

时间反演镜对时间反演电磁波聚焦特性 影响因素的研究*

丁帅[†] 王秉中 葛广顶 王多 赵德双

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2010年12月23日收到; 2011年1月11日收到修改稿)

时间反演电磁波聚焦特性的主要影响因素来自于时间反演镜(time reversal mirror, TRM). 利用电磁仿真工具, 对各种影响因素进行分析, 给出了改善时间反演电磁波聚焦特性的方法. 最后, 通过实验对改善方法的有效性进行了验证.

关键词: 时间反演镜, 时间反演电磁波, 聚焦特性, 影响因素

PACS: 41. 20. Jb, 42. 25. Bs, 84. 40. Ba

1. 引言

时间反演电磁波具有远场时空同步聚焦特性^[1-4], 在超宽带通信、成像及能量传输系统中有广阔的应用前景. 一套完整的电磁时间反演系统由收、发天线与时间反演镜两部分组成. 电磁信号经时间反演镜反演变换后重新发射, 能够在收、发天线处处同步聚焦. 理论上, 一个封闭的时间反演腔(time reversal cavity, TRC)是最为理想的接收、反演、发射系统, 但现实中却很难构造这种封闭系统. Fink 将有限天线阵列作为接收、反演、发射的系统, 命名这种系统为时间反演镜(time reversal mirror, TRM), 并在1989年成功构造出了用于水下超声波通信及探测用的声学时间反演镜. 2004年, 时间反演技术被引入到电磁学领域, 人们开始探索时间反演技术在电磁波系统中的应用. 研究发现, 利用时间反演技术同样可以实现电磁波的时间和空间同步聚焦. 关于电磁时间反演镜理论的探讨始于2007年, Carminati 等人基于矢量衍射理论^[5], 利用并矢格林函数给出了严格的电磁时间反演腔理论. 同年, de Rosny 和 Fink 验证了时间反演电磁波在近场具有超分

辨率聚焦特性^[6]. 而后, Lerosey 等人用实验证明了时间反演电磁波具有远场超分辨率聚焦特性^[7]. 2010年, 随着研究的进一步深入, Rosny 等人对时间反演镜理论作了详细阐述^[8], 进一步完善了时间反演电磁学的相关理论.

经过多年的发展, 时间反演电磁学的基础理论已趋于完善, 以时间反演电磁学为背景的应用性研究也逐步开展起来, 并在医疗、目标探测以及无线通信等领域均取得了丰硕成果^[9-13]. 时间反演镜是电磁时间反演系统的核心, 但针对其设计具有指导意义的研究却尚未开展. 频域的相位共轭与时域的时间反演为等效关系, 近年来, 有关相位共轭阵列方面的研究开展较为成熟^[14-16], 成功解决了窄带相位共轭镜的设计, 但相位共轭阵列的窄带特性决定了其不适用于时间反演镜设计中. 因此, 为获得对时间反演镜设计有价值的参考信息, 本文在总结了本课题组前期大量相关工作的基础上^[17, 18], 通过建立 TRM 仿真模型, 对影响时间反演电磁波聚焦的因素进行研究分析, 总结出了改善时间反演电磁波聚焦效果的方法, 并通过实验对其有效性进行了验证, 为高效时间反演镜的实现提供了设计指导.

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008AA01Z206)、博士点基金(批准号:20100185110021)、国家自然科学基金(批准号:61071031)和中央高校基本科研业务费项目(批准号:E022050205, 9140A01020110DZ0211)资助的课题.

[†] E-mail: dingshuai_uestc@yahoo.cn

2. 研究方案

时间反演镜的功能是将接收到的信道测量信号反转,然后再发射给接收天线,以期达到在接收天线处电磁波时空同步聚焦. 研究方案分为两个步骤,首先,通过建立电磁仿真模型对电磁波聚焦特性的影响因素进行分析计算,根据仿真结果提出改善聚焦效果的方法. 然后,通过实验对所提出的方法加以验证,进一步明确所提出的方法对改善电磁波聚焦的有效性.

如图 1 所示,利用先进的电磁仿真软件 CST Microwave Studio,可以建立电磁信号时间反演聚焦的仿真模型. 接收天线与时间反演镜天线都安置在一个腔体内,腔体边界的设定决定了环境的复杂程度. 时间反演镜阵列的天线单元数量为 N ($N=1,2,3$),单元之间的距离设定为 d . 接收天线采用一种微结构天线^[7,17,18],如图 1(b)所示,它与时间反演镜的距离为 D , D 满足远场条件. 通过参数化建模能够对各种影响时间反演电磁波聚焦特性的因素进行模拟分析.

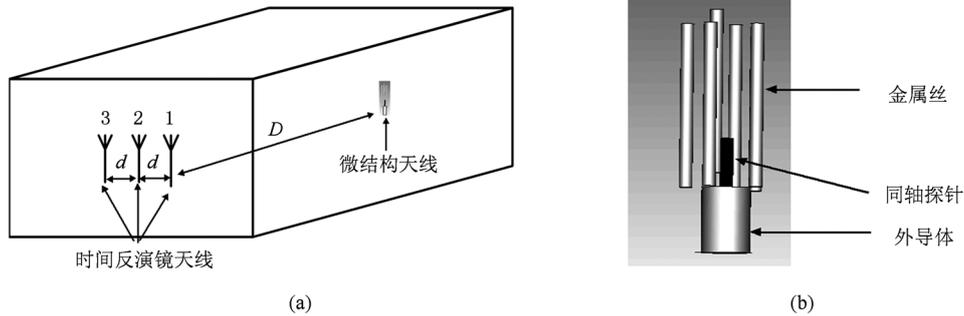


图 1 仿真模型示意图 (a)外腔及天线摆放位置;(b)由同轴探针构成的微结构天线

首先,接收天线发射信道探测信号 $a(t)$. $a(t)$ 为一阶高斯脉冲,频带 0.1—8 GHz,中心频率为 4 GHz,中心频率对应的波长为 λ . 时间反演镜各天线单元分别接收到信号 $x_i(t)$, $i = 1-N$;将其作反演变换,得到 $x_i^{TR}(t) = x_i(-t)$;然后将 $x_i^{TR}(t)$ 由时间反演镜重新发射,能够在接收天线处得到聚焦信号 $y_N(t)$ 以及聚焦峰值 P_N . 根据 Parseval 定理,采用如下公式可求得聚焦信号的聚焦能量值 E_N :

$$E_N = \sum_k |y_N(t_k)|^2 \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, (1)$$

其中, Δt 为仿真时间步长. 仿真时,采用六面体网格,每个波长的网格数不少于 15.

我们将通过对聚焦信号 $y_N(t)$, 聚焦峰值 P_N 以及聚焦能量值 E_N 进行计算,找出影响聚焦效果的因素,并提出改进方法.

为了论证改善时间反演聚焦效果方法的有效性

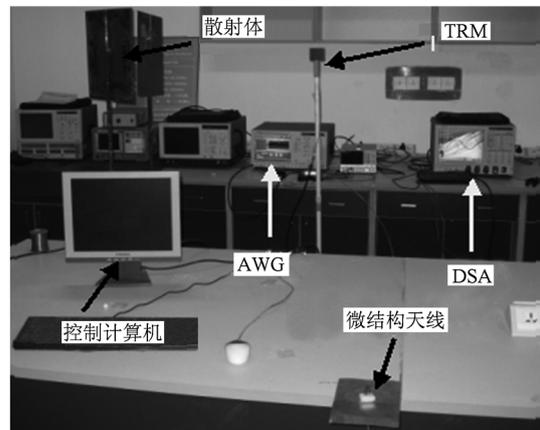
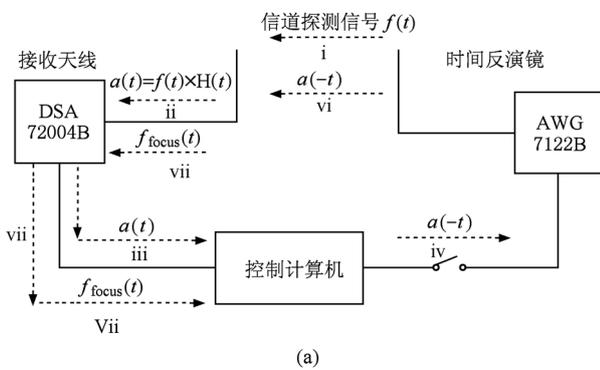


图 2 电磁波时间反演系统实验方案 (a) 时间反演系统方案;(b)时间反演镜、接收天线及仪器布局

性,我们也设计了相关实验对其进行验证. 图 2(a) 为实验流程图. 采用任意波形发生器 AWG7122B 作为信号源, 这种仪器有两个触发通道, 双通道交互采样率为 24 GS/s, 可准确实现任意 0—9.6 GHz 信号发生. 信号采集通过串行数据分析仪 DSA72004B 实现, 这种仪器采样率为 50GS/s, 可准确采集实验中天线接收的信号. 电磁波反演聚焦的过程为, 由 AWG 产生一个短脉冲作为信道探测信号, 接收天线接收到经过多径作用的信号, 并由 DSA 采集. 通过控制计算机将信号反演, 并将反演信号重新通过 AWG 发射, 在接收天线处得到聚焦信号. 根据需要, 对时间反演镜各参数进行调整, 比较得到的聚焦信号, 验证改善聚焦效果方法的有效性. 实验中, 信道探测信号采用调制高斯脉冲. 为了便于操作, 信道探测信号由时间反演镜发射, 根据信道互易原理, 这样操作是合理可行的.

3. 时间反演电磁波聚焦效果影响因素分析及改善方法

影响聚焦效果的因素主要有: 1) 时间反演镜天线数量; 2) 时间反演镜天线分布形式; 3) 计算误差

以及各天线响应时间不同带来的影响.

3.1. 时间反演镜天线数量对聚焦效果的影响

时间反演电磁波只有在复杂多径环境中才能展示出时间与空间的同步聚焦效果. 通过将图 1 所示模型的外腔边界设置为电壁, 可以产生丰富的多径, 得到更好的聚焦效果. 图 3(a)—(c) 为时间反演镜采用不同天线数量时得到的聚焦信号 $y_N(t)$. 当天线数量为 3 时, 得到最大聚焦峰值 P_3 . 将三组聚焦峰值 P_N 对 P_3 归一化, 得到图 3(d) 中的归一化聚焦峰值曲线. 将三组聚焦能量值对 E_3 归一化, 得到图 3(d) 中归一化聚焦能量值曲线.

图 4 为利用实验手段得到的归一化最大聚焦峰值与归一化能量值随时间反演镜天线数量变化的曲线.

仿真及实验结果表明, 增加时间反演镜天线数量能够明显改善时间反演电磁波的聚焦效果. 聚焦效果改善的原因是天线数量的增加可以使时间反演镜接收到的多径信息更为丰富, 收集到的空间信道信息更为完整, 时间反演能够更好地对多径效应进行补偿, 从而提高信号聚焦的质量.

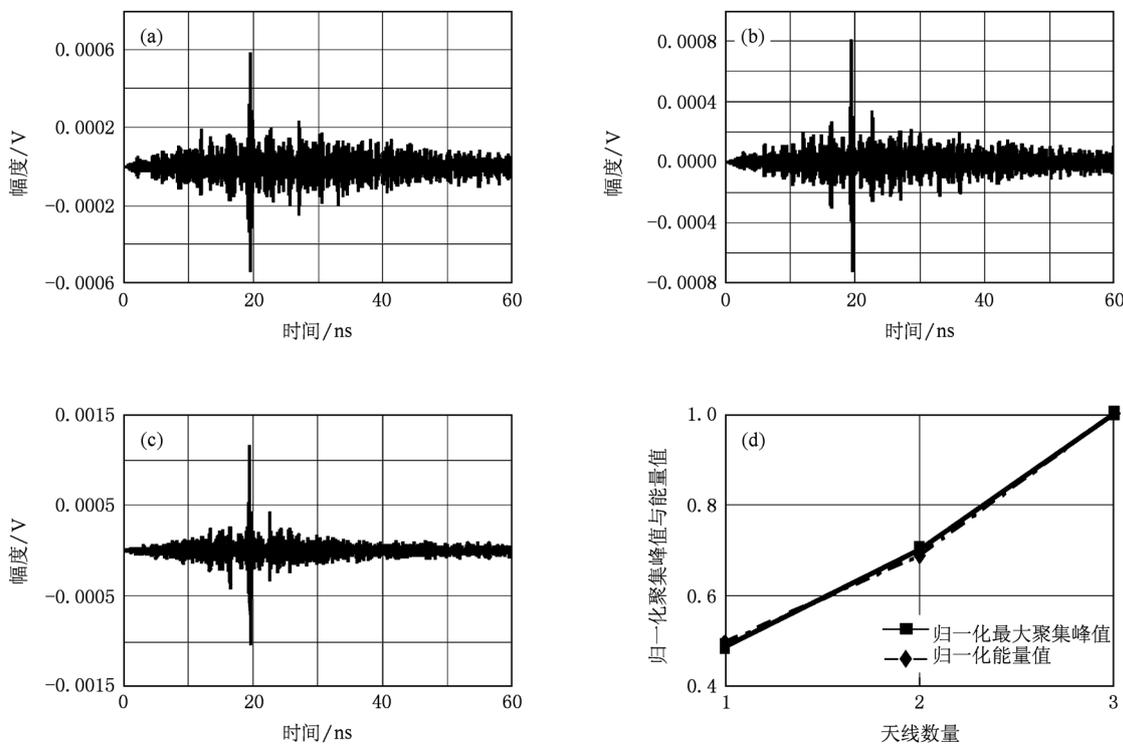


图 3 信号聚焦效果 (a) 单天线反演镜聚焦; (b) 双天线反演镜聚焦; (c) 三天线反演镜聚焦; (d) 归一化聚焦峰值与归一化能量值

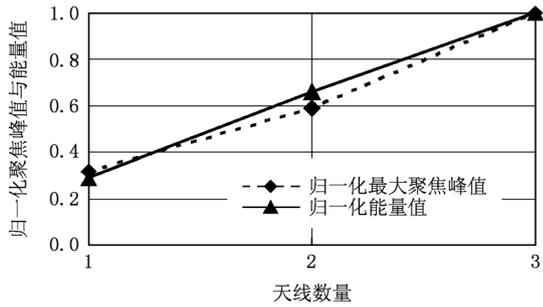


图4 利用实验得到的归一化聚焦峰值与归一化能量值

3.2. 时间反演镜天线分布对聚焦效果的影响

时间反演镜中天线的分布也会对聚焦效果产生影响. 在图1所示模型中, 时间反演镜各天线间距为 d . 我们采用改变间距 d 的方式来研究天线分布对聚焦效果的影响. 通过仿真计算, 可以得到当 $d = \lambda/16, \lambda/8, 3\lambda/16, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4, \lambda$ 时的聚焦信号 $y_3(t)$ 与聚焦能量值 E_3 . 经计算, 当 $d = \lambda$ 时, 得到最大聚焦峰值 P_{3max} . 最大聚焦能量值 E_{3max} 出现在 $d = \lambda/2$ 时. 将4组聚焦峰值及能量值分别对 P_{3max} 和 E_{3max} 作归一化处理, 能够得到图5所示曲线.

计算结果表明, 时间反演镜天线分布会对聚焦效果产生影响. 天线分布形式会对接收到的信道信息产生影响. 但在天线形式与数量相同的情况下,

时间反演镜接收到的总能量差异却不会有明显差异. 因此, 反演聚焦信号的总能量也不会随天线分布形式的改变而有较大差异. 如图6所示为时间反演镜天线间距 $d = \lambda/4$ 与 $d = \lambda$ 时得到的聚焦信号. 从图中可以看出, 当天线间距较大时, 由于时间反演镜能够收集到更多独立信道信息, 接收天线处能得到更好的聚焦效果. 聚焦信号在聚焦时刻的电平值较高, 而非聚焦时刻的电平值较低. 在能量分布上, 聚焦时刻附近的能量较高, 但非聚焦时刻的能量较低. 因此, 两种情况下, 聚焦信号的总能量差异较小. 同时, 还可以看出, 当天线间距足够大时, 聚焦峰值趋于平稳, 不再随间距增加而增大.

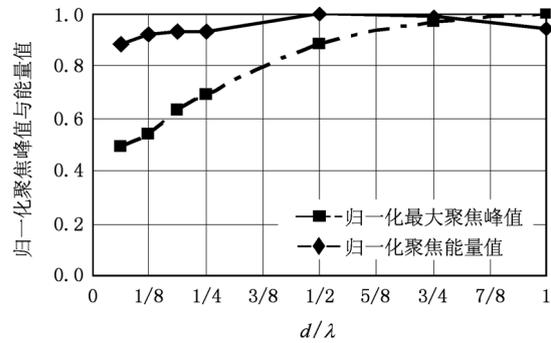


图5 天线间距对信号聚焦效果的影响

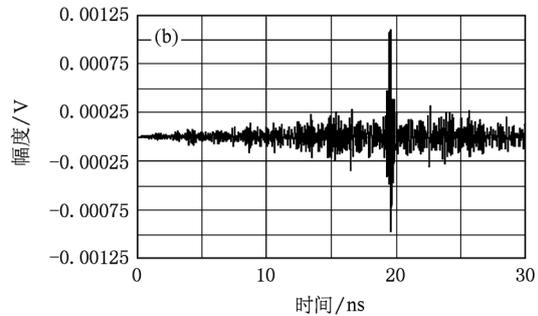
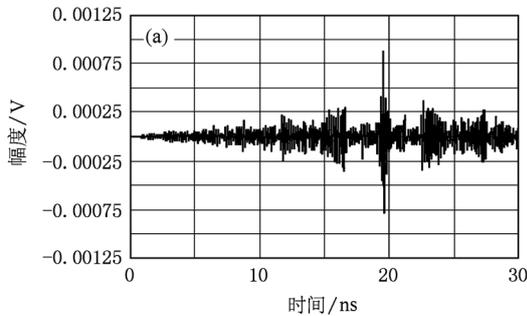


图6 两组聚焦信号 (a) $d = \lambda/4$ 时的聚焦信号; (b) $d = \lambda$ 时的聚焦信号

图7所示为通过实验手段得到的归一化聚焦峰值及能量值随天线间距变化的曲线. 实验中, 天线间距 d 的变化范围为1—20 cm. 可以看出, 聚焦信号能量值随天线间距变化不明显. 当天线间距小于8 cm时, 聚焦峰值随天线间距变化较大, 当天线间距大于半波长时, 聚焦峰值变化趋于平稳.

仿真及实验结果表明, 时间反演镜天线分布会对聚焦效果产生影响. 在利用普通天线作为时间反演镜天线时, 可以采用增大天线间距的方式获取更

多信道信息, 改善聚焦效果.

值得注意的是, 在封闭环境中, 能够分配给时间反演镜的空间有限, 天线间距通常会受到限制, 以致影响聚焦效果. 为解决这个问题, 可以采用与接收天线形式类似的微结构天线阵作为时间反演镜天线. 这种天线阵即使在单元间距很小的情况下, 各单元的接收信道也能保持相对独立. 作为电磁时间反演系统的接收天线, 文献[5]与文献[15]已经对其做了详细讨论, 并证明在使用时间反演技

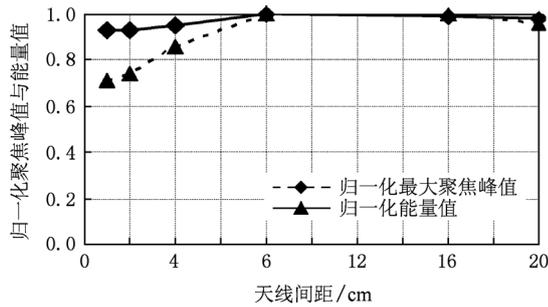


图7 天线间距对聚焦效果的影响

术时,这种微结构天线阵具有超分辨率特性.我们利用这种特性,采用微结构天线阵构成时间反演镜,可以解决空间大小限制带来的天线分布问题.将三单元微结构天线阵作为时间反演镜天线,通过仿真计算,能够得到不同间距下的聚焦峰值及聚焦能量值.图8所示为 d 取不同值时的聚焦效果曲线.计算结果表明接收天线处聚焦信号的最大幅值与能量值不会随天线间距发生明显变化.

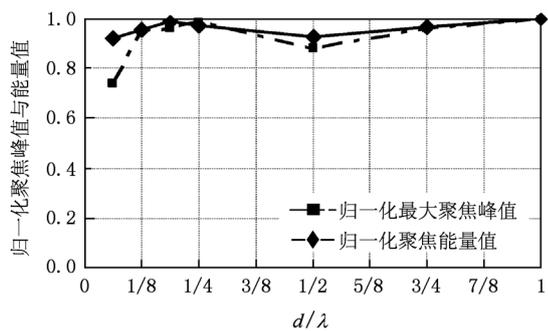


图8 微结构天线间距对信号聚焦效果的影响

任意波形发生器可以提供两路信号,实验中,我们利用两单元微结构天线阵作为时间反演镜,研究天线间距对聚焦效果的影响.天线间距最小为1 cm,最大为20 cm,图9为采用用微结构天线阵作为时间反演镜得到的归一化最大聚焦峰及聚焦能量曲线.实验显示,采用微结构天线阵后,聚焦峰值与能量值受天线间距影响很小.

3.3. 计算误差以及各天线响应时间不同带来的影响

在研究中,我们发现:无论是在仿真计算还是在实验过程中,时间反演信号接收天线处会有多峰聚焦现象出现,表现为在聚焦时刻附近出现多个聚焦峰.多峰聚焦现象的出现会严重干扰时间反演问

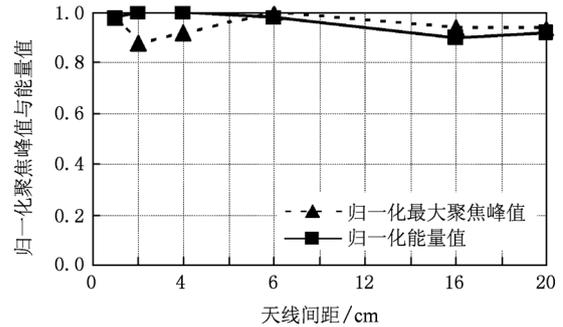


图9 实验采用微结构天线得到的归一化聚焦峰值与能量值

题的研究,影响诸如基于时间反演技术的成像以及通信系统的性能.

我们对图1所示的模型进行改进,建立图10所示模型,用于研究计算误差与时间反演镜各天线响应同步问题对聚焦效果的影响.图10所示模型中,在接收天线与时间反演镜之间加入了多个散射体,能够构造更为丰富的多径环境.

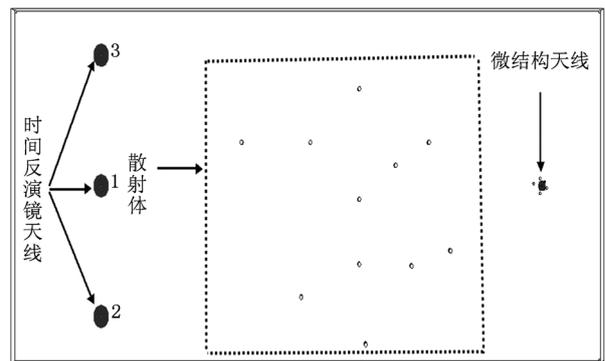


图10 引入更多散射体后的仿真模型

在仿真计算中,模型变得复杂,对精算精度要求也将随之提高.当计算精度不足时,会得到如图11(a)所示双峰聚焦现象.通过加密网格提高计算精度,可以得到正确的计算结果.如图11(b)所示为网格加密后得到的正确的聚焦信号.

在实际中,时间反演镜各天线间收发响应也会存在差异,这种差异会对时间反演电磁波的聚焦特性产生影响.为研究这个问题,需要对仿真模型中的时间反演镜各天线收发信号时刻进行调整,通过这种调整,使各天线收发响应产生差异.如图11(c)所示,当各天线发射时间反演信号的时刻相差10 ps时,仍然能够获得很好的聚焦效果.但当发射时刻相差42 ps时,聚焦效果会显著恶化,出现明显的多峰聚焦现象,如图11(d)所示.

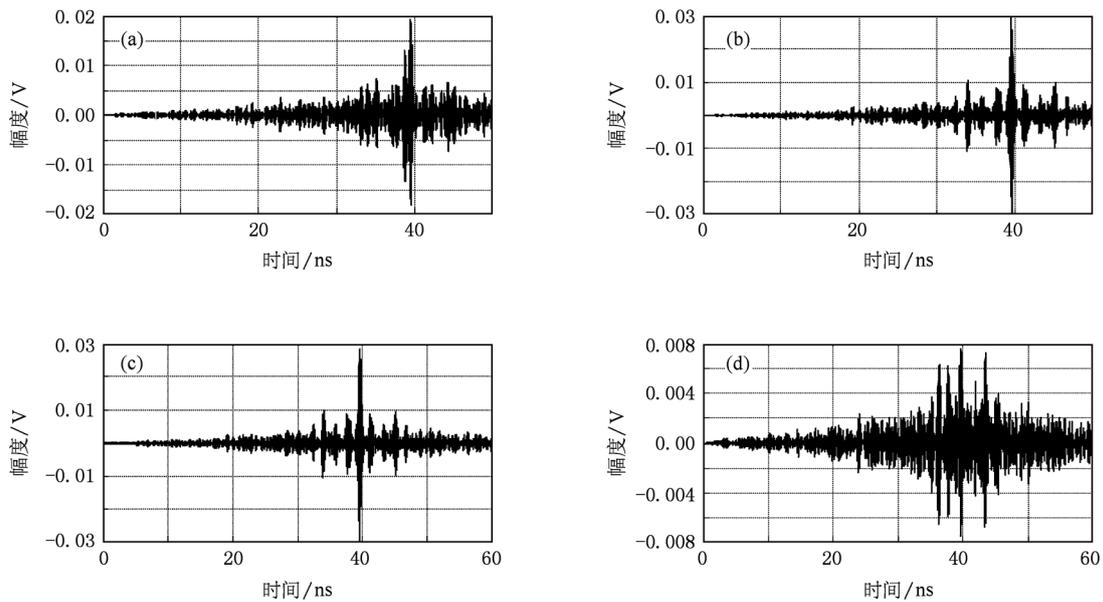


图 11 仿真计算得到聚焦信号 (a) 计算精度不足得到的双峰聚焦信号;(b) 提高计算精度后得到的聚焦信号;(c) 时间反演镜各天线发射时刻相差 10 ps 得到的聚焦信号;(d) 时间反演镜各天线发射时刻相差 42 ps 得到的聚焦信号

实验中,为体现天线响应未同步带来的影响,在发射反演信号时,我们首先将反演信号的发射时间错开一个采样周期(84 ps),得到了如图 12(a)所示的聚焦信号.在发射未同步的情况下,聚焦峰不

明显,聚焦效果很差.调整反演信号发射时间,在同步条件下发射信号,得到如图 12(b)所示的聚焦信号.可以看出,调整后的信号聚焦峰非常明显,聚焦效果得到改善.

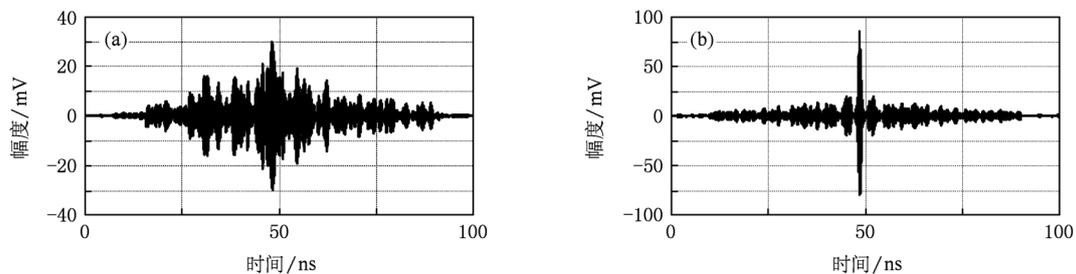


图 12 实验结果 (a) 反演信号未同步得到的聚焦信号;(b) 反演信号同步得到的聚焦信号

仿真及实验结果表明,时间反演镜各天线间响应的差异对聚焦信号影响较大.因此,在多天线时间反演镜设计中,应采用准确的时钟信号对时间反演镜各天线信号收发进行协调,保证高精度的信号同步,确保聚焦质量.

4. 结论与展望

本文对影响时间反演电磁波聚焦效果的因素

进行了仿真分析.讨论了时间反演镜天线数目、天线分布以及天线响应差异等对时间反演电磁波聚焦效果的影响.通过对各种因素的仿真分析,给出了改善聚焦效果的方法.这些改善方法在实验中得到了验证.为时间反演镜天线阵列的设计提供了指导.在今后的工作中,还将重点探讨高效电磁信号时间反演变换的方法,使电磁时间反演镜能够早日走出实验室,走进应用.

- [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] Li M, Zhang Z Y, Shi S, Du J L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** (in Chinese) [李敏、张志友、石莎、杜惊雷 2010 物理学报 **59** 958]
- [4] Liu H Y, Lv Q, Luo H L, Wen S C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 256 (in Chinese) [刘虹遥、吕强、罗海路、文双春 2010 物理学报 **59** 256]
- [5] Carminati R, Pierrat R, Rosny J, Fink M 2007 *Optics Letters* **32** 3107
- [6] Rosny J, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 065801
- [7] Lerosey G, Rosny J, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1119
- [8] Rosny J, Lerosey G, Fink M 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 3139
- [9] Kosmas P, Rappaport C M 2005 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **53** 2317
- [10] Liu D H, Kang G, Li L, Chen Y, Vasudevan S, Jones W, Liu Q H, Krolik J, Carin L 2005 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **53** 3058
- [11] Qiu R C, Zhou C, Guo N, Zhang N J 2006 *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.* **5** 269
- [12] Chambers D H, Berryman J G 2003 *Phys. Rev. Lett.* **92** 023902
- [13] Chen Y F, Gunawan E, Low K S, Wang S, Kim S, Soh C B 2007 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **55** 194
- [14] Henty B E, Stancil D D 2003 *Phys. Rev. Lett.* **93** 243904
- [15] Maslovski S, Tretyakov S 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 4241
- [16] Malyuskin O, Fusco V 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 459
- [17] 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]
- [18] Ge G D, Wang B Z, Zhao D S, Liu X F 2010 *ICMMT, Chengdu* 345

Influential factors of time reversal Mirror on focusing property of time-reversed electromagnetic wave*

Ding Shuai[†] Wang Bing-Zhong Ge Guang-Ding Wang Duo Zhao De-Shuang

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

(Received 23 December 2010; revised manuscript received 11 January 2011)

Abstract

The main influential factors on focusing property of time-reversed electromagnetic wave come from time reversal mirror (TRM). The various influential factors are analyzed by using electromagnetic simulation tools. Then method of improving the focusing property of time-reversed electromagnetic wave is proposed. Finally, the method of improving the performance is verified in experiment.

Keywords: time reversal mirror, time-reversed electromagnetic wave, focusing property, influential factors

PACS: 41. 20. Jb, 42. 25. Bs, 84. 40. Ba

* Project supported by the High-Tech Research and Development Program of China (Grant No. 2008AA01Z206), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100185110021), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071031), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. E02205205, 9140A01020110DZ0211).

[†] E-mail: dingshuai_uestc@yahoo.cn