

文章编号 1005-0388(2012)02-0396-07

正交偶极子的极化特性分析

李棉全 李永祯 董 健 王雪松

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要 双极化相控阵天线的极化特性及其对目标极化散射矩阵测量的影响, 将决定相控阵体制雷达获取目标极化信息的精度和能力, 是相控阵雷达极化技术的基础。以正交偶极子为阵元模型, 分析了双极化阵列天线的空域极化特性及其对雷达目标极化散射矩阵测量的影响。由于两阵元辐射电场在偏离视轴方向的非正交性, 不可避免地会引起两天线交叉极化之间的相互干扰。根据传统交叉极化评价指标的定义, 分析了正交偶极子天线的交叉极化特性, 并从目标极化特性测量性能的角度, 定义了双极化雷达系统的交叉极化隔离度, 将其表示为极化测量系数矩阵条件数的形式, 以衡量全极化相控阵雷达天线的交叉极化特性。

关键词 正交偶极子; 交叉极化隔离度; 极化散射矩阵; 空域极化特性

中图分类号 TN95

文献标志码 A

Polarization characteristics analysis of crossed dipoles

LI Mian-quan LI Yong-zhen DONG Jian WANG Xue-song

(School of Electronic Science and Engineering, National University of

Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract The spatial polarization characteristics of dual-polarized arrays and its influence on the polarization scattering matrix measurement of target are analyzed in this paper by using crossed dipoles as elements. Because of the nonorthogonality of the radiated electric field at off-broadside, it is inevitable to cause cross-polarization interference between crossed dipoles. The cross-polarization characteristics of crossed dipoles are analyzed according the traditional evaluation definition. Furthermore, the cross-polarization isolation(XPI) of dual polarized radar system is defined in the respect of target polarization scattering matrix measurement, which is denoted by the polarization measurement formula and evaluate the stability of polarization measurement methods.

Key words crossed dipoles; cross-polarization isolation; polarization scattering matrix; spatial polarization characteristics

引 言

目前, 双极化阵列天线已被广泛应用于现代通信和雷达等领域^[1-6]。一方面, 双极化阵列天线能够

发挥极化分集的信息处理优势, 提高通信容量^[2]和抗信道衰落能力^[4], 增强雷达的目标识别能力^[5]等; 另一方面, 双极化阵列天线具有波束指向、波束形状快速变化能力, 易于形成多个波束, 提高雷达的数据

收稿日期: 2011-06-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 60736006); 国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 60802078)

联系人: 李棉全 E-mail: tiananle521@163.com

率和多目标跟踪能力^[6]等。

根据天线理论,在给定频率和空间指向的远场区,天线存在着某一确定的极化方式,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,这意味着天线的极化是频率和空域指向的函数,且与天线形式有关,天线极化在空间的这种变化特性称为天线的空域极化特性^[7]。与机械扫描体制天线相比,相控阵天线的空域极化特性更为复杂,其辐射电场的极化状态取决于波束扫描方向、阵元形式、阵元耦合等因素^[8-11]。文献[8]使用三维电磁仿真软件(XFDTD)分析了单极化阵列天线的空域极化特性。文献[9]使用无限电流元模型分析了两正交电流元的极化纯度随扫描角的变化规律,并提出了提高极化纯度的幅相控制方法。为了评价双极化系统的交叉极化性能,Stutzman^[10]定义了双极化通信系统的交叉极化隔离度和交叉极化鉴别率两个指标,文献[11]根据文献[10]中的定义,以辐射圆极化信号为例,分析了正交偶极子天线的极化隔离度。

现有关于双极化阵元的文献大多纯粹考虑天线的极化特性,而未考虑其在极化雷达中的应用。对于双极化相控阵雷达系统,其阵元的极化特性以及对目标极化散射矩阵测量的影响,将决定相控阵体制雷达获取目标极化信息的精度和能力,是相控阵雷达极化技术的基础。以正交偶极子为阵元模型,分析了双极化阵列天线的空域极化特性,并从极化测量性能的角度,根据分时和同时极化测量的观测方程,定义了双极化相控阵雷达的交叉极化隔离度,将其表示为极化测量系数矩阵条件数的形式,以衡量双极化天线的交叉极化特性。

1. 正交偶极子的极化特性

1.1 正交偶极子辐射特性的信号模型

任何单元的辐射方向图都可以根据单元上的电流或口径场积分得到,在多数情况下,阵元可认为由无限小线电流源或者口径切向电场线组成。如图1所示为沿 x 、 y 轴放置的两正交短偶极子,其在空间球坐标系 (r, θ, φ) 下的远场辐射电场为^[5]

$$E_n = -\frac{k^2 e^{-jkr}}{4\pi\epsilon r} [a_r \times (a_r \times M_n)] \quad n = x, y \quad (1)$$

式中: M_n 为偶极矩, $M_x = m_x a_x$, $M_y = m_y a_y$; $k = 2\pi/\lambda$; ϵ 为介电常数; a_r 为球坐标系下辐射方向 r 的单位矢量:

$$a_r = a_x \sin \theta \cos \varphi + a_y \sin \theta \sin \varphi + a_z \cos \theta \quad (2)$$

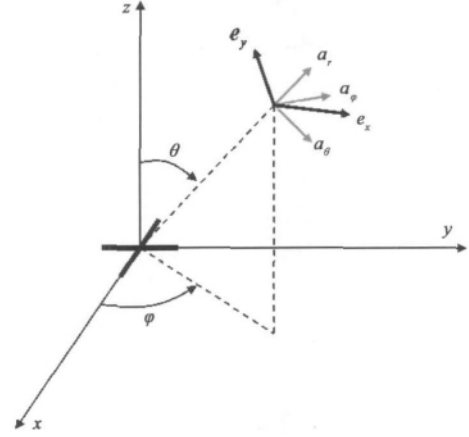


图1 正交偶极子天线辐射示意图

由矢量积的性质可知^[12]

$$a_r \times (a_r \times M_n) = a_r (a_r \cdot M_n) - M_n (a_r \cdot a_r) \quad (3)$$

那么, x 、 y 轴方向偶极子在方向 r 上远场某点处的辐射电场可表示为

$$E_n = \frac{m_n k^2 e^{-jkr}}{4\pi\epsilon r} e_n \quad n = x, y \quad (4)$$

$$e_x = -[a_r \times (a_r \times a_x)] = a_x - a_r \sin \theta \cos \varphi \quad (5)$$

$$e_y = -[a_r \times (a_r \times a_y)] = a_y - a_r \sin \theta \sin \varphi \quad (6)$$

两矢量 e_x 和 e_y 之间的夹角为

$$\begin{aligned} \cos \gamma &= \frac{e_x \cdot e_y}{|e_x| |e_y|} \\ &= \frac{-\sin \theta \cos \varphi \sin \theta \sin \varphi}{\sqrt{1 - (\sin \theta \cos \varphi)^2} \sqrt{1 - (\sin \theta \sin \varphi)^2}} \end{aligned} \quad (7)$$

方向余弦 $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$, 则式(7)可以表示为

$$\cos \gamma = \frac{-uv}{\sqrt{1-u^2} \sqrt{1-v^2}} \quad (8)$$

图2(a)所示为 e_x 和 e_y 之间的夹角 γ 随空间指向角 θ 、 φ 的变化情况,图2(b)为 $\cos \gamma$ 在 u - v 平面的分布情况(单位: dB)。由图2(见424页)可见,在两个主平面内($u=0$ 或 $v=0$), e_x 和 e_y 之间的夹角 γ 为 90° ,而在其他的空间指向角,两矢量之间的夹角不再是 90° ,即两矢量不再正交, γ 随着 θ 的增大而增大,且关于对角平面($\varphi = 45^\circ, 135^\circ$)成对称分布。对于电场平面内的任何一组极化基,由于 e_x 和 e_y 在偏视轴方向上不再正交,两电场在极化基上的分解都不可避免地会导致交叉极化的产生。

对于给定的天线而言,主极化和交叉极化的定义有多种方式。Ludwig^[13]对天线极化坐标系的选取作了较完整的论述,并给出了三种交叉极化的定义,其中定义2常用于描述电偶极子产生的极化波,交叉极化是与电偶极子共轴的磁偶极子产生的极化波。选用第2种定义,即

$$a_h = a_\varphi = -a_x \sin \varphi + a_y \cos \varphi \quad (9)$$

$$\begin{aligned} a_v &= -a_\theta \\ &= -a_x \cos \theta \cos \varphi - a_y \cos \theta \sin \varphi + a_z \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

那么,在水平和垂直极化基 (a_h, a_v) 下,式(1)形式的辐射电场可表示为

$$E_t = \begin{bmatrix} E_{th} \\ E_{tv} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: J 为双极化阵元在 (a_h, a_v) 极化基下的极化辐射矩阵,且有

$$\begin{aligned} J &= \begin{bmatrix} e_x \cdot a_h & e_y \cdot a_h \\ e_x \cdot a_v & e_y \cdot a_v \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -\sin \varphi & \cos \varphi \\ -\cos \theta \cos \varphi & -\cos \theta \sin \varphi \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$$E_n = \frac{m_n k^2 e^{-jkr}}{4\pi\epsilon r} \quad n = x, y \quad (13)$$

假设 x, y 轴方向偶极子电流同幅同相,即 $m_x = m_y$,则正交偶极子辐射电场的线极化比为

$$\rho_L(\theta, \varphi) = \frac{E_v}{E_h} = \frac{-\cos \theta (1 + \tan \varphi)}{1 - \tan \varphi} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,正交偶极子的极化比随着扫描角度的改变而变化,这将给相控阵雷达极化信息的获取带来两个本质的问题:①天线极化特性随着扫描角度的改变而剧烈变化,因此,要想获取目标的准确极化散射矩阵,需要在每个角度下都进行不同的极化校准,对于宽角扫描相控阵雷达,这种校准方式复杂且困难;②天线极化的纯度随着扫描角度变化,在相当大的扫描空域下,其交叉极化分量很大,将导致对目标极化散射矩阵的测量存在大的误差。本文将重点考虑第②点问题,分析正交偶极子的交叉极化对目标极化测量的影响,并进一步定义衡量其交叉极化特性的指标。

1.2 正交偶极子的交叉极化隔离度

交叉极化隔离度(XPI)和交叉极化鉴别率(XPD)是双极化通信系统中交叉极化干扰的常用评价指标^[10]。如图3所示,发射通道1期望的辐射极化为 J_{11} ,同时产生的交叉极化分量为 J_{21} ,而发射通道2辐射的主极化和交叉极化分量分别为 J_{22}

和 J_{12} ,其中 J_{ij} 中的下标“ j ”表示发射通道,“ i ”表示接收通道。

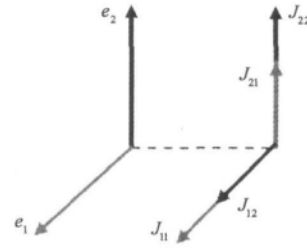


图3 双极化天线辐射示意图

交叉极化隔离度的定义是:本信号的主极化分量 J_{11} (或 J_{22})与另一信号产生的交叉极化分量 J_{12} (或 J_{21})之比;交叉极化鉴别率的定义是:本信号产生的主极化分量 J_{11} (或 J_{22})与该信号产生的交叉极化分量 J_{21} (或 J_{12})之比。根据定义,由式(12)可知: x 轴向偶极子阵元的交叉极化隔离度和交叉极化鉴别率分别为

$$XPI_1 = |J_{11}|/|J_{12}| = |\tan \varphi| \quad (15)$$

$$XPD_1 = |J_{11}|/|J_{21}| = |\tan \varphi / \cos \theta| \quad (16)$$

同样, y 轴向偶极子阵元的交叉极化隔离度和交叉极化鉴别率可分别表示为

$$XPI_2 = |J_{22}|/|J_{21}| = |\tan \varphi| \quad (17)$$

$$XPD_2 = |J_{22}|/|J_{12}| = |\tan \varphi \cos \theta| \quad (18)$$

由式(15)和(17)可知,对于 x, y 轴方向放置的正交偶极子,两阵元的交叉极化隔离度 XPI_1 和 XPI_2 是相同的,这与两阵元关于视轴方向(z 轴)对称的几何位置关系相一致。

上述指标是针对双极化通信系统而提出的,以衡量不同极化传输信道之间的干扰,而对于双极化雷达系统,通常更关注交叉极化对目标极化特性测量性能的影响。按照式(15)~(18)的定义,对于式(12)形式的双极化阵元,衡量其交叉极化干扰的指标有4个,这对分析交叉极化对整个系统的影响带来不便。另外,每个指标都只用到极化辐射矩阵 J 中的两个元素,无法完整地反映双极化阵元的极化辐射特性。下面将从目标极化特性测量的角度分析正交偶极子的交叉极化隔离度。

式(11)形式的辐射电场,经远场区目标散射后,其接收回波可以表示为

$$E_r = \begin{bmatrix} E_{rh} \\ E_{rv} \end{bmatrix} = J^T S J \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中:

$$S = \begin{bmatrix} S_{hh} & S_{hv} \\ S_{vh} & S_{vv} \end{bmatrix} \quad (20)$$

为目标的极化散射矩阵。

对于分时极化测量体制雷达^[14],发射时两正交极化天线交替辐射信号,接收时两天线同时接收回波信号。那么,第一、二个发射脉冲的回波信号可分别表示为

$$E_{r1}^A = \begin{bmatrix} E_{rh1}^A \\ E_{rv1}^A \end{bmatrix} = J^T S J \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$E_{r2}^A = \begin{bmatrix} E_{rh2}^A \\ E_{rv2}^A \end{bmatrix} = J^T S J \begin{bmatrix} 0 \\ E_y \end{bmatrix} \quad (22)$$

假设 $E_x = E_y = 1$, 那么,式(21)和(22)可以表示为

$$\begin{bmatrix} E_{rh1}^A \\ E_{rv1}^A \\ E_{rh2}^A \\ E_{rv2}^A \end{bmatrix} = P^A \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}^A & P_{12}^A & P_{13}^A & P_{14}^A \\ P_{21}^A & P_{22}^A & P_{23}^A & P_{24}^A \\ P_{31}^A & P_{32}^A & P_{33}^A & P_{34}^A \\ P_{41}^A & P_{42}^A & P_{43}^A & P_{44}^A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中:

$$\begin{aligned} P_{11}^A &= \sin^2 \varphi; P_{12}^A = P_{13}^A = \cos \theta \sin \varphi \cos \varphi; \\ P_{14}^A &= \cos^2 \theta \cos^2 \varphi; P_{21}^A = P_{31}^A = -\sin \varphi \cos \varphi; \\ P_{22}^A &= P_{33}^A = \cos \theta \sin^2 \varphi; P_{23}^A = P_{32}^A = -\cos \theta \cos^2 \varphi; \\ P_{24}^A &= P_{34}^A = \cos^2 \theta \sin \varphi \cos \varphi; P_{41}^A = \cos^2 \varphi; \\ P_{42}^A &= P_{43}^A = -\cos \theta \sin \varphi \cos \varphi; P_{44}^A &= \cos^2 \theta \sin^2 \varphi. \end{aligned}$$

对于同时极化测量体制雷达^[14],发射时两正交极化天线同时辐射信号,接收时两天线同时接收目标回波信号,它具有目标极化特性测量速度快、精度高等优点,其接收回波可表示为

$$E_r^S = \begin{bmatrix} E_{rh}^S \\ E_{rv}^S \end{bmatrix} = J^T S J \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} \quad (24)$$

对每个天线的接收回波分别使用 E_x 和 E_y 进行匹配滤波,得到

$$\begin{bmatrix} E_{rh}^S & E_{rhv}^S \\ E_{rvh}^S & E_{rvv}^S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{rh}^S * E_x & E_{rh}^S * E_y \\ E_{rv}^S * E_x & E_{rv}^S * E_y \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中“*”表示卷积运算。与分析分时极化测量时一样,本文重点分析正交极化天线的特性,而不考虑发射波形的影响。假设 $E_x * E_x = 1, E_y * E_y = 1, E_x * E_y = 0$, 式(25)可以表示为与式(23)一样的形式,有

$$\begin{bmatrix} E_{rh}^S \\ E_{rvh}^S \\ E_{rvh}^S \\ E_{rvv}^S \end{bmatrix} = P^S \begin{bmatrix} S_{hh} \\ S_{vh} \\ S_{hv} \\ S_{vv} \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中, $P^S = P^A = P$. 当 $E_x * E_y = 0$ 时,双极化天线的空域极化特性对同时和分时极化测量性能具有相同的影响,仅考虑天线特性的情况下,同时极化测量体制的交叉极化隔离度和分时极化测量体制是一样的。理论上,如果天线的极化特性已知,通过求解式(23)或者式(26)形式的线性方程组,可以得到目标极化散射矩阵的估计为

$$\tilde{S} = P^{-1} E_r \quad (27)$$

式中, $\tilde{S} = [\tilde{s}_{hh} \quad \tilde{s}_{hv} \quad \tilde{s}_{vh} \quad \tilde{s}_{vv}]^T$.

条件数刻画了求解线性方程时,误差经过系数矩阵的传播扩大为解向量的误差程度,是衡量线性方程数值稳定性的重要指标^[15]。解的准确性可用矩阵 P 的条件数来衡量,记为 $\text{cond}(P)$. $\text{cond}(P)$ 越大,矩阵 P 的扰动对解的影响越大, $\tilde{S}$ 的估计性能将越差。当矩阵 P 是正交或酉矩阵时,其条件数等于 1,对目标极化散射矩阵的估计性能最好。

对于双极化雷达系统,其交叉极化隔离度可以定义为

$$XPI^P = \frac{\text{cond}(P) + 1}{\text{cond}(P) - 1} \quad (28)$$

式中, $\text{cond}(P) = 1/\cos^2 \theta$. 当 $\text{cond}(P) \rightarrow 1$, 交叉极化隔离度 $XPI^P \rightarrow \infty$, 对目标极化散射矩阵的估计性能就越好;当 $\text{cond}(P) \rightarrow \infty$, 交叉极化隔离度 $XPI^P \rightarrow 1$, 对目标极化散射矩阵的估计就更容易受到观测误差的影响,其估计性能就越差。

2. 仿真及结果分析

这一节将重点对正交偶极子的线极化比和交叉极化隔离度进行仿真分析。

图 4(图 4b(见 424 页))所示为正交偶极子的线极化比随扫描角度的变化规律。由图 4 可见,正交偶极子天线的线极化比随扫描角度的改变而变化,随 φ 的变化起伏比较大,而随 θ 的变化相对比较平缓。

由于在不同的波束扫描角度下,正交偶极子的极化特性不同,通过式(27)求解得到的目标极化散射矩阵的精度也会不同。定义目标极化散射矩阵的测量误差为

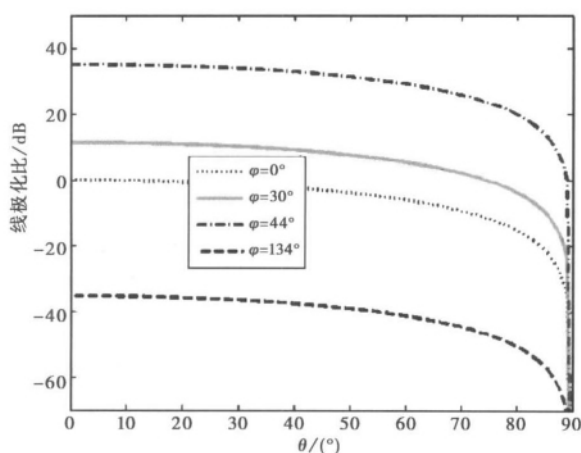
(a) 随 θ 的变化曲线

图4 线极化比随扫描角度的变化曲线

$$Error(S) = \frac{\sum_{n=1}^N \|\tilde{S}(n) - \text{vec}(S)\|}{N \|\text{vec}(S)\|} \quad (29)$$

式中: N 为测量次数; $\text{vec}(S) = [s_{hh} \ s_{hv} \ s_{vh} \ s_{vv}]^T$.

图5(见424页)所示为不同扫描角度情况下,测量矩阵 P 的条件数与对应角度观测下的测量误差。仿真中设置信噪比为 20 dB, 每个观测角度下蒙特卡洛仿真次数 $N = 500$, 目标极化散射矩阵 $\|\text{vec}(S)\| = 1$ 。由图5可见,目标极化散射矩阵测量误差的变化规律与测量矩阵 P 的条件数相一致,条件数越大,测量误差也就越大。因此,使用矩阵 P 的条件数定义正交偶极子的交叉极化隔离度是合理的。

图6(见424页)所示为正交偶极子的交叉极化隔离度 XPI^P 在 $u-v$ 平面的分布情况,由图可见, XPI^P 随着 θ 的增大而减小,当 $\theta = 0^\circ$ 时,交叉极化隔离度最大,相应地,在该扫描空域内,对目标极化散射矩阵的估计比较精确;当 $\theta = 90^\circ$ 时,交叉极化隔离度最小,为 0 dB,在该扫描空域内,对目标极化散射矩阵的估计精度最差。

3. 结 论

双极化相控阵天线的极化特性随扫描角度的变化而剧烈变化,极化纯度也随之恶化,这将影响相控阵体制全极化雷达获取目标极化信息的精度和能力。以正交偶极子为阵元模型,研究了双极化阵元辐射电场的极化状态随扫描角度的变化规律,对线极化比、交叉极化隔离度和交叉极化鉴别率进行了理论和仿真分析,分析结果表明正交偶极子的极化状态随扫描角的变化比较明显,在对角平面($\varphi =$

$45^\circ, 135^\circ$), 单个偶极子的交叉极化隔离度和交叉极化鉴别率都能达到 0 dB。对于双极化雷达系统,采用传统的交叉极化指标定义,其参数有 4 个,给双极化天线的特性分析带来了不便。为了衡量整个雷达系统的交叉极化特性,结合分时和同时极化测量的观测方程,使用测量系数矩阵的条件数定义了双极化雷达系统的交叉极化隔离度,该参数能直接反映雷达系统获取目标极化信息的精度,为指导双极化阵元天线设计与衡量其极化特性提供了一种简易途径。本文仅仅分析了一对正交极化阵元的极化特性,阵元之间的耦合、整个阵列的极化特性等将是下一步需要研究的内容。

参考文献

- [1] HSU S H, REN Y J, CHANG K. A dual-polarized planar-array antenna for S-band and X-band airborne applications [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2009, 51(4): 70-78.
- [2] VAUGHAN R G. Polarization diversity in mobile communications [J]. IEEE Trans Veh Technol, 1990, 39(3): 177-186.
- [3] 李建新, 李迎林, 张金平. 一种新型星载 SAR 宽带双极化微带天线研究 [J]. 电波科学学报, 2009, 24(2): 354-358.
LI Jianxin, LI Yinglin, ZHANG Jinping. Study on a novel dual-polarized and wide-band microstrip patch antenna for SAR applications [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2009, 24(2): 354-358. (in Chinese)
- [4] LINDMARK B, NILSSON M. On the available diversity gain from different dual-polarized antennas [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(2): 287-294.
- [5] ZHANG Guifu. Phased array radar polarimetry for weather sensing: a theoretical formulation for bias corrections [J]. IEEE Trans GRS, 2009, 47(11): 3679-3689.
- [6] GREGORWICH W, WARD R B, HAL R A. An Electronically scanned dual-polarized antenna for tracking multiple targets simultaneously [C]//IEEE Aerospace Applications Conference. Vail, USA, 1994: 241-251.
- [7] 罗 佳, 王雪松, 李永祯, 等. 天线空域极化特性的表征及分析 [J]. 电波科学学报, 2008, 23(4): 620-628.
LUO Jia, WANG Xuesong, LI Yongzhen, et al. Description and analysis of spatial polarization characteristics of antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science,

2008, 23(4): 620-628. (in Chinese)

- [8] 戴幻尧, 李永祯, 薛松, 等. 相控阵天线空域极化特性的高频仿真分析[J]. 电波科学学报, 2011, 26(2): 316-322.

DAI Huanyao, LI Yongzhen, XUE Song, et al. High frequency simulation analysis of spatial polarization characteristic of phased array antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(2): 316-322. (in Chinese)

- [9] BORYSSENKO A O. Polarization constraints in dual-polarized phased arrays derived from an infinite current sheet model[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8: 955-958.

- [10] STUTZMAN W L. Polarization in Electromagnetic Systems[M]. New York: Artech House, 1992.

- [11] SIKINA T V, TROTT K D. Polarization Isolation Limit for Dual-Polarized Phased Array Systems[C]// Phased Array Systems and Technology. Waltham, October 12-15, 2010: 796-800.

- [12] 刘新东. 张量分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

- [13] LUDWIG A C. The definition of cross polarization [J]. IEEE Trans AP, 1973, 21(1): 116-119.

- [14] CHANG Y L, WANG X S, LI Y Z, et al. The signal selection and processing method for polarization measurement radar [J]. Sci China Ser F-Inf Sci, 2009, 52(10): 1926-1935.

- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

作者简介



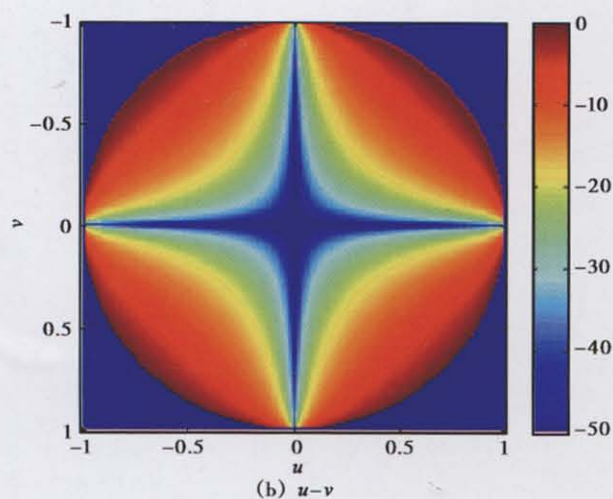
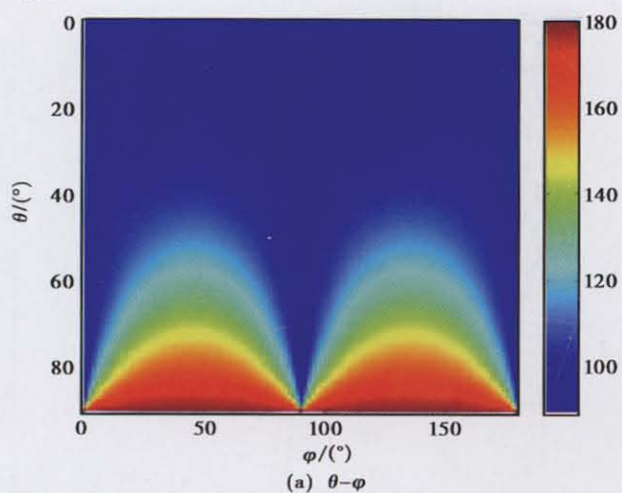
李棉全 (1985—), 男, 湖南人, 国防科技大学信息与通信工程专业博士生, 研究方向为雷达极化信息处理、雷达成像和目标识别。



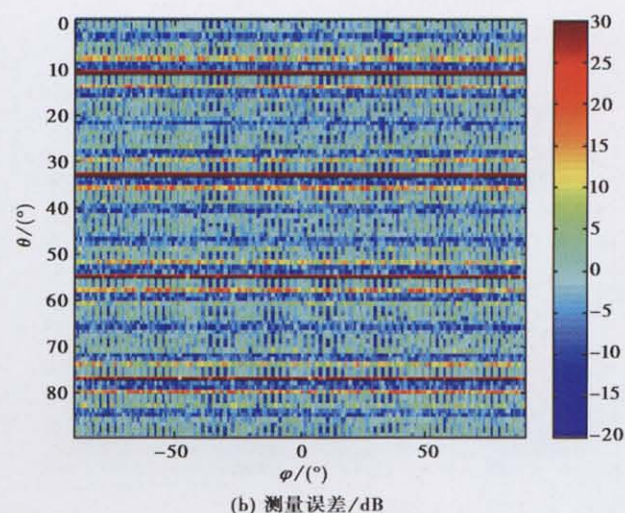
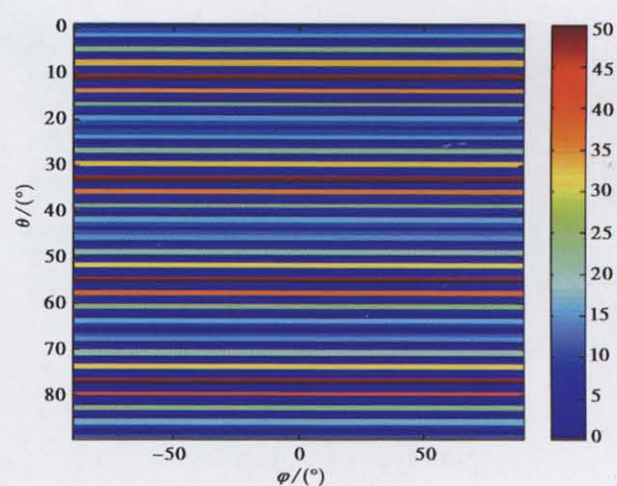
李永祯 (1977—), 男, 内蒙古人, 国防科技大学副教授, 主要从事雷达极化信息处理、电子战建模与仿真、目标检测与识别等方面的研究。在国际国内期刊、会议上发表论文 50 余篇, 获军队科技进步二等奖 2 项, 出版专著 1 部。



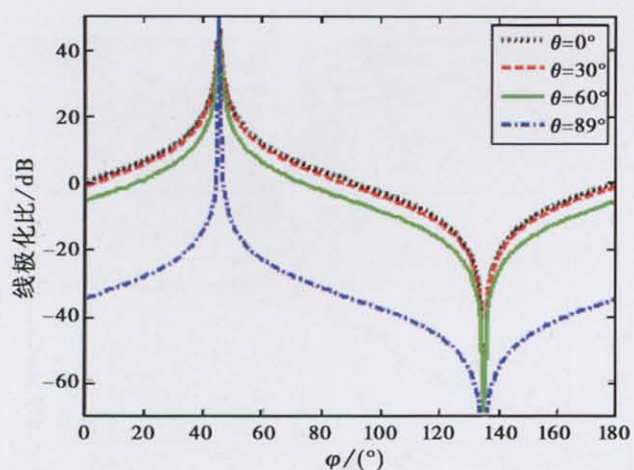
王雪松 (1972—), 男, 内蒙古人, 国防科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员, 主要从事雷达极化信息处理、雷达电子战等领域的研究。



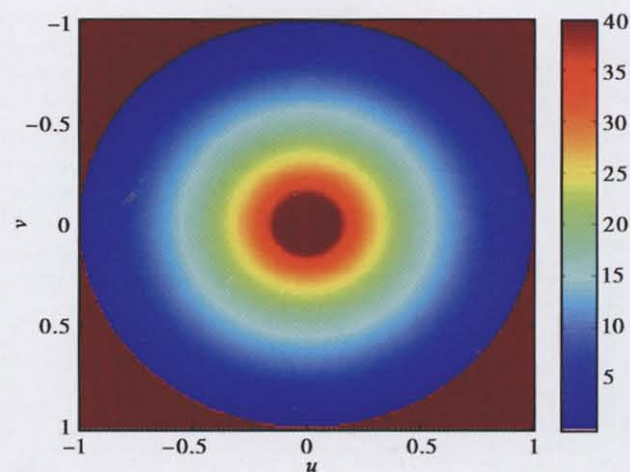
李棉全图 2 r 随空间指向角 θ 、 ϕ 的变化情况



李棉全图 5 测量矩阵条件数和测量误差的对照



李棉全图 4 (b) 随 ϕ 的变化曲线



李棉全图 6 双极化雷达系统的交叉极化隔离度 (单位/dB)