inverse Problems, 2009, 25(7): 1–34.
- [8] MARENKO E A, GRUBER F K, SIMONETTI F. Time-reversal MUSIC imaging of extended targets [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 1967–1984.
- [9] KLEINMAN R E, van den BERG P M. A contrast source inversion method [J]. Inverse Problems, 1997, 13(6): 1607–1620.
- [10] EGGER H, LEITÄO A. Nonlinear regularization methods for ill-posed problems with piecewise constant or strongly varying solutions [J]. Inverse Problems, 2009, 25(11): 1–19.
- [11] BACHMAYR M, BURGER M. Iterative total variation schemes for nonlinear inverse problems [J]. Inverse Problems, 2009, 25(10): 1–26.
- [12] ABUBARKAR A, HU W, van den BERG P M, et al. A finite-difference contrast source inversion method [J]. Inverse Problems, 2008, 24(6): 1–17.
- [13] MIAO J, MARKLEIN R, LI J. Application of the linear and nonlinear inversion algorithms on two-dimensional experimental electromagnetic data [C]// the International Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics. Beijing: [s. n.], 2009: 296–299.

(上接第 1179 页)

- [2] Supercomputer TOP500 organization. Top 500 list (November 2007) [EB/OL]. [2011-09-20]. [http://www.top500.org/static/lists/2007/11/top500\\_200711.xls](http://www.top500.org/static/lists/2007/11/top500_200711.xls).
- [3] Supercomputer TOP500 organization. Top 500 list (November 2008) [EB/OL]. [2011-09-20]. [http://www.top500.org/static/lists/2008/11/top500\\_200811.xls](http://www.top500.org/static/lists/2008/11/top500_200811.xls).
- [4] Supercomputer TOP500 organization. Top 500 list (November 2009) [EB/OL]. [2011-09-20]. [http://www.top500.org/static/lists/2009/11/top500\\_200911.xls](http://www.top500.org/static/lists/2009/11/top500_200911.xls).
- [5] Supercomputer TOP500 organization. Top 500 list (November 2010) [EB/OL]. [2011-09-20]. [http://www.top500.org/static/lists/2010/11/top500\\_201011.xls](http://www.top500.org/static/lists/2010/11/top500_201011.xls).
- [6] 胡世平, 姚信安, 宋飞. 高性能计算机电源系统设计的关键技

- 术[J]. 计算机工程与科学, 2006, 28(5): 136–140.
- [7] 姚信安, 胡世平, 宋飞, 等. 高性能计算机电源系统的设计与实现[J]. 电力电子技术, 2008, 42(2): 40–42.
- [8] Intel. Voltage regulator module (VRM) and enterprise voltage regulator-down (EVRD) 11.1 design guidelines [EB/OL]. [2011-09-20]. <http://www.intel.com/Assets/PDF/designguide/397898.pdf>.
- [9] ZHANG M T. Powering Intel pentium 4 generation processors [C]// Electrical Performance of Electronic Packaging. Hillsboro: IEEE, 2001: 215–218.
- [10] 袁伟, 张军明, 钱照明. 一种混合式自适应电压定位控制策略及 12 V 电压调节模块拓扑[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 115–121.