

基于反演场扩散消除的时间反演多目标成像技术

臧锐 王秉中 丁帅 龚志双

Time reversal multi-target imaging technique based on eliminating the diffusion of the time reversal field

Zang Rui Wang Bing-Zhong Ding Shuai Gong Zhi-Shuang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204102 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204102

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204102>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大地土壤表面与浅埋多目标宽带复合电磁散射研究

Wide-band composite electromagnetic scattering from the earth soil surface and multiple targets shallowly buried

物理学报.2016, 65(20): 204101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204101>

基于胶囊内窥镜的胃部肿瘤检测方法

A method of detecting stomach tumour based on capsule endoscopy

物理学报.2016, 65(19): 194101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194101>

基于多开口田字形宽频带低损耗左手材料

Broadband and low-loss left-handed materials based on multi-opening cross shape structures

物理学报.2016, 65(16): 164101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.164101>

单层高效透射型相位梯度超表面的设计及实验验证

Design and experimental verification of single-layer high-efficiency transmissive phase-gradient metasurface

物理学报.2016, 65(15): 154101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154101>

基于梯度超表面的反射型线-圆极化转换器设计

Design of reflective linear-circular polarization converter based on phase gradient metasurface

物理学报.2016, 65(15): 154102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.154102>

# 基于反演场扩散消除的时间反演多目标成像技术\*

臧锐 王秉中† 丁帅 龚志双

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2016年4月27日收到; 2016年7月5日收到修改稿)

基于时间反演腔理论, 分析了时间反演场存在的聚焦扩散现象. 通过对该现象的分析, 提出了利用 Clean 算法进行单频时间反演场扩散消除, 进而实现时间反演多目标成像的技术. 全波仿真结果表明, 该技术能够消除时间反演场扩散的影响, 利用单一频率信号实现多目标的成像. 最后, 分析了时间反演镜的选取对时间反演场的影响, 并在此基础上, 提出了非理想情况下相应的时间反演镜信号均衡算法, 为时间反演多目标成像技术的实际应用提供了有效的支撑.

**关键词:** 时间反演场, 多目标成像, Clean 算法, 时间反演镜

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** 10.7498/aps.65.204102

## 1 引言

时间反演场具有自适应的时空同步聚焦特性, 在目标定位、区域成像、能量传输以及超宽带通信领域都有广阔的应用前景<sup>[1-7]</sup>. 在微波成像领域, 利用时间反演场会在原始激励源处重新汇聚的特性, 通过直接观察时间反演场分布或者使用 DORT 及 TR-MUSIC 等算法, 均可以实现对区域内目标成像<sup>[8-10]</sup>. 但是, 由于用于成像的时间反演系统中无法预先设置与原始激励源相对应的吸收源, 从而使得时间反演场在原始激励源处汇聚后会继续扩散, 进而形成类似于 sinc 函数分布的聚焦斑<sup>[11]</sup>, 对其他区域的场分布产生一定影响. 当进行多目标成像且成像目标发射或反射的信号具有幅度和相位差别时, 多个目标处的时间反演扩散场会在成像区域内进行叠加, 有可能会形成伪像, 也有可能将信号幅值较小的目标掩盖. 当成像算法使用的频带较宽时, 可以利用每个目标聚焦时间不同来进行多目标成像, 减小扩散场带来的影响. 但当使用单频进行时间反演(相位共轭)成像时, 扩散的时间反演场

将会对成像系统产生很大的影响.

Clean 算法是一种有效的逆卷积算法, 已在通信信道提取、天文图像质量提高等方面有了广泛的应用<sup>[12,13]</sup>. 利用 Clean 算法可以有效地抑制旁瓣信号, 去除时间反演场中场扩散带来的问题, 提高时间反演成像的准确率. 本文首先分析了实际时间反演过程中造成聚焦扩散的原因以及扩散场的表达形式, 然后结合 Clean 算法, 提出了基于扩散场消除的时间反演多目标成像方案. 为了对该方案的可行性进行验证, 通过全波仿真模拟了时间反演的过程并提取了时间反演场, 数据处理结果表明提出的方案能够实现多目标的成像, 符合理论预期.

在实际时间反演过程中, 往往使用离散的时间反演镜来代替理论分析中的时间反演腔<sup>[14]</sup>, 而时间反演镜的选取也会对成像结果造成一定的影响<sup>[15]</sup>. 在先前的研究中, 往往直接通过对离散时间反演镜接收的信号进行时间反转来实现时间反演功能. 本文首先结合时间反演腔理论分析了时间反演镜离散过程, 提出了实际过程中的时间反演镜的选择标准, 然后提出了在非理想情况下时间反演镜信号的均衡算法, 使得到的时间反演场具有符合我

\* 国家自然科学基金(批准号: 61331007, 61361166008, 61401065)和高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120185130001)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [bzwang@uestc.edu.cn](mailto:bzwang@uestc.edu.cn)

们预期的稳定表达形式, 增强了文中提出的时间反演多目标成像算法的应用前景.

## 2 时间反演多目标成像技术

### 2.1 时间反演场聚焦效果分析

在理想的时间反演过程中, 除了完整的时间反演腔外, 还需要一个与原始激励源相对应的时间反演吸收源, 用来吸收时间反演聚焦后的场以避免该场进一步扩散. 而在利用时间反演技术的目标成像过程中, 由于无法事先知道原始激励源的位置, 也就无法设置对应的吸收源, 从而造成了时间反演场在源处汇聚后会继续的扩散.

我们考虑电磁场的电场分量  $\mathbf{E}$ , 激励电流源  $\mathbf{J}$  产生的电场满足波动方程, 可以表示为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) - k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega\mu \mathbf{J}(\mathbf{r}, \omega), \quad (1)$$

其中,  $k$  表示空间的波数,  $\mathbf{r}$  和  $\omega$  分别表示空间位置和对应的频率. 对方程两端分别取共轭, 所得到的场解从直观意义来讲, 即为时间反演场:

$$\begin{aligned} \nabla \times \nabla \times \mathbf{E}^*(\mathbf{r}, \omega) - k^2 \mathbf{E}^*(\mathbf{r}, \omega) \\ = -j\omega\mu(-\mathbf{J}^*(\mathbf{r}, \omega)). \end{aligned} \quad (2)$$

需要注意的是, 共轭后的波动方程并非表示时间反演场能够由一个与原始激励源反向的共轭辐射源  $-\mathbf{J}^*$  产生. 上述方程的意义在于, 理想的时间反演场需要能够在原始激励源处产生一个相应的吸收源  $\mathbf{J}^*$ , 以将能量吸收掉.

但是, 由于实际成像过程中无法在区域内设置相对应的吸收过程, 汇聚后的场会继续扩散, 而利用时间反演腔理论产生的场应该满足无源空间的波动方程, 即:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}^{\text{TRC}}(\mathbf{r}, \omega) - k^2 \mathbf{E}^{\text{TRC}}(\mathbf{r}, \omega) = 0. \quad (3)$$

为了求解时间反演腔产生的场, 我们可以模拟出未被吸收的场重新扩散的情形, 对应的波动方程可以表示为

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}'(\mathbf{r}, \omega) - k^2 \mathbf{E}'(\mathbf{r}, \omega) = -j\omega\mu \mathbf{J}^*(\mathbf{r}, \omega). \quad (4)$$

结合 (2)—(4) 式, 以及时间反演腔理论, 我们可以得知时间反演腔产生的场将是回传的共轭场以及汇聚后场继续扩散形成的场的叠加:

$$\mathbf{E}^{\text{TRC}} = \mathbf{E}^* + \mathbf{E}' = \mathbf{E}^*(\mathbf{J}) + \mathbf{E}(\mathbf{J}^*). \quad (5)$$

结合实际应用环境中的格林函数等条件, 我们就可以得到时间反演腔产生场的表达形式. 自由空间并矢格林函数  $\overline{\overline{G}}$  与电流源产生场的关系可以表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}') = -j\omega\mu \int_V \mathbf{J}(\mathbf{r}) \cdot \overline{\overline{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') dV. \quad (6)$$

将 (6) 式代入 (5) 式, 即可以得到时间反演腔产生的场为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^{\text{TRC}}(\mathbf{r}') \\ = -j\omega\mu \int_V \mathbf{J}^*(\mathbf{r}) \cdot [\overline{\overline{G}}(\mathbf{r}, \mathbf{r}') - \overline{\overline{G}}^*(\mathbf{r}, \mathbf{r}')] dV. \end{aligned} \quad (7)$$

由于时间反演腔是我们模拟时间反演过程的途径, 而且实际的时间反演场由于吸收源无法设置而无法产生 [16,17], 为了方便起见, 在后续说明中, 我们会将时间反演腔产生的场称为时间反演场. 在激励源附近没有近场散射体的情况下, 单个激励源的时间反演场满足近似 sinc 函数的分布形式 [11,17]. 考虑二维的时间反演过程, 仿真得到的归一化时间反演场幅度如图 1 所示. 图中  $\lambda$  表示电磁波的波长,  $x$  和  $y$  分别表示两个维度的空间坐标.

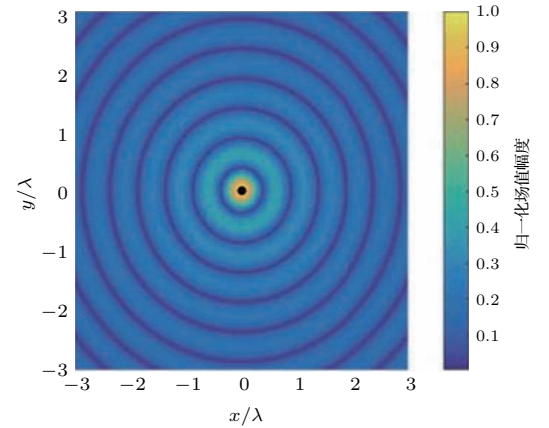


图1 (网刊彩色) 单激励源的归一化时间反演场幅度分布. 图中黑色圆点表示原始激励源的位置

Fig. 1. (color online) Normalized time reversal field distribution of the single source. The black points show the positions of the sources.

### 2.2 单频反演场扩散消除

自由空间中独立源的时间反演场近似满足 sinc 函数分布, 仍然具有一定的聚焦效果. 但是, 当成像区域内存在多个距离较近的原始激励源时, 由于场的叠加效应, 时间反演场的聚焦效果就会受到较大的影响. 尤其当各个激励源间还存在相位和幅度差别时, 这种影响将会直接影响时间反演成像

算法的准确度. 为了研究时间反演的多目标成像技术, 我们使用商用软件 CST 对整个时间反演过程进行仿真模拟. 仿真中, 我们在激励源和时间反演镜的中间区域内随机地设置散射体, 以模拟可能出现的远场多径环境. 我们在成像区域内设置同时存在的三个原始激励源, 三个激励源的坐标分别为  $(-\lambda, -\lambda)$ ,  $(\lambda, 0)$ ,  $(\lambda, -\lambda)$ , 激励的相对幅相分别为  $1e^{j0}$ ,  $0.5e^{j0}$ ,  $1e^{j\pi}$ . 仿真中我们使用的时间反演镜的数量为 72 个, 时间反演镜均匀地分布在距离原点  $50\lambda$  的圆周上. 所得到的时间反演场如图 2 所示.

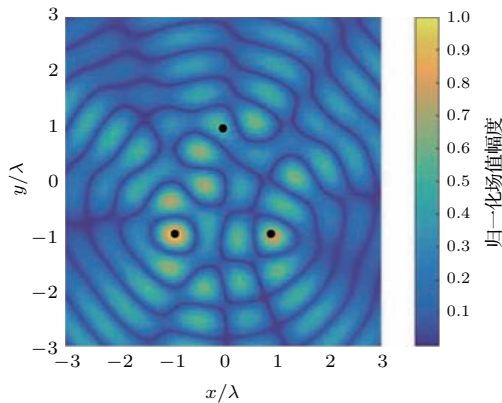


图2 (网刊彩色) 多个激励源的归一化时间反演场分布图中黑色圆点表示原始激励源的位置, 原始激励源的坐标分别为  $(-\lambda, -\lambda)$ ,  $(\lambda, 0)$ ,  $(\lambda, -\lambda)$ , 激励的相对幅相分别为  $1e^{j0}$ ,  $0.5e^{j0}$ ,  $1e^{j\pi}$

Fig. 2. (color online) Normalized time reversal field distribution of the multi sources. The black points show the positions of the sources. Three sources located  $(-\lambda, -\lambda)$ ,  $(\lambda, 0)$ ,  $(\lambda, -\lambda)$  and the related excitation are  $1e^{j0}$ ,  $0.5e^{j0}$ ,  $1e^{j\pi}$ , respectively.

从图 2 的结果可以看出, 由于时间反演场的扩散效应, 幅值较小的源位置并未形成明显的聚焦, 而在其他的位置则形成了较多的伪像.

在不考虑各个激励源之间的互扰的前提下, 总时间反演场可以认为是激励源分布和单个激励源形成的时间反演场的卷积. 为了消除扩散的时间反演场对多目标成像的影响, 可以利用 Clean 算法对得到的时间反演场分布进行处理. Clean 算法的处理步骤为:

- 1) 记录所得到的成像区域内的时间反演场, 创建一个各点均为 0 的源分布函数;
- 2) 通过逐点扫描的方式, 找到成像区域内与单个激励源的时间反演场相关性最高的位置, 将相关

系数  $a$  的  $m$  倍加到源分布函数在该点的值, 为了算法的稳定,  $m$  取小于 1 的数值;

3) 在成像区域内的总场的相应位置中减去  $ma$  倍的单激励源时间反演场;

4) 重复步骤 2 和步骤 3, 直到成像区域内的各处的场均低于事先设定的阈值;

5) 使用一个无扩散的理想场分布和所得到的近似的源分布函数进行卷积, 利用新得到的场值进行成像判定.

经过 Clean 算法消除了时间反演场扩散的影响后, 所得到的场分布图如图 3 所示.

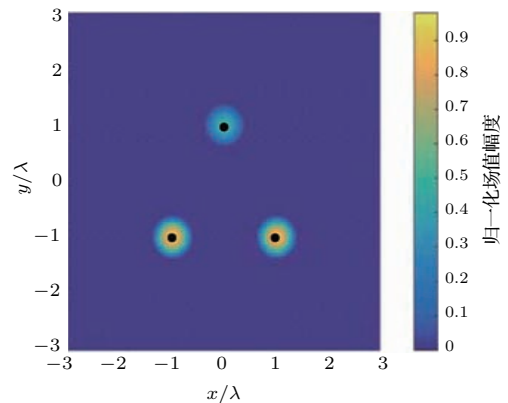


图3 (网刊彩色) 经过 Clean 算法后, 多个激励源的时间反演场分布, 图中黑色圆点表示原始激励源的位置

Fig. 3. (color online) Time reversal field distribution of the multi sources after using the Clean algorithm. The black points show the positions of the sources.

### 3 时间反演镜的信号均衡

理想的时间反演过程需要在完整的时间反演腔上进行反演, 在实际情况下我们很难实现这样的操作, 因此往往采用离散的时间反演镜来代替完整的时间反演腔. 为了实现时间反演功能, 一般情况下会直接将时间反演镜所得到的信号进行时间反转. 在此情况下, 当时间反演镜不是均匀地分布在圆周上时, 我们所得到的时间反演场也会与理论值具有较大的差别. 图 4(a) 和图 4(b) 分别给出了时间反演镜分布在椭圆周上, 以及时间反演镜非均匀地分布在圆周上时得到的时间反演场的分布情况. 图中外围的黑色圆点反映了时间反演镜的排布情况. 通过与图 1 进行比较, 可以看出时间反演镜的排布会对时间反演场产生较大的影响, 进而会影响成像算法.

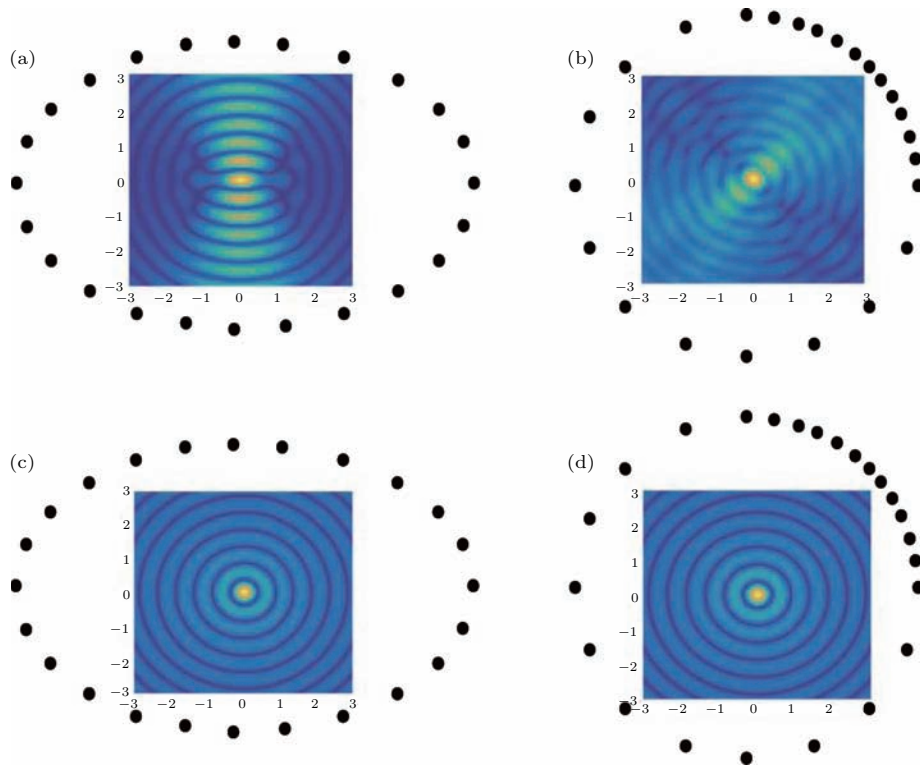


图4 (网刊彩色) 单个激励源的归一化时间反演场分布, 图中外围的黑色圆点表示了时间反演镜的排布情况 (a) 时间反演镜等角间距地分布在椭圆周上, 反演信号直接反转不经过均衡处理; (b) 时间反演镜非均匀地分布在圆周上, 反演信号直接反转不经过均衡处理; (c) 时间反演镜等角间距地分布在椭圆周上, 反演信号经过均衡处理; (d) 时间反演镜非均匀地分布在圆周上, 反演信号经过均衡处理

Fig. 4. (color online) Normalized time reversal field distribution of the single source, the black points show the distribution of the time reversal mirrors: (a) Time reversal mirrors distributed in the elliptical circumference at equal angular intervals, the time reversal signal without equalization; (b) time reversal mirror non-uniformly distributed on the circumference, the time reversal signal without equalization; (c) time reversal mirrors distributed in the elliptical circumference at equal angular intervals, the time reversal signal with equalization; (d) time reversal mirror non-uniformly distributed on the circumference, the time reversal signal with equalization.

时间反演场会随时间反演镜的排布而变化, 是因为在将时间反演腔离散为时间反演镜的过程中, 如果每个时间反演镜所代表的区域大小不同, 直接在时间反演镜处进行信号反转并不能准确地对时间反演腔上进行的积分进行近似. 因此, 为了得到理想的时间反演场, 我们需要使每个时间反演镜对应的积分区域相同. 在实际的环境中, 如果每个时间反演镜所对应的积分区域不同, 则需要在信号反转的同时进行均衡. 均衡的依据为将时间反演镜接收的信号分别乘上其所对应的积分区域面积. 在时间反演镜对应的区域内场值分布近似相同且远场传播方向沿球面法线方向的近似条件下, 该均衡算法能够有效地还原理想的时间反演场. 图4(c)和图4(d)分别给出了经过均衡算法后, 时间反演镜分布在椭圆周上, 以及时间反演镜非均匀地分布在圆周上时得到的时间反演场的分布情况. 可以看

出, 经过均衡后所得到的时间反演场与理想的时间反演场相一致, 能够用来进行多目标成像.

## 4 结 论

本文分析了时间反演过程中由于对应吸收源缺失带来的时间反演场扩散现象, 并通过全波仿真展示了该扩散现象对时间反演成像系统的影响. 为了解决该问题, 提出了基于 Clean 算法的时间反演扩散场消除技术, 并结合该技术完成了时间反演的多目标成像. 成像结果表明利用反演场扩散消除技术, 可以通过得到的新的场分布直观地实现目标的成像识别, 能够识别信号幅度较小的原始激励源并且能够有效地去除伪像. 利用扩散场消除技术, 能够在单频情况下实现时间反演场的多目标成像, 扩展了时间反演技术的应用. 同时, 本文分析了时间

反演镜的排布对时间反演场的影响, 提出了在非理想情况下时间反演镜信号的均衡算法, 为实际情况下反演场扩散消除技术提供了技术支持.

## 参考文献

- [1] Fink M 1997 *Phys. Today* **50** 34
- [2] Lerosey G, Rosny J, Tourin A, Derode A, Fink M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **88** 154101
- [3] Kong Q, Shi Q F, Yu G Z, Zhang M 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 024208
- [4] Wang B Z, Zang R, Zhou H C 2013 *J. Microwaves* **29** 25 (in Chinese) [王秉中, 臧锐, 周洪澄 2013 微波学报 **29** 25]
- [5] Feng J, Liao C, Zhang Q H, Sheng N, Zhou H J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134101 (in Chinese) [冯菊, 廖成, 张青洪, 盛楠, 周海京 2014 物理学报 **63** 134101]
- [6] Chen Q J, Jiang Q X, Zeng F L, Song C B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 204101 (in Chinese) [陈秋菊, 姜秋喜, 曾芳玲, 宋长宝 2015 物理学报 **64** 204101]
- [7] Yang Y, Wang B Z, Ding S 2016 *Chin. Phys. B* **25** 050101
- [8] Liu D H, Kang G, Li L, Chen Y, Vasudevan S, Joines W, Liu Q H, Krolik J, Carin L 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 3058
- [9] Liu X F, Wang B Z, Li J L W 2012 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **60** 220
- [10] Zhong X M, Liao C, Lin W B 2015 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **63** 5619
- [11] Jackson D R, Dowling D R 1991 *J. Acoust. Soc. Am.* **89** 171
- [12] Schwarz U J 1978 *Astron. Astrophys.* **65** 345
- [13] Bose R 2011 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **47** 2190
- [14] Rosny J, Lerosey G, Fink M 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 3139
- [15] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D, Zhao D S 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104101 (in Chinese) [丁帅, 王秉中, 葛广顶, 王多, 赵德双 2011 物理学报 **60** 104101]
- [16] Carminati R, Saenz J J, Greffet J J, Nieto-Vesperinas M 2000 *Phys. Rev. A* **62** 012712
- [17] Carminati R, Pierrat R, Rosny J, Fink M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3107

# Time reversal multi-target imaging technique based on eliminating the diffusion of the time reversal field\*

Zang Rui Wang Bing-Zhong<sup>†</sup> Ding Shuai Gong Zhi-Shuang

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

( Received 27 April 2016; revised manuscript received 5 July 2016 )

## Abstract

Time reversal technique has the adaptive time-space focusing characteristics, which has been widely used in communication systems, imaging systems, and power combining systems. However, the ideal time reversal processing cannot be implemented in an actual imaging system and some diffusion phenomenon has been observed. In this paper, the diffusion phenomenon of the time reversal field in an imaging system is analyzed based on the time reversal cavity theory. Since the corresponding absorption source cannot be set in an imaging process, the time reversal field will continue to disperse after the convergence. Therefore, the field produced by the time reversal cavity will be similar to the sinc-function near the source. The diffusion field will result in mutual interference between the imaging targets. In a traditional time reversal multi-target imaging system, weaker targets can easily be concealed and artifacts may occur. In this paper, a multi-target imaging technique based on the elimination of the time reversal field diffusion is proposed. In order to eliminate the effect of the diffusion field, the Clean algorithm is used. The Clean algorithm is a de-convolution algorithm, which can effectively suppress the side lobe signal. By using the Clean algorithm in the time reversal imaging system, the interaction between multi-targets can be eliminated. Full-wave simulation shows a good performance of the proposed method. In practice, the time reversal mirrors are used to replace the time reversal cavity, for the fully closed time reversal cavity cannot be implemented. The effects of the time reversal mirrors have also been analyzed in this paper. The result shows that the positions of the time reversal mirrors have a significant influence on the reversed field distribution, which affects the Clean algorithm and the proposed imaging method. In order to eliminate the influence of time-reversal mirror position, an effective time reversal signal equalization algorithm is proposed. In the equalization algorithm, the amplitude of the time reversal signal in the time reversal mirrors is adjusted according to both the distance and the intensity. The proposed equalization algorithm can keep the time reversal field stable and provide effective support for the imaging method.

**Keywords:** time reversal field, multi-target imaging, Clean-algorithm, time reversal mirror

**PACS:** 41.20.Jb, 42.25.Bs

**DOI:** [10.7498/aps.65.204102](https://doi.org/10.7498/aps.65.204102)

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61331007, 61361166008, 61401065), and the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120185130001).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [bwzhang@uestc.edu.cn](mailto:bwzhang@uestc.edu.cn)