

# 基于时间反演电磁波的微结构天线的单频点超分辨力聚焦研究\*

屠惠琳<sup>†</sup> 肖绍球<sup>‡</sup> 杨智杰 王秉中

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2013年11月4日收到; 2014年1月13日收到修改稿)

提出了在时间反演技术条件下单频的电磁波信号可以实现超分辨力聚焦这一思路, 并基于信道理论推导了该思路的可行性; 基于传统的同轴探针结构建立了间距为1/4波长的微结构模型, 仿真结果证实了该模型结合时间反演技术在单频信号和宽带信号激励时均可以表现出超分辨力聚焦特性. 理论分析和仿真结果为单频以及多频带天线的超分辨力聚焦特性的研究提供了重要的指导作用.

**关键词:** 单频信号, 时间反演技术, 微结构, 超分辨力

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.084102

## 1 引言

近年来, 为了进一步提高无线通信容量和通信速率, 适用于移动台的信道相互独立、间距小于波长的紧凑型天线阵列受到了广泛的关注. 为了在受限空间内实现所需频带范围内天线的多独立信道, 构建电磁波超分辨力传输技术将是一条十分重要的研究思路. 电磁波的超分辨力现象研究最早始于亚波长光学成像领域<sup>[1-5]</sup>, 通过近场探测目标精细结构对应的高频分量从而获得超分辨力识别. 2002年, Rosny等<sup>[6]</sup>使用时间反演声波在近场发现了超分辨力现象, 同时时间反演声波的聚焦特性已广泛应用于目标监测等领域<sup>[7-10]</sup>. 2004年, 时间反演技术被引入电磁学领域<sup>[11]</sup>, 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. 时间反演电磁学的提出在国内外引起了广泛的研究<sup>[12-15]</sup>. 在通信领域方面, 2007年, Fink等<sup>[16]</sup>于《Science》发表的文章指出, 在丰富多径的环境中时间反演电磁波可以实现 $\lambda/30$ 的超分辨力聚焦特性, 随后Ge

等<sup>[17-20]</sup>通过刻蚀不同的微结构设计了多种亚波长天线阵列, 2012年, Fink等<sup>[21,22]</sup>提出了深度亚波长多输入多输出天线阵列, 这些阵列结合时间反演电磁波可用于多天线的高速率通信系统中, 但这些研究都是在宽带信号的激励条件下进行的. 早在1977年, 单色激光在一种等效于时间反演技术的非线性媒质作用下可以表现出聚焦成像的特性<sup>[23]</sup>. 文献<sup>[24]</sup>从理论上说明了在非均匀媒质存在的条件下任意带宽的信号均可以在时间反演条件下实现目标源的重建, 但是并没有给出具体的分辨力特性. 2010年, Malyuskin 和 Fusco<sup>[25]</sup>利用相位共轭透镜 (phase conjugated mirror, PCM) 研究了单频信号的超分辨力聚焦特性, 实现了单目标源处 $\lambda/7$ 的超分辨力特性, 对频域信号的相位共轭所具有的超分辨力特性进行了理论分析. 但是基于时间反演技术的单频电磁信号可以实现超分辨力聚焦的模型未见报道. 2013年, Pierrat等<sup>[26]</sup>研究了圆柱散射体构成的随机介质环境中点源的超分辨力聚焦特性, 并给出在时间反演技术下, 一定带宽的发射信号能够在点源实现超分辨力聚焦, 但是点

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61271028)、霍英东教育基金 (批准号: 131107) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: ZYGX2011J036) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [tuhl\\_uestc@163.com](mailto:tuhl_uestc@163.com)

‡ 通讯作者. E-mail: [xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn](mailto:xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn)

频发射信号不能够在点源产生聚焦现象的结论。由此可见,与单频信号激励时能够实现单目标以及多目标源的超分辨力聚焦相关的模型设计理论以及仿真实验结果亟待发展。

本文通过信道理论推导了单频信号激励时在目标天线处可以实现超分辨力的可行性;基于规律微细金属丝加载的天线模型,研究了微细金属丝对辐射信号的频率响应特性,将频谱中的峰值所对应的频点作为单频信号的频率,研究不同的目标天线在单频激励条件下的聚焦特性;基于同一个模型,研究了宽带信号与点频信号激励时不同目标天线的超分辨力效果的区别与联系。通过相关研究验证了点频信号激励时目标天线也可以表现出超分辨力聚焦特性,对窄带以及多频带的微结构天线的超分辨力的研究具有重要的指导意义。

## 2 单频点聚焦特性的理论研究

根据文献[27]中的结论,对于一个三单元亚波长阵列天线,耦合矩阵 $\mathbf{C}_r$ 可以写为

$$\mathbf{C}_r = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^c = \begin{bmatrix} c_{11}|H_1^{NC}|e^{j\alpha_1} + c_{12}|H_2^{NC}|e^{j\alpha_2} + c_{13}|H_3^{NC}|e^{j\alpha_3} \\ c_{21}|H_1^{NC}|e^{j\alpha_1} + c_{22}|H_2^{NC}|e^{j\alpha_2} + c_{23}|H_3^{NC}|e^{j\alpha_3} \\ c_{31}|H_1^{NC}|e^{j\alpha_1} + c_{32}|H_2^{NC}|e^{j\alpha_2} + c_{33}|H_3^{NC}|e^{j\alpha_3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由于耦合系数与信道响应函数具有相同的表达形式,因此,考虑单元天线互耦条件下的亚波长阵列与时间反演镜间的频域信道响应可以表示为

$$\begin{aligned} H_1^C &= |H_1^C|e^{j\theta_1}, \\ H_2^C &= |H_2^C|e^{j\theta_2}, \\ H_3^C &= |H_3^C|e^{j\theta_3}, \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $|H_1^C|$ ,  $|H_2^C|$ ,  $|H_3^C|$  为考虑互耦时频域信道响应的幅度;  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  为考虑互耦时频域信道响应的相位。由于单元天线间互耦的存在,会导致  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  出现差异。

将亚波长阵列中的 1 号单元天线设置为目标天线,由时间反演镜发射探测信号

$$x(t) = \cos(\omega_0 t) = (e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t})/2,$$

其中,对角线元素为单元天线的自耦合系数,对角线两边的元素为单元天线间的互耦系数。由于单元天线的自阻抗、互阻抗与负载阻抗均存在实部与虚部,因此,亚波长阵列天线单元之间的耦合系数是复数。

若在亚波长阵列天线远场放置时间反演镜,在计及互耦条件下,亚波长天线与时间反演镜间的信道响应矩阵为

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^c &= \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \\ &\times \begin{bmatrix} |H_1^{NC}|e^{j\alpha_1} \\ |H_2^{NC}|e^{j\alpha_2} \\ |H_3^{NC}|e^{j\alpha_3} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,  $|H_1^{NC}|$ ,  $|H_2^{NC}|$ ,  $|H_3^{NC}|$  为不计互耦的条件下频域信道响应的幅度;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  为不计互耦条件下频域信道响应的相位。由于天线单元间距很小,因此  $H_1^{NC}, H_2^{NC}, H_3^{NC}$  间的差异较小。(2) 式可以展开为

其傅里叶变换为

$$X(j\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)],$$

则亚波长阵列各单元天线所接收的信号为  $Y = X(j\omega)H^C$ , 表达式如下:

$$Y = \begin{bmatrix} \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_1^C|e^{j\theta_1} \\ \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_2^C|e^{j\theta_2} \\ \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_3^C|e^{j\theta_3} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

数学领域中频域的相位共轭变换等同于时域的时间反演变换,将(5)式中的 1 号单元天线所接收到的信号做相位共轭变换得到新的发射信号

$$\begin{aligned} X_N &= (X(j\omega)H_1^C)^* \\ &= \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_1^C|e^{-j\theta_1}, \end{aligned}$$

将其由时间反演镜重新发射,则亚波长阵列中各天

线单元所接收到的信号为

$$Y^{\text{TR}} = \begin{bmatrix} l\pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_1^C|^2 \\ \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_2^C|e^{j(\theta_2 - \theta_1)} \\ \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]|H_3^C|e^{j(\theta_3 - \theta_1)} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由于  $X(j\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$ , (6) 式简写为

$$Y^{\text{TR}} = \begin{bmatrix} X|H_1^C|^2 \\ X|H_1^C||H_2^C|e^{j(\theta_2 - \theta_1)} \\ X|H_1^C||H_3^C|e^{j(\theta_3 - \theta_1)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

由 (7) 式可知, 时间反演操作仅对目标天线所接收到的信号进行相位补偿, 对非目标天线不能进行相位补偿. 亚波长阵列天线能否展示出时间反演超分辨力特性将由  $|H_1^C|, |H_2^C|, |H_3^C|$  和  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  的值共同决定, 当构建的时间反演系统中考虑了互耦的信道响应满足条件  $|H_1^C| > 2|H_2^C|e^{j(\theta_2 - \theta_1)}$  且  $|H_1^C| > 2|H_3^C|e^{j(\theta_3 - \theta_1)}$  时, 亚波长天线可以展示出超分辨力特性. 因此, 本文在此理论基础上研究了能够在单频条件下展示出时间反演超分辨力特性的亚波长天线阵列.

### 3 单频点超分辨力聚焦特性的仿真模型

本文所采用的结构如图 1 所示, 微结构天线阵列由 9 个同轴探针天线组成, 编号分别为天线 1—9, 探针长度为  $\lambda/4$ , 探针之间的间隔为  $\lambda/4$ ,  $\lambda$  为频率 4 GHz 对应的波长. 用于实现电磁信号时间反演操作的时间反演镜 (time reversal mirror, TRM) 超宽带天线阵列由 3 个间距为  $\lambda$  的 bowtie 天线组成 [28], 天线编号分别为天线 6—8; 同轴探针天线阵列与时间反演镜阵列 TRM 中心的距离是  $3\lambda$ . 天线馈入信号为单频余弦信号. 本文利用仿真软件 CST Microwave Studio 验证单频超分辨力聚焦特性的可行性.

由文献 [29] 可知, 为了使仿真模型具有超分辨力聚焦特性, 亚波长阵列天线周围须加载微结构. 本文采用均匀金属丝阵列的结构代替随机加载结构实现超分辨力效果, 加载金属丝后微结构阵列如图 2 所示. 其中, 每个同轴探针周围的均匀金属丝阵列由 12 根金属丝组成, 金属丝的间距  $d = 3 \text{ mm}$ , 长度  $l = 0.2\lambda$ , 半径  $r = 1/(250\lambda)$ . 金属丝的间距、

长度、半径是通过仿真分析其对亚波长天线阵列的超分辨力特性的影响最终确定的. 由于金属丝阵列会降低探针天线的辐射效率, 因此边缘探针天线的辐射效率较高, 为保证目标天线的辐射效率一致, 选取 1—5 号天线作为研究对象.

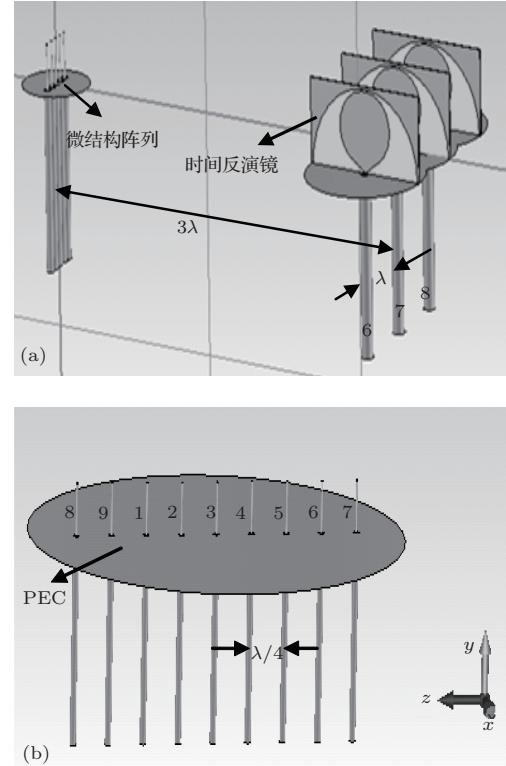


图 1 仿真模型 (a) 系统结构图; (b) 无探针加载紧凑阵列图

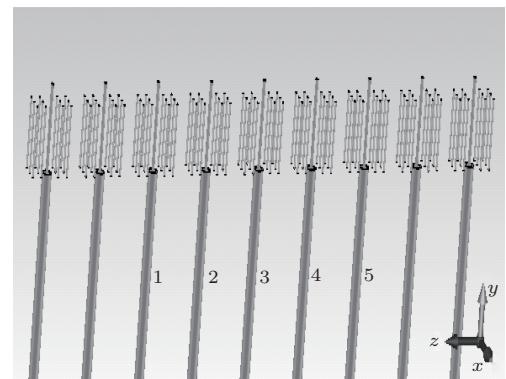


图 2 加载金属丝的微结构天线阵列结构图

### 4 单频点超分辨力聚焦的仿真及分析

基于图 2 所示模型, 分别对 5 个目标天线进行仿真分析, 每一个天线的仿真过程包括两个步骤. 首先以 1 号天线作为目标天线进行仿真分析, 宽带信号激励具体仿真过程如下:

1) 1号天线发射2—6 GHz的宽带信号  $i(t)$ , 仿真时间设置为36 ns;

2) 将TRM接收到的信号  $r_m(t)$  分别进行频谱变换得到  $r_m(f)$  ( $m = 6, 7, 8$ ), 为便于对比各时间反演镜天线接收到的信号频谱, 将  $r_m(f)$  ( $m = 6, 7, 8$ ) 中的各个频谱分量按其中最大值进行归一化, 用新的频谱分量数据绘出如3所示的散点图, 同时在图3中画出归一化的宽带信号  $i(t)$  的频谱分布图.

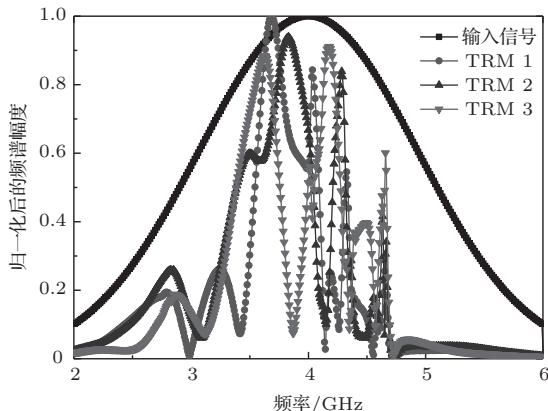


图3 1号天线作为发射天线时TRM接收到的频谱分布

由图3可知, 1号天线作为初始的发射天线时, TRM接收到的信号的频谱分布不再是高斯脉冲的频谱, 而是由天线的辐射性能和微细金属丝的散射共同作用形成的具有多个峰值的频谱. 由此可知, 峰值所对应的频谱分量在该微结构中是可以传输的, 单频信号对应的频率应从峰值所对应的频点中选择, 从图3中选取最大峰值所对应的频点  $f_1 = 3.67$  GHz作为1号天线的单频信号发射频点. 为验证此频点处1号天线能否表现出超分辨力聚焦特性, 选取频率  $f_1 = 3.67$  GHz的单频信号作为激励信号, 具体仿真过程如下:

1) 1号天线发射频率为  $f_1 = 3.67$  GHz的单频余弦信号  $i(t)$ , 仿真时间设置为50 ns;

2) 将TRM接收到的信号  $r_m(t)$  利用matlab进行数据处理, 即完美的时间反演操作变为  $r_m(-t)$  ( $m = 6, 7, 8$ ), TRM将信号  $r_m(-t)$  再次发射出去, 实验系统中时域信号的反演的具体操作参考文献[30];

3) 记录1—5号微结构天线接收到的信号  $r_i^{\text{TR}}(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ );

4) 将信号  $r_i^{\text{TR}}(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) 的峰值进行归一化, 绘出信号聚焦峰值分布图;

5) 将记录得到的信号  $r_i^{\text{TR}}(t)$  分别进行频谱变换得到  $r_i^{\text{TR}}(f)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), 为便于对比各个微

结构天线接收到的单频点的频谱幅值, 将  $r_i^{\text{TR}}(f_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ) 按其最大值进行归一化, 与步骤4) 中的数据共同绘出如图4所示的散点图.

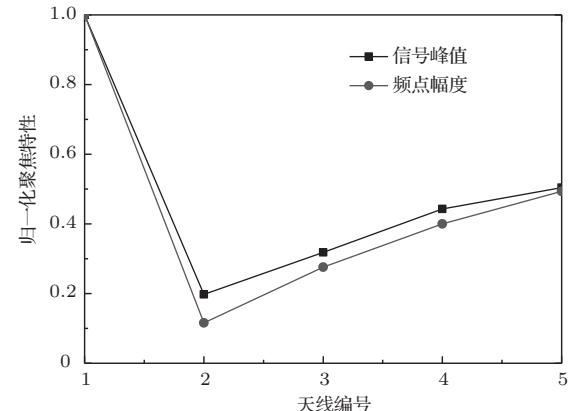


图4 1号天线作为目标天线时单频输入信号 ( $f_1 = 3.67$  GHz) 的归一化聚焦特性

从图4可以清楚地观察到, 非目标天线接收到的信号峰值和在  $f_1$  处的频谱幅度均在1号目标天线的50%以下. 由此可以验证在时间反演技术的支持下, 微结构阵列1号目标天线在输入信号为单频信号时可以表现出超分辨力聚焦特性.

将1号天线的仿真过程分别用于2—5号天线, 单频信号激励时2—5号天线的归一化信号峰值如图5(a)所示, 归一化频点幅值如图5(b)所示. 其中, 2号天线所选择的单频信号频率为  $f_2 = 3.35$  GHz; 3号天线单频信号频率为  $f_3 = 4.29$  GHz; 4号天线单频信号频率为  $f_4 = 3.29$  GHz; 5号天线单频信号频率为  $f_5 = 3.67$  GHz. 每个目标天线选取的单频信号的频率是由该天线的位置和金属丝的滤波作用共同决定的.

当激励信号为每个目标天线的单频余弦信号时, 图5(a)中非目标天线的信号峰值并非准确地都在目标天线的50%以下, 此误差是由于单频信号的截断误差和信号的上升沿造成的, 图5(b)即2—5号天线的归一化频点幅值图显示出在目标频点处每个天线接收到的频点幅值比例, 清楚地表明在单频条件下每一个目标天线也可以完美地展现出超分辨力聚焦特性.

为对比宽带信号激励与单频信号激励时1—5号天线的超分辨力聚焦特性的变化, 将1—5号天线分别作为目标天线进行仿真. 具体过程如下:

1) 第  $I$  号 ( $I = 1, 2, \dots, 5$ ) 目标天线发射2—6 GHz的宽带信号  $i(t)$ , 仿真时间设置为36 ns;

2) 将TRM接收到的信号  $r_m(t)$  经过时间反演变为  $r_m(-t)$  ( $m = 6, 7, 8$ ), TRM将信号  $r_m(-t)$

再次发射出去;

3) 记录1—5号微结构天线接收到的信号 $r_i^{\text{TR}}(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ );

4) 将各个信号 $r_i^{\text{TR}}(t)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ )的峰值以最大值 $r_I^{\text{TR}}$ 进行归一化, 绘出聚焦峰值分布图;

5) 将记录得到的信号 $r_i^{\text{TR}}(t)$ 分别进行频谱变换得到 $r_i^{\text{TR}}(f)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), 为便于对比第 $I$ 个微结构天线在单频激励和宽带激励时 $f_I$ 处的频谱幅值, 将 $r_i^{\text{TR}}(f_I)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ )按其最大值进行归一化, 绘出单频点频谱幅值图.

1—5号天线分别进行步骤1—5), 然后绘出如图6(a), (b)所示的归一化信号峰值分布和归一化单频点频谱幅度分布图.

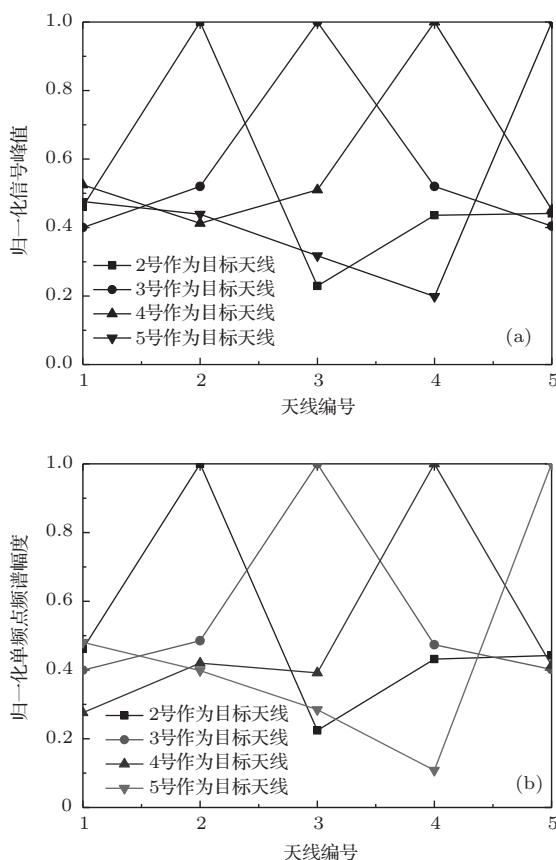


图5 单频点激励下不同天线作为目标天线时的聚焦特性 (a) 归一化信号峰值; (b) 归一化单频点频谱幅度

图6(a)表明, 当激励信号为宽带信号时, 非目标天线的信号峰值在目标天线的50%以下, 在宽带条件下每一个目标天线可以完美地展现出超分辨力聚焦特性. 将归一化的单频点频谱幅度图6(b)与图5(b)对比可以看出, 各个目标天线的超分辨力聚焦效果几乎是一致的, 因此, 单频点处的聚焦效果决定了各个目标天线在宽带信号入射时的超分辨力特性. 通过仿真验证, 微结构天线模型在包

含点频的一定带宽范围内均可以表现出超分辨力特性, 因此, 窄带、多频带的紧凑型多天线的超分辨力特性可以在实现单频点聚焦的基础上进行研究, 提高所需频带范围内频谱的利用率.

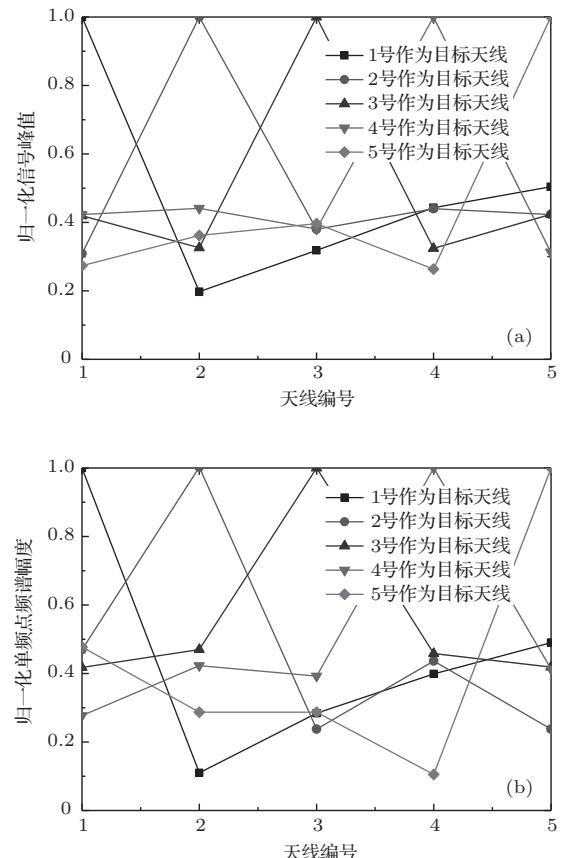


图6 宽频信号激励下不同天线作为目标天线时的聚焦特性 (a) 归一化信号峰值; (b) 归一化单频点频谱幅度

## 5 结 论

本文基于信道理论证明了在单频点可以实现超分辨力聚焦特性的思路的可行性, 同时基于同轴探针构建了亚波长微结构天线阵列模型, 对5个不同的目标天线展开了研究. 结果表明, 通过分析宽带信号激励时时间反演镜各个天线接收到的信号频谱, 进而可以找到在微结构条件下传输特性较好的频点, 通过仿真单频与宽带信号分别激励目标天线的模型, 可以证明单频信号激励时与宽带信号激励时各个目标天线表现出一致的超分辨力聚焦效果. 这些结果表明, 我们可以利用时间反演技术实现多天线单频点的超分辨力聚焦, 有效地提高频谱的利用率, 为研究多频段天线阵列的超分辨力特性提供了理论与仿真基础. 此外, 本文仅仿真证明了 $\lambda/4$ 的点频信号的超分辨力聚焦特性, 在微结构的量化设计以及更紧凑的亚波长超分辨力天线阵列

的设计方面可以做更加深入的研究。

## 参考文献

- [1] Merlin R 2007 *Science* **317** 927
- [2] Grbic A, Lei J, Merlin R 2008 *Science* **320** 511
- [3] Grbic A, Merlin R 2008 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **56** 3159
- [4] Jiao X B, Wei J S, Gan F X 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5370
- [5] Wang Y Q, Ye J S, Liu S T, Zhang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 114202
- [6] Rosny J D, Fink M 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 124301
- [7] Lu M H, Zhang B X, Wang C H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 1766
- [8] Zhang B X, Wu H, Wang C H 2004 *Chin. Phys. Lett.* **21** 337
- [9] Zhang H Y, Cao Y P, Sun X L, Chen X H, Yu J B 2010 *Chin. Phys. B* **19** 114301
- [10] Ying Y Z, Ma L, Guo S M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054301
- [11] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
- [12] Fusco V, Buchanan N, Malyuskin O 2010 *IEEE Trans. Antennas Propagat.* **58** 798
- [13] Malyuskin O, Fusco V 2010 *URSI International Symposium on Electromagnetic Theory* Berlin, Germany, August 16–19, 2010 p235
- [14] Kong Q, Shi Q F, Yu G Z, Zhang M 2012 *Chin. Phys. Lett.* **29** 024208
- [15] Chen Y M, Wang B Z 2012 *Chin. Phys. B* **21** 026401
- [16] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1120
- [17] Ge G D, Wang B Z, Wang D, Zhao D S, Ding S 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **59** 4345
- [18] Ge G D, Zang R, Ding S, Wang B Z 2011 *IET Electron. Lett.* **47** 16
- [19] Ge G D, Wang D, Wang B Z 2011 *Prog. Electromagn. Res.* **114** 429
- [20] Zhang Z M, Wang B Z, Ge G D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 058402 (in Chinese) [章志敏, 王秉中, 葛广顶 2012 物理学报 **61** 058402]
- [21] Lerosey G, Leray C, Lemoult F, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2012 *6th European Conference on Antennas and Propagation* Prague, Czech Republic, March 26–30, 2012 p2697
- [22] Lerosey G, Leray C, Lemoult F, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2012 *International Symposium on Antennas and Propagation* Nagoya, Japan, October 29–November 2, 2012 p774
- [23] Hellwarth R 1977 *J. Opt. Soc. Am.* **67** 1
- [24] Cassereau D, Fink M 1992 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* **39** 579
- [25] Malyuskin O, Fusco V 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 2884
- [26] Pierrat R, Vandenbem C, Fink M, Carminati R 2013 *Phys. Rev. A* **87** 041801
- [27] Blum R S 2003 *IEEE J. Selected Areas Commun.* **21** 793
- [28] Qu S W, Ruan C L, Wang B Z, Xue Q 2006 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **5** 399
- [29] 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]
- [30] 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]

# Research on the single-frequency super-resolution focusing of micro-structured antenna based on time reversal electromagnetic wave<sup>\*</sup>

Tu Hui-Lin<sup>†</sup> Xiao Shao-Qiu<sup>‡</sup> Yang Zhi-Jie Wang Bing-Zhong

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

(Received 4 November 2013; revised manuscript received 13 January 2014)

## Abstract

The idea that single-frequency electromagnetically excited signal can possess the property of super-resolution focusing under time reversal technique is proposed in this paper. The feasibility of the idea is investigated from the channel theory. A micro-structured model with inter-element spacing of  $1/4$  wavelength is proposed based on the traditional coaxial probe antenna. Simulated results verify that in combination with time reversal technique, the model shows super-resolution focusing characteristics under single-frequency and broadband input signal excitation. The theoretical analysis and simulated results have great guiding significance for the super-resolution research of the single-frequency and multi-band antennas.

**Keywords:** single-frequency signal, time reversal technique, micro-structures, super-resolution

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

**DOI:** 10.7498/aps.63.084102

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61271028), the Fok Ying-Tong Education Foundation, China (Grant No. 131107), and the Fundamental Research Fund for the Central Universities, China (Grant No. ZYGX2011J036).

† Corresponding author. E-mail: [tuhl\\_uestc@163.com](mailto:tuhl_uestc@163.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn](mailto:xiaoshaoqiu@uestc.edu.cn)