

1-2-2019

Computation and Analysis for Coupling Scattering Characteristics of Low-fly Target Above Ocean Surface

Guanghui Wu

1.School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; ;

Chuangming Tong

1.School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; ;

Dongxun Sui

2.Unit of 93246, Yanbian 133613, China; ;

Yulong Sun

3.Unit of 95910, Jiuquan 735000, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Computation and Analysis for Coupling Scattering Characteristics of Low-fly Target Above Ocean Surface

Abstract

Abstract: Aiming at fast computation of the composite scattering of low-fly target and ocean surface, the improvement of conventional multi-path algorithm is implemented, and *a new multi-path algorithm is proposed based on the statistics of mirror facets' slope. New algorithm takes the modulation from gravity into account in comparison with conventional algorithm.* The distribution of mirror facets' slope is counted from a determined ocean surface, and the multi-path coupling is summed with a weight coefficient, which scatters from mirror facets with different slope. Furthermore, the coupling scattering characteristic is obtained from target and ocean surface. Simulation result indicates that the proposed algorithm could explain how the coupling scattering is affected by the slow change of mirror facets' slope, and could simulate the G-Brewster effect effectively, which lies a solid foundation for electromagnetic scattering research of the moving target and time-varied ocean surface.

Keywords

composite scattering, G-Brewster, ultralow altitude, distribution for slops, multi-path

Recommended Citation

Wu Guanghui, Tong Chuangming, Sui Dongxun, Sun Yulong. Computation and Analysis for Coupling Scattering Characteristics of Low-fly Target Above Ocean Surface[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(3): 1030-1035.

海面低飞目标复合散射计算及分析

武光辉¹, 童创明¹, 隋栋训², 孙玉龙³

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051; 2. 93246 部队, 吉林 延边 133613; 3. 95910 部队, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 针对低飞目标与海面复合散射的快速计算问题, 对传统的多径散射计算算法进行了改进, 提出一种基于镜像反射面元斜率统计的多径散射计算算法。改进算法相比传统的多径散射模型考虑了在重力波调制作用下的确定海面斜率分布特性。对确定海面上镜像反射面元斜率的分布特性进行统计, 然后以此对各种斜率下的镜像反射面元的多径耦合散射进行加权, 得到总的耦合散射贡献, 进而求得目标与确定海面的复合电磁散射特性。仿真实验结果表明, 该方法合理解释镜像反射面元斜率缓变对耦合散射的影响, 能够有效地对广义布儒斯特效应进行仿真, 为进一步对研究时变海面上运动目标的电磁散射特性打下基础。

关键词: 复合散射; 广义布儒斯特效应; 超低空; 斜率分布; 多径

中图分类号: TN011; TN955

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 03-1030-06

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201803033

Computation and Analysis for Coupling Scattering Characteristics of Low-fly Target Above Ocean Surface

Wu Guanghui¹, Tong Chuangming¹, Sui Dongxun², Sun Yulong³

(1. School of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

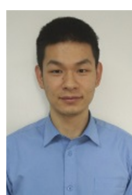
2. Unit of 93246, Yanbian 133613, China; 3. Unit of 95910, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Aiming at fast computation of the composite scattering of low-fly target and ocean surface, the improvement of conventional multi-path algorithm is implemented, and a new multi-path algorithm is proposed based on the statistics of mirror facets' slope. New algorithm takes the modulation from gravity into account in comparison with conventional algorithm. The distribution of mirror facets' slope is counted from a determined ocean surface, and the multi-path coupling is summed with a weight coefficient, which scatters from mirror facets with different slope. Furthermore, the coupling scattering characteristic is obtained from target and ocean surface. Simulation result indicates that the proposed algorithm could explain how the coupling scattering is affected by the slow change of mirror facets' slope, and could simulate the G-Brewster effect effectively, which lies a solid foundation for electromagnetic scattering research of the moving target and time-varied ocean surface.

Keywords: composite scattering; G-Brewster; ultralow altitude; distribution for slopes; multi-path

引言

巡航导弹、无人机等超低空突防武器和相应



收稿日期: 2016-03-18 修回日期: 2016-04-25;
基金项目: 国家自然科学基金(61372033), 航空基金
(20130196005);
作者简介: 武光辉(1991-), 男, 河南周口, 硕士, 研
究方向为目标与环境电磁散射特性及应用; 童创明
(1964-), 男, 湖北黄冈, 博士, 教授, 博导, 研究方
向为计算电磁学与雷达信号处理。

低空突防战法的出现使得舰载防空系统面临巨大威胁, 超低空目标与环境复合散射产生的多径效应给雷达的检测和跟踪带来了巨大的挑战。尤其是对雷达导引头而言, 复合电磁散射会导致接收回波信号由目标直接散射和强杂波背景下的多条反射路径散射叠加组成。当多径效应带来的多径回波和目标回波的多普勒频差小于导引头速度门

带宽时, 会对导引头截获和跟踪目标产生影响^[1], 使得导引头跟踪真实目标与镜像目标的合成相位中心或者镜像目标, 造成仰角跟踪误差。研究超低空目标与海面的复合散射现象和原理, 寻找抑制多径效应的方法, 对于提高导引头雷达对超低空目标的截获和跟踪能力具有重要的理论意义和工程价值^[2]。

通过计算电磁学方法研究超低空目标和环境的复合散射一直是国内外研究的难点和热点。低空目标和海面的复合散射同时具有时变性和超电大性, 这要求电磁计算方法要在保证一定精度的同时兼顾计算效率, 给低空目标与海面复合散射电磁建模带来了巨大的困难。经过国内外学者的不懈努力取得了丰硕的成果, 不乏开创性的研究, 其中主要包括基于数值框架的加速算法、基于高低频混合或半解析的算法和基于高频近似的混合算法。数值加速的算法, 比如广义稀疏矩阵平面迭代及规范网格算法(GSMCG)^[3], 快速多极子(MLFMA)^[4], 快速远场近似(FAFFA)^[4], 时域有限差分(FDTD)^[5], 有限元(FEM)^[6]和区域分解法(DDM)^[7]等, 具有较高的计算精度, 但计算效率仍不能满足现实问题的需求。高低频混合或半解析算法, 比如基尔霍夫-距离法混合(KA-MOM)^[8], 半空间距离法(Half-space MOM)^[9]等, 虽然解决了一部分效率问题, 但仍无法满足雷达导引头所在 X/Ku 波段的计算条件。高频近似算法, 比如双向解析射线追踪(BART)^[10], 物理光学-物理光学迭代(Hybrid PO-PO)^[11], 四路径(FPM)^[12], 以及改进的多径模型^[2,13]等, 这些算法具有一定的精度保证, 且具较高的计算效率, 比较适合超电大目标与海面耦合散射的计算, 进一步进行回波信号仿真。J.T.Johnson 提出的 FPM 算法是应用于介质平面半空间的, 虽然后来通过引入粗糙度因子对复反射系数进行修正, 进而应用于粗糙环境, 但实际上仍然将目标下方粗糙海面当成平面处理, 耦合散射强点仅在少数几个镜像方向出现, 并不能反映确定海面重力波调制的轮廓特征对耦合散射的影响。文献[13]采用小斜率近似(SSA)代替

粗糙度因子来计算确定海面的复反射系数, 虽然考虑了确定海面重力波调制的轮廓特征, 但对于超电大的确定海面来说 SSA 的积分核带来了巨大的计算量。

本文针对在较高频段低飞目标与海面复合散射的快速计算问题, 对传统的多径散射计算算法进行了改进, 提出一种基于镜像面元斜率统计模型的多径散射计算算法。通过对确定海面上镜像反射面元的斜率分布特性进行统计, 得到确定海面重力波调制的轮廓特征; 使用镜像反射面元斜率的概率密度函数对不同斜率下面片产生的耦合散射贡献进行加权, 得到总的耦合散射场。并通过与文献[2]计算得到的结果进行比较, 证明了该算法的正确性; 通过与传统多径算法计算结果比较, 体现了该算法的优势。

1 多径镜像等效原理

文献[12]使用四路径 FPM 来解决低空目标与无限大粗糙面的复合散射问题, 并在时频域与 MOM 的计算结果进行对比, 验证了该方法的精度。J.T.Johnson 将目标与粗糙面的复合散射 E_{total} 分为粗糙面的散射场 $E_{surface}$ 和差场 E_{diff} 。

$$E_{total} = E_{surface} + E_{diff} \quad (1)$$

如图 1 所示, FPM 忽略高次耦合场的作用将差场又分解为(a)目标直接散射场 E_{target} 、(b)(c)目标一次耦合场 $E(k_i, k'_s)$ 、 $E(k'_i, k_s)$ 、(d)目标二次耦合场四条等效路径的相干叠加 $E(k'_i, k'_s)$, 其中(b)(c)(d)过程组成了目标与粗糙面的耦合散射场 $E_{coupling}$ 。

$$E_{diff} = E_{target} + E_{coupling} \quad (2)$$

$$E_{coupling} = \rho E(k_i, k'_s) + \rho E(k'_i, k_s) + \rho \rho E(k'_i, k'_s) \quad (3)$$

多径镜像等效原理把粗糙面等效为一个平面, 即图 1 中虚直线。将目标与粗糙面耦合散射场 $E_{coupling}$ 的主要贡献归结于目标的双站(b,c)和单站(d)散射在等效平面上的镜像反射场。如式(3)所示, 具体通过散射场 $E(k_i, k_s)$ 与等效复反射系数 ρ 相乘, 然后再相干叠加来实现^[14-15]。

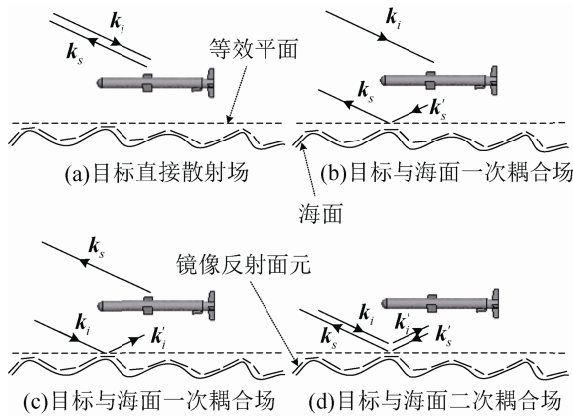


图1 四路径模型
Fig. 1 Four-path model

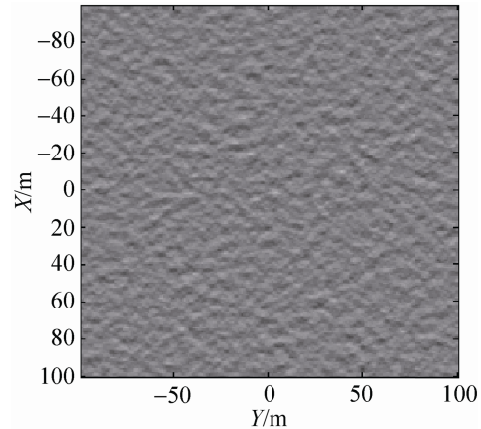
2 基于镜像面元斜率统计的多径模型

等效复反射系数虽然考虑了确定海面表面的均方根高度对复反射系数的影响,但忽略了确定海面表面的斜率分布特性,导致对风速和入射角度过于敏感,并且耦合散射在个别角度出现尖峰。本文通过对确定海面镜像反射面元的斜率进行统计来解决这一问题。

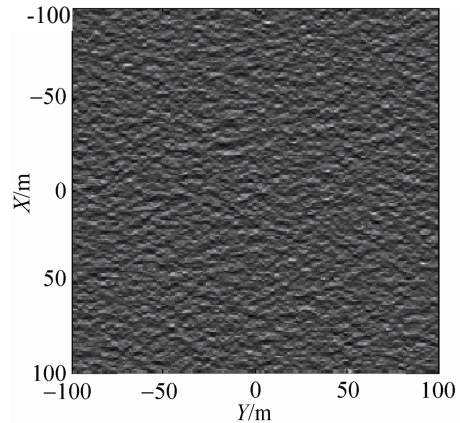
2.1 海面大尺寸面元的斜率分布特性

双尺度理论将海面看做大尺度重力波和小尺度毛细波的叠加。重力波调制决定了海面的轮廓特征,可以通过镜像反射理论来计算其镜像散射贡献;毛细波调制决定了海面的细节,可以通过布拉格谐振(Bragg resonant)理论来计算漫反射的贡献。

对于确定海面来说,可以根据大尺度轮廓将海面离散成 1~2 m 量级的非相关面元来模拟海面的空间分布特性^[14,16-17]。文献[15]使用镜像面元的斜率分布对 Bragg 散射进行调制,建立散射系数面元模型,结合基尔霍夫和双尺度理论给出了适合计算单双站散射系数的面元模型。图 2 中(a)为海面上 10 m 高度的风速 3 m/s 时,根据 Elfouhaily 海谱采用线性滤波法生成的大尺度海面面元模型,表达了海面重力波调制的轮廓特征,面元尺寸为 1 m×1 m; (b)当电磁波频率为 10 GHz,沿 X 轴方向以 45°入射时,采用文献[15]提出的方法得到的 VV 极化条件下面元的镜像散射系数。



(a) 海面面元模型的高度分布

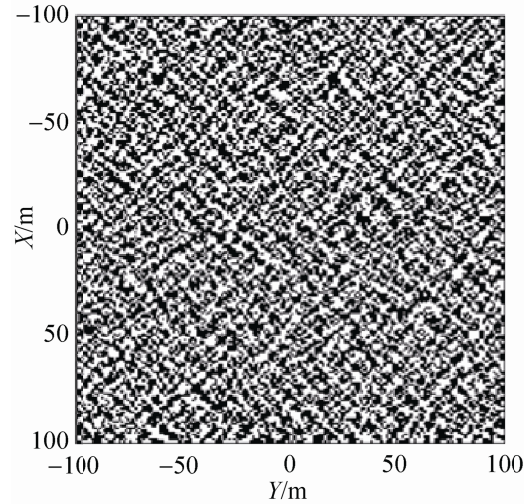


(b) VV极化反射系数

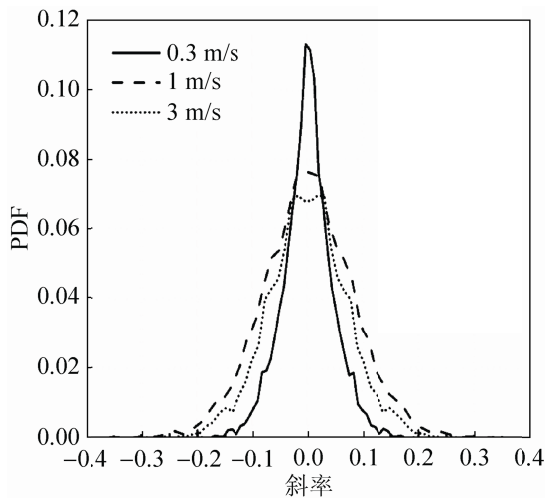
图2 确定海面面元的反射系数

Fig. 2 Scattering coefficient of a determined ocean surface' facets

确定海面面元由于重力波调制向不同方向倾斜,服从 Gram-Charlier 分布。根据高频近似的多径镜像等效原理,只有那些法向平行于散射平面或者接近平行的面元才满足镜像反射的条件,才能将耦合场反射到接收方向,这些面元称之为镜像反射面元。散射平面是指由入射电磁波方向 \hat{k}_i 和铅垂方向 \hat{z} 构成的平面,平行于散射平面即几何关系里的线面平行。采用与图 2 相同的参数,图 3 中(a)为镜像反射面元的空间分布,白色为镜像反射面元; (b)为不同风速条件下镜像反射面元斜率的概率密度函数(PDF)分布,从斜率分布的角度体现了重力波调制的海面大尺度轮廓特征。镜像反射面元斜率由镜像反射面元和水平面构成二面角的正切值决定,可参考图 4。



(a) 镜像反射面元



(b) 镜像面元斜率分布

图 3 镜像反射面元及其斜率分布

Fig. 3 Mirror facets and the distribution of its slope

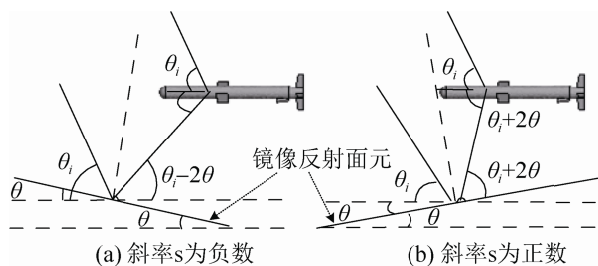


图 4 不同斜率面元下的角度关系

Fig. 4 Angle relation of missile and facets with different slope

2.2 改进多径散射模型

传统的多径模型将目标下面的粗糙海面近似为平面, 这种近似只适用于微粗糙和高掠射角的情

况。考虑到可以通过统计的方法获取对耦合散射产生主要贡献的镜像反射面元的斜率分布 PDF, 并且镜像反射面元是受毛细波调制的微粗糙面元, 所以可以借鉴双尺度算法的思想, 采用加权积分的方法对多径模型进行改进。

$$\mathbf{E}_{coupling} = \int \mathbf{E}_{coupling}(s) \text{pdf}(s) ds \quad (4)$$

式中: s 为镜像反射面元方向量在散射平面内的斜率, $\text{pdf}(s)$ 为概率密度函数, $\mathbf{E}_{coupling}(s)$ 为镜像面元斜率为 s 时产生的耦合散射。

$$\mathbf{E}_{coupling}(s) = \rho \mathbf{E}(\mathbf{k}_i, \mathbf{k}'_s) + \rho(s) \mathbf{E}(\mathbf{k}'_i, \mathbf{k}_s) + \rho^2(s) \mathbf{E}(\mathbf{k}'_i, \mathbf{k}'_s) \quad (5)$$

式中: $\rho(s)$ 为反射系数, \mathbf{k}_i 、 \mathbf{k}_s 分别为入射方向和散射方向, 计算后向耦合散射时 $\mathbf{k}'_i = -\mathbf{k}_s$, \mathbf{k}'_i 、 \mathbf{k}'_s 由镜像反射面元的斜率决定。

图 4 中(a)(b)为不同斜率 $s = \tan(\theta)$ 下, 目标与面元的角度关系。图 4(a)对应斜率 s 为负数的情况, 通过这些角度关系可以计算得到图 1(b)(c)(d)中的 \mathbf{k}'_i 、 \mathbf{k}'_s , 图 4(b)对应斜率 s 为正数的情况。在具体计算过程中, 需要对图 1 中(a)、(b)、(c)、(d)中的单双站散射场 $\mathbf{E}(\cdot)$ 进行计算, 这里采用高频方法 PO/EEC 算法来实现, 具体可参考文献[2]。

$$\mathbf{E}(\cdot) = \mathbf{E}_{PO}(\cdot) + \mathbf{E}_{EEC}(\cdot) \quad (6)$$

3 仿真分析

选取战斧巡航导弹作为目标, 位于海面上方 10 m 处, 海面风速为 1 m/s, 入射频率为 10 GHz, 海面介电常数为 $\epsilon_r = 50 - 19.8j$ [2]。由于研究的重点是广义布儒斯特效应, 主要研究 VV 极化[2]。采用改进算法计算目标后向散射场与耦合场如图 5 所示, 目标与耦合场基本处于一个量级, 因而耦合场形成的多径干扰会对目标形成干扰, 在低掠角阶段更加明显。在 10° 左右出现广义布儒斯特效应, 这与文献[2]通过 SSA 算法所得结论一致, 证明了改进算法的正确性。

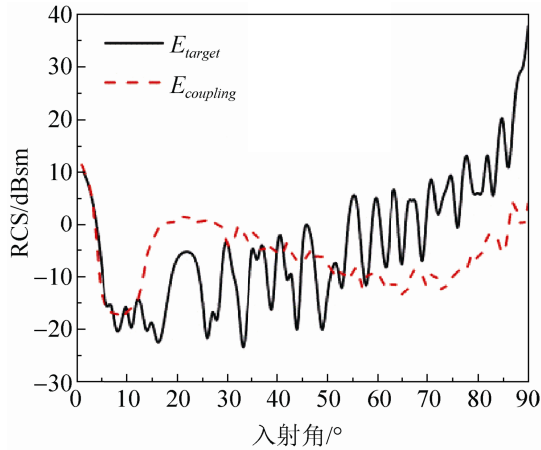


图5 目标后向散射场和后向耦合场比较

Fig. 5 Comparison between backscattering and coupling scattering

针对图1所示多径模型采用改进算法后,得到各条路径散射场如图6。在多径散射中,只发生一次镜面反射的路径散射场最强,从图6中可以看出,第四条路径的散射场相比于其它两条强度要弱很多,布儒斯特效应也不是特别明显,这主要是第四条路径经过了二次镜面反射后损耗比较严重。而第二条和第三条的路径基本上与耦合场的趋势一致。从单独的每一条路径来看,各入射角处的散射场 RCS 与目标基本处于一个量级,这就容易形成干扰,导致雷达无法得到准确的距离和速度信息。而在布儒斯特角处,耦合场 RCS 有剧烈衰减的现象,散射强度的下降有利于克服多径干扰。

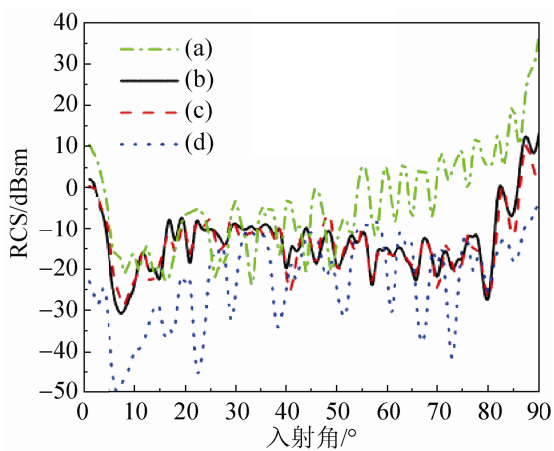
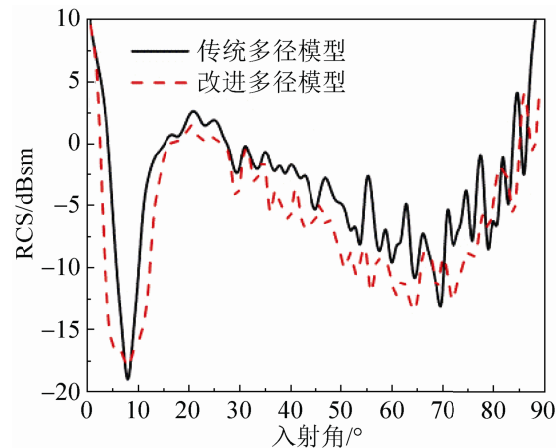


图6 不同路径散射场

Fig. 6 Scattering patterns from different paths

从图7中可知,采用加权算法后,耦合散射的趋势基本与原有算法一致,但是相比而言,曲线要缓和的多。针对垂直极化的耦合场,变化最明显的是原有的布儒斯特角附近。假设把粗糙面等效为单一平面,如图中传统多径模型计算结果所示,布儒斯特角附近将会出现陡降。当采用改进多径模型时,通过对海面面元的斜率统计,将海面大尺度轮廓的分布特性考虑进去后,布儒斯特角附近曲线下下降变缓,原有的布儒斯特角发生展宽。这说明改进的算法更好地考虑了确定性海面大尺度轮廓的分布特性对耦合散射的影响。这对从电磁散射的物理机理角度寻找抑制多径效应的方法,提高导引头截获和跟踪低空目标具有积极意义。

图7 传统多径算法与改进算法得出耦合场比较
Fig. 7 Comparison of coupling scattering between conventional multi-path algorithm and the new

4 结论

本文在传统多径算法的基础上提出一种基于镜像面元斜率统计模型的多径散射计算算法,用于在高频段快速计算低飞目标与海面复合散射。通过对确定海面上镜像反射面元的斜率分布特性进行统计,得到确定海面重力波调制的轮廓特征,合理解释镜像反射面元斜率缓变对耦合散射的影响,并且能够有效地对广义布儒斯特效应进行仿真,为研究时变海面上运动目标的电磁散射特性,进一步提高导引头截获和跟踪低空目标的能力打下基础。

参考文献:

- [1] 曹原, 陈刚, 张金泽, 等. 雷达导引头对低空慢速小目标探测能力的研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(10): 18-23.
Cao Yuan, Chen Gang, Zhang Jinze, et al. A Study on Detection Capability of Radar Seeker to Low Slow Small Target[J]. Modern Radar, 2012, 34(10): 18-23.
- [2] 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 Dongxun, TONG Chuangming, PENG Peng, et al. A Study of G-Brewster of Super-low Altitude Target[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2015, 16(4): 29-32.
- [3] 姬伟杰, 童创明. 三维目标与粗糙面复合散射的广义稀疏矩阵平面迭代及规范网格算法[J]. 物理学报, 2011, 60(1): 1146-1151.
Ji Weijie, Tong Chuangming. Bistatic Scattering from Three-dimensional Target on Perfectly Conducting Rough Surface by Using G-SMFSIA/CAG[J]. Acta Physical Sinia, 2011, 60(1): 1146-1151.
- [4] Cui T J, Weng C C, Chen G, et al. Efficient MLFMA, RPFMA, and FAFFA Algorithms for EM Scattering by Very Large Structures[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation(S0018-926X), 2004, 52(3): 759-769.
- [5] Kuang L, Jin Y Q. Bistatic Scattering from a Three-dimensional Object over a Randomly Rough Surface Using the FDTD Algorithm[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation(S0018-926X), 2007, 55(8): 2302-2312.
- [6] Liu P, Jin Y Q. Numerical Simulation of Bistatic Scattering from a Target at Low Altitude above Rough Sea Surface under an EM-Wave Incident at Low Grazing Angle by Using Finite Element Method[J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation(S0018-926X), 2004, 52(5): 1205-1210.
- [7] Liu P, Jin Y Q. The Finite-element Method and Domain Decomposition for Electromagnetic Bistatic Scattering from the Comprehensive Model of a Ship on and a Target above a Large Scale Rough Sea Surface[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2004, 42(5): 950-956.
- [8] Li L, Dong T L, Li Q X. A Hybrid Method of Scattering from a Dielectric Target above a Rough Surface: TE Case[J]. Progress in Electromagnetic Research M (S1937-8726), 2013, 31(1): 71-83.
- [9] Guan B, Zhang J F, Zhou X Y, et al. Electromagnetic Scattering from Objects above a Rough Surface Using the Method of Moment with Half-space Green Function[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2009, 47(10): 3399-3405.
- [10] Xu F, Jin Y Q. Bidirectional Analytic Ray Tracing for Fast Computation of Composite Scattering from Electric-large Target over a Randomly Rough Surface[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing (S0196-2892), 2009, 57(5): 1495-1505.
- [11] Li J, Guo L X, Chai S R, et al. Electromagnetic scattering from a PEC object above a dielectric rough sea surface by a hybrid PO-PO method [J]. Wave in Random and Complex Media(S1745-5030), 2015, 25(1): 60-74.
- [12] Johnson J T. A Numerical Study of Scattering from an Object a Rough Surface[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing(S0196-2892), 2002, 57(5): 1495-1505.
- [13] Wang Y, Xu X J. On Wideband Radar Signature Simulation of Ships over Sea Surface[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica(S1000-6893), 2009, 30(2): 337-342.
- [14] Chen H, Zhang M, Yin H C. Facet-based Treatment on Microwave Bistatic Scattering of Three-Dimensional Sea Surface With Electromagnetic Large Ship[J]. Progress in Electromagnetic Research(S1070-4698), 2012, 123(1): 385-405.
- [15] Arnold-Bos A, Khenchaf A, Martin A. Bistatic Radar Imaging of the Marine Environment-part I: Theoretical Background[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3372-3383.
- [16] Chen H, Zhang M, Nie D. Robust Semi-Deterministic Facet Model for Fast Estimation on EM Scattering from Ocean-like Surface[J]. Progress in Electromagnetic Research B(S1937-6472), 2009, 18(18): 347-363.
- [17] Chen H, Zhang M, Yin H C. Facet-based Simulator for Bistatic Scattering of the Maritime Scene with Electrically Large Ships: Slope Summation Facet Model [J]. International Journal of Remote Sensing (S0143-1161), 2012, 33(21): 6927-6941.