

基于时域物理光学法的涂覆目标瞬态散射分析*

武光辉¹ 童创明^{1,2} 李西敏¹ 苏文然¹ 肖 军¹

(1. 空军工程大学 防空反导学院, 西安 710051; 2. 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

摘 要: 为了对涂覆雷达吸波材料(RAM)的电大尺寸目标的时域瞬态散射特性和宽带 RCS 进行快速计算, 以满足工程上对目标电磁散射特性的计算向宽频带、向时域靠拢的需求。通过引入阻抗边界条件(IBC), 计算了涂覆 RAM 目标表面的等效反射系数, 将等效反射系数代入频域物理光学法(PO)的表达式, 并进行逆傅里叶变换(IFT), 推导出了适用于涂覆 RAM 的目标的时域物理光学法(TDPO)积分表达式。使用 OpenGL 控制图形处理器(GPU)来对目标的面元模型进行消隐处理, 提高了运算速度。最后通过两个仿真算例, 对 TDPO 与频域 PO 计算所得的时域瞬态响应和宽带 RCS 进行对比, 验证了 TDPO 计算结果与频域 PO 计算结果具有同等精度。

关键词: 宽带 RCS, 瞬态散射, 涂覆目标, 时域物理光学, OpenGL

The Analysis of Transient Scattering from Coated Target Based on Time-Domain Physical Optics Method

WU Guang-hui¹, TONG Chuang-ming^{1,2}, LI Xi-min¹, SU Wen-ran¹, XIAO Jun¹

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
2. State Key Laboratory of Millimeter Waves, Nanjing 210096, China)

Abstract: A new approach is proposed to accelerate the calculation of the transient scattering and wide-band RCS from electrically large target coated with radar absorption material (RAM), and to meet the engineering requirements of obtaining the scattering characteristics in wide-band and time domain. The equivalent complex reflection coefficient of RAM-coated target is calculated by introducing the impedance boundary conditions (IBC). With the substitution of the equivalent complex reflection coefficient for frequency-domain physical optics (PO), the integral expression of the time-domain physical optics (TDPO) is obtained by implementing the inverse Fourier transformation (IFT), which is suitable for RAM-coated target. The Graphics Processing Unit (GPU) is driven to accelerate the shadowing processing of the facet target model by the OpenGL. With the comparisons of the transient scattering and wide-band RCS between TDPO and frequency-PO, TDPO is proved to have the same accuracy as frequency-PO.

Key words: wide-band RCS, transient scattering, coated target, time-domain physical optics, OpenGL

引 言

瞬态电磁场理论和技术在超宽带雷达目标探测与识别、电磁兼容、闪电和核电磁脉冲对人体和电子设备的损伤、电磁探矿、微波遥感以及信息通讯等工程领域都有着广阔的应用前景^[1-3]。尤其是在反隐身领域, 冲击雷达的超宽带特性是一条有效的反隐身途径^[4-5]。为了能够快速准确地分析电大尺寸目标的瞬态散射特性, 近年来发展出与各种频域高频

算法相对应的时域方法, 其中时域物理光学法(TDPO)就是一种在计算速度、内存消耗上比较有优势的时域方法。

国内外发表的文献中对 TDPO 应用于电大尺寸金属目标的瞬态散射特性分析进行的广泛且深入的研究。文献[6]首次将频域物理光学法(PO)推广到时域, 把目标表面的时域等效电流密度代入到时域散射电场表达式中, 提出了真正意义上的 TDPO 并计算了大口径反射面天线的结构模式项散射场。

* 收稿日期:2016-01-11; 修回日期:2016-05-05

基金项目:国家自然科学基金(61372033); 航空科学基金资助项目(20130196005)

文献[7-8]通过对使用频域 PO 得到的金属目标的远场 RCS 进行逆傅里叶变换,得到了与 TDPO 同样的结果,证明了 TDPO 的精度。文献[9-11]通过引入 Radon 变换得到了三角面片和非均匀有理 B 样条表面上的频域 PO 和 TDPO 的精确闭式表达式,将二维 TDPO 积分转化为一维线积分,提高了计算速度。

本文将 TDPO 应用于表面涂覆雷达吸波材料的隐身目标,使用 TDPO 来分析涂覆 RAM 的目标的瞬态散射特性,为研究超宽带冲击雷达的反隐身作用奠定基础。通过引入阻抗边界条件(IBC),将频域感应电、磁流密度用等效反射系数和频域入射场表示,并将频域感应电、磁流密度和远区散射场表达式逆傅里叶变换至时域,推导出涂覆 RAM 目标的 TDPO 远区散射场表达式。通过使用 OpenGL 控制 GPU 来加速目标面元模型的消隐过程,提高了运算速度。文中计算分析了若干电大涂覆 RAM 目标的瞬态散射响应和宽带 RCS,通过与频域方法的计算结果对比,验证了本文方法的正确性。

1 理论与公式

1.1 涂覆 RAM 目标的阻抗边界条件

假设理想导体(PEC)目标表面 RAM 涂覆层的厚度为 d ,相对介电常数为 ε_r ,相对磁导率为 μ_r ,当涂覆 RAM 厚度满足 $d \leq 0.05\lambda$ 时,可将该复合结构等效为无厚度阻抗表面,相应的归一化表面阻抗为

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{Z_0} = j\sqrt{\mu_r/\varepsilon_r} \tan(k_0 d \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}) \quad (1)$$

Z_0 为自由空间的波阻抗。

1.2 TDPO 公式的推导

远场条件下,根据 Stratton-Chu 方程可以得到目标散射场的远场频域表达式

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}, f) = jk \frac{\exp(-jkR)}{4\pi R} \int \mathbf{k}_s \times [\mathbf{J}_m + Z_0 \mathbf{k}_s \times \mathbf{J}_e] \times \exp[jk\mathbf{r} \cdot (\mathbf{k}_s - \mathbf{k}_i)] dS \quad (2)$$

式中, $\mathbf{r}$ 为场点; f 为入射波频率; k 为自由空间波常数; R 为场点到目标的距离; $\mathbf{k}_s$ 、 $\mathbf{k}_i$ 分别为散射方向和入射波方向的单位矢量; $\mathbf{n}$ 为表面法向矢量; Z_0 为自由空间的波阻抗; $\mathbf{J}_e$ 、 $\mathbf{J}_m$ 分别为目标表面的感应电流和感应磁流。

求解 Stratton-Chu 方程的关键在于计算积分表面的总电场和总磁场。在 PO 近似条件下,涂覆 RAM 目标的表面等效电流和等效磁流可以通过下式求得

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{E} \times \mathbf{n} = [\mathbf{E}_\parallel^i (1 + \Gamma_\parallel) + \mathbf{E}_\perp^i (1 + \Gamma_\perp)] \times \mathbf{n} \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_e = \mathbf{n} \times \mathbf{H} = \mathbf{n} \times [\mathbf{H}_\parallel^i (1 + \Gamma_\perp) + \mathbf{H}_\perp^i (1 + \Gamma_\parallel)] \quad (4)$$

式中, $\mathbf{n}$ 为目标表面法向矢量; $\mathbf{E}_\parallel^i$ 、 $\mathbf{E}_\perp^i$ 、 $\mathbf{H}_\parallel^i$ 、 $\mathbf{H}_\perp^i$ 分别为入射电场、入射磁场的水平分量和垂直分量,相应的等效反射系数可通过下式求得

$$\Gamma_\parallel = \frac{\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n} - \bar{\eta}}{\bar{\eta} + \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n}} \quad (5)$$

$$\Gamma_\perp = \frac{\bar{\eta} \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n} - 1}{\bar{\eta} \mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n} + 1} \quad (6)$$

综合(1)~(6)式,考虑到 $\mathbf{H}^i = 1/Z_0(\mathbf{k}_i \times \mathbf{E}^i)$,单站情况下涂覆 RAM 目标的后向散射场可以通过下式得到

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}, f) = -jk \frac{\exp(-jkR)}{2\pi R} \int_{S_{\text{light}}} [\Gamma_\perp \mathbf{E}_\perp^i - \Gamma_\parallel \mathbf{E}_\parallel^i] \cdot [\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_i] \exp[2jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{k}_i] dS \quad (7)$$

对式(7)进行 IFT 可得 TDPO 计算电大涂覆 RAM 目标的时域散射场表达式

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}, t) = \frac{-1}{2\pi RC} \int_{S_{\text{light}}} \left\{ \Gamma_\perp \frac{\partial \mathbf{E}_\perp^i}{\partial t} \left(t - \left(\frac{2\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}'}{C} + \frac{R}{C} \right) \right) - \Gamma_\parallel \frac{\partial \mathbf{E}_\parallel^i}{\partial t} \left(t - \left(\frac{2\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}'}{C} + \frac{R}{C} \right) \right) \right\} [\mathbf{n} \cdot \mathbf{k}_i] dS \quad (8)$$

式中积分曲面 S_{light} 表示目标表面被电磁波直接照亮的区域; $\mathbf{r}'$ 为目标表面被入射电磁波照亮部分任意一点; $\mathbf{E}_\perp^i(t)$ 、 $\mathbf{E}_\parallel^i(t)$ 分别为时域入射电场的水平分量和垂直分量。

1.3 基于 GPU 的消隐处理

式(7)、式(8)中的积分区域 S_{light} 为目标表面被入射电磁波直接照射的部分。根据物理光学法的假设,目标表面只有被电磁波直接照射部分才有感应电流存在,才能产生散射场贡献。对于电大尺寸目标而言,采取合适的方法迅速对目标表面是否被电磁波直接照射进行判断就显得十分关键。

Z-buffer 算法就是通过对深度值进行比较来实现对隐藏面的判断。文献[9,12]即是用的这种算法,但它们是通过软件实现的该过程。OpenGL 提供了颜色缓冲区、深度缓冲区、模板缓冲区和累加缓冲区来存储每个像素的相应数据,利用深度缓冲区能有效地实现图形消隐。深度缓冲区中存储了屏幕上每个像素的深度值,可以用于 Z-buffer 算法进行消隐处理。OpenGL 的优势在于可以通过控制硬件,即 GPU,来获得优秀的加速效果。采用普通 Z-buffer 算法对由 50000 个面元构成的标准体进行消隐判断

时耗时 7 s,采用 GPU 进行遮挡判断时仅需 2 s,并且在面元数量越多时优势越明显。本文采用基于 OpenGL 控制 GPU 进行遮挡判断的方法来对目标的三角面片模型进行消隐处理,能够大幅提高目标面元的遮挡判断速度。

2 仿真算例

分别采用传统的频域 PO 和 TDPO 对涂覆 RAM 平板和涂覆 RAM 球锥的后向散射特性进行计算,通过对比频域算法和时域算法计算得到的时域瞬态响应和宽带 RCS 数据来验证 TDPO 算法的精度。

2.1 涂覆 RAM 平板的后向散射

涂覆 RAM 平板模型如图 1 所示。平板位于 xoy 平面,涂覆 RAM 层法向为 z 轴正向,尺寸为 $0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 。涂覆层的参数为 $d = 0.07 \text{ mm}$, $\epsilon_r = 16.3 - j1.62$, $\mu_r = 1.49 - j1.67$ 。照射脉冲为调制高斯脉冲,带宽为 $10 \sim 20 \text{ GHz}$,中心频率为 15 GHz ,其入射方向为 z 轴负向, e_y 为入射电磁波极化方向,其表达式为

$$E_i(t) = e_y \cdot \exp(2\pi \times 15 \times 10^9 t) \times \exp\left(-\frac{4\pi(t - 3.2 \times 10^{-10})^2}{(4 \times 10^{-10})^2}\right) \quad (9)$$

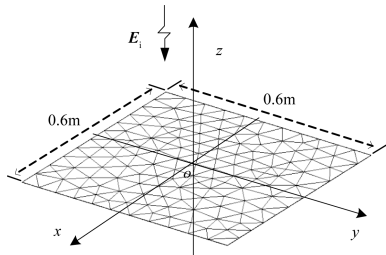


图1 平板的面元剖分示意图

图 2 为该涂覆平板在式(9)形式的调制高斯脉冲照射下的时域散射响应。纵坐标为场点与源点的距离 r 与远场散射电场幅值 E^s 的乘积,这样表示可以让时域响应幅值摆脱对场点位置的依赖。采用 Gordon 积分公式的一种频域 PO 计算方法,在同等精度下相比采用高斯积分的 PO 有明显的计算速度优势,本文将采用该算法作为参照算法来验证 TDPO 的精度,以下将该算法简称为 Gordon-PO。通过对 Gordon-PO 算法得到的频域结果进行 IFT 即可得到与 TDPO 计算结果相对应时域瞬态响应,图中标注为 Gordon-PO-IFT。图 2 中 TDPO 和 Gordon-PO 的计算结果具有很好的一致性。通过对 TDPO 得到的时域散射响应进行傅里叶变换(FT),可以得到图 3 中的涂覆 RAM 平板的宽带 RCS,显然 TDPO 与 Gor-

don-PO 方法得到的计算结果具有较好的一致性。

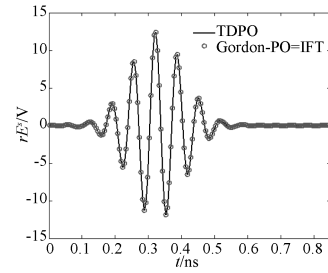


图2 TDPO 与 Gordon-PO-IFT 计算后向散射时域响应

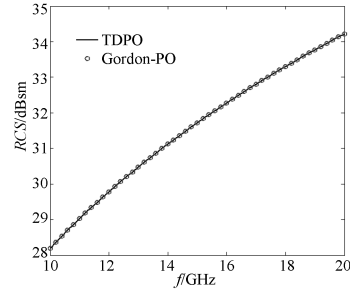


图3 TDPO 与 Gordon-PO 计算宽带 RCS 结果对比

继续采用图 1 中的平板模型和式(9)的入射波,图 4 和图 5 分别给出了理想导体平板和涂覆 RAM 平板的时域散射响应和宽带 RCS 计算,通过对比可以发现涂覆 RAM 确实能够减弱散射场的能量,缩减目标的 RCS,起到隐身作用。

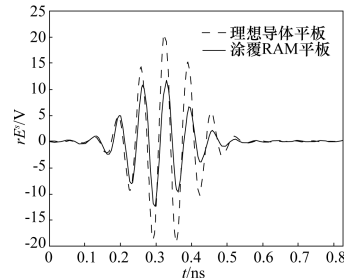


图4 理想导体和涂覆 RAM 平板散射的后向散射时域响应

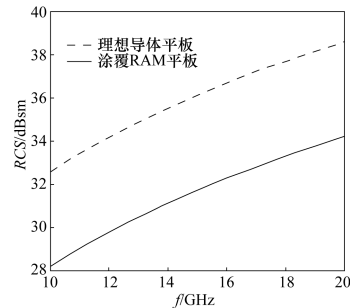


图5 理想导体和涂覆 RAM 平板散射的宽带 RCS

2.2 涂覆 RAM 球锥的后向散射

图 6 为涂覆 RAM 的球锥模型,是导弹等常见军事目标的简化模型^[12]。这里采用和文献[12]同样的几何参数,即其半锥角为 7° ,球半径为 0.0749 m ,

锥部分和整个球锥的长度分别为 0.06051 m 和 0.6891 m。照射脉冲为高斯脉冲,方向为 y 轴负方向,带宽为 0 ~ 10 GHz, $\mathbf{e}_z$ 为入射电磁波极化方向,其时域表达式为

$$\mathbf{E}_i(t) = \mathbf{e}_z \cdot \exp\left(-\frac{4\pi(t - 1.6 \times 10^{-10})^2}{(2 \times 10^{-10})^2}\right) \quad (10)$$

涂覆层的参数为 $d = 0.1$ mm, $\varepsilon_r = 11.4 - j1.52$, $\mu_r = 2.2 - j1.27$ 。

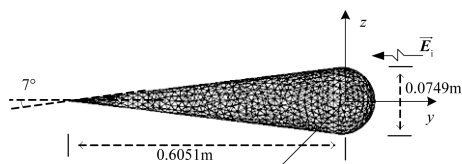


图 6 球锥的面元剖分示意图

图 7 和图 8 分别为涂覆 RAM 球锥在式 (10) 表示脉冲照射下得到的后向时域响应和宽带 RCS。使用 CPU 为 Inter E3400 主频 2.9 GHz 内存 2 GB 的 PC 机进行仿真实验时, TDPO 方法耗时 12 s, Gordon-PO 方法耗时 26 s, 显然 TDPO 方法在计算速度上有较明显的优势。图 7 和图 8 表明两种方法的计算结果具有较好的一致性。

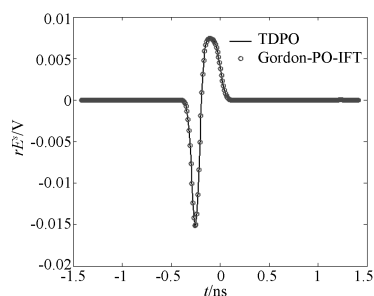


图 7 TDPO 与 Gordon-PO-IFT 计算后向散射时域响应

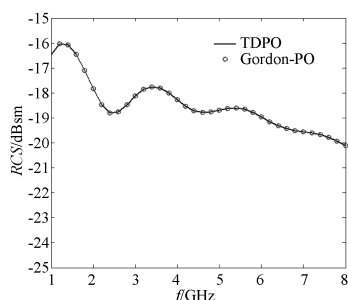


图 8 TDPO 与 Gordon-PO 计算宽带 RCS

3 结论

TDPO 方法是在频域 PO 方法的基础上发展起来的,通过对频域 PO 表达式的逆傅里叶变换推导出时域的瞬态响应表达式。本文通过 IBC 的引入,将等效反射系数应用到频域 PO 当中,进而通过 IFT

推导出了 TDPO 算法的积分表达式;与此同时,利用 OpenGL 控制 GPU 加速消隐处理,大大提高了运算速度。使用 TDPO 实现了对电大涂覆 RAM 目标的时域瞬态散射特性的快速计算,进而分析涂覆 RAM 目标的宽带散射特性。通过对理想导体平板、涂覆 RAM 平板和涂覆 RAM 球锥体时域瞬态响应和宽带 RCS 的计算,并与频域 PO 算法进行对比,验证了该方法与频域 PO 方法具有同等的精度。

参 考 文 献

- [1] 韩涛,徐永钊. 基于时域 UTD-PO 的多重圆形曲边缘绕射分析方法[J]. 微波学报, 2013, 29(4): 20-23
Han T, Xu Y Z. Time domain solution based on UTD-PO for multiple-cylinder diffraction [J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(4): 20-23
- [2] 顾俊,戴飞. 一种电大尺寸涂覆目标 RCS 的算法[J]. 微波学报, 2010, 26(S2): 40-43
Gu J, Dai F. RCS calculation method of large electric size targets coated with radar absorbing material [J]. Journal of Microwaves, 2010, 26(S2): 40-43
- [3] 姚汉英,李星星,孙文峰,等. 基于电磁散射数据的弹道目标宽带回波仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 599-611
Yao H Y, Li X X, Sun W F, et al. Wideband echo simulation of ballistic targets based on electromagnetic scattering data [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 599-611
- [4] 刘彬,何广军,程果,等. 超宽带冲击雷达反隐身导引头研究[J]. 飞航导弹, 2012(1): 76-79
Liu B, He G J, Cheng G, et al. Research on seeker of wide-band impulse radar[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2012(1): 76-79
- [5] 曾刚,杨宏春,杨啸林. 基于冲击雷达的近战引信控制电路原理与设计[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(6): 21-22
Zeng G, Yang H C, Yang X L. Principle and design of controlled circuit in proximity fuzes based on impulse radar [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(6): 21-22
- [6] Sun E Y, Rusch W V T. Time-domain physical-optics [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(1): 9-15
- [7] Guan Y, Gong S X, Zhang S, et al. Improved time-domain physical optics for transient scattering analysis of electrically large conducting targets [J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2011, 5(5): 625-629

(下转第 14 页)

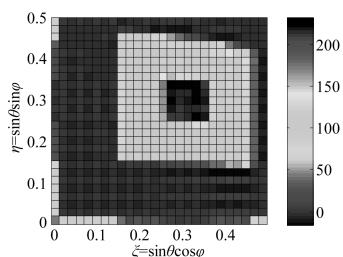


图 14 镜像综合孔径组合测量求解余弦可见度反演

次可以有效实现图像重建。同时,旋转镜像综合孔径获得的反演图像质量与镜像综合孔径组合测量反演图像质量接近。

4 结论

本文首先简要介绍了旋转镜像综合孔径基本原理,分析了L型阵和U型阵在不同旋转方式下 uv 平面采样特点,以及转移矩阵秩的大小变化和余弦可见度的求解精度变化。提出了将U型阵以 $\pi/2$ 围绕伪中心点旋转4次,可以有效实现旋转镜像综合孔径图像重建。

旋转镜像综合孔径空间频域均匀采样方法,用阵列的转动代替反射面的平动,采用较少的天线数目实现高分辨率微波辐射测量,为静止地球轨道卫星高分辨微波辐射测量提供了一个方法。

参 考 文 献

[1] Ruf Christopher S, Swift Calvin T, Tanner Alan B, et al. Interferometric synthetic aperture microwave radiometry for the remote sensing of the earth[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(5): 597-611

[2] 董健,李青侠,郭伟,等. 综合孔径辐射计二维稀疏天线阵列排列方法[J]. 微波学报,2009,25(2): 83-86
Dong J, Li Q X, Guo W, et al. An approach to topology design of 2D sparse arrays for synthetic aperture interferometric radiometer [J]. Journal of Microwaves. 2009, 25(2): 83-86

[3] Chen L B, Li Q X, Guo W, et al. One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2010, 7(2): 357-361

[4] Chen L B, Zhang X Y. Two-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis [A]. 2012 10th International Symposium on ISAPE [C]. 2012. 482-485

[5] Chen L B, Li Q X, Yi G L, et al. One-dimensional mirrored interferometric aperture synthesis: performances, simulation, and experiments [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(5): 2960-2968

[6] Lambrigtsen B, Wilson W, Tanner A, et al. GeoSTAR—a synthetic aperture approach for a geostationary microwave sounder [A]. Proc IEEE IGARSS [C]. 2004. 1008-1014

[7] Jacob C, Anders C, Anders E, et al. The geostationary atmospheric sounder (GAS) [A]. Proc Remote Sensing [C]. International Society for Optics and Photonics, 2006. 636109

[8] Liu H, Wu J, Zhang S W, et al. The geostationary interferometric microwave sounder (GIMS): instrument overview and recent progress [A]. Proc IEEE IGARSS [C]. 2011. 3629-3632

李育芳 女,1987年生,博士生。主要研究方向:微波遥感,信号处理。

E-mail: sophia_2013@hust.edu.cn

(上接第9页)

[8] Deniz B, Arif E A. A random transform interpretation of the physical optics integral [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2005, 44(3): 284-288

[9] 关莹,龚书喜,张帅,等. NURBS曲面建模的电大目标的宽带RCS快速计算[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2730-2734
Guan Y, Gong S X, Zhang S, et al. Fast computation of wideband RCS of electrically large targets modeled with nurbs surfaces [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(11): 2730-2734

[10] Guan Y, Gong S X, Zhang S, Xu Y X. A radon transform interpretation of contour integral in time-domain equivalent edge currents [J]. IEEE Antennas and Wire-

less Propagation Letters, 2011, 10: 1247-1250

[11] Hüseyin A S, Arif E A. Computation of the physical optics integral on NURBS surfaces using a radon transform interpretation [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008, 7: 70-73

[12] 关莹,龚书喜,张帅,等. 时域物理光学法分析均匀介质目标的瞬态散射[J]. 电波科学学报, 2011, 26(3): 515-520
Guan Y, Gong S X, Zhang S, et al. Transient scattering analysis of electrically large homogeneous dielectric targets by using tdp method [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2011, 26(3): 515-520

武光辉 男,1991年生,硕士。主要研究方向:地海环境中目标电磁散射特性及其应用。