

## 均匀平面电磁波的极化及基于 HFSS 极化状态的课堂展示

杨俊秀, 赵文来, 鲍 佳

(浙江理工大学信息学院, 杭州 310018)

**摘 要:** 极化是描述电磁波和天线的重要参量之一,是电磁教学中的重要知识点,在卫星广播、雷达、航空航天遥感等领域中有着广泛的应用。介绍电磁波极化这一概念,分析均匀平面电磁波极化的成因,并基于电磁分析软件 HFSS(high frequency simulator structure),呈现了线极化及圆极化波增益图形曲线。课堂中引入仿真图形及数据,增加学生的感性认识及兴趣,使得教学效果得到改善。

**关键词:** 平面电磁波; 极化; 反射损耗; 轴比; 左旋圆极化; 右旋圆极化; 课堂展示

**中图分类号:** G420

**文献标志码:** A

### 引 言

电磁波的极化是电磁波中的一个重要的概念,是电磁波中与频率、振幅和相位并列的四大要素之一,在通信、雷达信号检测、目标识别和抗干扰等方面具有重要的应用价值<sup>[1-2]</sup>。首先,从复数形式的麦克斯韦方程组出发,给出简化的无源自由空间的波动解;其次,简化波动解并简单分析平面电磁波极化的成因;最后,借助 HFSS(high frequency simulator structure)电磁仿真系统,利用图形曲线展示电磁波的极化状态,可形象生动、直观快捷,直接体现各种因素对极化状态的影响,从而有效地加深对该问题的理解<sup>[3-4]</sup>。

#### 一、电磁波极化的成因

一切的电磁问题均可归结为麦克斯韦方程组的解,在均匀无界、无源的自由空间中,整理麦克斯韦方程组的复数形式,得 $\vec{E}$ ,  $\vec{H}$ 满足:

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \\ \nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中  $k^2 = \omega^2 \mu \epsilon$ , 具有与求解机械振动类似的表达,故认为式(1)具有类似机械波的解,称为电磁波。假设电磁波沿  $z$  方向传播,且为横波,则电场  $\vec{E}$  具有如下的表达:

$$\vec{E} = \vec{e}_x \vec{E}_x + \vec{e}_y \vec{E}_y = (\vec{e}_x \vec{E}_{ax} + \vec{e}_y \vec{E}_{ay}) e^{-jkz} = (\vec{e}_x E_{xm} e^{j\varphi_x} + \vec{e}_y E_{ym} e^{j\varphi_y}) e^{-jkz} \quad (2)$$

式(2)中  $E_{xm}$ ,  $E_{ym}$  分别表示电场沿  $x$ ,  $y$  方向各分量的振幅,  $\varphi_x$ ,  $\varphi_y$  表示电场沿  $x$ ,  $y$  方向的初相位,对应时域表达式为:

$$\vec{E} = \vec{e}_x E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x) + \vec{e}_y E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y) \quad (3)$$

式(3)中蕴含,其一,对同一观察点  $z$ , 电场矢量 $\vec{E}$ 在 $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$ 方向的分量  $E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)$ ,  $E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y)$  随时间  $t$  向后延续发生变化,导致合成 $\vec{E}$ 的终端也随时间  $t$  发生变化,将合成 $\vec{E}$ 的终端在  $xoy$  平面投影会形成一定的轨迹;其二,对同一时间  $t$ , 电场矢量 $\vec{E}$ 在 $\vec{e}_x$ ,  $\vec{e}_y$ 方向的分量  $E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)$ ,  $E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y)$  随空间位置  $z$  也发生变化,导致合成 $\vec{E}$ 的终端也随  $z$  发生变化,将合成 $\vec{E}$ 的

收稿日期: 2014-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(1104688-A); 浙江省教育厅项目(13036068-F)

作者简介: 杨俊秀(1976-),女,河南开封人,硕士研究生,主要从事电磁场理论及射频频通信等方面的研究。

通信作者: 赵文来, E-mail: zhwlai@126.com

终端在  $xoy$  平面投影也会形成一定的轨迹,此轨迹即称为极化,一般定义为电磁波传播空间的某点处电场强度矢量  $E$  的末端随时间变化的轨迹,也称为偏振。

对电场矢量  $\vec{E}$ , 设  $E_x = E_{xm} \cos(\omega t - kz + \varphi_x)$ ,  $E_y = E_{ym} \cos(\omega t - kz + \varphi_y)$ , 则  $\vec{E} = \vec{e}_x E_x + \vec{e}_y E_y$ 。设  $z = 0$ , 则:

$$\frac{E_x}{E_{xm}} = \cos(\omega t + \varphi_x) = \cos\omega t \cos\varphi_x - \sin\omega t \sin\varphi_x \quad (4)$$

$$\frac{E_y}{E_{ym}} = \cos(\omega t + \varphi_y) = \cos\omega t \cos\varphi_y - \sin\omega t \sin\varphi_y \quad (5)$$

式(4)两边同乘  $\cos\varphi_y$ , 然后减去式(5)两边同乘  $\cos\varphi_x$  得:

$$\begin{aligned} \frac{E_x}{E_{xm}} \cos\varphi_y - \frac{E_y}{E_{ym}} \cos\varphi_x = \\ \sin\omega t (\sin\varphi_y \cos\varphi_x - \sin\varphi_x \cos\varphi_y) = \sin\omega t \sin(\varphi_y - \varphi_x) \end{aligned} \quad (6)$$

式(4)两边同乘  $\sin\varphi_y$ , 然后减去式(5)两边同乘  $\sin\varphi_x$  得:

$$\begin{aligned} \frac{E_x}{E_{xm}} \sin\varphi_y - \frac{E_y}{E_{ym}} \sin\varphi_x = \\ \cos\omega t (\cos\varphi_x \sin\varphi_y - \sin\varphi_x \cos\varphi_y) = \cos\omega t \sin(\varphi_y - \varphi_x) \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)两边平方, 然后加上式(7)两边平方, 同时设  $\Delta\varphi = \varphi_y - \varphi_x$  得:

$$\left(\frac{E_x}{E_{xm}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{ym}}\right)^2 - 2\frac{E_x}{E_{xm}}\frac{E_y}{E_{ym}}\cos\Delta\varphi = \sin^2\Delta\varphi \quad (8)$$

结合  $\vec{E} = \vec{e}_x E_x + \vec{e}_y E_y$ , 式(8)表明任意时刻在  $xoy$  平面上,  $E_x, E_y$  为某一椭圆上的点, 故合成轨迹为椭圆。且当  $\Delta\varphi, E_{xm}, E_{ym}$  满足特殊关系时,  $E_x, E_y$  在  $xoy$  平面上合成为特殊的线或圆, 如果电场矢量在空间描出的轨迹是一条直线, 称为线极化波; 描出的轨迹是圆, 称为圆极化波; 描出的轨迹是椭圆, 称为椭圆极化波。有关线极化、圆极化、椭圆极化及相互之间的关系与转化, 相关教材及论文中均可参考<sup>[5-6]</sup>。

一般教材都是运用上述数学推导判断极化方式的, 学生的意识停留在空间电场在  $xoy$  平面上的分布决定了极化的方式, 而空间电场有激励天线及馈电装置决定, 即特定频率下, 空间电磁波的极化由天线的形状、尺寸及馈电方式决定。下面将借助有限元分析软件 HFSS, 通过图形曲线描述线极化可分解为左右旋圆极化, 然后天线尺寸及馈电点改变可产生圆极化波, 如此, 在数学抽象的解析指导下, 通过图形图像将使极化更加直观、生动, 增加学生对极化的认识与理解, 相应的也可提

高教学效果。

## 二、基于 HFSS 的极化状态展示

电磁波极化理论表明, 线极化波可分解为右旋、左旋圆极化波的叠加, 下面基于 HFSS, 通过仿真曲线验证。设系统输入端口为 1, 由于天线与传输线特征阻抗不匹配会造成加到传输线的功率不能全部被天线吸收,  $S(1, 1)$  即表征了系统入射端口的损耗, 也称为反射损耗或回波损耗, 分贝表示为  $\text{dB}(S(1, 1)) = 20 \lg |S(1, 1)|$ , 设计了某一线极化微带天线, 谐振频率为 2.45 GHz, 回波损耗  $\text{dB}(S(1, 1))$  随频率的变化曲线如图 1 所示。

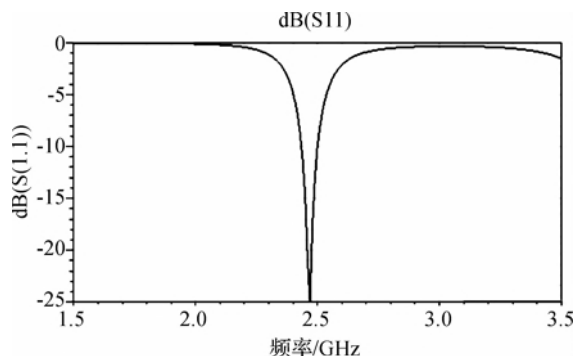


图 1  $\text{dB}(S(1, 1))$  随频率的变化曲线

由图 1 可看出, 当频率为 2.45 GHz 左右时,  $\text{dB}(S(1, 1))$  最小, 即在此频率点, 天线输入阻抗与馈线阻抗匹配, 达到尽可能大的传输效率。且在此频率点, 垂直方向天线轴比与频率的关系曲线如图 2 所示。

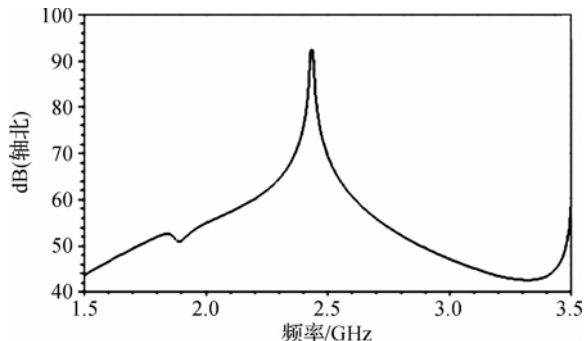


图 2  $xoz$  平面轴比随频率的关系

线极化一般不讨论轴比的概念, 由图 2 可看出, 当频率为 2.45 GHz 左右时, 描述椭圆极化的长短轴的轴比达到 92 dB, 表明在此频率点若把极化波看作椭圆的话, 长轴与短轴的比值约为无穷大, 即天线辐射出来的为线极化波。为证实线极化波可分解为同幅度的左右旋圆极化波, 给出了频率为 2.45 GHz,  $\phi$  在  $90^\circ$  及  $0^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆

增益的关系曲线,如图 3、图 4 所示。

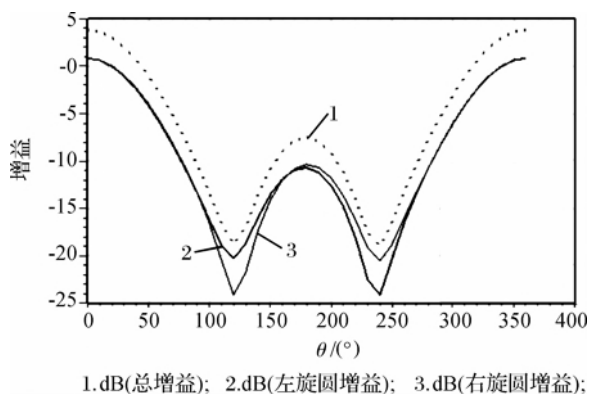


图 3  $\phi=90^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆极化波增益的关系曲线

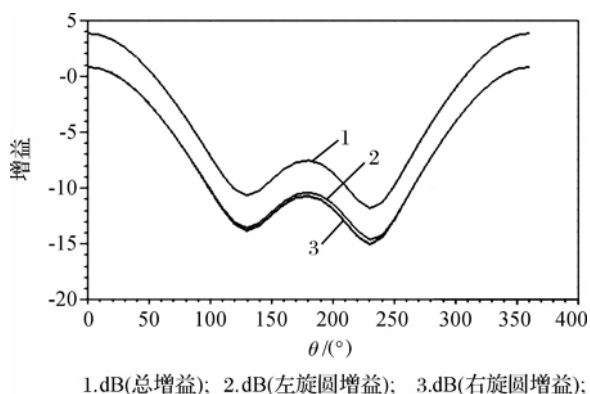


图 4  $\phi=0^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆极化波增益的关系曲线

由图 3、图 4 可看出当频率为 2.45 GHz 时,天线分解为左右旋圆极化波时,其增益相似且与总增益变化曲线一致,即表明线极化波可分解为参数相同的左右旋圆极化波的叠加。

要得到圆极化波,需要激励两个极化方式正交的线极化波,且线极化波幅度相等,相位相差  $90^\circ$ ,微带天线要获得圆极化波,可通过馈电点的特殊设计实现。下面给出一单点馈电的圆极化矩形微带天线,谐振频率为 1.59 GHz 左右, dB(S(1,1)) 随频率的变化曲线如图 5 所示<sup>[7]</sup>。

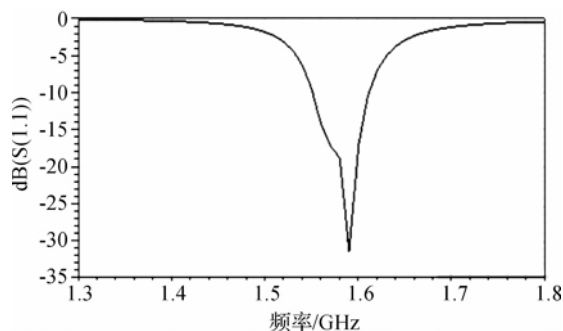


图 5 dB(S(1,1)) 随频率的变化曲线

且在此频率点,垂直方向天线轴比与频率的关系曲线如下图 6 所示。

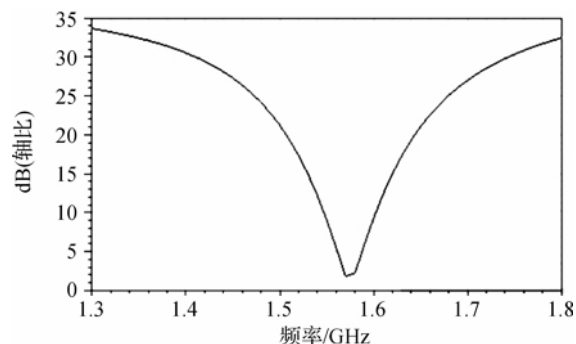


图 6  $xoz$  平面轴比随频率的关系

由图 6 可看出,当频率为 1.59 GHz 左右时,描述椭圆极化的长短轴的轴比达到最小,表明在此频率点椭圆长轴与短轴相差不大,即天线辐射波近似为圆极化波。为观察该圆极化波属于左旋还是右旋,给出频率为 1.59 GHz,  $\phi$  在  $0^\circ$  及  $90^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆极化波增益的关系曲线,如图 7、图 8 所示。

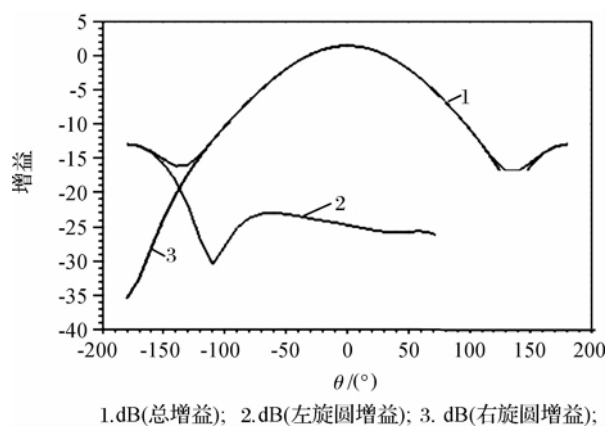


图 7  $\phi=0^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆极化波增益的关系曲线

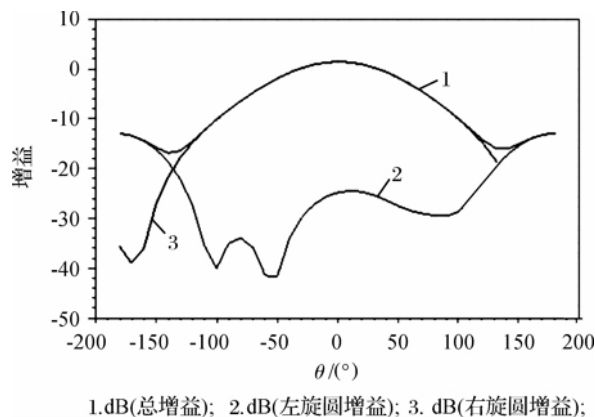


图 8  $\phi=90^\circ$  方向上天线总增益与左右旋圆极化波增益的关系曲线

由图7、图8可看出,在 $\phi=0^\circ$ 及 $\phi=90^\circ$ 方向上天线总增益与右旋圆极化波变化曲线一致,即表明该天线辐射右旋圆极化波。

### 三、结 语

电磁波极化在卫星广播、雷达、航空航天遥感等领域中有着广泛的应用,线极化的电磁波能用具有相同极化方式的线极化天线接收,而采用与发射天线极化方式垂直的接收天线则几乎没有能量可以获得;为提高天线的接收效果,无线通信中多采用圆极化天线进行发射与接收。课堂中为增加学生对极化的感性认识及兴趣,借助 HFSS 电磁仿真软件,利用图形曲线展示电磁波的极化状态,同时基于仿真软件的即时性,可增加不同因素对极化状态的影响效果,使得极化变得不再只是概念与公式,改善电磁

场与电磁波教学效果。

### 参考文献:

- [1] 张建华,黄 冶. 电磁波极化和天线极化的教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(4): 111-114.
- [2] 胡 云. 均匀平面电磁波极化的应用研究[J]. 大学物理, 2012, 31(12): 38-41.
- [3] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高教出版社, 2009.
- [4] 郭冰莹. 电磁波极化状态的计算机展示[J]. 广州师院学报, 1999, 21(11): 39-41.
- [5] 刘军民, 林相波. 平面电磁波极化方式的分析与判断[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(1): 95-97.
- [6] 梁昌洪, 陈 曦. 电磁波极化及其应用[J]. 电气电子教学学报, 2011, 33(3): 1-5.
- [7] 李明洋, 刘 敏, 杨 放. HFSS 天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

## Polarization of Uniform Plane Electromagnetic Wave and Polarized State Display in Class Based on HFSS

YANG Jun-xiu, ZHAO Wen-lai, BAO Jia

(Zhejiang Sci-Tech University, Institute of information, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** As one of significant parameters to describe electromagnetic wave and antenna, polarization is an important knowledge point in electromagnetic teaching. And it is widely used in the fields of satellite radio, radar, aerospace remote sensing and etc. Concept of electromagnetic wave polarization is introduced in this paper firstly. Then, polarization factor of uniform plane electromagnetic wave is analyzed. Based on electromagnetic analysis software HFSS, gain graph curves of linear polarized waves and circular polarized waves are presented. The introduction of simulation graphics and data in the classroom will increase perceptual cognition and interest of students and improve teaching effects.

**Key words:** plane electromagnetic wave; polarization; reflection loss; axial ration; LHCP; RHCP; class display

(责任编辑: 陈和榜)