

基于时间反演的天线阵列激励分布确定方法研究

范晶晶^{*①②③} 赵德双^① 张浩然^① 周城^①

^①(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 时间反演(TR)是一种新型的电磁波传播与控制方法,具有电磁环境自适应性。采用时间反演方法,可使结构复杂的天线阵列方向图综合设计简单化。该文初步探索了将时间反演方法应用于微带天线阵列激励设计的可行性,并进行了数值模拟和实验验证。结果表明:对于不同的主波束指向,时间反演法均能准确地确定其对应的激励分布。相对于传统的激励分布确定方法,时间反演法无需互耦补偿计算,准确便捷,且不受阵列和阵元结构形式的限制,在结构复杂阵列的激励分布计算上优势明显。

关键词: 天线; 微带阵列; 时间反演; 激励分布; 波束方向图

中图分类号: TN820

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)09-2238-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01737

Array Excitation Determining Method Based on Time Reversal

Fan Jing-jing^{*①②③} Zhao De-shuang^① Zhang Hao-ran^① Zhou Cheng^①

^①(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China)

^②(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Time Reversal (TR) is a new method for wave propagation and control with electromagnetic environment adaptability. Time reversal method can simplify the pattern design of antenna arrays with complicated structures. In this paper, a time reversal method is investigated for determining the excitation of a micro-strip antenna array. Both simulations and experiments are performed. The results show that the time reversal method can exactly determine the array excitation for beam patterns with different desired main-lobes. Compared with the traditional array excitation-determining methods, time reversal has remarkable advantages in determining the array excitation since it does not require coupling compensation computation and has no limitations to the element geometrical structures and array configurations.

Key words: Antenna; Micro-strip arrays; Time Reversal (TR); Excitation determination; Beam pattern

1 引言

时间反演(Time Reversal, TR)起源于时间反演镜(Time Reversal Mirror, TRM)^[1,2]。自 Fink^[2]利用 TRM 获得超声波信号空-时同步聚焦后,TR 便成为科学家们理论和试验研究的一大热点。研究表明,TR 在工程应用领域具有巨大价值^[3-5]。采用这种技术,能使均匀和非均匀媒质中传播的声波实现空-时同步聚焦,可解决复杂媒质中目标探测难题。同理,将 TR 运用在电磁波领域也能实现辐射电磁波的空-时同步聚焦^[6-8]。基于电磁波的空-时同步聚焦特性,TR 方法不仅能有效解决无线通信中面临的多径干

扰、码间干扰、共道干扰等技术难题^[9-13],而且也能解决结构复杂的天线阵列综合设计难题^[14]。虽然有关天线阵列的综合设计已有不少方法被相继提出^[15],但相比之下,TR 方法优势明显:首先,阵列综合不受限于阵列结构形式,通用性好;其次,TR 具有天然的电磁环境自适应性,能对工作在复杂的电磁环境下的天线阵列进行综合设计;而且,TR 还能借助于快速傅里叶变换,对天线阵列的方向图进行宽频带综合设计,一次性获取天线工作带宽范围内所有频点的辐射特性。

基于 TR 电磁波的物理工作机理,本文初步探索了将 TR 方法应用于微带天线阵列激励设计的可行性,并进行了数值模拟和实验验证。

2013-11-07 收到, 2014-03-24 改回

*通信作者: 范晶晶 fanjingjing1001@126.com

2 阵列天线辐射方向图 TR 综合理论

设阵列由 N 个任意排布的阵元组成，将阵元从 1 到 N 进行编号，并假设平面波 $s(t)$ 从 (θ_d, φ_d) 角度方向入射，则各阵元的接收信号 $r_i(t) (i = 1, 2, \dots, N)$ 可表示为

$$r_i(t) = s(t) * h_i(\theta_d, \varphi_d, t) \quad (1)$$

式(1)中， $h_i(\theta_d, \varphi_d, t)$ 为第 i 个阵元在阵列环境下的系统冲激响应。

根据 TR 理论，首先对各阵元所接收到的信号 $r_i(t)$ 分别进行 TR 处理，即在时间轴上进行波形镜像，得到 TR 信号如式(2)所示。

$$r_i(-t) = s(-t) * h_i(\theta_d, \varphi_d, -t) \quad (2)$$

其次，将所得到的 $r_i(-t)$ 作为阵列的激励信号，同步馈入到其对应阵元。依照天线阵列基本理论，可知，在时间反演信号 $r_i(-t)$ 的激励下，阵列在远场处的时域辐射方向图为

$$\begin{aligned} f(\theta, \varphi, t) &= \sum_{i=1}^N r_i(-t) * h_i(\theta, \varphi, t) \\ &= s(-t) * \left[\sum_{i=1}^N h_i(\theta_d, \varphi_d, -t) * h_i(\theta, \varphi, t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

对式(3)进行傅里叶变换，可得

$$F(\theta, \varphi, \omega) = S^*(\omega) \sum_{i=1}^N [H_i^*(\theta_d, \varphi_d, \omega)] H_i(\theta, \varphi, \omega) \quad (4)$$

式(4)中， $S^*(\omega)$ ， $H_i^*(\theta_d, \varphi_d, \omega)$ 和 $H_i(\theta, \varphi, \omega)$ 分别为 $s(-t)$ ， $h_i(\theta_d, \varphi_d, -t)$ 和 $h_i(\theta, \varphi, t)$ 的傅里叶变换式。由施瓦兹数学不等式可知，当式(4)中 $\theta = \theta_d$ ， $\varphi = \varphi_d$ 时， $\sum_{i=1}^N [H_i^*(\theta_d, \varphi_d, \omega)] H_i(\theta, \varphi, \omega)$ 将取最大值，也即阵列天线辐射方向图 $F(\theta, \varphi, \omega)$ 在 (θ_d, φ_d) 方向取得最大值。由此意味着，如果采用时间反演信号 $r_i(-t)$ 作为阵元激励，阵列天线辐射方向图的主波束方向将会回指 (θ_d, φ_d) 。

依据上述思路，对于任意给定的主波束指向，

利用 TR 方法可方便地确定出阵列单元激励。本文正是基于这一思路，对微带阵列天线展开了研究。

3 基于 TR 的阵列天线激励设计

3.1 天线阵元设计

基于微带天线理论，利用电磁仿真软件 CST Microwave Studio^[16]，设计了一款刻蚀有 π 型槽缝的矩形贴片宽带微带天线作为阵元，如图 1 所示。该天线由一个上端开口的矩形金属腔和一块薄层介质基片组成，介质基片水平安装在金属腔开口上方，金属腔尺寸为 $40 \times 40 \text{ mm}^2$ ，壁厚 4 mm，腔深 2 mm，底厚 4 mm。介质基片尺寸为 $40 \times 40 \times 1 \text{ mm}^3$ ，介电常数为 $\epsilon = 4.4$ 。在介质基片上表面，刻蚀有 π 型槽缝的矩形金属贴片作为主辐射体，其结构参数为： $L = 15.5 \text{ mm}$ ， $W = 20 \text{ mm}$ ， $L_1 = 3 \text{ mm}$ ， $L_2 = 2.35 \text{ mm}$ ， $L_3 = 5.15 \text{ mm}$ ， $W_1 = W_2 = 3 \text{ mm}$ ， $W_s = 1 \text{ mm}$ ，贴片厚度为 0.035 mm。采用同轴背部馈电方式，同轴屏蔽套筒半径为 2.5 mm，内部探针半径为 0.55 mm，内外导体间的介质层外半径为 2.05 mm，相对介电常数为 2.2。

图 2 为天线馈电端口反射参数 (S_{11}) 的仿真和实测曲线，测试设备为中电 41 所 AV3618 矢量网络分析仪。测试结果显示，天线实际的工作频率范围为 5.5~6.3 GHz，带宽约 0.8 GHz。由于介质基板与金属腔的装配误差、馈电点焊接不理想等因素的影响，从图 2 中可以看出，实测天线的工作频带宽度较仿真结果偏小，整体向高频段偏移，但总体来说，二者趋势基本一致，性能基本能满足后面的验证实验要求。

3.2 天线阵列激励设计

基于所设计阵元，构建了一个 6 单元直线阵列，单元间距为 40 mm，阵列排布如图 3 所示，要求确定出任意波束指向下的阵元激励分布。

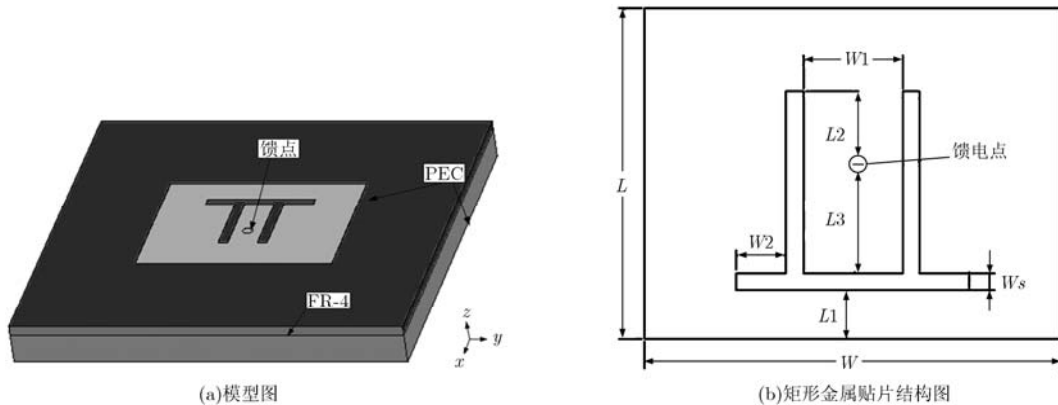


图 1 刻蚀有 π 型槽缝的矩形贴片微带天线模型及其辐射贴片结构图

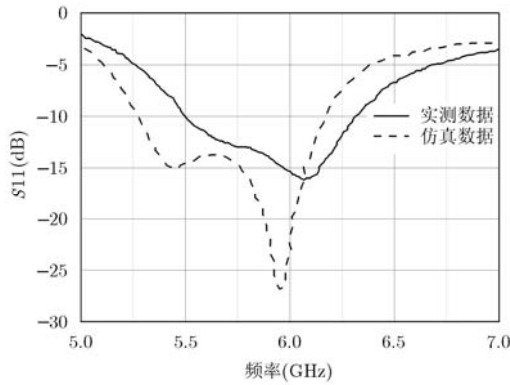


图2 仿真及实测所得 S11

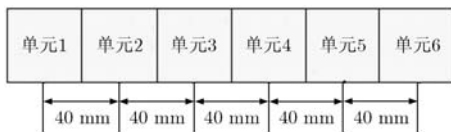


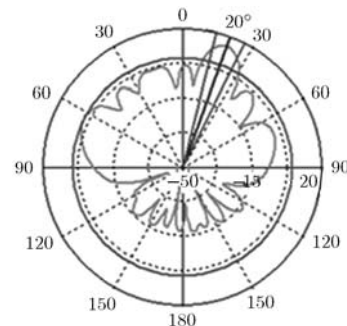
图3 微带6元直线阵点阵模型

根据阵列天线理论,要实现这样的目标,需要确定各阵元激励信号的幅度和相位差。假设阵列的期望主波束指向为 θ ,对于单元间距为 d 的阵列,采用传统阵列设计方法,各阵元激励信号的相位差可近似由时间差 $\Delta t = d \cos(\theta) / c$ 转换得到。这种传统激励方法对于简单的直线阵列较容易实现,但对于结构复杂的阵列,由于需要处理阵元间的互耦,各单元馈电幅度与相位的精确设计将变得非常困难^[17]。为此,我们采用TR法来进行阵列激励设计。对于任意给定波束指向,该方法可快捷、高效地一次性确定宽频带范围对应的阵列激励。

新方法具体实验操作步骤如下:对于任意给定的主波束指向,首先在预期主波束指向上,用一平面波对阵列进行照射,并记录下各阵元接收信号

$r_n(t)$;然后,将 $r_n(t)$ 进行TR处理,得到TR信号 $r_n(-t)$;最后,对TR信号 $r_n(-t)$ 进行傅里叶变换,由变换得到的频谱结果作为端口的激励。根据前面的阵列天线辐射方向图TR综合理论可知,这种设计方法可以得到预期的主波束指向。

对于前述设计的6元直线阵列,要实现主瓣方向在 20° 的辐射特性,根据上述方法,采用CST Microwave Studio进行数值仿真,所获各端口激励的幅度和相位分布分别如表1和表2所示。由这些激励分布所获阵列天线的辐射方向图如图4所示,从图4中可看出,在中心频率5.8 GHz,阵列天线的主波束精确指向 20° 。这一仿真结果初步证实,基于TR法进行阵列激励设计是可行的。

图4 预期波束指向为 20° 的微带6元阵仿真方向图

为进一步验证,分别对5.8 GHz处预期主波束指向为 0° , 10° , 40° 等情况进行数值仿真,其辐射方向图分别如图5(a),5(b),5(c)所示。结果表明,采用基于TR的阵列激励设计方法均能够很好地实现预期的波束指向。需注意的是,图5(c)有两个主波束,其中右边的是栅瓣,非预期主波束,产生这一

表1 各阵元激励信号幅度分布

频率(GHz)	归一化幅度(dB)					
	单元1	单元2	单元3	单元4	单元5	单元6
5.03131	-0.31637	-0.95582	-0.33548	-1.05294	-1.01210	0
5.23257	0	0	0	-0.20224	0	-0.86008
5.43382	-0.66136	-0.21848	-0.83785	0	-0.94409	-0.32350
5.63507	-2.41749	-1.44707	-2.52927	-1.19300	-3.11718	-0.89055
5.83633	-5.09224	-3.06797	-4.18474	-3.11820	-4.05122	-3.29310
6.03758	-6.74654	-4.45175	-5.51170	-4.78793	-4.31854	-5.23964
6.23883	-5.58732	-4.89590	-5.50957	-5.40718	-4.35073	-4.66993
6.44008	-6.01122	-5.77175	-5.75761	-6.18129	-5.42438	-4.23618
6.64134	-7.96700	-7.63361	-7.25773	-7.60982	-7.58779	-6.12063
6.84259	-10.47485	-9.81335	-9.21926	-9.29521	-9.87081	-9.26445
7.04384	-13.51323	-12.37562	-11.52520	-11.19564	-11.44637	-10.80932

表 2 各阵元激励信号相位分布

频率(GHz)	相位(°)					
	单元 1	单元 2	单元 3	单元 4	单元 5	单元 6
5.03131	129.94591	-109.88118	26.14573	155.23423	26.14573	64.28832
5.23257	-88.07465	25.94075	154.90975	-96.74348	154.90975	162.27187
5.43382	63.61842	173.81788	-70.40883	32.08331	-70.40883	-104.33909
5.63507	-140.81104	-36.05287	61.11516	168.30283	61.11516	23.14581
5.83633	29.25393	122.40831	-160.20452	-46.23903	-160.20452	157.83354
6.03758	-122.58180	-64.39149	3.04307	114.37515	3.04307	-78.59519
6.23883	74.05073	113.89672	176.40288	-88.52737	176.40288	36.52064
6.44008	-112.96191	-78.26961	-22.85959	49.87051	-22.85959	165.12815
6.64134	41.98782	71.76812	119.67388	174.27608	119.67388	-72.34206
6.84259	-173.85010	-149.93754	-110.91101	-70.72551	-110.91101	22.42245
7.04384	-36.85585	-16.21400	14.70777	45.09818	14.70777	106.56520

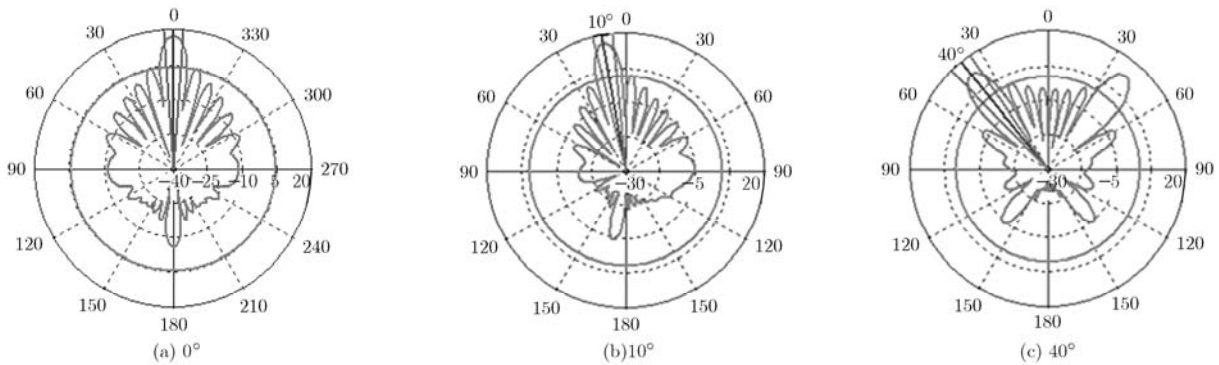


图 5 预期波束指向分别为 0°, 10°, 40° 的微带 6 元阵仿真方向图

栅瓣的主要原因是阵元间距大于半个波长和主波束偏转角度过大。

4 实验验证

为进一步验证 TR 方法的可行性, 本文采用图 6 所示的实验系统, 对其进行实验验证。系统验证平台主要构成包括: 任意波形发生器(AWG7122B)、数字串行分析仪(DSA72004B)、低噪声放大器(LNA)、计算机、天线、同轴电缆等其它辅助器材^[18,19]。其中, 天线 A 为超宽带喇叭天线, 作为信源发射天线。天线 B 为 6 元阵列天线, 阵元为前面

所设计的微带贴片天线, 各阵元工作频率范围为 5.5~6.3 GHz。

对于任意给定的主波束指向 θ_d , 可通过以下方法确定阵列各单元的激励, 具体操作步骤如下: 在图 6 中, 信源天线 A 作为发射天线, 将其固定在 θ_d 方向上某一远场位置, 天线阵列固定在底座可旋转的标有刻度的转盘上, 并保持 θ_d 方向不变完成以下操作。首先, 将天线 A 与 AWG7122B 连接, 由 AWG7122B 发射调制高斯脉冲, 并由天线 A 发射出去。阵列天线 B 作为接收天线, 先将第 1 个阵元与 DSA 72004B 通过同轴电缆相连接, 阵列中的其他单元接匹配负载, 将接收波形在计算机中记录下来。然后, 依次将各阵列单元与 DSA72004B 连接, 阵列中其他天线分别接匹配负载, 依次同步记录下各阵列单元的接收波形。最后, 将接收到的波形在计算机中进行时间反转处理, 所得各端口反转信号即为各阵元的激励分布。

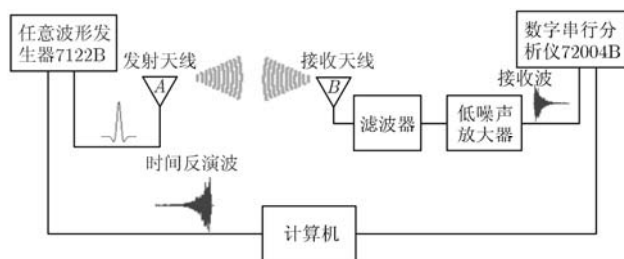


图 6 实验系统框图

为验证所确定的激励分布的准确性, 我们再次

利用 AWG7122B 产生对应的时间反转信号,并将其作为阵元激励信号,得到最终的阵列辐射特性。由于实验中使用的 AWG7122B 只有两路输出,不能同时输出 6 路信号。因此,实验主要采用交替输出,每次以一路信号馈入相应的阵元,其他阵元接匹配负载,完成 6 组信号的测量,最后通过信号叠加的方式实现 6 路同时馈电的效果。具体操作为:依次将各阵元分别与 AWG7122B 连接,其他阵元接匹配负载,天线 A 与 DSA 72004B 连接。天线 B 将以时间反演信号作为输入激励,记录天线 A 的接收信号,旋转转盘,将阵列旋转至不同角度测量并记录下端口接收信号,理想情况下完成 360° 的测量。由于线性阵列的对称性,在本次试验中仅需测量前向 180° 范围,并以 3° 为一个间隔。

基于 TR 方法,在中心频率 5.8 GHz,分别对 0° 和 20° 波束指向的激励分布进行确定和实验验证,验证结果分别如图 7 和图 8 所示。由实验验证结果可以看出,对于给定的波束指向,基于 TR 方法,可以准确地进行阵列激励分布的确定,验证了 TR

方法的有效性。图 8 中副瓣较大是由于微带阵元天线定向辐射特性、平面波入射方向与阵元主瓣的夹角以及阵元间耦合效应综合引起的,当采用一个弱方向性的阵元天线时,这种现象可能可以避免。

综合前面的数值仿真和实验结果可以看出,采用 TR 方法对微带阵列的激励分布进行精确是可行的。基于 TR 方法可以迅速快捷准确地得到预期主波束指向所对应的阵列激励。

5 结束语

基于 TR 电磁波的物理工作机理,本文探索了将 TR 方法应用于微带天线阵列激励设计的可行性,并进行了数值模拟和实验验证。结果表明:对于不同的主波束指向,TR 法均能准确地确定其对应的激励分布。由于无需互耦补偿计算、准确便捷,相对于传统的激励分布确定方法,TR 法具有显著优势。此外,TR 方法不受阵列和阵元结构形式的限制,因此,具有一定的通用性,可推广应用于其它复杂阵列,如共形阵列等。

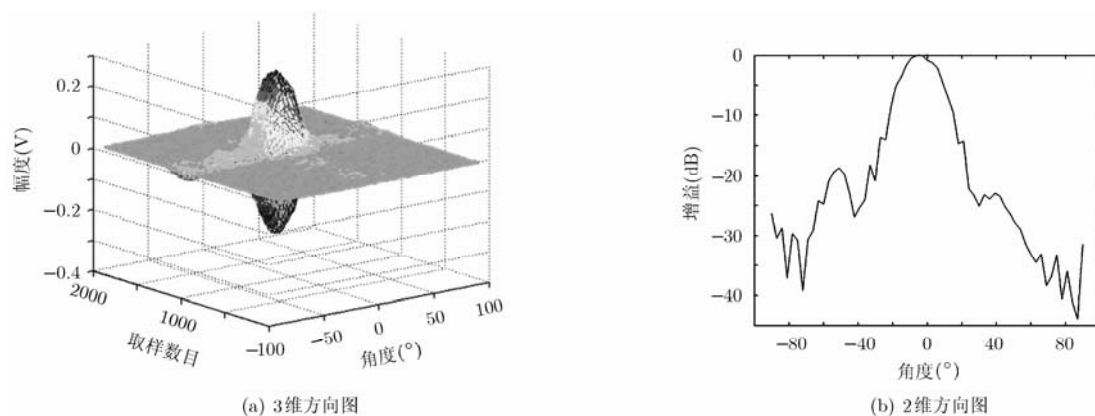


图7 预期波束指向为 0° 的微带 6 元阵实测方向图

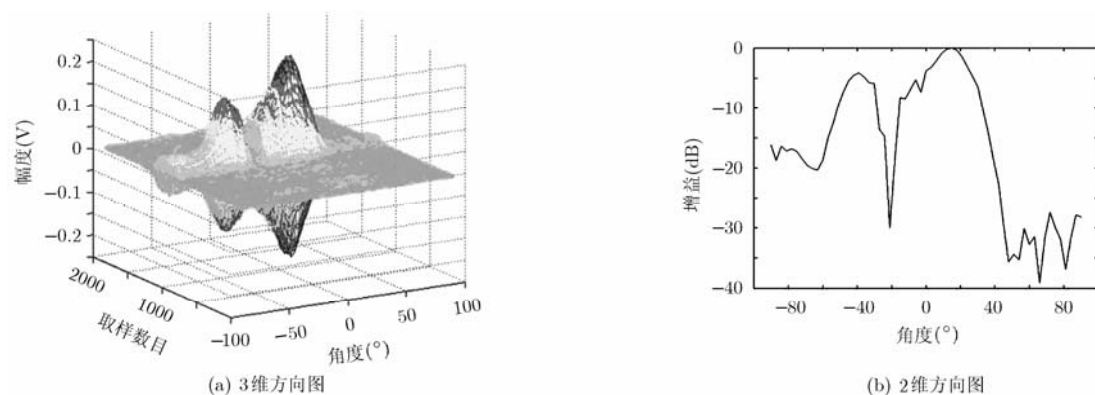


图8 预期波束指向为 20° 的微带 6 元阵实测方向图

参考文献

[1] de Rosny J, Lerosey G, and Fink M. Theory of

electromagnetic time-reversal mirror[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(10): 3139-3149.

- [2] Fink M. Time reversal mirrors[C]. The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Barcelona, 2013: 788-789.
- [3] Lerosey G, de Rosny J, Tourin A, *et al.* Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal[J]. *Science*, 2007, 315(5815): 1120-1122.
- [4] Mosk A P, Lagendijk A, Lerosey G, *et al.* Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(1): 283-292.
- [5] Razzaghi R, Lugrin G, Manesh H M, *et al.* An efficient method based on the electromagnetic time reversal to locate faults in power networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1663-1673.
- [6] Zhao D, Yue W, Yu M, *et al.* Propagation characteristics of time reversal pulsed electromagnetic waves in double negative materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(7): 074102.
- [7] Lerosey G, de Rosny J, Tourin A, *et al.* Time reversal of wideband microwaves[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 154101-1-154101-3.
- [8] Hong S K, Taddese B T, Drikas Z B, *et al.* Focusing an arbitrary RF pulse at a distance using time-reversal techniques[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2013, 27(10): 1262-1275.
- [9] Nguyen H T, Andersen J B, Pedersen G F, *et al.* Time reversal in wireless communications: a measurement-based investigation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2006, 5(8): 2242-2252.
- [10] Nguyen H T, Kovacs I Z, and Eggers P C. A Time reversal transmission approach for multiuser UWB communications [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(11): 3216-3224.
- [11] Nguyen H T, Andersen J B, and Pedersen G F. The potential use of time reversal techniques in multiple element antenna systems[J]. *IEEE Communications Letters*, 2005, 9(1): 40-42.
- [12] Monsef F and Cozza A. Analysis of time-reversal-based propagation for spatial focusing and multiplexing[C]. 2011 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), Torino, 2011: 827-830.
- [13] Fouda A E and Teixeira F L. Time-reversal techniques applied to ultra-wideband indoor wireless communication[C]. 2012 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), Chicago, 2012: 1-2.
- [14] Zhao D, Jin Y, Wang B Z, *et al.* Time reversal based broadband synthesis method for arbitrarily structured beam-steering array[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(1): 164-173.
- [15] 刘肖萌, 高文军, 邓云凯, 等. 基于投影矩阵法的阵列天线波束形成方法[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 50-57.
- Liu X M, Gao W J, Deng Y K, *et al.* Beam synthesis technique for array antenna based on projection matrix algorithm[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 50-57.
- [16] 张敏. CST 微波办公室用户全书[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004: 208-238.
- [17] 赵菲, 王生水, 柴舜连, 等. 非理想馈电端口下的共形阵完备互耦分析与校正[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1490-1495.
- Zhao F, Wang S S, Chai S L, *et al.* The complete mutual coupling analysis and calibration for conformal arrays with nonideal ports fed[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1490-1495.
- [18] 刘静. TR-UWB 无线通信系统中的天线及系统实验研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2008.
- Liu J. Experimental study of antenna and system in TR-UWB wireless communication system[D]. [Master dissertation]. University of Electronics and Science Technology of China, 2008.
- [19] Dezfouliyan A and Weiner A M. Experimental investigation of UWB impulse response and time reversal technique up to 12 GHz: omnidirectional and directional antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(7): 3407-3415.
- 范晶晶: 女, 1989年生, 硕士生, 研究方向为电磁场与微波技术.
- 赵德双: 男, 1974年生, 副教授, 研究方向为天线与电波传播及认知无线电.
- 张浩然: 男, 1987年生, 硕士生, 研究方向为天线设计与综合.
- 周城: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为电磁干扰抑制及无线共存.