

不同战场环境下超低空导弹目标抗多径方法

邹高翔¹, 童创明¹, 刘博², 朱建兵³, 刘佩文⁴

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 95169 部队, 南宁, 530031; 3. 93770 部队, 北京, 102309;
4. 95539 部队, 云南寻甸, 655200)

摘要 多径干扰是影响超低空探测的主要因素, 针对防空导弹对超低空导弹目标探测问题, 研究了不同战场环境下的抗多径方法。采用物理光学法与等效电磁流混合方法(PO+MEC)快速获取导弹目标的电磁散射特性, 结合传统的四路径模型, 并引入导引头天线方向图对其进行修正, 提取出不同战场环境下超低空导弹目标的多径干扰。仿真结果表明, 不同的战场环境对应着不同的布儒斯特角, 混凝土、半干地、干地和湿地环境下所对应的布儒斯特角分别为 30°、26.5°、21.5°和 10.5°; 当导引头采用 VV 极化方式以布儒斯特角下视探测超低空导弹目标时, 多径干扰达到极小水平, 所接收信号的信干比达到极大水平, 此时导引头对于超低空导弹目标的探测能力最强, 目标回波最为明显。仿真结果对于防空导弹弹道优化具有借鉴意义, 为超低空对抗打下基础。

关键词 多径干扰; 布儒斯特角; 天线方向图; 物理光学法; 等效电磁流法

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.04.017

中图分类号 TJ761.7 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)04-0099-06

Study on Anti-multipath Method of Super-low Altitude Missile Target under Diverse Battlefield Environments

ZOU Gaoxiang¹, TONG Chuangming¹, LIU Bo², ZHU Jianbin³, LIU Peiwen⁴

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. Unit 95169, Nanning 530031, China; 3. Unit 93770, Beijing 102309, China;
4. Unit 95539, Xundian 655200, Yunnan, China)

Abstract: Multipath interference is a main factor of having influence on detection in super-low altitude. Anti-multipath methods under condition of diverse battlefield environments are studied. By the hybrid method PO+MEC of Physical Optics (PO) and Method of Equivalent Currents (MEC), this paper calculates the electromagnetic scattering characteristic of missile target. Antenna radiation pattern of seeker is introduced to modify traditional Four Path Method (FPM). The multipath interference of super-low altitude missile target under diverse battlefield is extracted. The simulation results show that the different battlefield has corresponding Brewster angle. The Brewster angles of concrete, dry land, half-dry land and wet land environment are 30°, 26.5°, 21.5° and 10.5° respectively. When seeker of air-defense missile takes the VV polarization mode with the Brewster angle to detect super-low altitude missile target, mul-

收稿日期: 2017-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61372033)

作者简介: 邹高翔(1993—), 男, 湖南衡阳人, 硕士生, 主要从事军用目标电磁散射特性及战场电磁环境研究。E-mail: gxiangzou@163.com

引用格式: 邹高翔, 童创明, 刘博, 等. 不同战场环境下超低空导弹目标抗多径方法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(4):99-104. ZOU Gaoxiang, TONG Chuangming, LIU Bo, et al. Study on Anti-multipath Method of Super-low Altitude Missile Target under Diverse Battlefield Environments [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(4):99-104.

tipath interference reaches minimum level, and the signal to interference ratio reaches maximum level. At this moment, the seeker has the best detection capability to super-low altitude missile target and the target echo is the most obvious.

Key words: multipath interference; brewster angle; antenna radiation pattern; physical optics; method of equivalent currents

超低空空袭兵器以巡航导弹为代表,依靠贴地、掠海超低空机动飞行,利用地球表面的曲率以及地表的起伏来躲避雷达的直接探测,借助目标与下方环境多次耦合所产生的多径效应^[1],以隐藏自身的回波信号,躲避对方防空武器的探测,是防空体系面临的主要威胁之一^[2]。因此,针对不同战场环境下超低空导弹目标的抗多径方法研究,具有重要的军事意义与国防价值。

超低空目标探测的多径问题,在本质上属于计算电磁学中目标与环境复合散射问题,Johnson首次提出“四路径”模型^[3-4]来描述目标与下方环境的多次耦合作用,并计算了无限大介质平板上介质目标的散射;王勇、许小剑在复反射系数上考虑了表面粗糙度的影响,提出了修正四路径模型^[5];陈琿、赵焯通过统计确定性粗糙面上镜像反射单元的分布特征并加权各镜像路径的耦合贡献,提出了加权多路径模型^[6-7]。王利军等^[8]运用经典的多路径回波模型,得到了利用短波雷达探测和增加天线架设高度来抗多径的方法;杨勇等^[9]基于多径散射模型,得到了雷达在多径环境下检测低飞目标时具备最佳检测性能的最佳第二门限值;吕韶昱等^[10]基于多径几何模型,采用多目标分辨算法结合偏差补偿算法对掠海巡航飞行的低空目标进行俯仰角的偏轴跟踪测量,具备较强的抗多径性能;段世忠^[11]等基于多路径反射模型,得到了利用目标距离与角度信息辨别镜向干扰和采用频率捷变的抗多径方法。文献^[12]针对超低空探测中存在的多径干扰问题,提出“广义布儒斯特效应”,以降低多径干扰的影响。上述研究均基于经典的“四路径”模型,主要集中在优化雷达的探测条件以及信号处理方法等方面,并没有从根本上减弱多径干扰的影响。防空导弹导引头在探测超低空目标时,导引头的天线波束是具备一定宽度的,此时多径干扰并不完全从主瓣进入,这一问题常常被忽略或者简化。

本文采用物理光学法和等效电磁流混合方法(PO+MEC)^[13]获取目标及镜像目标的散射特性,基于导引头天线方向图修正的四路径模型来提取和分析多径干扰,并总结出不同战场环境下的超低空导弹抗多径方法。

1 修正四路径模型

引入天线方向图对传统的四路径模型进行修正。采用高斯型天线方向图^[14],综合考虑导引头天线方向图模拟的复杂程度与精度,主要设置主瓣和两侧各2个旁瓣,其它旁瓣增益值与主瓣相比很小,因此采用统一的常值增益 g_3 来近似。

令设波束主瓣的天线方向图函数为高斯状:

$$G_{MB}(\theta) = \exp\left(\frac{-2\ln 2\theta^2}{\theta_B^2}\right), |\theta| \leq \mu \quad (1)$$

式中: θ_B 为波束主瓣半功率点宽度; μ 是主瓣增益等于 g_3 时的方位角度值,且有:

$$\mu = \theta_B \sqrt{\ln g_3 / (-2\ln 2)} \quad (2)$$

第一旁瓣方向图用中心位置为 $\pm 1.5\mu$ 的高斯函数描述:

$$G_{B1}(\theta) = g_1 \exp\left(\frac{-2\ln 2(\theta + 1.5\mu)^2}{\theta_{B1}^2}\right), \mu \leq |\theta| \leq 2\mu \quad (3)$$

g_1 为第一旁瓣的增益峰值, θ_{B1} 的取值满足 $\theta = \pm \mu, \theta = \pm 2\mu$ 时第一旁瓣的增益为 g_3 ,由此可得:

$$\theta_{B1} = 0.5\mu \sqrt{(-2\ln 2) / \ln(g_3/g_1)} \quad (4)$$

同理,可将第二旁瓣的方向图用中心为 $\pm 2.5\mu$ 的高斯函数表示:

$$G_{B2}(\theta) = g_2 \exp\left(\frac{-2\ln 2(\theta + 2.5\mu)^2}{\theta_{B2}^2}\right), 2\mu < |\theta| \leq 3\mu \quad (5)$$

其中:

$$\theta_{B2} = 0.5\mu \sqrt{(-2\ln 2) / \ln(g_3/g_2)} \quad (6)$$

设置参数^[14]如下:第一旁瓣增益峰值 $G_1 = 10\lg g_1 = -20$ dB,第二旁瓣增益峰值 $G_2 = 10\lg g_2 = -25$ dB,其余旁瓣相对较小,均取为定值 $G_r = 10\lg g_3 = -30$ dB,即对应增益为 $g_1 = 0.01, g_2 = 10^{-2.5} = 0.00316, g_3 = 0.001$ 。引入高斯型方向图来模拟导引头方向图,修正四路径模型见图1。

图1中, H 为目标的飞行高度, h 为防空导弹的飞行高度, R 为弹目的空间距离, D 为弹目水平投影的距离。各参数角度关系为:

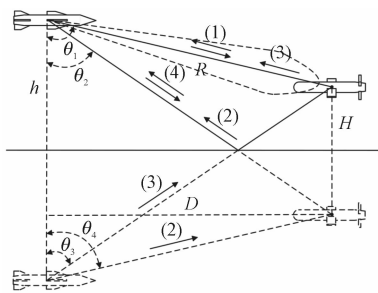


图 1 修正四路径模型

Fig. 1 Model of modified four path method

$$\begin{cases} h = R\cos\theta_1 + H \\ D = R\sin\theta_1 \\ \theta_2 = \theta_3 = \tan^{-1}[D/(H+h)] \\ \theta_4 = \theta_1 \end{cases} \quad (7)$$

四路径模型将目标下方的微粗糙面简化为无限大平面,认为反射能量全部集中在镜反射方向。当表面十分粗糙时,漫反射分量将会占主导地位。在此采用修正反射系数^[5]方法来描述地海面环境的作用:

$$\rho(\theta_i^{sur}) = \Gamma(\theta_i^{sur})\rho_s(\theta_i^{sur}) \quad (8)$$

式中: θ_i^{sur} 为入射到粗糙面的入射角; Γ 为垂直或水平极条件下的菲涅尔反射系数; ρ_s 为粗糙表面反射因子,具体表达式参考文献^[5]。

记来自实际目标的散射场为 $\mathbf{E}(\theta_i, \theta_s)$, 来自镜像目标的散射场为 $\mathbf{E}'(\theta_i, \theta_s)$ 。图 1 中,路径 1 的电磁波散射与传播路径为“导引头→目标→导引头”,产生的目标场记为 $\rho\mathbf{E}_1(\theta_1, \theta_1)$, 是一次单站散射。

路径 2 的电磁波散射与传播路径为“导引头→目标→环境→导引头”,等效为“镜像导引头→镜像目标→环境→导引头”,产生的散射场记为 $\rho(\theta_2)\mathbf{E}'_2(\pi-\theta_1, \theta_2)$, 是一次双站散射。

路径 3 的电磁波散射与传播路径为“导引头→环境→目标→导引头”,等效为“镜像导引头→环境→目标→导引头”,产生的散射场记为 $\rho(\theta_2)\mathbf{E}_3(\pi-\theta_3, \theta_1)$, 是一次双站散射。

路径 4 的电磁波散射与传播路径为“导引头→环境→目标→环境→导引头”,等效为“导引头→环境→镜像目标→环境→导引头”产生的散射场记为 $\rho^2(\theta_2)\mathbf{E}'_4(\theta_2, \theta_2)$, 是一次单站散射。

由图 1 可发现,目标与环境的多次作用所产生的多径干扰并不是从主瓣的最大增益处直接进入,可能会从主瓣的其他方向或者副瓣进入,记多径干扰方向与主瓣的最大增益方向夹角为 $\Delta\theta$, 则 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 。设方向图修正系数为 $\xi(\Delta\theta)$, 主瓣的最大增益方向的增益 $G_{MB}(\theta)|_{\theta=0^\circ} = 1$, $\xi(\Delta\theta)$ 的取值规则如下:

$$\xi(\Delta\theta) = \frac{G(\Delta\theta)}{G_{MB}(\theta)|_{\theta=0^\circ}} =$$

$$\begin{cases} G_{MB}(\Delta\theta), & |\Delta\theta| \leq \mu \\ G_{B1}(\Delta\theta), & \mu \leq |\Delta\theta| \leq 2\mu \\ G_{B2}(\Delta\theta), & 2\mu \leq |\Delta\theta| \leq 3\mu \end{cases} \quad (9)$$

通过方向图修正系数 $\xi(\Delta\theta)$ 修正后的四路径模型为:

$$\mathbf{E}^s = \mathbf{E}_1(\theta_1, \theta_1) + \xi(\Delta\theta)\rho(\theta_2)\mathbf{E}'_2(\pi-\theta_1, \theta_2) + \rho(\theta_2)\mathbf{E}_3(\pi-\theta_3, \theta_1) + \xi(\Delta\theta)\rho^2(\theta_2)\mathbf{E}'_4(\theta_2, \theta_2) \quad (10)$$

式中: \mathbf{E}^s 表示导引头位置所接收到的目标回波电场矢量,即来自经导引头方向图修正后的 4 条回波路径上场量的叠加。多径干扰即为除目标场之外的 2、3、4 条路径上场量的叠加。

2 电磁计算方法

2.1 物理光学法

超低空导弹目标可以采用三角面元来模拟,三角面元的远场散射场,是在图 2 的被照射区域 S 上的三角面元上,通过 PO 积分^[15]计算得到的。

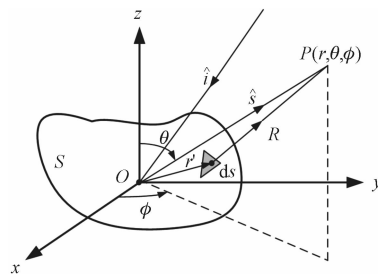


图 2 面元电磁散射示意图

Fig. 2 The electromagnetic scattering from the facet
其远场散射场近似为:

$$\mathbf{E}^s \approx \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} [\mathbf{s} \times (\mathbf{M}_s + \eta_0 \mathbf{s} \times \mathbf{J}_s)] 2\Delta \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{I} \quad (11)$$

式中: \mathbf{J}_s 和 \mathbf{M}_s 为面元上的电流和磁流, ΔA 为三角面元的面积。利用戈登面元积分法, \mathbf{I} 可表达为:

$$\mathbf{I} = \frac{1}{jk} \frac{1}{|\mathbf{n} \times \mathbf{w}| \Delta A} \sum_{m=1}^3 (\mathbf{n} \times \mathbf{w}) \cdot$$

$$\mathbf{a}_m \exp(jk\mathbf{r}_m \cdot \mathbf{w}) \text{sinc}\left(\frac{1}{2}k\mathbf{a}_m \cdot \mathbf{w}\right) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{w} = \mathbf{s} - \hat{\mathbf{i}}$, $\hat{\mathbf{i}}$ 和 \mathbf{s} 为入射和散射方向单位矢量, $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$, k 为波数, \mathbf{a}_m 表示面元 S_i 第 m 条边的长度和方向, \mathbf{r}_m 为第 m 条边中点的位置矢量。当 $|\mathbf{n} \times \mathbf{w}| = 0$ 时,式(12)可以写为 $\mathbf{I} = \exp(jk\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{w})$, 其中, \mathbf{r}_0 为三角形质点的位置矢量。最终将所有面元的远场散射场相加,得到目标的远场散射场。

2.2 等效电磁流法

超低空导弹目标存在棱边结构,为了进一步改进 PO 的结果,采用计算劈边的 MEC 方法^[16],通过将等效电磁流代入辐射积分来求解棱边结构的远区边缘绕射场。对边缘为 C 的任意劈边,它的远区边缘绕射场可表示为:

$$\mathbf{E}^d = \frac{ik_0}{4\pi} \frac{e^{-jk_0 r}}{r} \int_C \left\{ \eta_0 \boldsymbol{\delta} \times [\boldsymbol{\delta} \times \mathbf{J}(\mathbf{r}')] + \boldsymbol{\delta} \times \mathbf{M}(\mathbf{r}') \right\} e^{jk_0 \boldsymbol{\delta} \cdot \mathbf{r}'} dl \quad (13)$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{r}') = I_c(\mathbf{r}') \hat{\mathbf{t}}$ 和 $\mathbf{M}(\mathbf{r}') = I_m(\mathbf{r}') \hat{\mathbf{t}}$ 分别为等效边缘电流和磁流, $\hat{\mathbf{t}}$ 为边缘 C 的切向单位矢量; $\boldsymbol{\delta}$ 是观察方向的单位矢量; \mathbf{r}' 是从原点到边缘上某点的径向矢量; dl 是沿边缘 C 的弧长增量。

2.3 算法验证

为了验证 PO+MEC 算法的正确性和有效性,将其与精确的数值算法矩量法(MOM)进行比较,设置雷达工作频率为 $f=1$ GHz,计算对象为某型导弹,导弹头朝向 x 正向并沿 x 轴放置,计算 VV 极化下入射角度为 $\varphi_i=0^\circ$, $\theta_i=-90^\circ \sim 90^\circ$ 的单站散射特性,散射系数见图 3。

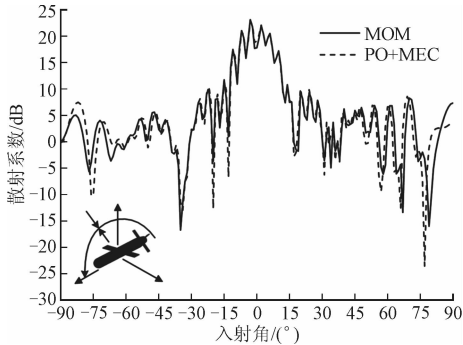


图3 某型导弹单站散射系数

Fig. 3 The monostatic scattering coefficient of missile

PO+MEC 算法能够较好的反映目标的三角面元、棱边的散射,仿真结果同 MOM 算法相比,能够得到准确的解。

3 仿真分析

基于 PO+MEC 算法,采用经导引头方向图修正的四路径模型对超低空导弹目标在不同战场环境下的多径干扰进行提取与分析。

信干比定义为在确定的入射方向(θ_i, φ_i)下,目标的后向散射强度与多径干扰强度的比值,具体表达式如下:

$$S/I = \frac{|\mathbf{E}_T(\theta_i, \varphi_i)|^2}{|\mathbf{E}_M(\theta_i, \varphi_i)|^2} \quad (14)$$

式中: $|\mathbf{E}_T(\theta_i, \varphi_i)|^2$ 和 $|\mathbf{E}_M(\theta_i, \varphi_i)|^2$ 分别为目标的

后向散射强度和多径干扰强度。

工作频率均设置为 1 GHz,参照国际无线电咨询委员会(CCIR)推荐的一套地面反射系数图表^[17]^[34-35],获得不同反射面的复介电常数作为仿真条件的选取依据,见表 1。

表1 不同反射面的复介电常数

Tab. 1 Complex dielectric constants of different reflecting surface

反射面	电导率	相对介电常数	复介电常数
混凝土	2×10^{-5}	3	$3.0 - 0.0004i$
干地	1×10^{-5}	4	$4.0 - 0.0002i$
半干地面	4×10^{-2}	7	$7.0 - 0.72i$
湿地	2×10^{-1}	30	$30.0 - 3.6i$

本文的仿真环境均是处于防空导弹的末制导阶段,在该阶段导引头对超低空目标处于稳定跟踪状态;仿真目标均为某型超低空巡航导弹,目标高度为 15 m;环境类型为高斯谱粗糙面,均方根高度为 $h_{rms} = 0.01$ m,相关长度为 $l_x = l_y = 1.0$ m;防空导弹与目标的空间距离为 5 km;导引头半功率波束宽度为 5° ;仿真所用的散射角均为擦地角。电磁波经过地面的散射作用,电场幅度将衰减,相位将滞后,当垂直极化波以特定角度照射的介质表面,出现镜向散射为极小值的现象,其为布儒斯特效应,而在水平极化波照射下则不存在该效应,因此在仿真中雷达波的极化方式均为 VV 极化。下面将对超低空导弹目标在不同战场环境下的多径干扰和信干比进行仿真与分析,见图 4。

如图 4 所示,混凝土、半干地、干地和湿地环境下所对应的布儒斯特角 φ_B (擦地角)分别为 30° 、 26.5° 、 21.5° 和 10.5° ,可以发现随着介电常数的增加,所对应的布儒斯特角是减小的,该角度为最佳探测角。提取的路径 2、3、4 之和为多径干扰,均在布儒斯特角处出现了极小值。值得注意的是,在以上算例中,多径干扰在 38° 左右也出现了一个极小值,这是由于超低空导弹目标自身的双站散射特性所引起的,因此不能作为不同战场环境下对抗多径干扰的参考依据。进一步观察信干比曲线可以得到,在布儒斯特角处信干比均出现了极大值,这是由于以布儒斯特角对超低空导弹目标进行探测时,此时的多径干扰达到极小值水平,因此信干比在此角度达到极大值,目标回波强度也达到极大水平。从仿真结果可以得到以下结论:当防空导弹采用 VV 极化方式以布儒斯特角下视探测超低空目标时,导引头所接收到的多径干扰最小,信干比达到极大值水平,此时对超低空目标的探测能力最强,目标回波最为明显。

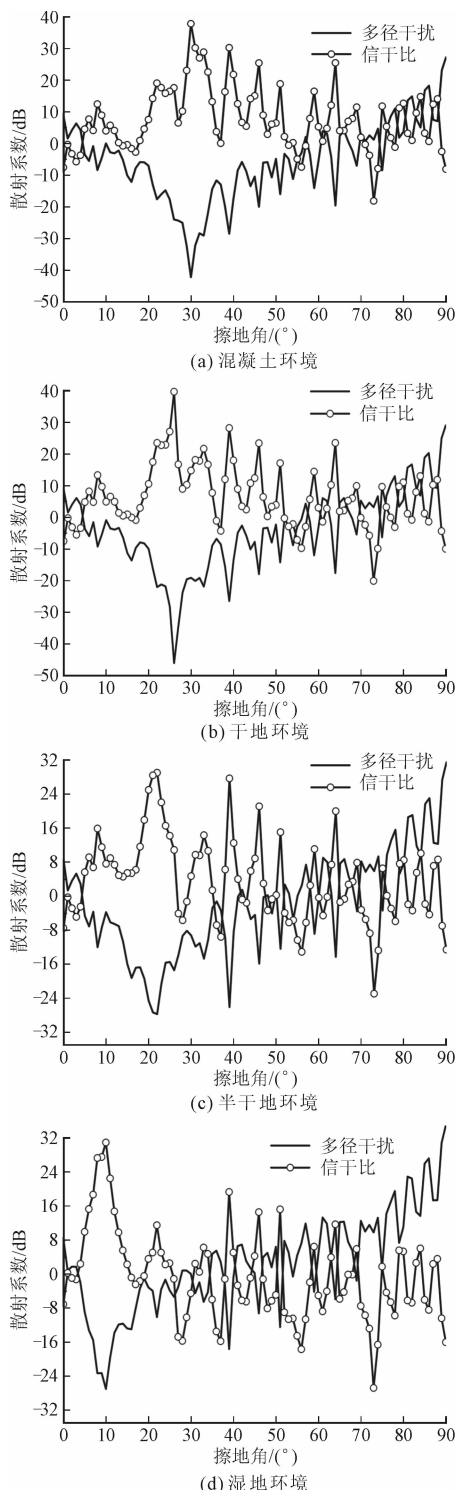


图4 超低空导弹目标不同战场环境下多径干扰与信干比
Fig. 4 The multipath interference and signal to interference ratio of super-low altitude missile target under diverse battlefield environments

4 结语

本文针对超低空导弹目标的抗多径方法研究,是在国内外尚未检索到相关文献的基础之上,首次通过导引头天线方向图对传统的四路径模型进行修

正,并以此为基础结合 PO+MEC 电磁计算方法研究和总结了不同战场环境下超低空导弹的抗多径方法。下一步工作将研究如何把修正四路径模型拓展到半主动雷达导引头对超低空目标的探测过程中,同时生成实际的粗糙表面并对粗糙表面面元的斜率进行统计,将实际粗糙面的影响加权至每条路径之中,进一步优化该修正四路径模型。

参考文献(References):

- [1] 毛虎,杨建波,邱宏坤. 多径效应对信号接收及方向测量的影响 [J]. 电讯技术, 2010, 50(10): 63-68.
MAO H, YANG J B, QIU H K. Influence of Multipath Effect on Signal Receiving and Direction Finding [J]. Telecommunication Engineering, 2010, 50(10): 63-68. (in Chinese)
- [2] FEICKERT A. Missile Survey: Ballistic and Cruise Missiles of Foreign Countries [C]// Congressional Research Service Reports, 2004: 1-22.
- [3] JOHNSON J T. A Study of the "Four-Path" Mode for Scattering from an Object above a Half-Space [J]. Microwave Optical Technology Letters, 2001, 30(2): 130-134.
- [4] JOHNSON J T. A Numerical Study of Scattering from an Object above a Rough Surface [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2002, 50(10): 1361-1367.
- [5] 王勇,许小剑. 海上舰船目标的宽带雷达散射特征信号仿真 [J]. 航空学报, 2009, 30(2): 337-342.
WANG Y, XU X J. On Wideband Radar Signature Simulation of Ships over Sea Surface [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2009, 30(2): 337-342. (in Chinese)
- [6] ZHAO Y, ZHANG M, CHEN H, et al. Radar Scattering from the Composite Ship-Ocean Scene: Doppler Spectrum Analysis Based on the Motion of Six Degrees of Freedom [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4341-4347.
- [7] ZHAO Y, YUAN X F, ZHANG M, et al. Radar Scattering from the Composite Ship-Ocean Scene: Facet-Based Asymptotical Model and Specular Reflection Weighted Model [J]. IEEE Trans Antennas and Propagation, 2014, 62(9): 4810-4815.
- [8] 王利军,郭建明,郝晶. 多径效应对雷达探测低空巡航导弹的影响 [J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(1): 7-14.
WANG L J, GUO J M, HAO J. The Influence of Multipath Effect on Low Altitude Cruise Missile Detection in Radar [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(1): 7-14. (in Chinese)
- [9] 杨勇,王雪松,张文明,等. 多径环境下海面低空目

- 标检测技术研究 [J]. 电波科学学报, 2011, 26(3): 443-449.
- YANG Y, WANG X S, ZHANG W M, et al. Detection Technology of Low-Flying Target on the Sea in Multipath Environment [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(3): 443-449. (in Chinese)
- [10] 吕韶昱, 万建伟, 辛勤. 海面多径环境下雷达目标俯仰角测量提取的研究与应用 [J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(5): 48-53.
- LYU S Y, WAN J W, XIN Q. Research on Application of Radar Target Elevation Measurement Extraction in the Presence of Sea-Surface Multipath [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 48-53. (in Chinese)
- [11] 段世忠, 周荫清, 张孟, 等. 主动雷达导引头多路径效应的数字仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(4): 447-450.
- DUAN S M, ZHOU Y Q, ZHANG M, et al. Numerical Simulation of Multipath Effect of Active Radar Seeker [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(4): 447-450. (in Chinese)
- [12] 隋栋训, 童创明, 彭鹏, 等. 超低空目标的广义布儒斯特效应 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(4): 29-32.
- SUI D X, TONG C M, PENG P, et al. Study on G-Brewster of Super-low Altitude Target [J]. Air Force Engineering University Journal; Natural Edition, 2015, 16(4): 29-32. (in Chinese)
- [13] CORBEL C, BOURLIER C, PINEL N, et al. Rough Surface RCS Measurements and Simulations Using the Physical Optics Approximation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(10): 5155 - 5165.
- [14] 宋旭东, 汪学刚, 向敬成. 机载相控阵雷达和差通道地面杂波功率谱分析 [J]. 信号处理, 2002, 18(1): 91-96.
- SONG X D, WANG X G, XIANG J C. A Procedure for Analyzing Ground Clutter Spectrum in Sum and Difference Channels for Airborne Phased Array Radars [J]. Signal Processing, 2002, 18(1): 91-96. (in Chinese)
- [15] ZHANG J, XU B, CUI T J. An Alternative Treatment of Saddle Stationary Phase Points in Physical Optics for Smooth Surfaces [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(2): 986-991.
- [16] NGUYEN A N, SHIRAI H. Electromagnetic Wave Scattering from Dielectric Bodies with Equivalent Current Method [C]// IEEE International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, 2013: 744-747.
- [17] 徐振海, 肖顺平, 熊子源. 阵列雷达低脚跟踪技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- XU Z H, XIAO S P, XIONG Z Y. Low Angle Tracking Techniques for Array Radars [M]. Science Press, Beijing, 2014. (in Chinese)

(编辑: 徐 敏)