

## 一种用于时间反演通信的亚波长天线阵列设计\*

章志敏<sup>1)2)</sup> 王秉中<sup>1)†</sup> 葛广顶<sup>1)</sup>

1) (电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

2) (淮北师范大学物理与电子信息学院, 淮北 235000)

(2011年4月23日收到; 2011年5月23日收到修改稿)

基于时间反演电磁波的远场超分辨聚焦特性, 设计了一种亚波长天线阵列, 其天线单元刻蚀有微结构、单元间距为  $1/20$  工作波长且信道相互独立. 在保证相似的辐射特性的条件下, 该亚波长天线阵列对比于其他微结构刻蚀所组成的亚波长天线阵列, 具有较好的远场超分辨率聚焦特性. 为基于时间反演的高速率、高质量多天线通信提供了一种有效的终端天线阵列.

**关键词:** 时间反演, 超分辨, 亚波长结构, 天线阵列

**PACS:** 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.-q

## 1 引言

根据传统理论, 为使多天线系统获得良好的空间分集增益和空间复用增益, 要求天线单元间距不小于半个工作波长. 如果天线单元间距远小于半个工作波长, 将导致单元间的耦合增大, 各天线对应的无线信道的相关性大大提高, 使得移动终端系统的通信容量和通信速率极大地降低, 严重损害了通信质量. 尽管人们对天线单元的小型化进行了诸多研究, 但由于天线单元之间的间距限制, 要将多个信道独立的天线集成在移动终端上, 所占的空间仍然较大.

时间反演通信技术的提出为移动终端的小型化提供了保障<sup>[1-5]</sup>. 时间反演技术利用时间反演电磁波自适应的空间、时间同步聚焦特性<sup>[6-8]</sup>, 可以使天线单元之间的间距即便是工作在亚波长状态, 天线单元的信道依然是独立的. Lerosey 等人首先实现了间距为  $\lambda/30$  的多天线系统独立单元的高质量通信<sup>[9]</sup>, 同时, Carminati 等<sup>[10]</sup> 在理论上证明时间反演矢量电磁波的时空聚焦特性. 在国内, 王秉中课题组也开展了这方面的研究工作, 并取得了一

系列成果<sup>[11-16]</sup>.

然而, 文献 [9] 中的通信终端需要大量随机细金属丝辅助构成多径, 以实现时间反演电磁波的时空聚焦, 这就限制了终端的集成和小型化. 文献 [16] 提出了一种平面三角单极子天线阵列, 该天线单元上刻蚀了许多十字槽, 从而摆脱了文献 [10] 上金属丝的限制, 使得通信终端的体积大大减小. 本文在普通贴片天线基础上进行微结构刻蚀, 并将不同微结构刻蚀的天线组成亚波长天线阵列进行时间反演超分辨实验, 从而获得了一种时间反演通信的亚波长天线阵列. 该亚波长天线阵列的天线单元比文献 [16] 上的天线单元带宽更宽、尺寸更加小巧.

## 2 天线阵列单元的设计和仿真

所设计的亚波长天线阵列的四种天线单元的辐射面和地板如图 1 所示 (单位: mm). 辐射面和地板中间是介质基片, 其厚度为 0.5 mm, 相对介电常数为 2.2, 损耗角正切为 0.003.

以图 1 中的 (a) 为辐射面, 以 (c) 为地板构成

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61071031)、高等学校博士学科点专项基金 (批准号: 20100185110021)、中央高校基本科研业务费 (批准号: E022050205, 9140A01020110DZ0211) 和淮北师范大学青年科研项目 (批准号: 2012xq41) 资助的课题.

† E-mail: bzwang@uestc.edu.cn

传统的单极子贴片天线, 将其记为天线 A; 依次, 由 (a), (d) 构成的记为 B, 由 (b), (c) 构成的记为 C, 而由 (b), (d) 构成的记为 D. 也就是说, 天线 B 是传统单极子贴片天线 A 在地板上进行刻蚀的结果, 天线 C 是辐射面进行了刻蚀, 而天线 D 则是辐射面和地板都进行了刻蚀.

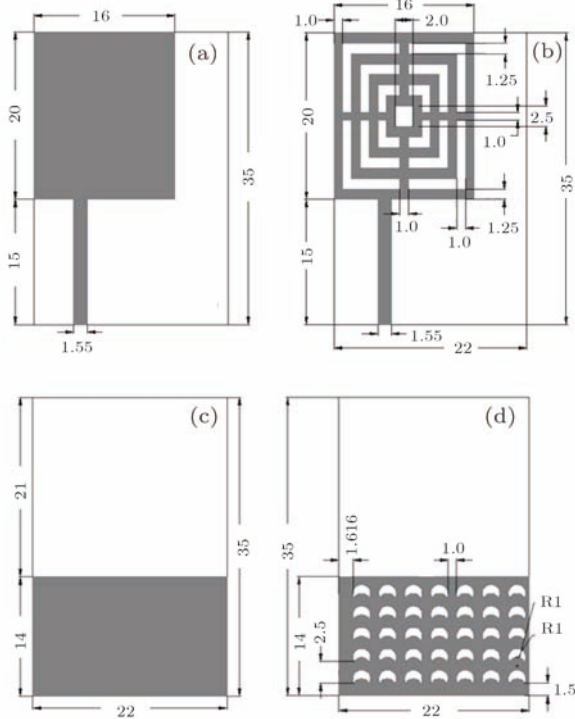


图 1 天线阵单元辐射面和地板示意图 (a) 未刻蚀的辐射面; (b) 微结构刻蚀的辐射面; (c) 未刻蚀的地板; (d) 微结构刻蚀的地板

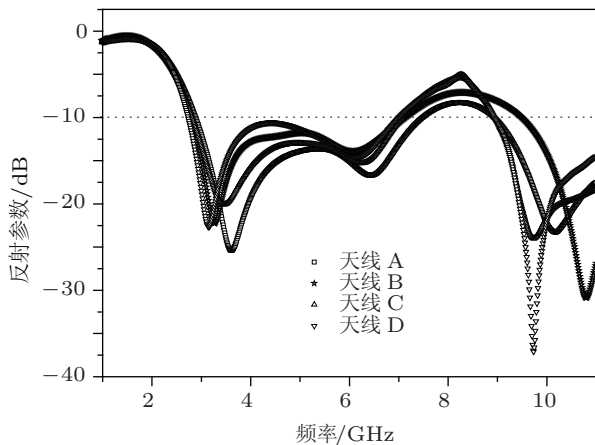


图 2 四种单元天线的 S 参数

使用仿真软件 CST Microwave Studio 对四种天线单元进行了辐射特性的仿真, 图 2 给出了四种天线的 S 参数. 从图中可以看出, 四种天线的带宽并没有多大的差异, 输入端口反射系数在 3—7 GHz 的带宽内都处于  $-10$  dB 以下 (超分辨率实验使用

的是 4 GHz 调制的 Gauss 脉冲). 图 3 给出了 4 GHz 时的 E 面方向图 ( $\varphi = 90^\circ$ ). 从仿真结果中我们可以看出, 经过微结构刻蚀的天线与传统的单极子贴片天线相比, 带宽相当, 辐射方向图也未发生变化. 也就是说, 经过微结构刻蚀的天线改变了局部微电流的分布, 却基本没有改变原天线的阻抗, 而且, 这种电流的微小变化也未能影响天线的远场辐射特性. 这样, 我们便得到了亚波长天线阵列的四种天线单元, 且这四种天线单元之间的辐射特性基本相同.

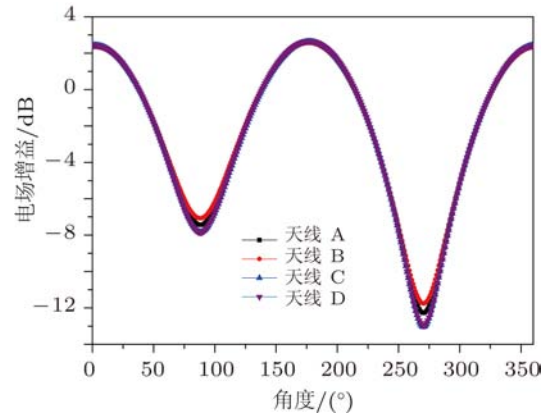


图 3 四种单元天线在  $\varphi = 90^\circ$  时的 E 面方向图 (4 GHz)

### 3 亚波长天线阵列的时间反演超分辨实验

如图 4 所示, 将四种天线单元 A, B, C, D 分别组成四组  $1 \times 4$  的天线阵列 (每组使用的天线单元

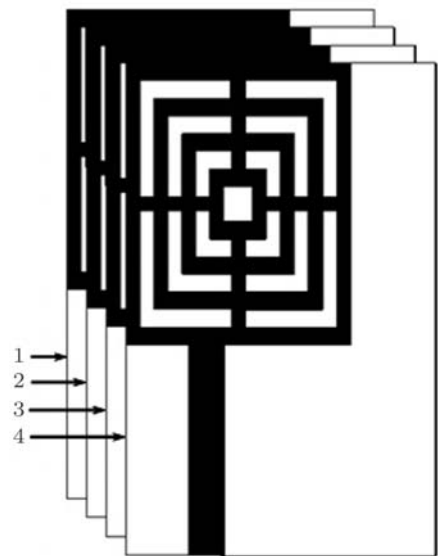
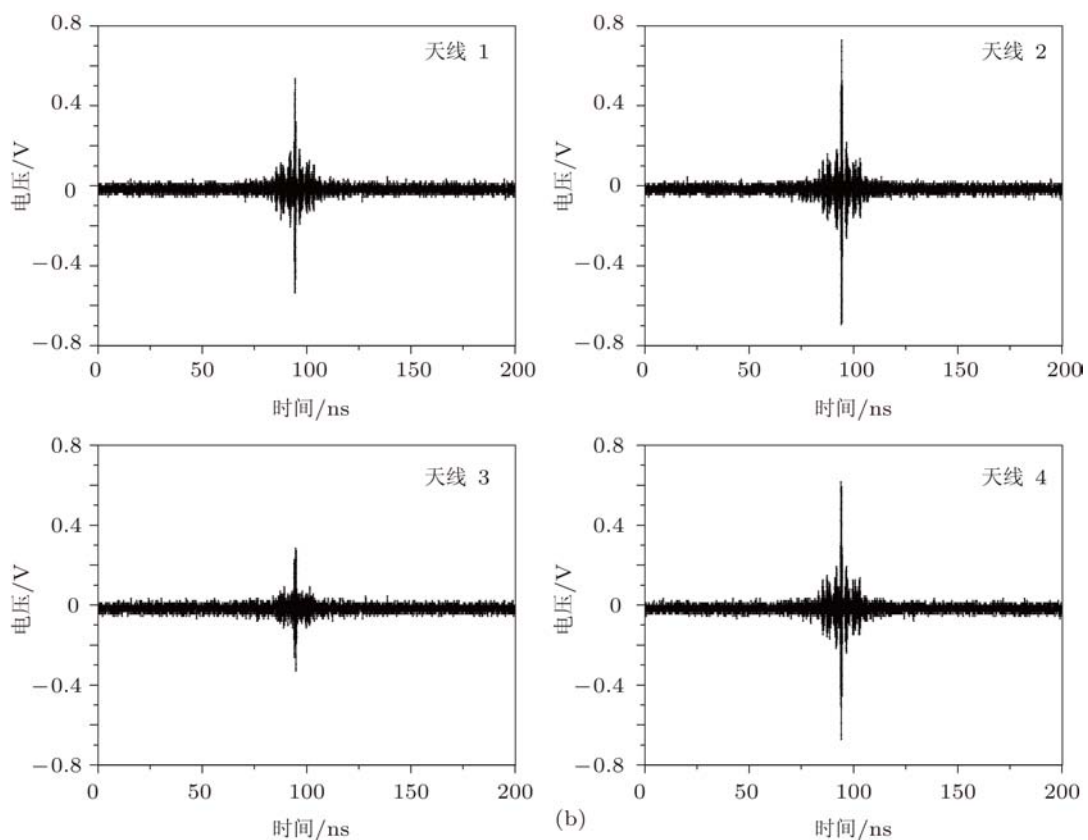
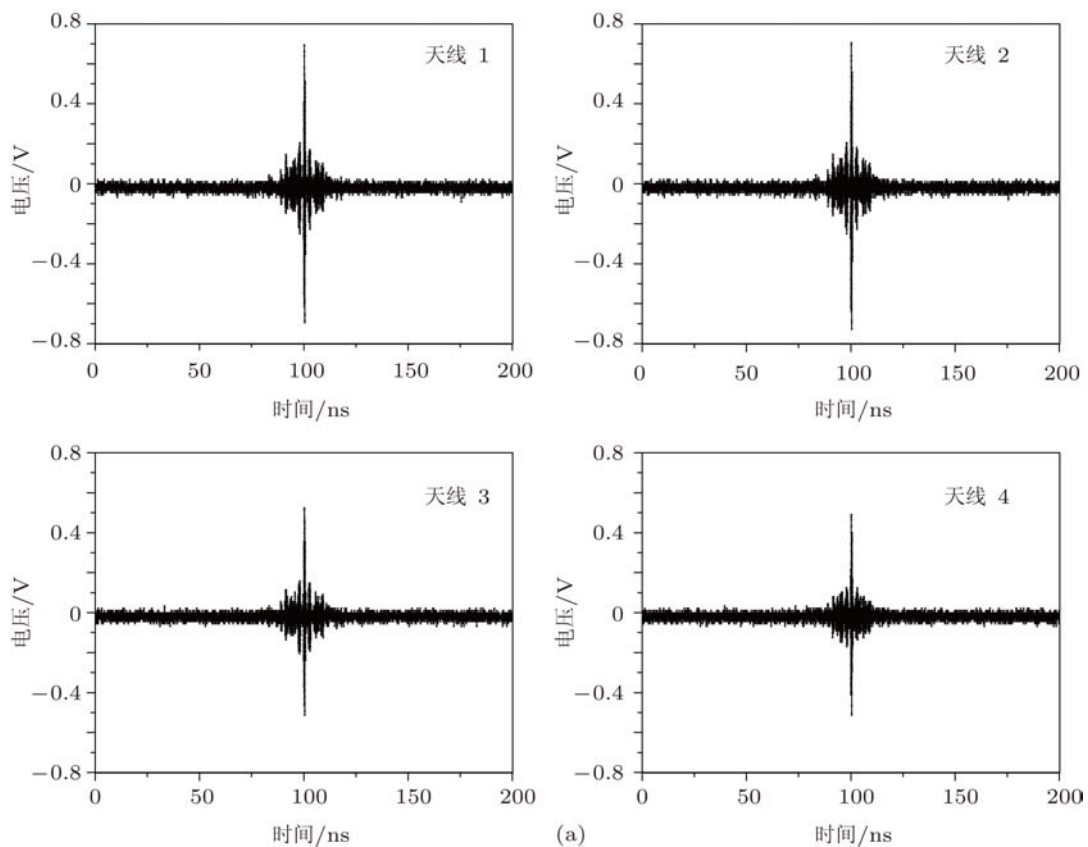


图 4 紧凑的亚波长天线阵列 (阵元间距  $\lambda/20$ )



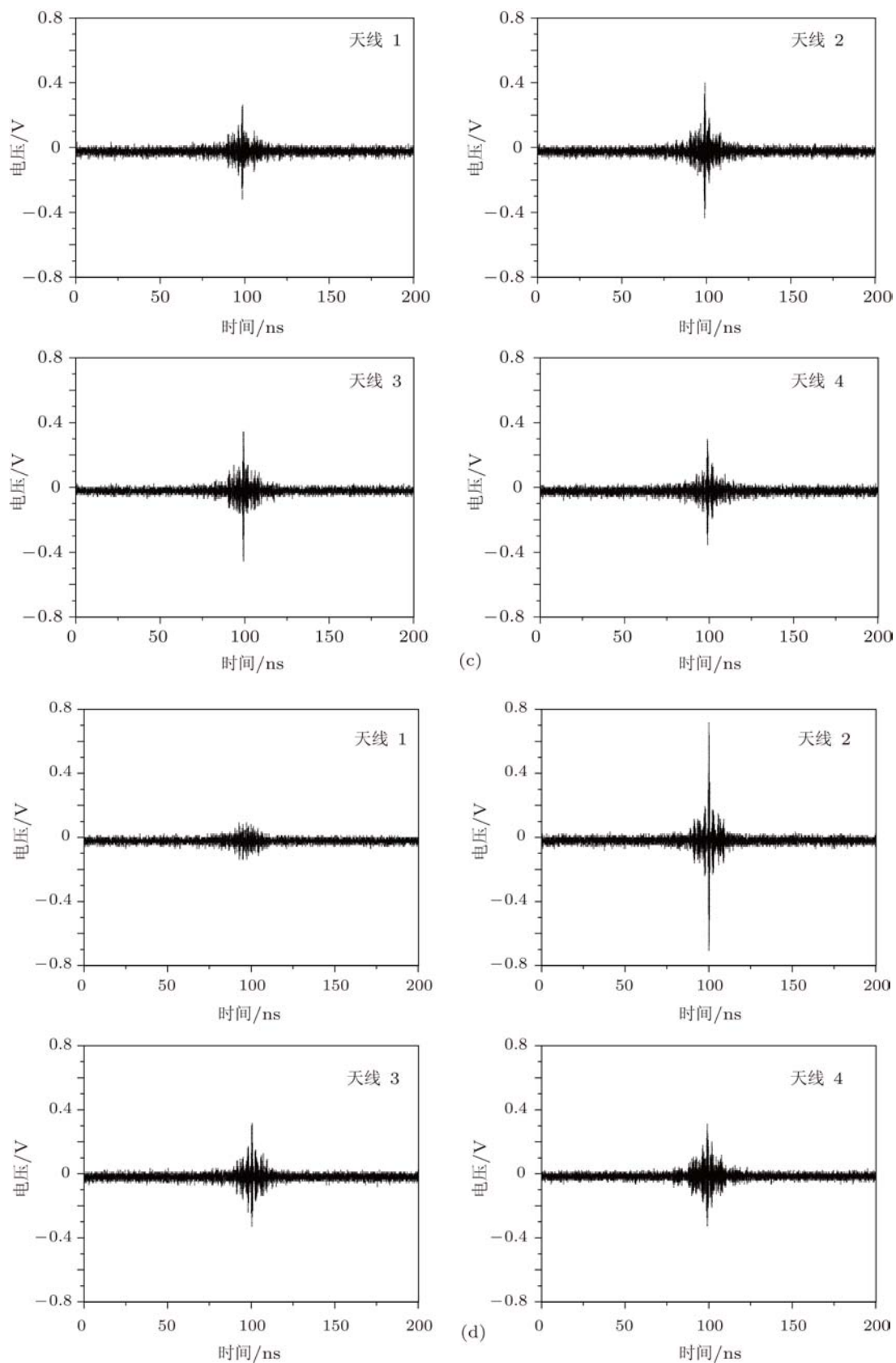


图 5 不同天线阵列的天线单元接收的时间反演电磁波信号 (天线 2 为馈入端) (a) 天线阵列 A; (b) 天线阵列 B; (c) 天线阵列 C; (d) 天线阵列 D

为同一种天线), 天线单元之间的间距为  $\lambda/20$ . 每组天线阵列的单元依次编号为天线 1, 天线 2, 天线 3 和天线 4.

实验步骤如下:

- 1) 选择亚波长天线阵列 A;
- 2) 用任意波形发生器 (Tektronix, AWG7122B) 对天线单元 1 馈入一个 4 G 调制的 Gauss 脉冲;
- 3) 距离天线阵列  $50\lambda$  处的时间反演天线接收信号, 并由串行数字分析仪 (Tektronix, DSA72004B) 进行信号采样;
- 4) 将采集到信号用计算机进行时间反演, 并由时间反演天线重新发送;
- 5) 天线阵列 A 上的天线单元 1, 2, 3, 4 接收时间反演天线发出的时间反演电磁信号;
- 6) 对天线单元 2, 3, 4 重复 2)—5) 的操作, 完成对天线阵列 A 的超分辨率测量实验;
- 7) 按上述顺序完成对天线阵列 B, C, D 的超分辨率测量实验.

作为典型, 图 5 给出了天线单元 2 为馈入端的天线阵列 A, B, C, D 的超分辨实验结果.

从图 5(a) 中可以看出, 由普通单极子贴片天线

构成的亚波长天线阵列 A 的天线单元 1, 2, 3, 4 接收信号的电压峰峰值差别不大, 也就是说, 时间反演电磁波在天线阵列 A 处的场分布比较均匀, 天线阵单元之间无法分辨时间反演信号. 换句话说, 4 个天线单元共享了这个从天线单元 2 馈入经过时间反演镜反演再发回的信号, 因此天线单元的信道彼此之间不是相互独立的. 对于亚波长天线阵列 B 的单元所接收的信号, 如图 5(b) 所示. 虽然天线单元 3 接收到的信号很小, 但是天线单元 1, 2, 4 却接收到了幅度相当的、从天线单元 2 馈入经过时间反演镜反演再发回的信号. 故此, 仅将普通贴片天线的地板进行刻蚀而组成的天线阵列并不具有时间反演亚波长超分辨特性. 图 5(c) 所示的是仅将普通贴片天线的辐射面进行刻蚀而组成的天线阵列单元所接收的信号, 很明显, 这种亚波长阵列也不具有超分辨能力. 我们很容易从图 5(d) 的结果中看到, 天线阵列 D 中, 2 号天线单元接收到的信号幅度最大, 其他天线接收到的信号幅度均小于 2 号天线的一半. 这意味着, 对于天线阵列 D 附近的场, 天线单元 2 处的场最大, 场在距其  $\lambda/20$  处已迅速衰减. 也就是说, 该天线阵列具有亚波长超分辨特性.

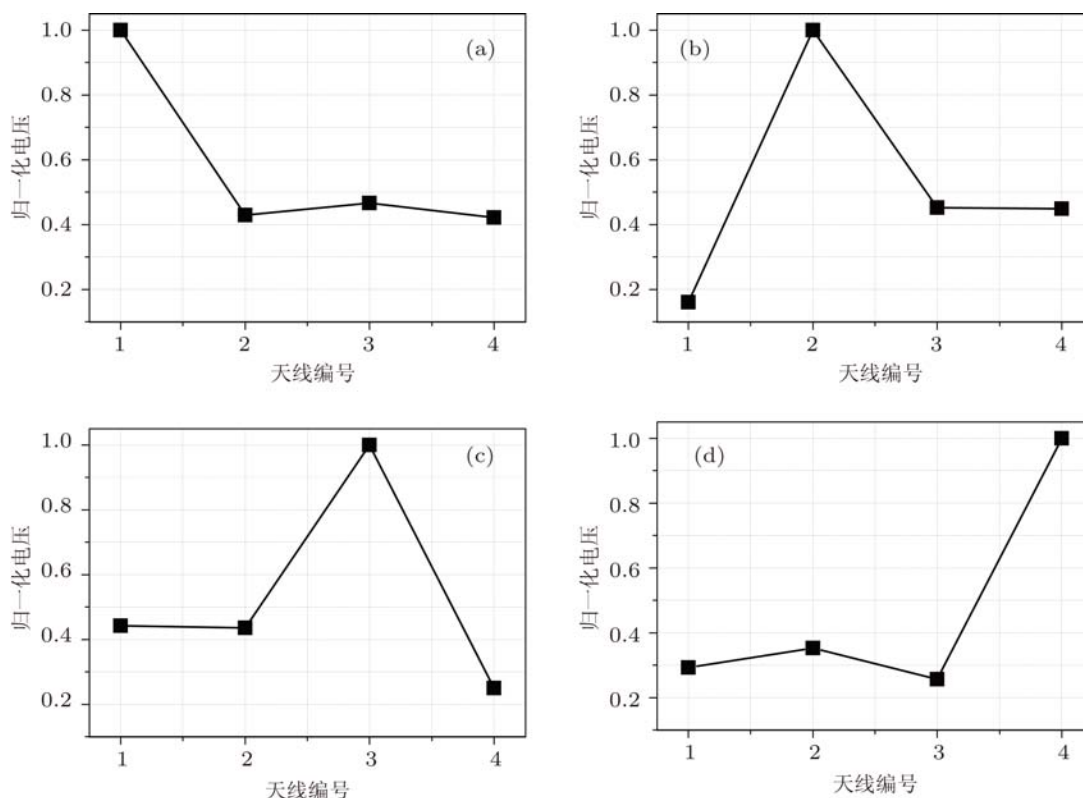


图 6 天线阵列 D 在不同馈端下的超分辨实验结果 (a) 馈入端, 天线单元 1; (b) 馈入端, 天线单元 2; (c) 馈入端, 天线单元 3; (d) 馈入端, 天线单元 4

通信时, 2号天线独享了这个由2号天线发射经由时间反演镜反演再发回的信号, 因此, 该信道是独立的.

图6给出了亚波长天线阵列D在不同的天线单元馈入信号时的时间反演超分辨实验结果. 图6(a)表示的是天线单元1作为馈入端时, 由天线单元1发出的信号时间反演镜反演再发回, 各天线单元重新再接收的归一化电压峰峰值. 从图中可以发现, 只有天线单元1接收的信号最强, 那么也就意味着, 每个天线单元代表一个相互独立的信道, 对其他天线单元干扰很小. 图6(b)—(d)同样也展示了这个亚波长天线阵列的超分辨特性, 即信道的独立性.

实验结果表明: 将传统的单极子贴片天线的辐射面和地板同时进行微结构刻蚀来组成亚波长天线阵列, 该亚波长天线阵列具有亚波长分辨能力, 而由其他三种天线单元所组成的亚波长天线阵列都不具备有时间反演超分辨特性.

## 4 结论

用传统的单极子贴片天线, 在不影响天线的辐射特性的情况下, 在辐射面和地板上同时进行微结构刻蚀, 设计了4种天线阵单元. 将每种天线单元组成 $1 \times 4$ 的亚波长天线阵列, 进行时间反演超分辨实验. 通过实验表明, 将传统的单极子贴片天线的辐射面和地板同时进行微结构刻蚀的天线单元所组成的亚波长天线阵列具有亚波长超分辨特性, 该亚波长天线阵列在时间反演超分辨实验中展示了天线单元的信道独立性, 从而为基于时间反演技术的高速率、高质量多天线通信提供了一种紧凑的亚波长天线阵列. 本文为时间反演技术通信终端的小型化提供了一种设计思路, 而由其他天线单元所组成的亚波长天线阵列是否具有时间反演超分辨能力, 以及为什么这种结构会带来亚波长超分辨能力都需要进一步的研究和探索.

- 
- [1] Guo N, Sadler B M, Qiu R C 2007 *IEEE Trans. Wireless Commun.* **6** 4221
  - [2] Song H C, Hodgkiss W S, Kuperman W A, Akal T, Stevenson M 2007 *IEEE J. Oceanic Eng.* **32** 915
  - [3] Jin Y, Moura J M F 2009 *IEEE Trans. Signal Process.* **57** 1396
  - [4] Jin Y, Moura J M F, O'donoghue N 2010 *IEEE J. Selected Topics in Signal Process.* **4** 210
  - [5] Scott I, Vukovic A, Sewell P 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 917
  - [6] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
  - [7] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Fink M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 154101
  - [8] Rosny J D, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **92** 1
  - [9] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1119
  - [10] Carminati R, Perrat R, Rosny J D, Fink M 2007 *Opt. Lett.* **32** 3107
  - [11] Xiao S Q, Chen J, Wang B Z, Liu X F 2007 *Prog. Electromagn. Res.* **77** 329
  - [12] Liu X F, Wang B Z, Li L W 2009 *IEEE Antenna Wireless Propag. Lett.* **8** 1426
  - [13] Liu X F, Wang B Z, Xiao S Q, Lai S J 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1731
  - [14] 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]
  - [15] Wang D, Wang B Z, Ge G D, Chen S T, Tang M C 2011 *J. Electromagn. Waves and Appl.* **25** 63
  - [16] Ge G D, Wang D, Wang B Z 2011 *Prog. Electromagn. Res.* **114** 429

# A subwavelength antenna array design for time reversal communication\*

Zhang Zhi-Min<sup>1)2)</sup> Wang Bing-Zhong<sup>1)†</sup> Ge Guang-Ding<sup>1)</sup>

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

2) (*School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China*)

(Received 23 April 2011; revised manuscript received 23 May 2011)

## Abstract

Based on the super-resolution property of time reversal electromagnetic wave far-field focusing, a subwavelength antenna array is proposed. The elements of the array are etched into those that have microstructures, placed at an interval of  $\lambda/20$  apart from one another, and have independent channels. Compared with the subwavelength antenna arrays, each of which is composed of other microstructure elements, the array, whose radiation property of individual antennae is similar to others, shows better super-resolution characteristic of far-field focusing. Therefore, an effective wireless terminal antenna array is provided for the high-speed and high-quality multiple-antenna communication using the time reversal technology.

**Keywords:** time reversal, super-resolution, subwavelength structure, antenna array

**PACS:** 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.-q

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071031), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of High Education of China (Grant No. 20100185110021), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. E022050205, 9140A01020110DZ0211), and the Scientific Research Foundation for Young Scientist of Huaibei Normal University, China (Grant No. 2012xq41).

† E-mail: bzwang@uestc.edu.cn