

文章编号: 1001- 2486(2010) 01- 0084- 06

电扫偶极子相控阵天线的空域极化特性分析*

戴幻尧¹, 李永祯¹, 陈志杰², 王雪松¹, 肖顺平¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 训练部信息中心, 湖南 长沙 410073)

摘要: 推导了偶极子线性阵列和平面相控阵天线在空域波束电扫时辐射场的极化特性, 建立了数学模型。计算结果和仿真分析表明: 偶极子相控阵天线辐射场在空域扫描各个波位的极化特性并不一致, 是具有一定差异的, 当待测目标的方向偏离天线电轴方向时, 所接收到的电波极化状态也会随偏离电轴的方向和仰角而改变。该结论对于现代电子战中相控阵天线系统的精确建模与仿真具有重要意义, 对于研究和利用天线的极化特性进行雷达极化抗干扰技术是非常必要的。

关键词: 阵列天线; 相控阵; 空域极化特性; 波束电扫

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

Spatial Polarization Characteristics of Electronically Scanning Dipole Phased Arrays Antenna

DAI Huanyao¹, LI Yongzhen¹, CHEN Zhijie², WANG Xuesong¹, XIAO Shunping¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Information Center of Training Department, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The spatial polarization characteristic of electromagnetic field radiated by linear dipole array and planar array antenna scanning in different direction was derived and modeled theoretically and mathematical in this paper. The calculation results and simulation analysis show that the polarization properties of phased arrays in various beam positions are diverse, and the polarization state of EM wave will change with the azimuth and elevation of the electrical boresight when the target direction deviates from the antenna boresight direction. The conclusion is of significance to high-precision modeling and simulation for phased array antennas, and is also important for anti-interference by making use of polarization information.

Key words: array antenna; phased array; spatial polarization characteristics; beam electrical scanning

随着极化测量技术、矢量信号处理及微波技术的快速发展, 未来具有极化测量能力的雷达系统将逐渐取代单极化雷达, 成为雷达技术发展的一个主流方向。极化信息的充分利用为雷达系统削弱恶劣电磁环境的影响、对抗有源干扰、抑制环境杂波、反隐身和识别目标等方面, 提供了颇具潜力的技术途径, 可以有效地提高现代雷达的性能^[1-3]。但是, 就目前而言, 实际具备全极化测量及应用能力的军用雷达, 还仅限于大型的、专业的空间目标监视雷达, 这类雷达因为增加了全极化发射和接收能力, 在系统复杂性方面付出了昂贵代价。具备全极化能力的战术防空雷达还未见报道。文献[4-6]创造性地提出利用单极化机械扫描体制的极化特性获取目标全极化散射信息的方法, 具有一定的启发性, 但是该方法在获取运动目标全极化散射矩阵和多目标跟踪战情下显得无能为力, 驻留时间短、天线口径内加装极化栅网较大程度地衰减极化与工作极化相正交的信号等限制, 使得可利用的交叉极化分量很弱, 应用前景受到一定限制。

相控阵雷达克服了机械天线惯性扫描的缺点, 通过控制阵列天线各个单元的相位, 达到控制天线波束指向的目的, 突出了电控快速、准确的优点。现有文献关于相控阵天线特性的研究多关心降低副

* 收稿日期: 2009- 04- 15

基金项目: 国家自然科学基金重点项(60736006); 国家自然科学基金青年科学基金项目(60802078); 国防科技大学博士研究生创新资助项目(B090401)

作者简介: 戴幻尧(1982-), 男, 博士生。

瓣^[7]、提高天线增益降低波束宽度^[8]、提高天线纯度^[9]、开发共型阵^[10-11]等方面,对极化特性的研究多只停留在主平面工作时的特性,没有更多地考虑在其他空域指向的方位、俯仰电扫的极化特性。实际上,相控阵天线在空域扫描各个波位时的极化特性是不同的,而且当待测目标的方向偏离天线电轴方向时,所接收到的电波极化状态会随着偏离电轴的方向和仰角而改变。因此,研究电扫时相控阵天线的极化特性不仅具有很高的理论研究价值,而且也有助于提高目标识别能力,具有重要的军事意义。本文重点研究相控阵天线的空域极化特性,通过理论推导和仿真计算,得到了定性和定量的描述,这为下一步的应用工作提供了重要的理论基础和实践依据。

1 电扫平面阵天线的空域极化特性建模

考虑一个二维 $M \times N$ 个阵元的平面阵,每个阵元具有相同的方向图, θ_i , ϕ_i 分别为各阵元局部坐标系中的俯仰角和方位角。为了考察该型阵列的交叉极化特性,需计算每个阵元在阵元局部坐标系中给定极化基下的极化分量,然后通过坐标变换,对阵元局部坐标系中的极化分量转换到全局坐标系中进行叠加,在建立阵列的时候,阵元所在的坐标系可在球坐标系下赋予不同的位置,三维的坐标变换可以通过欧拉矩阵变换来实现,因此建模的关键是各单元极化分量的旋转变换,流程如下:

(1) 建立阵元单位矢量在全局坐标系中的坐标;

(2) 根据平面阵列天线的具体几何结构以及各阵元的位置关系,建立各阵元局部坐标系在全局坐标系中的坐标;

(3) 建立阵元方向单位矢量在各阵元局部直角坐标系中的坐标;

(4) 在全局坐标系中计算阵元的单位矢量在其局部坐标轴上的投影;

(5) 利用阵元方向单位矢量在各阵元局部直角坐标系中的坐标和阵元的单位矢量在各阵元局部坐标轴上的投影的关系,求解俯仰角和方位角在全局坐标系与各阵元局部坐标系中的转换关系,完成阵元的极化分量在全局坐标系中的转换。

如图 1 所示, ε_x , ε_y , ε_z 为三维空间直角坐标变换的三个旋转角,也称欧拉角,对 X 轴进行旋转 ε_x 角时,旋转矩阵定义为 R_1 ,对 Y 轴进行旋转 ε_y 角时,旋转矩阵定义为 R_2 ,对 Z 轴进行旋转 ε_z 时,旋转矩阵定义为 R_3 。因此旋转矩阵可表示为 $R_0 = R_3 R_2 R_1$,展开得

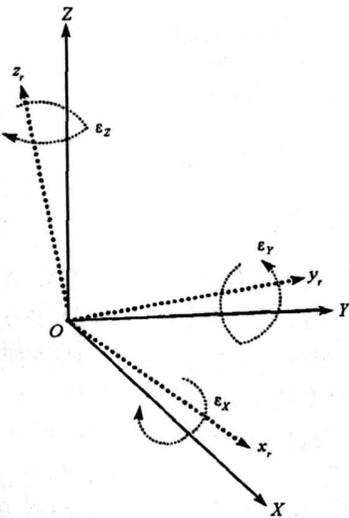


图 1 坐标系旋转和旋转矩阵的定义
Fig. 1 Definition of coordinate rotation and euler rotation matrix

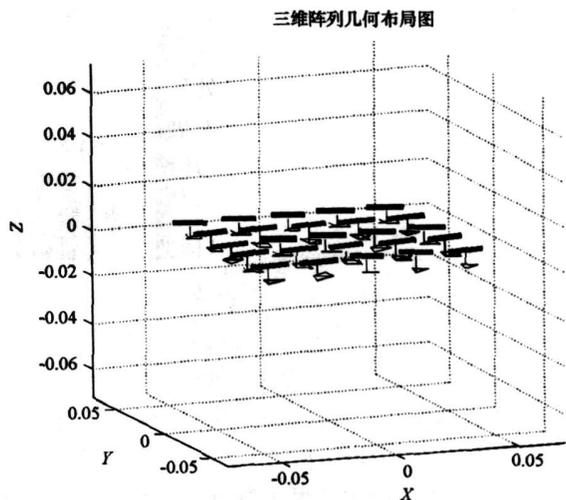


图 2 平面偶极子阵列的布局图
Fig. 2 Dipole planar array geometry figure

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_\gamma \cos \varepsilon_z & \cos \varepsilon_\gamma \sin \varepsilon_z & -\sin \varepsilon_\gamma \\ -\cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_z + \sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_\gamma \cos \varepsilon_z & \cos \varepsilon_x \cos \varepsilon_z + \sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_\gamma \sin \varepsilon_z & \sin \varepsilon_x \cos \varepsilon_\gamma \\ \sin \varepsilon_x \sin \varepsilon_z + \cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_\gamma \cos \varepsilon_z & -\sin \varepsilon_x \cos \varepsilon_z + \cos \varepsilon_x \sin \varepsilon_\gamma \sin \varepsilon_z & \cos \varepsilon_x \cos \varepsilon_\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

球坐标系下 $[\theta, \varphi]$ 的单位矢量为 $\mathbf{n} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$, 因此由全局坐标系变换到阵元局部坐标系的笛卡尔坐标表示为

$$[x, y, z]^T = \mathbf{R}_0(\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)^T \quad (2)$$

$$\theta = \arccos z, \quad \varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3)$$

当阵元的电场在球坐标系下表示为 $E_i(\theta, \varphi)$, 两个正交极化分量分别为 $E_{i\theta}E_{i\varphi}$ 时, 在阵元局部直角坐标系 (x, y, z) 下可表示为

$$\begin{cases} E_{ix} = E_{i\theta} \cos \theta \cos \varphi - E_{i\varphi} \sin \varphi \\ E_{iy} = E_{i\theta} \cos \theta \sin \varphi - E_{i\varphi} \cos \varphi \\ E_{iz} = -E_{i\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

将各分量在局部直角坐标系 (x, y, z) 表示转换为全局直角坐标系下表示^[10-11],

$$[E_{ix} \ E_{iy} \ E_{iz}]^T = \mathbf{R}_0^{-1}(\varepsilon_x, \varepsilon_\gamma, \varepsilon_z) \cdot [E_x \ E_y \ E_z] \quad (5)$$

就可以确定各阵元在全局坐标系 (θ, φ) 极化基下的两个极化分量:

$$\begin{cases} E_{i\theta}(\theta, \varphi) = \frac{E_{ix} \cos \varphi + E_{iy} \sin \varphi}{\cos \theta} \\ E_{i\varphi}(\theta, \varphi) = -E_{ix} \sin \varphi + E_{iy} \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

因此, 平面阵列天线的远区辐射场可以表示为

$$E_{array}(\theta, \varphi) = \sum_i^N G_i(\theta, \varphi) E_i(\theta, \varphi) = \sum A_i e^{jP_i(\theta, \varphi)} \cdot E_i(\theta, \varphi) = \sum A_i e^{j\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}_i} \cdot E_i(\theta, \varphi) \quad (7)$$

其中, $\mathbf{r}_i = (x_i, y_i, z_i)$ 表示第 i 个阵元在全局坐标系下的位置, A_i 表示对第 i 个阵元的激励电流; $E_i(\theta, \varphi)$ 表示第 i 个阵元的方向图。

为简化分析, 这里设平面阵在 xoy 面等间距 $M \times N$ 排列, 间距分别为 d_x, d_y , 并且天线口径电场为均匀分布时, 横向和纵向电场的阵因子和在极化基 $[\theta, \varphi]$ 下的场表示为

$$F_\theta(\theta, \varphi) = \frac{E_\theta(\theta, \varphi)}{\sqrt{MN}} \frac{\sin(Mk_0 \frac{d_x}{2} \cos \varphi \sin \theta) \sin(Nk_0 \frac{d_y}{2} \sin \varphi \sin \theta)}{\sin(k_0 \frac{d_x}{2} \cos \varphi \sin \theta) \sin(k_0 \frac{d_y}{2} \sin \varphi \sin \theta)} \quad (8)$$

$$F_\varphi(\theta, \varphi) = \frac{E_{i\varphi}(\theta, \varphi)}{\sqrt{MN}} \frac{\sin(Mk_0 \frac{d_x}{2} \cos \varphi \sin \theta) \sin(Nk_0 \frac{d_y}{2} \sin \varphi \sin \theta)}{\sin(k_0 \frac{d_x}{2} \cos \varphi \sin \theta) \sin(k_0 \frac{d_y}{2} \sin \varphi \sin \theta)} \quad (9)$$

由上式可轻易得出该型平面阵列天线的空域极化比, 可以看出, 如果用极化比或交叉极化鉴别量来表征一个等幅分布相控阵天线的空域极化特性, 其表达式是一个关于阵元辐射场的函数, 与阵元数目、排列方式以及阵元间距关系不大, 这些因素(主要是阵因子)只会影响波束宽度、天线方向图的形状, 而不会影响在不同扫描空域上的交叉极化分量关于主极化分量的相对变化率, 阵列的极化特性主要取决于阵元的极化特性和扫描的极化状态。对于任意一个阵列天线, 主极化和交叉极化在任意扫描角下的辐射场都需要乘以阵列因子, 因此整个阵列的极化特性的问题可以等效用单个阵元的极化特性来描述。对于密度加权、幅度加权和共形阵列天线, 由于口径分布不是等幅的, 横向和纵向方向图函数不能作为公因子提出, 考虑多阵元间的互耦时的理论分析要更加复杂, 可以考虑其他等效的计算方法, 这一部分将另文作进一步的研究。

2 仿真计算

对平面偶极子阵列建模, 进行了大量的仿真计算, 偶极子阵列布局为 5×5 等间距排列, 排列方向均

平行于 x 轴,如图 2 所示, xy 向间距 0.7λ , 谐振频率为 10GHz , 偶极子长度为 1.5cm , 距离地面高度 0.75cm , 平面阵列的布局如图 2 所示。仿真条件分别考虑了 4 种情况: 主波束在法线方向时, 不同方位观测角度下极化特性及俯仰角度下的极化特性, 以及主波束在空域其他方位面和俯仰面上扫描时, 方位电扫的极化特性和俯仰电扫的极化特性。仿真结论和前面的理论分析的结果较吻合, 通过进一步分析, 得到了一些有意义的结论: 相控阵天线的极化特性和三个量密切相关, 第一, 天线机械结构确定的最大辐射方向, 即法线方向; 第二, 实际电扫时最大辐射的波束指向, 通常认为就是主波束的指向, 也称为电轴方向; 第三, 前两者的差值, 这里定义为“波束偏斜角度”, 指的是空域电扫时主波束的指向偏离法线方向的角度。相控阵天线在不同的空域指向上进行电扫时具有不同的方向图结构, 在某些特定的空域扫描角度下的方向图具有复杂的极化结构, 既含有主极化分量, 又含有交叉极化分量, 定性和定量分析如下。

2.1 不同观测方位和俯仰向的极化特性

如图 3、4 所示, 天线波束指向在法线方向时, 当测量目标方向偏离天线电轴方向时, 或者说当观测点的俯仰和方位角度不在主平面内时, 所接收到的电波极化状态将随着偏离电轴的方向和仰角而改变, 此时在天线的主瓣区域内不仅有主极化分量, 而且还有交叉极化分量; 观测点的俯仰角度增大, 波束宽度越窄, 天线增益降低, 方位向的极化特性变化不大。俯仰电扫的主极化方向图和交叉极化方向图形状是相似的, 观测方位偏离电轴不同角度时, 方向图的形状波束宽度、辐射增益均没有较大变化, 随着观测方位角度增大, 交叉极化分量增大, 俯仰电扫的极化纯度降低。表 1 给出了波束在法线方向时, 不同观测方向的极化特性的定量描述。

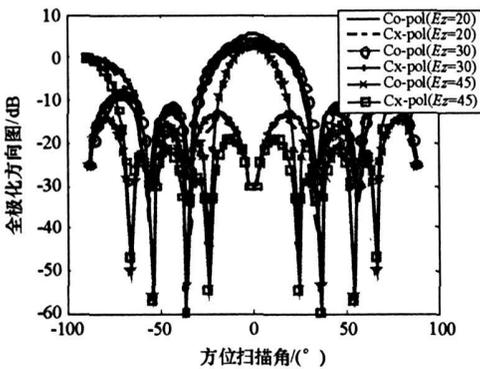


图 3 法线方向方位极化方向图

Fig. 3 Polarization pattern of azimuth direction when beam position in normal direction

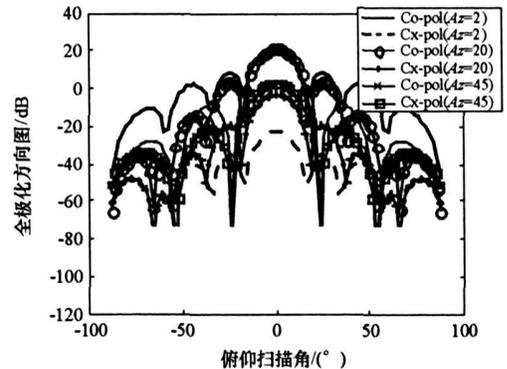


图 4 法线方向俯仰极化方向图

Fig. 4 Polarization pattern of elevation direction when beam position in normal direction

表 1 法线方向不同观测角度下的极化特性定量描述

Tab. 1 Polarization characteristic description in different observation angle from normal direction

波束在法线方向观测点偏离轴向一定角度	方位向极化纯度	特性
观测点偏离电轴仰角 10°	- 18dB	俯仰向的极化纯度变化不大
观测点偏离电轴仰角 20°	- 18dB	
观测点偏离电轴仰角 30°	- 16dB	
观测点偏离电轴仰角 45°	- 20dB	
波束在法线方向观测点偏离方位一定角度	俯仰向极化纯度	特性
观测点偏离电轴方位 0°	低于 - 50dB	主极化 V 极化, 交叉极化 H 极化
观测点偏离电轴方位 2°	- 44dB	方位向的极化纯度随观测方位
观测点偏离电轴方位 20°	- 24dB	增大而降低
观测点偏离电轴方位 45°	- 16dB	
观测点偏离电轴方位 90°	仅有交叉极化	

2.2 波束空域方位和俯仰上电扫的极化特性

当天线波束在空域扫描,电轴的指向偏离阵面的法线方向,两者存在一定的偏斜角时,相控阵天线辐射的方向图发生改变。如图 5、6 所示,在不同的方位偏斜和俯仰偏斜下,相同的观测点所接收到的电波极化状态将随着偏离电轴的方位和仰角而改变,此时在天线的主瓣区域内不仅有主极化分量,而且还有交叉极化分量。当俯仰偏斜角度和观测角度固定时,方位偏斜角度增大,对天线方位向的极化特性影响很大,交叉极化电平升高,方位电扫的极化纯度降低。特别是当俯仰偏斜角度为 30° ,方位偏斜角度为 45° 时,主交叉极化相等。

当方位偏斜角度和观测角度固定时,增大俯仰偏斜角度,俯仰的电扫的极化特性没有变化,天线方向图结构发生较大变化,副瓣电平升高,主瓣增益略有下降。增加观测方位角度,交叉极化升高。表 2 定量给出了波束空域扫描时的极化特性。

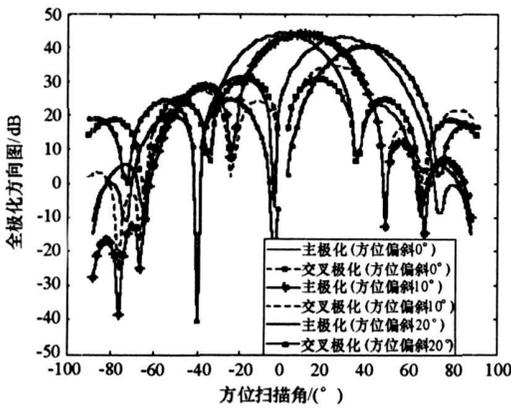


图 5 多个方位偏轴角度下的方位电扫方向图
Fig. 5 Azimuth polarization pattern of beam scanning in different direction

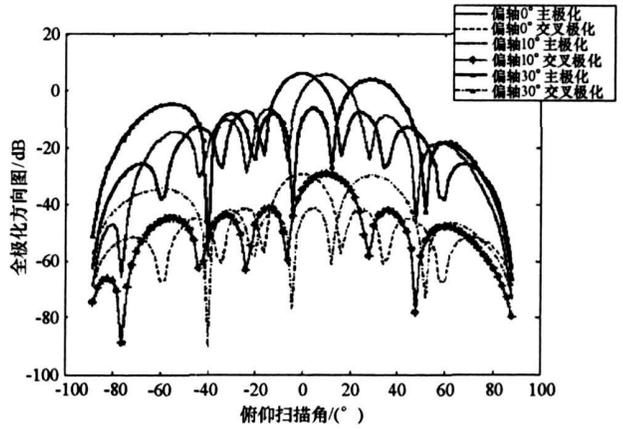


图 6 多个俯仰偏轴角度下的方位电扫方向图
Fig. 6 Azimuth polarization pattern of beam scanning in different elevation direction

表 2 空域扫描时的极化特性定量描述

Tab. 2 Polarization characteristic description of beam scanning in spatial

波束在空域扫描, 偏离法线方向 方位偏斜固定, 俯仰偏斜角度增大	俯仰电扫极化纯度	特性
波束方位偏斜 ρ , 俯仰偏斜角度为 0°	- 35 dB	交叉极化方向图和主极化方向图结构相似
波束方位偏斜 ρ , 俯仰偏斜角度为 10°	- 35 dB	
波束方位偏斜 ρ , 俯仰偏斜角度为 20°	- 35 dB	俯仰电扫的极化纯度没有变化
波束方位偏斜 ρ , 俯仰偏斜角度为 30°	- 35 dB	
波束在空域扫描, 偏离法线方向 俯仰偏斜角度固定, 方位偏斜角度增大	方位电扫极化纯度	特性
波束方位偏斜 0° , 俯仰偏斜角度为 30°	- 15 dB	
波束方位偏斜 10° , 俯仰偏斜角度为 30°	- 10 dB	增大波束方位偏斜角度, 交叉极化分量增大
波束方位偏斜 20° , 俯仰偏斜角度为 30°	- 7 dB	方位电扫极化纯度降低
波束方位偏斜 30° , 俯仰偏斜角度为 30°	- 5 dB	

3 结论

推导和分析了平面阵的辐射场的极化特性,得到了空域极化特性描述模型,指出相控阵天线在空域扫描的各个波位的极化特性是有差异的,而且当待测目标或观测的方向偏离天线电轴方向时,所接收到的电波极化状态会随着偏离电轴的方向和仰角而改变。讨论了影响相控阵天线的空域极化特性的主要

因素。通过仿真,定性和定量地分析了天线在空域方位电扫和俯仰电扫时的主极化和交叉极化方向图,分析结果表明,在空间扫描的不同位置,相控阵天线的极化特性呈一定规律变化。

从各个不同的角度对相控阵天线的极化特性进行了分析,并给出了相应的分析结果。本文只是分析了均匀分布偶极子阵列天线的空域极化特性,而在实际应用中,阵元型式种类繁多,口径电场的幅度和相位加权,馈电方式、共形阵的各单元具有不同的指向的因素必然会给极化特性的分析带来新的问题和影响,还需要做更进一步的研究,但本文的分析结果具有一般性,作为对相控阵天线空域极化特性研究的初探,具有一定的理论和实际意义,对于在外场试验评估雷达威力和精度中减少天线极化特性的影响,修正相控阵雷达天线的仿真模型,丰富内场仿真理论,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Boemer W M. Recent Advances in Extra-wide-band Polarimetry, Interferometry and Polarimetric Interferometry in Synthetic Aperture Remote Sensing and Its Applications [J]. Radar, Sonar and Navigation, IEE Proceedings, 2003, 150 (3): 113- 124.
- [2] Wang X S, Chang Y L, Dai D H, et al. Band Characteristics of SINR Polarization Filter [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(4): 1148- 1154.
- [3] Howard S D, Caherbank A R. A Simple Signal Processing Architecture for Instantaneous Radar Polarimetry [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 2007, 53(4): 1282- 1289.
- [4] 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.
- [5] 罗佳,王雪松,李永祯,等. 一种估计来波信号极化状态的新方法[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 56- 61.
- [6] Luo J, Wang X S, Xiao S P. Spacial Polarization Characteristics of Antenna [C]// 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar Proceedings (APSAR- 2007), Huangshan, China, 2007: 139- 144.
- [7] Bray M G, Werner D H. Optimization of Thinned Aperiodic Linear Phased Arrays Using Genetic Algorithms to Reduce Grating Lobes during Scanning [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(12): 1732- 1742.
- [8] 王楠,薛正辉,杨仕明,等. 宽带超低副瓣相控阵天线时域远场辐射特性研究[J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1605- 1609.
- [9] 杜小辉,李建新,郑学誉. X波段双极化有源相控阵天线的设计[J]. 现代雷达, 2002, 5(9): 67- 69.
- [10] Qi Z S, Guo Y, Wang B H. Performance Analysis of MUSIC for Conformal Array [C]// 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WICOM07), Shanghai, 2007: 168- 171.
- [11] 齐子森,郭英,王布宏,等. 共型阵列天线 MUSIC 算法性能分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(11): 2674- 2677.

(上接第 78 页)

参考文献:

- [1] Small D, Wemer C, Nuesch D. Baseline Modelling for ERS- 1 SAR Interferometry [C]// IEEE IGARSS' 93, 1993: 1204- 1206.
- [2] Zebker H A. Interferometric SAR Processing Tutorial [EB]. <http://ee.stanford.edu/~zebker>, 1996: 208- 216.
- [3] Hiroshi K, Masahiro T. Baseline Estimation Using Ground Points for Interferometric SAR [C]// IEEE IGARSS' 97, 1997: 242- 244.
- [4] Singh K, Stussi N, Keong K L, et al. Baseline Estimation in Interferometric SAR [C]// IEEE IGARSS' 97, 1997: 454- 456.
- [5] Kneřdik S, Loffel O, Hein A, et al. A Novel Approach to Accurate Baseline Estimation [C]// IEEE IGARSS' 99, 1999: 254- 256.
- [6] Kohlhase A O, Feigl K L, Massonnet D. Applying Differential InSAR to Orbital Dynamics: A New Approach for Estimating ERS Trajectories [J]. Journal of Geodesy, 2003, 77: 493- 502.
- [7] Guarnieri A M. SAR Interferometry and Statistical Topography [J]. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing, 2002, 40(12): 2567- 2581.
- [8] Zhou C X, Ge L L, E D C, et al. A Case Study of Using External DEM in InSAR DEM Generation [J]. Geospatial Information, 2005, 8(1): 14- 18.
- [9] Eineder M. Efficient Simulation of SAR Interferograms of Large Areas and of Rugged Terrain [J]. IEEE Trans. Geosciences and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1415- 1427.