

时间反演电磁波在金属丝阵列媒质中的超分辨率聚焦*

周洪澄[†] 王秉中[‡] 丁帅 欧海燕

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2012 年 11 月 29 日收到; 2013 年 2 月 22 日收到修改稿)

本文利用一种已有的金属丝阵列结构, 验证了时间反演技术的时空聚焦特性, 并证明了在该阵列结构中, 时间反演电磁波具有超分辨率聚焦特性. 利用金属丝阵列能为凋落波提供传播渠道这一特性, 通过改变信号对时间反演镜的激励方式, 得到了多种亚波长异地成像的仿真结果. 本文的分析和仿真结果证实了利用时间反演技术, 可以采用传统的材料和设备, 在远场实现超分辨率聚焦成像, 并能在多个位置实现对源信号的提取和分析.

关键词: 时间反演, 金属丝阵列, 超分辨率聚焦, 异地成像

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

DOI: 10.7498/aps.62.114101

1 引言

时间反演技术最开始在声波中得以提出和应用, 并于 2004 年被引入电磁学领域^[1]. 电磁学中的时间反演是指: 天线接收到一串电磁信号之后, 将其在时域上进行反转, 并重新发射出去的过程. 这类似于堆栈操作, 最先接收到的信号最后发射出去, 而最后接收到的信号则最先发射. 2007 年, Fink 等人把有限个接收天线组成时间反演镜^[2] (time reversal mirror, TRM) 放置在具有丰富多径的环境中进行实验, 验证了时间反演电磁波在近场^[3]和远场^[4]都具有超分辨率聚焦特性. 研究发现, 时间反演电磁波具有时空聚焦特性^[5], 即: 经过时间反演处理的电磁波在时间域内具有时间压缩特性、在空间域内具有空间聚焦特征^[6,7]. 因此, 时间反演技术可广泛用于复杂媒质中目标的探测与成像、超宽带无线通信等领域^[8–11].

2010 年, Fusco 等人利用相位共轭透镜 (phase conjugated mirror, PCM), 研究了相位共轭电磁波的近、远场超分辨率聚焦特性, 对频域信号的相位共

轭所具有的超分辨率特性进行了理论分析^[12–14]. 研究表明, 凋落波借助于散射体转换为传播波, 激发物体表面的等离子体激元, 是相位共轭具有超分辨率聚焦特性的重要原因. 由傅里叶变换关系可知, 信号在时域进行时间反演等效于在频域上进行相位共轭. 与相位共轭镜使用单频信号相比, 时间反演镜使用的是宽带或超宽带脉冲, 它允许对任何时间窗内的信号进行时间反演处理.

自从 Pendry 预测负折射材料可以构成一个完美透镜后^[15], 出现了多种可以用于亚波长天线成像的完美透镜. Fink 与 Fusco 等都曾指出, 单纯的时间反演技术并不能突破衍射极限、获得电磁波的超分辨率聚焦特性, 只有在目标体的近场周围加入散射体, 才能获得这种特性^[16–18]. 本文在已有的研究基础上, 提出了利用一种规则排列的金属丝阵列来实现时间反演的超分辨率聚焦成像的方法. 这里说的金属丝阵列, 是一组平行的理想导线, 即损耗可忽略不计, 如图 1 所示. 这种结构与左手材料不一样, 它没有负折射, 并且 Belov 等已经证实该种金属丝阵列可以为凋落波提供一种的传播渠道^[19], 因此它是一种不同于完美透镜的亚波长成像透镜.

* 博士点基金 (批准号: 20100185110021, 20120185130001) 和国家自然科学基金 (批准号: 61071031, 61107018) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhouhc1230@163.com

[‡] 通讯作者. E-mail: bzzwang@uestc.edu.cn

文献 [19] 利用金属丝阵列能够传递凋落波这一特性, 成功地在源信号的异侧实现了对源信号信息的提取. 可是, 一旦源信号停止激励, 则无法准确地确定源信号的位置. 2010 年, Ding 等人在时间反演技术的支持下, 利用金属丝阵列证实了时间反演的时空聚焦特性、实现了对源信号的提取, 且在源信号停止激励后仍旧能够确定目标天线的位置及目标天线的形状, 得到了具有超分辨率特征的源像 [20]. 本文在文献 [20] 的基础上, 进一步证实利用金属丝阵列的传播特性和时间反演技术能够确定源像的位置, 首次提出利用金属丝阵列在异地实现对源像恢复的方法, 并在仿真软件 CST Microwave Studio 中验证了该方法.

2 线阵式时间反演镜的聚焦成像

凋落波能够携带亚波长信息, 但在普通的导波结构, 甚至是自由空间中, 凋落波的传播通常会呈现指数型衰减, 因此很难观测到凋落波, 也就很难获得亚波长信息. 传统的成像系统只能传递源信号的传播波, 并受到衍射极限的限制. 而本文利用的这种金属丝阵列结构, 能够为凋落波提供传播渠道, 使得源信号所成的像可以在透镜的另一端被观测到. 因此可以推断, 该金属丝媒质可以用于对微波源进行亚波长成像.

本文成像所采用的结构如图 1 所示. 其中, 图 1(a) 为放置在一个完全封闭的谐振腔中的一个 31×31 的正方形规则排列的理想金属导线阵列, 其中金属丝半径 $r = 1 \text{ mm}$, 相邻金属丝之间的中心间距 $a = 3 \text{ mm}$, 金属丝的长度均为 $d = 110 \text{ mm}$. 如图 1(b) 所示, 这个金属丝阵列可以等效为一种特殊介质, 它不仅能为传播波提供丰富的多径和散射, 还能为凋落波到传播波的转换提供一种渠道. 即使在低频阶段, 该金属丝阵列结构仍有强烈的空间色散特性 [21], 因此本文选择该种金属丝阵列作为亚波长成像的传输渠道, 来研究时间反演电磁波的时空聚焦特性以及其超分辨率聚焦结果. 在三维空间中, 其该种金属丝阵列的介电常数可用张量形式表示为

$$\epsilon = \epsilon_{xx} + yy + zz, \quad \epsilon(\omega, q_x) = 1 - \frac{k_p^2}{k^2 - q_x^2}, \quad (1)$$

其中, x 方向是金属丝阵列的伸展方向, q_x 是波矢 q 在 x 方向上的分量, k_p 是对应于等离子体频率 ω_p

的波数. 因此在此介质的波长应表示为

$$\lambda = \sqrt{\epsilon(\omega, q_x)} \cdot \lambda_{\text{真空}}. \quad (2)$$

在这种结构中, k_p 取决于金属丝的间距 a 以及金属丝的半径 r , 公式如下 [19]:

$$k_p^2 = \frac{2\pi/a^2}{\ln \frac{a}{2\pi r} + 0.5275}. \quad (3)$$

图 1 为用于实现异地成像的结构图, 由图 1 可看出, 目标天线和时间反演镜天线阵列分别位于金属丝阵列的两侧, 时间反演镜呈线阵式分布 (从右至左依次为天线 2, 3, ..., 8). 这 8 个天线的结构一样, 均为理想偶极子天线. 这些偶极子天线的长度均为 20 mm , 且目标天线距离金属丝阵列的距离为 2 mm , 时间反演镜中的所有天线距离金属丝阵列的距离为 5 mm .

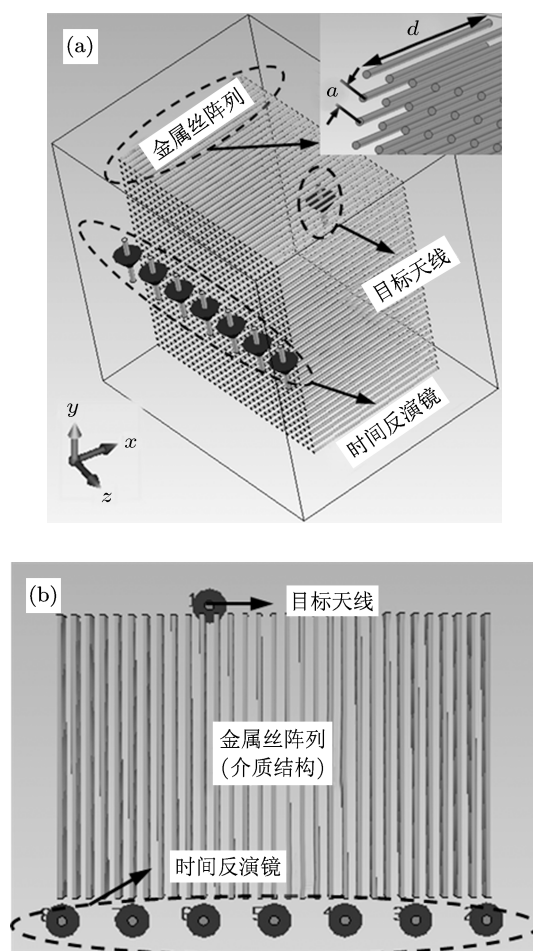


图 1 成像结构图 (a) 三维结构图; (b) 平面图

在时间反演技术下, 利用该金属丝阵列在不同位置恢复源像的具体步骤描述如下:

1) 由目标天线 (1 号天线) 发射一个频谱带宽为 0.1—6 GHz 的调制高斯脉冲信号 $x(t)$, 信号波形如图 2 所示.

2) 时间反演镜中的天线 $i(i=2,3,\cdots,8)$ 接收到的信号 $y_i(t)$ ($i=2,3,\cdots,8$) 表示为

$$y_i(t) = x(t) \otimes h_i(t), \quad (4)$$

其中 $h_i(t)$ 是目标天线与天线 i 之间的信道冲激响应. 图 3(a) 显示的是接收天线 2 接收到的信号, 由于金属丝阵列的散射作用, 复杂的多路径效应显而易见.

3) 将接收到的信号 $y_i(t)$ ($i=2,3,\cdots,8$) 分别在时域上进行时间反演操作, 记为 $y_i(t)$ ($i=2,3,\cdots,8$). 图 3(b) 表示的是天线 2 的接收信号经时域反转之后的信号.

4) 将时域反转信号作为源信号, 分别由对应的 7 个接收天线同时发射出去, 即天线 i 的激励信号为 $y_i(-t)$, $i=2,3,\cdots,8$. 天线 1 接收到的信号 $y_1^{\text{TR}}(t)$ 为

$$y_1^{\text{TR}}(t) = \sum_{i=2}^8 \underbrace{x(-t) \otimes h_i(-t)}_{y_i(-t)} \otimes h'_i(t), \quad (5)$$

式中, $h'_i(t)$ 是天线 i 与目标天线之间的信道冲激响应. 假定这是一个线性时不变的系统, 信道互易就表现为 $h'_i(t) = h_i(t)$. 根据 (5) 式可知, 信号 $y_1^{\text{TR}}(t)$ 会在某一时刻聚焦到 1 天线位置处 [3]. 图 4 所示为经过时间反演技术处理后的天线 1 接收到的信号, 可以看出, 1 天线在 $t = 181.86$ ns 时刻点得到了时间上的聚焦峰值.

5) 取消目标天线, 利用 CST 仿真软件, 在目标天线的原位置设置一个场观测面, 如图 5 所示, 其中场观测面的频率设置在 3.5 GHz.

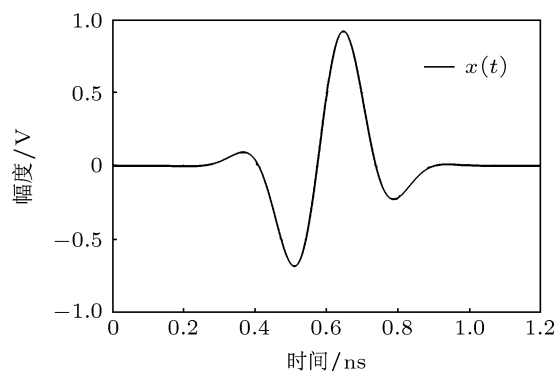


图 2 激励信号

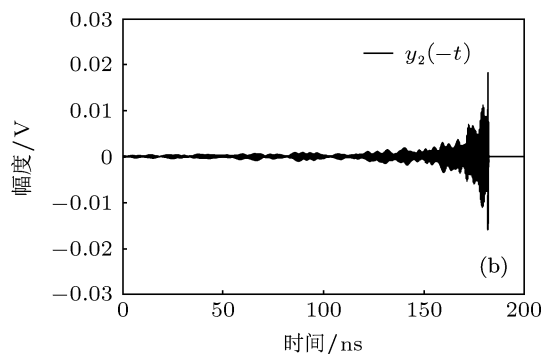
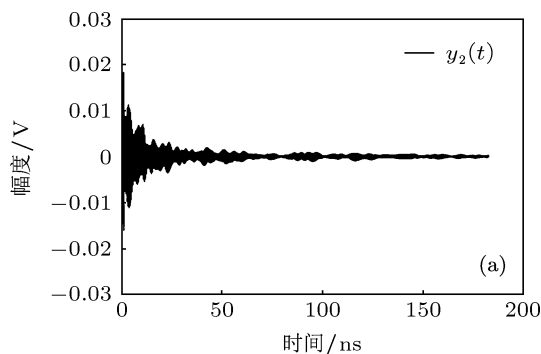


图 3 接收天线 2 的信号 (a) 接收到的信号; (b) 时域反转后的信号

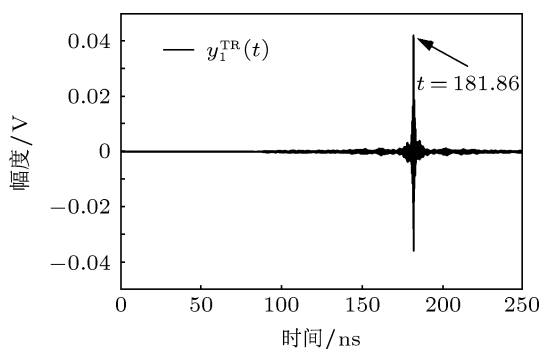


图 4 天线 1 接收到的信号

6) 将时域反转信号作为源信号, 分别由对应的 7 个接收天线同时发射出去, 即天线 i 的激励信号为 $y_i(-t)$, $i=2,3,\cdots,8$. 在观测面上显示的最佳聚焦效果如图 6 所示.

7) 以时间反转镜中心位置的天线 5 为对称点, 将其它天线的时域反转信号进行左右对称交换之后再同时发射, 即天线 i 的激励信号为 $y_{5-(i-5)}(-t)$, $i=2,3,\cdots,8$. 这种时间反演激励下, 在观测面上显示的最佳聚焦效果如图 7 所示.

通常环境下, 时间反演聚焦特性受到瑞利判据的限制, 聚焦分辨率是 $\lambda/2$. 而在本文所构建的仿真模型, 能够实现电磁波超分辨率的聚焦特性. 图 6 所示为 $t = 181.86 \text{ ns}$ 时 (聚焦效果最好的时刻) 的观测面上呈现出的聚焦效果, 从图中可以清晰地看到偶极子天线的形状. 时间反演镜天线反演之后发射出的信号, 能够在目标天线原位置很好实现时空聚焦, 而且成像尺寸为金属丝的三个结构周期, 约为 $\lambda/14$, 突破衍射极限, 实现了亚波长成像.

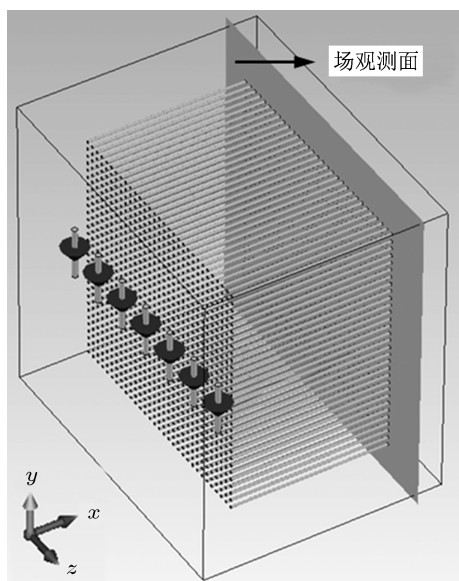


图 5 设置场观测面

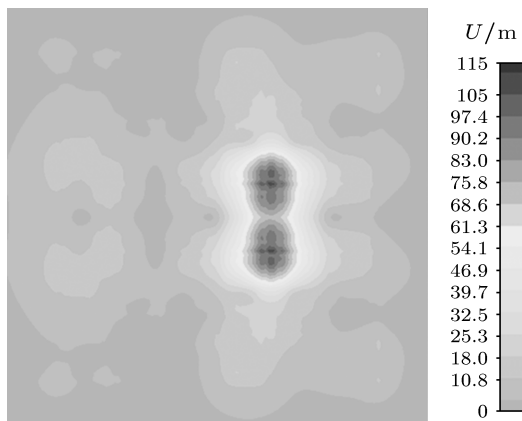


图 6 原地成像效果

图 7 同样为 $t = 181.86 \text{ ns}$ 时 (聚焦效果最好的时刻) 的观测面上呈现出的聚焦效果, 由图 7 可看出, 将时间反演镜时域反转后的信号以天线 5 为中心左右对称交换之后再发射, 同样能够突破衍射极限, 并在异于源像的位置出现了清晰的成像效果.

文献 [20] 中指出, 如果不使用时间反演技术, 将时间反演镜接收到的信号直接发射出去, 即使是穿过金属丝阵列, 也只能在目标天线对应的位置上, 出现时间反演镜天线的模糊成像, 无法在观测面上得到清晰的聚焦成像结果. 但由图 6 和图 7 可以知道, 在时间反演技术的支持下, 只要接收天线阵列接收到了目标天线发射出的信号, 并经过时间反演技术处理, 即使取消了目标天线, 同样能够在目标天线的观测面上得到良好的聚焦效果. 与此同时, 根据图 6 和图 7 可知, 原地和异地的成像能量分布一致、成像位置对称, 并且两者在同一时刻得到空间上的最佳聚焦效果. 因此, 利用时间反演技术, 改变信号对时间反演镜天线的激励方式, 能够在除了源像原位置之外的其他位置实现对源信号的提取和分析. 图 7 所示的异地成像效果满足远场成像条件 ($r > 2D^2/\lambda$), 即利用该方法能够在远场实现超分辨率聚焦成像.

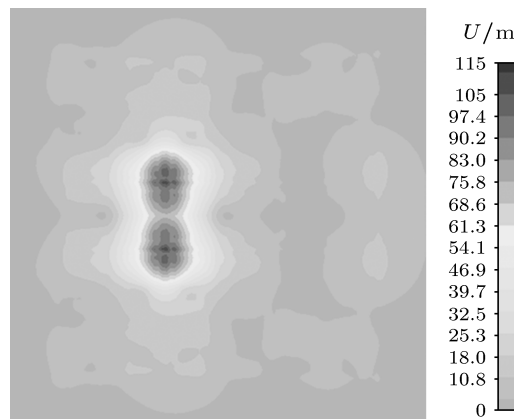


图 7 异地成像效果

3 面阵式时间反演镜的聚焦成像

上一小节证实了利用金属丝阵列结合时间反演技术能够在两个不同的位置恢复目标天线的信号, 这一节将介绍一种能够在 4 个不同的位置实现对源信号恢复的情况. 采用的结构设置与上一节相似, 金属丝阵列保持不变, 仅改变目标天线和时间反演镜的分布和数目. 其中, 1 号天线为目标天线, 2—6 号天线组成面阵式分布的时间反演镜. 天线 2 处于金属丝阵列的中心位置, 天线 3—6 以天线 2 为中心呈对称分布, 具体分布如下图 8 所示.

具体成像步骤与上一节的类似, 首先由目标天线发射一个如图 2 所示的时域信号 $x(t)$, 然后时间反演镜接收到的信号记为 $y_m(t)$ ($m = 2, 3, \dots, 6$), 其

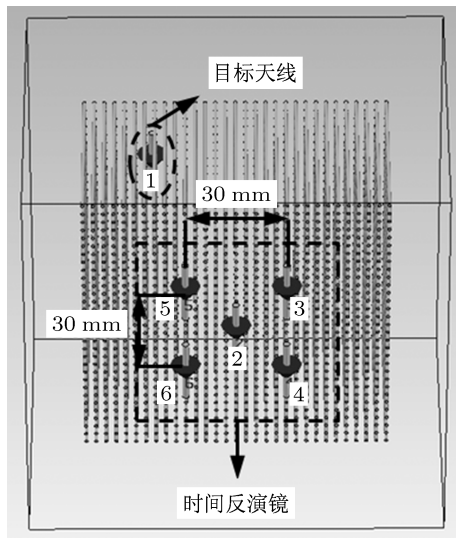


图8 四个成像结果的结构设置图

时域反转之后的信号记为 $y_m(-t)$ ($m = 2, 3, \dots, 6$), 接着取消目标天线, 利用 CST 仿真软件, 在目标天线的原位置设置一个场观测面, 场观测面的频率设

置在 3.5 GHz, 最后分别按照如表 1 所示的四种方式 (S1—S4) 对时间反演镜天线进行激励.

表1 时域反转信号对时间反演镜的激励方式

	天线 2	天线 3	天线 4	天线 5	天线 6
S1	$y_2(-t)$	$y_3(-t)$	$y_4(-t)$	$y_5(-t)$	$y_6(-t)$
S2	$y_2(-t)$	$y_5(-t)$	$y_6(-t)$	$y_3(-t)$	$y_4(-t)$
S3	$y_2(-t)$	$y_4(-t)$	$y_3(-t)$	$y_6(-t)$	$y_5(-t)$
S4	$y_2(-t)$	$y_6(-t)$	$y_5(-t)$	$y_4(-t)$	$y_3(-t)$

表 1 中的 S1, S2, S3, S4 四种情况, 分别表示将时间反演镜接收信号做时域反转后的信号用于直接激励、左右对称交换后激励、上下对称交换后激励以及对角交换后激励, 由此分别得到如图 9(a)—(d) 所示的四个成像结果. 图 9 展示的是在同一时刻点, 不同激励方式下最佳的聚焦成像效果. 由图 9 可以看出, 通过改变信号的激励方式, 能够在不同的位置实现对源像的恢复, 每个成像效果都突破衍射极限, 成像尺寸约为 $\lambda/8$, 实现了超分辨率成像, 并且在除了目标天线原位置之外的三个远场位置实现了对源像的恢复.

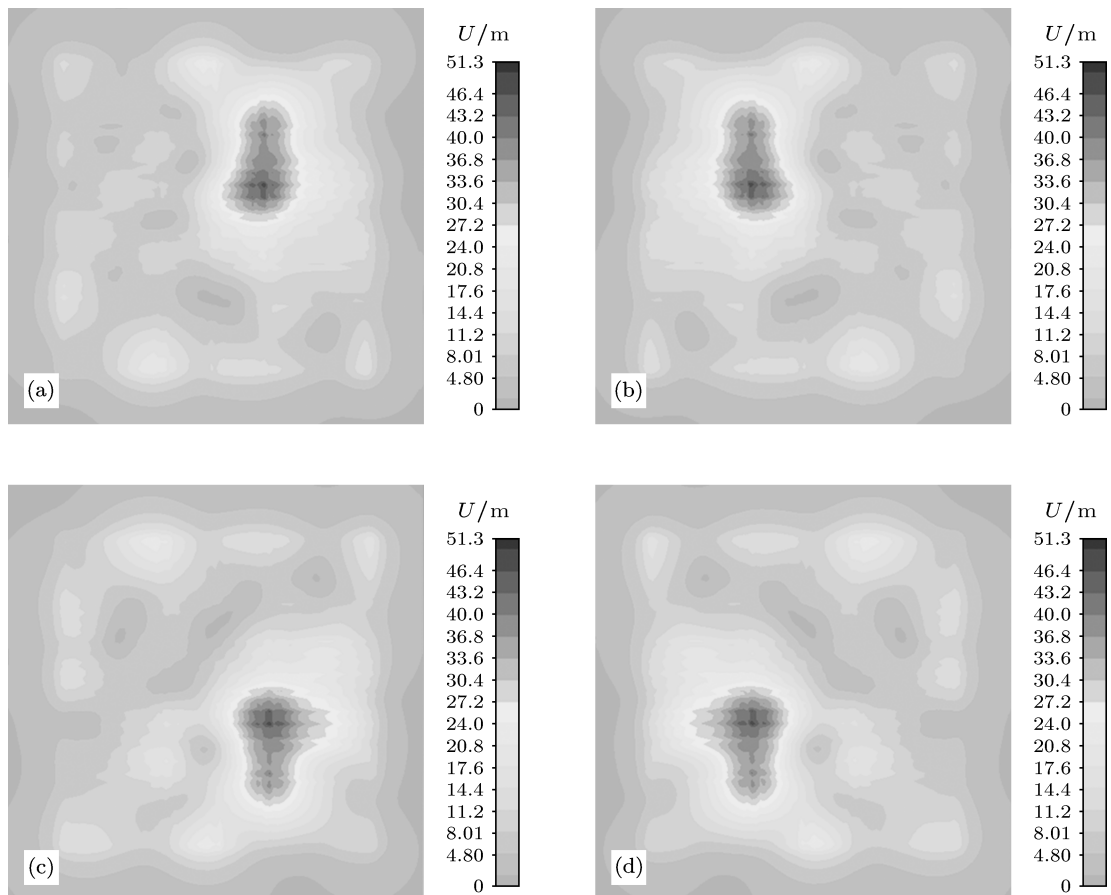


图9 成像结果图 (a) 原地成像; (b) 左右交换; (c) 上下交换; (d) 对角交换

本文还分析了如表 2 所示的两种方式, 将时间反演镜接收信号做时域反转后的信号用于激励. 表 2 表示的是时间反演镜天线处理激励信号的过程中, 只是对一部分信号进行了对称交换, 分别得到如图 10(a) 和 (b) 所示的两种结果. 由图 10 可以看出, 如果只对称交换一部分接收天线时域反转后的信号, 将只能在观测面上得到模糊的成像效果, 我

们无法通过成像结果来分析和提取源信号的信息. 因此在信号交换的过程中, 须对称地交换所有的信号, 才能在不同的位置实现对源像的恢复.

表 2 只对称交换部分信号的激励方式

	天线 2	天线 3	天线 4	天线 5	天线 6
S5	$y_2(-t)$	$y_5(-t)$	$y_4(-t)$	$y_3(-t)$	$y_6(-t)$
S6	$y_2(-t)$	$y_3(-t)$	$y_6(-t)$	$y_5(-t)$	$y_4(-t)$

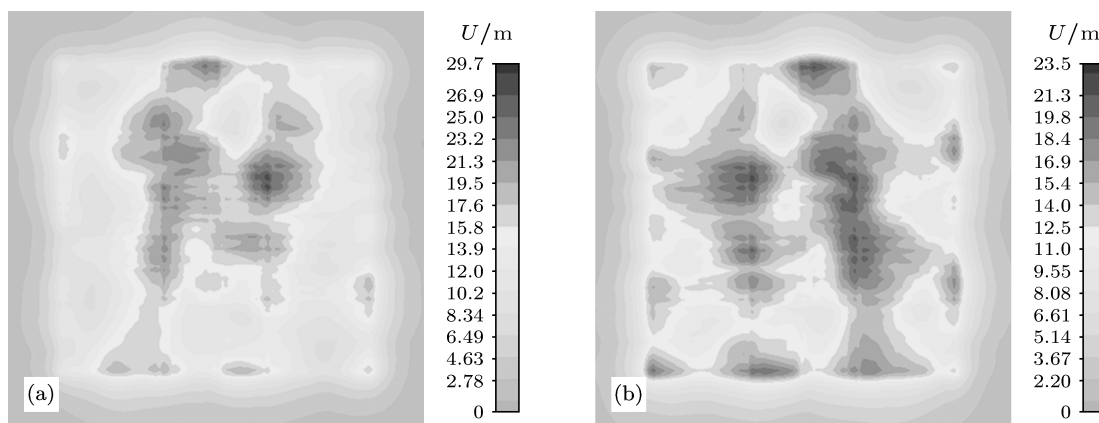


图 10 对称交换部分信号的成像效果 (a) 只交换 3 号和 5 号天线; (b) 只交换 4 号和 6 号天线

4 目标天线不同位置的聚焦成像

接下来讨论在时间反演镜阵列一定的情况下, 通过改变目标天线的位置, 能够在另外 4 个位置得到相应的成像效果. 此时的结构设置与图 8 相似, 唯一的变化就是将目标天线的位置向下移动了 15 mm. 激励方式与表 1 所示一致, 分别为: 直接激励、左右交换后激励、上下交换后激励以及对角交换后激励. 得到的四个成像效果分别如下图 11(a)—(d) 所示.

由图 11 可知, 即使改变目标天线的位置, 通过时间反演技术处理之后, 同样能够在成像平面上的 4 个不同位置得到超分辨率聚焦成像效果 (成像尺寸约为 $\lambda/7$), 实现对源像的恢复. 可以推断, 如果金属丝介质的某一部分出现问题, 则会在成像平面上出现不同的能量分布和成像效果^[13]. 通过改变目标天线的位置和观察成像效果图, 能够实现对结构的检测和扫描.

综合以上仿真结果图, 可以发现, 在目标天线位置和初始激励信号都不改变的时候, 不同的时间

反演镜阵列将会在不同的地方实现对源像的恢复, 并且成像分辨率也不一样; 此外, 在时间反演镜阵列不改变的情况下, 改变目标天线的位置, 也将会得到不同效果的成像精度. 这是因为, 改变时间反演镜排布或是改变目标天线的位置之后, 将会改变目标天线与时间反演镜之间的多径分布, 使得时间反演镜接收到不同的信号, 最终导致了在观测面上得到不同的成像效果. 综合分析, 成像效果的主要因素有: 1) 近远场转换效率. 转换效率将主要取决于目标天线与时间反演镜阵列之间的多径分布, 因此金属丝的排布方式将会影响近远场转换效率. 2) 传播过程中自由空间的波谱损失. 因为凋落波与传播波之间的互换过程发生在金属丝阵列中, 但并不是所有的波 (凋落波/传播波) 都能够到达时间反演镜平面, 因此尽可能地将目标天线和接收天线排布得离金属丝近一些. 3) 传播过程中的色散效应. 在整个实验过程中, 金属丝的电尺寸、信号在金属丝阵列中接收和发送形式的差异, 都将带来图像的不同扩展^[13].

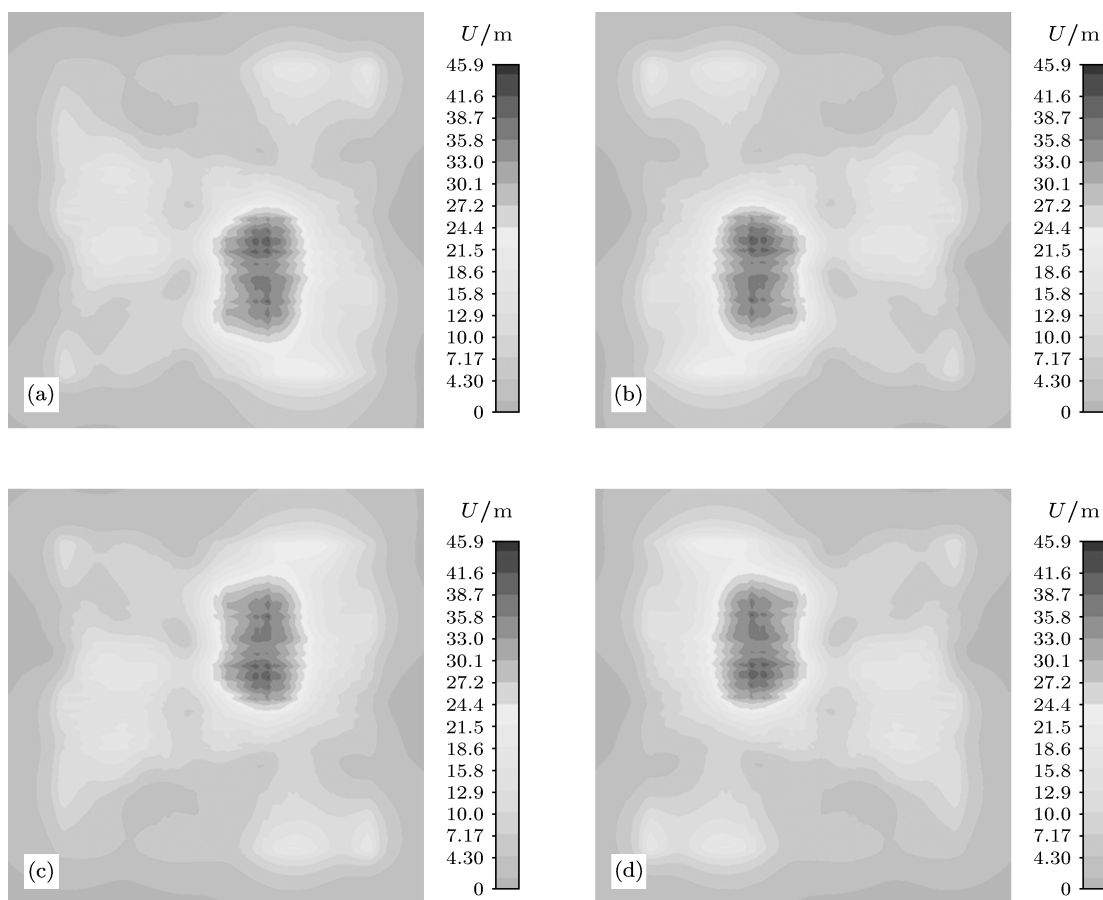


图 11 改变目标天线位置后的成像结果图 (a) 原地成像; (b) 左右交换; (c) 上下交换; (d) 对角交换

5 结 论

本文利用时间反演技术, 对规则排列金属丝阵列的超分辨率聚焦成像特性进行了研究. 利用一种已有的规则排列的金属丝阵列, 对时间反演电磁波的超分辨率聚焦成像特性展开了研究. 文中证实, 在不同的信号激励方式下, 除了能在原地实现对源信号的提取和突破衍射极限聚焦之外, 还能在同一时刻的不同位置实现对源像的恢复, 并得到了多种

超分辨率聚焦成像的仿真结果, 最佳聚焦效果达到了 $\lambda/14$. 在时间反演镜位置一定的情况下, 改变目标天线的位置依然能实现聚焦成像. 但是, 若只交换部分时间反演镜中时域反转后的信号, 将无法在观测面上得到清晰地超分辨率成像. 这些结果表明, 我们可以在传统的材料和设备下, 利用时间反演技术在源像的远处实现对微细特征的提取, 这种成像结构对异地恢复源信号、远场超分辨率成像以及结构探测都有着重要的意义.

- [1] Lerosey G, Rosny J, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 1
- [2] Ding S, Wang B Z, Ge G D, Wang D 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104101 (in Chinese) [丁帅, 王秉中, 葛广顶, 王多 2011 物理学报 **60** 104101]
- [3] Rosny J, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 1
- [4] Lerosey G, Rosny J, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1120
- [5] Ge G D, Wang B Z, Huang H Y, Zheng G 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8249 (in Chinese) [葛广顶, 王秉中, 黄海燕, 郑罡 2009 物理学报 **58** 8249]

- [6] Chen Y M, Wang B Z, Ge G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024101 (in Chinese) [陈英明, 王秉中, 葛广顶 2012 物理学报 **61** 024101]
- [7] Chen Y M, Wang B Z 2012 *Chin. Phys. B* **21**
- [8] Zhang Z M, Wang B Z, Ge G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 098401 (in Chinese) [章志敏, 王秉中, 葛广顶 2012 物理学报 **61** 098401]
- [9] Liu X F, Wang B Z, Xiao S, Deng J 2008 *Progress in Electromagnetics Research, PIER* **79** 401
- [10] Liu X F, Wang B Z, Xiao S, Lai S 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1731

- [11] Liu X F, Wang B Z, Li L 2009 *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters* **9** 1429
- [12] Malyuskin O, Fusco V 2010 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **58** 2884
- [13] Malyuskin O, Fusco V 2010 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **58** 459
- [14] Malyuskin O, Fusco V 2010 *Proc. URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*. Berlin 2010 p235
- [15] Pendry J B 2010 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966
- [16] Ge G D, Wang B Z, Wang D, Zhao D, Ding S 2011 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **59** 4345
- [17] Ge G D, Wang D, Wang B Z 2011 *Progress In Electromagnetics Research* **114** 429
- [18] Ge G D, Zang R, Wang D, Ding S, Wang B Z 2011 *IET Electronics Letters* **47** 901
- [19] Belov P A, Silveirinha M G 2006 *Phys. Rev.* **73** 056607
- [20] Ding S, Wang B Z, Ge G D 2010 *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), International Conference on* p1160
- [21] Belov P A, Marques R, Maslovski S, Nefedov I, Silveirinha M, Simovski C, Tretyakov S 2003 *Phys. Rev. B* **67** 113103

Super-resolution focusing of time reversal electromagnetic waves in metal wire array medium*

Zhou Hong-Cheng[†] Wang Bing-Zhong[‡] Ding Shuai Ou Hai-Yan

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

(Received 29 November 2012; revised manuscript received 22 February 2013)

Abstract

With an existing metal wire array structure, this paper verifies the temporal and spatial focusing properties of the time reversal techniques, and confirms the super-resolution focusing properties of the time reversal electromagnetic waves. Since the metal wire array can provide an evanescent-wave channel, by changing the signal incentives to the time reversal mirror (TRM), this paper achieves some satisfactory simulation results of subwavelength off-site imaging. The analysis and simulation results indicate that with time reversal technique, we can use traditional materials and equipment to achieve super-resolution confocal imaging in the far field, and extract and analyze the source signal at different positions.

Keywords: time reversal, metal wire array, super-resolution focusing, off-site imaging

PACS: 41.20.Jb, 42.25.Bs, 84.40.Ba

DOI: 10.7498/aps.62.114101

* Project supported by the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant Nos. 20100185110021, 20120185130001), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61071031, 61107018).

[†] Corresponding author. E-mail: zhouhc1230@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: bztwang@uestc.edu.cn