

利用线极化天线快速测量圆极化天线轴比的方法

李南京¹, 冯引良^{1,2}, 王建飞^{1,2}, 党娇娇^{1,2}

(1. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

2. 西北工业大学 电子信息学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 针对轴比测试需要连续旋转线极化天线极化轴, 在高频段旋转关节难以消除高速旋转带来的电缆抖动所引起的幅度和相位不一致性, 提出了一种快速、精确测量圆极化天线轴比的测试方法。基于椭圆极化波的正交分解理论, 该方法利用线极化天线对待测圆极化天线进行两组正交的线极化幅度测量, 通过计算得到圆极化天线的轴比等极化椭圆参数的信息。在此基础上又提出了只用三个线极化分量测量圆极化天线轴比的方法。通过在微波暗室中对圆极化天线进行多次测试, 验证了该方法的有效性。该方法提高了圆极化天线的测试效率, 降低了测试难度, 对于工程应用有重要的应用价值。

关键词: 圆极化天线; 线极化; 正交分解; 轴比

中图分类号: TN821⁺.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2216-05

Fast measuring axial ratio of circular polarization antennas based on linear polarization antenna

Li Nanjing¹, Feng Yinliang^{1,2}, Wang Jianfei^{1,2}, Dang Jiaojiao^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Xi'an 710065, China;

2. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Axial ratio (AR) test requires continuous rotation of polarization axis of linear polarization(LP) antenna, however high-speed rotation of rotary joint brings cable jitter, which causes inconsistencies between amplitude and phase. Since it is difficult to eliminate the jitter at high frequency, a fast and accurate measurement method of the AR of CP antennas was presented. The method, which is based on the orthogonal decomposition theory of elliptically polarized wave, employs LP antenna to measure two groups of orthogonal LP amplitude of the CP antennas under test. Therefore axial ratio of circularly polarized antennas and other parameters of elliptic polarization can be obtained by calculating. And on this basis, an innovative method of measuring the AR of CP antennas using only three linear polarization components was proposed. By measuring CP antennas in an anechoic chamber repeatedly, the method was proved to be effective. This method can increase the efficiency of measuring CP antennas, ease the difficulty level of test, and is of great importance to engineering application.

Key words: circular polarization(CP) antennas; linear polarization(LP); orthogonal decomposition; axial ratio(AR)

收稿日期: 2013-01-13; 修订日期: 2013-02-11

基金项目: 西北工业大学基础基金

作者简介: 李南京(1976-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事天线与散射技术、系统仿真, 微波成像技术等方面的研究。

Email: linanjing76@163.com

0 引言

极化的利用在很早就引起了人们的重视,特别是对圆极化波的利用。圆极化天线的极化波具有抗自然干扰的特性,为了获得最大极化效率,减少干扰,许多卫星通讯系统、点对点通讯系统、雷达系统、导航系统等都采用了圆极化方式^[1-2]。在圆极化天线测试中,需要测量圆极化天线的轴比,以判断圆极化天线的圆极化程度是否达到设计要求。参考文献[3-4]提出了一种用线极化辅助天线在同一极化面内绕旋转轴高速旋转,而被测圆极化天线绕方位轴慢速旋转来测量圆极化天线的方法——旋转源法。该方法只能得到一个截面的近似特性信息,并且旋转关节不能够完全消除,因为高速旋转而带来的电缆抖动所引起的幅度和相位的变化(特别是在高频段,这种现象尤为明显)会给测试带来误差,同时由于标准圆极化天线不易制作,通常也不采用圆极化天线作为辅助天线进行精确测量。参考文献[5]提出了一种基于线圆变换的线极化测试方法。文中在参考文献[5-6]的基础上进行推导分析,提出了一种两组正交线极化分量测量圆极化天线轴比的方法,同时还对该方法做了进一步分析,得到了更为简单的只用三个线极化分量就能对天线轴比进行测量的方法。

1 极化的概念

所谓极化,就是在空间某位置上,沿电磁波的传播方向看去,其电场矢量在空间的取向随时间变化所描绘出的轨迹。如果这个轨迹是一条直线,则称为线极化;如果是一个圆,则称为圆极化;如果是一个椭圆,则称为椭圆极化。图 1 所示为电场矢量取向随时间变化的典型轨迹曲线^[6-7]。由于线极化和圆极化是椭圆极化的特例,椭圆极化波可以分解为两个同频线极化波,也可以分解为两个同频旋向相反的圆极化波,亦可合成为一个椭圆极化波^[8]。极化轴比的定义为极化椭圆长轴与短轴之比,用 AR 表示。 AR 的取值范围为 $1 \leq AR < \infty$, 工程上常用分贝表示: $AR_{dB} = 20 \log AR$ 。当 $AR=1(0 \text{ dB})$ 时为圆极化, $AR=\infty$ 时为线极化。在圆极化天线设计中,轴比是衡量天线圆极化程度的一个重要技术指标,一般要求在方向图主瓣宽度范围内 $AR_{dB} \leq 3 \text{ dB}$ 。通常理想的线极化天线较

容易做到,而理想的圆极化天线很难实现,一般的圆极化天线都表现为椭圆极化。若用一个非理想的圆极化天线来测量圆极化天线参数会带来一定的测量误差,所以要研究用线极化天线测量圆极化天线的参数。

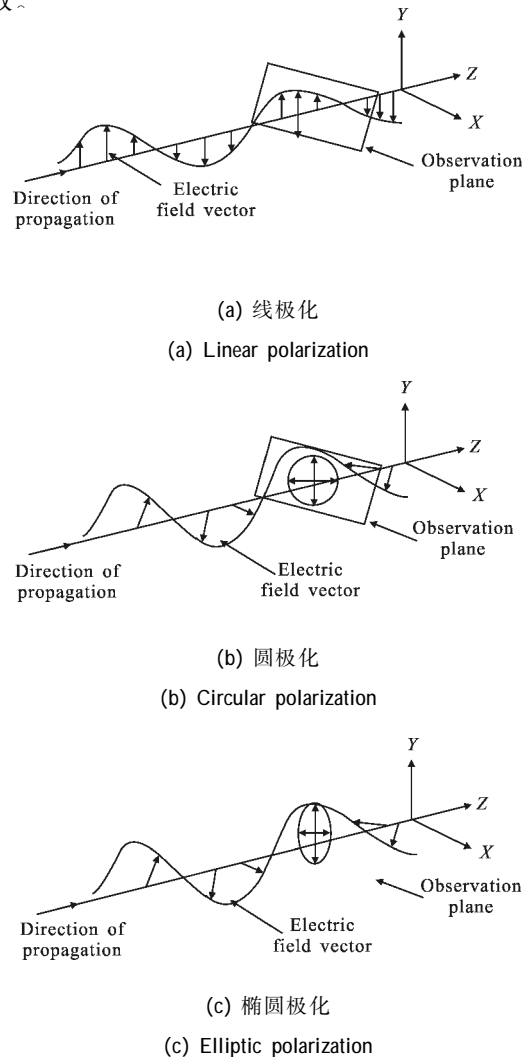


图 1 电场矢量取向随时间变化的典型轨迹曲线

Fig.1 Typical trajectory curves of electric field vector orientation changed with time

2 测量原理

椭圆极化波可以看成两个同频线极化波合成的结果。如图 2 所示,取任意方向的一般椭圆极化波,可分别用沿 x 方向和 y 方向的两项线极化分量来描述。

令水平极化波的瞬时电场为 E_x , 垂直极化波的瞬时电场为 E_y , 它们都是距离和时间的函数:

$$E_x = E_1 \sin(\omega t - kz) \quad (1)$$

$$E_y = E_2 \sin(\omega t - kz + \delta) \quad (2)$$

式中： E_1 为水平极化波的振幅； E_2 为垂直极化波的振幅； δ 为 E_y 超前 E_x 的相位角(水平极化波取为参考相位)。当 $0^\circ < \delta < 180^\circ$ 时, 旋向为左旋; 当 $-180^\circ < \delta < 0^\circ$ 时, 旋向为右旋^[1]。

为了简化, 取在 $z=0$ 的平面分析^[6], 并对两个方程进行合并, 有

$$\frac{E_x^2}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{2E_x E_y \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{E_y^2}{E_2^2 \sin^2 \delta} = 1 \quad (3)$$

方程(3)是个一般化椭圆方程。它表明由 E_x 和 E_y 组合成的电场矢量终端画出的轨迹是一个椭圆, 如图 2 所示。它的长轴和短轴不与 x 轴及 y 轴重合, 其合成电场矢量振幅大小随时间而改变, 这就是椭圆极化波。

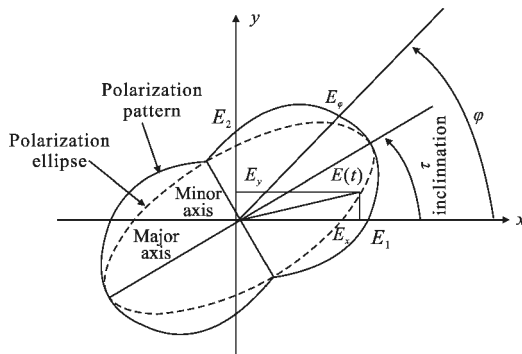


图 2 极化图和极化椭圆

Fig.2 Polarization pattern and polarization ellipse

由参考文献[6]可知, 测量圆极化天线方向性图时, 只需测量待测天线在水平极化电磁波幅度 E_1 和垂直极化状态下的电磁波幅度 E_2 , 然后代入 $E_0 = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$ 中计算 E_0 , 就能得到待测天线的方向性图。

再考虑图 2 所示 xoy 平面中 \vec{E} 在任意方向 φ 的瞬时分量(即投影), 有

$$E_\varphi(t) = E_x \cos \varphi + E_y \sin \varphi \quad (4)$$

根据上述分析可以推得:

$$E_\varphi(t) = E(\varphi) \sin(\omega t + \gamma) \quad (5)$$

其中

$$E^2(\varphi) = (E_1 \cos \varphi + E_2 \sin \varphi \cos \delta)^2 + (E_2 \sin \varphi \sin \delta)^2 = \frac{1}{2} [E_1^2 + E_2^2 + (E_1^2 - E_2^2) \cos 2\varphi + 2E_1 E_2 \sin 2\varphi \cos \delta] \quad (6)$$

E 与 φ 的关系图称为波的极化图, 它给出了电场矢量 E 在 φ 方向的最大投影。因此, $E(\varphi)$ 实际上

就是在 xoy 平面内旋转的线极化天线对 φ 方向的场强响应, 且极化图的最大值和最小值与极化椭圆的最大值和最小值重合。

从图 2 中可以看出, 极化椭圆的长轴与短轴不与坐标轴重合, 以 xoy 坐标系为参考, 建立一组新的坐标系 $x'oy'$, 如图 3 所示。则任一点的坐标可用新坐标表示如下:

$$\begin{cases} x = x' \cos \tau - y' \sin \tau \\ y = x' \sin \tau + y' \cos \tau \end{cases}$$

因此, 电场分量 E_x 和 E_y 可以用新的电场分量 $E_{x'}$ 和 $E_{y'}$ 表示如下:

$$\begin{cases} E_x = E_{x'} \cos \tau - E_{y'} \sin \tau \\ E_y = E_{x'} \sin \tau + E_{y'} \cos \tau \end{cases} \quad (7)$$

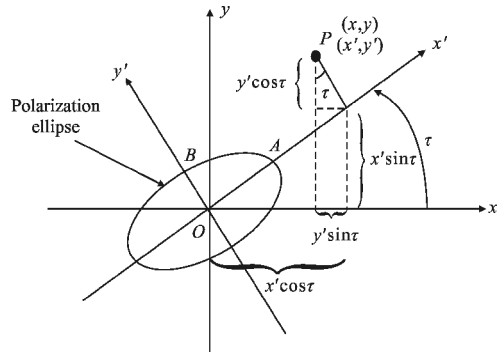


图 3 坐标系变换

Fig.3 Coordinate system transformation

将公式(7)代入公式(3)中可以推得:

$$\begin{aligned} & E_{x'}^2 \left(\frac{\cos^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{\sin^2 \tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} \right) + \\ & E_{x'} E_{y'} \left(\frac{\sin 2\tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} - \frac{2\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} \right) + \\ & E_{y'}^2 \left(\frac{\sin^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} + \frac{\cos^2 \tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} \right) = 1 \quad (8) \end{aligned}$$

公式(8)为新坐标中的一般化椭圆方程。如果椭圆极化波的极化椭圆之长轴和短轴分别与新坐标 x' 、 y' 轴重合, 则 E_x 和 E_y 乘积项的系数应为零, 因此有

$$\frac{\sin 2\tau}{E_2^2 \sin^2 \delta} - \frac{2\sin 2\tau \cos \delta}{E_1 E_2 \sin^2 \delta} - \frac{\sin 2\tau}{E_1^2 \sin^2 \delta} = 0 \quad (9)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2E_1 E_2 \cos \delta}{E_1^2 - E_2^2} \right) \quad (10)$$

$$AR = \frac{\text{长轴}}{\text{短轴}} = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2 \tau + E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \sin^2 \tau}{E_1^2 \sin^2 \tau - E_1 E_2 \sin 2\tau \cos \delta + E_2^2 \cos^2 \tau}} \quad (11)$$

根据上述分析,选取一个极化方向已知、可以在 φ 平面(即极化平面)内转动并且附转动轴上附有精确刻度的线极化天线作为辅助天线。分别测取线极化天线极化方向在 $\varphi=0^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$ 、 $\varphi=45^\circ$ 、 $\varphi=145^\circ$ 时所接收到的场强响应。由公式(6)可知,线极化天线极化方向在 $\varphi=0^\circ$ 和 $\varphi=90^\circ$ 时所接收到的功率分别正比于 E_1^2 和 E_2^2 , 当线极化天线处于 $\varphi=45^\circ$ 和 $\varphi=145^\circ$ 极化方向时, 所接收到的相对功率分别正比于

$$E_\varphi^2(45^\circ) = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos\delta) \quad (12)$$

$$E_\varphi^2(135^\circ) = \frac{1}{2}(E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2\cos\delta) \quad (13)$$

令

$$E_\varphi^2(45^\circ) = E_3^2, E_\varphi^2(135^\circ) = E_4^2 \quad (14)$$

联立公式(12)~(14)可以推得:

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{E_3^2 - E_4^2}{2E_1E_2}\right) \quad (15)$$

将公式(15)代入公式(10)可得待测椭圆极化天线极化椭圆的倾角为:

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{E_3^2 - E_4^2}{E_1^2 - E_2^2}\right) \quad (16)$$

可见, 只要测得线极化天线在极化方向 $\varphi=0^\circ$ 、 90° 、 45° 、 135° 时的相对功率响应就可以通过公式(16)求出待测椭圆极化天线极化椭圆的倾角, 由公式(15)求得其旋向。

由公式(15)和公式(11)可推得轴比计算公式:

$$AR = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2\tau + \frac{1}{2}(E_3^2 - E_4^2)\sin 2\tau + E_2^2 \sin^2\tau}{E_1^2 \sin^2\tau - \frac{1}{2}(E_3^2 - E_4^2)\sin 2\tau + E_2^2 \cos^2\tau}} \quad (17)$$

根据公式(11)、(12)、(14)可进一步推得:

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2}{2E_1E_2}\right) \quad (18)$$

$$\tau = \frac{1}{2} \tan^{-1}\left(\frac{2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2}{E_1^2 - E_2^2}\right) \quad (19)$$

$$AR = \sqrt{\frac{E_1^2 \cos^2\tau + \frac{1}{2}(2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2)\sin 2\tau + E_2^2 \sin^2\tau}{E_1^2 \sin^2\tau - \frac{1}{2}(2E_3^2 - E_1^2 - E_2^2)\sin 2\tau + E_2^2 \cos^2\tau}} \quad (20)$$

由公式(20)可知, 只需进行三次测量就可以计算出圆极化天线的轴比, 称之为“三线法”。

3 实验验证

为了验证该方法的有效性, 根据测试原理, 在微波暗室中利用线极化喇叭天线(图 4)对某圆极化天线(图 5)进行实际测试, 并将测试结果与旋转源方法和参考文献[5]的方法进行了比较。测试频率为 8.5 GHz, 在该频率下旋转源方法的测试结果是可信的。测量角度范围为 $-50^\circ \sim 50^\circ$ 。在相同条件下, 对公式(17)和公式(20)的计算结果进行了比较。



图 4 辅助线极化天线

Fig.4 Auxiliary linear polarization antenna



图 5 待测圆极化天线

Fig.5 Under test circular polarization antenna

图 6 为主极化方向图。可以看出, 该圆极化天线的主瓣宽度为 $-20^\circ \sim 20^\circ$ 。通过图 7 和图 8 中的计算结果比较, 可以证明文中提出的方法是正确、有效的。

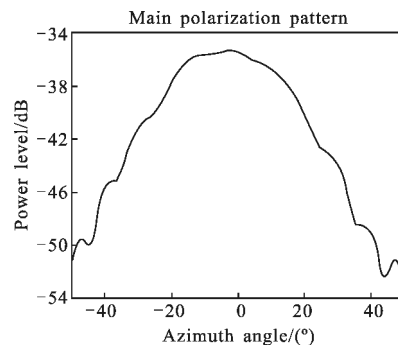


图 6 主极化方向图

Fig.6 Main polarization pattern

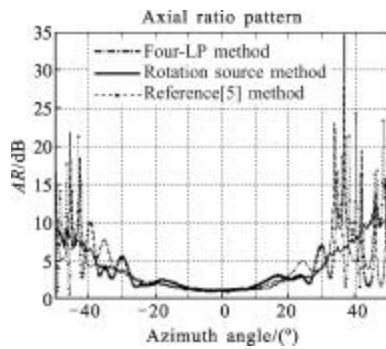


图 7 三种方法计算结果对比图

Fig.7 Three methods results comparison chart

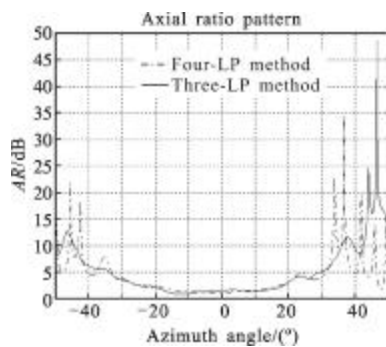


图 8 四线法和三线法计算结果对比图

Fig.8 Four-LP and three-LP method results comparison chart

经过大量实验验证,任意两组正交线极化分量(即四线法)都可以得到在主瓣范围内一致的轴比信息。三线法不一定能够得到一致的轴比信息,所以其具有不稳定性。为了能够得到真实的轴比信息,建议使用四线法进行测量。

4 结论

辅助天线处于静态,减少了不可控制因素的影响,消除旋转关节高速旋转带来的电缆抖动所引起误差,可以得到更加真实可靠的圆极化天线轴比信息。文中依托西北工业大学无人机重点实验室微波暗室设计了一种利用线极化天线来快速、精确测量圆极化天线轴比的方法。通过在微波暗室内的实际测试,表明该方法简单、快速、有效,在工程应用中具有重要的应用价值。

参考文献:

- [1] Mao Naihong, Ju Xinde. Antenna Measurement Manual [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997: 126-135. (in Chinese)
毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1997: 126-135.
- [2] Shang Junping, Fu Demin, Jiang Shuai, et al. Method for measuring the characteristic parameter of the circular polarization antenna [J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(1): 106-110. (in Chinese)
尚军平, 傅德民, 蒋帅, 等. 圆极化天线特性参数测量方法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(1): 106-110.
- [3] Toh B Y. Understanding and measuring circular polarization [J]. IEEE Transactions Education, 2003, 46(3): 313-318.
- [4] Kraus J D, Marhefka R J. Antennas: For All Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 827-873.
- [5] Zhang Xiaoping, Zhou Huai'an. An accurate test method for circular polarized antenna [J]. 2009, 26(1): 67-70. (in Chinese)
张晓平, 周怀安. 一种圆极化天线极化特性的幅度精测方法 [J]. 航天器环境工程, 2009, 26(1): 67-70.
- [6] Guo Jing, Wan Shunsheng. Measuring Method for circular polarization antennas in far field [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009, 46(S): 62-66. (in Chinese)
郭静, 万顺生. 圆极化天线在远场条件下的测试方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2009, 46(S): 62-66.
- [7] Qin Shunyou, Yang Kezhong, Chen Hui. Measuring technique of gain for different polarization antenna [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2003, 17(1): 7-11. (in Chinese)
秦顺友, 杨可忠, 陈辉. 不同极化天线增益测量技术 [J]. 电子测量与仪器学报, 2003, 17(1): 7-11.
- [8] Ling Changlu. Antenna Measurement Techniques [M]. Chengdu: Chengdu Institute of Telecommunication Engineering Press, 1987: 165-169.
林昌禄. 天线测量技术 [M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1987: 165-169.