旋转矢量法解的二义性及其消除方法

翟 禹 苏东林

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 对旋转矢量法用于相控阵天线校准时的多解问题及其消除方法进行了研究. 采用旋转矢量法对相控阵天线进行校准时会得到两组解,其中一组是伪解. 通过理论推导对旋转矢量法中解的二义性进行了分析,给出了两组解的物理意义;然后通过对求解量进行变换给出了一种基于多轮测试的旋转矢量法解的二义性消除方法;最后通过理论分析和数值仿真对该方法的有效性进行了验证. 结果表明,通过设置多组不同的初始相位分布,进行多轮旋转矢量测试,可有效消除解的二义性,该方法具有可操作性强、对测试系统要求低等优点.

关 键 词: 相控阵;校准;旋转矢量法;二义性

中图分类号: TN 99

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)11-1450-04

Ambiguity of rotating-element electric-field vector method and elimination method

Zhai Yu Su Donglin

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Ambiguity of rotating-element electric-field vector (REV) method for calibration of phased array antenna and the elimination method were studied. Two sets of solutions exist for calibration of phased array antenna using the REV method. And one of sets is pseudo solution. Ambiguity and physical interpretation of solutions were studied by the theoretical analysis. In order to eliminate the ambiguity, a novel method was proposed by the variable substitution based on several tests with different phase distributions. Theoretical analysis and simulated results show that the proposed method can eliminate the ambiguity of the REV method effectively. Furthermore, this method has advantages of high operability and low requirement for test system.

Key words: phased array; calibration; rotating-element electric-field vector; ambiguity

针对相控阵天线幅相不一致性的校准,1982年日本学者 Seji Mano 和 Takashi Katagi 提出了旋转矢量法(REV, Rotating-element Electric-field Vector). 该方法不需要对辐射场的相位进行测量,也不需要附加开关设备,仅利用有源相控阵自身的控制系统进行功率测量即可完成校准,且可用于发射天线的校准[1-3].

由于单个单元信号在阵列信号中所占的比例较小,当阵列规模较大时,旋转矢量法的校准精度会大大降低. 后来提出的分组旋转矢量法(CREV)解决了这一问题,用于大型相控阵天线的校准[4-7].

但是,采用旋转矢量法对相控阵天线进行校准时会得到两组解,而 REV 和 CREV 本身都无法确认哪一组解为真解[8-9]. 为了消除解的二义性,国内外做了多方面的研究,文献[9]对已提出的各种方法进行了总结,给出了三种可能的解决思路.

本文首先通过理论推导对旋转矢量法解的二义性问题进行了分析,给出了伪解的物理意义;然

收稿日期: 2012-05-02; **网络出版时间**: 2012-11-16 11:07

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20121116.1107.001.html

基金项目: 航空科学基金资助项目(2008ZC51044)

作者简介: 翟 禹(1977-),男,天津人,讲师,zhaiyu@buaa.edu.cn.

后对文献[5]中三种消除解的二义性的的思路进行了比较分析,指出了它们的优点和不足之处;最后给出了一种新的消除解的二义性的方法,并进行了仿真验证.

1　旋转矢量法原理

一个阵列的合成电场矢量是各单元电场矢量的叠加. 当其中一个单元的激励相位变化 360° 时,单元电场矢量在矢量坐标中的轨迹为一个圆,合成电场矢量的端点落在这个圆上. 改变移相器的相移,测量合成电场矢量的幅度波动,然后通过数学计算求解该旋转单元的幅度和相位值,这就是 REV 法的原理.

如图 1 所示,合成电场矢量的初始状态用 E_0 和 ϕ_0 表示,第 n 个单元的电场矢量用 E_n 和 ϕ_n 表示. 当第 n 个单元的相位偏移 Δ 时,合成电场矢量为

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

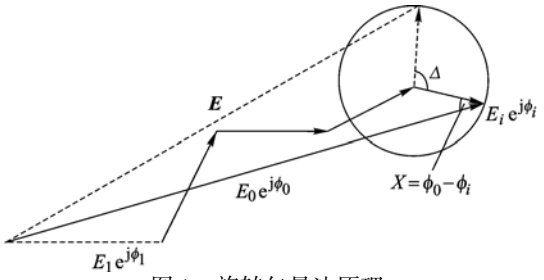

图 1　旋转矢量法原理

定义第 n 个单元的相对幅度和相位为

$$\left.\begin{aligned} k &= \frac{E_n}{E_0} \\ X &= \phi_n - \phi_0 \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

则相对功率可表示为

$$Q = \frac{|\boldsymbol{E}|^2}{E_0^2} = Y^2 + k^2 + 2kY\cos(\Delta + \Delta_0) \tag{3}$$

其中

$$\left.\begin{aligned} Y^2 &= (\cos X + k)^2 + \sin^2 X \\ \tan\Delta_0 &= \frac{\sin X}{\cos X - k} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

可以看出,合成功率 Q 随着单元相位的变化以余弦形式变化,单元相位变化为 $-\Delta_0$ 时 Q 取得最大值. 最大功率与最小功率之比为

$$r^2 = \frac{(Y+k)^2}{(Y-k)^2} = \frac{Q_{\max}}{Q_{\min}} \tag{5}$$

令

$$\Gamma = \frac{r-1}{r+1} \tag{6}$$

可得到如下两组解:

1) 当 $r=\dfrac{Y+k}{Y-k}$ 时

$$\left.\begin{aligned} k = k_a &= \frac{\Gamma}{\sqrt{1+2\Gamma\cos\Delta_0+\Gamma^2}} \\ X = X_a &= \cot\left(\frac{\sin\Delta_0}{\cos\Delta_0+\Gamma}\right) \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

2) 当 $r=-\dfrac{Y+k}{Y-k}$ 时

$$\left.\begin{aligned} k = k_b &= \frac{1}{\sqrt{1+2\Gamma\cos\Delta_0+\Gamma^2}} \\ X = X_b &= \cot\left(\frac{\sin\Delta_0}{\cos\Delta_0+(1/\Gamma)}\right) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

2　解的二义性分析

2.1　解的二义性

由以上推导过程可以看出,在 r 取值符号不同的情况下分别得到了两组解. 对于实际情况而言,只有一组解是正确的,称为真解,另一组解称为伪解. 如果可以判断出 r 的取值符合哪种情况,就可以确定哪一组解是真解. 但是,在实际校准时,通过测量可直接获得的量只有第 n 个单元的相位偏移 Δ 和对应的合成功率 Q,r 的值由下式给出

$$r = \pm\sqrt{\frac{Q_{\max}}{Q_{\min}}} \tag{9}$$

若已知 Y 与 k 的相对大小,则上式中的正负号可与解的判断条件中的正负号对应起来,从而确定出真解. 例如,若已知 $Y>k$,则 $(Y+k)/(Y-k)>0$,当式(9)取正号时第一组解是真解,取负号时第二组解是真解. 但是,由于 Y 与 k 的相对大小未知,因此无法判断哪一组解是正确的.

理论上,当 $Y=k$ 时,r 趋向于正无穷大或负无穷大,此时 $\Gamma=1$,两组解相同.

2.2　伪解的物理意义

将待测的第 n 单元的场矢量称为旋转矢量,而除第 n 单元以外的所有单元的合成场矢量称为固定矢量. 那么,上述两组解的物理意义如下:真解为旋转矢量的相对幅度和相位,伪解为固定矢量的相对幅度和相位. 下面给出证明.

由式(7)和式(8),对于相对幅度,易得

$$\frac{k_a}{k_b} = \Gamma \tag{10}$$

对于相对相位,可以证明

$$\tan(X_a + X_b) = \tan\Delta_0 \tag{11}$$

故

$$\Delta_0 = X_a + X_b \tag{12}$$

1）当 $r=\dfrac{Y+k}{Y-k}$ 时，有 $\Gamma=\dfrac{k}{Y}$. 旋转矢量相对幅度真解为 $k=k_a$，而

$$k_b=\frac{k_a}{\Gamma}=\frac{k}{k/Y}=Y \tag{13}$$

为固定矢量的相对幅度.

由旋转矢量法原理可知，X 实际上是旋转矢量与合成矢量的夹角，而 Δ_0 为旋转矢量与固定矢量的夹角，如图2所示. 从图中可以看出，固定矢量的相对相位 $\theta=\Delta_0-X$. 由于旋转矢量相对相位真解为 $X=X_a$，所以有

$$X_b=\Delta_0-X_a=\theta \tag{14}$$

恰为固定矢量的相对相位.

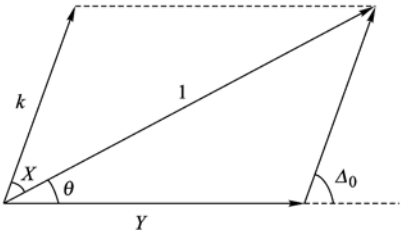

图2 矢量合成示意图

2）当 $r=-\dfrac{Y+k}{Y-k}$ 时，有 $\Gamma=\dfrac{Y}{k}$. 旋转矢量的真解为 $\{k_b,X_b\}$，同理可证，另一组解 $\{k_a,X_a\}$ 恰为固定矢量的相对幅度和相位.

综上所述，无论式(9)中 r 符号如何选，总能得到两组解. 一组解为待测的第 n 单元场矢量的相对幅相，另一组解则为除第 n 单元以外的所有单元的合成场矢量的相对幅相. 但是，单纯依靠上述测量过程无法判断出哪一组解为真解.

3 解的二义性消除方法

文献[9]对目前国内外已提出的消除旋转矢量法解的二义性的方法进行了总结，给出了3种解决思路：

1）在幅度测量的同时，加入对总场相位的测量，在单元相位变化360°过程中，若总场相位变化是小于180°，则选择第一组解作为最终解，否则选第二组解.

2）分别设置两组不同的初始相位分布，进行两轮旋转矢量测试，选择两轮测试中得到的不变的(remain identical)解作为最终解.

3）通过对各单元初始相位的调整，使得对各单元总满足 $k<Y$ 的情况，选择第一组解作为最终解.

第1种方法思路清晰，但需要进行相位测量，丧失了旋转矢量法的最主要优势，在测试场地和测试系统受限的情况下无法实现. 第2种方法可操作性较强，但其论述存在严重的错误. 由式(2)可以看出，旋转矢量法要求解的 k 和 X 实际上是各单元的初始场矢量相对于初始总场的相对幅度和相位. 对于两轮测试而言，各单元的初始相位分布不同，初始总场也就不同，两轮测试得到的真解也会发生变化，因此不存在“不变的解”. 第3种方法需要在旋转矢量法校准之前进行初始校准，实现起来比较麻烦.

本文沿用第2种方法的思路，对求解量进行适当的变换，得到了两轮测试中“不变的解”，从而给出了一种切实可行的解的二义性消除方法.

首先作如下定义：

1）第 n 个单元移相器的相移值为0时的电场矢量幅相用 E_n 和 ϕ_n 表示；

2）第1轮测试时第 n 单元相移值为 $\psi_n^{(1)}$，即初始相位分布为 $\{\phi_n-\psi_n^{(1)}\}$，采用旋转矢量法得到的解记为 $\{k_n^{(1)},X_n^{(1)}\}$；

3）第2轮测试时第 n 单元相移值为 $\psi_n^{(2)}$，即初始相位分布为 $\{\phi_n-\psi_n^{(2)}\}$，采用旋转矢量法得到的解记为 $\{k_n^{(2)},X_n^{(2)}\}$.

对于 $n>1$，定义

$$\left.\begin{aligned}h_n&=\frac{k_n}{k_1}\\Z_n&=(X_n+\psi_n)-(X_1+\psi_1)\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

每轮测试得到的 $\{h_n,Z_n\}$ 有4组解. 当 $\{k_1,X_1\}$ 和 $\{k_n,X_n\}$ 均取真解时

$$\left.\begin{aligned}h_n&=\frac{k_n}{k_1}=\frac{\dfrac{E_n}{E_0}}{\dfrac{E_1}{E_0}}=\frac{E_n}{E_1}\\Z_n&=(X_n+\psi_n)-(X_1+\psi_1)=\\&\quad[(\phi_n-\psi_n-\phi_0)+\psi_n]-\\&\quad[(\phi_1-\psi_1-\phi_0)+\psi_1]=\\&\quad\phi_n-\phi_1\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

此时，h_n 和 Z_n 分别为第 n 个单元的电场矢量相对于第1个单元的归一化幅度和相位，此时 h_n 和 Z_n 与初始总场无关，与初始相位分布无关. 有

$$\left.\begin{aligned}h_n^{(1)}&=\frac{E_n}{E_1}=h_n^{(2)}\\Z_n^{(1)}&=\phi_n-\phi_1=Z_n^{(2)}\end{aligned}\right\} \tag{17}$$

当 $\{k_1,X_1\}$ 或 $\{k_n,X_n\}$ 取伪解时，无法保证上式的成立. 例如，$\{k_1,X_1\}$ 取真解，$\{k_n,X_n\}$ 取伪解，即有

$$\left.\begin{aligned} h_n &= \frac{k_n}{k_1} = \frac{\dfrac{\overline{E}_n}{E_0}}{\dfrac{E_1}{E_0}} = \frac{\overline{E}_n}{E_1} \\ Z_n &= (X_n + \psi_n) - (X_1 + \psi_1) = \\ &\quad [(\theta_n - \phi_0) + \psi_n] - \\ &\quad [(\phi_1 - \psi_1 - \phi_0) + \psi_1] = \\ &\quad \theta_n + \psi_n - \phi_1 \end{aligned}\right\} \tag{18}$$

其中,$\overline{E}_n$ 和 θ_n 分别为除第 n 单元以外的所有单元的合成场的幅度和相位,它们均与初始相位分布有关. 因此,无法保证式(17)成立.

对于 $n=1$,可直接定义

$$\{h_1, Z_1\} = \{1, 0\} \tag{19}$$

以 $\{h_n, Z_n\}$ 代替 $\{k_n, X_n\}$,作为求解量,可以看出,两轮测试各自得到的 4 组解中必然有一组是不变的,这组解就是真解.

需要注意的是,尽管在 $\{k_1, X_1\}$ 或 $\{k_n, X_n\}$ 取错误的解时,无法保证式(17)成立,但是,并不能说明 $\{h_n, Z_n\}$ 的 3 组伪解一定是不同的. 在某些情况下,伪解可能出现恰好相等的情况,给最终解的选取造成困扰. 这个问题可通过多轮测试的方式进行排除.

4　仿真验证

为了对上述方法的有效性进行验证,进行了大量的数值仿真分析. 仿真过程如下:对于 N 元阵列,首先给定一组通道幅相误差,并以第一通道为参考进行归一化处理;然后模拟旋转矢量测试过程,得到求解所需的物理量;再利用上述方法进行求解和解的选择;最后将得到的解与直接归一化处理得到的结果进行对比.

表 1 为一个 8 元阵的一次仿真结果,其中 $h_n^{(0)}$ 和 $Z_n^{(0)}$ 分别为根据给定的幅相误差直接计算得到的归一化幅相值,h_n 和 Z_n 为利用三轮旋转矢量测量得到的结果. 从表中可以看出,采用上述方法得到的解与根据误差直接计算得到的结果具有良好的一致性,消除了解的二义性问题.

表 1　8 元阵仿真结果

n	$h_n^{(0)}$	$Z_n^{(0)}$	h_n	Z_n
1	1	0	1	0
2	1.35	35.00	1.35	34.98
3	0.86	157.00	0.87	157.03
4	0.97	-105.00	0.97	-105.02
5	1.20	23.00	1.20	23.00
6	0.97	78.00	0.97	77.99
7	1.43	-165.00	1.43	-164.97
8	1.25	131.00	1.26	131.04

5　结　论

通过上述分析,可得出以下结论:①采用传统的旋转矢量法可得到两组解. 一组为待测的第 n 单元的场矢量的相对幅相,而另一组解则为除第 n 单元以外的所有单元的合成场矢量的相对幅相. 单纯依靠传统的测量过程无法判断出哪一组解为真解. ②在对求解量进行适当变换的基础上,分别设置多组不同的初始相位分布,进行多轮旋转矢量测试,可消除解的二义性.

参考文献(References)

[1] Mano S, Katagi T. A method for measuring amplitude and phase of each radiating element of a phased array[J]. Electronics and Communication in Japan (IEICE), 1982, 65(5): 58-64

[2] 阎鲁滨. 相控阵天线幅相校准的简单方法[J]. 航天器工程, 2006, 15(4): 43-45
Yan Lubin. A simple calibration method[J]. Space Engineering, 2006, 15(4): 43-45(in Chinese)

[3] 崔卫东,钟华. 基于旋转矢量法的有源相控阵天线中场测量[J]. 现代电子技术, 2011, 34(15): 117-120
Cui Weidong, Zhong Hua. Mid-field testing for active phased array antenna based on rotating-element electric-field vector[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(15): 117-120(in Chinese)

[4] Shitikov A M, Bondarik A V. Multi-element PAA calibration with REV method[C]//IEEE 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT). Crimea, Ukraine: IEEE, 2003: 761-764

[5] 刘明罡,冯正和. 分组旋转矢量法校准大规模相控阵天线[J]. 电波科学学报, 2007, 22(3): 380-384
Liu Minggang, Feng Zhenghe. Combined rotating-element electric-field vector(CREV) method for calibration of phased array antenna[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(3): 380-384(in Chinese)

[6] Liu Minggang, Feng Zhenghe. Combined rotating-element electric-field vector (CREV) method for nearfield calibration of phased array antenna[C]//IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), Guilin, China: IEEE, 2007: 1-4

[7] Takahashi T, Konishi Y, Chiba I. A novel amplitude-only measurement method to determine element fields in phased arrays[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 2012, 60(7): 3222-3230

[8] 方敏. 星载相控阵天线波束校正[D]. 成都:电子科技大学,电子工程学院, 2008
Fang Min. Methods to calibrate phased array antenna of satellite[D]. Chengdu: School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, 2008(in Chinese)

[9] Kojima N, Shiramatsu K, Chiba I. Measurement and evaluation techniques for an airborne active phased array antenna[J]. IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996, 10: 231-236

(编　辑:娄　嘉)