

文章编号:1005-0523(2012)03-0016-05

随机粗糙面上电磁散射的高效迭代 IEM 计算

张晓燕, 李子, 江代力, 刘志伟

(华东交通大学信息工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要:在复合目标电磁散射计算中,目标与粗糙面间的耦合近场计算问题是制约算法的主要瓶颈。该文提出一种适用于二维随机粗糙面上电磁散射场计算的迭代积分方程法(IEM)。与传统IEM法不同,迭代IEM法基于近场格林函数建立,考虑了粗糙面元间的多次电磁互耦作用,散射场不能简化为积分形式的近似解。数值实验表明,与传统MoM法相比,迭代IEM法的内存需求节省了9倍,计算速度比矩量法(MoM)法提升了4.5倍以上,更能有效地计算粗糙面上的散射场。

关键词:电磁散射近场;积分方程法;迭代S

中图分类号:O441.1

文献标志码:A

复合目标电磁散射特性的研究,对雷达图像解读、雷达体制研制都具有重要意义。然而,目标与环境间的相互作用十分复杂,其耦合场的计算非常耗时,计算量随目标尺寸和粗糙面作用区域的增加而急剧增大,是制约算法的主要瓶颈。研究粗糙面散射近场的高效计算方法对进一步建立高性能的复合目标电磁散射算法,研究复杂环境下目标电磁散射特性具有重要意义。

目前,计算粗糙面散射场的方法有数值法和解析法。数值法如矩量法(MoM)^[1-2]精度高,但计算复杂、速度慢,受计算机计算能力的影响,粗糙面与目标复合散射数值模拟理论和方法的研究对象主要集中于粗糙面为一维的二维复合目标散射问题,或者是粗糙面尺寸不超过 $30\lambda \times 30\lambda$ (λ 代表波长)的三维复合目标电磁散射问题^[3],而在电大尺寸复合目标的散射计算中,粗糙面的尺寸往往高达成百上千 λ^2 。相比之下,解析法如基尔霍夫近似法(KA)^[4]、物理光学法(PO)^[5]等的精度较低,但由于运算量小、速度快,在研究粗糙面散射远场特性时还可进一步简化为近似的数学表达式,常被用来研究粗糙面的散射远场特征。1975年,G.A.Thiele等^[5]提出了解析法与数值法相结合的混合算法思想,其后混合法一直在不断发展,在提高算法效率上取得了显著的效果。2008年,金亚秋等人提出了混合基尔霍夫近似法和矩量法(KA-MoM)^[6],实现了一般粗糙面(例如:土壤、海洋)上目标电磁散射的高效计算。但KA法只适用于粗糙度较低的光滑型大尺度粗糙面,当粗糙度较大时,则应使用微扰法(SPM)^[7],或者是更为精确的数值算法,而实际中,在不同频率的雷达波照射下,粗糙面也会具有小尺度或者双尺度粗糙面统计特征。1992年,Fung等人结合KA和SPM法,提出适用范围更广的积分方程法(IEM)^[8],应用于水域反演^[9]等。2003年,Chen等人^[10]对算法进行了改进,改进后的AIEM算法适用于更为广阔的粗糙面参数范围,应用于地形效应^[11]特征研究。无论是传统的IEM法还是AIEM法,其高效性主要体现在只考虑粗糙面面元间散射场的一次互耦作用,从而得到散射远场的近似解。实际应用中发现,随着粗糙面粗糙度的增大,粗糙面面元间的多次互耦作用增强,往往不能忽略。

在传统IEM算法的基础上提出迭代IEM法,与传统IEM法不同,该算法考虑了粗糙面面元间的多次互

收稿日期:2012-03-13

基金项目:国家自然科学基金项目(61061002)

作者简介:张晓燕(1979—),女,副教授,博士,研究方向为计算电磁学、目标与环境特性等。

耦。由于使用近场格林函数进行方程求解,散射场不能简化为传统IEM法所使用的积分形式的近似解,但能更为有效地用于计算粗糙面上的散射场,尤其是散射近场。首先介绍迭代IEM法的数学原理,再通过数值实验证明算法的有效性,进一步经过对比说明迭代IEM算法的性能。

1 迭代IEM法的数学模型

如图1所示,粗糙面离散为 m 个面元, $A(r_a)$ 点是其中任意一个面元, $P(r_p)$ 点为检测点。根据电磁理论,当入射电磁波 E_i 入射到粗糙面上时,会在粗糙面上形成表面等效电流 J_i ($i=1,2,\dots,m$)。等效电流除了感应产生直接散射场 E_s^d 外, J_i 间的相互感应还会产生耦合场 E_s^c 。因此,粗糙面上任意一点(包括 P 点和 A 点)的散射场值可表示为

$$E_s = E_s^d + \sum_{i=1}^n E_s^{c(i)} \quad (1)$$

式中: E_s 表示总散射场; E_s^d 表示直接散射场; $E_s^{c(i)}$ 表示耦合散射场; n 表示耦合次数。 E_s^d 可根据KA法计算得到,即

$$E_s^d = (1 + R^{TE})(q \cdot E_i)q + (p \cdot E_i)(p - R^{TM}k_r \times q) \quad (2)$$

式中: R^{TE} 和 R^{TM} 为局部切平面近似条件下的菲涅尔反射系数; p, q 表示局部平面的单位坐标向量。

通过式(2),就可得到 P 点的直接散射场 $E_s^d(r_p)$ 以及其余面元在 A 点处产生的耦合场 $E_s^d(r_{ja}, j=1,2,\dots,m, j \neq a)$ 。当粗糙面面元间的电磁互耦作用不可忽略时,对于面元 A 来说,每一个 $E_s^d(r_{ja})$ 都是新的入射场。这时,只需要将式中的 E_i 替换为 $E_s^d(r_{ja})$ 便可计算得到面元间电磁互耦所产生的耦合场 $E_s^{c(i)}$ 。最后,执行式(1)就可得到 P 点的散射场 E_s 。图2给出了迭代IEM法的计算流程。

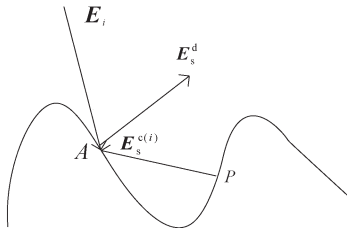


图1 迭代IEM算法模型示意图
Fig.1 Model scheme of iterative IEM

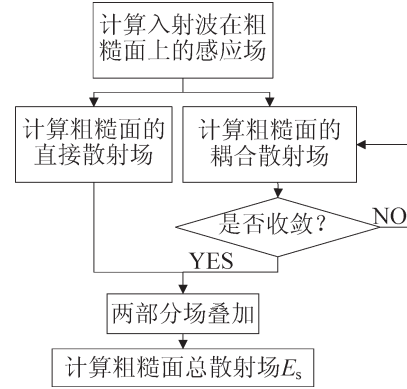


图2 迭代IEM算法流程示意图
Fig.2 Flow chart of iterative IEM

2 数值试验与结果

2.1 算法检验

以 $l=1.0\lambda, \sigma=0.0, 0.1, 0.3, 0.5\lambda$ (其中, l 是相关长度, σ 是起伏表面的均方根高度)^[7]的随机粗糙面后向双雷达散射截面(RCS)为例,入射波为垂直极化的平面波,其频率 $f=300$ MHz,沿垂直方向入射。图3给出了本文所提的迭代IEM法与MoM的数值结果比较0均方根误差(RSME)分别为1.51,1.40,1.09,1.32 dB,均小于3 dB,计算结果吻合较好。

2.2 算法性能

固定 $l=2\lambda$ 不变,以 $\sigma=0.0, 0.1, 0.2, 0.4\lambda$ 的4组金属随机粗糙面为例,这些粗糙面均满足KA算法的有效性条件^[12]。假设入射波为VV极化的锥形波(锥形波宽度为3 m),入射方向与上例保持不变,计算距粗糙面

上方1 km处的一系列检测点 P 的散射场值。图4给出了不同粗糙度情况下 $E_s^c(y)$ 的数值对比。图5给出了只使用KA法和使用迭代IEM法后的计算结果比较。

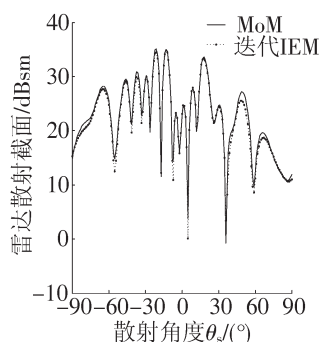


图3 MoM与迭代IEM的双站RCS对比结果
Fig.3 RCS contrast between MoM and iterative IEM

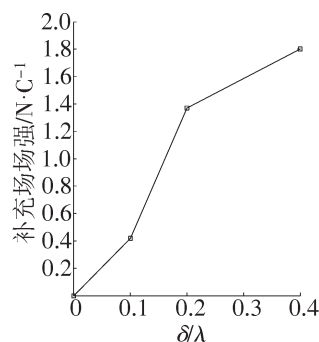
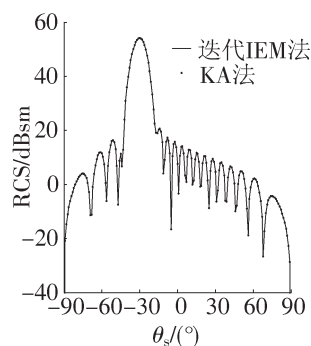
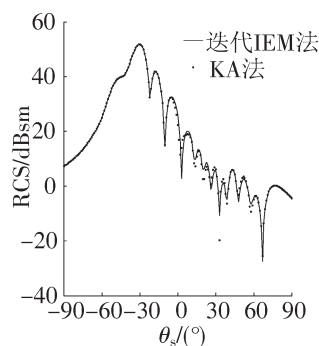


图4 不同粗糙度的耦合电场强度最大值对比
Fig.4 Coupling electric field intensities in different surface roughnesses

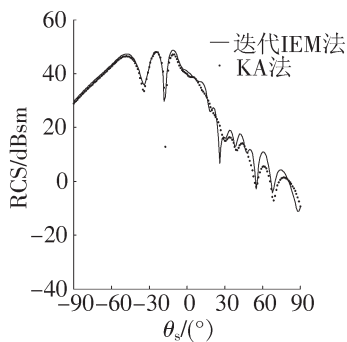
如图4所示,当粗糙面为 $\delta < 0.1$ 的光滑型大尺度随机粗糙面时,面元间的耦合作用低于0.5 C,此时,迭代IEM法的计算精度与KA法相近(见图5(a~b))。也就是说,在这种粗糙面条件下,迭代IEM法能进一步简化为KA算法。而当 $\delta > 0.2$ 时,粗糙面面元间的耦合作用增强,迭代IEM法和KA法的数值结果表现出明显差别(见图5(c~d)),这时,忽略面元间的耦合作用将导致较大计算误差。



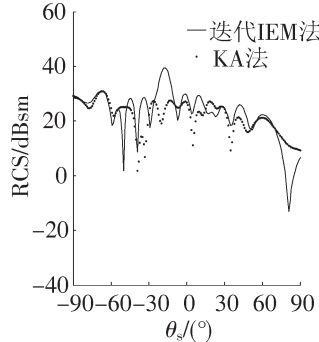
(a) $\delta = 0.0 \lambda$



(b) $\delta = 0.1 \lambda$



(c) $\delta = 0.2 \lambda$



(d) $\delta = 0.4 \lambda$

图5 平板上所得的RCS对比图
Fig.5 RCS comparison between KA and iterative IEM

图6(a)给出了计算以上4组金属随机粗糙面散射场时粗糙面元间的耦合次数对比。图6(b)展示了不同耦合次数下迭代IEM法的计算结果比较。图6的数据显示,尽管粗糙度的增大会导致耦合增强,但对于金属随机粗糙面来说,一般只需考虑5次互耦,其 E_s^c 的数值便可衰减。

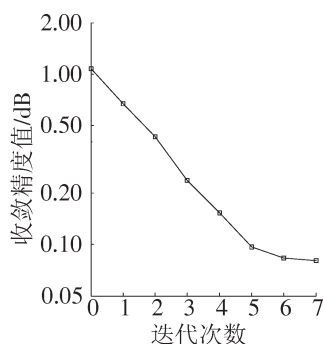
表1给出了图3的实例中迭代IEM法与KA法、MoM法的计算性能比较。表中的数据显示,使用迭代IEM法后,计算误差从只使用KA算法的RMSE=2.95 dB减小为1.77 dB,具有更高的计算精度。与MoM法相比,内存需求减少了9倍,计算速度提高了4.5倍以上,就算与使用了多层快速多极子技术(MLFMA)加速后的MoM法相比,计算速度仍然提高了2倍。

表1 迭代IEM与其他算法的计算性能比较

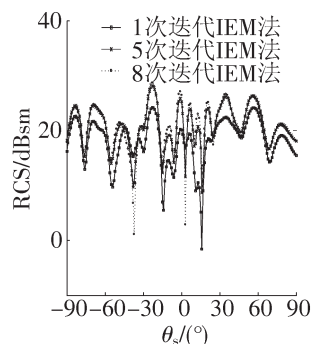
Tab.1 Performance comparison between iterative IEM and other methods

计算方法	RMSE/dB	时间/h:m:s	内存/MB
MoM	\	1:45:03	237
MLFMA+MoM	\	0:59:26	63
KA	2.95	0:23:45	12
迭代IEM	1.77	0:32:25	26

注:测试系统:winXP,编译环境:CVFortran 6.6,机器内存:2GB



(a)



(b)

图6 不同迭代次数的IEM法对比结果

Fig6 RCS contrast of different IEM iterations

3 结论

由于考虑了粗糙面面元间的耦合场作用,迭代IEM法可用于计算不同尺度条件下的粗糙面的散射场。当粗糙面的粗糙度为 $\delta < 0.1$ 的光滑型大尺度粗糙面时,迭代IEM法的计算精度与KA法相当,这时,算法还可进一步简化为KA法。而当粗糙面粗糙度增大时,迭代IEM法的计算精度表现出优于KA法并更接近MoM法的特点,计算速度与MoM法相比则提高了4.5倍以上,就算与使用了多层快速多极子技术(MLFMA)加速后的MoM法相比,也仍然提高了2倍,并且内存需求量更低,证明了算法具有高效性的特点。

参考文献:

- [1] HARRINGTON R F. Field computation by moment methods[M]. New York: Macmillan, 1968:1-98.
- [2] COLAK D, BURKHOLDER R J, NEWMAN E H. Multiple sweep method of moments analysis of electromagnetic scattering from 3D targets on ocean-like rough surfaces[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2007, 49(1): 241-247.
- [3] 金亚秋, 刘鹏, 叶红霞. 随机粗糙面与目标复合散射数值模拟理论和方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-3.
- [4] THORSOS E I. The validity of the kirchhoff approximation for rough surface scattering using a gaussian roughness spectrum [J]. Acoust Soc Am, 1988, 83(1): 78-92.
- [5] 刘志伟, 张月圆, 陈嘉琪. 移变模式双站 SAR 信号模型及电磁仿真研究[J]. 华东交通大学学报, 2012, 29(1): 24-29.
- [6] THIELE G A, NEWHOUSE T H. A hybrid technique for combining moment methods with the geometrical theory of diffraction [J]. IEEE Trans Antennas Propagat, 1975, 23: 62-69.
- [7] 叶红霞, 金亚秋. 三维随机粗糙面上导体目标散射的解析[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 839-846.
- [8] TSANG L, KONG J A, DING K H. Scattering of electromagnetic waves[M]. New York: Wiley, Theories and Applications, 2002: 407-416.

- [9] LI Z, FUNG A K. A reformulation of the surface field integral equation [J]. J Electromagnetic Waves and Application, 1991, 5(2): 195-203.
- [10] 高婷婷. 基于IEM的裸露随机地表土壤水分反演研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [11] CHEN K S, WU T D, TSANG L, et al. The emission of rough surfaces calculated by the integral equation method with a comparison to a three-dimensional moment method simulations [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2003, 41: 90-101.
- [12] 李欣欣, 张立新, 蒋玲梅. 被动微波辐射特征地形效应模拟与实验 [J]. 遥感学报, 2011, 15(1): 100-109.
- [13] 闫文哲. 电磁场面散射和体散射研究及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2009: 3-8.

Efficient Iterative Algorithm of Electromagnetic Scattering from Random Rough Surface

Zhang Xiaoyan, Li Zi, Jiang Daili, Liu Zhiwei

(School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In the algorithm of electromagnetic scattering of compound goals, calculating near field coupling between goals and rough surface is the main bottleneck. This paper proposes an efficient iterative integral equation method (IEM) for solving the scattering problems from the two dimensional (2D) rough surface with various roughness. Different from the traditional IEM, the proposed approach, based on the near field green function, takes the multiple coupling into account. Therefore, the scattering field can not be simplified as the integral form as the analytical solution any more. Compared with the moment method (MoM), the proposed iterative IEM can save much memory requirement and the calculation speed is much faster.

Key words: electromagnetic scattering; integral equation method; iteration