

# 二维高斯随机粗糙面与其上方三维双立方体复合散射的混合算法

田贵龙<sup>1</sup>, 童创明<sup>1</sup>, 龙振国<sup>2</sup>, 孙华龙<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051; 2. 95392 部队, 广州, 510000)

**摘要** 基于数值方法(MOM)与基尔霍夫近似(KA)相结合的混合算法计算了二维随机粗糙面与其上方三维双立方体的复合散射特性。首先建立了随机粗糙面与其上方三维双目标的复合模型,将目标划分为 MOM 区域,粗糙面划分为 KA 区域,并采用 Monte-carlo 方法模拟真实粗糙地面。在复合散射场的求解中,首先求出在仅有初始入射场时多目标表面的感应电流;其次,将目标表面感应电流产生的散射场与外部入射场作为 KA 区域的入射场,求出 KA 区域表面的感应电流;最后将 KA 区域的感应电流产生的散射场与外部入射场作为 MOM 区域的入射场,利用导体目标表面的狄利克莱边界条件求出目标表面电流以及电流系数,并进一步求解出散射场。通过减小了粗糙面各面元的相互耦合及体-面的高阶耦合作用,极大提升了计算速率。在大小尺寸为  $L_x \times L_y = 100\lambda \times 100\lambda$  的粗糙面与棱边长度为  $l = 2\lambda$  的立方体目标复合计算中,使用 MoM 算法产生了 747 886 个未知量,计算时间为 8 821.5 s;而使用 MOM-KA 混合算法产生未知量为 26 868 个,计算时间为 423.8 s,仿真结果同时验证了 MOM-KA 混合算法的准确性。最后,详细讨论了均方根高度、目标间距、高度及立方体尺寸及对复合散射系数的影响。

**关键词** 粗糙海面;复合散射;混合算法;三维多目标

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.02.011

**中图分类号** TN011 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)02-0062-05

## A Hybrid Method for Scattering from 3-D Double Cubic above a Randomly Gaussian Rough Surface

TIAN Guilong<sup>1</sup>, TONG Chuangming<sup>1</sup>, LONG Zhengu<sup>2</sup>, SUN Hualong<sup>1</sup>

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

2. Unit of 95392, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** In this paper, the composite electromagnetic scattering problem of 3-D double cubic above a 2-D rough surface is analyzed by the hybrid MOM-KA method, which combines the moment(MOM) methods and the Kirchhoff approximation (KA). The composite Electromagnetic scattering model of double-target above randomly rough surface is constructed, and the target is divided as MOM region while the rough surface is divided as KA region, the current on the rough surface is obtained through the KA approximation, and construct integral equation on the surface of target so as to get the current on target. The scattering

**收稿日期:** 2017-06-27

**基金项目:** 国家自然科学基金(61372033)

**作者简介:** 田贵龙(1994—),男,湖南永州人,硕士生,主要从事电磁散射特性研究. E-mail:tianguilong163@163.com

**引用格式:** 田贵龙,童创明,龙振国,等. 二维高斯随机粗糙面与其上方三维双立方体复合散射的混合算法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(2): 62-66. TIAN Guilong, TONG Chuangming, LONG Zhengu, et al. A Hybrid Method for Scattering from 3-D Double Cubic above a Randomly Gaussian Rough Surface [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(2): 62-66.

field contains the interaction between the target and the rough surface. The efficiency and the convergence of this hybrid algorithm is numerical validated. By comparing the results with the conventional MOM, the validity and high efficiency of this method are verified. Then the scattering coefficients in different rms of rough surface, the different distance, height and size of target are calculated and discuss in detail.

**Key words:** rough sea surface; composite electromagnetic scattering; hybrid method; 3-D multi-target

目标环境复合散射特性是近年来研究的热点<sup>[1-3]</sup>。只有准确建立地、海面与上方多目标复合模型,得出复合散射系数随多目标的分布特征,才能对多目标进行有效制导与跟踪。因此,开展多目标环境复合散射特性研究具有重要的军事应用价值,目前鲜有文献对此进行分析。

目前应用于目标环境复合计算的算法主要有数值算法、高频算法、高低频混合算法等。数值算法<sup>[3-6]</sup>在计算过程中需要对所有面元之间的相互耦合作用进行计算,计算目标为电小尺寸时能得到较为精确的结果,而当计算目标尺寸变大时,所需内存与计算量急剧增加,无法满足电大尺寸目标与粗糙面复合计算需求。高频方法如 PO-PO<sup>[7]</sup>等算法对粗糙面与目标均采用近似算法,由于忽略了目标之间的相互作用以及复杂结构目标面元之间的耦合作用,不能准确分析目标的散射特性。高低频混合算法<sup>[8-10]</sup>结合了数值算法与高频算法的优势,对复杂结构目标采用精确数值算法进行分析,对大尺寸粗糙面采用高频近似方法快速得到粗糙表面电流。高低频混合算法中,微扰法-矩量法对于计算大尺寸微粗糙度粗糙面具有一定优势,当粗糙面表面粗糙度增大时,计算准确度有所下降;互易性定理结合基尔霍夫定理一般用于简单目标与邻近微粗糙面的计算。近年来出现的矩量法(MOM)与基尔霍夫近似(KA)相结合的 MOM-KA 混合算法,对粗糙面采用基尔霍夫近似,通过一次计算得到粗糙表面电流,同时对目标采用矩量法进行计算,保证了计算的准确性。文献[10]利用 MOM-KA 计算了一维粗糙面与其上方简单目标的复合散射,文献[11]利用 MOM-KA 计算了一维粗糙面上方双矩形截面柱复合散射。上述文献均为一维粗糙面与目标的复合散射。本文将这一算法扩展到更具有普遍性的二维随机粗糙面与其上方三维多目标的复合散射。

## 1 混合方法推导

图 1 为二维高斯粗糙面与其上方双立方体复合散射的几何示意图。图中 2 个理想立方体导体目标位于一个均方根高度为  $\delta$ 、相关长度为  $l$  高斯粗糙面上,高斯粗糙面满足 Kirchhoff 近似条件,即  $kl > 6$ ,

$l^2 > 2.76\delta\lambda$ ,它的随机高度函数为  $z = \zeta(x)$ ,且有  $\langle \zeta(x) \rangle = 0$ 。其中,粗糙面表面轮廓记为  $S_r$ ,立方体轮廓分别为  $S_{o1}, S_{o2}$ 。选取图 1 中  $O$  点为坐标原点,目标间距为  $d$ ,则  $S_{o1}$  几何中心点坐标为  $(d/2, d/2, H)$ ,  $S_{o2}$  几何中心坐标为  $(-d/2, d/2, H)$ 。 $\theta_i, \theta_s$  分别为入射角与散射角,场点与源点的位置矢量分别为:  $\mathbf{r} = x\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}$  和  $\mathbf{r}' = x'\hat{\mathbf{x}} + y'\hat{\mathbf{y}} + z'\hat{\mathbf{z}}$ 。

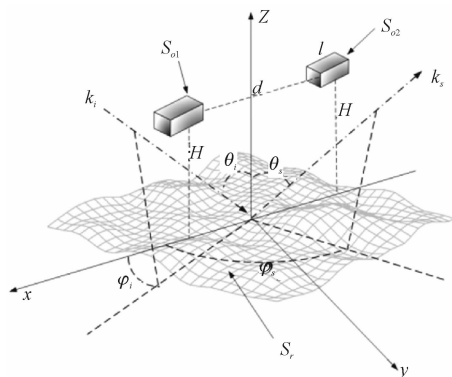


图 1 高斯粗糙面与其上方双立方体复合散射

Fig. 1 Geometry of composite scattering from the double-cubic above Gaussian rough surface

为了提高计算效率,将目标和粗糙面分别划分到 MOM 区域和 KA 区域。对目标与粗糙面均采用三角剖分,将 MOM 区目标剖分为  $N$  个三角面元,KA 区域粗糙面剖分为  $Q$  个三角面元。假设电磁波入射到复合模型中时,分别在目标和粗糙面表面激发的感应电流为  $\mathbf{J}_{o1}, \mathbf{J}_{o2}$  和  $\mathbf{J}_r$ ,将它们分别用 RWG 基函数  $\mathbf{f}_n$  和  $\mathbf{f}_q$  展开为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathbf{J}_{o1} &= \sum_{n=1}^N \alpha_n \mathbf{f}_n \\ \mathbf{J}_{o2} &= \sum_{n=N+1}^{2N} \alpha_n \mathbf{f}_n \\ \mathbf{J}_r &= \sum_{q=1}^Q \beta_q \mathbf{f}_q \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\alpha_n$  和  $\beta_q$  分别为目标与粗糙面的表面电流展开系数。感应电流在自由空间中产生的电场和磁场分别为<sup>[13]</sup>:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s &= L^e(\mathbf{J}) = ik\eta \int_S \left( \bar{\mathbf{I}} + \frac{\nabla \nabla'}{k^2} \right) \mathbf{J}(\mathbf{r}') g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' \\ \mathbf{H}^s &= L^h(\mathbf{J}) = \int_S \mathbf{J} \times \nabla' g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') ds' \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $\bar{\mathbf{I}}$  为单位并矢;  $k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$ , 为自由空间波数;  $g(\mathbf{r}, \mathbf{r}') = e^{-jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} / 4\pi |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$ , 为自由空间格林函

数; $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 为表面感应电流。粗糙面表面的电流系数由基尔霍夫近似求得,电流可以表示为:

$$\mathbf{J}_r(\mathbf{r}) = 2\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r}) + 2\hat{\mathbf{n}} \times L^h \sum_{n=1}^N (\alpha_n \mathbf{f}_n) + 2\hat{\mathbf{n}} \times L^h \sum_{n=N+1}^{2N} (\alpha_n \mathbf{f}_n) \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{n}}$ 为粗糙面表面的法向单位矢量; $\mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r})$ 为入射磁场强度。将式(1)中表面电流代入式(3)中可以得到:

$$\beta_q = (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times \mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r}_q)) + \sum_{n=1}^{2N} \alpha_n (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times L^h [\mathbf{f}_n(\mathbf{r}_n)]) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{t}_q^+$ 、 $\mathbf{t}_q^-$ 的定义见文献[14]; $\mathbf{n}^\pm$ 分别为第 $q$ 条棱边左右面元的单位方向矢量; $\mathbf{t}_q^\pm$ 为分别为粗糙面第 $q$ 条棱边左右面元垂直于棱边的切向分量。将系数 $\beta_q$ 代入到粗糙面表面电流表达式(1)可以得到粗糙面表面电流为:

$$\mathbf{J}_r = \sum_{q=1}^Q \mathbf{f}_q \{ (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times \mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r}_q)) + \sum_{n=1}^{2N} \alpha_n (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times L^h [\mathbf{f}_n(\mathbf{r}_n)]) \} \quad (5)$$

TE波入射情况下,由导体表面的Dirichlet边界条件可得导体目标表面电场积分方程为:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^{\text{in}} + \mathbf{E}^s = 0 \quad (6)$$

式中: $\mathbf{E}^{\text{in}}$ 表示入射场, $\mathbf{E}^s$ 为目标和粗糙面在自由空间激发的散射电场。式(6)可以表示为:

$$\mathbf{E}^{\text{in}} + L^e [\mathbf{J}_{01}(\mathbf{r})] + L^e [\mathbf{J}_{02}(\mathbf{r})] + L^e [\mathbf{J}_r(\mathbf{r})] = 0 \quad (\mathbf{r} \in \mathbf{S}_o \text{ or } \mathbf{S}_s) \quad (7)$$

将式(1)及式(5)代入(7)得:

$$-\mathbf{E}^{\text{in}} = L^e \left( \sum_{n=1}^{2N} \alpha_n \mathbf{f}_n \right) +$$

$$L^e \left( \sum_{q=1}^Q \mathbf{f}_q \{ (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times \mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r}_q)) + \sum_{n=1}^{2N} \alpha_n (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times L^h [\mathbf{f}_n(\mathbf{r}_n)]) \} \right) \quad (8)$$

将式(8)整理可得:

$$\sum_{n=1}^{2N} \alpha_n L^e(\mathbf{f}_n)_{\text{tan}} + \sum_{q=1}^Q \tau_{n,q}^s L^e(\mathbf{f}_q)_{\text{tan}} = -\mathbf{E}_{\text{tan}}^{\text{in}} + \sum_{q=1}^Q \tau_q^i L^e(\mathbf{f}_q)_{\text{tan}} \quad (9)$$

式中: $\tau_q^i$ 与 $\tau_{n,q}^s$ 的表达式为:

$$\begin{cases} \tau_q^i = (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times \mathbf{H}^{\text{in}}(\mathbf{r}_q)) \\ \tau_{n,q}^s = (\mathbf{t}_q^+ + \mathbf{t}_q^-) \cdot (\mathbf{n}^\pm \times L^h [\mathbf{f}_n(\mathbf{r}_q)]) \end{cases} \quad (10)$$

选择RWG函数 $\mathbf{f}_m(\mathbf{r}')$ 为基函数,用伽略金法对式(10)进行检验得到:

$$\sum_{n=1}^{2N} \alpha_n \langle L^e(\mathbf{f}_n), \mathbf{f}_m \rangle_{\text{tan}} + \sum_{q=1}^Q \tau_{n,q}^s \langle L^e(\mathbf{f}_q), \mathbf{f}_m \rangle_{\text{tan}} =$$

$$-\langle \mathbf{E}_{\text{tan}}^{\text{in}}, \mathbf{f}_m \rangle_{\text{tan}} + \sum_{q=1}^Q \tau_q^i \langle L^e(\mathbf{f}_q) \rangle_{\text{tan}} \quad (11)$$

对式(11)进行离散得到矩阵方程:

$$(\mathbf{Z}_{mm} + \mathbf{Z}_{mm}^0) \boldsymbol{\alpha}_n = \mathbf{V}_m + \mathbf{V}_m^0 \quad (12)$$

式中: $\mathbf{Z}_{mm}$ 表示MOM区域目标上面元的相互耦合作用; $\mathbf{Z}_{mm}^0$ 表示MOM区域感应电流经KA区粗糙面作用后,再对MOM区域目标产生的影响; $\boldsymbol{\alpha}_n$ 表示目标表面未知电流系数矩阵; $\mathbf{V}_m$ 表示目标区域自激励矩阵; $\mathbf{V}_m^0$ 表示入射波经KA区粗糙面作用后,再对MOM区域目标产生的激励作用。通过解矩阵方程(12)可求出目标表面电流展开系数 $\boldsymbol{\alpha}_n$ ,将 $\boldsymbol{\alpha}_n$ 代入(4)式得到粗糙面表面的电流展开系数 $\beta_q$ ,最后将求解出的 $\boldsymbol{\alpha}_n$ 与 $\beta_q$ 分别代入式(1)求得目标和粗糙面表面电流 $\mathbf{J}_{01}$ 、 $\mathbf{J}_{02}$ 和 $\mathbf{J}_r$ 。二维粗糙面与多目标的远区复合散射场由Stratton-Chu公式计算得到<sup>[15]</sup>:

$$\mathbf{E}^s = i\alpha\mu \left( \bar{\mathbf{I}} + \frac{\nabla \nabla'}{k^2} \right) \iint_S \frac{\exp(ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \mathbf{J}_s ds' \quad (13)$$

## 2 数值计算结果与分析

在本章的计算过程中,粗糙面及其上方目标的几何参数均以波长 $\lambda$ 为单位,若无特殊声明,入射波频率取 $f=0.3$  GHz,锥形波因子 $g=L/4$ ,锥形入射波极化方式为VV极化,入射角 $\theta_i=30^\circ$ ,粗糙面大小取 $L_x \times L_y = 100\lambda \times 100\lambda$ 。

### 2.1 二维粗糙面与单目标复合散射系数对比

图2给出了分别应用矩量法和MOM-KA混合方法计算了 $30^\circ$ 与 $45^\circ$ 角度下高斯粗糙面与其上方双立方体目标双站散射的结果,其中立方体棱边长为 $l=2\lambda$ ,距离粗糙面高度为 $H=6\lambda$ ,粗糙表面均方根高度 $\delta=0.1\lambda$ ,入射角为 $\theta_s=30^\circ$ 。

通过比较,两种方法所得结果吻合较好,验证了本文提出方法的准确性。此外,用传统矩量法进行计算时,未知量数目为 $2N+Q$ 个( $N$ 为目标表面未知量个数, $Q$ 为粗糙表面未知量个数),而使用MOM-KA算法时,未知量数目仅为 $2N$ 个,未知量数目极大减小,提高了计算效率并减小了内存。当选用内存为16.0 GB、主频为3.20 GHz的计算机,分别用矩量法与混合算法计算结果见表1。

表1 矩量法与混合算法计算时间和消耗内存对比

Tab. 1 Comparison on computing time and storage requirement

$L_x \times L_y$	方法	未知量 个数/个	运算 时间/s	所需内 存/Gbite
$100\lambda \times 100\lambda$	MOM	747 886	8 821.5	7.47
$100\lambda$	KA-MOM	26 868	423.8	2.05
$200\lambda \times 200\lambda$	MOM	2 985 901	34 171.1	14.813
$200\lambda$	KA-MOM	104 513	1 152.5	3.416

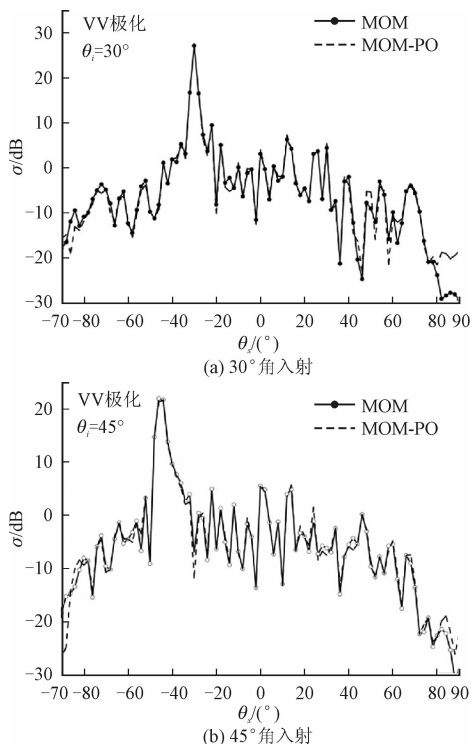


图 2 30°与 45°角入射时混合法与矩量法结果比较

Fig. 2 Comparison of the result of hybrid method and MOM in 30° and 45° incident angle

结果表明,相比于矩量法,混合算法极大地缩短了计算时间并减小了内存占用量。且粗糙面越大,优势越明显。

### 2.2 不同参数对复合散射系数的影响

图 3 给出了粗糙面高度起伏均方根对复合散射系数的影响情况。其中,  $H=6\lambda, d=6\lambda, l=2\lambda$ 。由图 3 可以看出,复合散射系数在镜向方向峰值最大,随着粗糙表面均方根高度的增大,镜向方向峰值下降,后向散射增强,整体散射系数增大。这是因为随着粗糙面均方根高度增加,粗糙表面粗糙度增大,目标环境复合散射相干分量减小,非相干分量增加,而镜向散射主要由相干分量引起,后向散射主要由非相干分量引起,故镜向散射增强,后向散射减弱;粗糙表面粗糙度越大,目标环境耦合作用越强,导致整体散射系数增大。

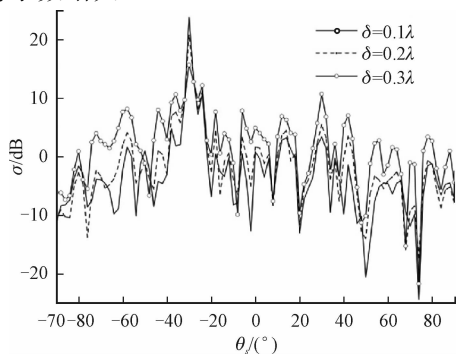


图 3 高度起伏均方根对复反射系数的影响

Fig. 3 The influence of rms for composite scattering coefficient

图 4 给出了双立方体高度对复合散射系数的影响情况,计算中取  $\delta=0.1\lambda, d=6\lambda, l=2\lambda$ 。由图 4 可看出,复合散射系数在镜向方向峰值最大,且峰值随高度变化不大,在除镜向方向外的大部分方向,目标高度越低,复合散射系数越强,后向散射越大。这说明目标与粗糙面的耦合作用对镜向方向散射系数影响不大;目标高度越低,目标与粗糙面的耦合作用越强,复合散射非相干分量增多,导致整体复合散射系数增大,后向散射增强。

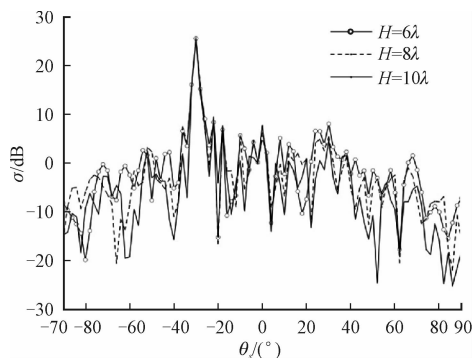


图 4 目标高度对复合散射系数的影响

Fig. 4 The influence of target height for composite scattering coefficient

图 5 给出了立方体目标间距对复合散射系数影响情况。其中,  $\delta=0.1\lambda, H=6\lambda, l=2\lambda$ 。由图 5 可看出,镜向方向峰值最大,且基本不变,复合散射系数随目标间距变化不大;在除镜向方向的大部分方向,目标间距越小,复反射系数越大,后向散射越强。这是因为复合散射在镜向方向最强,目标环境耦合作用对镜向方向散射贡献不大;目标之间耦合作用较弱,导致整体复合散射系数变化不大;目标间距越小,目标之间的耦合作用越强,非相干散射分量越多,导致后向散射及整体散射系数增大。

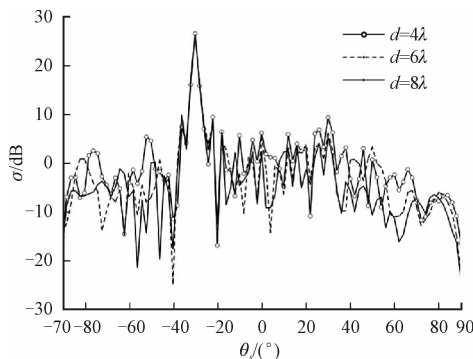


图 5 目标间距对复合散射系数影响

Fig. 5 The influence of target distance for composite scattering coefficient

图 6 给出了双立方体目标尺寸对复合散射系数

影响情况,计算中取  $\delta=0.1\lambda$ ,  $d=6\lambda$ ,  $H=6\lambda$ 。由图6可看出,镜向附近复合散射系数峰值基本不变,在除镜向方向外的大部分方向,目标尺寸越大,复合散射系数越大,后向散射越强,在  $40^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  间复合散射系数随目标尺寸变化尤为明显。这是因为,目标尺寸增大,目标与粗糙面之间耦合面积越大,耦合作用越强,导致非相干散射分量增加,使整体散射系数增强,后向散射系数增大;而镜向附近为弱耦合区,目标与粗糙面之间的耦合作用对镜向附近复合散射系数影响不大。

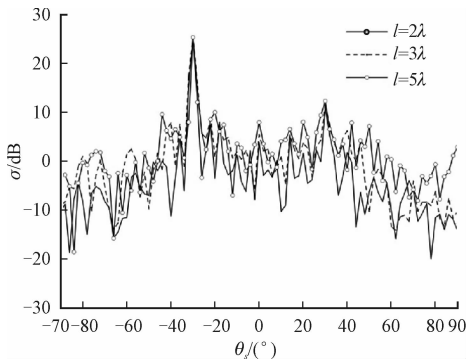


图6 目标尺寸对复合散射系数影响

Fig. 6 The influence of target size for composite scattering coefficient

### 3 结语

本文针对二维随机粗糙面与其上方三维双立方体的复合散射,建立了求解目标环境复合模型的矩阵方程,将目标划归到 MOM 区,粗糙面划分为 KA 区,并分别利用矩量法与基尔霍夫定理进行求解,计算得到二维随机粗糙面与其上方双立方体的复合散射系数。通过与矩量法相对比,验证了 MOM-KA 混合算法的准确性。最后利用混合算法分析了粗糙面均方根高度、目标高度、间距、尺寸对复合散射系数的影响,得到了二维随机粗糙面与其上方双立方体的散射特性。

#### 参考文献(References):

[1] ZAMANI H, TAVAKOLI A, DEHMOLLAIAN M. Scattering From Layered Rough Surfaces: Analytical and Numerical Investigations [J]. IEEE Trans Geo Sci Remote Sens, 2016, 54(6): 3685-3696.

[2] 王蕊, 郭立新, 王安琪. 不同土壤类型的粗糙地面与其下方埋藏目标复合电磁散射研究 [J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3179-3186.

WANG R, GUO L X, WANG A Q. Investigation of Electromagnetic Scattering Interaction between the

Buried Target and the Rough Surface in Different types of Soil [J]. Acta Phys Sin, 2010, 59(5): 3179-3186. (in Chinese)

[3] MARTINO G D, IODICE A, RICCIO D, et al. Ocean Monitoring with SAR: An Overview [J]. Oceans, 2015, 5(4): 1-5.

[4] XU R W, GUO L X, HE H J, et al. A Hybrid FEM/MoM Technique for 3-D Electromagnetic Scattering from a Dielectric Object above a Conductive Rough Surface [J]. IEEE Trans Geo Sci Remote Sens, 2016, 13(3): 314-318.

[5] 任新成, 朱小敏, 刘鹏. 雪层覆盖土壤表面与半埋柱体宽带复合散射 FDTD 方法 [J]. 物理学报, 2017, 34(3): 327-334.

REN X C, ZHU X M, LIU P. FDTD Study on Wide-Band Composite Scattering from Soil Surface Covered with Snow and a Partially Buried Column [J]. Acta Phys Sin, 2017, 34(3): 327-334. (in Chinese).

[6] BOURLIER C, KUBICKÉ G, DÉCHAMPS N. Fast Method to Compute Scattering by a Buried Object under a Randomly Rough Surface: PILE Combined with FB-SA [J]. J Opt Soc Am A, 2008, 25(4): 891-902.

[7] LI J, GUO L X, CHAI S R. Electromagnetic Scattering from a PEC Object above a Dielectric Rough Sea Surface by A hybrid PO-PO Method [J]. Waves in Random and Complex Media, 2015, 25(1): 60-74.

[8] ZHANG Y, YANG Y E, BRAUNISCH H, et al. Electromagnetic Wave Interaction of Conducting Object with Rough Surface by Hybrid SPM/MOM Technique [J]. Progress in Electromagnetics Research, 1999, 22: 315-335.

[9] 郭立新, 王运华, 吴振森. 二维导体微粗糙面与其上方金属平板的复合电磁散射研究 [J]. 物理学报, 2005, 54(11): 5130-5138.

GUO L X, WANG Y H, WU Z S. Electromagnetic Scattering Interaction between a Conducting Plate and a 2-D Conducting Slightly Rough Surface [J]. Acta Phys Sin, 2005, 54(11): 5130-5138. (in Chinese)

[10] 王蕊, 郭立新, 秦三团, 等. 粗糙海面及其上方导体目标复合电磁散射的混合算法研究 [J]. 物理学报, 2008, 57(6): 3473-3480.

WANG R, GUO L X, QIN S T, et al. Hybrid Method for Investigation of Electromagnetic Scattering Interaction between the Conducting Target and Rough Sea Surface [J]. Acta Phys Sin, 2008, 57(6): 3473-3480. (in Chinese).

- ton, VA, USA, 2010: 789-793.
- [8] 任雪婷,贺兴时. 基于强度 Pareto 的自适应多目标差分进化算法[J]. 纺织高校基础科学学报, 2016, 29(3):402-406.  
REN X T, HE X S. An Adaptive Multi-objective Differential Evolution Algorithm Based on the Strength of the Pareto [J]. Basic Sciences Journal of Textile University, 2016, 29(3): 402-406. (in Chinese)
- [9] 丁昊,李建忠,安昕. 实测海杂波数据的多普勒谱特性[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4):400-420.  
DING H, LI J Z, AN X. Doppler Spectra Property of Measured Sea Clutter Data [J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(4):400-420. (in Chinese)
- [10] BALLERIA, NEHORAI, WANG J. Maximum Likelihood Estimation for Compound-Gaussian Clutter with Inverse-Gamma Texture [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(2): 775-780.
- [11] BOCQUET S. Closed-Form Parameter Estimators for Pareto Distributed Clutter with Noise [J]. IET Electronics Letters, 2015, 51(23): 1924-1962.
- [12] WEINBERG G V. Estimation of Pareto Clutter Parameters Using Order Statistics and Linear Regression [J]. IET Electronics Letters, 2013, 49(13): 201-216.
- [13] 李宽,罗丰. 基于实测海杂波数据的统计特性分析[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013.  
LI K, LUO F. Analysis of Sea Clutter Statistical Characteristics Based on Acquired Radar Data [D]. Xi'an: Xidian University, 2013. (in Chinese)
- [14] BOCQUET S. Simulaton of Correlated Pareto Distributed Sea Clutter [C]// International Conference on Radar, Adelaide, 2013: 258-261. Doi: 10.1109/RADAR. 2013.6651995.
- [15] KRISHNAMO O, K. Handbook of Statistical Distributions with Applications [M]. Londong: Chapman and Hall, 2006.
- [16] AMAR M. K-Clutter Plus Noise Parameter Estimation Using Fractional Positive and Negative Moment [J]. Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(2): 960-967.
- [17] MEZACHE A, CHALABI I, SOLTANI F, et al. Estimating the Pareto Plus Noise Distribution Parameters Using Non-Integer Order Moments and  $[\varepsilon \log(z)]$  Approaches [J]. IET Radar Sonar & Navigation Iet, 2015, 10(1): 192-204.

(编辑:徐敏)

**(上接第 66 页)**

- [11] 田炜,任新成,郭立新. 海面与其上方双矩形截面柱复合散射的混合算法研究 [J]. 物理学报, 2015, 17(64): 174101-174107.  
TIAN W, REN X C, GUO L X. Study on Composite Electromagnetic Scattering from the Double Rectangular Cross-section Columns above Rough Sea Surface Using Hybrid Method [J]. Acta Phys Sin, 2015, 17(64): 174101-174107. (in Chinese).
- [12] 郭立新,王蕊,吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论和方法 [M]. 北京:科学出版社, 2010: 199.  
GUO L X, WANG R, WU Z S. Basic Theory and Method of Electromagnetic Scattering from Random Rough Surface [M]. Beijing: Science Press, 2010: 199. (in Chinese)
- [13] JAKOBUS U, LANDSTORFER F M. Improvement of the PO-MOM Hybrid Method by Accounting for Effects of Perfectly Conducting Wedges-Reply [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1995, 45(10): 1123-1129.
- [14] JAKOBUS U, LANDSTORFER F M. Improved PO-MM Hybrid Formulation for Scattering from Three-dimensional Perfectly Conducting Bodies of Arbitrary Shape [J]. IEEE Trans Antennas Propag, 1995, 43(1): 162-169.
- [15] 孔金欧,著. 电磁波理论[M]. 吴季,译. 北京:电子工业出版社, 2003: 286-288.  
KONG J O. Electromagnetic Wave Theory [M]. WU J, Translated, Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003: 286-288 (in Chinese)

(编辑:徐敏)