

文章编号: 2095-4980(2019)02-0234-05

## 低空镜像角闪烁的雷达极化效应分析

张梦琪<sup>1</sup>, 施龙飞<sup>2</sup>, 王雪松<sup>2</sup>

(1.上海航天电子技术研究所, 上海 201109; 2.国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410000)

**摘要:** 雷达探测低空目标时, 镜像“目标”严重影响雷达检测与仰角测量性能。镜像“目标”对雷达仰角测量的影响一般用两点源角闪烁模型来描述, 国内外已有很多文献对低空镜像角闪烁问题展开了研究, 但未对雷达极化的重要影响给予足够关注。本文着重围绕雷达天线极化和目标极化散射矩阵对低空镜像角闪烁的影响效应, 开展了理论推导与仿真分析, 相关模型可为雷达低空镜像角闪烁抑制技术提供参考和依据。

**关键词:** 天线极化; 极化散射矩阵; 镜反射; 角闪烁

**中图分类号:** TN95

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201902.0234

## Analysis of radar polarization effect of low angle target tracking

ZHANG Mengqi<sup>1</sup>, SHI Longfei<sup>2</sup>, WANG Xuesong<sup>2</sup>

(1.Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2.College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410000, China)

**Abstract:** Specular multipath causes erratic elevation tracking at low target detection, which can be described as two-point glint model. The multipath errors encountered in radar tracking of low-elevation targets have attracted increasing interest in recent years. Many techniques for reducing radar multipath angle-tracking errors are proposed, but the important influence of radar polarization is not paid enough attention to. The theoretical derivation and simulation analysis are carried out about the effect of radar antenna polarization and polarization scattering matrix of target and image target. This proposed model can provide a reference for low angle target tracking.

**Keywords:** antenna polarization; polarization scattering matrix; specular multipath; glint

雷达探测低空目标时, 受地面反射信号影响, 在接收目标回波信号的同时会有从其他路径进入雷达天线的多径信号, 其中最为主要的就是经地面(海面)镜面反射而形成的“镜像”信号。由于镜像信号到达方向在俯仰上不同于目标直达回波, 因此, 会对雷达仰角测量造成影响。雷达界常将目标与镜像视为“两点源”, 并基于两点源角闪烁模型分析低空镜像对雷达仰角测量的影响<sup>[1]</sup>。

围绕低空镜像角闪烁问题, 雷达界一方面在多径效应建模等方面开展研究, 文献[1]结合实验数据研究了镜、漫反射散射特性, 首次建立了镜、漫反射系数模型。在此基础上, 文献[2]应用电磁散射原理分析并提出了镜反射和漫反射建模方法。文献[3]考虑了远距离区地球曲率的影响, 改进了文献[2]的镜反射模型。另一方面, 围绕角闪烁抑制提出了大量的抑制方法, 主要包括以下几类: 复角技术<sup>[4]</sup>、改进单脉冲技术(双零点法<sup>[5]</sup>、对称波束法<sup>[6]</sup>和偏轴跟踪<sup>[7]</sup>)、多维高分辨技术(角度、距离<sup>[8]</sup>、多普勒高分辨和多极化分辨)、频率分集<sup>[9]</sup>技术以及极化分集<sup>[10]</sup>技术。其中, 复角技术依赖于地面反射系数的先验信息; 改进单脉冲方法通过修正天线方向图来减弱多径的影响; 角度高分辨技术需要大天线口径; 距离高分辨对带宽要求很高; 多普勒高分辨技术对相干处理时间有很高要求; 频率分集技术应用较为广泛, 但分集效果要求有很大的分集带宽, 对雷达系统要求较高。

极化分集也是近年来较受关注的一个重要技术途径, 通过雷达接收极化分集或发射极化分集, 都可以改善仰角测量性能, 但其改善性能取决于目标极化散射矩阵、镜反射系数以及雷达收发极化设置等多种因素, 十分复杂, 至今尚未有公开文献对此问题进行专门研究, 使得极化分集方法的优化设计至今未有实质性突破, 限制了极化雷达在改善低空仰角测量与跟踪性能方面的潜力。文献[11]在现有极化分集方法基础上, 提出了一种新

的极化分集方法，相比于均匀分集、随机分集等简单极化分集方式，显现出更大的优势。但该文献对收发极化方式进行了约束，也未对目标、镜像极化散射矩阵的影响进行更深入的分析。实际上，雷达天线收发极化、目标/镜像极化散射矩阵对极化分集性能有重要影响。本文围绕这一问题展开深入的分析研究，建立低空镜像角闪烁的极化效应模型，为极化雷达针对不同场景设计更为有效的极化分集方式提供参考和依据。论文着重分析了典型发射极化情况下，雷达接收极化对角闪烁抑制性能的影响，并利用典型极化散射类型目标进行仿真验证。

### 1 镜像两点源测角误差的极化效应模型

如图 1 所示建立直角坐标系，极化敏感天线分布在 Z 轴上，接收天线由一对正交电偶极子构成，这对正交电偶极子沿 X 和 Z 方向放置。假定目标位于 YOZ 平面并且满足远场条件，直达波可以看作是平面波，通常菲涅尔反射区域位于雷达附近，可认为是平面反射，因此反射波也是平面波<sup>[12]</sup>。如图 1 所示，远场条件下，直达波与散射波互相平行，因此可忽略双站散射的影响，目标角度、镜像角度和擦地角之间的关系满足  $\theta_d = -\theta_i = \psi = \theta$ ，其中， $\theta$  为目标偏离水平轴的角度。在  $(\bar{\varphi}, \bar{\theta})$  极化基下，直达波和反射波可分别表示为：

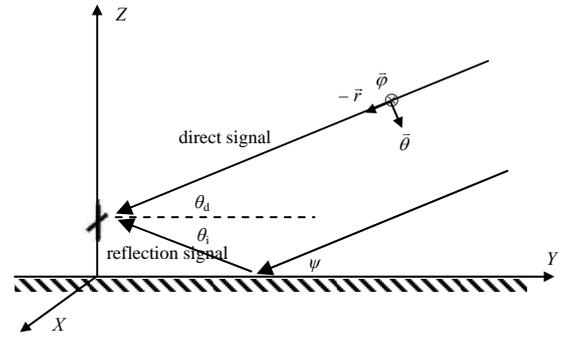


Fig.1 Specular model of radar detection of low angle target  
图 1 雷达探测低角目标的镜面反射模型

$$\begin{cases} e_d = E_\varphi \cdot \bar{\varphi} + E_\theta \cdot \bar{\theta} \\ e_i = \rho_H(\theta) E_\varphi \cdot \bar{\varphi} + \rho_V(\theta) E_\theta \cdot \bar{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

本文仅考虑光滑镜面场景，则水平极化和垂直极化条件下镜面反射系数  $\rho_H$  和  $\rho_V$  可表示为<sup>[12]</sup>：

$$\rho_H(\theta) = \frac{\sin \theta - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \theta}}, \quad \rho_V(\theta) = \frac{\epsilon_c \sin \theta - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \theta}}{\epsilon_c \sin \theta + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \theta}} \quad (2)$$

式中： $\epsilon_c$  为反射面复介电常数， $\epsilon_c = \epsilon_r - j60\lambda\sigma$ ， $\epsilon_r$  为反射面的相对介电常数， $\sigma$  为电导率<sup>[6]</sup>。

在  $(\bar{X}, \bar{Z})$  极化基下，假定发射极化  $\mathbf{h}_t = [\cos \epsilon \quad e^{j\tau} \sin \epsilon]^T$ ，则在  $(\bar{\varphi}, \bar{\theta})$  极化基下的目标回波信号为：

$$\begin{bmatrix} E_\varphi \\ E_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\varphi\varphi} & S_{\varphi\theta} \\ S_{\theta\varphi} & S_{\theta\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \epsilon \\ e^{j\tau} \sin \epsilon \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\cos \theta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $\begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\cos \theta} \end{bmatrix}$  为极化基  $(\bar{X}, \bar{Z})$  到极化基  $(\bar{\varphi}, \bar{\theta})$  的转换因子； $\begin{bmatrix} S_{\varphi\varphi} & S_{\varphi\theta} \\ S_{\theta\varphi} & S_{\theta\theta} \end{bmatrix}$  为目标极化散射矩阵。

定义目标后向散射回波的极化比为  $\rho_d = e^{j\varphi} \tan \gamma$ ，其中  $(\gamma, \varphi)$  为相位描述子，则根据式(3)可得

$$\rho_d = e^{j\varphi} \tan \gamma = \frac{E_\theta}{E_\varphi} = \frac{\cos \theta \cos \epsilon S_{\theta\varphi} + e^{j\tau} \sin \epsilon S_{\varphi\varphi}}{\cos \theta \cos \epsilon S_{\varphi\varphi} + e^{j\tau} \sin \epsilon S_{\theta\varphi}} \quad (4)$$

根据镜面反射理论，镜像回波在  $(\bar{\theta}, \bar{\varphi})$  极化基下的极化比为  $\rho_i = e^{j\zeta} \tan \eta = \frac{\rho_V}{\rho_H} e^{j\varphi} \tan \gamma$ ，其中， $(\eta, \zeta)$  为镜像回波相位描述子。因此，在  $(\bar{X}, \bar{Z})$  极化基下， $E_\varphi, E_\theta$  用式(3)代入，可得 X 和 Z 方向的电偶极子接收到的目标与镜像回波合成信号矢量为：

$$\begin{bmatrix} E_X \\ E_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 + \rho_V) E_\varphi \\ -\cos \theta (1 + \rho_H) E_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1 + \rho_V) (\cos \epsilon S_{\theta\varphi} + e^{j\tau} \cos \theta \sin \epsilon S_{\varphi\varphi}) \\ \cos \theta (1 + \rho_H) (\cos \epsilon S_{\theta\theta} + e^{j\tau} \cos \theta \sin \epsilon S_{\varphi\theta}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

目标和镜像在接收天线处的总接收电压为  $\mathbf{U} = \mathbf{h}_r^T \begin{bmatrix} E_X \\ E_Z \end{bmatrix}$ ，其中， $\mathbf{h}_r = [\cos \alpha \quad e^{j\beta} \sin \alpha]^T$  为接收天线极化形式。

用极化比的形式表示镜像与目标的复电压之比，能够更清晰地反映出雷达测角误差与收发极化之间的关系，因此，目标回波与镜像回波复电压之比可用复数  $\rho = |\rho| e^{j\varphi}$  表示为：

$$\rho = |\rho|e^{j\varphi_\rho} = \frac{1 + \frac{\rho_V}{\rho_H} e^{j(\varphi+\beta)} \cos\theta \tan\gamma \tan\alpha}{1 + e^{j(\varphi+\beta)} \cos\theta \tan\gamma \tan\alpha} = \frac{1 + \rho_r \rho_i}{1 + \rho_r \rho_d} \quad (6)$$

$$|\rho| = \left| \frac{1 + \rho_r \rho_i}{1 + \rho_r \rho_d} \right|, \quad \varphi_\rho = \arg\left( \frac{1 + \rho_r \rho_i}{1 + \rho_r \rho_d} \right) \quad (7)$$

$$\begin{cases} \rho_r = e^{j\beta} \cos\theta \tan\alpha, \quad \rho_d = \frac{\cos\theta \cos\varepsilon S_{\theta\varphi} + e^{j\tau} \sin\varepsilon S_{\varphi\theta}}{\cos\theta \cos\varepsilon S_{\varphi\theta} + e^{j\tau} \sin\varepsilon S_{\theta\varphi}} \\ \rho_i = \frac{\rho_V}{\rho_H} \times \frac{\cos\theta \cos\varepsilon S_{\theta\varphi} + e^{j\tau} \sin\varepsilon S_{\varphi\theta}}{\cos\theta \cos\varepsilon S_{\varphi\theta} + e^{j\tau} \sin\varepsilon S_{\theta\varphi}} \end{cases} \quad (8)$$

根据文献[13], 为便于分析测角误差, 本文定义归一化线偏差为扩展目标(目标与镜像构成两点源扩展目标)视在中心与目标位置在垂直于直达波方向上的投影距离, 且靠近镜像一侧为正, 则归一化线偏差  $e$  为:

$$e = \frac{\theta - \hat{\theta}}{\theta} = 2 \frac{|\rho|^2 + |\rho| \cos\varphi_\rho}{1 + 2|\rho| \cos\varphi_\rho + |\rho|^2} \quad (9)$$

由式(9)可知, 归一化线偏差与擦地角、镜反射系数、发射与接收极化和目标散射矩阵有关。  $e < 0$  时, 雷达偏离目标指向其上方;  $0 < e < 1$  时, 雷达指向目标与地面之间;  $e = 1$  时, 雷达指向地平面;  $e > 1$  时, 雷达指向地下;  $e = 2$  时, 雷达恰好指向镜像。

## 2 雷达极化对测角误差的影响分析

针对目前最为普遍的“单发双收”极化雷达体制, 研究典型发射极化状态下, 雷达接收极化对低空镜像角闪烁误差的影响。

下面以发射极化为  $45^\circ$  斜极化为例, 分析雷达天线极化与归一化线偏差的关系。设目标极化散射矩阵为  $\zeta \begin{bmatrix} 1 & c_1 e^{j\varphi_1} \\ c_1 e^{j\varphi_1} & c_2 e^{j\varphi_2} \end{bmatrix}$ , 则目标回波极化比幅值为  $\tan\gamma = \zeta \left| \frac{c_1 e^{j\varphi_1} + c_2 e^{j\varphi_2}}{1 + c_1 e^{j\varphi_1}} \right|$ 。

根据式(7)~式(9)画出的图 2, 清晰地反映出发射极化为  $45^\circ$  斜极化情况下, 镜反射系数、目标散射矩阵(图中用镜像回波极化比幅值  $\tan\eta$  表示)、接收极化对归一化线偏差的影响。其中, 红色区域表示归一化线偏差为  $\pm 20\%$  (即  $e = \pm 0.2$ ) 的范围, 暂称之为“可接受范围”。红色区域的中心位置即归一化线偏差为零的位置。由式(9)可知, 当  $\rho = 0$  时, 归一化线偏差为 0。进一步由式(6)可知, 当  $\rho_r \rho_i = -1$  时,  $\rho = 0$ , 即当接收极化与镜像回波极化(由目标极化散射矩阵、镜反射系数、发射极化决定)互为交叉极化时, 镜像干扰被完全抑制, 归一化线偏差为 0。图 2 显示红色区域中心位置确实为镜像回波交叉极化, 验证了当雷达接收极化与镜像回波极化互为交叉极化时, 归一化线偏差为 0 的结论。红色区域的范围(包括  $\alpha$  和  $\beta$  值范围)呈现为一个椭圆形。

由图 2 可以看出: a) 红色区域内  $\alpha$  值范围主要取决于  $\tan\eta$  的大小,  $\alpha$  值位置由镜像回波极化比幅度  $\tan\eta$  决定; b) 红色区域  $\beta$  值范围受  $\tan\eta$  影响不大,  $\beta$  值位置主要由镜像回波极化比相位  $\zeta$  决定; c) 当  $\tan\eta$  太小或太大时, 红色区域不存在(即归一化线偏差均超过  $\pm 20\%$ )。

为进一步分析镜像回波极化比幅度  $\tan\eta$  和相位  $\zeta$  对红色区域范围的影响, 设置多次蒙特卡洛仿真, 根据切

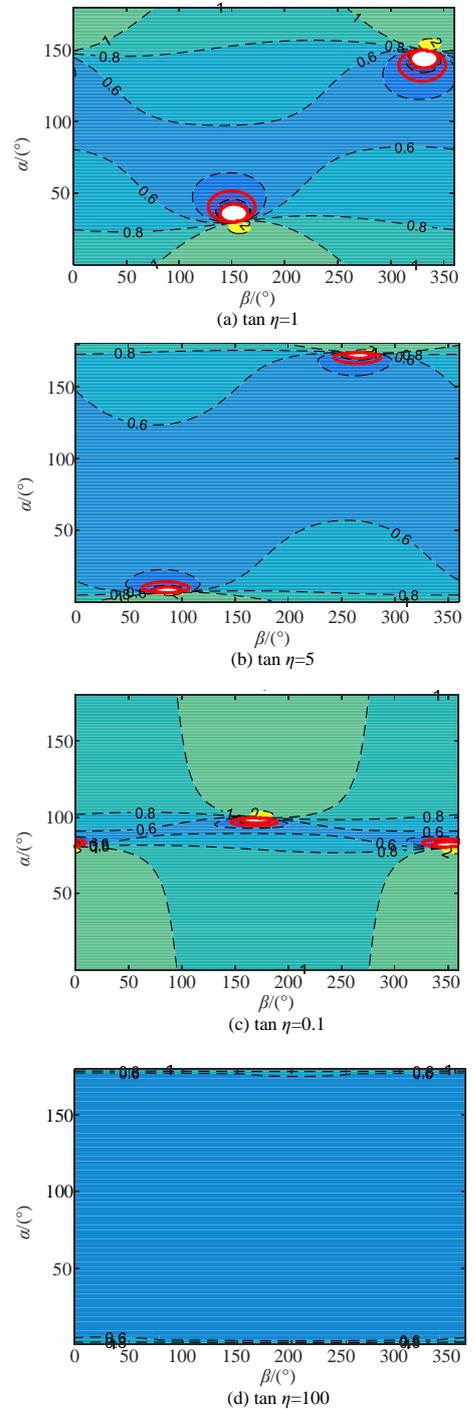


Fig.2 Relationship of the normalized error and the receiving polarization in different image echo polarization ratios

图 2 不同镜像回波极化比情况下归一化线偏差随接收极化的变化

比雪夫大数定理可知，在抽样次数非常多的情况下，归一化线偏差落入红色区域的概率越大，表明红色区域的范围越大。由图 3(a)可知， $\zeta$  值对落入红色区域的概率影响不大，因此，进一步以  $\zeta = 108^\circ$ ,  $\varepsilon_c = 65 - j30.7$ ,  $\theta = 3^\circ$  为例，统计得到  $\tan \eta$  与归一化线偏差落入红色区域的概率的关系示意图，如图 3(b)所示，归一化线偏差落入红色区域的概率随  $\tan \eta$  的增大呈现出先增大后减小最后趋近于 0 的趋势，暂称极大值对应的  $\tan \eta$  为最佳镜像极化比幅值。而镜像回波极化比除与发射极化和目标散射矩阵有关以外，还与擦地角、镜反射系数(由反射面复介电常数和擦地角决定)有密切关系，图 4 给出了擦地角与镜像回波极化比幅度之间的关系，低角情况下， $\tan \eta$  随  $\theta$  的增大，先减小后增大，并在 Brewster 角附近取到最小值( $\varphi_B = \arcsin(1/\sqrt{\varepsilon_r - 1})$ )<sup>[12-16]</sup>。

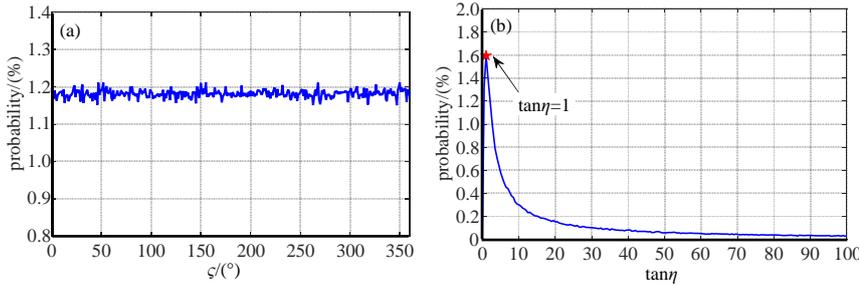


Fig.3 Probability of the normalized error falling into the red region vs. the amplitude and phase of polarization ratio of image echo  
图 3 归一化线偏差落入红色区域的概率随镜像回波极化比幅度和相位变化的统计示意图

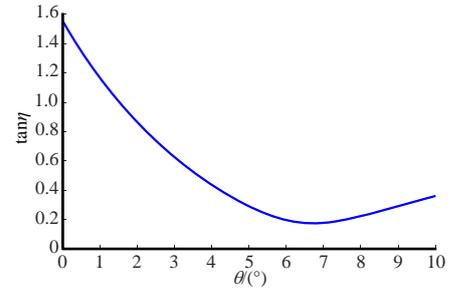


Fig.4 Grazing angle for specular reflection vs. amplitude of polarization ratio of image echo  
图 4 擦地角与镜像回波极化比幅度之间的关系 ( $\varepsilon_c = 65 - j30.7$ )

综上所述，按照发射极化为垂直极化、水平极化等情况进一步分析后，可得到下述相同的结论：

- 1) 红色区域(可接受范围)中心位置由镜像回波极化决定，当接收极化与镜像回波极化互为交叉极化时，归一化线偏差达到极小值；
- 2) 红色区域大小由发射极化、目标散射矩阵、反射面复介电常数(工作频率)、擦地角共同决定；
- 3) 红色区域中， $\alpha$  值范围主要由镜像回波极化比决定， $\beta$  值范围与其无关。

### 3 仿真分析

仿真中设置目标高度为 1 km，目标与雷达径向距离为 20 km，由几何关系可知目标真实角度  $\theta = 3^\circ$ ，X 波段海水复介电常数  $\varepsilon_c = 65 - j30.7$ ，目标为暗室某战斗机数据。按文中理论分析进行仿真验证，天线波束中心指向高于水平面  $1^\circ$ ，3 dB 波束宽度为  $3^\circ$ ，发射极化为  $45^\circ$  斜极化、垂直极化和水平极化。

为清晰反映归一化线偏差较小时对应的接收极化，图 5 给出了归一化线偏差的倒数随接收极化的变化，峰值点为误差较小的情况。发射极化为  $45^\circ$  斜极化、垂直极化和水平极化时，统计得到镜像回波极化比(由镜反射系数、发射极化和目标散射矩阵共同决定)分别为 0.733 4、0.336 5 和 0.770 3。如图 5 所示，当  $\tan \eta$  越接近最佳镜像极化比幅值时，峰值点数目越多。经计算验证可知，峰值中心位置与镜像回波极化互为交叉极化。综上所述，实测数据仿真结果与理论分析结果一致。

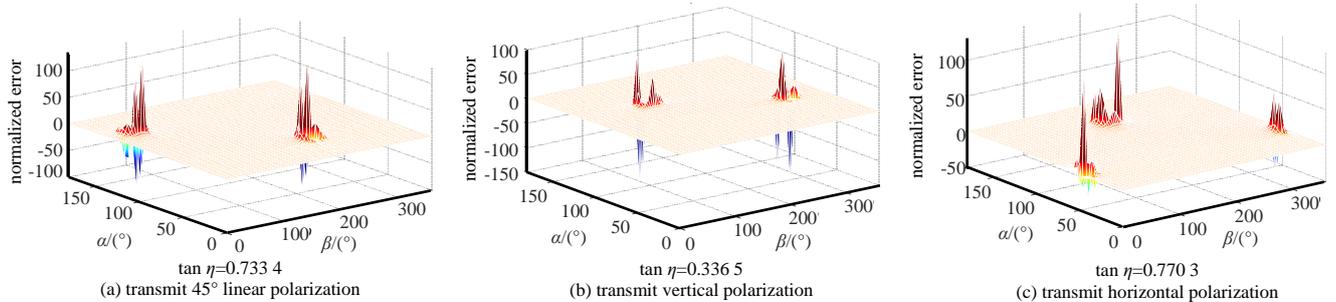


Fig.5 Relationship between the receiving polarization and the normalized error  
图 5 接收极化与归一化线偏差倒数的关系

## 4 结论

本文建立了目标、镜像两点源归一化线偏差的雷达天线极化效应模型,阐述了雷达天线极化对归一化线偏差的影响。针对几类典型的目标散射矩阵和发射极化,重点分析了雷达接收极化对归一化线偏差的影响效应模型,该模型可进一步为通过极化分集优化设计抑制低空镜像角闪烁技术提供理论依据,为提高雷达低空目标跟踪能力提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] BEARD C I. Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean[J]. IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1961,9(5):470-483.
- [2] BARTON D K. Low-angle radar tracking[J]. Proceedings of IEEE, 1974,62(6):687-704.
- [3] BAR-SHALOM Y,KUMAR A. Tracking low elevation targets in the presence of multipath propagation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1994,30(3):162-173.
- [4] HOWARD D D,SHERMAN S M,THOMSON D N,et al. Experimental results of the complex indicated angle technique for multipath correction[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974,10(6):779-787.
- [5] WHITE W D. Double-null technique for low-angle tracking[J]. Microwave Journal, 1976(19):35-38,60.
- [6] WHITE W D. Low-angle radar tracking in the presence of multipath[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1974,10(6):835-852.
- [7] 杨世海,胡卫东,杜小勇. 雷达低空目标跟踪的偏差补偿算法研究[J]. 电子学报, 2002,30(12):1741-1744. (YANG Shihai,HU Weidong,DU Xiaoyong. Research on deviation compensation algorithm for radar low altitude target tracking[J]. Acta Electronica Sinica, 2002,30(12):1741-1744.)
- [8] 赵宏钟,何松华. 基于高分辨距离像的单脉冲角跟踪技术[J]. 电子学报, 2000,8(4):142-144. (ZHAO Hongzhong,HE Songhua. Single pulse angle tracking technology based on high resolution range image[J]. Acta Electronica Sinica, 2000,8(4):142-144.)
- [9] MANGULIS V. Frequency diversity in low-angle radar tracking[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981,17(1):149-153.
- [10] 施龙飞,王雪松,肖顺平. 低空镜像角闪烁的极化抑制[J]. 电波科学学报, 2008,23(6):1038-1044. (SHI Longfei,WANG Xuesong,XIAO Shunping. Low-level mirror angle flicker polarization suppression[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23(6):1038-1044.)
- [11] 施龙飞. 雷达极化抗干扰技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2003. (SHI Longfei. Research on radar polarization anti-jamming technology[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2003.)
- [12] 徐振海,肖顺平,熊子源. 阵列雷达低角跟踪技术[M]. 北京:科学出版社, 2014:145-156. (XU Zhenhai,XIAO Shunping,XIONG Ziyuan. Array radar low angle tracking technology[M]. Beijing:Science Press, 2014:145-156.)
- [13] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005:162-164. (HUANG Peikang,YIN Hongcheng,XU Xiaojian. Radar target characteristics[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005:162-164.)
- [14] MONAKOV Andrei. Maximum-likelihood estimation of parameters of an extended target in tracking monopulse radars[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2012,48(3):2653-2665.
- [15] 杨世海. 相控阵雷达低空目标探测与跟踪技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2002:36-40. (YANG Shihai. Research on low-altitude target detection and tracking technology of phased array radar[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2002:36-40.)
- [16] 丁鹭飞. 雷达原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001:15-21. (DING Lufei. Radar principle[M]. Xi'an,China: Xidian University Press, 2001:15-21.)

### 作者简介:



张梦琪(1992-),女,黑龙江省齐齐哈尔市人,在读硕士研究生,主要研究方向为雷达极化信息处理与抗干扰技术,email:zhangmengqi317@163.com.

施龙飞(1978-),男,安徽省芜湖市人,博士,讲师,主要研究方向为雷达信号处理、雷达对抗技术、雷达系统仿真。

王雪松(1972-),男,内蒙古自治区包头市人,博士,教授,主要研究方向为研究方向为雷达极化信息处理与抗干扰技术。