

A New Method for Measuring Digital Active Phased Array Antenna

Jian Ding, Shuji Hao, Libin Lv

National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao Shandong
Email: dj2020@126.com, hsj80586@126.com, libin_lv@163.com

Received: Dec. 1st, 2018; accepted: Dec. 21st, 2018; published: Dec. 28th, 2018

Abstract

A new method is proposed to solve the measurement problem of digital active phased array antenna by using the modified coding algorithm. Fixing the probe in the mid-field of the phased array antenna, using the controllable excitation amplitude and phase of the digital active phased array antenna, the excitation amplitude and phase are coded, and the initial excitation is quickly recovered. The radiation characteristics of the measured antenna are obtained by using the active element pattern and the initial excitation. The simulation results of two digital active phased array antenna models verify the correctness and efficiency of the proposed method.

Keywords

Digital Active Phased Array Antenna, Active Element Pattern, Mid-Field, Orthogonal Coding

一种数字有源相控阵天线的测量方法

丁 建, 郝书吉, 吕立斌

中国电波传播研究所, 电波环境特性及模化技术重点实验室, 山东 青岛
Email: dj2020@126.com, hsj80586@126.com, libin_lv@163.com

收稿日期: 2018年12月1日; 录用日期: 2018年12月21日; 发布日期: 2018年12月28日

摘 要

本文利用变型的编码算法, 提出一种新方法来解决数字有源相控阵天线的测量问题。在相控阵天线的中场区内固定测量探头, 利用数字有源相控阵天线激励幅度和相位可控的特点, 对激励幅度和相位进行编码, 快速恢复出初始激励, 应用有源单元波瓣图, 得出被测天线的辐射特性。通过两个数字有源相控阵

天线模型的仿真结果, 验证了该方法的正确性和高效性。

关键词

数字有源相控阵天线, 有源单元波瓣图, 中场, 正交编码

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

相控阵天线可实现波束快速扫描、波束赋形捷变, 还具有多波束形成和空间功率合成能力。因而近年来相控阵天线在各种不同的无线电系统中得到越来越广泛的应用。有源相控阵天线有利于采用直接数字频率合成器(DDS)、数字上变频器(DUC)、数字下变频器(DDC)和数字控制振荡器(NCO)等实现相控阵发射波束和接收波束的数字形成(DBF), 提高相控阵的数字化程度。随着大规模数字和微波及模拟集成电路技术的发展, 这种基于 DDS 的数字有源相控阵天线将会得到广泛应用。

数字有源相控阵的测量和校准的研究也就成为了一个相控阵天线研究的热门问题。对于大型相控阵天线, 天线口径很大, 且常常是不能转动的天线, 这给天线远场测量[1]带来特殊的困难。而近场扫描方法[2] [3]要求有高精度的扫描器测试架、探头、机械或者激光定位装置等, 测量通常只能在微波暗室中进行。另外一类方法是将天线测试信号源或者测试探头放置在中场, 这种方法也称为中场测量方法。所谓中场是介于近场和远场之间的范围, 对于阵中单元来说是远场, 相对整个阵面来说是辐射近场的区域。在中场测量方法研究方面, 近场聚焦法[4] [5]是通过近场聚焦形成球面波前来等效远场测量, 该方法受到扫描角的限制, 只能测量部分波瓣图; 旋转矢量法[6] [7]是改变每个单元的相位, 逐个测量天线单元。对于大型相控阵, 改变单个单元相位对整个相控阵发射信号影响不大, 给测量带来了很大困难。以换相法为基础的一系列相控阵快速测量方法[8] [9] [10], 都需要利用相控阵天线的一些先验知识来评估各通道的真实激励, 其精度较差。而基于编码矩阵的方法[11], 虽然能够减少测量次数和提高测量的精度, 但只能对某些特定阵元数目的相控阵天线进行测量。换相法和编码矩阵法都是基于对移相器进行控制, 遍历所有移相器状态的。而数字有源相控阵天线中 T/R 组件中的移相器、衰减器被 DDS 中的相位累加器和乘法器取代, 遍历所有的配相状态就不太现实。本文根据变型的编码算法[12]提出了测量数字有源相控阵的新方法, 减少了测量次数和简化了数据处理过程, 提高了测量效率, 具有很强的实用性。

2. 测量方法模型

如图 1 所示的相控阵模型中可以看出, 数字有源相控阵天线的显著特点就是采用 DDS 代替了移相器, 能够产生更多和更精确的配相。在相控阵天线进行发射时, 由控制电路控制 DDS 产生所需要的激励信号, 经过功率放大器和传输线馈给天线单元, 在对相控阵天线进行测量和校准时必须考虑这些元件的影响。而且整个相控阵的辐射特性决定于各个天线单元的激励特性。在相控阵的远场区, 由叠加原理可知, 相控阵的波瓣图[13] [14]为:

$$E(\theta, \phi) = \sum_{q=1}^N V_q \mathbf{g}_u^q(\theta, \phi) e^{jk\hat{r}_q} \quad (1)$$

其中, \hat{r} 是观察点的位置单位矢量; \mathbf{r}_q 是第 q 个天线单元中心的位置矢量; V_q 是第 q 个天线单元的激励复信号; $\mathbf{g}_u^q(\theta, \phi)$ 是第 q 个天线单元的有源单元波瓣图, 即该天线单元单位激励(发射机阻抗 Z_{gq}), 其它天线单元接相应的发射机阻抗 $\{Z_{gq}\}$ 时的波瓣图。一系列的 $\{\mathbf{g}_u^q(\theta, \phi)\}$ 包含了所有互耦和发射机失配的影响, 式(1)就是相控阵波瓣图的精确表达式。

对均匀分布的相控阵天线, 由于阵元位置的不同, 其受到其他阵元的耦合影响也不同。随着距离的增加, 阵元之间的耦合影响越来越小, 可认为阵元只会受到周围有限距离内的阵元耦合影响。因此当阵元数目较多时, 天线阵中间的阵元受到的耦合影响是相似的, 其有源单元波瓣图是相似的, 可以用随着天线单元的增加, 可用平均有源单元波瓣图来描述, 而天线阵边缘的阵元受到的耦合影响基本不相同。这样就可以把阵元分为两组: 边缘单元组和阵中单元组, 相控阵天线的波瓣图就变为:

$$\mathbf{E}(\theta, \phi) = \mathbf{g}_{av}^i(\theta, \phi) \sum_{n=1}^{N_i} V_n e^{jk\hat{r}r_n} + \sum_{m=1}^{N_e} V_m \mathbf{g}_u^m(\theta, \phi) e^{jk\hat{r}r_m} \quad (3)$$

其中, N_i 是阵中单元组的天线单元数; $\mathbf{g}_{av}^i(\theta, \phi)$ 是阵中单元组的平均有源单元波瓣图; N_e 是边缘单元组的天线单元数; $\mathbf{g}_u^m(\theta, \phi)$ 是各边缘阵元有源单元波瓣图。

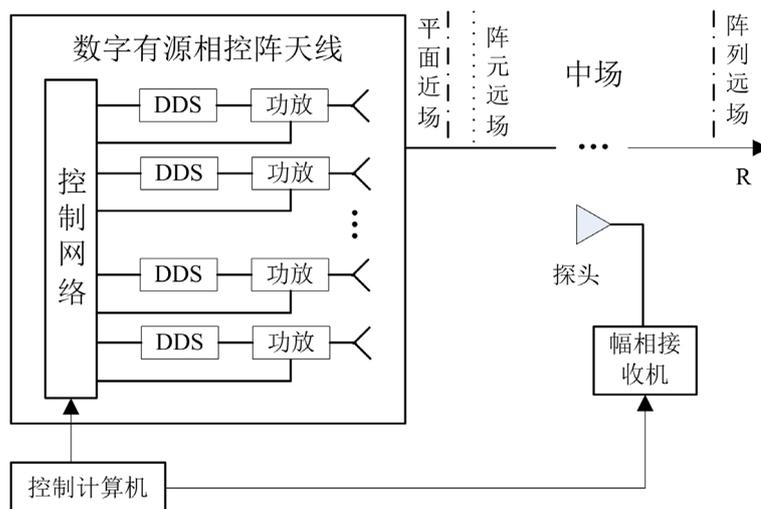


Figure 1. Measurement model of digital active phased array antenna
图 1. 数字有源相控阵天线测量模型

测量时, 探头处于相控阵天线的中场区, 被测天线和探头均保持不动, 根据场的叠加原理, 探头接收到的信号可以表示为如下形式:

$$y = \sum_{q=1}^N V_q c_q \quad (2)$$

$$c_q = \frac{e^{-jk d_q}}{d_q} \mathbf{g}_u^q(\hat{\mathbf{d}}_q) \cdot \mathbf{f}_p(-\hat{\mathbf{d}}_q) \quad (3)$$

其中, $d_q = |\mathbf{r}_q - \mathbf{r}_p|$, \mathbf{r}_p 是探针的位置矢量; $\hat{\mathbf{d}}_q = (\mathbf{r}_q - \mathbf{r}_p) / d_q$ 是从 \mathbf{r}_q 指向 \mathbf{r}_p 的单位矢量; \mathbf{f}_p 是探头的远场波瓣图; c_q 可以通过探头和相控阵的先验信息算出来, 或者通过测量得到。

3. 变型的编码算法的测量原理

变型的编码算法[12]采用哈达马矩阵 H 作为其编码矩阵进行测量, 而不需要再采用 $-H$ 作为编码矩阵进行测量, 只需一组测量数据即可复原出初始激励。而且可以对任意阵元数目的相控阵天线进行测量。

正规哈达马矩阵的第一行和第一列元素都是+1，其他行和列都是+1 或者-1，而且它们的数量相同。其他形式的哈达马矩阵都可以变换为正规形式。目前 $N=1,2,4t$ ，(t 为正整数)阶数的哈达马矩阵大部分已经被构造出来。 $N=1$ 时， $H_1=[1]$ 。一般地， 2^k 阶哈达马矩阵为

$$H_{2^k} = \begin{bmatrix} H_{2^{k-1}} & H_{2^{k-1}} \\ H_{2^{k-1}} & -H_{2^{k-1}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

编码时，要保证哈达马矩阵的阶数 $M \geq N+1$ ， N 为相控阵天线单元数目。用来编码的哈达马矩阵的一行代表着在一次探针采样中所有天线单元的编码状态，一列代表着一个天线单元在整个测量过程中的编码状态。第 q 个天线单元在第 m 次探针采样中编码后的激励为：

$$a_q = \begin{cases} t(q)V_q, & H(m, n+1) = +1 \\ V_q, & H(m, n+1) = -1 \end{cases} \quad (5)$$

在一组编码激励下，探头收到的信号为：

$$y(m) = \sum_{q=1}^N a_q c_q = \sum_{q=1}^N \left(\frac{1+H(m, n+1)}{2} V_q + \frac{1-H(m, n+1)}{2} t(q)w_q \right) c_q \quad (6)$$

由哈达马矩阵的性质可知：

$$H_M^{-1} = \frac{1}{M} H_M \quad (7)$$

这样，解码后的信号为：

$$z(q) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^N H(m, n+1) y(m), \quad q = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

则由式(7)、(8)、(9)可得：

$$z(q) = \frac{(1-t(q))V_q c_q}{2}, \quad q = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

由式(3)计算或者测出 c_q 的情况下，初始激励就被复原出来：

$$V_q = \frac{2 * z(q)}{(1-t(q))c_q}, \quad q = 1, 2, \dots, N \quad (10)$$

以上结果的推导主要利用哈达马矩阵两个重要性质：每行或者每列的均值都为零；每行或者每列都是正交的。在已知有测量噪声的假设前提下，应用最小二乘法可以得到线性估值的最佳无偏估计。

根据编码方式 $t(q)$ 的不同，编码算法由三个变型，如表 1 所示。1) 对复激励的幅度进行编码。在哈达马矩阵元素为+1 时(记为 Hadamard+1)，激励幅度不变；在哈达马矩阵元素为-1 时(记为 Hadamard-1)，激励幅度衰减为 $\alpha * V_q$ ， α 为衰减因子。2) 对复激励的相位进行编码。利用两个移相，需要三次测量；第一次使用初始激励和 90° 移相激励，分别为 V_q 和 $V_q \exp(j\pi/2)$ ；第二次使用初始激励和 180° 移相激励，分别为 V_q 和 $V_q \exp(j\pi)$ ；第三次使用 90° 移相激励和 270° ($90^\circ + 180^\circ$) 移相激励，分别为 $V_q \exp(j\pi)$ 和 $V_q \exp(-j\pi/2)$ ；可以解码出三种状态初始激励、 90° 移相激励、 180° 移相激励。3) 组合编码，幅度和相位均编码。利用衰减激励和 90° 移相激励。三次测量可以解出初始激励，衰减因子和 90° 移相激励。由于数字有源相控阵的激励的幅度和相位均可控，因此可以使用三种变型中的任何一种进行测量。

该方法的基础是考虑了相控阵天线的构成特性，在固定探头和相控阵天线不动的情况下，利用数字有源相控阵天线激励幅度和相位可控的特点，完成测量过程，恢复出初始激励。该方法可以对大型数字相控阵天线进行现场测量，而且避免了复杂的数据处理过程，具有精确高效的特点，便于自动化测量实现。

Table 1. Coding algorithms for three variants**表 1.** 三种变型的编码算法

	Hadamard+1	Hadamard-1
幅度编码	V_q	$\alpha * V_q$
相位编码	V_q	$V_q \exp(j\pi/2)$
	V_q	$V_q \exp(j\pi)$
组合编码	$V_q \exp(j\pi)$	$V_q \exp(-j\pi/2)$
	V_q	$\alpha * V_q$
	$V_q \exp(j\pi/2)$	$\alpha * V_q \exp(j\pi/2)$

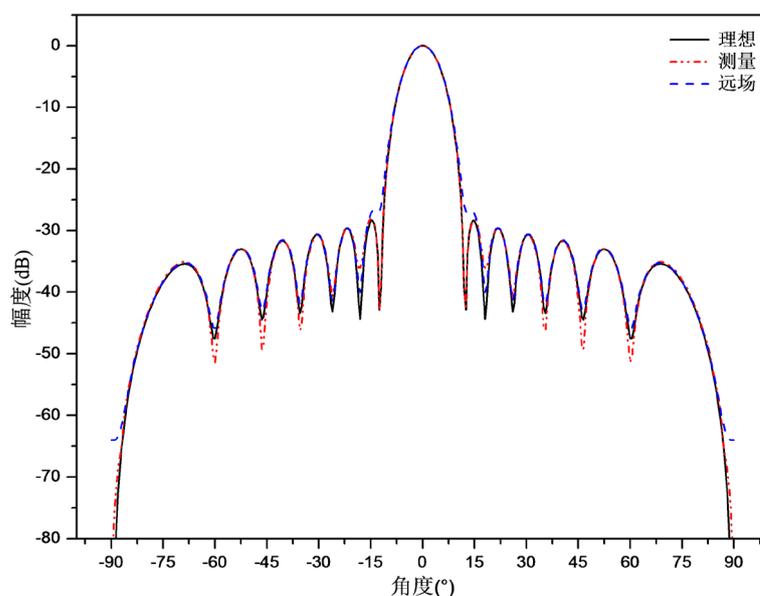
4. 仿真结果分析

该方法对数字有源相控阵天线辐射特性的测量过程分为两个阶段：第一个阶段是测量各阵元的方向性特性(各阵元有源单元波瓣图)，通常测量一个或是几个阵元的波瓣图就够了；第二个阶段是测量各阵元的激励特性，根据探针的接收信号，通过式(10)得到激励权。

仿真 1：相控阵模型为一 14 元半波偶极子线阵。偶极子沿 y 轴排列，对称排列在 xoy 平面上。单元间距为 0.5λ 。相控阵口径为 6.5λ ，远场距离选为 100λ 。探针放在 z 轴上，距离阵面 13λ 。根据阵元数目选择 16 阶哈达马矩阵作为编码矩阵，使用相位编码的方式对此阵进行测量。测量结果如图 2 和图 3 所示。

仿真 2：相控阵模型为 7×7 平面相控阵。天线单元为沿 z 轴放置的半波偶极子，对称排列在 xoy 平面上。沿 x 轴、 y 轴的单元间距均为 0.5λ 。相控阵口径为 3.5λ ，远场距离选为 30λ 。探针放在 z 轴上，距离阵面 10λ 。据阵元数目选择 52 阶哈达马矩阵作为编码矩阵，使用幅度编码的方式对此阵进行测量。测量结果如图 4 和图 5 所示。

从以上两个仿真结果可以看出，远场测量对测量距离要求很高，而且不能正确测出第一旁瓣。而本文提出的方法对距离要求不高，能够很好地复原出初始激励，计算出的波瓣图和理想波瓣图吻合较好，对旁瓣的测量较好，精度较高。而且根据复原出的激励可以相控阵进行校准，提高相控阵性能。

**Figure 2.** Radiation pattern of 14-element linear array**图 2.** 14 元线阵辐射波瓣图

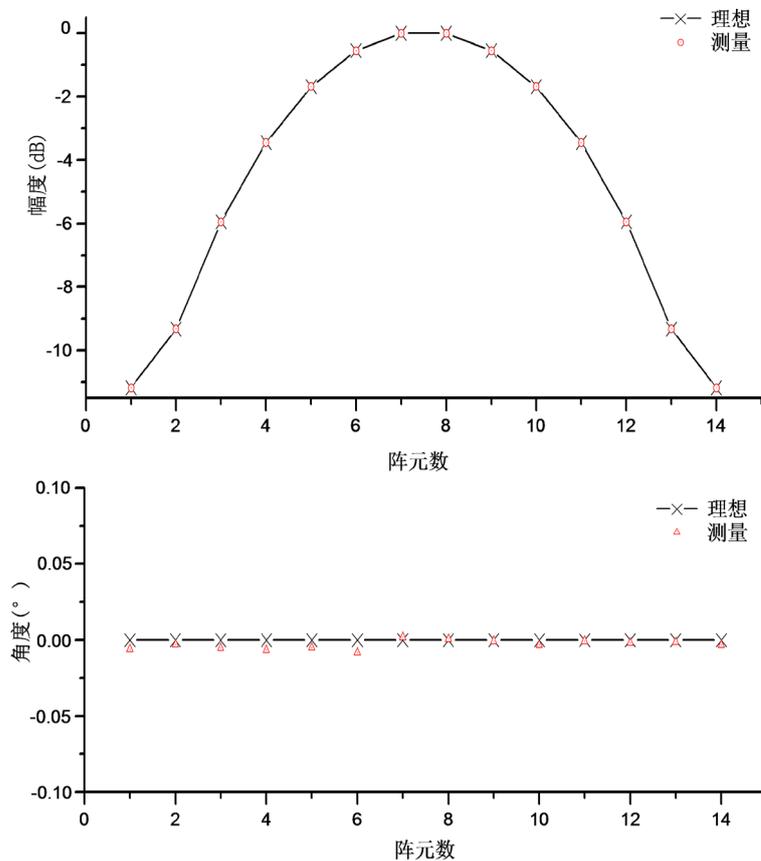


Figure 3. Amplitude and phase distribution of elements in 14-element linear array
 图 3. 14 元线阵各单元幅相分布

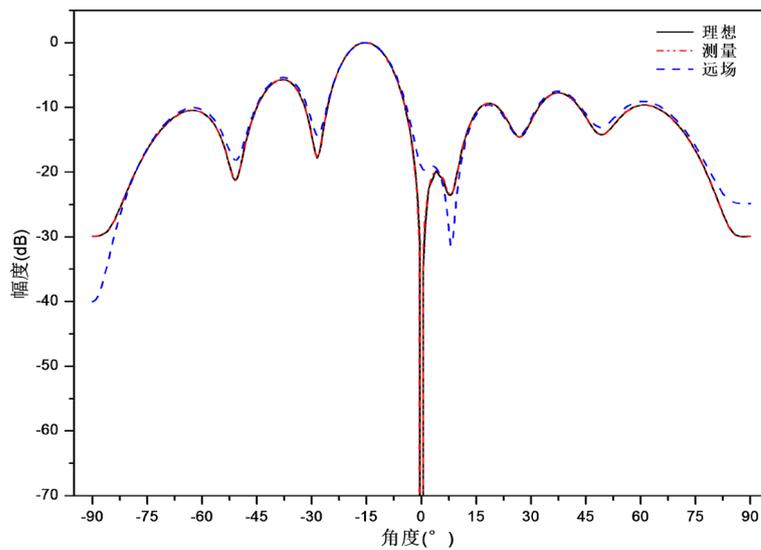


Figure 4. Scanning radiation pattern of 7×7 planar array
 图 4. 7×7 平面阵扫描辐射波瓣图

5. 结论

本文对数字有源相控阵天线测量方法进行了研究，提出了一种合适的快速测量方法，并通过计算机

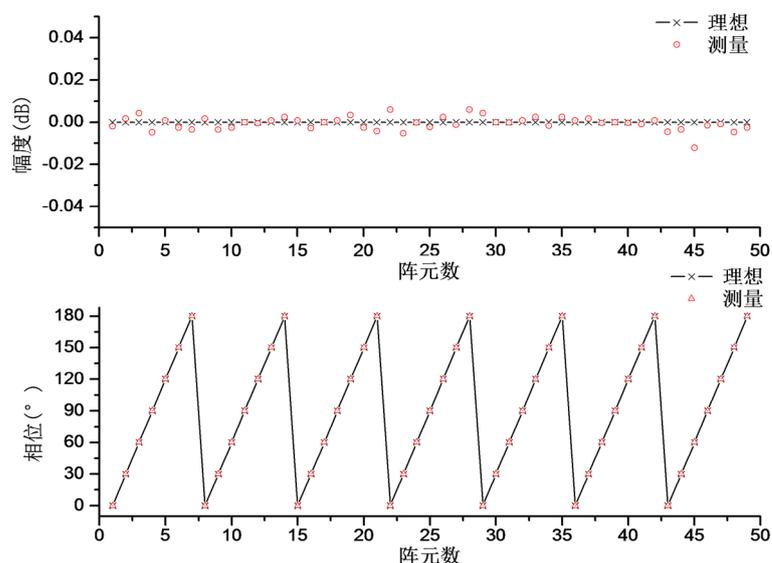


Figure 5. Amplitude and phase distribution of elements in 7×7 planar array
图 5. 7×7 平面阵各阵元幅相分布

仿真证明了该方法的正确性和高效性。从仿真中可以看出，该方法把探针放在相控阵天线的中场区降低了测量距离的要求，利用哈达马矩阵的性质降低了数据处理的复杂度，提高了处理测量数据的速度，保证了测量精度，使测量具有很高的效率，而且便于实现自动化测量。这对于数字有源相控阵天线的测量和校准都具有重要的理论和实际应用价值。后续研究中需要分析不同阵元与探针之间的时延差对哈达马矩阵正交特性的影响，以及哈达马矩阵大小对测量结果的影响，进一步提高测量精度。

参考文献

- [1] Evans, G.E. (1990) *Antenna Measurement Techniques*. Artech House, Inc., London.
- [2] Isernia, T., Leone, G., *et al.* (1996) Radiation Pattern Evaluation from Near-Field Intensities on Planes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **44**, 701-710. <https://doi.org/10.1109/8.496257>
- [3] Patton, W.T. and Yorinks, L.H. (1999) Near-Field Alignment of Phased Array Antenna. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **47**, 584-591. <https://doi.org/10.1109/8.768795>
- [4] 张俭, 熊继袞. 相控阵天线的聚焦法[J]. 系统工程与电子技术, 1990(1): 36-44.
- [5] 高火涛, 吴世才, 侯杰昌, 等. 高频地波雷达天线阵方向图的近场聚焦技术[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 47(5): 545-549.
- [6] Takahashi, T., Miyashita, H. and Konishi, Y. (2006) Theoretical Study on Measurement Accuracy of Rotating Element Electric Field Vector (REV) Method. *Electronics and Communications in Japan, Part 1*, **90**, 22-33. <https://doi.org/10.1002/ecja.20239>
- [7] Takahashi, T., Konishi, Y. and Makino, S. (2008) Fast Measurement Technique for Phased Array Calibration. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **56**, 1888-1899. <https://doi.org/10.1109/TAP.2008.924682>
- [8] Ovidio, M.B. and Migliore, M.D. (2005) Accurate Diagnosis of Conformal Arrays from Near-Field Data Using the Matrix Method. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **53**, 1114-1120. <https://doi.org/10.1109/TAP.2004.842656>
- [9] Shang, J.-P., Deng, Y.-B., Jiang, S., *et al.* (2008) Study on a Fast Measurement Method of Phased Array Antennas. *The 8th International Symposium on Antennas, Propagation, and EM Theory*, Kunming, 2-5 November 2008, 161-165.
- [10] 尚军平, 傅德民, 等. 基于最佳配相控制的相控阵天线快速测量方法研究[J]. 电波科学学报, 2008, 23(2): 331-334.
- [11] 尚军平, 傅德民, 徐平. 基于控制电路编码算法的相控阵天线快速测量[J]. 电波科学学报, 2010, 25(1): 73-76.
- [12] Lier, E., Zemlyansky, M., *et al.* (2010) Phased Array Calibration and Characterization Based on Orthogonal Coding:

Theory and Experimental Validation. 2010 *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Waltham, 12-15 October 2010, 271-278. <https://doi.org/10.1109/ARRAY.2010.5613357>

- [13] David, F.K. (1993) Array Antenna Pattern Methods That Include Mutual Coupling Effects. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **41**, 1625-1632. <https://doi.org/10.1109/8.273305>
- [14] Pozar, D.M. (1994) The Active Element Pattern. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, **42**, 1176-1178. <https://doi.org/10.1109/8.310010>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-2227, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ja@hanspub.org