

水面目标复合电磁散射的并行迭代快速计算

王晓冰^{1)†} 梁子长²⁾ 吴振森¹⁾

1) (西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

2) (电磁散射重点实验室, 上海 200438)

(2011年9月22日收到; 2011年10月26日收到修改稿)

采用快速远场近似的降秩电磁流迭代法计算目标与粗糙水面的复合散射, 并进一步采用粗糙面分区的多进程并行迭代算法提高其计算速度, 分析了降秩电磁流迭代法对散射结果的影响, 表明该方法可用于近场复合散射问题的计算; 对平板目标与水面间的复合散射进行了计算, 计算结果与快速多极子方法 (MLFMM) 结果符合较好, 验证了该算法的有效性. 同时, 利用造波水池开展了目标与水面近场复合散射的模拟实测, 测试与计算结果趋势较为一致.

关键词: 粗糙面, 复合散射, 降秩电磁流迭代法, 并行

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 42.68.Mj

1 引言

水面目标与粗糙海面构成二面角, 复合散射较强, 针对远场应用情况下目标与粗糙面复合散射计算的研究较多, 如采用数值算法结合高频算法^[1-3]、采用快速多极子方法等数值算法^[4-7]和采用高频近似算法^[8-12]等都得到广泛应用. Burkholder 等采用的前向-后向迭代物理光学法 (FBIPO)^[13] 及降秩迭代物理光学法 (ROIPO)^[14] 计算了电大尺寸目标与粗糙面的复合散射, 且与造波池测试结果符合较好.

导弹末制导或与目标交会时, 观测天线处于目标的电磁散射近区, 电磁波相对海面的入射余角相对较大 (一般处于平稳区和高角区), 观测天线主波束照射海面区域大小有限, 与远程雷达探测应用有着较大区别和不同侧重, 因此, 近场情况下目标与粗糙海面间复合散射特性的研究有着十分重要的意义. 通过对 ROIPO 进行改进和近场修正, 文献 [15] 计算了超低空目标与粗糙海面的近场复合散射, 并分析了粗糙面截断对复合散射计算结果的影响. 但由于近场情况下自变参量更多, 散射特

性的计算量更大, 其计算速度仍难以满足工程适用要求.

本文采用快速远场近似的降秩电磁流迭代法计算目标与水面的复合散射, 采用粗糙面分区的并行迭代算法提高计算效率, 该算法进程间数据通信量较少, 并行效率较高, 适于目前应用较多的集群组网方式的并行计算. 对平板目标与水面间的复合散射进行了计算, 计算结果与 MLFMM 结果符合较好. 同时, 利用造波水池开展了目标与水面复合散射的模拟实测, 测试与计算结果趋势较为一致.

2 计算原理

2.1 快速远场近似的降秩电磁流迭代法

对目标与粗糙海面间复合散射的计算, 忽略粗糙面间相互作用的降秩电磁流迭代法仍将具有较高精度, 且计算速度较快, 降秩电磁流迭代法的单次迭代计算为

$$\mathbf{H}_{\text{target}}^{(n+1)}(r_s) = \int_{\text{sea}} \mathbf{J}_{\text{sea}}^{(n)}(r'_s) \times \nabla g(r_s - r'_s) ds + \frac{1}{jkZ_0} \nabla \times \int_{\text{sea}} \mathbf{M}_{\text{sea}}^{(n)}(r'_s)$$

† E-mail: wxb218@sina.com

$$\begin{aligned}
 & \times \nabla g(r_s - r'_s) ds \\
 & + \int_{\text{target}} \mathbf{J}_t^{(n)}(r'_s) \\
 & \times \nabla g(r_s - r'_s) ds, \quad (1) \\
 \mathbf{E}_{\text{sea}}^{(n+1)}(r_s) = & \frac{Z_0}{jk} \nabla \times \int_{\text{target}} \mathbf{J}_t^{(n)}(r'_s) \\
 & \times \nabla g(r_s - r'_s) ds, \quad (2)
 \end{aligned}$$

式中, n 为迭代次数; k 为自由空间的波数; Z_0 为自由空间的特征阻抗; \mathbf{H}_t 为目标面元处的散射磁场; \mathbf{E}_{sea} 为海面面元处的散射电场; \mathbf{J}_{sea} , \mathbf{M}_{sea} 分别为海面面元的电流密度和磁流密度; \mathbf{J}_t 为目标面元的电流密度; 根据基尔霍夫近似, 面元的电磁流密度可由面元的前次散射电磁场计算 ($n=0$ 时即为入射电磁场).

为提高计算速度, 可根据目标与各部分粗糙水面距离的不同进行分组, 再采用快速远场近似进行目标与粗糙海面间复合多次散射的加速计算, 图 1 为目标和粗糙面面元的分组示意图.

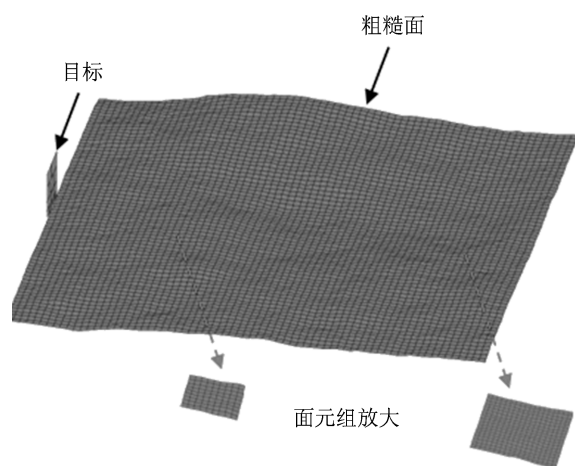


图 1 目标及粗糙面面元分组示意图

目标及粗糙面面元各分组的尺寸大小 D 、分组间距离 R 及电磁波波长 λ 需满足以下远场近似条件:

$$D < \sqrt{R\lambda/2}, \quad (3)$$

可见, 随着目标与粗糙面分组间距离的增加, 分组尺寸增加, 即目标下部及其附近粗糙面区域分组较密, 目标上部及远处粗糙面分组较粗.

假定目标面元组 m 中心坐标为 r_m , r_{mi} 为其

中面元 i 的中心坐标, 共 M 个面元; 粗糙面面元组 m' 中心坐标为 $r_{m'}$, $r_{m'j}$ 为其中面元 j 的中心坐标, 共 M' 个面元, 则快速远场近似的降秩电磁流迭代法可写为

$$\begin{aligned}
 \mathbf{H}_t^{(n+1)}(r_{mi}) \approx & \int_{\text{target}} \mathbf{J}_t^{(n)}(r'_s) \times \nabla g(r_{mi} - r'_s) ds \\
 & - \exp[jk\hat{k} \cdot (r_{mi} - r_m)] \\
 & \times jk \frac{\exp(jk|r_m - r_{m'}|)}{4\pi|r_m - r_{m'}|} \\
 & \times \sum_j \left\{ \hat{k} \times \mathbf{J}_{\text{sea}}^{(n)}(r_{m'j}) \right. \\
 & \left. + \hat{k} \times [\hat{k} \times \mathbf{M}_{\text{sea}}^{(n)}(r_{m'j})] / Z_0 \right\} \\
 & \times \exp[jk\hat{k} \cdot (r_{m'j} - r_{m'})] \Delta s_j, \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{E}_{\text{sea}}^{(n+1)}(r_{m'j}) \approx & - \exp[jk\hat{k} \cdot (r_{m'j} - r_{m'})] \\
 & \times jk \frac{\exp(jk|r_m - r_{m'}|)}{4\pi|r_m - r_{m'}|} \\
 & \times \sum_i Z_0 \hat{k} \times [\hat{k} \times \mathbf{J}_t^{(n)}(r_{mi})] \\
 & \times \exp[jk\hat{k} \cdot (r_{mi} - r_m)] \Delta s_i. \quad (5)
 \end{aligned}$$

式中, \hat{k} 为波矢; Δs 为面元面积. 可见采用快速远场近似后, 对目标面元组 m 与粗糙面面元组 m' 间的一次相互作用, 只需进行 $M + M' + 1$ 次操作 (包含聚合、转移及分配等), 远小于直接迭代计算时的 MM' 次面元对操作; 相应地, 若目标中心离水面较高, 该方法加速效果将较明显.

2.2 粗糙面分区的并行算法

目标与粗糙面复合电磁散射计算过程中, 依据目标所在的位置对粗糙面截取有限大尺寸. 为保证计算结果的精度和有效性, 粗糙面截取区域的尺寸通常需几倍于目标尺寸, 复合散射的计算量仍较大, 通过进一步采用并行算法提高计算速度. 同时通过采用粗糙面分区的多进程并行方式, 对目标与不同分区粗糙面间的复合多次散射分别进行迭代计算, 利用 MPI 并行协议在每两步迭代间进行同步及对目标面元电流密度进行数据交换, 减少并行计算中数据交换量, 提高计算效率. 图 2 给出了示意图.

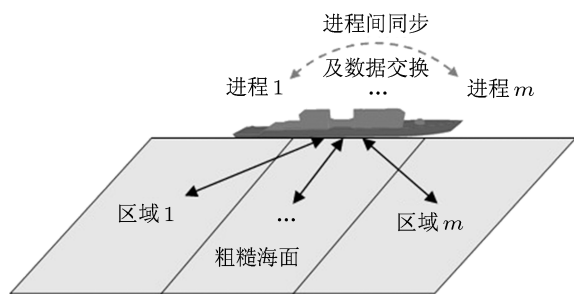


图2 粗糙面分区的并行计算示意图

文献 [16] 描述了并行迭代算法的具体计算步骤, 该计算步骤对本文提出的快速远场近似的降秩电磁流迭代法同样适用. 计算步骤如下:

1) 粗糙面区域截取. 由于目标自身的遮挡, 目标与粗糙面较强的多次散射区域通常位于目标的观测方向一侧, 另一侧粗糙面区域的散射贡献较小, 粗糙面截取区域还与入射角度有关, 根据电磁波入射方位及角度确定粗糙面截取区域的大小.

2) 粗糙面分区划分. 对于 m 个进程的并行计算, 将截取的有限粗糙面划分成 m 个分区. 根据各组网计算机性能, 粗糙面还可采用不等大小的分区方式, 以提高并行效率.

3) 分区迭代计算. 对粗糙面各分区与目标间的复合散射分别采用不同进程进行迭代计算.

4) 同步及数据交换. 在每步迭代计算后, 在进程间同步并交换目标面元的电磁流密度数据, 并重复步骤 3), 4) 直至收敛, 合成各进程的散射计算结果, 完成计算.

3 计算结果

3.1 与 MLFMM 结果的比较

首先, 对算法精度进行了验证计算, 对比数据为 MLFMM 计算结果, 验证对象为金属平板与良导体粗糙面, 入射电磁波为平面波.

设某粗糙面最大起伏高度差分别为 0.02 m 和 0.13 m, 等效相对介电常数取为 $(1, 5 \times 10^6)$, 使其反射特性与良导体接近 (接近 90° 入射角时有一定误差). 仿真坐标系原点定义为有限粗糙面区域中

心, 金属平板边长为 0.2 m, 平板中心位于 $(-3 \text{ m}, 0, 0.11 \text{ m})$, 处于粗糙面上方, 一边平行于 y 轴, 如图 3 所示. 计算时电磁波频率取为 10 GHz, 极化为 VV 同极化.

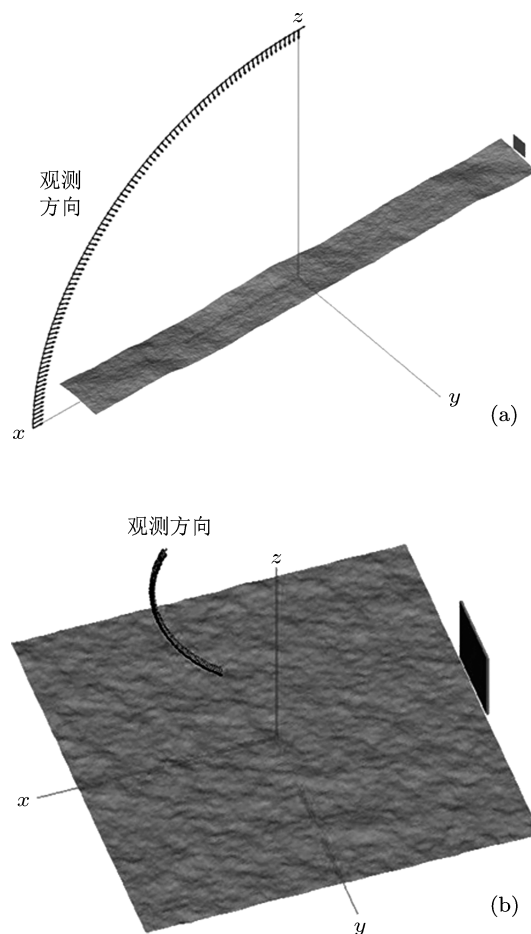


图3 平板与粗糙面的复合散射观测示意图 (a) 俯仰向观测; (b) 方位向观测

图 4 给出了金属平板与不同粗糙面起伏的后向 RCS 随俯仰角变化的结果, 其中粗糙面大小截取为 $6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$, 粗糙面网格尺寸为 0.2 倍波长, 总面元数约为 20×10^5 . 单点单进程计算时间约为 4.7 min (采用 11 进程并行计算 91 个角度点共耗时 38.5 min).

可见, 由于金属平板与粗糙面间构成直二面角, 图 4 中在较大观测角范围内均有较大的复合二次散射贡献, 复合二次散射贡献大小随粗糙面起伏增加而减小; 且其与 MLFMM 计算结果较为符合, 仅 RCS 值较小及接近 90° 入射角时偏差较大, 其主要误差来源于粗糙面自身耦合散射的忽略.

图 5 给出了金属平板与粗糙面复合 RCS 随方位角的变化结果,其中粗糙面大小截取为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,入射角取为 30° . 可见,垂直于金属平板与粗糙面组成的二面角轴线观测时 (0° 方位角附近) 出现 RCS

峰值,且本文算法计算结果与 MLFMM 结果符合较好,仅 RCS 值较小时 (-5 dBm^2 以下) 误差较大,该误差主要来源于粗糙面自身间耦合及边沿散射的影响.

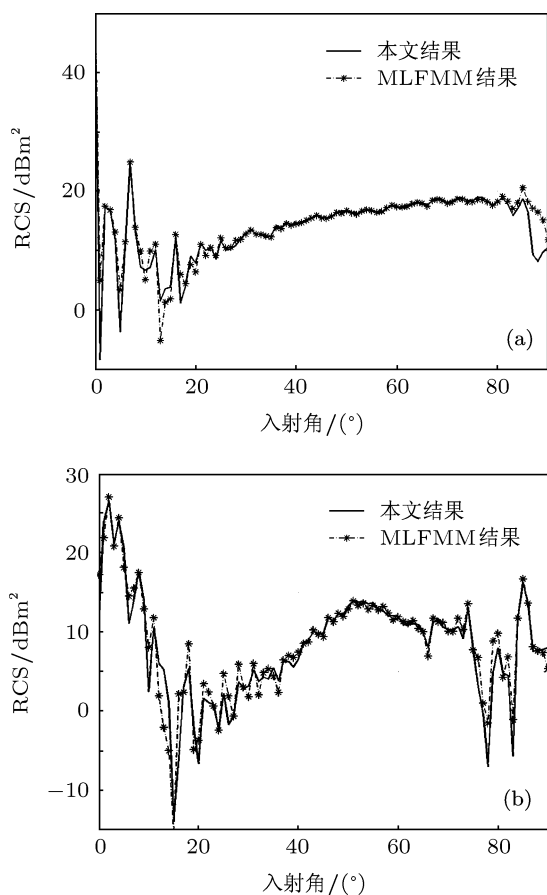


图 4 金属平板与粗糙面复合散射的俯仰向 RCS 比较 (a) 2 cm 起伏; (b) 13 cm 起伏

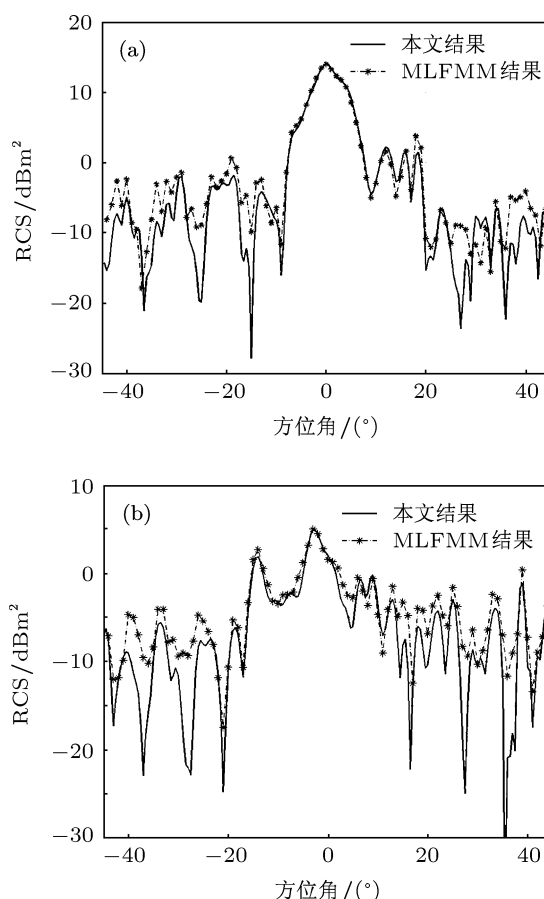


图 5 金属平板与粗糙面复合散射的方位向 RCS 比较 (a) 2 cm 起伏; (b) 13 cm 起伏

3.2 并行计算效率

对上述金属平板与粗糙面的复合散射问题,分别采用不同进程数进行并行计算(共 4 个 CPU,每 CPU 为 6 核 AMD8425HE 处理器,主频为 2.1 GHz),表 1 给出了不同并行进程下 21 个角度点 RCS 的计算耗时及对应的并行效率.

可见,表 1 中 12 个及以下并行进程数对应的并行效率均达 90%以上,且随着进程数的增加略有降低,这主要因为对某一固定规模的复合散射计算问题,进程间通信及同步等耗时基本不变,当并行进程数增多时,单个进程的计算量将减少,进程间通信及同步等耗时所占比重将增加,并行效率将降

低. 为获取最佳的计算效率,单个进程对应的粗糙面分区范围需保持在一定规模以上.

表 1 金属平板与海面复合散射计算并行效率

并行进程数	计算耗时/s	并行效率/%
1	4900.68	—
2	2453.48	99.9
3	1666.19	98.0
4	1248.65	98.1
5	1003.21	97.7
6	859.15	95.1
8	651.12	94.1
12	450.79	90.6
22	291.81	76.3

4 水面目标近场复合 RCS 的测量验证

为进一步验证该算法的有效性,在造波池水面开展了测试验证,测量过程中采用观测喇叭天线的主波束宽度为 13° ,工作频率为 10 GHz,极化为 VV;水面较平静,风速约为 1 m/s;金属平板边长为 0.6 m,下端离水面 0.1 m,如图 6 所示.仿真计算采用相同的状态参数,且考虑观测天线方向图等的影响.

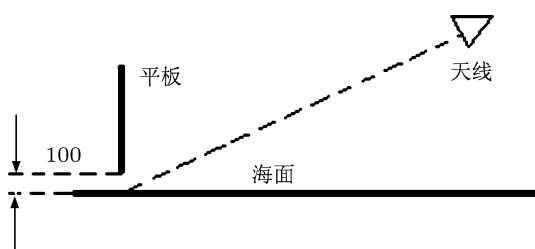


图 6 造波水池内平板与水面复合散射试验示意图

图 7 给出了垂直金属平板目标与水面近场复合 RCS 计算与测试数据的比较,其中观测方位角取为 0° ,入射角范围取 $10^\circ\text{--}80^\circ$.

可见,平板与水面复合 RCS 有较大及较宽的峰值,这主要来源于两者构成二面角的多次反射贡献;且在小入射角下其 RCS 有一定的起伏,这主要由于此时水面散射贡献相对较大(一般随着入射角减小而增大),而两者间复合散射贡献相对减小,两

路贡献干涉导致合成 RCS 呈现一定起伏.

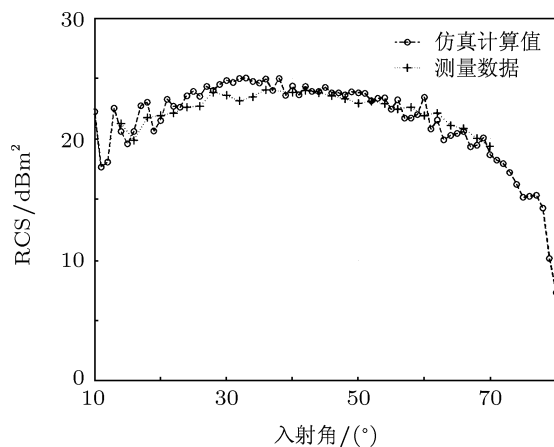


图 7 平板与水面复合 RCS 测量与计算结果比较

5 结论

本文采用快速远场近似的降秩电磁流迭代法,计算了目标与粗糙水面的复合散射.采用粗糙面分区的多进程并行迭代算法,提高了计算效率.在分析了降秩电磁流迭代法对散射结果的影响之后,发现该算法进程间数据通信量较少,并行效率较高.对平板目标与水面间的复合散射进行了计算,结果与测试结果趋势较为一致.

- [1] Qin S T, Guo L X, Dai S Y, Gong S X 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074217 (in Chinese) [秦三团, 郭立新, 代少玉, 龚书喜 2011 物理学报 **60** 074217]
- [2] Wang R, Guo L X, Qin S T, Wu Z S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3473 (in Chinese) [王蕊, 郭立新, 秦三团, 吴振森 2008 物理学报 **57** 3473]
- [3] Ye H X, Jin Y Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 839 (in Chinese) [叶红霞, 金亚秋 2008 物理学报 **57** 839]
- [4] Kang S F, Wang X D 2004 *J. Microwave* **20** 43 (in Chinese) [康士峰, 王显德 2004 微波学报 **20** 43]
- [5] Colak D C, Burkholder R J, Newman E H 2007 *Microwave and Opt. Tech. Lett.* **49** 241
- [6] Liu Z J, He J Q, Xie Y J, Sullivan A 2002 *IEEE Trans. Antennas Propaga.* **50** 1838
- [7] Lei K, Jin Y Q 2007 *IEEE Trans. Antennas Propaga.* **55** 2302
- [8] Zhang Y, Lu J, Pacheco J 2005 *IEEE Trans. Antennas Propaga.*

53 1631

- [9] Ye H X, Jin Y Q 2006 *Acta Electronica Sinica* **34** 1074 (in Chinese) [叶红霞, 金亚秋 2006 电子学报 **34** 1074]
- [10] Marcos R P, Luis L 1999 *IEEE Trans. Antennas Propaga.* **47** 961
- [11] Wu Z S, Zhang J J 2009 *Progress In Electromagnetics Research* **92** 317
- [12] Guo L X, Wang Y H, Wu Z S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5130 (in Chinese) [郭立新, 王运华, 吴振森 2005 物理学报 **54** 5130]
- [13] Burkholder R J 1999 *USNC/URSI Radio Science Meeting* 224
- [14] Burkholder R J, Khalid J 2003 *The Ohio State University Electro Science Laboratory Final Report* 742962-1
- [15] Liang Z C, Wang X B, Yu H 2009 *Guidance & Fuze* **30** 30 (in Chinese) [梁子长, 王晓冰, 岳慧 2009 制导与引信 **30** 30]
- [16] Liang Z C, Zhang Y, Gu J 2010 *J. Antenna* **1** 132 (in Chinese) [梁子长, 张元, 顾俊 2010 天线学报 **1** 132]

Fast parallel iterative calculating of the composite scattering between targets and rough surface

Wang Xiao-Bing^{1)†} Liang Zi-Chang²⁾ Wu Zhen-Sen¹⁾

1) (School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

2) (The State Key-Lab for Electromagnetic Characters of Environment, Shanghai 200438, China)

(Received 22 September 2011; revised manuscript received 26 October 2011)

Abstract

A new fast far field approximation algorithm is introduced to calculate the composite scattering characteristics of rough surface and the target in near field, by using the reduced-order electromagnetic current iteration method. Also we use the multi-process parallel algorithm to reduce the simulation time and analyze the influence on the results of the reduced-order electromagnetic current iteration. The calculated results by the algorithm described in the paper and the results obtained by the multi-level fast multi-pole method (MLFMM) are in good agreement, so the effectiveness of the algorithm is verified. At the same time, the use of tank to carry out the measurements of near-field complex scattering between the targets and rough surface shows that the test results and the calculation results are very consistent.

Keywords: rough surface, composite scattering, reduced-order electromagnetic current iteration, multi-process parallel algorithm

PACS: 41.20.-q, 41.20.Jb, 42.68.Mj

† E-mail: wxb218@sina.com