

基于远场时间反演的亚波长天线阵列研究*

梁木生[†] 王秉中 章志敏 丁帅 臧锐

(电子科技大学应用物理研究所, 成都 610054)

(2012年8月25日收到; 2012年9月24日收到修改稿)

基于远场时间反演, 从信号处理角度对亚波长阵列的超分辨率聚焦特性进行了理论分析. 提出了一种新型的微结构刻蚀亚波长阵列, 通过时间反演聚焦实验表明, 该阵列具有远场超分辨聚焦特性, 各单元间信道相互独立. 将这种亚波长阵列应用在时间反演镜天线上, 通过实验验证了可以获得更好的超分辨率聚焦效果. 所提出的亚波长天线阵列对多天线超宽带无线通信具有潜在的应用价值.

关键词: 时间反演, 亚波长, 天线阵列, 超分辨率

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.058401

1 引言

自2004年时间反演技术 (time reversal, TR) 被引入到电磁学领域以来, 时间反演电磁学便成为了一个新兴的研究方向, 吸引了越来越多电磁学研究者的关注. 已有证明, 时间反演电磁波在均匀和非均匀媒质中均可实现自适应的时间和空间同步聚焦^[1-4]. 利用这种特性, 电磁波时间反演技术在雷达探测与成像、超宽带通信中得到许多应用^[5-10].

2007年, Fink等^[11]提出, 在亚波长天线阵列周围随机放置一些微结构散射体, 即文中所描述的细金属丝, 可以突破衍射极限, 将凋落波转化为传输波, 对时间反演电磁波产生远场超分辨率聚焦. 该成果的问世有效推动了时间反演技术的快速发展^[12-21]. 微结构散射体是亚波长天线阵列产生远场超分辨率聚焦特性的关键部件, 因为微结构散射体可以辅助产生近场凋落波和丰富的多径, 凋落波借助于微结构散射体转换为传播波, 这是产生超分辨率聚焦特性的重要原因之一, 而且越是在复杂和多径环境下, 时间反演时-空超分辨率聚焦特性越明显. 该结论在文献[4], [11]和[19-21]中均通过实验得到验证. 然而迄今为止, 时间反演电磁波超分辨率聚焦特性的理论分析尚无定论. 文献[11]仅

以理想封闭腔内的电磁波传播特性并结合格林函数给出了近似解释, 而其他文献并没有进行相关理论分析和求解, 因此对电磁波时间反演特性的理论研究也吸引了不少学者的研究兴趣^[22,23]. 本文将从另外一个角度, 即信号处理近似, 从理论上对亚波长阵列的超分辨聚焦特性进行推导和分析. 另外, 文献[11]中亚波长阵列所采用的天线结构复杂, 金属丝数量较多, 体积较大, 不利于通信终端系统集成. 因此, 基于远场时间反演的小型化亚波长天线阵列设计已成为当前的研究热点, 近几年取得了一系列成果^[19-21]. 文献[24]研究了时间反演镜天线分布对时间反演电磁波聚焦特性的影响, 采用与接收天线形式类似的微结构天线阵列作为时间反演镜天线, 同样可以获得较好的聚焦效果, 该研究为亚波长天线阵列的应用研究提供了新的途径.

本文首先从信号处理角度对亚波长阵列的超分辨率聚焦特性进行了理论分析. 然后对一种传统的桃形单极子天线^[25]进行改进, 提出一种新型的亚波长天线阵列, 相比文献[4], [11]和[19], 该亚波长天线阵列中的天线单元具有体积更小、带宽更宽等优点. 最后通过实验验证了该阵列的超分辨率聚焦特性.

* 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20100185110021) 和国家自然科学基金 (批准号: 61071031) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: liangms80@gmail.com

2 超分辨聚焦特性理论分析

假设一个 1×4 的亚波长阵列由四个单元天线等间距排列构成, 单元天线间距小于二分之一工作波长, 天线序号依次为 1—4, 如图 1 所示.

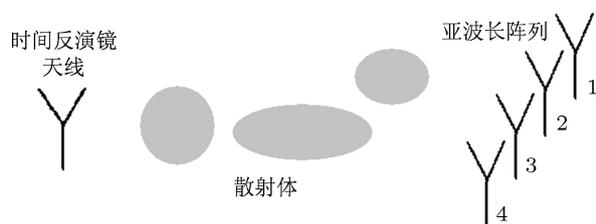


图 1 电磁波时间反演系统模型

首先由单元天线 1 辐射信号 $x_1(t)$, 经过前向无线通信信道 $h_1(t)$ 后, 由远场的时间反演镜天线接收到信号 $y_1(t)$, 通过时间反演变换后由时间反演镜天线发送反演信号 $y_1(-t)$, 经过后向无线通信信道 $h'_1(t)$ 后, 由亚波长阵列接收反演信号, 其中单元天线 1 接收到的信号记为 $y_{1,1}^{TR}(t)$, 其余天线接收到的信号为 $y_{1,j}^{TR}(t) (j = 2, 3, 4)$, 所对应的后向信道函数分别为 $h'_j(t) (j = 2, 3, 4)$.

假定整个无线通信为一个时不变线性系统, 根据互易定理有 $h'_j(t) = h_j(t) (j = 1, 2, 3, 4)$, 于是

$$y_{1,1}^{TR}(t) = y_1(-t) * h'_1(t) = y_1(-t) * h_1(t), \quad (1)$$

其中 $*$ 表示卷积运算.

因为 $y_1(t) = x_1(t) * h_1(t)$, 故 $y_1(-t) = x_1(-t) * h_1(-t)$, 有

$$y_{1,1}^{TR}(t) = x_1(-t) * h_1(-t) * h_1(t). \quad (2)$$

依此类推, 当天线 1 辐射信号时, 四个天线中第 j 个天线最终接收到的反演信号为

$$y_{1,j}^{TR}(t) = x_1(-t) * h_1(-t) * h_j(t), \quad (j = 1, 2, 3, 4). \quad (3)$$

如果换作其他单元天线 $i (i = 2, 3, 4)$ 辐射信号, 同理可得第 j 个天线最终接收到的反演信号为

$$\begin{aligned} y_{i,j}^{TR}(t) &= x_i(-t) * h_i(-t) * h_j(t) \\ &= x_i(-t) * [h_i(-t) * h_j(t)], \end{aligned} \quad (i, j = 1, 2, 3, 4). \quad (4)$$

从 (4) 式可以看出, 当辐射单元天线 i 确定后, $x_i(-t)$ 即辐射信号 $x_i(t)$ 的反演信号也随之确定, 由

于四个单元天线同时接收反演信号, 因此第 j 个天线最终接收到的反演信号, 与该天线对应的信道函数 $h_j(t)$ 及原发射信道函数 $h_i(t)$ 的时间反演值 $h_i(-t)$ 相关. 当 $i = j$ 时, $h_i(-t) * h_j(t) = h_i(-t) * h_i(t)$, 该过程即信道函数与其反演函数作自相关处理, 等效为信号检测中的匹配滤波, 可以有效提高信噪比, 增加接收信号的强度; 当 $i \neq j$ 时, $h_i(-t) * h_j(t)$ 为各信道函数与发射信道的反演函数作互相关处理, 两者之间相关性通常较弱, 接收信号强度远低于自相关项.

现在将单元天线 1 进行微结构刻蚀, 从而引入了近场的随机信道, 再加之, 由于采样率限制, 时间反演镜并不能完整地记录该信道, 因此我们认为对应的信道 $h_1(t)$ 引入了平稳高斯白噪声 $n_1(t)$, 其余三个单元天线对应的信道引入高斯白噪声分别为 $n_2(t), n_3(t), n_4(t)$, 那么各信道对应的响应函数分别变为 $h_1(t) + n_1(t), h_2(t) + n_2(t), h_3(t) + n_3(t), h_4(t) + n_4(t)$.

下面, 我们分析引入噪声后上述时间反演传播过程的聚焦特性.

由天线 1 发射信号, 经时间反演镜天线接收、反演、回传, 最终被天线 1 接收, 所对应的信道函数时间反演自相关运算如下:

$$\begin{aligned} & [h_1(-t) + n_1(-t)] \odot [h_1(t) + n_1(t)] \\ &= h_1(-t) \odot h_1(t) + [h_1(-t) \odot n_1(t) \\ & \quad + h_1(t) \odot n_1(-t)] + n_1(-t) \odot n_1(t) \\ &\approx h_1(-t) \odot h_1(t) + n_1(-t) \odot n_1(t), \end{aligned} \quad (5)$$

其中 \odot 表示相关性运算. 通过 (4) 式可知, $h_1(-t) \odot h_1(t)$ 即自相关处理过程, 将有效增大了接收信号的强度, 同时根据高斯白噪声特性, (5) 式中第二项 $n_1(-t) \odot n_1(t)$ 即作自相关运算, 结果将极大增强原信号强度, 叠加后可以获得峰值. 因此, 当单元天线 1 辐射信号, 最终由该天线接收到的反演信号峰值强度明显增大.

信号最终被单元天线 2 接收时, 所对应的信道函数时间反演互相关运算如下:

$$\begin{aligned} & [h_1(-t) + n_1(-t)] \odot [h_2(t) + n_2(t)] \\ &= h_1(-t) \odot h_2(t) + [h_1(-t) \odot n_2(t) \\ & \quad + h_2(t) \odot n_1(-t)] + n_1(-t) \odot n_2(t). \end{aligned} \quad (6)$$

由于亚波长阵列中单元天线具有微结构, 电磁波在各单元之间的辐射及反射的路径差异较大, 这

样导致各单元天线的通信信道之间相互关联程度较低,因此(6)式中,作互相关运算的 $h_1(-t) \odot h_2(t)$ 项约等于零.另外,对于高斯白噪声,其函数之间的互相关仍为高斯白噪声,并不能带来接收信号峰值的增加,即 $n_1(-t) \odot n_2(t)$ 项也可以忽略.因此,(6)式可以简化为

$$[h_1(-t) + n_1(-t)] \odot [h_2(t) + n_2(t)] \approx h_1(-t) \odot n_2(t) + h_2(t) \odot n_1(-t). \quad (7)$$

(7)式说明,两个不同信道之间的相关性运算等效为高斯白噪声函数与信道响应函数(或信道反演函数)之间的互相关叠加,而显然这两者的相关性很小.对比(7)式与(5)式可以看出,(5)式的相关性明显高于(7)式,说明亚波长阵列中发射信号的单元天线1,最终接收到的信号强度远大于单元天线2接收到的信号强度.同理,亦分别远大于单元天线3和4所接收到的信号强度.

如果换作对其他单元天线进行微结构刻蚀并辐射信号,同样可以得到,辐射信号的单元天线最终接收到的反演信号强度远大于其他单元天线接收到的信号强度.文献[4]已通过实验筛选出了时间反演超分辨特性的关键因素为单元天线周围的微结构(文中即细金属丝),如果亚波长阵列中各单元周围没有微结构,则无法得到时间反演超分辨聚焦效果.根据上述理论推导,可以近似认为无微结构加载情况下各单元信道之间相关性较强,不易分辨彼此信号,但这并非说明阵列中所有单元都不具有超分辨特性,在后文的实验中可以发现,没有微结构的亚波长阵列中若干单元仍能体现出了超分辨聚焦特性,而非全部单元,而具有微结构的亚波长阵列所有单元都能展示出完美的超分辨率聚焦.对比无微结构刻蚀结果,辅以微结构的亚波长阵列可以增强时间反演电磁波超分辨聚焦效果.

3 亚波长阵列设计

3.1 阵列单元设计与仿真

文献[25]中桃形单极子天线结构如图2所示,该天线主要包括正面金属辐射单元、介质基片、背面金属地三部分.辐射单元形似“桃子”,由一个等腰三角形和半椭圆形的金属片以及一段微带馈线组成,背面金属地为半椭圆形.馈线与半椭圆形金属片接触处采用梯形结构过渡,以获得良好阻抗匹配.

本文选取的介质基片介电常数 $\epsilon_r = 2.2$,厚度 $H = 0.5$ mm,天线总尺寸为 33 mm \times 35 mm, $L = 30.75$ mm, $a_1 = 12$ mm, $a_2 = 6$ mm, $l_1 = 16.5$ mm, $l_2 = 10.5$ mm, $b = 12.5$ mm.在梯形过渡处,微带线宽度从 1.6 mm逐渐减小为 0.97 mm,所对应的阻抗由 50Ω 增加至 67Ω .其他尺寸与文献[25]中天线尺寸一致.利用CST软件进行仿真,得到该天线单元的低端工作频率为 3.19 GHz.

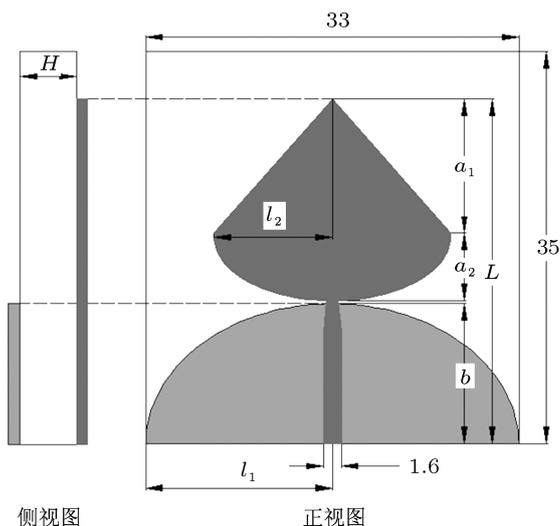


图2 桃形单极子天线结构示意图(单位: mm)

根据第2节分析,对单元天线进行微结构刻蚀可以增强时间反演电磁波超分辨聚焦效果.在不改变总尺寸的前提下,对上述天线进行如下改进:在正面辐射单元部分刻蚀一些孔,孔的外形与辐射单元的外形——桃形相似,方向倒置,如图3(a)所示;在背面金属地部分,沿着椭圆弧边线刻蚀两排孔,孔的外形为半椭圆形,与半椭圆形金属地相似,方向倒置,如图3(b)所示.

在原桃形天线单元的双面进行刻蚀,由于刻蚀的小孔尺寸较小,均在毫米量级,远小于二分之一工作波长,这些小孔的谐振频率在毫米波频段,因此对工作在超宽带频率范围内天线的辐射特性影响很小.通过CST仿真发现,单元天线阻抗和工作带宽都基本没有变化.

3.2 亚波长天线阵列

将原来未刻蚀微结构的天线(图2所示)记作A,双面均刻蚀微结构的天线(图3所示)记作B.首先将四个天线A重叠等距排列,天线单元编号依次为1,2,3,4,组成 1×4 的天线阵列,各天线之间的间距为 d ,如图4所示.

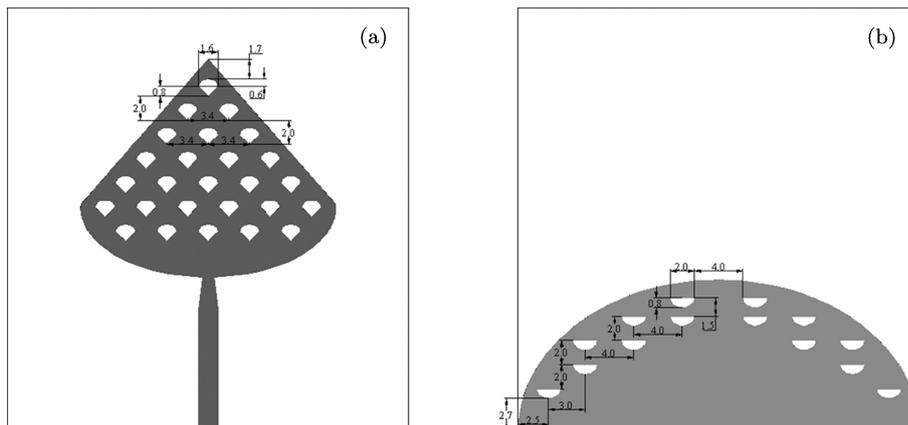


图3 改进的桃形天线结构示意图(单位: mm) (a) 正面刻蚀; (b) 背面刻蚀

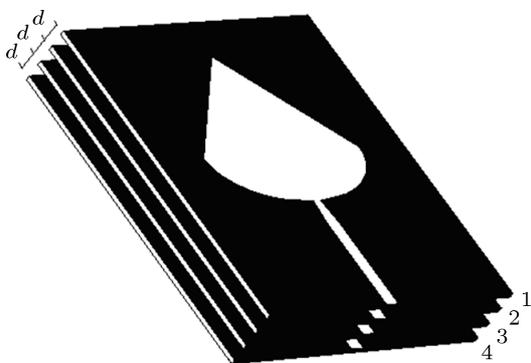


图4 由天线 A 组成的亚波长天线阵列示意图

于半个工作波长 λ , 在本文中用于接收反演信号的阵列单元间距 d 取 $\lambda/20$, 因此, 由双面均不刻蚀孔的原天线 A 构成了一种亚波长天线阵列.

依照天线 A 组阵方法, 可将四个天线 B 组成另外一种亚波长天线阵列, 用于接收时间反演信号. 在时间反演聚焦实验中, 这两种亚波长天线阵列是否都具有超分辨率聚焦特性有待进一步验证.

4 时间反演实验及结果

4.1 实验方案

亚波长天线阵列要求天线单元之间的间距小

实验系统方案如图 5 所示.

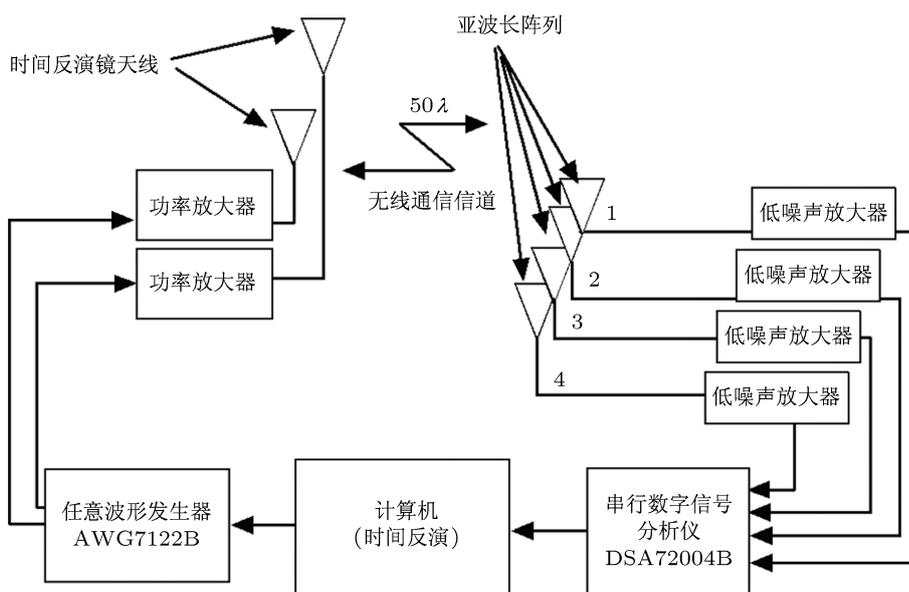


图5 时间反演实验系统方案框图

分别采用上节所提出的两种亚波长天线阵列,并结合时间反演镜天线进行超分辨率聚焦特性验证. 实验中,时间反演镜天线阵列由两个间距为 10λ 的超宽带单极子天线组成.

首先验证由四个相同的单元天线 A 构成的亚波长阵列. 具体步骤如下.

第一步 由任意波形发生器 (AWG7122B, 泰克公司) 对时间反演镜阵列馈入一个中心频率为 4.5 GHz 的调制高斯脉冲, 在距离天线阵列 50λ 处的亚波长天线阵列中的单元 1 接收信号, 并由串行数字信号分析仪 (DSA72004B, 泰克公司) 进行采样处理. 根据互易原理, 上述过程可以等效为: 将调制高斯脉冲馈入亚波长天线阵列中的单元 1, 发射后由时间反演镜阵列接收, 然后进行采样处理.

第二步 将采集到的信号利用计算机进行时间反演处理, 数据输入 AWG7122B, 由其产生时间反演信号, 功率放大后通过时间反演镜天线重新发送已反演的信号.

第三步 亚波长阵列中四个天线单元同时接收时间反演电磁信号, 通过低噪声放大器后再次送入 DSA72004B 中进行采样处理, 获得所需实验数据.

第四步 对亚波长阵列中其他天线单元 2, 3, 4 重复前三步实验操作, 完成对由天线 A 所组成的亚波长阵列超分辨率聚焦实验.

按照上述过程, 完成由单元天线 B 所组成的亚波长阵列超分辨率聚焦实验.

4.2 实验结果及分析

根据第 2 节分析可知, 判断一个亚波长阵列是否具有时间反演超分辨率聚焦特性主要是针对该亚波长阵列中任意一个天线单元. 当阵列中某单元馈入发射信号, 最后该单元所接收到的反演信号所对应的电压峰峰值与其他单元分别的比值均大于或等于 2, 满足该条件的亚波长阵列即具有时间反演超分辨率聚焦特性, 并且比值越大, 聚焦效果越好.

对于由单元天线 A 和 B 分别构成的亚波长阵列, 当依次由单元 1, 2, 3, 4 馈入信号, 实验测得各阵列单元所接收到的反演信号归一化电压峰峰值分别如图 6(a), (b) 所示.

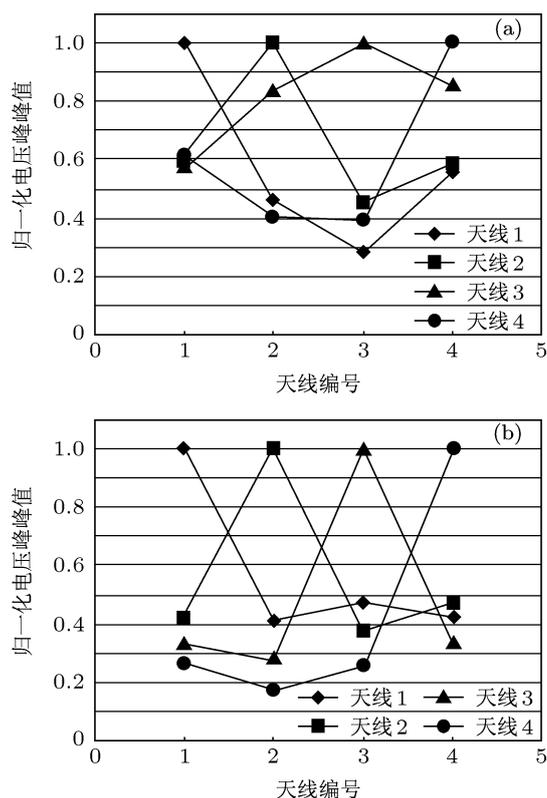


图 6 亚波长天线阵列接收到的反演信号归一化电压峰峰值 (a) 天线单元为 A; (b) 天线单元为 B

从图 6(a) 可知, 由四个天线单元 A 构成的亚波长阵列, 无论是哪个单元馈入信号, 馈入单元接收到的反演信号电压峰峰值分别与其他三个单元分别接收到的反演信号电压峰峰值之比不完全小于 2, 四个单元接收的反演信号功率强度除馈入单元最大外, 其余三个单元或两个单元之间的差别不大, 说明不刻蚀的天线单元之间信道并不相互独立, 而是信道响应函数相关性较强, “共享”了由时间反演镜天线发射出来的反演信号, 从而无法分辨这些信号. 因此由不刻蚀的原桃形天线单元所构成的亚波长阵列不具有超分辨率聚焦特性.

而从图 6(b) 可见, 由天线单元 B 组成的亚波长阵列, 无论是由哪个单元馈入信号, 其他天线接收到的信号电压峰峰值均小于该馈入天线接收到信号电压峰峰值的二分之一. 这说明对于该亚波长阵列附近的电磁场, 在馈入天线单元处的场强最大, 场强在距其 $\lambda/20$ 处已迅速衰减, 馈入天线单元大部分接收了其发射然后经过时间反演镜反演后再次发回的信号, 因此该天线单元的信道是独立的, 信道响应函数之间相关性较弱, “独享”了反演信号, 与其他三个天线单元互不干扰. 显然, 该天线阵列满足时间反演超分辨率聚焦的条件, 具有远场亚

波长超分辨聚焦特性.

实验表明: 由双面均进行微结构刻蚀的传统平面单极子天线所组成的亚波长天线阵列, 对时间反演电磁波展现出了超分辨聚焦特性. 根据文献 [4], [11], [19—21] 及本文实验结果可知, 产生时间反演超分辨率聚焦特性的关键因素是摆放在天线单元周围或在天线上刻蚀的微结构, 由于这些微结构是随机摆放或刻蚀的, 微结构形状对最终超分辨结果基本无影响, 因此可以根据实际集成需要进行设计, 只需满足微结构尺寸远小于二分之一工作波长以及双面同时进行刻蚀即可. 微结构刻蚀不会改变单元天线的性能如电压驻波比、方向图等, 仅改变了局部微电流的分布, 但不刻蚀或者单面刻蚀均不能得到整个阵列的亚波长超分辨聚焦.

4.3 采用亚波长阵列的时间反演镜聚焦实验

根据文献 [24] 提出的研究思路, 将具有微结构刻蚀的单元 B 所组成的阵列同时用作时间反演镜天线, 同样可以获得聚焦效果, 且接收天线处聚焦信号的最大幅值与能量值不会随时间反演镜天线间距发生明显变化. 下面我们将通过实验验证.

考虑到任意波形发生器 AWG7122B 可以提供两路信号, 因此实验中, 只利用两个天线单元 B 组成单元间距为 $\lambda/4$ 的亚波长阵列时间反演镜. 接收反演信号的天线阵列仍然采用这种天线阵列, 由四个单元天线 B 构成, 单元间距 d 取 $\lambda/20$. 实验过程与 4.1 节所述具体步骤一致. 图 7 为所测得的各阵列单元所接收到的反演信号归一化电压峰峰值.

由上图可知, 在反演信号接收端, 亚波长天线阵列对时间反演电磁波依然展示出显著的超分辨率聚焦特性.

通过对比图 6(b) 和图 7 发现, 对于同一个馈入单元天线, 采用亚波长阵列时间反演镜所得到的归一化电压峰峰值与其他三个单元天线的比值, 分别比采用原超宽带天线时间反演镜所得到的比值基本上都要大 (除单元 4 馈入时两者几乎接近外), 说明采用由天线单元 B 构成的亚波长阵列时间反演镜同样可以辅助产生多径, 同时结合接收反演信号的亚波长阵列, 能够获得较好的时间反演超分辨率聚焦.

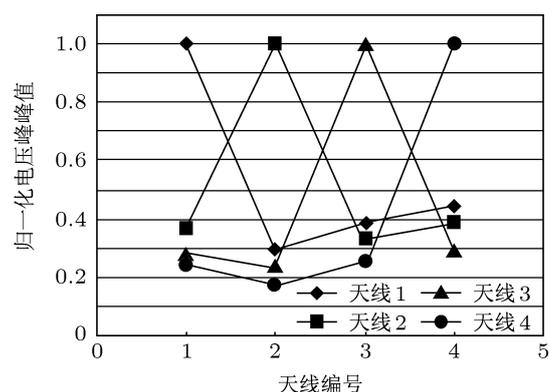


图 7 采用亚波长阵列的时间反演镜所获得的超分辨率聚焦测试结果

5 结论

本文基于远场时间反演, 对亚波长阵列的超分辨率聚焦特性进行了理论分析和实验研究, 提出了一种新型的亚波长阵列, 验证了采用亚波长阵列时间反演镜可以获得更好的超分辨聚焦效果. 相比相关文献所提及的亚波长阵列, 本文所提出的新型阵列体积小, 工作频率范围宽, 以期在高速、多天线、超宽带通信传输中获得应用.

[1] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Montaldo G, Fink M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 193904
 [2] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Derode A, Fink M 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 154101
 [3] Rosny J D, Fink M 2007 *Phys. Rev. A* **76** 065801
 [4] 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]
 [5] Kyritsi P, Papanicolaou G, Eggers P, Oprea A 2004 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **3** 96
 [6] Strohmer T, Emami M, Hansen Papanicolaou J G, Paulraj A J 2004 *IEEE Global Telecommunications Conference* **5** 3123
 [7] Qiu R C, Zhou C, Guo N, Zhang J Q 2006 *IEEE Antennas Wireless*

Propag. Lett. **5** 269
 [8] Candy J V, Chambers D H, Guidry B L, Poggio A J, Robbins C L 2008 *US Patent* 7463690
 [9] Kosmas P, Rappaport C M 2005 *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **53** 2317
 [10] 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
 [11] Lerosey G, Rosny J D, Tourin A, Fink M 2007 *Science* **315** 1120
 [12] Carminati R, Pierrat R, Rosny J D, Fink M 2007 *Optics Lett.* **32** 3107
 [13] Pendry J B 2008 *Science* **322** 71
 [14] Xiao S Q, Chen J, Wang B Z, Liu X F 2007 *Progress in Electromagnetics Research* **77** 329
 [15] Liu X F, Wang B Z, Li L W 2009 *IEEE Antennas Wireless Propag Lett.*

- 8 1426
- [16] Rosny J D, Lerosey G, Fink M 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 3139
- [17] Liu X F, Wang B Z, Xiao S Q, Lai S J 2010 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **58** 1731
- [18] Song Y, Guo N, Qiu R C 2011 *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* **10** 796
- [19] Ge G D, Wang D, Wang B Z 2011 *Progress In Electromagnetics Research* **114** 429
- [20] Ge G D, Wang B Z, Wang D, Zhao D S, Ding S 2011 *IEEE Trans. Antennas Propag.* **99** 1731
- [21] Ge G D, Zang R, Wang D, Ding S, Wang B Z 2011 *Electron. Lett.* **47** 901
- [22] 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]
- [23] Zhang Z M, Wang B Z, Ge G D, Liang M S, Ding S 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 098401 (in Chinese) [章志敏, 王秉中, 葛广顶, 梁木生, 丁帅 2012 物理学报 **61** 098401]
- [24] 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]
- [25] Bi D H, Yu Z Y 2008 *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* **22** 2335

Subwavelength antenna array based on far-field time reversal*

Liang Mu-Sheng[†] Wang Bing-Zhong Zhang Zhi-Min Ding Shuai Zang Rui

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

(Received 25 August 2012; revised manuscript received 24 September 2012)

Abstract

Based on far-field time reversal, the super-resolution focusing property of the subwavelength array is analyzed theoretically according to signal processing in this paper. A novel subwavelength array is proposed. It is demonstrated experimentally that the array has super-resolution focusing property in the far-field zone and each element has an independent channel. With this kind of subwavelength array used in time reversal mirror, better super-resolution focusing result is achieved. The proposed subwavelength array may be useful in the applications of multi-antenna ultra-wideband (UWB) wireless communications.

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

PACS: 84.40.Ba, 84.40.Ua, 41.20.Jb

DOI: 10.7498/aps.62.058401

* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20100185110021), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61071031).

[†] Corresponding author. E-mail: liangms80@gmail.com