

文章编号: 1672-2892(2010)05-0530-04

## 旋转矢量法结合最大值法校准宽角相控阵天线

简荣华

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 介绍了相控阵天线的远场校准方法——旋转矢量法, 利用 HFSS 仿真软件对  $4 \times 4$  元相控阵天线扫描角为  $0^\circ$  状态进行校准仿真, 效果优良; 在宽角校准时, 采用旋转矢量法结合最大值法进行校准, 用 CST 仿真软件结合该方法进行仿真, 效果良好; 最后进行试验测试, 对  $4 \times 4$  元相控阵天线在两维宽角范围内进行校准。结果证明该方法能有效校准小阵面宽角扫描相控阵天线。

**关键词:** 旋转矢量法; 相控阵; 小阵面; 宽角; 校准

**中图分类号:** TN821+.7

**文献标识码:** A

## REV method combined maximum method for calibration of phased array antenna with wide angle

JIAN Rong-hua

(Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The Rotating-element Electric field Vector(REV) method, for far field calibration of Phased Array Antenna(PAA), was proposed in this study. First, a  $4 \times 4$  two-dimensional PAA was commendably calibrated at  $0^\circ$  scanning angle for using REV method by HFSS. Then, a method combining maximum method was used in wide scanning angle calibration with CST, which showed good effect. At last, a test was carried out. The results indicate that the method is valid for small PPA in wide scanning angle.

**Key words:** REV method; Phased Array Antenna; small array; wide angle; calibration

相控阵天线由多个单元组成, 依靠控制每个单元的相位来改变合成波束的指向, 实现波束扫描。相控阵天线由于天线单元之间间距小, 互耦强烈, 导致天线增益下降, 副瓣电平抬高, 严重时不仅无法实现波束准确扫描, 而且可能出现波束严重畸变。相控阵幅相校准的方法包括近场校准<sup>[1-2]</sup>、中场校准<sup>[3]</sup>和远场校准<sup>[4-9]</sup>3类。目前的远场校准方法中, 多数是基于数字波束成型天线阵, 要求知道每个阵元接收到信号的幅度和相位<sup>[4-6]</sup>, 且无法用于发射天线阵元的校准。旋转矢量法(REV)<sup>[7-9]</sup>可以在远场对相控阵发射天线进行校准, 无需相位测量和附加开关设备, 仅使用波控器及接收的幅度测量即可进行校准, 大大简化了测量的复杂性和难度。当用移相器来改变一个单元的相位时, 合成场矢量随着单元场矢量的旋转而变化, 然后, 测量出合成矢量的幅度变化, 从而决定单元的幅度和相位。

已发表的文献主要采用旋转矢量法校准相控阵天线法向及小扫描角的方向图, 但是随着扫描角度增大, 指向误差也会增大。本文采用旋转矢量法结合最大值法校准  $4 \times 4$  元相控阵天线, 满足在宽角范围内二维扫描需求。

### 1 旋转矢量法

图1中,  $E_0$  和  $\phi_0$  分别表示合成场矢量的幅度和相位的初始状态,  $E_n$  和  $\phi_n$  分别表示第  $n$  个单元的幅度和相位, 当第  $n$  个单元的相位变化为  $\Delta$ , 总的矢量场为:

$$\dot{E} = (E_0 e^{j\phi_0} - E_n e^{j\phi_n}) + E_n e^{j(\phi_n + \Delta)} \quad (1)$$

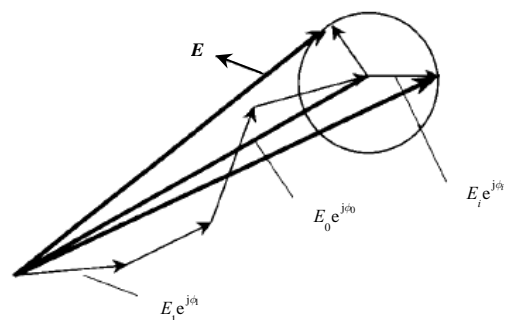


Fig.1 Composite field vector and the field vector of each element antenna  
图1 旋转矢量法原理图

定义第  $n$  个单元的相对幅度和相位为：

$$\begin{cases} X = \phi_n - \phi_0 \\ K = \frac{E_n}{E_0} \end{cases} \quad (2)$$

如图 2，合成功率  $Q$  随单元相位的改变呈正弦变化。当相位变化为  $-\Delta_0$  时，合成功率  $Q$  达到最大值。

每个单元的相对幅度  $K$  和相对相位  $X$  分别为：

$$K = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}} \quad (3)$$

$$X = \arctan \left( \frac{\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + \Gamma} \right) \quad (4)$$

式中  $\Gamma = \frac{\tau - 1}{\tau + 1}$ ， $\tau$  为最大最小合成功率之比。

## 2 仿真计算

采用 HFSS 对 16 元相控阵天线进行仿真，模型如图 3 所示，天线单元为 U 型缝隙天线，阵面中心 16 元为有源单元，周围一圈为无源单元，设置 16 个有源单元的激励均为：幅度为 1，相位为 0，得到仿真结果如图 4(a) 所示，经过旋转矢量法校准后结果如图 4(b) 所示。

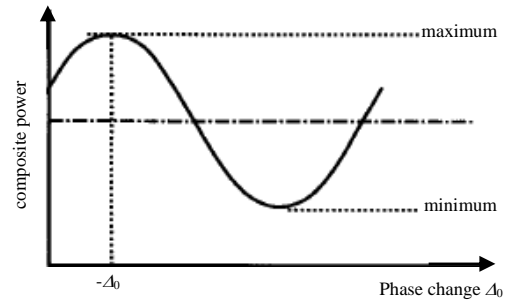


Fig.2 Variation of the composite power of array field  
图 2 合成功率随相位  $\Delta$  变化曲线图

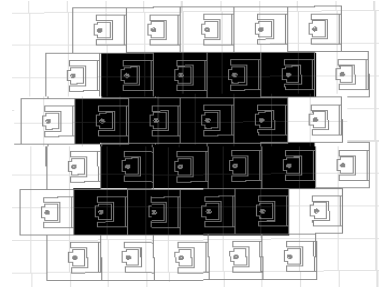


Fig.3 16-element phased array antenna simulated model  
图 3 16 元相控阵天线仿真模型

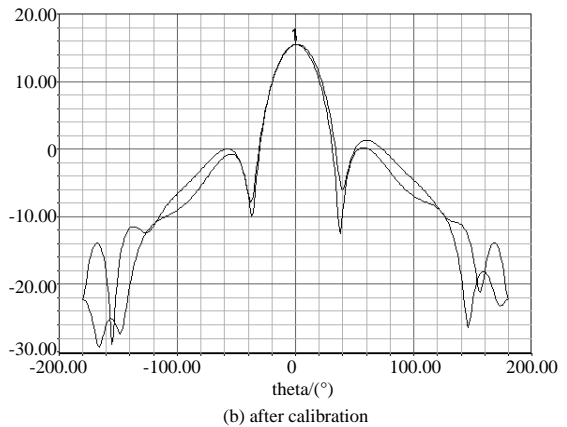
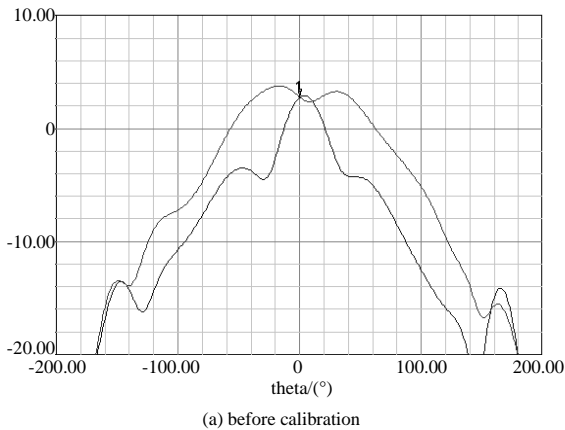


Fig.4 Simulated results with HFSS  
图 4 HFSS 仿真结果

从图 4 可以看出，由于相控阵单元之间存在互耦，方向图发生了畸变，采用旋转矢量法对相控阵天线进行校准后，相控阵  $0^\circ$  扫描角时，增益达到 15.51 dB，副瓣电平 -14.09 dB。

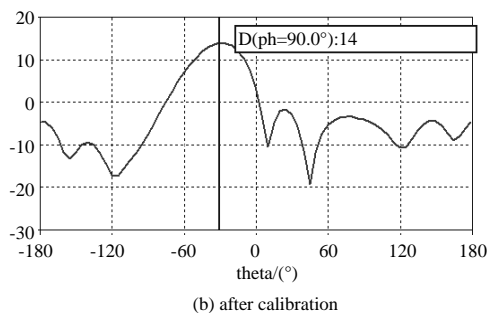
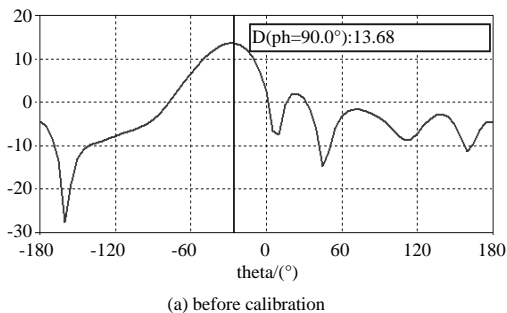


Fig.5 Simulated results with CST  
图 5 CST 仿真结果

采用 CST 对 16 元相控阵天线进行仿真, 先对扫描角为  $0^\circ$  时进行校准, 得到校准矩阵。在校准矩阵的基础上, 结合  $30^\circ$  扫描角所对应的单元相位差对移相器进行馈相, 馈相矩阵等于  $0^\circ$  校准矩阵加  $30^\circ$  对应的相位差矩阵, 得到指向角为  $25^\circ$  (图 5(a) 所示), 偏离了  $30^\circ$ 。对馈相矩阵各单元相位分别进行微调, 测量出合成矢量的幅度变化, 直到取得最大值, 仿真结果如图 5(b) 所示, 此时馈相矩阵等于  $0^\circ$  校准矩阵加  $30^\circ$  扫描角对应的相位差矩阵加  $0^\circ$  扫描角与  $30^\circ$  扫描角的互耦误差矩阵, 扫描角为  $0^\circ$  与扫描角为  $30^\circ$  时, 互耦系数是不同的。

### 3 性能测试

根据上面论述的方法, 对图 6 中的相控阵天线在频率  $8.0\text{ GHz}\sim 8.5\text{ GHz}$ , 扫描角  $\pm 50^\circ \times (\pm 40^\circ)$  范围内进行相位校准和性能测试。测试过程中进行了多次校准, 图 7 中 “★” 为校准角度点, “★” 附近的长方形区域为指向误差小于  $5^\circ$  所包含的角度区域。天线波束宽度约为  $27^\circ \times 28^\circ$ 。

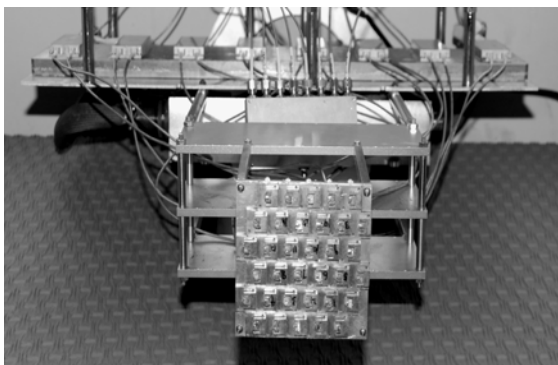


Fig.6 16-element phased array antenna  
图 6 16 元相控阵天线

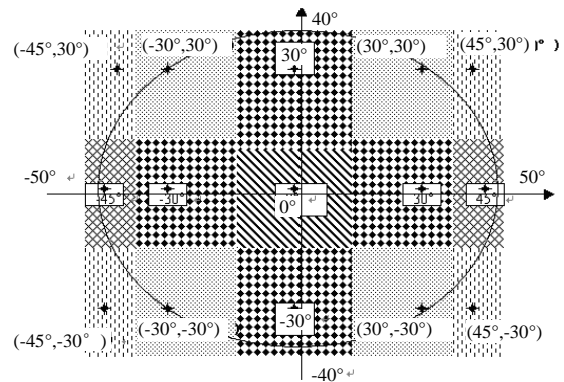
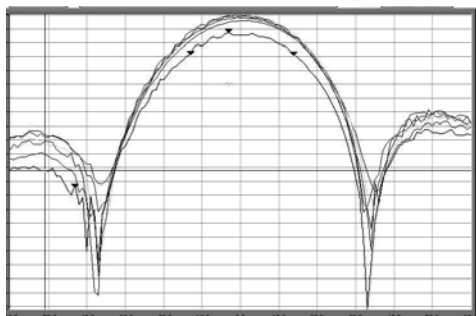
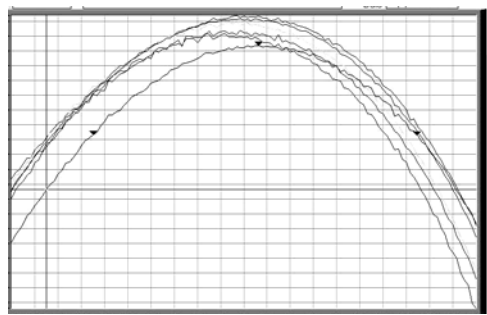


Fig.7 Calibration angle in scanning range and its valid range  
图 7 扫描范围内的校准点及校准区域

性能测试结果如图 8~图 10 所示, 该相控阵可以在  $\pm 50^\circ \times (\pm 40^\circ)$  范围内进行波束扫描。



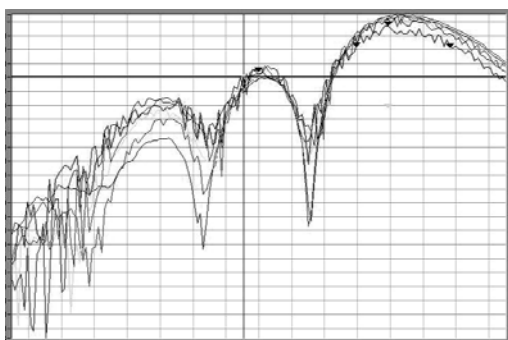
(a) E plane



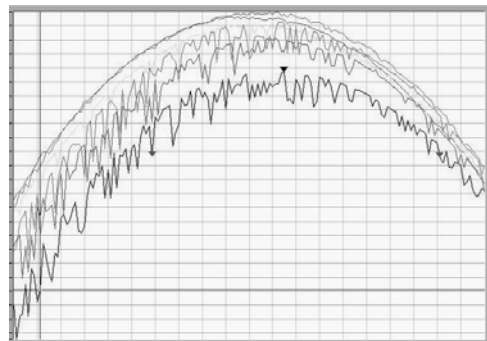
(b) H plane

Fig.8 Radiation pattern of scanning angle  $(0^\circ, 0^\circ)$

图 8 扫描角  $(0^\circ, 0^\circ)$  的方向图



(a) E plane



(b) H plane

Fig.9 Radiation pattern of scanning angle  $(-50^\circ, -20^\circ)$

图 9 扫描角  $(-50^\circ, -20^\circ)$  的方向图

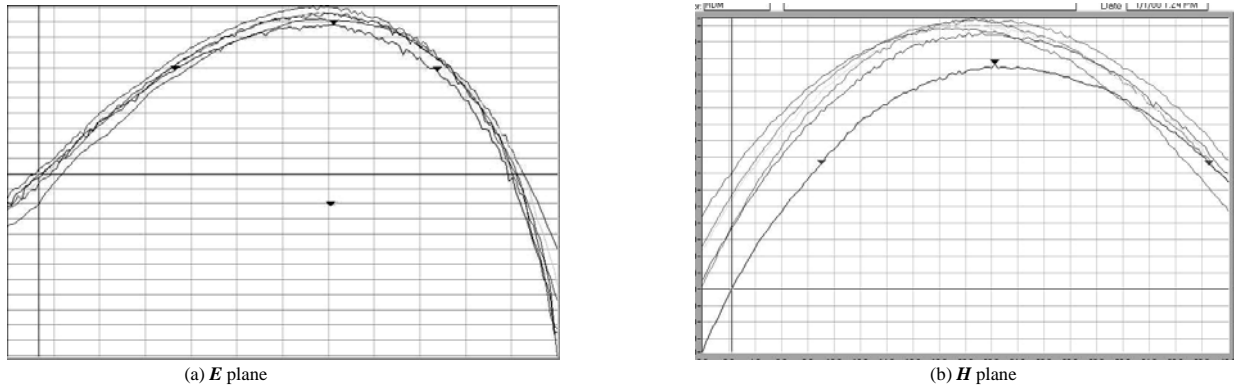


Fig.10 Radiation pattern of scanning angle( $30^\circ, -30^\circ$ )  
图 10 扫描角( $30^\circ, -30^\circ$ )的方向图

#### 4 结论

本文采用旋转矢量法结合最大值法在宽角范围内实现了相控阵的波束扫描，并通过仿真和样机性能测试证明了该方法的有效性。该方法对相控阵天线的宽角校准具有一定的指导意义。

#### 参考文献：

- [ 1 ] Lee J J,Edward M Ferren,Woollen D Pat,et al. Near-field probe used as a diagnostic tool to locate defective elements in an array antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1988,36(6):884-889.
- [ 2 ] 熊旋,王乃彪,焦永昌. 一种实用的相控阵近场诊断新方法[J]. 电波科学学报, 2004,19(5):573-576.
- [ 3 ] 李迪,王华. 中场测量相控阵扫描方向图的方法研究[J]. 现代雷达, 2005,27(7):48-50.
- [ 4 ] Silverstein S D. Application of orthogonal codes to the calibration of active phased array antennas for communication satellites[J]. IEEE Transactions on see also Acoustics,Speech,and Signal Processing, 1997,45(1):206-218.
- [ 5 ] Aumann H M,Fenn A J,Willwerth F G. Phased array antenna calibration and pattern prediction using mutual coupling measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989,37(7):844-850.
- [ 6 ] 贾永康,保铮,吴涸. 一种阵列天线阵元位置、幅度及相位误差的有源校正方法[J]. 电子学报, 1996,24(3):47-52.
- [ 7 ] Yonezawa R,Konishi Y,Chiba I,et al. Beam-shape correction in deployable phased arrays[J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 1999,47(3):482-486.
- [ 8 ] Kojima N,Shiramatsu K,Chiba I,et al. Measurement and evaluation techniques for an air-borne active phased array antenna[C]// IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Boston,MA:[s.n.], 1996:231-236.
- [ 9 ] 阎鲁滨. 相控阵天线幅相校正的简单方法[J]. 航天器工程, 2006,15(4):43-45.

#### 作者简介：



简荣华(1981-), 女, 福建省龙岩市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事天线技术研究与设计工作.  
email:janmy1981@163.com.