

典型抛面天线的空域极化特性及散射矩阵测量方法

戴幻尧 罗佳 李金梁 李永桢 王雪松

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 单极化雷达天线的极化特性在空域中并非一成不变, 而是按一定规律变化的。本文研究了抛面反射天线的空域极化特性, 通过数值计算验证了天线极化状态在不同空域指向上的分布规律。并以此为基础, 讨论了立足于现有的单极化雷达, 仅需一个极化通道对天线接收到雷达回波电压进行处理, 完成雷达目标极化散射矩阵估计的方法。该法将可以大幅度的降低生产成本和设备复杂度, 具有一定的理论参考价值和应用前景。

关键词: 抛面反射天线; 空域极化特性; 交叉极化分量; 极化比; 目标散射矩阵测量

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2009)09-1347-06

Polarization Scattering Matrix Measurement Based on Spatial Polarization Characteristic of Typical Parabolic Antenna

DAI Huan-yao LUO Jia LI Jin-liang LI Yong-zhen WANG Xue-song

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, 410073, China)

Abstract: The polarization properties of single polarized radar antenna in spatial is not static but change with some law which defined as spatial polarization characteristics (SPC). The SPC of parabolic antenna is studied thoroughly at first. The distribution law of polarization states in different pointing space is obtained by numerical calculation and verified with simulation. Based on the SPC of typical reflector antenna, a novel PSM measurement methods which need only one polarization channel to process the received radar target's echo is proposed. Furthermore, this novel approach has theory reference value and practicability due to its depressed production cost without adding extra instruments.

Key words: parabolic antenna; spatial polarization characteristic; crossed polarization component; polarization ratio; polarization scattering matrix measurement

1 引言

雷达天线是雷达装备的重要组成部分。抛面天线由于具有高增益, 馈电简单, 设计容易, 并且能够得到一定设计要求形状波束的诸多优点, 能满足常规雷达系统的要求, 从而成为雷达装备中应用最为广泛的一种反射面天线。一般而言, 反射面的口径越大其优点越突出, 该式天线不仅在过去、现在更将在未来的雷达装备中发挥重要作用, 占据不可替代的重要地位^[1]。单极化抛面天线主要用于搜索、警戒、监视、引导雷达, 这些雷达不具备全极化收发和雷达目标特性测量等功能, 目标识别和抗干扰能力很弱, 难以适应复杂多变的

战场电磁环境。传统的观念认为, 雷达只有在相邻脉冲重复周期内利用两个正交极化通道“轮流发射, 同时接收”^[2,3,4,5]才能测得目标极化散射矩阵, 或者说, 使用单极化天线的雷达不可能测量出目标的散射矩阵。准确获得目标的极化特性信息并有效加以利用, 长期以来一直也是雷达目标识别、地理遥感等多个领域备受关注的前沿问题^[2-11]。由于天线空域极化特性的存在, 即天线随着工作频率和空间指向的不同, 天线辐射场的极化方式也有所不同^[12], 在空域不同的观测位置, 单极化天线的远场可视为极化空变的电场, 抛物面天线也具备这个性质, 通过研究该类雷达天线的空域极化特性, 并采取一定的信号处理技术和极化信息处理方

收稿日期: 2008 年 6 月 11 日; 修回日期: 2008 年 11 月 21 日

国家自然科学基金重点项目(60736006), 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号:60802078), 国家 973 重大基础研究发展规划(编号 No. 51314)“十一五”武器装备预先研究项目(51309060305)

法,就能够在原来雷达系统的基础上最大限度的发掘和利用雷达传感系统所获得的丰富的电磁信息,提升其信息获取与处理能力,为目标极化散射特性的测量带来新的思路,也为目标识别提供依据。

2 抛物面反射天线的空域极化特性

对于雷达发射和接收而言,都希望天线具有很高的极化纯度。然而实际上,天线的极化状态随着扫描角的变化呈一定规律变化。如何准确的描述天线空域变极化这种固有物理属性并准确建模,从而为后端的目标特性测量和信号处理提供准则和依据就成为一项亟待解决的工作,目前很少见到此类研究的公开报道。通常情况下,抛面天线的辐射场可表示为^[13]

$$\left. \begin{aligned} E_\theta &= jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} (f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi) \\ E_\varphi &= jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r} \cos \theta (f_y \cos \varphi - f_x \sin \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 f_x, f_y 为面积分可表示为

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \int_a E_{ax} e^{j(k_x x + k_y y)} ds \\ f_y &= \int_a E_{ay} e^{j(k_x x + k_y y)} ds \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

考虑反射面和口径之间的相位因子,在直角坐标系下抛物面表面的反射场,即口径场表示为

$$\begin{aligned} E_{ax} &= \frac{4fe^{-j2k_0 f} e(\theta_0)}{(4f^2 + r^2)[4f^2 + r^2 4fy \sin \varphi + (4f^2 - r^2) \cos \varphi]} \\ &\times \frac{4fe^{-2k_0 f} e(\theta_0)}{[2xy(1 - \cos \varphi) - 4yx \sin \varphi]} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_{ay} &= \frac{4fe^{-j2k_0 f} e(\theta_0)}{(4f^2 + r^2)[4f^2 + r^2 4fy \sin \varphi + (4f^2 - r^2) \cos \varphi]} \\ &\times \frac{4fe^{-2k_0 f} e(\theta_0)}{[(4f^2 + r^2 - 2x^2) + (4f^2 - r^2 + 2x^2) \cos \varphi - 4fy \sin \varphi]} \end{aligned} \quad (4)$$

$$E_{az} = 0 \quad (5)$$

对于 x 方向极化(这里假设为垂直极化)的口径场,主极化场为 E_x ,利用文献[14]中的 Ludwig 第三定律关于交叉极化的定义

$$\begin{aligned} E_p(\theta, \varphi) &= E_\theta(\theta, \varphi) \sin \varphi \hat{e}_\theta + E_\varphi(\theta, \varphi) \cos \varphi \hat{e}_\varphi \\ E_q(\theta, \varphi) &= E_\theta(\theta, \varphi) \cos \varphi \hat{e}_\theta - E_\varphi(\theta, \varphi) \sin \varphi \hat{e}_\varphi \end{aligned} \quad (6)$$

因此通过坐标变换 $\hat{x} = \hat{\theta} \sin \varphi + \hat{\varphi} \cos \varphi$ 和式(1-5)的关系得到场的主极化分量 E_x

$$E_x = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r}$$

$$\left. \begin{aligned} &f_x [1 - (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi] + f_y (1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ &f_y [1 - (1 - \cos \theta) \sin^2 \varphi] + f_x (1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

同样,利用坐标变换 $\hat{y} = \hat{\theta} \cos \varphi - \hat{\varphi} \sin \varphi$,可求得场的交叉极化分量 E_y ,

$$E_y = jk_0 \frac{e^{-jk_0 r}}{2\pi r}$$

$$\left. \begin{aligned} &f_x [1 - (1 - \cos \theta) \sin^2 \varphi] + f_y (1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \\ &f_y [1 - (1 - \cos \theta) \cos^2 \varphi] + f_x (1 - \cos \theta) \sin \varphi \cos \varphi \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由上式可见,即使投影口面场只有主极化分量而没有交叉极化分量时,其辐射场也会产生交叉极化分量。通过上式即可确定任意 θ 和 φ 下的辐射场从而得到天线方向图。目前大多数论著和文献都以 $\varphi = 0^\circ$ 和 90° 的 H 面和 E 面两个主平面为参考面来研究其辐射场,往往没有讨论并且忽略了在其他区域的交叉极化分量的影响。实际上,E 面 H 面的交叉极化分量相互抵消,对辐射场没有贡献或者贡献很小,但在其它空域指向会上会产生服从一定规律分布的交叉极化场,从而使天线偏离主辐射轴后天线辐射场的极化方式也有所不同。考虑利用该特性来研究相应的极化信息处理方法,这里我们更关心的是抛面反射天线的极化特性在空间存在着怎样的变化规律,并借助于文献[15,16]关于空域瞬态极化特性的表征对抛面天线以定性和定量的分析,通过数值计算仿真给出一些供参考的结论。

通过公式(1),(2)可求得该型天线的空域极化比为

$$P = \frac{-E_\theta}{E_\varphi} = \frac{f_x \cos \varphi + f_y \sin \varphi}{(f_x \sin \varphi - f_y \cos \varphi) \cos \theta} = \frac{k + \tan \varphi}{(k \cdot \tan \varphi - 1) \cos \theta} \quad (9)$$

从上式不难看出,抛面天线的空域极化比的变化与三个参数有关: $k = \frac{f_y}{f_x}, \cos \theta, \tan \varphi$ 。

工程中,也常用“交叉极化鉴别率”^[10]来描述天线的极化纯度,即交叉极化和主极化分量功率比,具体定义为

$$XPD = 20 \log \frac{E_{x0}}{E_{co}} \quad (10)$$

式中, E_{co} 表示接收的共极化电场, E_{x0} 表示接收的交叉极化场。可以用 XPD 来描述天线在扫描时极化特性的变化,通过分析空域交叉极化鉴别量(或极化比)随天线扫描时的变化规律能够确定天线的变极化特性,也就是极化比随空域角 θ, φ 的变化规律。利用文献[15,16]定义的空域瞬态 Stokes 矢量和瞬态极化投影集可完整描述天线辐射电磁波在空间不同位置上极化状态瞬

变的分布特点和规律。式(2)中 f_x, f_y 积分的理论推导复杂烦琐,可先考虑两种简单的情况,在E面上当 $\varphi=90^\circ$ 的时候,此时极化比变为:

$$P = -\frac{E_\theta}{E_\varphi} = \frac{1}{k \cos \theta} \quad (11)$$

同样,H面上 $\varphi=0^\circ$,极化比为

$$P = \frac{-E_\theta}{E_\varphi} = \frac{k}{\cos \theta} \quad (12)$$

当偏离E面和H面,偏离主辐射方向的时候,即相对的空域观测方向 θ, φ 按一定规律变化,观察其空域极化的变化情况。当已知主辐射方向上的极化方式时,其它辐射方向上的极化方式应当呈现出某种的变化规律^[17]。利用丹麦TICRA公司开发的GRASP9.0对某C波段偏馈抛面反射天线进行建模,计算了在天线坐标系下截取的 $\varphi=45^\circ$ 面的主极化场和交叉极化场,然后通过坐标变换将天线坐标系转换到雷达坐标系下,利用上面关于空域极化的三种表征和公式(1-9),用Matlab计算出主波束宽度内天线远场主极化和交叉极化方向图,天线空域交叉极化鉴别量XPD随 θ 的变化规律,极化相位描述子 ϕ 的变化规律,以及天线空域瞬态IPPV的分布如图1-4所示。同样的,当 θ 角固定时,也可以得到天线主波束辐射场随方位角 φ 的变化规律如图5-7。

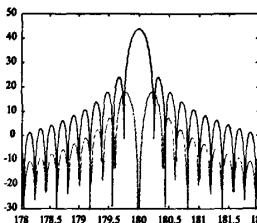


图1 主极化和交叉极化方向图

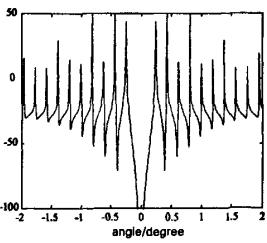


图2 天线空域XPD关于 θ 变化规律

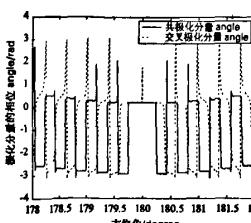


图3 辐射场相位关于 θ 的变化规律

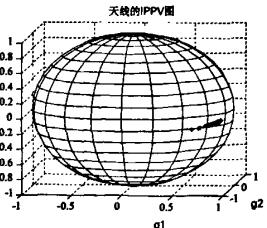


图4 天线空域瞬态IPPV分布图

由图1-4可见,当天线在空域扫描时,其极化特性并非一成不变,而是不断变化的。天线辐射场的极化状态,场分量的相位,随着角度 θ 的变化也服从一定的规律变化,天线的空域瞬态IPPV也服从一定分布。同样的,天线的空域极化特性在雷达坐标系中方位和俯仰向上扫描时,其主极化分量逐渐减小,交叉极化分量

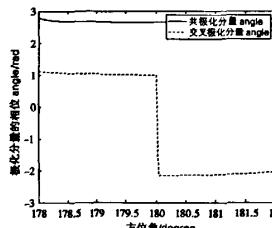


图5 辐射场相位关于 φ 变化规律

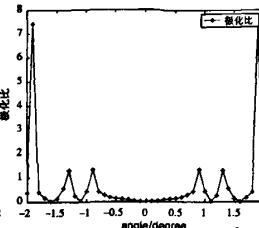


图6 空域极化比关于 φ 变化规律

极化比幅度

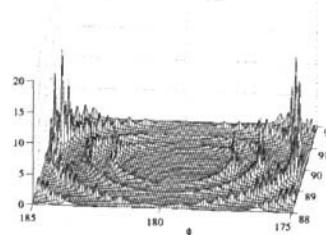


图7 极化比幅度的三维变化规律
逐渐增加,在方位向上的主瓣范围内,天线的极化特性变化明显且规律性强。经过大量的仿真实验进行比对发现,较小的俯仰角变化对主波束宽度内空域极化比幅度影响不大,方位向上的第一副瓣内的交叉极化分量比较微弱,往往在主瓣下降10dB-15dB的区域内交叉极化分量比较丰富。综合图6、7可看出,极化比关于 θ 和 φ 呈现出不同的变化规律,在主波束宽度以外和旁瓣区域,关于 θ 对称的出现脉冲一样的尖峰,这个尖峰的位置对应着交叉极化电平高于主极化电平时所在的角度;关于 φ 则呈现不严格的单调性和对称性。

上述变化规律这意味着,当天线在方位向主瓣范围内扫描,主极化为左旋圆极化的时候,随空域观测角度的变化,圆极化逐渐偏离原来的极化方式成为椭圆极化,而垂直极化和水平极化将随着角度的变为某角度的线极化。其中,文献[18]指出由于馈源和反射面的影响,口径场的E面和H面之间的共极化方向图的不平衡,从而会引起口径中的交叉极化,进而引起远场的交叉极化。当工作在E面上时候,如果 φ 略微偏离90度容易带来辐射场交叉极化分量,从图1所示的某偏馈抛面天线 $\varphi=45^\circ$ 面内主极化和交叉极化方向图可以看出在某个空间指向上天线的交叉极化高于主极化电平,天线主瓣区域内的交叉极化峰值低于共极化峰值电平达到24.97dB,这使得物理上的单极化天线在某种程度上近似为空域多极化天线。用天线工作在E面上时的极化比 $P(\varphi) = -\frac{E_\theta}{E_\varphi} = \frac{f_y}{f_x \cos \theta} = \frac{k}{\cos \theta}$ 作为参考极化,观测天线在不同空域产生的交叉极化。由式(9)可以看出,在 $\operatorname{tg}\varphi = 1/k$ 的时候,极化比会出现一个极点,此时极化比趋近于无穷大,对应着天线的主极化垂直极化,对 $P(\varphi)$ 求导可得到其变化率。

$$P'(\varphi) = d\left(\frac{1 + ktg\varphi}{(tg\varphi - k)\cos\theta}\right)/d\varphi = \frac{1}{\cos\theta} \left(-1 - \left(\frac{1 + ktg\varphi}{(tg\varphi - k)} \right)^2 \right) \quad (13)$$

该极化比的导数一直是小于0,并随着角度 φ 的增加会不断减小,不会呈现出像 θ 一样沿某一点对称的情形,当 θ 为 0° 的时候该变化率最小,随着角度的变化变化率会按照 $\frac{1}{\cos\theta}$ 的规律慢慢增大,通过仿真可以发现:

随着 k 的增大,极化比在 φ 逼近 90° 度处存在极点,产生的寄生极化越来越严重。换言之,极化比越大,产生的变极化效应也就越明显。在天线的设计中,应尽量避免这种情况的出现,但同时也注意到,这个极点的存在给天线空域极化特性研究和目标极化特性测量等应用研究带来了一种新的思路,可以通过测量极点可间接的得到天线的极化比,即便存在一定的误差,但是相对于双极化天线和全极化通道相比也具有明显优势,可大幅度节约成本,降低系统复杂度,并且利用起来相对简单,后端的信号和数据处理也相对容易,不失为一种目标极化特性测量的新思路。

3 单极化通道测量目标极化散射矩阵模型

根据上面的讨论,在不同的方向上天线的极化特性会偏离主极化呈现一定的规律。如果假设各个辐射角度的极化方式已知,任意取出两个角度对目标进行测量,同时用主辐射方向测量,则可以通过以下的计算得到目标的散射矩阵 S 。

假设 $\theta=0^\circ$,抛面天线波束在俯仰向未扫描时,指向阵面的法向的极化形式为水平极化, $h=[1, 0]^T$,那么当天线在主瓣区内扫过角度 φ 时,天线的极化比变

$$\text{为 } \rho_0 = \frac{E_\theta}{E_\varphi} = \frac{tg\varphi + 1}{tg\varphi - 1}, \text{ 极化状态}^{[9]} \text{ 为 } h = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_0^2}} [1, \rho_0]^T = \begin{bmatrix} \frac{\sin\varphi - \cos\varphi}{\sqrt{2}} \\ \frac{\sin\varphi + \cos\varphi}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \text{ 另外再取两个特定角度上}$$

的极化比分别为 ρ_1, ρ_2 ,则天线的极化状态也相应的表示为

$$h_i = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_i^2}} [1, \rho_i]^T = \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2 \quad (14)$$

当雷达收发共用天线的情况下有:

$$h_r = h_t = h_i \quad (15)$$

h_r 表示接收天线的极化状态, h_t 表示发射天线的极化状态。

根据雷达极化理论^[6],天线对目标的接收电压为:

$$p_s = h_r S h_t \quad (16)$$

如暂不考虑杂波和干扰的影响,仅考虑接收系统和测量系统噪声的影响,则存在如下关系式

$$\tilde{p}_s = h_r S h_t + \xi_m(i) \quad (17)$$

$\xi_m(i)$ 服从复高斯分布,噪声方差或者其平均功率为 $\xi_m(i) \sim N(0, \sigma_m^2)$,并且相互独立。

$$\text{假设满足互易性目标的极化散射矩阵为 } \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12} & S_{22} \end{bmatrix}$$

为了不失一般性,上面所有涉及到的变量都可以是复数形式。

可以选取三个典型的测量时刻分别为 t_1, t_2, t_3 ;该

$$\text{三个时刻天线的极化状态分布对应为 } \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix},$$

在这三个时刻天线的接收电压幅度(归一化接收电压),即对目标散射矩阵测量时的电压值得到的结果分别为 $p_i (i=0, 1, 2)$,将 h_i 代入公式(17)以后得到:

$$\begin{cases} 2a_0 b_1 S_{12} + b_0^2 S_{22} + a_0^2 S_{11} = p_0 + \xi_0 \\ 2a_1 b_1 S_{12} + b_1^2 S_{22} + a_1^2 S_{11} = p_1 + \xi_1 \\ 2a_2 b_2 S_{12} + b_2^2 S_{22} + a_2^2 S_{11} = p_2 + \xi_2 \end{cases} \quad (18)$$

通过对线性方程组求解即可得到散射矩阵 S 的各分量:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{11} = -\frac{(a_2 b_1^2 b_2 - a_1 b_1 b_2^2)(p_0 + \xi_0) + (a_0 b_0 b_2^2 - a_2 b_0^2 b_2)(p_1 + \xi_1) + (a_1 b_0^2 b_1 - a_0 b_0 b_1^2)(p_2 + \xi_2)}{(a_0 b_1 - a_1 b_0)(a_2 b_0 - a_0 b_2)(a_2 b_1 - a_1 b_2)} \\ S_{12} = -\frac{(a_1^2 b_2^2 - a_2^2 b_1^2)(p_0 + \xi_0) + (a_2^2 b_0^2 - a_0^2 b_2^2)(p_1 + \xi_1) + (a_0^2 b_1^2 - a_1^2 b_0^2)(p_2 + \xi_2)}{2(a_2 b_0 - a_0 b_2)(-a_1 a_2 b_0 b_1 + a_0 a_2 b_1^2 + a_1^2 b_0 b_2 - a_0 a_1 b_1 b_2)} \\ S_{22} = -\frac{(a_1 a_2^2 b_1 - a_1^2 a_2 b_2)(p_0 + \xi_0) + (a_0^2 a_2 b_2 - a_0 a_2^2 b_0)(p_1 + \xi_1) + (a_0 a_1 b_0^2 - a_0^2 a_1 b_1)(p_2 + \xi_2)}{(a_2 b_0 - a_0 b_2)(-a_1 a_2 b_0 b_1 + a_0 a_2 b_1^2 + a_1^2 b_0 b_2 - a_0 a_1 b_1 b_2)} \end{array} \right\} \quad (19)$$

当 $\theta = 0^\circ$ 天线在该辐射方向上为水平极化, $h_i = h_i$ 代入公式以后得到:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{由主极化方向可以测得 } S_{11} = p_0 + \xi_0.$$

由另外两个典型时刻天线的极化状态对目标测量得到的结果(归一化接收电压)分别为 $p_i (i=1,2)$, 将

$$\begin{cases} S_{12} = \frac{-b_2^2(p_1 + \xi_1) + b_1^2(p_2 + \xi_2) + (a_1^2b_2^2 - a_2^2b_1^2)(p_0 + \xi_0)}{2b_1b_2(a_2b_1 - a_1b_2)} \\ S_{22} = \frac{-a_2b_2(p_1 + \xi_1) + a_1b_1(p_2 + \xi_2) + (a_1^2a_2b_2 - a_1a_2^2b_1)(p_0 + \xi_0)}{b_1b_2(a_2b_1 - a_1b_2)} \end{cases} \quad (21)$$

这个时候 S 矩阵的 3 个参数都已经求出。由上式可见, 测量目标散射矩阵各个分量产生的误差不单对自己有影响, 对其余的分量也是有较大影响的。

当 $\theta = 0^\circ$ 时, 不考虑噪声影响即由主极化上测得的电压就是 S_{22} , 剩下两个参数也可以通过方程组进行相应的求解, 这里不详细写出, 仅给出计算的结果:

$$\begin{cases} S_{12} = \frac{a_2^2p_1 - a_1^2p_2 - a_2^2b_1^2S_{22} + a_1^2b_2^2S_{22}}{2a_1a_2(-a_2b_1 + a_1b_2)} \\ S_{11} = \frac{-a_2b_2p_1 + a_1b_1p_2 + a_2b_1^2b_2S_{22} - a_1b_1b_2^2S_{22}}{a_1a_2(-a_2b_1 + a_1b_2)} \\ S_{22} = p_0 \end{cases} \quad (22)$$

综上, 利用抛面天线主波束宽度及附近区域上的变极化来测量目标特性, 可以在不增加系统复杂度的情况下使单极化天线在时域测量目标散射矩阵成为可能。文献[9]甚至创造性地提出并验证了运用天线的空域极化特性测量目标极化散射矩阵的频域算法, 并验证了方法的可行性, 相比较而言方法更贴近实际装备。同时需要指出的是, 上面给出的测量方法是对单天线测量单个静止目标的极化散射矩阵的初步探索, 还没有考虑多目标、目标运动、目标散射矩阵起伏、角闪烁、有干扰存在等多种情况的场景, 下一步将继续深入分析算法的可行性、稳定性和有效性, 找出算法的适用范围, 并寻求提高测量性能的有效途径。

4 实验结果

设天线未扫描时为水平极化, $h = [1, 0]^T$, 在主瓣区域扫描时, 空域的极化比呈余弦函数变化, 即 $\rho = \cos \theta$, 天线的极化状态为 $h = \frac{1}{\sqrt{1+\rho^2}} [1, \rho]^T$, 仿真中选取三个测量点位置分别为 $\theta = 90^\circ, 0^\circ, \text{和 } 60^\circ$, 假定目标的散射矩阵为 $\begin{bmatrix} 2 & 0.5 \\ 0.5 & 1 \end{bmatrix}$, 将散射矩阵中 S_{11}, S_{12}, S_{22} 分量

$$\begin{cases} 2a_1b_1S_{12} + b_1^2S_{22} + a_1^2S_{11} = p_1 + \xi_1 \\ 2a_2b_2S_{12} + b_2^2S_{22} + a_2^2S_{11} = p_2 + \xi_2 \end{cases} \quad (20)$$

计算可得到复数的 S 矩阵的剩下的两个参数

的测量值偏离真实值的起伏程度来衡量测量精度, 并考察不同信噪比条件下各极化分量的相对测量误差及对测量算法的影响。

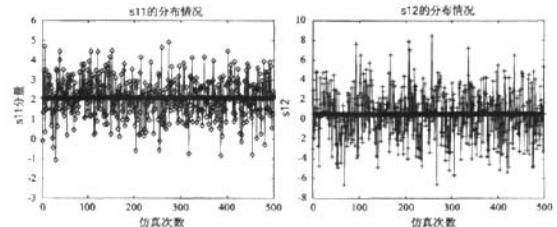


图 8(a) S_{11} 分量测量误差

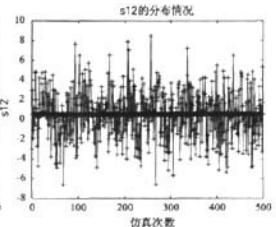


图 8(b) S_{12} 分量测量误差

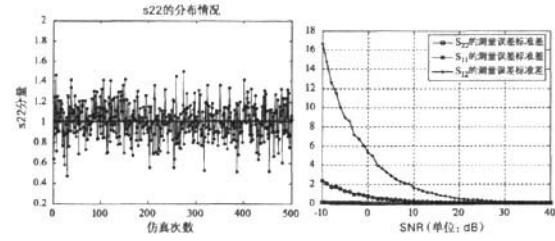


图 8(c) S_{22} 分量测量误差 图 8(d) 各分量测量精度随信噪比的变化曲线

从图 8(a-d) 的仿真实验结果不难看出, 对目标散射矩阵各分量的测量精度均不是很高, 并且测量精度随信噪比降低而恶化。值得注意的是, 该方法对散射矩阵 S_{22} 分量测量精度的较之 S_{12}, S_{11} 要高些, S_{11} 次之, 对 S_{12} 分量的测量效果最差。分析造成这种情况的原因可能是测量点的位置选择不够好, 造成空域极化变化程度不够明显, 空域极化比变化规律假设不够合理严密, 没有考虑天线方向图的形式, 天线扫描速度, 天线增益等多种因素, 相应的需要进一步深入研究针对该种目标散射矩阵的极化测量校准方法, 比较典型的传统极化测量校准方法主要利用一个或者多个典型定标体散射矩阵来修正系统测量误差, 下面可以进一步针对单天线的空域极化特性对金属球, 二面角反射器等典型目标的散射矩阵进行多角度的暗室测量, 积累一

些经验值和变化规律,从而对单天线的目标极化测量方法实现进一步的修正,这也是下一步需要讨论的问题。限于篇幅,本文仅对空间固定目标进行了基础的理论性的研究,对高速运动目标的测量方法,极化测量系统误差的校准,以及散射矩阵的误差修正的研究并未深入探讨,对实际使用的天线采用的信号波形体制也未提及,这些将是下一步研究的内容。

5 结论

本文重点讨论了典型抛物面反射天线的空域极化特性,根据空域瞬态极化的表征,通过数值计算和仿真分析验证并得出了雷达坐标系下天线空域极化特性的一些特征规律,这是挖掘现有单极化雷达获取目标特征信息潜力的理论基础。基于该特性还给出了一种实现目标极化散射矩阵的测量方法。该方法不需要对雷达体制和天线进行复杂和高成本的改造,利用天线的极化状态在空域上的分布呈现一定规律的性质来实现目标特性的测量,虽然在理论分析、仿真模型和实现结果上还比较粗糙,还没有考虑更复杂的情况,但寄希望于借助这样一般性的理论模型来描述“利用单站单极化天线体制的空域变极化特性进行目标极化测量”的新思路。该方法对于改造采用单极化的反射面天线、卡赛格伦天线、单脉冲天线、阵列天线的雷达来完成专用的全极化目标特性测量雷达才能完成的测量任务,降低雷达设计和制造成本起到了较好的作用。

参考文献

- [1] 张祖稷,金林,束咸荣 编著. 雷达天线技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [2] D. Giulia. Polarization diversity in radars [J]. Proc of the IEEE, 1986, 74(2): 245 ~ 269.
- [3] W-M Boerner, et. al. Direct and inverse methods in radar polarimetry [M]. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [4] D Giulia, M Fossi. Radar target scattering matrix measurement through orthogonal signals [J]. IEE Proc-F, 1993, 140(4): 233 ~ 242.
- [5] D. Giulia, L. Facheris, M. Fossi. Simultaneous scattering matrix measurement through signal coding [J]. Proceedings of IEEE 1990 International Radar Conference. Arlington, VA, USA: 258-262.
- [6] 庄钊文,肖顺平,王雪松著. 雷达极化信息处理及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 第1版, 1999: 41-44, 164, 95, 254.
- [7] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 1999, 6.
- [8] 王雪松,王涛,李永祯等. 雷达目标极化散射矩阵的瞬时测量方法 [J]. 电子学报, vol. 34, 2006 (6): 1020-1025.
- [9] 王涛. 运动目标的时分极化测量研究 [J]. 电子与信息学报, 第28卷第11期: 97 ~ 101, 2006.
- [10] 罗佳,王雪松,李永祯等. 雷达目标极化散射矩阵测量的新方法研究 [J]. 信号处理, 2009, 25(6): 868-873.
- [11] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用. 北京: 科学出版社, 2000.
- [12] 刘克成,宋学诚. 天线原理. 国防科技大学出版社, 1989.5, 长沙.
- [13] H Mott. 天线和雷达中的极化 [M]. 林昌禄, 等, 译. 成都: 电子科技大学出版社, 1989.
- [14] J. E. Roy, L. Shafai. Generalization of the Ludwig-3 Definition for Linear Co-polarization and Cross Polarization [J] IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION, VOL. 49(6), JUNE 2001.
- [15] 罗佳,王雪松,李永祯,肖顺平. 实测天线的空域瞬态极化特性. 电波科学学报. 第22卷, 增刊. Vol. 22. Sup. 2007. 9: 373 ~ 376.
- [16] 李永桢 瞬态极化统计特性及处理的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2004, 10.
- [17] 鲍亮, 等. 天线空域极化比分布的分析及设计方法. 电波科学学报 [J]. 2007, vol. 22 (Sup): 364-367.
- [18] W. L. Stutzman, G. A. Thiele 天线理论与设计 [M]. 朱守正等, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 10.

作者简介



戴幻尧,男,1982-,吉林长春人,现为国防科技大学博士研究生,主要从事电子信息系统仿真与评估,雷达极化信息处理、信号波形设计与识别等方面的研究。

罗佳,女,1981-,湖北恩施人,现为国防科技大学电子科学与工程学院博士研究生。研究方向:雷达极化信息处理、信号处理、雷达电子战建模与仿真。

李金梁,男,1982-,山东省济宁市人。2004年6月毕业于国防科技大学电子科学与工程学院电子工程专业,2005年12月获该院信息与通信工程专业硕士学位,现为国防科技大学在读博士。主要从事无源干扰,极化信息处理方面的研究。

李永祯,男,1977-,内蒙古化德人,2004年12月于国防科技大学获得博士学位,现为国防科技大学副教授,研究方向为雷达极化信息处理、信号处理、目标检测与识别。

王雪松,男,1972-,内蒙古包头人,博士生导师,现为国防科技大学教授,博士生导师,IEEE会员,中国电子学会高级会员。主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标识别、雷达电子战建模与仿真等方面的研究。

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，一直致力于专注于微波、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>