

文章编号 1005-0388(2009)02-0293-04

论天线收发方向图的非互易性

束咸荣 何炳发

(天线与微波技术国防重点实验室, 南京电子技术研究所, 江苏 南京 210013)

摘要 由电磁场互易原理得到的待测天线(AUT)幅度接收方向图(ARP)和发射方向图(ATP)相等的结论, 具有易于被忽视的重要前提。对极化电磁波接收所作的深入分析表明, 一般情况下, 上述结论不成立。由于在 ARP 和 ATP 测试并形成过程中, AUT 面临着自身和检验天线的各异收、发极化失配状态, 受到不同的空间极化滤波影响。通常, ARP 和 ATP 有差别, 即同一个 AUT 的收、发方向图非互易。论文的分析还得到, 线极化和圆极化 AUT 方向图不失真的简洁、正确测试方法。

关键词 互易原理; 天线收、发方向图; 电磁波接收; 极化匹配因子; 方向图不失真测试方法

中图分类号 TN820.1⁺2

文献标志码 A

On non-reciprocity between received and transmitting patterns of antenna

SHU Xian-rong HE Bing-fa

(Nation Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210013, China)

Abstract Conclusion that amplitude received pattern(ARP) and transmitting pattern(ATP) of an antenna under test(AUT) are equally are obtained from the electromagnetic field reciprocity principle has premises that are easily ignored. Analysis on reception of polarization electromagnetic wave shows that the above conclusion can not form. During the course of ARP and ATP being tested and formed, the AUT is faced with reception and transmittal different polarization matching states of one self and testing antenna. Generally they are different, namely the received and transmitting pattern of AUT are non-reciprocal. Lastly, succinct and correct testing methods for pattern of line and circular polarization AUT are given.

Key words reciprocity principle; ARP/ATP; electromagnetic wave reception; polarization matching factor; undistorted testing method of pattern

引言

互易原理是根据 Maxwell 方程, 经严格数学证明得到的电磁场基本规律。作为源和场之间激励和响应关系的 Rayleigh-Carson(R-C)互易引理的应用, 人们从处理标量参数的电路观点得到了同一个

待测(AUT)天线的幅度接收方向图(ARP)和发射方向图(ATP)相等的结论。事实上, 这一结论的正确性基于源和场存在空间的媒质为线性、无源和各向同性的假设(这些假设保证, 媒质中传播的电磁波极化取向不至改变)。除此之外, 还有易于被人们忽视的重要前提。文献[1][2]在介绍 R-C 互易引理

的这一应用时,作了 AUT 和检验天线须极化匹配笼统而原则的假设;文献[3]在叙述 ARP 和 ATP 互易时,提到这一结论适用于接收的电磁场为一特定极化分量的限定;文献[4]在转述 ARP 和 ATP 互易的验证时,设置了检验天线为全向天线的约束。经分析,正是这些假设尚未考虑或掩盖了电磁场矢量特性引发的 ARP 和 ATP 之间的差别。任何电子设备的性能参数在频域都有带宽特性,即“频响”。我们将在极化域,讨论 AUT 接收和发射的矢量特性及电磁波极化在空间的失配及其对 AUT 收、发方向图形成的加权和调制影响。

以往得到的 AUT ARP 和 ATP 相等,是以电路的观点和标量的方式粗略处理具有矢量特性电磁场的结果。极化电磁波接收的深入分析表明,有确定极化的检验天线,使有特定极化 AUT 的 ARP 和 ATP 受有差别的空间极化滤波影响,经各异空间函数的附加调制,因而有不同的数学表示。这反映了,用描述标量参数“路”的观点和方法,分析具有矢量特性“场”的局限。为此,论文分析了空间极化滤波效应对 AUT 方向图的动态影响,给出了 AUT 和检验天线各种收、发工作状态和极化失配情形,对 AUT 方向图影响的数学表示,得到同一 AUT 的 ARP 和 ATP 在极大多数情况下都不相等,即天线收、发方向图互易性不成立的结论。

1 极化电磁波的接收

空间的极化滤波效应使平面电磁场中的细直天线,仅对与自身导线相切的电场分量有响应。因此,矢量有效长度为 h 的细直 AUT A,在 Jones 矢量为 E 的平面电磁场中感应的开路电压 V 为^[5]

$$V = E \cdot h \quad (1)$$

若 e 为电场 E 的单位矢量, h 和 τ 分别为天线 A 的标量有效长度和电流方向的单位矢量,则

$$V = E h e \cdot \tau \quad (2)$$

于是在极化域,AUT 接收平面电磁波能量的极化效率即极化匹配因子 p 可以定义为

$$p = |e \cdot \tau^*|^2 \quad (3)$$

式中, τ^* 为 τ 的共轭。显然, $0 \leq p \leq 1$, $p = 1$ 为极化完全匹配, $p = 0$ 为极化完全失配, p 是空间方向 (θ, φ) 的函数。

根据 Friis 传输公式,天线接收的信号功率 P_r 为^[2]

$$P_r = p \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \cdot (1 - |\Gamma_r|^2) \cdot (1 - |\Gamma_t|^2) \cdot$$

$$G_r(\theta_r, \varphi_r) \cdot G_t(\theta_t, \varphi_t) \cdot P_t \quad (4)$$

上式表明,AUT 与检验天线的极化匹配因子 p ,参与并影响 AUT 全空域的功率接收。收、发极化匹配因子不同,将导致 AUT 收、发状态空间功率分布的区别,使其的收、发方向图不等。

处于收、发状态的 AUT,测试方向图受极化失配影响的情形可由图 1 说明。在 $o-yz$ 平面中,设直线 A 的相位中心位于坐标原点 o ,方向图测试的某一时刻,A 的极化单位矢量 $\tau(\theta)$ 由 y 轴转至 θ 角。假设位于 $o-yz$ 平面,相位中心为 $(0, z_1)$ 的直线检验天线 A_1 的极化单位矢量 τ_1 与 y 轴平行, A_1 与 A 相距的 r 大于各自的远区。

考察 A 受激并作发射时的自身方向图测试(见图 1(a))可以发现,无论 A 在 $o-yz$ 平面旋转至任何方位 θ ,作接收的检验天线 A_1 处,A 的辐射场极化单位矢量 e 始终与 A_1 也即与 y 轴平行。因此在极化域,A 的发射极化匹配因子 P_T 为

$$P_T = |e \cdot \tau_1^*|^2 \equiv 1 \quad (5)$$

即,A 的 ATP 不受空间极化滤波的影响。

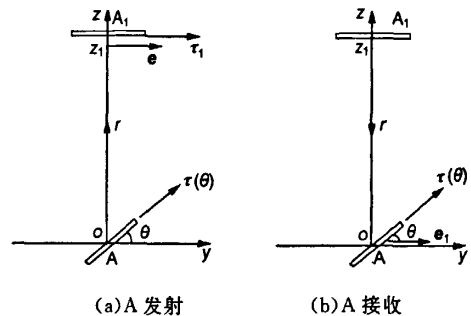


图 1 极化失配对 AUT 收、发方向图的影响

A 作接收时,设检验天线 A_1 以同频发射,且保持上述 r 不变。方向图测试中,若 A 的极化单位矢量 $\tau(\theta)$ 与 y 轴成 θ 角,而这时用作发射的检验天线 A_1 在 A 处的辐射场极化单位矢量为 e_1 ,按电波传播原理, e_1 应与 y 轴平行,而与 A 的轴线成 θ 角。于是在极化域,待测天线 A 的接收极化匹配因子 $P_R(\theta)$ 为

$$P_R(\theta) = |e_1 \cdot \tau^*(\theta)|^2 \leq 1 \quad (6)$$

即,A 的 ARP 受极化滤波的影响,且是空间方向 θ 的函数。

上述分析表明,由于收、发极化匹配因子的差异,致使 AUT 的 ARP 与 ATP 因不同的空间极化滤波效应而存在着区别。

考虑到 AUT 收、发方向图测试时极化匹配因子的上述差别,文献[1]中的式(4.119)

$$\int_{V_A} \mathbf{J}_{A_0}^{(1)} \cdot \mathbf{E}_{A_0}^{(2)} dv + \int_{V_B} \mathbf{J}_{B_0}^{(1)} \cdot \mathbf{E}_{B_0}^{(2)} dv \\ = \int_{V_B} \mathbf{J}_{B_0}^{(2)} \cdot \mathbf{E}_{B_0}^{(1)} dv + \int_{V_A} \mathbf{J}_{A_0}^{(2)} \cdot \mathbf{E}_{A_0}^{(1)} dv \quad (7)$$

一般不能表示成文中的式(4.120)

$$I_{A_0}^{(1)} U_{A_0}^{(2)} + I_{B_0}^{(1)} U_{B_0}^{(2)} = I_{B_0}^{(2)} U_{B_0}^{(1)} + I_{A_0}^{(2)} U_{A_0}^{(1)} \quad (8)$$

要得到式(4.120),应有严格的限定条件,而上式恰是 AUT 之 ARP 和 ATP 相等的依据。

因而通常不能断言,同一副天线作为发射用时的方向性函数与它作为接收用时的方向性函数相同。

同样,文献[3]由互易引理在作了特定假设后得到, AUT 接收时的电流和来波电场之间的关系,与它用作发射时的电流和电场强度关系的形式相同,即

$$I = i \frac{\lambda r}{60\pi} \cdot \frac{EAF(\theta, \phi)}{Z_H + Z_a} \quad (9)$$

但是,鉴于电磁波极化滤波赋予 AUT 的空间选择性,式(9)中 AUT 发射时的电场强度 E 应为: $E_T = \mathbf{E}_1 \cdot \boldsymbol{\tau}_2 = |\mathbf{E}_1|$, 而该天线接收时的电场强度 E 应为: $E_R = \mathbf{E}_2 \cdot \boldsymbol{\tau}_1(\theta)$ 。显然,由于 $E_T \neq E_R$, 因此上式中的 $F_R(\theta, \phi) \neq F_T(\theta, \phi)$, 即天线的 ARP 和 ATP 不互易。

2 理论分析

本节将从更普遍的情形,分析各种线极化和左右旋圆极化 AUT 收、发极化匹配因子的异同及其对 ARP 和 ATP 产生的附加调制。为此,在 A 的相位中心建立本地坐标系 $o-x'y'z'$ 。方向图测试开始前,使 $o-x'y'z'$ 与 $o-xyz$ 重合, A 的法线方向为 \mathbf{k}' 。假设位于 $o-x'y'$ 平面内的 A 的极化单位矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 为

$$\boldsymbol{\tau} = \xi \mathbf{i}' + \eta \mathbf{j}', |\xi|^2 + |\eta|^2 = 1 \quad (10)$$

则, A 绕 x 轴在 $o-yz$ 平面旋转作方向图测试时的 $\boldsymbol{\tau}$ 应为

$$\boldsymbol{\tau}(\theta) = \xi \mathbf{i} + \eta \cos \theta \mathbf{j} + \eta \sin \theta \mathbf{k} \\ - \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \quad (11)$$

式中, θ 为 A 的法向与 z 轴的夹角。

设相位中心在 $(0, 0, z_1)$ 处检验天线 A_1 的极化单位矢量 $\boldsymbol{\tau}_1$ 为

$$\boldsymbol{\tau}_1 = \xi_1 \mathbf{i} + \eta_1 \mathbf{j}, |\xi_1|^2 + |\eta_1|^2 = 1 \quad (12)$$

于是可以得到,线极化和圆极化 A 在下述所有情形中的收、发极化匹配因子 P_r, P_t 。

2.1 待测天线 A 为线极化

1) A 为垂直极化,即 A 的极化单位矢量 $\boldsymbol{\tau}$ 垂直于 xy 平面

于测试面 $o-yz$, 这时 $\xi = 1, \eta = 0$ 。讨论:

(1) 检验天线 A_1 与 A 共极化, 即 $\xi_1 = 1, \eta_1 = 0$;

(2) A_1 为 A 的正交极化, 即 $\xi_1 = 0, \eta_1 = 1$ 。

2) A 为平行极化, 即 A 的 $\boldsymbol{\tau}$ 位于测试面 $o-yz$ 内, 这时 $\xi = 0, \eta = 1$ 。讨论:

(1) A_1 与 A 共极化, 即 $\xi_1 = 0, \eta_1 = 1$;

(2) A_1 为 A 的正交极化, 即 $\xi_1 = 1, \eta_1 = 0$ 。

3) A 为 $\pm 45^\circ$ 斜极化, 即 $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$ 。讨论:

(1) A_1 与 A 共极化, 即 $\xi_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta_1 = \pm \frac{\sqrt{2}}{2}$;

(2) A_1 为 A 的正交极化, 即 $\xi_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta_1 = \mp \frac{\sqrt{2}}{2}$;

(3) A_1 为垂直极化, 即 $\xi_1 = 1, \eta_1 = 0$;

(4) A_1 为平行极化, 即 $\xi_1 = 0, \eta_1 = 1$ 。

2.2 待测天线 A 为圆极化

A 为左、右旋圆极化, 即 $\xi = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{i}$ 。讨论:

(1) 检验天线 A_1 与 A 共极化, 即 $\xi_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta_1 = \pm \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{i}$;

(2) A_1 为 A 的正交极化, 即 $\xi_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}, \eta_1 = \mp \frac{\sqrt{2}}{2} \mathbf{i}$;

(3) A_1 为垂直极化, 即 $\xi_1 = 1, \eta_1 = 0$;

(4) A_1 为平行极化, 即 $\xi_1 = 0, \eta_1 = 1$ 。

上述 24 种情形, 待测天线 A 的接收和发射极化匹配因子 P_r, P_t 的表示式汇于表 1。

3 结论

现代天线测试技术赋予我们, 可以通过扫频的方式, 得到 AUT 若干频点的多个方向图。但一幅方向图通常是 AUT 单色电磁波辐射特性的表述。一个单色电磁波可以在空间、频率、幅度、相位和极化等五个定义域中被完整描述和唯一确定。采用标量参数“路”的观点和方法, 在缺少矢量信息-极化的条件下, 分析得到 ARP 和 ATP 相等的结论, 尚没有也不可能充分反映, 矢量电磁波接收的空间极化滤波效应对 AUT 方向图的附加影响和调制。在极化域, 对电磁波收、发极化失配状况所作的数学分析表明, AUT 的 ARP 和 ATP 在有确定极化的检验

天线合作下,有各异的极化匹配因子,受与空间不同函数的调制。因此,同一个天线收、发方向图(ARP、ATP)的互易性不成立。结合表 1,可以得出以下结论:

表 1 待测天线的收、发极化匹配因子 P_r 、 P_t

待测天线极化	检验天线极化	待测天线极化匹配因子	
		(接收) P_r	(发射) P_t
垂直极化	共极化	1	1
	正交极化	0	0
平行极化	共极化	$\cos^2 \theta$	1
	正交极化	0	0
±45°斜极化,左右旋圆极化	共极化	$\frac{1}{4}(1 + \cos \theta)^2$	$\frac{(1 + \cos \theta)^2}{2(1 + \cos^2 \theta)}$
	正交(交叉)极化	$\frac{1}{4}(1 - \cos \theta)^2$	$\frac{(1 - \cos \theta)^2}{2(1 + \cos^2 \theta)}$
	垂直极化	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{1 + \cos^2 \theta}$
	平行极化	$\frac{1}{2} \cos^2 \theta$	$\frac{\cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}$

1)上述 24 种情形中仅有一例,即待测天线 A 的极化垂直于测试面,且检验天线与之共极化时, A 用作接收和发射时的极化匹配因子相等,也即待测天线 A 的收、发方向图才相等。这时在测试面内, A 等效为点源或由其组成的阵列。这与由 R-C 互易引理得到的同一个天线收、发方向图相等时所作的假设相符,但这些假设只能得到如此的平凡解。

2)待测天线 A 为垂直极化或平行极化,检验天线 A_1 的极化与 A 正交时, A 的收、发极化匹配因子为零。这种天线之间的“零响应”即为电子对抗、电磁兼容、目标识别和天线隐身领域可资利用的极化隔离和分集技术。但, ±45°斜极化和左、右旋圆极化的待测天线不具有上述特质。

3)除上述第 1 种特殊又显见的情形和第 2 种“零响应”外,一个待测天线无论何种极化,无论用作接收还是发射,因受不等的空间极化匹配因子加权和调制,有不同的接收和发射方向图,体现出同一个天线收、发方向图的非互易性。

4) ±45°斜极化和左、右旋圆极化两类待测天线,有相同的接收和发射极化匹配因子。但是,它们不仅因待测天线用作接收或发射时有差别,而且也因检验天线的极化状态不同而各异,同时还是空间方向的函数。这进一步证明,同一个天线收、发方向图的非互易性。

除此以外,表 1 还揭示了,线极化和圆极化天线

方向图不失真而又未引起人们充分注意的正确而简洁的测试方法:

1)水平极化的待测天线 A,仅在自身作发射,检验天线 A_1 与之共极化并作接收的情形下, A 的幅度方向图才不失真。而 A 作接收时,测得的功率方向图将受 $\cos^2 \theta$ 的调制。

2) ±45°斜极化和左、右旋圆极化两类待测天线 A,仅在自身作接收,检验天线 A_1 取垂直极化并作发射的情形下, A 的归一化幅度方向图才不失真(尽管功率处处有 3 dB 的恒定损失)。工程上,这两类天线方向图的提取,不必采用分别测试它们两个正交平面的方向图然后作矢量合成,或其他陈旧而繁琐的方法。

参考文献

- [1] 吕维保,王贞松. 无线电波传播理论及其应用[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [2] COLLIN R E. 天线与无线电波传播[M]. 王百锁,等译. 大连:大连海运学院出版社,1988.
- [3] 爱尔堡. 超高频天线[M]. 汪茂光,等译. 北京:人民邮电出版社,1980.
- [4] KONG Jin Au. 电磁波理论[M]. 吴季,译. 北京:电子工业出版社,2003.
- [5] 庄钊文等. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.
- [6] 束咸荣,何炳发,高 铁. 相控阵雷达天线[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

束咸荣 (1943—),男,江苏人,南京电子技术研究所研究员。复旦大学数学系毕业,合作著书三部,发表论文六十余篇,研究方向为相控阵雷达天线与微波技术。



何炳发 (1963—),男,湖北人,南京电子技术研究所研究员。西安电子科技大学毕业,合作著书二部,译书一部,发表论文四十余篇,研究方向为相控阵雷达天线与微波技术。



如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深, 让许多工程师望而却步, 然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上, 我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识, 借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养, 推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程, 化繁为简, 直观易学, 可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛, 让天线设计不再难...



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书, 课程从基础讲起, 内容由浅入深, 理论介绍和实际操作讲解相结合, 全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程, 可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计, 让天线设计不再难...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程, 由经验丰富的专家授课, 旨在帮助您从零开始, 全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程, 边操作边讲解, 直观易学; 购买套装同时赠送 3 个月在线答疑, 帮您解答学习中遇到的问题, 让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程, 培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合, 全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作, 同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习, 可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试...

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训：

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势：

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们：

- ※ 易迪拓培训官网：<http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网：<http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店：<http://shop36920890.taobao.com>