

# 海空目标部分极化雷达回波动态建模与实验验证

黎庞哲, 胡德秀\*, 崔毓函, 赵 闯, 杨 阳

(中国人民解放军信息工程大学数据与目标工程学院, 河南郑州 450001)

**摘 要:** 极化信息是雷达目标识别与特征提取的重要参数。现有对极化信号的研究多聚焦于全极化信号, 然而当雷达照射海面舰船或空中机动目标时, 目标姿态的连续变化、多散射中心干涉以及时变环境杂波等因素耦合作用, 使得回波往往呈现部分极化特性, 其极化状态并非恒定, 而是随时间不断演化, 蕴含丰富的目标物理信息。当前对实际雷达回波中广泛存在的部分极化信号的分析仅限于静态统计描述, 缺乏对其时变极化状态动态演化机理的建模与分析。针对上述问题, 本文建立了一种适用于海空动态目标的统一动态极化状态模型。该模型将接收信号分解为全极化分量与动态非极化分量, 并引入基于随机微分方程的目标姿态动态模型、极化参数-姿态角非线性耦合模型以及双尺度非极化功率模型, 构建了统一表征海面目标低频周期运动与空中目标高频机动特性的动态极化状态框架。基于此框架, 理论推导了时变极化度与斯托克斯参数的统计特性及谱结构, 进而揭示目标微动与散射起伏是驱动其极化状态演化的关键物理机理。实测数据的验证结果表明, 所提模型能够有效模拟海空目标部分极化信号的动态极化行为, 其极化度起伏与谱特征和实测数据基本一致, 验证了模型在揭示目标微动与散射机制方面的有效性。本文所建立的模型为动态部分极化信号的特征提取与目标识别提供了一个机理清晰、可解释性强的统一建模框架, 有助于从回波信号中定量反演目标的物理状态。

**关键词:** 部分极化信号; 时变极化状态; 极化度; 非极化分量; 斯托克斯参数; 庞加莱球

**基金项目:** 河南省自然科学基金青年基金(No.252300420991)

**中图分类号:** TN957.51

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2026)06-2790-15

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20260252

## Dynamic Modeling and Experimental Verification of Partially Polarized Radar Returns from Maritime and Aerial Targets

LI Pangzhe, HU Dexiu\*, CUI Yuhuan, ZHAO Chuang, YANG Yang

(Institute of Data and Target Engineering, The PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** Polarization information is a crucial parameter in radar target recognition and feature extraction. Existing researches on polarized signals mainly focuses on fully polarized signals. Nevertheless, when radar irradiates sea surface ships or aerial maneuvering targets, the coupled effects of continuous target attitude variation, multi-scattering center interference and time-varying environmental clutter endow radar echoes with inherent partially polarized characteristics. The polarization state of such echoes is time-varying rather than constant, and contains abundant physical information of targets. At present, the analysis of widely existing partially polarized signals in actual radar echoes is limited to static statistical description, while the modeling and analysis of dynamic evolution mechanism of time-varying polarization state are insufficient. To address this insufficiency in dynamic characterization, this paper aims to establish a unified dynamic polarization state model applicable to maritime and aerial dynamic targets. The model decomposes the received signal into a fully polarized component and a dynamically fluctuating unpolarized component. By introducing a target attitude dynamic model based on stochastic differential equations, a nonlinear coupling model between polarization parameters and attitude angles, and a dual-scale unpolarized power model, a unified dynamic polarization state framework is constructed. This framework simultaneously accommodates the low-frequency periodic motion of maritime targets and the high-frequency maneuvering characteristics of aerial targets. Based on this framework, the statistical properties and spectral structure of the time-varying degree of polarization and Stokes parameters are theoretically derived, revealing that target micromotion and scattering fluctuations are key physical mechanisms driving the evolution of the polarization state. Validation results against measured data demonstrate that the proposed model effectively simulates the dynamic polarization behavior of partially polarized signals from maritime and aerial targets. The fluctuations in the degree of polarization and spectral features of the simulated

signals show good consistency with the measured data, verifying the model's effectiveness in revealing target micromotion and scattering mechanisms. The model established in this work provides a unified modeling framework with clear mechanisms and strong interpretability for feature extraction and target recognition using dynamic partially polarized signals, facilitating the quantitative inversion of target physical states from radar returns.

**Keywords:** partially polarized signal; time-varying polarization state; degree of polarization; unpolarized component; Stokes parameter; Poincaré sphere

**Foundation Item(s):** Natural Science Foundation Youth Fund of Henan Province (No.252300420991)

## 0 引言

极化作为电磁波的本质矢量属性,是雷达对目标进行探测、识别与特征提取的关键物理维度。全极化雷达通过系统性地发射与接收多种极化组合的电磁波,能够完整获取目标的极化散射矩阵,已成为合成孔径雷达成像、精细目标分类、环境遥感及电子对抗等领域的核心技术<sup>[1-7]</sup>。然而,在实际雷达观测场景中,尤其是在面对复杂动态目标或处于非均匀传播环境(如存在海杂波、大气湍流、多径效应)时,接收到的回波信号往往并非完全极化,而是处于部分极化状态<sup>[8]</sup>。这种部分极化特性源于目标多散射中心干涉、姿态连续时变、环境去极化效应等多种物理过程的耦合作用,其极化状态表现为一个随时间随机演变的动态过程<sup>[9]</sup>。因此,对部分极化信号的动态演化机理进行建模与分析,是提升雷达对动态目标感知能力的关键科学问题。

近年来,针对部分极化信号的研究主要围绕其统计表征与参数估计展开,并逐渐向动态特性挖掘延伸。在经典理论层面,基于 Wolf 相干矩阵与 Stokes 矢量的二阶统计表征体系已相当完善<sup>[10-13]</sup>。随着阵列信号处理技术的发展,研究前沿集中于如何在欠定或低信噪比条件下实现参数的高精度、高分辨联合估计。Pan 等人<sup>[14]</sup>针对双极化互质阵列,提出了部分极化信号波达方向(Direction Of Arrival, DOA)与极化参数的欠定联合估计方法,通过利用信号的空间-极化域稀疏性,有效提升了自由度和估计精度。文献[15]指出传统研究中假设发射信号完全极化且忽略目标波动导致的非相干极化散射的局限性,构建了考虑发射极化捷变和非相干极化散射的不完全极化信号模型,提出一种基于旋转不变性技术(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)的方位-俯仰角估计算法。这类研究代表了当前的主流方向,其核心目标是通过先进的算法设计,从有限的观测快拍中更准确地提取信号的极化度、极化角等静态或时均统计参数。

与此同时,学者逐渐认识到极化状态的时变性本身具有重要价值。部分研究开始探索从动态极化信号中提取与目标物理状态相关的特征。有学者通过

建立分数阶傅里叶变换域分形模型,提取分形维数、截距、分形拟合误差和分形维数方差等统计量,实现低可观测目标检测<sup>[16]</sup>。Wang 等人<sup>[17]</sup>利用极化调制揭示目标与海杂波极化散射机制时变差异,提取极化稳定性、平均去相关时间和增强累积幅度特征实现海面小目标检测。这些工作标志着该领域正从纯粹的静态参数估计,向包含时间维度的动态信息利用过渡。

然而,通过对现有文献的深入剖析可以发现,当前研究范式存在一个显著的局限性<sup>[18-21]</sup>。现有绝大多数研究的核心是设计高精度算法,以从单次或有限次快拍中估计信号的极化度、极化角等静态统计参数。少量关注部分极化信号动态特性的工作,也仍然将部分极化信号的动态过程视为一个需要被处理或估计的“黑箱”。无论是致力于提高参数估计精度的算法研究,还是侧重于从数据中提取有效特征的识别方法,都未能建立一个能够正向描述极化状态连续演化物理机理的显式模型。现有方法缺乏将极化参数的时变轨迹与目标内在的运动学参数直接关联的数学框架,难以用一个统一模型同时解释海面目标受海浪调制的低频准周期极化起伏和空中目标因高速机动产生的高频随机极化演变。对非极化分量动态特性的刻画过于简单,未能区分环境杂波的长相关去极化和目标自身散射引起的快变去极化效应。这种机理模型的缺失,导致我们无法从动态极化信号中定量反演目标的物理状态,也制约了识别性能的进一步提升。

针对上述问题,本文从电磁散射物理与目标运动学出发,进行机理驱动的正向建模。本文提出了一个统一的动态极化状态模型框架。该模型将接收信号在物理层面分解为时变全极化分量与动态非极化分量,引入基于随机微分方程的目标姿态统一动力学模型,以普适地描述从低频周期运动到高频机动的连续谱。建立极化椭圆参数与姿态角之间的非线性耦合映射,以刻画复杂目标的电磁响应,从而构建包含慢变与快变的双尺度非极化分量功率模型<sup>[22-23]</sup>。模型定量揭示了目标姿态动态、散射起伏与环境扰动三者共同驱动极化度与 Stokes 参数演化的内在规律,为理解海空目标部分极化信号的时变行为提供了普适的物理建模框架。基于智能像素处理雷达(Ice multiParameter Imaging X-band radar, IPIX)实测数据的仿真实

验证结果表明,该模型能良好地表征真实数据的动态极化统计与谱特征,证实了其有效性与实用性。

## 1 部分极化信号时变极化状态模型

### 1.1 部分极化信号的静态表征

假设由雷达平台向海面 and 空中目标发射完全极化波,接收到的回波信号是目标散射、海面分散及大气传播效应的综合结果,具体场景如图1所示。

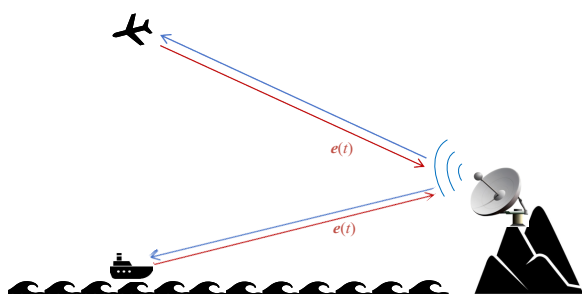


图1 海空目标观测场景

Figure 1 Observation scenario of maritime and aerial targets

考虑在该场景下雷达接收到一个准单色横电磁波回波信号,如图2所示,其瞬时电场矢量在一组正交基上可表示为

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} E_H(t) \\ E_V(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_H(t)e^{j\phi_H(t)} \\ E_V(t)e^{j\phi_V(t)} \end{bmatrix} e^{j\omega t} \quad (1)$$

其中,  $E_H(t)$ 、 $E_V(t)$  及  $\phi_H(t)$ 、 $\phi_V(t)$  分别为水平与垂直分量的时变包络与相位。对于准单色波,其极化状态由复基带矢量  $\mathbf{e}_p(t) = [E_H(t)e^{j\phi_H(t)}, E_V(t)e^{j\phi_V(t)}]^T$  完全描述。

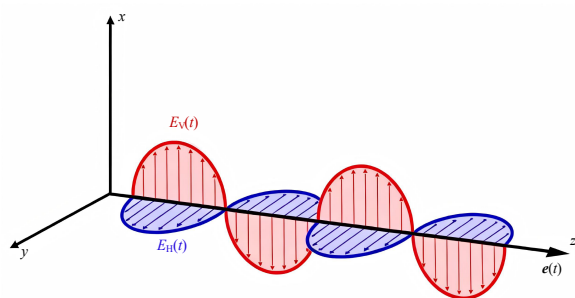


图2 极化信号分解示意图

Figure 2 Schematic illustration of polarimetric decomposition

令  $\mathbf{e}_p(t)$  为零均值、二阶平稳且各态历经的复随机过程,其信号极化的统计特性完全由其  $2 \times 2$  极化协方差矩阵所表征:

$$\mathbf{R}(t) = \mathbb{E}\{\mathbf{e}_p(t)\mathbf{e}_p^H(t)\} = \begin{bmatrix} r_{HH}(t) & r_{HV}(t) \\ r_{HV}(t) & r_{VV}(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\mathbb{E}(\cdot)$  表示期望算子,  $(\cdot)^H$  表示共轭转置。且矩阵

元素满足  $r_{HH} = \mathbb{E}\{|E_H(t)|^2\}$ ,  $r_{VV} = \mathbb{E}\{|E_V(t)|^2\}$ , 以及  $r_{HV} = \mathbb{E}\{E_H(t)E_V^*(t)\}$ 。相干矩阵  $\mathbf{R}(t)$  是 Hermitian 半正定矩阵,其秩直接决定了信号的极化状态:秩  $\text{rank}(\mathbf{R}(t)) = 1$  时,信号为完全极化,其极化状态时不变;秩为  $\text{rank}(\mathbf{R}(t)) = 2$  时,信号为部分极化,极化状态随时随机变化。部分极化信号是实际中最普遍的情形,源于目标起伏、多径效应及环境杂波,蕴含着比完全极化信号更丰富的物理信息,也是本文的研究对象。

为了获得更具物理直观性且便于动态建模的描述,引入 Stokes 矢量  $\mathbf{g}(t) = [g_0(t), g_1(t), g_2(t), g_3(t)]^T$ , 其与极化协方差矩阵元素的关系为

$$g_0(t) = r_{HH}(t) + r_{VV}(t) \quad (3)$$

$$g_1(t) = r_{HH}(t) - r_{VV}(t) \quad (4)$$

$$g_2(t) = 2\text{Re}(r_{HV}(t)) \quad (5)$$

$$g_3(t) = 2\text{Im}(r_{HV}(t)) \quad (6)$$

其中,  $g_0(t)$  表示总功率,  $g_1(t)$  表示水平/垂直极化功率差,  $g_2(t)$  表示  $\pm 45^\circ$  线极化功率差,  $g_3(t)$  表示左右圆极化功率差。Stokes 参数均为实值,且满足  $g_0^2(t) \geq g_1^2(t) + g_2^2(t) + g_3^2(t)$ 。信号的极化度定义为完全极化功率与总功率之比,可直接由 Stokes 参数计算:

$$\rho(t) = \frac{\sqrt{g_1^2(t) + g_2^2(t) + g_3^2(t)}}{g_0(t)} \in [0, 1] \quad (7)$$

当  $\rho(t) = 1$  时为完全极化,  $\rho(t) = 0$  为非极化,  $0 < \rho(t) < 1$  则为部分极化。Stokes 矢量提供了一种无冗余且物理意义明确的极化描述方式。

部分极化信号的协方差矩阵可唯一分解为一个完全极化信号与一个非极化信号之和:

$$\mathbf{R}(t) = P_s(t) \mathbf{a}(t) \mathbf{a}^H(t) + \frac{P_u(t)}{2} \mathbf{I}_2 \quad (8)$$

其中,  $P_s(t) \mathbf{a}(t) \mathbf{a}^H(t)$  为完全极化分量,  $(P_u(t)/2) \mathbf{I}_2$  为非极化分量,  $P_s(t) = l_1(t) - l_2(t)$  为完全极化功率,  $P_u(t) = 2l_2(t)$  为非极化功率,  $l_1(t) \geq l_2(t) \geq 0$  为特征值。  $\mathbf{a}(t)$  为最大特征值对应的归一化特征向量,满足  $\|\mathbf{a}(t)\| = 1$ 。  $\mathbf{I}_2$  为一个 2 阶单位矩阵。对应的极化度即为  $\rho(t) = P_s(t)/(P_s(t) + P_u(t))$ 。该分解直观反映了信号中“有序”与“无序”极化能量的构成。

该分解方式与 Stokes 矢量、极化度的关系为

$$P_s(t) = l_1(t) - l_2(t) = \rho(t)g_0(t) \quad (9)$$

$$P_u(t) = 2l_2(t) = (1 - \rho(t))g_0(t) \quad (10)$$

### 1.2 时变极化状态统一模型构建

在实际海空目标雷达探测场景中,驱动雷达回波极化状态时变的物理机制主要源于目标姿态动态变化和传播环境的动态去极化效应两个方面。无论是

海面目标的低频周期性摆动,还是空中目标的高频机动,其相对于雷达视线的姿态连续变化,都会导致目标的极化散射矩阵时变,从而引起回波中全极化分量参数的连续演化。同时目标自身散射中心的随机起伏以及信号在传播过程中经历时变非均匀介质会产生时变去极化效应,这直接表现为回波中非极化分量的功率的变化。

值得注意的是,海面与空中目标的运动与散射特性存在显著差异,导致其极化动态各具特点:海面目标运动受海浪影响,具有低频准周期性,且伴随强海杂波,非极化分量强、相关时间长;空中目标机动性强、可能包含高频姿态变化,其非极化分量主要源于目标自身多散射中心干涉,具有不同的统计特性。这些差异决定了统一动态极化状态模型必须同时兼容低频周期与高频随机运动,并能表征不同来源的非极化分量。

基于上述对海空目标观测场景及其极化动态物理机制的分析,为同时刻画低频周期运动与高频机动特性,并区分环境与目标自身引起的去极化效应,本文建立如图 3 所示统一的时变极化状态模型。

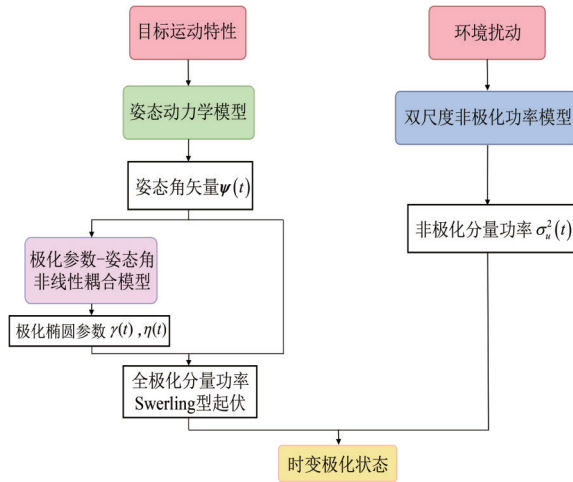


图 3 时变极化状态统一建模框图

Figure 3 Block diagram of the unified modeling of time-varying polarization states

极化信号的全极化分量源于目标主体结构的镜面反射与确定性散射中心,其极化状态随目标姿态连续演化,但在短时快拍内可视为近似确定性的调制过程,非极化分量则来源于环境背景产生的扩散散射和目标多散射中心间的干涉效应两类不同的去极化机制。为有效分离上述两种极化状态演化的有序成分和有序成分,将接收信号  $\mathbf{e}(t)$  建模为全极化分量与动态非平稳非极化分量的叠加:

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{s}(t) + \mathbf{u}(t) \quad (11)$$

其中,  $\mathbf{s}(t)$  为全极化分量,  $\mathbf{u}(t)$  为时变非极化分量,且两

者相互独立。

模型的驱动核心是目标的姿态动力学。定义目标的归一化姿态角矢量  $\boldsymbol{\psi}(t) = [\psi_1(t), \psi_2(t), \psi_3(t)]^T$ , 其三个分量分别对应横摇、纵摇、偏航的等效角度。为同时捕捉低频周期性运动(海面目标)和高频机动(空中目标),采用以下随机微分方程:

$$d\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\omega}_0 dt + \mathbf{K} \sin(\boldsymbol{\Omega} t) dt - \mathbf{A} \boldsymbol{\psi}(t) dt + \mathbf{Y} d\mathbf{w}_\psi(t) \quad (12)$$

其中:  $\boldsymbol{\omega}_0 = [\omega_1, \omega_2, \omega_3]^T$  为平均角速度向量,描述目标整体转动趋势;  $\mathbf{K} = \text{diag}(k_1, k_2, k_3)$ ,  $\boldsymbol{\Omega} = [\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3]^T$  描述周期性摆动分量,对海面目标此项显著;  $\mathbf{A} = \text{diag}[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3]$  为阻尼系数矩阵,保证姿态在随机扰动下仍具有均值回复特性,符合实际目标运动的惯性约束;  $\mathbf{Y} = \text{diag}[r_1, r_2, r_3]$  为扩散系数矩阵,控制姿态角的扰动强度;  $\mathbf{w}_\psi(t)$  为标准三维维纳过程,其三分量相互独立且增量服从高斯分布,用于模拟目标姿态中无法精确建模的随机扰动。

模型通过参数配置适应不同目标,海面目标设置较大  $\mathbf{K}$  和较小  $\mathbf{Y}$ ,空中目标设置较小  $\mathbf{K}$ ,较大  $\boldsymbol{\omega}_0$  和  $\mathbf{Y}$ 。

极化辐角  $\gamma(t)$  和极化相位差  $\eta(t)$  是描述电磁波极化状态的一对基本几何参数,分别决定了极化椭圆的轴比、旋向和取向角。对于雷达目标,回波的极化椭圆参数由目标的极化散射矩阵与发射极化状态共同决定。具体地,在给定发射极化条件下,接收回波的极化椭圆参数可通过相干矩阵或斯托克斯矢量唯一确定,二者与极化散射矩阵的元素存在确定的函数关系。因此,  $\gamma(t)$  与  $\eta(t)$  的时变特性直接反映了目标极化散射特性的动态演化。当目标相对于雷达视线的姿态发生变化时,其极化散射矩阵随之改变,进而导致回波极化椭圆参数的连续演化。为刻画这一物理过程,建立极化椭圆参数与目标姿态角的非线性耦合模型:

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= \gamma_0 + \mathbf{c}_\gamma^T \boldsymbol{\psi}(t) + \boldsymbol{\psi}^T(t) \mathbf{C}_\gamma \boldsymbol{\psi}(t) \\ \eta(t) &= \eta_0 + \mathbf{c}_\eta^T \boldsymbol{\psi}(t) + \boldsymbol{\psi}^T(t) \mathbf{C}_\eta \boldsymbol{\psi}(t) \end{aligned} \quad (13)$$

其中:  $\gamma_0, \eta_0$  为目标处于参考姿态时的极化参数;  $\mathbf{c}_\gamma, \mathbf{c}_\eta \in \mathbb{R}^3$  为线性耦合系数向量,表示小姿态扰动下的线性响应;  $\mathbf{C}_\gamma, \mathbf{C}_\eta \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$  为二次耦合系数矩阵,表示大姿态角下的非线性散射效应。该非线性模型能更精确描述复杂目标(如飞机机身、舰船上层建筑)在较大姿态变化范围内的极化响应。

最终接收回波信号由全极化和非极化分量的时变功率合成。全极化分量功率模型  $P_s(t)$  的演化由目标雷达散射截面起伏特性决定,建立适用于 Swerling I-II 类目标的统一模型:

$$dP_s(t) = \kappa (\bar{P}_s - P_s(t)) dt + \zeta P_s^\delta(t) d\mathbf{w}_P(t) \quad (14)$$

其中:  $\bar{P}_s(t)$  为平均功率;  $\kappa > 0$  为回归速率,控制起伏

相关时间;  $\delta \in [0.5, 1]$  为波动形态参数,  $\delta = 0.5$  对应瑞利起伏 (Swerling I),  $\delta = 1$  对应指数起伏 (Swerling II);  $\xi$  控制波动强度, 即瞬时功率相对于均值的归一化方差;  $w_p(t)$  为一维维纳过程, 与姿态驱动项  $w_\psi(t)$  独立统计, 以体现目标雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 与姿态运动在物理机制上的解耦性。

非极化分量  $u(t)$  两通道独立同分布, 其时变功率  $P_u(t)$  需同时适应海杂波的长相关特性和空中目标干涉引起的快变特性。建立两尺度混合过程:

$$dp_s(t) = \lambda_s(\mu_s - p_s(t))dt + \sigma_s dw_p(t) \quad (15)$$

$$dp_f(t) = -\lambda_f(\mu_f - p_f(t))dt + \sigma_f dw_p(t) \quad (16)$$

$$P_u(t) = \exp(p_s(t) + p_f(t)) \quad (17)$$

其中:  $p_s(t)$  为慢变分量, 描述环境背景去极化 (海杂波、大气效应);  $\mu_s$  为慢变平均功率;  $\sigma_s$  控制慢变起伏幅度;  $p_f(t)$  为快变分量, 描述目标多散射中心干涉等快速起伏;  $\mu_f$  为快变平均功率;  $\sigma_f$  控制快变起伏幅度; 参数  $\lambda_s \ll \lambda_f$  确保双尺度特性, 该双尺度结构可分别刻画海面目标的环境慢变去极化与空中目标的快变散射干涉。

基于上述构建的动态模型, 接收信号的瞬时极化特性可由时变协方差矩阵、Stokes 参数和极化度完全表示, 这些时变统计量构成了后续分析信号动态演化的数学基础。

将式 (8) 的分解结构代入极化协方差矩阵, 可得接收信号的模型瞬时协方差矩阵为

$$\mathbf{R}(t) = P_s(t) \begin{bmatrix} \cos^2 \gamma(t) & \cos \gamma(t) \sin \gamma(t) e^{-j\eta(t)} \\ \cos \gamma(t) \sin \gamma(t) e^{j\eta(t)} & \sin^2 \gamma(t) \end{bmatrix} + P_u(t) \mathbf{I}_2 \quad (18)$$

对应时变斯托克斯参数为

$$g_0(t) = P_s(t) + P_u(t) \quad (19)$$

$$g_1(t) = P_s(t) \cos(2\gamma(t)) \cos(\eta(t)) \quad (20)$$

$$g_2(t) = P_s(t) \cos(2\gamma(t)) \sin(\eta(t)) \quad (21)$$

$$g_3(t) = P_s(t) \sin(2\gamma(t)) \quad (22)$$

进而得到时变极化度可表示为

$$\rho(t) = \frac{P_s(t)}{P_s(t) + P_u(t)} = \frac{\sqrt{g_1^2(t) + g_2^2(t) + g_3^2(t)}}{g_0(t)} \quad (23)$$

上述推导表明, 极化度实时取决于全极化分量和非极化分量的功率比, 是描述部分极化信号本质特征的核心物理量。

## 2 模型特性分析

本节对所建模型进行理论验证与特性剖析, 旨在从理论分析的角度, 阐述模型的合理性与物理可解释性。通过推导时变极化度与斯托克斯参数的统计特

性、谱结构、相空间演化规律及参数灵敏度, 从理论上验证模型能否产生与物理认知一致的行为, 确保其结构合理性。将模型的数学表达与电磁散射、目标运动等物理过程明确关联, 从而增强模型的可解释性。同时明确关键参数对输出特征的影响方式与程度, 为后续从实测数据中定量反演目标微动参数、识别干扰类型提供理论依据与量化关系。

### 2.1 时变极化度统计特性

时变极化度  $\rho(t)$  是表征信号极化状态的核心指标。在本文所建模型中,  $P_s(t)$  与  $P_u(t)$  分别由式 (12) 与式 (15) 描述的随机过程驱动, 二者相互独立且均具有明确的物理来源:  $P_s(t)$  起伏源于目标 RCS 随视角的时变 (Swerling I/II 型),  $P_u(t)$  的波动则综合了环境背景去极化 (慢变) 与目标自身去极化 (快变) 的双尺度贡献。

假设  $P_s(t)$  与  $P_u(t)$  相互独立, 且鉴于海空场景典型目标雷达回波功率起伏的变异系数 (标准差与均值之比) 较小, 本文仿真场景中由波动强度  $\xi$  控制变异系数在 0.2 ~ 0.35 范围内, 因此采用一阶扰动近似分析  $\rho(t)$  的统计特性。将  $\rho(t)$  视为二元函数  $\rho(P_s(t), P_u(t))$ , 在平衡点  $(\bar{P}_s, \bar{P}_u)$  处进行泰勒展开并保留至一阶项:

$$\rho(t) \approx \rho_0 + \left. \frac{\partial \rho}{\partial P_s} \right|_{(\bar{P}_s, \bar{P}_u)} \delta P_s(t) + \left. \frac{\partial \rho}{\partial P_u} \right|_{(\bar{P}_s, \bar{P}_u)} \delta P_u(t) \quad (24)$$

其中,  $\rho_0 = \bar{P}_s / (\bar{P}_s + \bar{P}_u)$  为稳态极化度。令  $P_s(t) = \bar{P}_s + \delta P_s(t)$ ,  $P_u(t) = \bar{P}_u + \delta P_u(t)$ , 其中  $\mathbb{E}[\delta P_s] = \mathbb{E}[\delta P_u] = 0$ , 则有

$$\rho(t) \approx \rho_0 + \frac{\bar{P}_u}{(\bar{P}_s + \bar{P}_u)^2} \delta P_s(t) - \frac{\bar{P}_s}{(\bar{P}_s + \bar{P}_u)^2} \delta P_u(t) \quad (25)$$

建立了极化度瞬时波动与功率瞬时波动之间的线性映射关系。

利用  $\delta P_s(t)$  与  $\delta P_u(t)$  的零均值特性, 得到极化度的均值  $\mathbb{E}[\rho(t)] \approx \rho_0 = \bar{P}_s / (\bar{P}_s + \bar{P}_u)$ , 该式表明极化度均值  $\rho_0$  由全极化与非极化分量的平均功率比决定, 与动态过程无关。进一步利用  $\delta P_s(t)$  与  $\delta P_u(t)$  的独立性, 得:

$$\text{Var}[\rho(t)] \approx \left( \frac{\bar{P}_u}{D^2} \right) \text{Var}[\delta P_s] + \left( \frac{\bar{P}_s}{D^2} \right) \text{Var}[\delta P_u] \quad (26)$$

其中,  $D = (\bar{P}_s + \bar{P}_u)^2$ 。极化度方差由  $P_s(t)$  和  $P_u(t)$  的起伏方差共同贡献, 且贡献权重与各自平均功率成反比。这意味着, 增强目标散射 (增大  $\bar{P}_s$ ) 或抑制环境去极化 (减小  $\bar{P}_s$ ) 均可降低极化度的波动, 提升极化稳定性。

### 2.2 斯托克斯参数的动态谱特性

斯托克斯参数的动态谱直接反映了目标运动与散射过程的频率特征。以  $g_3(t) = P_s(t) \sin(2\gamma(t))$  为例进行分析。将其在标称值附近线性化:  $g_3(t) = \bar{g}_3 +$

$\Delta g_3(t)$ , 其中  $\bar{g}_3(t) = \bar{P}_s \sin(2\gamma_0)$ , 且满足:

$$\Delta g_3(t) \approx \sin(2\gamma_0) \Delta P_s(t) + 2\bar{P}_s \cos(2\gamma_0) \Delta \gamma(t) \quad (27)$$

$\Delta \gamma(t)$  由姿态过程  $\psi(t)$  驱动,  $\Delta P_s(t)$  为随机起伏过程。因此,  $\Delta g_3(t)$  的功率谱密度  $S_{g_3}(f)$  可表示为

$$S_{g_3}(f) = \sin^2(2\gamma_0) S_{P_s}(f) + 4\bar{P}_s^2 \cos^2(2\gamma_0) |H_\gamma(f)|^2 S_\psi(f) \quad (28)$$

其中:  $f$  为频率变量;  $S_{P_s}(f)$  为  $P_s(t)$  的功率谱密度, 由参数  $\kappa$  和  $\delta$  决定, 表现为低频连续谱;  $S_\psi(f)$  为姿态角过程的功率谱密度;  $H_\gamma(f)$  为从  $\psi(f)$  到  $\Delta \gamma(f)$  的线性传递函数。

上述谱分析表明,  $S_{g_3}(f)$  的构成具有明确的物理意义: 其连续谱部分主要源于目标 RCS 的随机起伏, 而离散的谱线成分则直接对应目标周期性的姿态微动。这一特性为从实测信号中提取目标特征提供了理论途径: 通过辨识斯托克斯参数谱中的离散谱线, 可以估计目标的微动频率; 同时, 分析连续谱的形状与展宽, 则可推断目标散射特性的起伏规律。

### 2.3 极化状态演化的相空间分析

在归一化斯托克斯矢量空间(庞加莱球)中, 部分极化信号的极化状态对应于球内的一个点。定义矢量归一化  $\mathbf{q}(t) = [g_1(t), g_2(t), g_3(t)]^T / g_0(t)$ , 其端点位于半径为 1 的球内, 其微分方程为

$$\frac{d\mathbf{q}(t)}{dt} \approx \frac{1}{g_0} \frac{d\mathbf{g}_{1:3}(t)}{dt} - \frac{\bar{\mathbf{g}}_{1:3}}{g_0^2} \frac{dg_0(t)}{dt} \quad (29)$$

其中,  $\mathbf{g}_{1:3} = [g_1, g_2, g_3]^T$ ,  $\bar{\mathbf{g}}_0 = \bar{P}_s + \bar{P}_u$ 。将模型方程代入可知,  $d\mathbf{q}/dt$  受姿态角速度  $d\psi/dt$  和功率变化率  $dP_s/dt$ 、 $dP_u/dt$  共同驱动。

在平稳状态下, 极化状态点  $\mathbf{q}(t)$  在球内形成一个稳态概率分布, 该分布的中心位于  $[\bar{g}_1, \bar{g}_2, \bar{g}_3]^T / \bar{g}_0$ , 分布的形状由姿态动力学参数  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{Y}$  和耦合矩阵  $\mathbf{C}_\gamma$ 、 $\mathbf{C}_\eta$  共同决定。较强的各项异性耦合(即  $\mathbf{C}_\gamma$ 、 $\mathbf{C}_\eta$  的特征值差异大)会导致演化轨迹在特定极化态方向上有更大起伏。

### 2.4 关键参数的灵敏度分析

为揭示模型输入参数与输出特征之间的定量映射关系, 采用一阶扰动法分析模型输出的方差对关键输入参数的灵敏度, 定义灵敏度系数  $S_\theta = (\partial \text{Var}[\rho] / \partial \theta) \cdot (\theta / \partial \text{Var}[\rho])$ , 其中  $\theta$  为待分析参数。

模型对姿态扰动强度的灵敏度如下:

$$S_\Sigma \approx 2 \cdot \frac{\bar{P}_u \text{Var}[\delta P_s]}{\bar{P}_s \text{Var}[\delta \bar{P}_u]} \cdot \frac{\tau_\Theta}{\tau_c} \quad (30)$$

其中,  $\tau_\Theta$  为姿态相关时间,  $\tau_c$  为 RCS 起伏相关时间。该式显示姿态扰动对极化度波动的影响取决于两个功率起伏方差的比值与两个相关时间的比值。当目

标 RCS 起伏强于环境去极化起伏, 且姿态变化慢于 RCS 起伏时, 姿态扰动成为极化度波动的主导因素。典型海面场景中,  $\tau_\Theta$  远大于  $\tau_c$ , 即姿态扰动强度是极化度波动的敏感参数。

对非极化分量相关时间  $\tau_s = 1/\lambda_s$ ,  $\tau_f = 1/\lambda_f$  的灵敏度分别为

$$S_{\tau_s} \approx \zeta^2 \left( \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_s + \bar{P}_u} \right)^2 \frac{\text{Var}[\delta p_s]}{\text{Var}[\rho]} \cdot \frac{2}{\pi} \arctan(\pi B \tau_s) \quad (31)$$

$$S_{\tau_f} \approx (1 - \zeta)^2 \left( \frac{\bar{P}_s}{\bar{P}_s + \bar{P}_u} \right)^2 \frac{\text{Var}[\delta p_f]}{\text{Var}[\rho]} \cdot \frac{2}{\pi} \arctan(\pi B \tau_f) \quad (32)$$

其中:  $\zeta$  为非极化功率中慢变分量的权重系数,  $1 - \zeta$  为快变分量的权重;  $B$  为观测系统带宽。灵敏度系数随相关时间增大而增加, 并最终趋于饱和。当相关时间远大于观测窗口时  $\tau_s \gg 1/B$ , 极化度波动方差对慢变去极化的相关时间不再敏感; 反之, 快变分量的相关时间若落入观测通带内, 则灵敏度较高。这一规律为从实测数据中识别双尺度去极化来源提供了依据——若极化度功率谱在特定频段呈现与  $\tau_f$  相关的特征峰, 则可判定该频段由目标自身去极化主导。

结合海空目标的典型场景, 可进一步分析不同海况、不同机动强度下各参数对极化度波动的影响程度变化。

在海面目标场景中, 海况直接影响海浪谱能量分布, 从而影响目标的低频摆动幅度与随机扰动强度。高海况下, 目标姿态角相关时间  $\tau_\Theta$  远大于 RCS 起伏相关时间  $\tau_c$ , 但姿态扰动强度明显增大, 同时海杂波增强导致非极化功率起伏方差升高。由灵敏度系数表达式可知  $\tau_\Theta/\tau_c$  仍维持较大值, 但  $\text{Var}[\delta P_s]/\text{Var}[\delta P_u]$  随非极化功率起伏增大而减小, 可能削弱姿态扰动的相对贡献。此时, 非极化分量慢变相关时间  $\tau_s = 1/\lambda_s$  的灵敏度系数随相关时间延长而增大, 在高海况长相关海杂波背景下成为影响极化度波动的关键因素。

对于空中目标场景, 机动强度主要体现为姿态角速度、摆动分量及扩散系数的增大。当机动强度增大时, 姿态变化相关时间  $\tau_\Theta$  缩短, RCS 起伏相关时间  $\tau_c$  也缩短, 两者比值取决于具体情况。若  $\tau_\Theta/\tau_c$  增大, 姿态扰动灵敏度增强; 若减小, 则功率起伏方差比  $\text{Var}[\delta P_s]/\text{Var}[\delta P_u]$  可能主导灵敏度。此外, 快变非极化分量相关时间  $\tau_f = 1/\lambda_f$  随机动强度增大而减小, 其灵敏度系数处于上升区间的较低段, 表明快变去极化对高频机动更为敏感。

可见, 在不同海况和机动强度下, 极化度波动的敏感参数动态变化: 低海况下姿态扰动占主导, 高海况下环境去极化相关时间影响增加; 空中目标机动强度较低时 RCS 起伏影响相对温和, 高机动时姿态随机

扰动与快变去极化共同主导极化度波动。

上述理论分析表明,在所建立的模型中,姿态扰动的随机强度是影响极化稳定性的一个敏感因素。同时,非极化干扰的双时间尺度特性,分别主导了极化状态中高频与低频动态分量的产生。这些推导出的解析关系与定量规律,为从动态极化信号中反演目标微动参数与识别干扰类型奠定了理论基础。

### 3 实验验证与分析

为验证本文所建动态极化状态模型的有效性和实用性,本节从模型仿真与实测数据验证两个层面开展实验验证。首先基于构建的统一模型生成仿真数据,重点考察时变极化度演化轨迹、庞加莱球空间分布形态及双尺度功率起伏特性,检验模型能否准确复现目标姿态调制与散射起伏耦合作用下的理论预期行为。再进一步实测验证,采用加拿大 McMaster 大学 IPIX 雷达于加拿大 Dartmouth 海岸面向大西洋海面采集的海面目标公开数据集,将模型输出与真实回波在极化度时域波形、概率密度分布及功率谱结构等方面进行定量比对,重点评估模型对实际雷达环境中部分极化信号非平稳特性的拟合精度。其中时域动态

相似性通过 Pearson 相关系数量化,统计分布一致性采用核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)与累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)误差分析,频域特性则通过功率谱对比加以验证,形成多维度、多尺度的验证体系。实验在配置为 Intel Core i7CPU、32 GB RAM 和 NVIDIA GeForce RTX 4060Ti GPU 的计算机上基于 MATLAB R2022b 平台进行。

#### 3.1 参数测试

为验证模型对海面目标动态的模拟能力,本节设置典型海面目标仿真场景。模型仿真参数设置如下:采样率 $f_s=100$  Hz,总时长 $T=10$  s;姿态动态参数设置为 $\omega_0=[0.08, 0.05, 0.06]^T$ , $\mathbf{K}=\text{diag}(0.25, 0.12, 0.18)$ , $\boldsymbol{\Omega}=[0.4, 0.6, 0.3]^T$ , $\mathbf{A}=\text{diag}(0.25, 0.3, 0.2)$ , $\mathbf{Y}=\text{diag}(0.08, 0.06, 0.1)$ ;极化参数标称值 $\gamma_0=\pi/4$ , $\eta_0=\pi/3$ ;功率参数 $\bar{P}_s=0.35$ , $\bar{P}_u=1.08$ 。

##### 3.1.1 时变极化状态动态演化特性

本实验展示了模型对目标姿态-极化耦合机制及双尺度功率起伏的刻画能力,结果如图4所示。其中包含6个子图,分别从不同维度说明部分极化信号时变极化状态全过程演化特性。

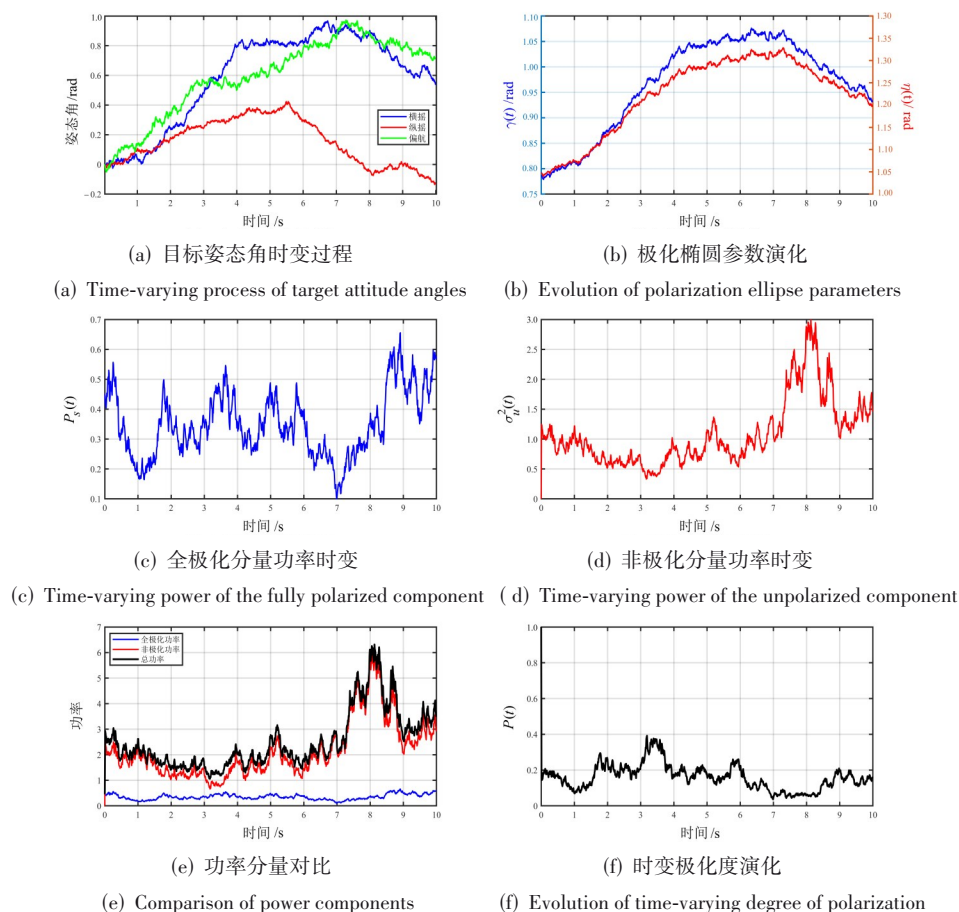


图4 海面目标动态演化特性图

Figure 4 Dynamic evolution characteristics of maritime targets

姿态角时变过程作为系统输入,表现出具有周期调制与随机扰动的复合运动特征,其动态特性直接驱动了极化椭圆参数的演化。图4(a)展示了横摇、纵摇和偏航三个姿态角的联合演化。曲线呈现明显的周期性调制叠加随机扰动的特征,反映了海面目标受海浪驱动的典型运动模型。姿态角的连续变化是导致极化状态时变的物理根源之一。

图4(b)为极化辐角 $\gamma(t)$ 和极化相位差 $\eta(t)$ 的时变曲线。 $\gamma(t)$ 的变化范围约为 $[0.8, 1.2]$  rad,决定了极化椭圆的轴比与旋向; $\eta(t)$ 在 $[1, 1.4]$  rad 范围内波动,决定了椭圆取向。两参数的非线性耦合反映了姿态变化对极化状态的复杂调制效应。

功率分量变化进一步揭示了能量在极化与非极化成分间的动态分配。图4(c)为全极化分量功率时变。 $P_s(t)$ 呈现随机起伏特性,其均值为 $\bar{P}_s=0.35$ 。功率起伏服从Swerling I型模型( $\delta=0.7$ ),反映了目标RCS的时变特性。功率的动态变化直接影响接收信号的信噪比。如图4(d)所示,非极化分量功率时变 $P_u(t)$ 表现出典型的双尺度特性:慢变分量(时间常数 $\lambda_s^{-1}=10$  s)模拟海杂波等环境效应的长相关起伏;快变分量(时间常数 $\lambda_f^{-1}=0.5$ )模拟目标多径干涉等快速变化。这种双尺度特性与实际观测数据相符。图4(e)清晰展示了 $P_s(t)$ 、 $P_u(t)$ 和总功率 $g_0(t)=P_s(t)+P_u(t)$ 的相互关系。在全极化分量功率较高的时段,信号表现出更强的极化特性;当非极化分量功率占优时,信号趋于非极化。

从图4(f)可以看到极化度 $\rho(t)$ 在 $[0.01, 0.5]$ 范围内动态变化,均值为0.17,标准差为0.07。极化度的时变由 $P_s(t)$ 与 $P_u(t)$ 的相对变化共同决定,直观反映了信号极化稳定性的动态起伏。极化度低谷对应非极化分量占主导的时刻。

### 3.1.2 庞加莱球极化状态演化轨迹

归一化斯托克斯矢量空间(庞加莱球)展示了极化状态的连续演化轨迹,提供了极化状态演化的三维几何视角。

由图5可见,灰色半透明球面代表完全极化状态( $\rho=1$ )的集合,球心(原点)对应完全非极化状态( $\rho=0$ )。彩色轨迹表示归一化斯托克斯矢量 $\mathbf{g}(t)=[g_1(t), g_2(t), g_3(t)]^T/g_0(t)$ 的端点随时间演化路径,颜色编码对应瞬时极化度 $\rho(t)$ (见右侧颜色条)。演化轨迹位于庞加莱球内部,表明信号始终为部分极化状态( $0<\rho(t)<1$ )。轨迹整体呈现复杂的空间螺旋结构,反映了姿态周期运动与随机扰动共同作用下的极化状态演化。轨迹在球内的分布区域反映了极化状态的可能取值范围,其形状与目标散射特性及运动模式密切相关。

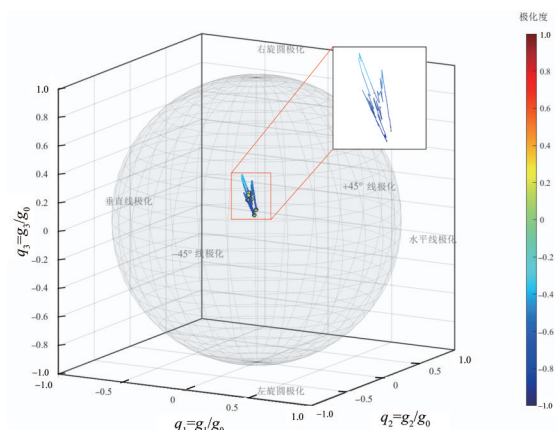


图5 海面目标庞加莱球极化状态演化轨迹

Figure 5 Trajectory of polarization state evolution of maritime targets on the Poincaré sphere

### 3.1.3 极化度统计特性分析

本组仿真从概率分布、时间相关性和频谱特征三个角度分析时变极化度 $\rho(t)$ 的关键特性,仿真结果如图6所示。

图6(a)显示了极化度概率密度分布,红色曲线为正态拟合结果。极化度 $\rho(t)$ 的均值为0.16,标准差为0.07。分布呈现单峰特征,主要集中在 $[0.01, 0.5]$ 区间,表明信号大部分时间处于低极化状态。与正态分布的偏差反映了极化度动态的非高斯特性。图6(b)展示了 $\rho(t)$ 的归一化自相关函数 $R_{pp}(\tau)$ 。相关函数呈现指数衰减趋势,相关时间(衰减至 $1/e$ 的时间)约为0.8 s。值得注意的是,自相关函数在衰减过程中表现出轻微的振荡,这对应于姿态周期性运动对极化度的调制效应。图6(c)为采用Welch方法估计的 $\rho(t)$ 功率谱密度。刻画了极化度波动的频率结构,功率谱值在低频区域较高,随着频率升高降低,频谱呈现低频主导特性,大部分能量集中在0~2 Hz 范围内,说明驱动极化度变化的主要因素是频率较低的姿态运动,高频随机扰动的影响在能量上占比较小。

### 3.2 空中目标模型仿真示例

为验证模型对空中目标动态的模拟能力,本节设置典型空中机动目标仿真场景,并与3.1节中海面目标模型做对比分析。模型仿真参数设置如下:采样率 $f_s=100$  Hz,总时长 $T=10$  s;姿态动态参数设置为 $\omega_0=[0.2, 0.1, 0.5]^T$ ,  $\mathbf{K}=\text{diag}(0.05, 0.03, 0.08)$ ,  $\mathbf{\Omega}=[0.5, 0.3, 0.8]^T$ ,  $\mathbf{A}=\text{diag}(0.2, 0.15, 0.4)$ ;  $\mathbf{Y}=\text{diag}(0.1, 0.12, 0.14)$ ;极化参数标称值 $\gamma_0=\pi/4$ ,  $\eta_0=\pi/3$ ;功率参数 $\bar{P}_s=1.25$ ,  $\bar{P}_u=0.15$ ,仿真结果如图7所示。

图7展示了空中目标仿真场景下姿态角、极化度及非极化分量等特征的时变特性。与图4所示的海面目标仿真结果相比,空中目标的姿态变化呈现更强

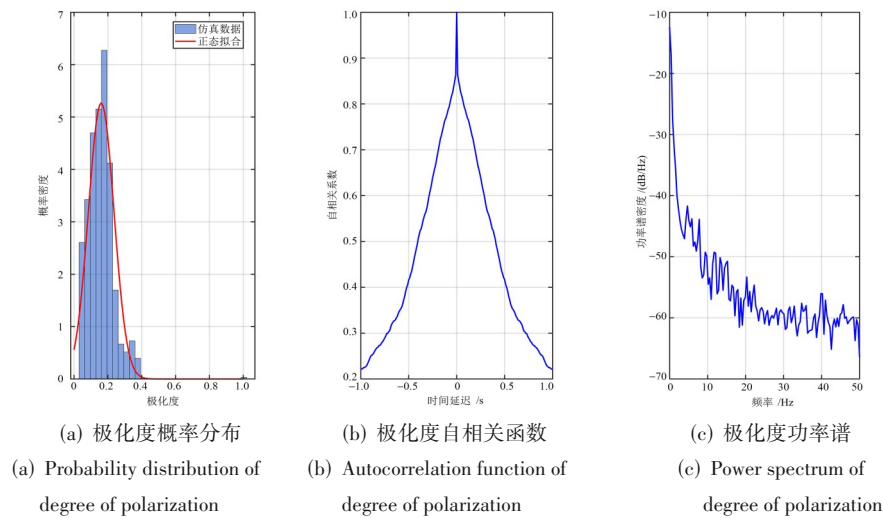


图6 海面目标极化统计特性分析

Figure 6 Analysis of polarimetric statistical characteristics of maritime targets

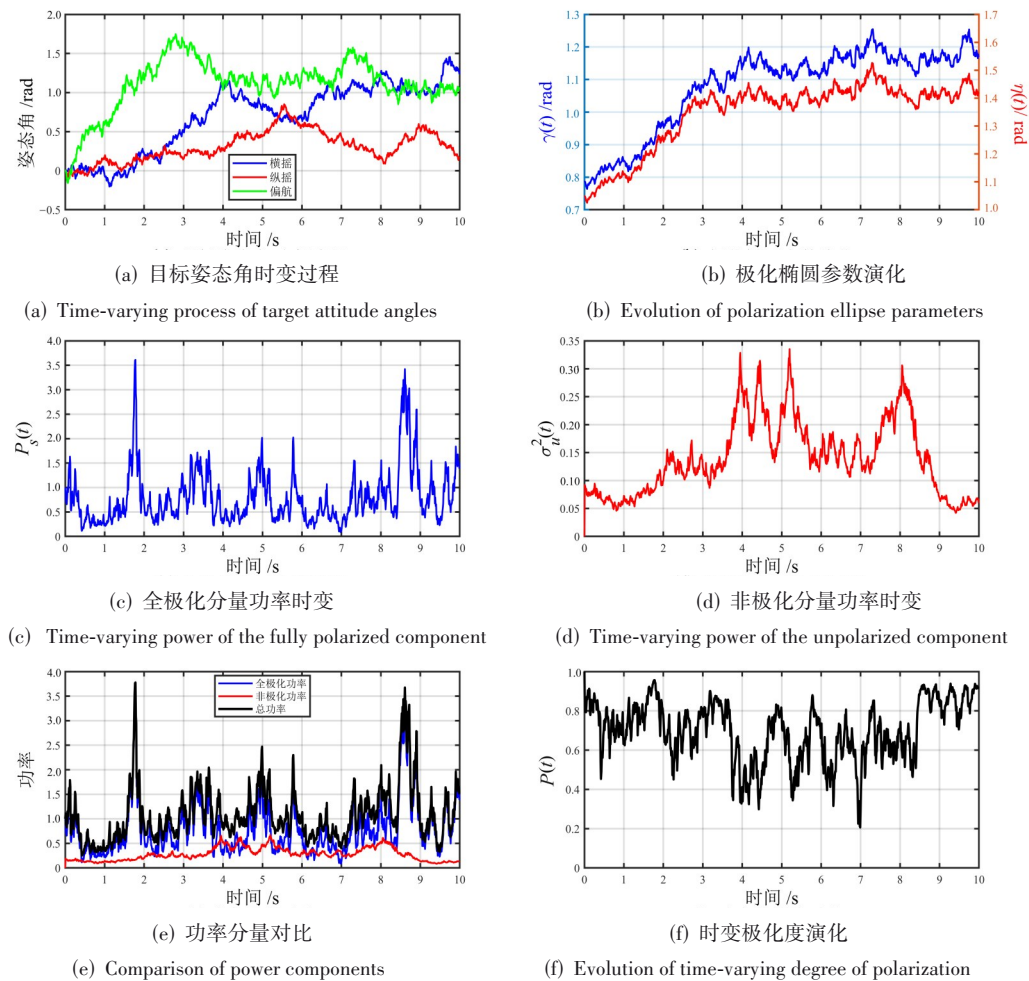


图7 空中目标动态演化特性图

Figure 7 Dynamic evolution characteristics of aerial targets

的高频随机特性,极化度波动范围扩大且变化速率加快,非极化分量中快变成分占比显著提升,符合空中

目标高速机动、多散射中心干涉加剧的物理特征。

图8展示了空中目标场景下归一化 Stokes 矢量在

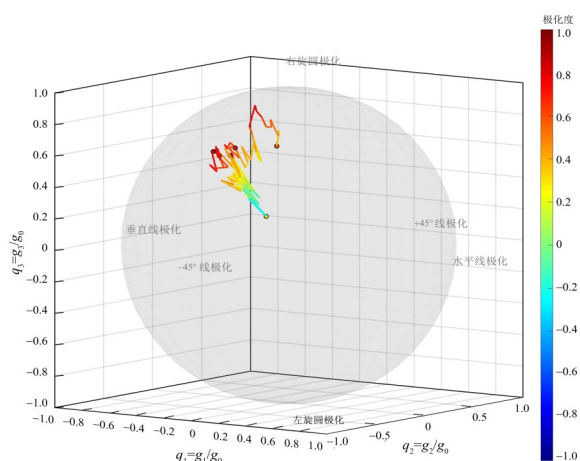


图8 空中目标庞加莱球极化状态演化轨迹

Figure 8 Trajectory of polarization state evolution of aerial targets on the Poincaré sphere

庞加莱球内的演化轨迹。轨迹在球内分布范围更广、运动速度更快,反映了极化状态的高频随机演变特性。

如图9所示,空中目标场景下,极化度均值明显高于海面目标,分布范围更宽且峰值降低,体现了全极化功率占比较高但快变起伏显著的特点。自相关函数呈现快速指数衰减,相关时间显著短于海面目标。相较于海面目标,极化度功率谱能量在高频段占比上升。

### 3.3 实验数据分析与验证

本文采用加拿大 McMaster 大学 IPIX 雷达于大西

洋海面采集的公开数据集(文件:13#19931106\_183151\_surv.cdf)进行模型拟合与适配度验证。

IPIX 雷达是加拿大麦克马斯特大学研制的全相干极化雷达,其采集的海杂波实测数据集已成为该领域研究的标准数据源之一。该雷达系统提供 HH、HV、VH、VV 四种极化通道的高分辨率数据,记录了不同海况、不同观测条件下的海洋回波特性。该系统工作在 X 波段,具备全极化测量能力,能够同时获取四种极化组合的回波数据,为极化特征提取与分析提供了基础。系统通过交替发射水平和垂直极化波,同时接收两种极化方向的回波,能够完整获取目标的极化散射矩阵。雷达采用高距离分辨率和高脉冲重复频率设计,能够精细刻画海面散射的时空演变特性。此外,IPIX 雷达实验通常伴随详细的环境参数记录,包括风速、风向、浪高、海况等级等,为数据分析和模型验证提供了完整的上下文信息。

本文采用数据文件 13#19931106\_183151\_surv.cdf,脉冲重复频率为 1 kHz,共采集 131 072 个脉冲;设置 14 个距离门,分辨率 30 m;输出 HH、HV、VH、VV 四个完整的极化通道数据。

以 HH 极化通道为例,观测通道内距离-时间二维强度分布。如图 10 所示,海面回波强度在距离维上呈现非均匀的带状结构,这直接反映了海面粗糙度分布的空间不均匀性及其随风浪运动的动态变化。第 7 门附近,可观察到一个强度持续高于相邻海杂波背景的“亮线”,说明该位置存在一个具有稳定雷达散射截面积的目标。图 11 展示了第 7 门中不同极化通道的

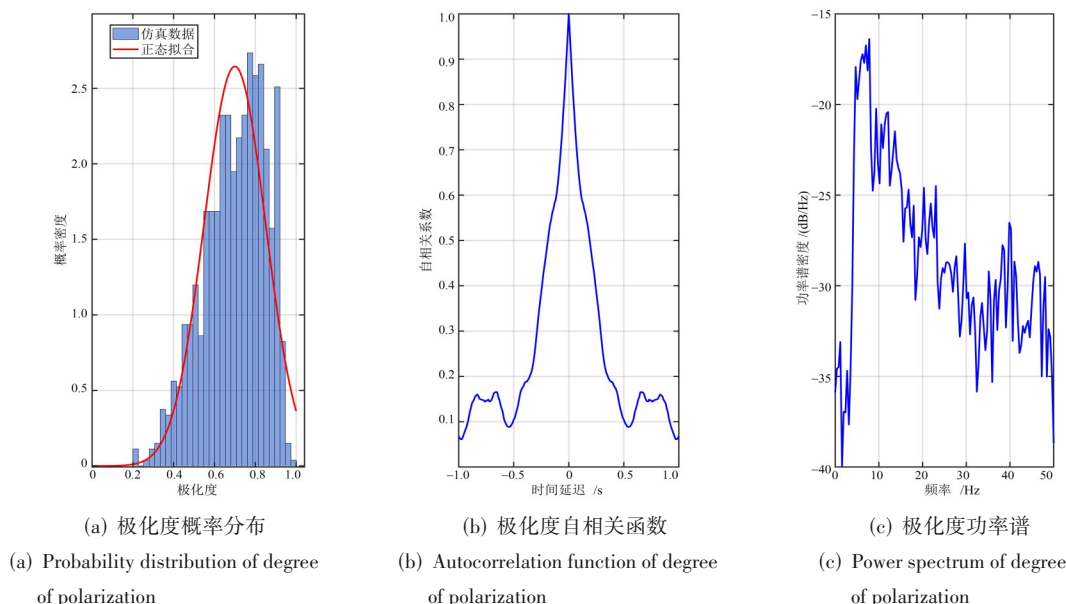


图9 空中目标极化统计特性分析

Figure 9 Analysis of polarimetric statistical characteristics of aerial targets

功率时间序列,不同通道的瞬时起伏并非完全同步,表明散射过程在矢量层面具有部分去极化的特性。这种非线性的功率关系表明,海杂波与潜在目标各自的散射矩阵随时间发生着微妙的演变,其合成信号无法用简单的标量模型描述,必须借助极化协方差矩阵或相干矩阵进行完整的二阶统计表征。

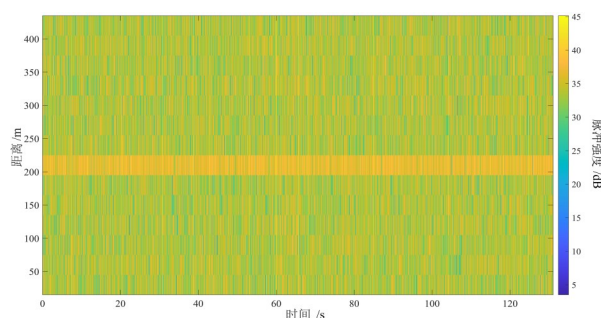


图 10 HH 距离-脉冲强度图

Figure 10 Range-pulse intensity image

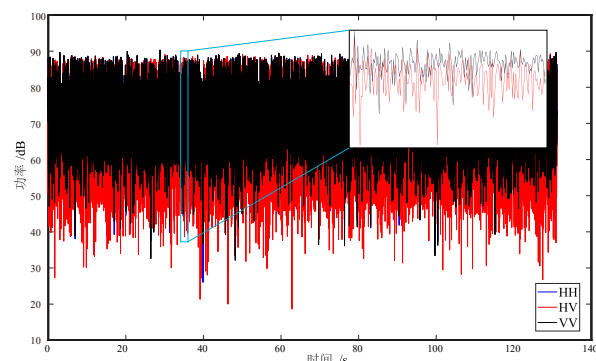


图 11 脉冲时间序列图

Figure 11 Pulse time series plot

极化度作为表征电磁波矢量状态最直接的参数,其动态演化过程深刻揭示了观测场景散射随机性的时变本质。如图 12 所示,第 7 距离门单元的极化度并非恒定值,而是在  $[0.01, 0.5]$  范围内进行大幅度、非周期性的波动,明确证实了雷达接收回波处于显著的部分极化状态。

为从统计意义上严格验证本文所建部分极化信号时变极化状态模型的准确性与可靠性,将 3.1 节所建立海面目标模型输出数据与 IPIX 实测数据在极化度这一核心特征上进行系统性对比。

图 13 展示了本文所提模型与 IPIX 实测数据极化度时变曲线对比。直观可见,两条曲线呈现出高度一致的演化形态与同步起伏趋势。经计算,两条序列的相关系数高达 0.909 8。这一强相关性表明,本文模型有效内嵌了驱动极化状态时变的关键物理机制,其输出不再是简单的随机过程,而是与真实观测在时域动态规律上具有高度同构性的信号。

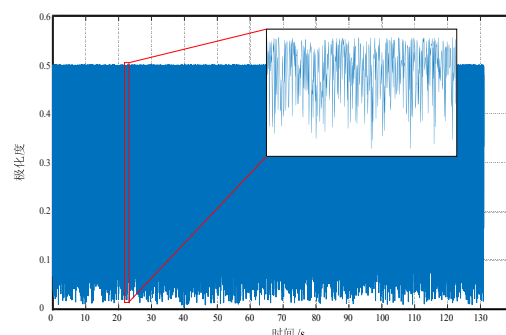


图 12 极化度时变曲线

Figure 12 Degree of polarization time series plot

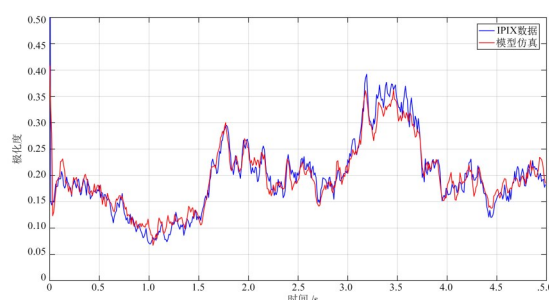


图 13 极化度时变曲线对比

Figure 13 Comparison of degree of polarization time series

极化度概率密度分布图提供了本文所提模型与 IPIX 实测数据的统计分布对比。如图 14 所示,图中蓝色与红色的 KDE 曲线重合度极高,共同呈现出一种非对称分布形态。该分布表明,在观测期间,目标的极化度主要集中分布于  $0.1 \sim 0.3$  的区间,且出现较高极化度的概率较低。直方图的叠加进一步印证了 KDE 曲线的结论,模型数据与实测数据在分布的主体区间、集中趋势以及拖尾形状上均展现出显著的相似性。此结果初步证明,模型不仅在瞬时值上逼近真实数据,其生成信号的一阶与二阶统计特性也与环境中的数据统计规律相符。

图 15 绘制了模型与实测数据的极化度 CDF 对比

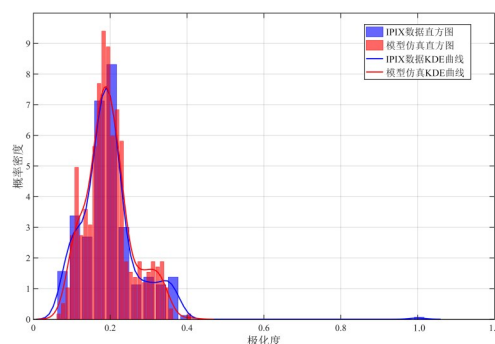


图 14 极化度概率密度分布对比

Figure 14 Comparison of probability density distributions of degree of polarization

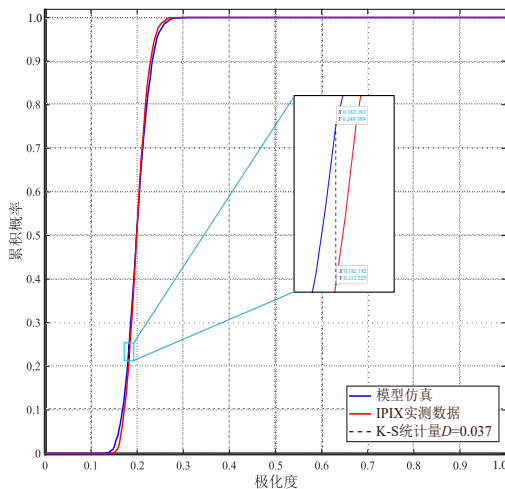


图 15 极化度累积分布函数对比

Figure 15 Comparison of cumulative distribution functions of degree of polarization

曲线。两条 CDF 曲线几乎完全重叠,直观地表明从极低值到极高值的整个取值范围内,两者的累积概率差异极小。为量化这一差异,采用非参数的柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫 (Kolmogorov-Smirnov, K-S) 检验。计算得到 K-S 统计量  $D=0.037$ ,该值表示两条 CDF 曲线之间的最大垂直距离,远低于 0.05 显著水平下的临界值,该结果表明两组数据分布的一致性具有统计显著性。图 16 的 CDF 差值曲线则系统展示了在整个极化度定义域  $[0, 1]$  上,实测 CDF 与模型 CDF 的差值。曲线始终在零值基准线附近做微幅波动,计算得到的平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 为 0.002 7,均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 为 0.008 3。这两个误差指标均处于极低数量级,这些量化指标共同证实,模型与实测数据的整体分布一致性具有极高的精度。

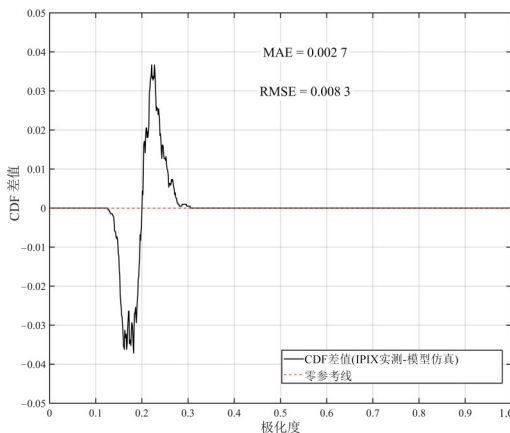


图 16 CDF 差值曲线

Figure 16 CDF difference curve

### 3.4 模型分析对比

为更直观地凸显本文所提模型在刻画动态极化特性方面的优越性,本节将其与两种现有模型进行对比分析。对比方法包括:(1)静态统计模型,该模型仅利用实测数据的极化度均值与标准差描述信号,忽略其时变特性,是当前主流极化分析方法的典型模式;(2)文献[17]中所提的三特征模型,该方法基于时变极化散射机制特征提取极化稳定性、平均去相关时间等统计量,重构极化度时变序列,是近期动态极化特征提取的代表性工作。

采用相关系数、K-S 统计量与功率谱余弦相似度作为评价指标,各项指标均是以 IPIX 雷达实测数据为基准,将各模型输出与该实测数据进行对比计算得到的,对比结果如表 1 所示。

由表 1 可见,静态统计模型仅能反映极化度的平均水平,无法刻画其时变特性,各项指标均较差。文献[17]中所提三特征模型通过提取时变极化散射机制特征,在相关性、分布拟合和谱相似度上均有显著提升,体现了动态特征提取方法的优势。本文所提模型在三个指标上均取得最优结果:相关系数高达 0.91,表明模型输出的极化度时变轨迹与实测数据高度同步;K-S 统计量低至 0.037,验证了模型统计特性的准确性;谱相似度达到 0.86,证明模型对极化状态动态频率特性的精确再现能力。上述对比充分验证了本文模型在动态极化特性刻画方面的优越性,体现了机理驱动建模相比现有方法的明显优势。

表 1 不同模型与实测数据的对比结果

Table 1 Comparison of different models with measured data

| 评价指标    | 静态统计模型 | 三特征模型 | 本文模型  |
|---------|--------|-------|-------|
| 相关系数    | 0.12   | 0.78  | 0.91  |
| K-S 统计量 | 0.35   | 0.11  | 0.037 |
| 谱相似度    | 0.23   | 0.74  | 0.86  |

### 3.5 参数敏感性实验

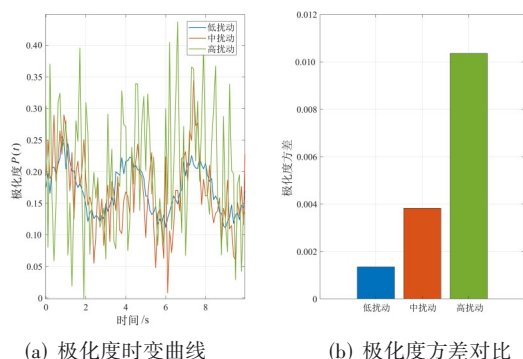
为揭示模型关键参数对输出极化特性的灵敏度,分析各物理参数对极化状态演化的影响机制,本节开展参数敏感度实验。以 3.1 节中海面目标仿真参数为基准,分别改变姿态扰动强度、非极化分量相关时间及双尺度功率占比,分析其对极化度统计特性的影响。

#### 3.5.1 姿态扰动强度敏感性

姿态扰动强度由扩散系数矩阵  $\mathbf{Y} = \text{diag}[r_1, r_2, r_3]$ ,反映了目标姿态随机扰动的剧烈程度。为简化分析,假设各姿态角扰动强度相同,即  $r_1 = r_2 = r_3$ 。实验设置三组扰动强度:低扰动 ( $r_1 = r_2 = r_3 = 0.02$ ),中扰动 ( $r_1 = r_2 = r_3 = 0.02$ ),高扰动 ( $r_1 = r_2 = r_3 = 0.02$ )。

图 17 展示了不同扰动强度下极化度的时变曲线

与方差对比。由时变曲线可见,随着扰动强度增大,极化度波动幅度明显加剧,高频抖动成分增加,且极化度方差随姿态扰动强度的上升而增大,表明姿态扰动强度是影响极化稳定性的敏感参数。



(a) Degree of polarization time series (b) Degree of polarization variance

图 17 极化度时变曲线与方差对比

Figure 17 Comparison of degree of polarization time series and variance

### 3.5.2 非极化分量相关时间敏感性

非极化分量中慢变相关时间  $\tau_s$  与快变相关时间  $\tau_f$ , 分别对应环境去极化与目标自身去极化的特征时间尺度。实验设置三组相关时间组合: 短相关 ( $\tau_s = 0.5$  s,  $\tau_f = 0.02$  s), 基准 ( $\tau_s = 1.0$  s,  $\tau_f = 0.05$  s), 长相关 ( $\tau_s = 2.0$  s,  $\tau_f = 0.1$  s)。

图 18 给出了不同相关时间下极化度的归一化自相关函数。随着相关时间增长, 自相关函数衰减速度明显减慢, 极化度序列的长程相关性增强。

### 3.5.3 双尺度功率占比敏感性

双尺度非极化功率模型由慢变分量平均功率  $\mu_s$

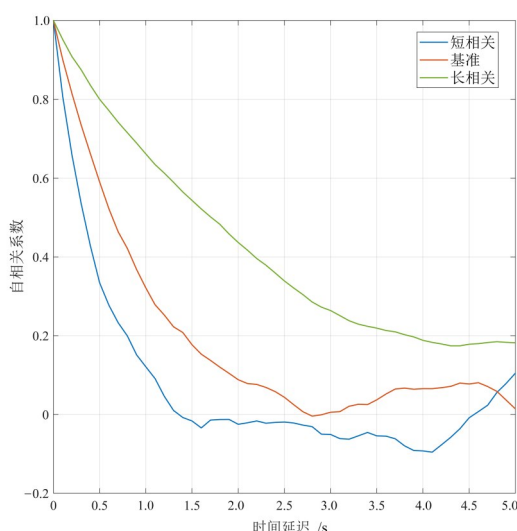


图 18 不同非极化相关时间下的极化度自相关函数

Figure 18 Autocorrelation function of the degree of polarization under different depolarization correlation times

与快变分量平均功率  $\mu_f$  共同构成, 两者占比决定了环境去极化与目标自身去极化的相对贡献。定义慢变分量占比  $\chi = \mu_s / (\mu_s + \mu_f)$ , 实验设置三组不同功率占比进行实验对比: 环境主导 ( $\chi = 0.8$ ), 均衡 ( $\chi = 0.5$ ), 目标主导 ( $\chi = 0.2$ )。

图 19 对比了不同占比下的极化度概率密度分布。当环境去极化主导时, 分布集中于较低极化度区域, 峰值较高; 当目标自身去极化主导时, 分布拖尾更宽, 峰值降低, 反映去极化来源的差异。

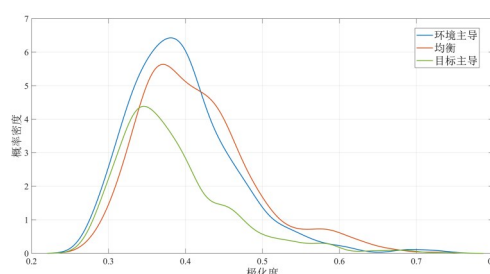


图 19 不同双尺度功率占比下的极化度概率密度分布

Figure 19 Probability density distributions of the degree of polarization under different two-scale power ratios

## 4 结论

本文针对现有研究对部分极化信号动态演化建模不足的问题, 面向海空动态目标, 提出了一种统一的时变极化状态模型。该模型从物理机理出发, 将接收信号分解为时变全极化分量与动态非极化分量, 并系统构建了目标姿态动力学模型、极化参数-姿态角非线性耦合模型以及双尺度非极化功率模型。理论分析揭示了目标微动、散射起伏及环境扰动共同驱动极化度与斯托克斯参数演化的内在规律, 并解析了其统计特性与谱结构。基于 IPIX 雷达实测数据的仿真验证表明, 模型生成的信号在极化度时变轨迹、概率分布、累积分布及谱特征等方面均与实测数据高度一致, 相关系数高, 分布误差极低, 显著优于传统静态统计模型。本文工作表明, 所提出的动态极化状态模型能够有效表征海空目标部分极化信号的时变行为。该模型为理解复杂动态场景下极化状态的演化机制提供了统一的理论框架, 不仅有助于从回波信号中定量反演目标运动与散射状态, 也为后续动态极化特征提取、目标识别及抗干扰处理奠定了坚实的模型基础。

值得指出的是, 本文所建模型包含姿态动力学、极化耦合及功率起伏等多类参数, 其从实测数据中的稳健估计是实现模型工程应用的关键。可采用分步估计, 将参数估计问题分解为姿态参数、极化参数及功率参数等若干子问题分别处理。利用谱分析与滤

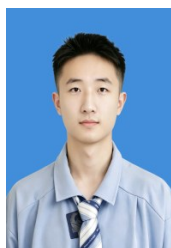
波方法估计姿态参数,通过子空间类算法估计极化参数,以及利用矩估计与迭代算法分离双尺度功率分量。该分步策略避免了高维参数联合优化的高复杂性,各环节计算量在典型雷达数据处理场景下均具备可实现性。未来工作将集中于模型参数的在线自适应估计及其在具体识别任务中的效能验证。

## 参考文献

- [1] Zhang Tao, Wang Haoran, Peng Chongmei, et al. Multifunctional polarization converters based on linear-to-circular polarization decomposition reflective surfaces[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2024, 72(11): 8476-8487.
- [2] Zhao Xingqiang, Lian Ruina, Wu Di, et al. A high-gain Fabry-Perot resonator antenna with dual-sense circular polarization diversity[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2024, 23(12): 4029-4033.
- [3] Chen Runrong, Duan Keqing, Cheng Shiyue. Effects of polarization on clutter characteristics for conformal array airborne radar[C]//2025 IEEE Radar Conference (Radar-Conf25). Piscataway: IEEE, 2025: 262-267.
- [4] Zhou Wenzhou, Zhang Lilian, Fan Chen, et al. Iterative joint global polarization position strategy based on image feature and polarization pattern[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 5009212.
- [5] Zhu Kai, Shao Yu, Luo Feihong, et al. A wideband circularly polarized millimeter-wave dielectric resonator antenna array with reconfigurable polarization state[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2026, 25(1): 279-283.
- [6] 耿源, 潘锦, 王凌霄, 等. 一款低剖面超宽带低交叉极化紧耦合阵列[J]. *电子学报*, 2025, 53(12): 4607-4613.  
Geng Yuan, Pan Jin, Wang Lingxiao, et al. A low-profile, ultra-wideband, low cross-polarization tightly coupled dipole array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(12): 4607-4613. (in Chinese)
- [7] 袁航, 陈付昌, 向凯燃. 一种用于 $\pm 45^\circ$ 极化十字型偶极子天线阵列的解耦方法[J]. *电子学报*, 2025, 53(7): 2453-2460.  
Yuan Hang, Chen Fuchang, Xiang Kairan. A decoupling method for  $\pm 45^\circ$ -Polarized crisscross-shaped dipole antenna array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2025, 53(7): 2453-2460. (in Chinese)
- [8] 杨童, 尚尚, 刘明, 等. 高频地波雷达海杂波背景下目标检测研究综述[J]. *遥测遥控*, 2020, 41(6): 39-45.  
Yang Tong, Shang Shang, Liu Ming, et al. A review of research on target detection in the background of high frequency ground wave radar and sea clutter[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2020, 41(6): 39-45. (in Chinese)
- [9] Hou Huijun, Mao Xingpeng, Liu Yongtan. Oblique projection for direction-of-arrival estimation of hybrid completely polarised and partially polarised signals with arbitrary polarimetric array configuration[J]. *IET Signal Processing*, 2017, 11(8): 893-900.
- [10] 徐振海, 王雪松, 肖顺平, 等. 极化敏感阵列信号检测: 部分极化情形[J]. *电子学报*, 2004, 32(6): 938-941.  
Xu Zhenhai, Wang Xuesong, Xiao Shunping, et al. Partially polarized signal detection using polarization sensitive array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(6): 938-941. (in Chinese)
- [11] He Jin, Zhang Zenghui, Shu Ting, et al. Direction finding of multiple partially polarized signals with a nested cross-dipole array[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, 16: 1679-1682.
- [12] Pal P, Vaidyanathan P P. Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, 58(8): 4167-4181.
- [13] Shu Ting, He Jin, Han Xiaodong, et al. Joint DOA and degree-of-polarization estimation of partially-polarized signals using nested arrays[J]. *IEEE Communications Letters*, 2020, 24(10): 2182-2186.
- [14] Pan Yujian, Gao Xiaoxin, Xu Xin. Underdetermined estimation of multiple parameters for partially polarized signals with dual-polarized coprime array[J]. *IEEE Communications Letters*, 2021, 25(9): 2923-2927.
- [15] Shu Ting, He Jin, Wen Fangqing, et al. Incompletely polarized MIMO radar for target direction estimation[J]. *IEEE Transactions on Radar Systems*, 2023, 1: 532-541.
- [16] Chen Xiaolong, Guan Jian, He You, et al. Detection of low observable moving target in sea clutter via fractal characteristics in fractional Fourier transform domain[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2013, 7(6): 635-651.
- [17] Wang Anan, Wang S L, Wu Guoqing, et al. A method for detecting sea-surface small targets based on features of time-varying polarization scattering mechanism[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2025, 61(6): 15311-15326.
- [18] He Jin, Ahmad M O, Swamy M N S. Near-field localization of partially polarized sources with a cross-dipole array[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 857-870.

- [19] Wang Shuai, Wen Shun, Deng Zilan, et al. Metasurface-based solid Poincaré sphere polarizer[J]. Physical Review Letters, 2023, 130(12): 123801.
- [20] Hu Qi, Chen Ke, Zhang Na, et al. Arbitrary and dynamic Poincaré sphere polarization converter with a time-varying metasurface[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(4): 2101915.
- [21] Wen Fangqing, Gui Guan, Gacanin H, et al. Compressive sampling framework for 2D-DOA and polarization estimation in mmWave polarized massive MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023, 22(5): 3071-3083.
- [22] 张凯. 根据部分极化波极化特征信息估计飞行器姿态研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- Zhang Kai. Research of aircraft attitude estimation based on partially polarized electromagnetic wave signal[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012. (in Chinese)
- [23] Pan Yujian, Xu Xin, Yang Afeng. DOA estimation for a mixture of completely and partially polarized signals with enhanced separation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(5): 6983-6994.

## 作者简介



**黎庞哲** 男, 2001年9月出生于重庆市。现为中国人民解放军网络空间部队信息工程大学数据与目标工程学院硕士研究生。主要研究方向为空间目标信号获取与处理。

E-mail: J\_kui@outlook.com



**赵 闯** 男, 1978年出生于河北省。现为中国人民解放军网络空间部队信息工程大学数据与目标工程学院副教授。主要研究方向为电子对抗、雷达信号处理。

E-mail: rushzhao@163.com



**胡德秀** 男, 2017年博士毕业于清华大学电子工程系。现为中国人民解放军网络空间部队信息工程大学数据与目标工程学院副教授。主要研究方向为无源定位与电子对抗。

E-mail: paper\_hdx@126.com



**杨 阳** 男, 1990年3月出生于河南省。博士毕业于西安电子科技大学信号与信息处理专业。现为河南省安全苛求系统人机智能交互工程技术研究中心讲师。主要研究方向为深度学习、人工智能、信号处理。

E-mail: yyang\_5@stu.xidian.edu.cn



**崔毓函** 女, 1996年10月出生于上海市。现为中国人民解放军网络空间部队信息工程大学数据与目标工程学院讲师。主要研究方向为无人机网络资源调度及其应用。

E-mail: 497781293@qq.com