

# 半空间环境下跨界金属目标电磁散射快速分析研究

綦鑫, 聂在平, 阙肖峰, 胡俊, 王玥

(电子科技大学电子工程学院 成都 611731)

**【摘要】**通过对半空间分界面进行截断, 半空间环境下目标的散射问题可以等效为自由空间中目标与背景构成的复合介质的散射问题。不同于传统的半空间散射问题分析方法, 该文使用自由空间格林函数, 从而避免复杂耗时的半空间格林函数的计算, 特别是当目标靠近或横跨分界面时。根据自由空间格林函数的特性, 该方法可以有效地利用多层快速多级子方法进行加速处理, 不仅解决了传统的半空间问题中缺乏有效的快速方法的问题, 而且改善了由截断半空间分界面而引入的额外未知量问题。通过对跨界舰船的数值分析, 验证了该方法的准确性和有效性。另外, 从能量守恒的角度出发, 提出了透射深度的概念, 为跨界目标处于下半空间部分的截断问题提供了依据。

**关键词** 格林函数; 半空间; 多层快速多级子; 跨界面金属目标; 散射

**中图分类号** O441 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2018.04.008

## Fast Analysis of EM Scattering from PEC Bodies Straddling a Half-Space Interface

QI Xin, NIE Zai-ping, QUE Xiao-feng, HU Jun, and WANG Yue

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731)

**Abstract** By truncating the half-space interface, the analysis of scattering from a PEC body straddling a half-space interface can be cast into that of a composite dielectric object in the free space. Different from the traditional half-space method, the Green's function of the free space has been used and the extremely time-consuming numerical evaluations of the half-space Green's functions can be totally avoided, which involve the complicated Sommerfeld integrals and is especially difficult to evaluate when the objects get close to or straddle the interface. Moreover, fast algorithms such as the MLFMA can be incorporated easily without any restrictions, effectively compensating the cost due to the introduction of additional unknowns by the truncation. Scattering from a PEC ship straddling the interface has been studied to demonstrate the accuracy and efficiency of the proposed method. Moreover, based on the principle of conservation of energy, the concept of transmission depth has been defined firstly, providing the basis for cutting off the buried part of the objects straddling the half-space interface.

**Key words** Green's function; half space; MLFMA; PEC bodies straddling the interface; scattering

半空间环境下目标的电磁散射问题具有重要的研究意义和应用价值, 特别是在地球物理探测、目标识别和遥感遥测等方面。在数值分析方法中, 基于半空间格林函数的矩量法(method of moments, MoM)是应用最广泛的方法之一, 这是因为其待求未知量仅限于目标表面上, 并且和背景参数无关。然而, 这种传统的方法一直存在两个问题, 限制了它在实际工程中的应用和效率<sup>[1-3]</sup>。

第一个问题是半空间格林函数的高效计算问题。它通常以索墨菲积分的形式表示, 由于其积分核的高振荡、慢衰减特性, 其数值积分比较耗时。

针对索墨菲积分的快速求解问题, 众多学者进行了研究, 比如离散复镜像法(discrete complex image method, DCIM)<sup>[4]</sup>和最陡下降路径法<sup>[5]</sup>。但这些方法都有各自的应用局限, 仅在一定条件下才能实现比较高的计算效率。

另一个问题在于半空间问题中快速算法的实现。尽管多层快速多级子方法(multi level fast multipole algorithm, MLFMA)已经被引入到半空间问题中<sup>[6]</sup>, 但由于MLFMA是一种与积分核有关的算法, 导致其仅适用于目标完全位于分界面一侧的情况。当目标靠近分界面时, 半空间多层快速多级子

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61231001, 61490695); 国家杰出青年基金(61425010)

作者简介: 綦鑫(1990-), 男, 博士, 主要从事计算电磁场、雷达成像及信号处理等方面的研究。

方法的效率和精度会严重下降；当目标横跨分界面时，该方法完全失效。针对目标跨界面的情况，自适应交叉近似方法被引入到半空间问题中，但当目标为电大尺寸时，这种方法的效率也会急剧下降。

针对以上问题，本文提出了一种有效的等效模型分析方法。在该模型中，半空间分界面被截断，并用有限大小的介质区域代替，从而使半空间环境下目标的散射问题等效为自由空间中目标与背景构成的复合介质体的散射问题。特别地，在实际工程中，对于半埋入有耗介质半空间的目标而言，充分考虑下方部分对整体散射的影响，可以有效避免贡献较小的部分的计算，在精度满足要求的条件下，可以减少未知量，进一步提高计算效率。特别是对海面舰船等电大尺寸目标，因为其吃水深度较深，水下部分的体积往往很大，且海水介电参数一般较大，损耗严重，未知量数目会很大。因此，从能量守恒角度出发，本文首次提出了透射深度的概念，为跨界目标处于下半空间部分的截断问题提供了依据。

### 1 跨界金属目标的等效模型

首先考察半空间环境下任意金属目标的散射问题。假设上半空间为无耗空间，下半空间为具有高介电参数的有耗空间，上下半空间由无限大平面分隔开。由于目标完全处于半空间分界面一侧是目标跨界面的一种特殊情况，下面就目标横跨分界面的情况给出模型分析。

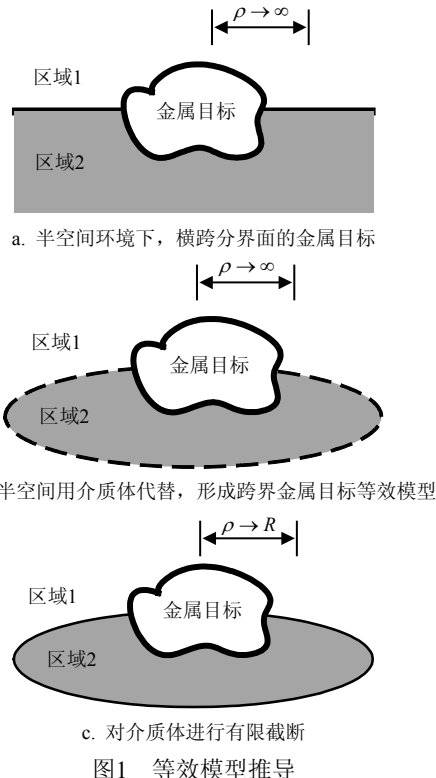
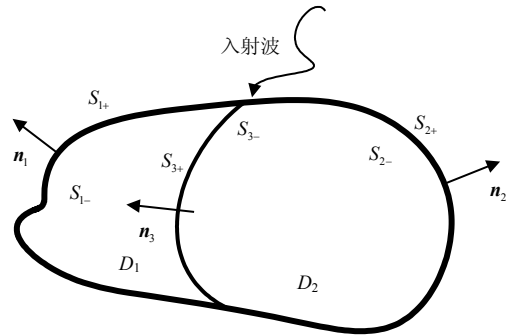


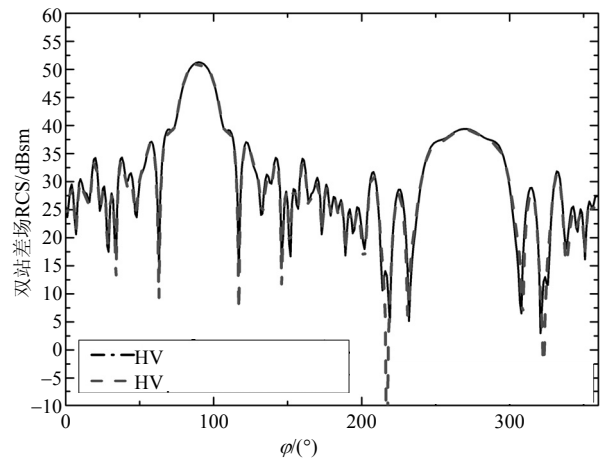
图1a为实际问题模型，区域1和区域2都是半无限大区域。由于半空间无限大，可以认为分界面在无穷远处闭合，因此用闭合的介质区域2代替下半空间，如图1b所示。在足够远处，分界面和目标的耦合较小，无限大的分界面被有限截断，截断半径之外的区域和目标之间的耦合影响可以忽略。因此，原半空间环境下目标散射问题被简化为自由空间中复合介质体的散射问题，如图1c所示。

一般地，假设金属目标为任意形状的散射体。利用零场定理<sup>[3]</sup>，可以构造求解复合介质目标表面上等效电流、磁流的表面积分方程。其中复合介质体各区域用  $D_l$  表示， $l=1,2$  分别表示金属目标和背景空间。自由空间和区域  $D_l$  间的外表面用  $S_{l+}$  表示，内表面用  $S_{l-}$  表示，表面  $S_{l+}$  的外法向矢量用  $n_l$  表示。 $D_1$  和  $D_2$  间的分界面用  $S_3$  表示， $n_3$  表示它的外法向矢量。所有符号表示如图2所示。



### 2 仿真评价

通过对跨界金属舰船的数值分析验证本文方法的计算精度和计算效率。



舰船尺寸为130 m×16 m×30 m，其中6 m高的舰体位于水面以下。海面截断半径为17个波长，入射

波频率为30 MHz, 平行极化, 入射角度为  $\theta = 60^\circ$ ,  $\varphi = -90^\circ$ , 下半空间中海水的介电参数为  $30-j2$ . HH极化和HV极化的双站差场RCS如图3和图4所示, 目标表面感应电流如图5和图6所示。

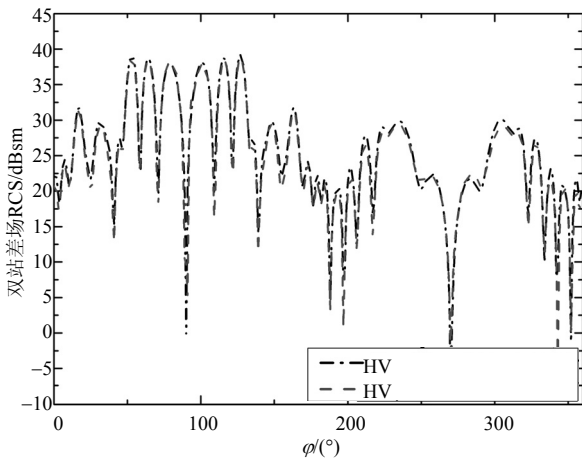


图4 跨界面金属舰船HV极化双站差场RCS

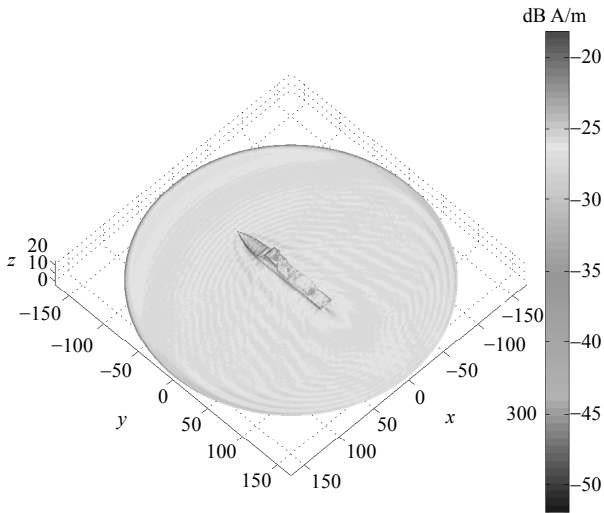


图5 等效模型表面感应电流分布图

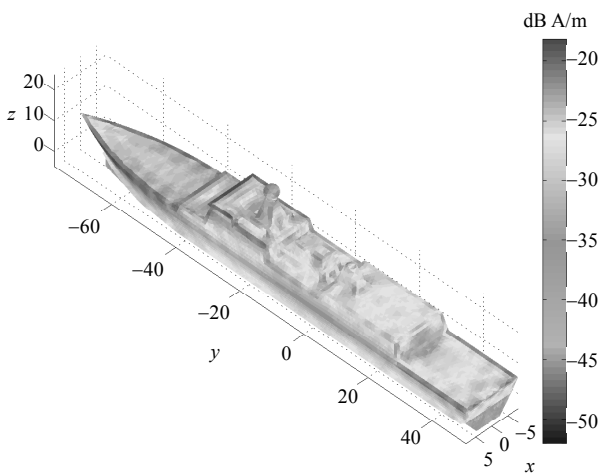


图6 舰船表面等效电流分布图

由于舰船是电大尺寸目标, 直接使用矩量法对计算时间和计算资源提出了巨大的要求, 并且在实际工程应用中也不现实。因此算例分析中将使用文献[7]的方法作为对比, 如图3和图4所示。本文方法和传统半空间方法相比, 具有良好的计算精度。然而, 这两种方法的计算时间和内存需求却截然不同, 如表1所示。由于避免了复杂耗时的索墨菲积分的计算, 本文方法将计算时间降为传统方法的三十分之一左右。尽管本文方法引入了额外的未知量来描述截断海面, 但内存需求也得到了明显的改善。这是因为本文方法采用了多层快速多级子算法进行加速, 可以有效地将计算复杂度控制在  $M \log N$  的量级 ( $N$  代表未知量数目), 而文献[7]的方法是格林函数无关的自适应交叉近似方法, 是一种代数方法, 其计算复杂度通常为  $N^2$ 。

表1 传统半空间方法和本文方法的计算成本比较

方法	格林函数类型	未知量	计算时间/h	计算内存/MB
传统半空间方法	半空间格林函数	201 294	156.7	34 687.0
本文方法	自由空间格林函数	463 618	5.66	19 806.9

### 3 目标跨界面部分的截断分析

#### 3.1 透射深度

在实际工程中, 对于部分埋入有耗介质半空间的目标而言, 充分考虑下方部分对整体散射的影响, 可以有效避免贡献较小部分的计算, 在计算精度满足工程需求的条件下, 可以减少未知量, 进一步提高计算效率。

入射波照射到半空间分界面上, 一部分透射到下半空间, 另一部分反射回来。透射波通常具有两个特性: 1) 通常情况下透射分量本身较小, 远小于反射分量; 2) 下半空间介质的损耗特性, 导致透射波在介质内不断衰减。因此, 界面下方的目标表面等效源通常较弱且对整体散射贡献较小。为了有效地分析下方部分对整体散射的影响, 本文首先给出了透射深度的定义, 并从能量角度给出了相关计算公式。

透射深度表征单位能量不同入射角、不同极化的电磁波入射到半空间分界面, 透过分界面的部分电磁波在损耗介质中的传播距离。定义当满足:

$$\left| \langle \bar{S}_i \rangle \right| = \frac{1}{e^4} \left| \langle \bar{S}_i \rangle \hat{e}_z \right| \quad (1)$$

电磁波走过的距离  $\delta$  为透射深度临界值。根据电磁理论相关公式可得:

$$\delta = \frac{\ln \xi}{-2k''_{2z}} \quad (2)$$

当TE波入射时,

$$\xi = \frac{2}{e^2} \frac{\omega}{|T^{TE}|^2} \frac{1}{|\operatorname{Re}(\bar{k}_2^*/\mu_2^*)|} \left| \langle \bar{S}_i \rangle \hat{e}_z \right| \quad (3)$$

当TM波入射时,

$$\xi = \frac{2}{e^2} \frac{\omega}{|T^{TM}|^2} \frac{1}{|\operatorname{Re}(\bar{k}_2/\varepsilon_2)|} \left| \langle \bar{S}_i \rangle \hat{e}_z \right| \quad (4)$$

式中,  $\bar{k}_2 = \hat{x}k_{2x} + \hat{z}k_{2z}$ ,  $k_{2x}^2 + k_{2z}^2 = \omega^2 \mu_2 \varepsilon_2 = k_2^2$ 。且  $k_2 = k_2' + ik_2''$  为复数, 由斯奈尔定理知  $\sin \theta_i / \sin \theta_t = k_2 / k_1$ ,  $\sin \theta_t$  和  $\cos \theta_t$  也为复数。已知折射波为:

$$E^t = E_0^t e^{ik_2(x \sin \theta_t + z \cos \theta_t)} = E_0^t e^{ik_1 \sin \theta_t x + ik_2 \cos \theta_t z}$$

$ik_2 \cos \theta_t$  为复数, 因此在损耗介质中传播的折射波振幅沿正  $z$  方向衰减, 而相位变化与  $x$  及  $z$  有关。可知  $k_{2x}$  为纯实数,  $k_{2z}$  为复数。且  $k_{2x} = k_1 \sin \theta_t$ ,  $k_{2z} = k_2 \cos \theta_t$ 。

假设下半空间有耗介电参数为  $40-j4.5$ 。考察透射深度临界值随不同入射角、不同频率及不同极化的变化情况, 如图7和图8所示。

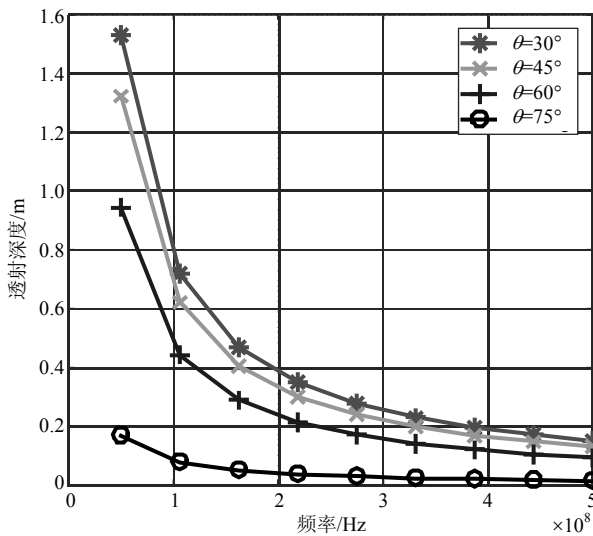


图7 介电参数为  $40-j4.5$  时, TE极化入射波的透射深度与入射波频率和入射角度的关系( $1/10^2$ )

通过以上分析可以发现, 透射长度临界值在不同极化下, 与入射频率和入射角度均为负相关关系, 即频率越高, 入射角越大, 透射深度越小; 根据数值分析, 可以得出初步结论, 在实际半空间问题中 (下半空间为有耗介质, 且介电参数较大), 当入射角度  $\theta > 30^\circ$  时, 半空间分界面下方部分对整体散射的贡献较小, 一般情况下, 仅需考虑2~3个介质波长内的贡献即可。

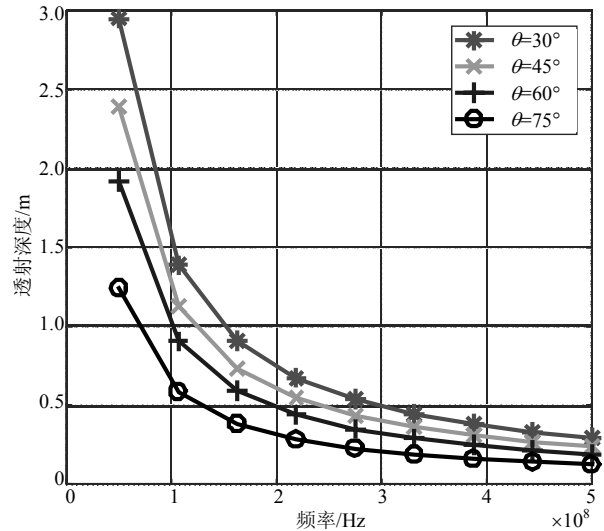


图8 介电参数为  $40-j4.5$  时, TM极化入射波的透射深度与入射波频率和入射角度的关系( $1/10^6$ )

### 3.2 数值算例

为了验证上面的分析, 本文进一步考察了跨界金属目标的电流分布情况, 如图9和图10所示。

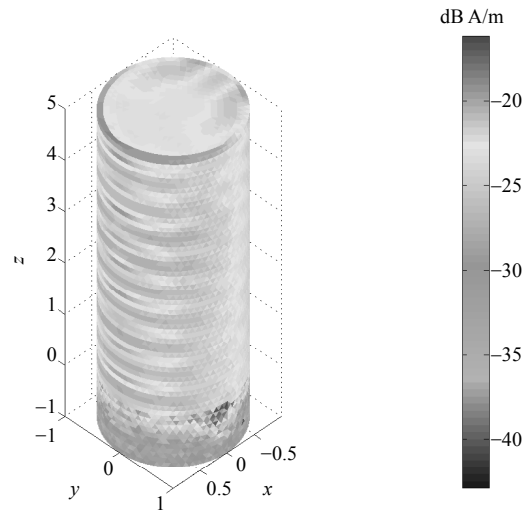


图9 跨界金属圆柱表面等效电流分布图( $\Delta H = 1$  m)

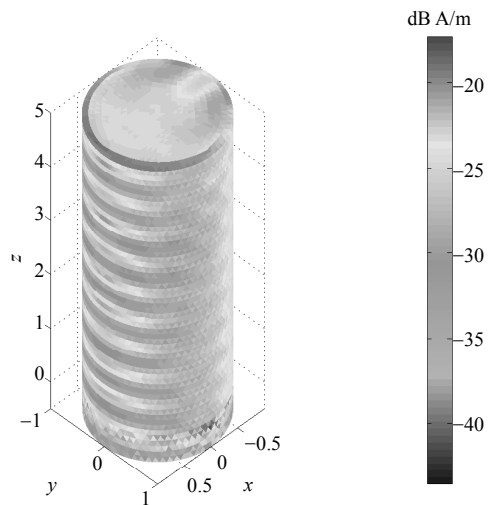


图10 跨界金属圆柱表面等效电流分布图( $\Delta H = 0.5$  m)

跨界金属圆柱, 圆柱半径1 m, 总高6 m, 埋地深度1 m。水平极化的入射波照射, 频率400 MHz, 入射角度 $\phi=0^\circ$ ,  $\theta=45^\circ$ 。下半空间相对介电参数为40-j4.5。等效模型的截断半径为10 m, 空气波长0.75 m, 介质波长0.118 m。目标表面等效电流分布如图9所示, 可以发现位于界面以下的等效电流远小于上半空间中目标表面的等效电流, 从而可以推断下半空间对目标整体散射的贡献较小。

进一步对目标位于下半空间中的部分进行不同长度的截断, 比较不同情况下的双站RCS, 如图11和12所示。令 $\Delta H$ 表示界面以下实际截取的高度, 其中Original表示 $\Delta H=1$  m, Model1表示 $\Delta H=0.5$  m, Model2表示 $\Delta H=0.25$  m, Model3表示 $\Delta H=0$  m。分析发现, 不同截取情况下, 目标的HH极化双站RCS精度吻合良好, 但随着截取高度的减小, HV极化RCS的计算精度开始下降。

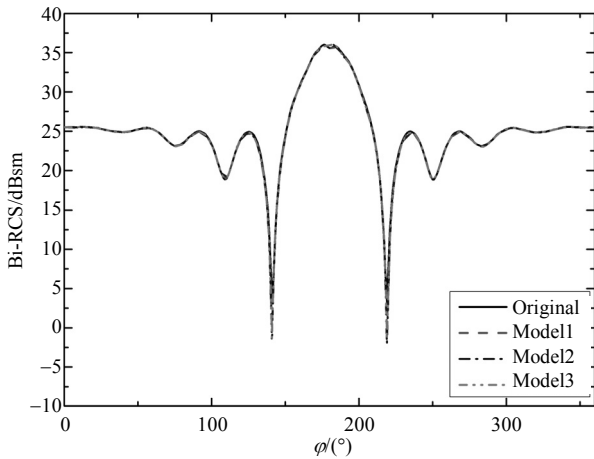


图11 不同截断情况下, 跨界金属圆柱的HH极化双站RCS

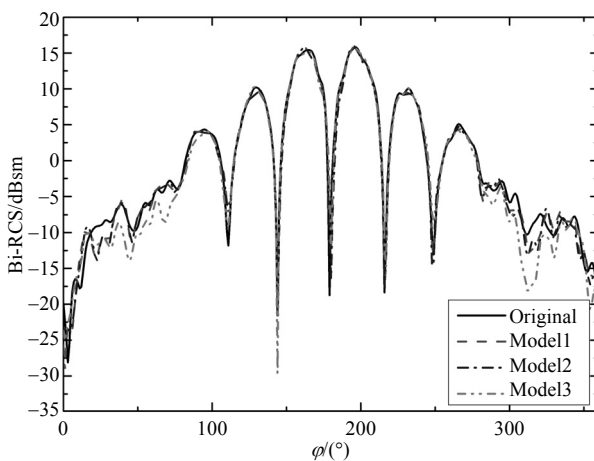


图12 不同截断情况下, 跨界金属圆柱的HV极化双站RCS

## 4 结束语

基于互耦影响分析和等效原理, 本文提出了一种分析半空间目标散射问题的有效模型。通过对半空间分界面进行截断, 半空间环境下目标的散射问题等效为自由空间中复合介质的散射问题。从表面上看, 本文方法由于对分界面进行截断而引入了额外的未知量, 反而增加了计算复杂度。但实际上并非如此, 因为: 1) 计算复杂耗时的索墨菲积分被完全避免, 直接提高了问题的计算效率; 2) 快速算法多层快速多级子可以毫无限制地应用到本文模型中, 解决了传统方法无法有效加速的问题, 特别是当目标距离分界面很近或者横跨分界面时。另外, 本文还分析了跨界目标位于下半空间的部分对整体散射的贡献影响, 并从能量守恒的角度出发, 提出了透射深度的概念, 给出了相关计算公式。

对跨界舰船的数值分析验证了本文模型的计算精度和计算效率; 对跨界金属圆柱的数值分析, 验证了对截断的影响和截断依据的分析, 为实际工程应用提供了有力的依据。

## 参考文献

- [1] MICHALSKI K A, ZHENG D. Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media I. theory [J]. IEEE Trans AP, 1990, 38(3): 335-344.
- [2] CHEN Ying-ping, CHEW W C, JIANG Li-jun. A new Green's function formulation for modeling homogeneous objects in layered medium[J]. IEEE Trans AP, 2012, 60(10): 4766-4776.
- [3] CHEW W C, Waves and fields in inhomogeneous media[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [4] YANG J J, CHOW Y L, FANG D G. Discrete complex images of a three-dimensional dipole above and within a lossy ground[J]. Microw AP IEE Proc H, 1991, 138(4): 319-326.
- [5] CHEN Ying-ping, XIONG J L, CHEW W C. A mixed-form thin-stratified medium fast-multipole algorithm for both low and mid-frequency problems[J]. IEEE Trans AP, 2011, 59(6): 2341-2349.
- [6] GENG N, SULLIVAN A, CARIN L. Multilevel fast-multipole algorithm for scattering from conducting targets above or embedded in a lossy half space[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38(4): 1561-1573.
- [7] LUO Wan, NIE Zai-ping, CHEN Ying-ping. Fast analysis of electromagnetic scattering from three-dimensional objects straddling the interface of a half space[J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2014, 11(7): 1205-1209.