

## 复杂目标的太赫兹波近场 RCS 快速计算

程志华<sup>\*①</sup> 谢拥军<sup>①</sup> 樊君<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

<sup>②</sup>(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 在太赫兹频段, 散射目标大部分处于近场区域, 远场计算方法已经不再适用, 为此该文推导了近场雷达散射截面(RCS)的计算公式。针对太赫兹频段近场条件下, 物理光学法(PO)由于面元数量巨大引起的遮挡判断耗时过长, 以及图形电磁学(GRECO)以像素为计算单位计算误差过大的问题, 该文提出一种以面元为计算单位, 以像素为遮挡判断单位的复杂目标太赫兹波近场 RCS 的快速计算方法, 该方法在保证计算精度的基础上, 大大降低了遮挡判断的计算复杂度和时间。最后, 以标准目标体平板、球体以及复杂目标体卫星在不同距离下的雷达散射截面的计算为例, 验证了该方法的有效性和准确性。

**关键词:** 雷达散射截面(RCS); 太赫兹; 近场; 图形电磁学(GRECO)

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)08-1999-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.01473

## Fast Computation of Near Field RCS of Complex Objects in Terahertz Band

Cheng Zhi-hua<sup>①</sup> Xie Yong-jun<sup>①</sup> Fan Jun<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

<sup>②</sup>(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In the terahertz band, most targets are in the scope of near field. The computation method of the far field RCS is not applicative, therefore, the computational formula of the near-field Radar Cross Section (RCS) is deduced. The occlusion judgment consumes a long time in the Physical Optics (PO) method because of the huge amount of surface elements, and the computational error is unacceptable in the GRaphical-Electromagnetic COmputing (GRECO) method using pixels as the unit of calculation. To deal with the above problem in the PO method and the GRECO method, based on the computational parameters pretreatment, a fast computational method of near field RCS using surface element as the calculating unit and the pixel is used as the occlusion judgment unit is proposed for the complex objects in terahertz band. The method ensures the calculation accuracy, and greatly reduces the computational complexity, and the time consumption of occlusion judging. The calculation of the near-field RCS produced by a square plate, a sphere and a satellite is studied in terahertz band. The results show that this method is efficient and accurate.

**Key words:** Radar Cross Section (RCS); Terahertz; Near field; GRaphical-Electromagnetic COmputing (GRECO)

### 1 引言

雷达散射截面(RCS)描述了目标在特定状态下对入射电磁波的反射能力, 通过研究目标的 RCS, 可以分析和预估雷达对目标的探测和识别能力。按照目标与雷达之间的距离划分, 电磁散射可分为远场散射和近场散射。一般以  $2D^2/\lambda$  为散射近场与远场的边界(其中  $D$  为目标最大尺寸,  $\lambda$  为雷达波长)。在远场区域, 电磁波采用平面波近似, 其计算方法已经较为成熟<sup>[1-6]</sup>。在近场区域, 电磁波为球面波,

远场区域的计算方法已经不再适用, 随着高频段雷达应用的逐渐增多, 目标体越来越多地处于近场区域。近场 RCS 的分析预估已经成为电磁散射研究的重要课题<sup>[7]</sup>。近年来, 太赫兹雷达以其高距离分辨率, 超大信号带宽, 强穿透力, 低截获率, 强抗干扰性, 优越的反隐身和穿透等离子体能力而具有强大的技术优势, 已经成为各国研究的重点<sup>[8]</sup>。对于太赫兹频段雷达, 目标体的近场区域将到达数千米甚至数十公里的范围, 其近场 RCS 的研究十分重要。

因此, 国内外很多学者都对近场 RCS 的计算进行了研究。其计算思路主要有两种: 一种是将物体

2013-09-26 收到, 2013-11-08 改回

\*通信作者: 程志华 asakaka1982@163.com

表面剖分成小面元,用远场 RCS 计算方法分别计算各小面元的 RCS 值,然后通过相位叠加得到总的散射场,是从部分到整体的思路<sup>[9]</sup>,DEMACO 公司研发的 NCPTD 和 CPATCH 软件采用的就是此方法。另外一种是以物理光学法(PO)为基础,通过散射场积分方程在无远场近似的情况下推导得出,该方法是从整体到部分的思路。在计算方法上,大部分学者采用了以物理光学法为基础的方法<sup>[10]</sup>,其计算准确性较高,但是在计算太赫兹频段的复杂目标体时,该方法主要面临两个问题:(1)由于太赫兹频段的频率很高,要求目标体的剖分面元要很小,从而导致剖分面元的个数大幅度增加,对计算机内存的要求将大幅度提高。(2)由于目标体面元个数的大幅度增加,射线追踪法判断遮挡的计算复杂度将呈几何倍数增加,在此基础上,由于近场区域,目标体照射区域将随着距离的变化而变化,随之相互遮挡情况也会产生变化,其计算复杂度和时间随距离点的多少又将呈倍数增加,导致大量的时间用在相互遮挡的判断上。

在远场 RCS 计算中,图形电磁学(GRECO)在互遮挡判断上的优势是极具吸引力的,该方法充分利用计算机硬件的优势,由计算机硬件完成最困难、最费时的遮挡和消影工作,但是,在现有硬件条件的基础上,由于颜色位数的限制,GRECO 通过对光照强度的提取得到计算参数的方法<sup>[11-13]</sup>,无法正确计算太赫兹目标体的近场 RCS 值。因此,如何在保证计算精度的前提下,把图形电磁学在遮挡判断上的优势应用在太赫兹目标的近场 RCS 的计算中,是十分有价值意义的工作。

本文推导了近场 RCS 的计算公式,针对 PO 法和 GRECO 法在太赫兹目标近场 RCS 计算中存在的问题,以面元为计算单位,以像素为遮挡判断单位,通过建立面元和像素之间的对应关系,快速计算太赫兹目标体的近场 RCS 值,既保证了计算精度要求,又保证了以像素为计算单位在自动判断光照区的优势。

## 2 理论分析

### 2.1 近场 RCS 计算公式推导

设  $D$  为一理想导体材料的目标体,如图 1 所示, $S$  为光照区表面,设表面单位单元为  $ds$ ,点源  $P$  与  $ds$  的距离为  $r$ 。其表面法相为  $\mathbf{n}$ ,入射电场方向为  $\mathbf{i}$ ,散射场方向为  $\mathbf{s}$ 。假设物体表面只有被入射波照射到的区域才有感应电流的存在。

根据麦克斯韦方程,对无远场近似的散射场积分方程进行推导可得

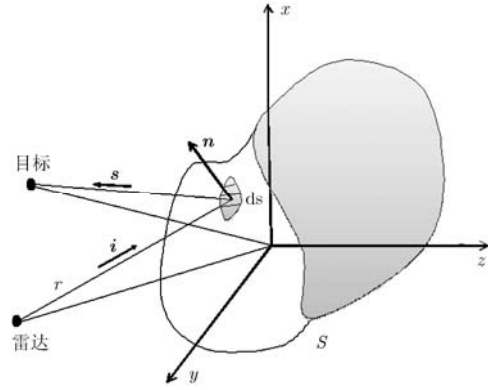


图1 目标体散射示意图

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s(x, y, z) = & \frac{jk}{4\pi} \int_S \phi(\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{s} - Z_0 \{ \mathbf{s} \times [ \mathbf{s} \\ & \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) ] \} ds + \frac{Z_0 \mathbf{s}}{4\pi} \int_S \phi \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} ds \\ & + \frac{Z_0 \mathbf{s}}{2\pi} \int_S \phi_1 (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) ds - \frac{\mathbf{s}}{4\pi j \omega \epsilon} \\ & \cdot \int_S \phi_1 \mathbf{J} \cdot \mathbf{n} ds - \frac{1}{2\pi r j \omega \epsilon} \int_S \phi_1 (\mathbf{n} \times \mathbf{H}) ds \\ & - \frac{1}{4\pi} \int_S \phi_1 (\mathbf{n} \times \mathbf{E}) \times \mathbf{s} ds \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{E}^s$  为目标体散射电场,  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  分别为总电场和总磁场,  $Z_0$  为波阻抗,  $\phi = e^{jkr}/r$ ,  $\phi_1 = e^{jkr}/r^2$ 。

假设物体表面的曲率半径远大于波长,考虑极化因素,由散射场积分方程可得

$$\mathbf{E}^s(Q) = - \frac{jk}{2\pi} \int_S \phi Z_0 \{ \mathbf{s} \times [ \mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H}^i) ] \} e^{jkr(i-s)} ds \quad (2)$$

其中  $\mathbf{E}^s(Q)$  为接收雷达处散射电场,由于是球面波入射,因此,

$$\mathbf{H}^i = H_0 \frac{\exp[jkr]}{r} \mathbf{h}_i \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得

$$\begin{aligned} \mathbf{E}^s(x, y, z) = & - \frac{jk}{2\pi} \int_S \frac{\phi Z_0 H_0}{r} e^{jkr} \{ \mathbf{s} \times [ \mathbf{s} \times (\mathbf{n} \times \mathbf{h}_i) ] \} \\ & \cdot e^{jkr(i-s)} ds \end{aligned} \quad (4)$$

近场雷达散射截面公式可定义为

$$\text{GRCS} = 4\pi R^2 \frac{|\mathbf{E}^s|^2}{|\mathbf{E}^i|^2} \quad (5)$$

其中  $R$  为源点到目标体中心的距离,  $\mathbf{E}^i$  为入射电场。

由式(4)和式(5),可以得到如式(6)的近场 RCS 的计算表达式:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_S \frac{R^2}{r^2} \cos \theta e^{2jkr} ds \right|^2 \quad (6)$$

其中,  $\theta$  角是导体表面法线与入射线之间的夹角,  $r$  是面元与观察点之间的距离,  $S$  积分域是照明区域。

在计算中可以离散化如式(7):

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{\text{elm}} \frac{R^2}{r^2} \cos \theta e^{2jkr} \cdot \Delta s \right|^2 \quad (7)$$

这里的  $\Delta s$  为每个剖分面元的面积,  $r$  为源点到面元的距离,  $\text{elm}$  代表面元。与文献[14]从磁场出发的方法进行对比, 从电场出发更有利于数据观测和后续工作的开展。

## 2.2 物理光学法和图形电磁学法在太赫兹频段的适用性分析

由式(7)可知, 该计算公式是以面元为计算单位。在太赫兹频段, 为保证计算结果的准确性, 剖分面元将会是千万级的数量, 甚至更高, 以面元为遮挡判断单位计算量十分巨大, 因此, 物理光学法在太赫兹频段的 RCS 计算中工程应用性很低。以像素为计算单位的图形电磁学方法, 在判断遮挡上具有很大的优势, 计算量大幅度减小, 但是, 图形电磁学中, 计算所需参数是以像素为单位通过对光强值的提取来得到的, 一般情况下颜色分配模式为 RGBA 模式, 在 RGBA 模式下, 硬件为 R, G, B, A 成分保留一定数量的位平面。R, G 和 B 值一般是以整数而不是浮点数的形式存储, 并且根据可用的位数进行缩放, 以便于存储和提取。目前显卡支持的最高颜色位数为 32 位, R, G, B 和 A 各占 8 位, 8 位的 R 成分可以存储 0~255 之间的整数<sup>[15]</sup>。位平面中的 0, 1, ..., 255 将对应于  $0/255=0.0, 1/255, \dots, 255/255=1$  的 R 值, 因此, 通过光照提取出来的参数值都将是  $1/255=0.0039$  的倍数。图 2 和图 3 分别为传统图形电磁学基于光照强度提取的面元法向与入射波方向的余弦值, 点源到面元的距离与实际值的对比。

太赫兹频段范围在 0.1 THz 到 10 THz 之间, 最低频率 0.1 THz 时, 波长为 0.003 m。为保证计算准确性, 剖分精度需为波长的  $1/3$ 。由上述分析可知, 太赫兹频段剖分精度的最低要求小于图形电磁学的计算误差, 因此以像素为计算单位的传统图

形电磁学在计算太赫兹频段的近场 RCS 值时是无效的。

## 3 太赫兹频段近场 RCS 快速计算方法

通过本文 2.2 节的分析可知, 物理光学法和图形电磁学法无法满足太赫兹频段的近场 RCS 的计算需要, 本文结合两种方法的优点, 通过以面元为计算单位保证太赫兹频段 RCS 计算精度, 以像素为遮挡判断单位保证遮挡判断的快速性, 最终通过建立像素与面元的对应关系从而达到快速计算太赫兹目标近场 RCS 的目的。

### 3.1 面元单位数据处理

由式(7)可知, 所需的参量包括单位面元的面积, 电磁波的波长, 面元到源点的距离, 当确定原始的入射条件后, 就确定了电磁波的波长和入射电场, 面元的面积可由剖分大小决定, 所需计算的参数包括: 各面元到光源的距离, 各面元法相与入射波相位的余弦值。

按照目标体实际尺寸, 用 FEMAP 对其进行建模并进行剖分。文件中包括各面元的法相矢量和位置信息。每一个面元的信息包括 3 个顶点坐标  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$  和面元法相矢量  $\mathbf{n}$ , 点源坐标  $(x, y, z)$  可以通过光源的位置得到。根据坐标和法向可以得到各面元到点源的距离和入射波与面元法向的夹角余弦值。图 4 为采用该方法提取的距离参数与实际参数的数据对比。从图 4 可以看出, 通过该方法可以准确得到各面元到点源之间的距离。

由于当余弦值小于零时, 对应面元不在光照区, 所以当余弦值小于零时放弃读入数据。整个数据处理过程在模型数据读入的过程中同步完成。通过计算数据的预处理, 大幅度减小了计算量。设 300 GHz 入射情况下, 剖分精度为 0.0003 m 时, 半径为 0.254 m 的球体, 数据处理前后的剖分面元数分别为 21226800 和 10613500。

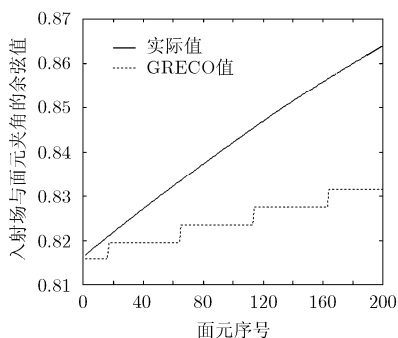


图 2 余弦值参数提取误差

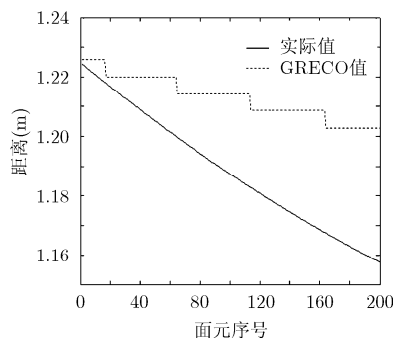


图 3 距离参数提取误差

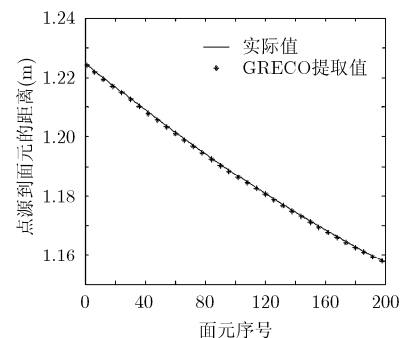


图 4 距离参数提取与实际值对比

### 3.2 目标体遮挡判断

通过 OPENGL 将光源设置为点光源, 光源位置信息通过模型视图矩阵进行变化, 并以视觉坐标的形式存储, 光照区域将随光源位置的不同自动进行光照区域判断, 结合深度缓存自动进行遮挡处理, 从而得到准确的光照区域, 利用 OpenGL 将消隐后的目标图像显现在计算机屏幕上, 如图 5 所示。光照区域的面元颜色是以像素为单位进行存储的, 无法直接判断面元是否处于光照区域, 通过 OPENGL

工具函数库中的 gluUnproject 函数将屏幕上光照区像素与剖分体面元一一对应, 从而以像素为光照区域判断单位, 当像素有颜色时, 对应的面元进行 RCS 计算。计算流程图如图 6 所示。为了防止出现单个像素对应多个面元的情况, 采用远场 RCS 计算中的分屏显示方法, 保证像素对应的实际的尺寸小于或等于面元剖分精度。以半径 0.254 m 球体为例, 入射频率 300 GHz, 剖分精度为 1/3 波长(m), 所需要的分屏数为

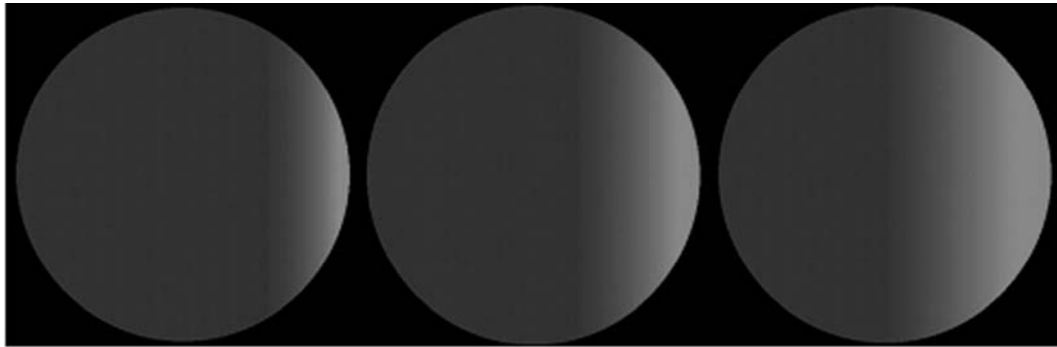


图 5 随距离变化的光照区域变化

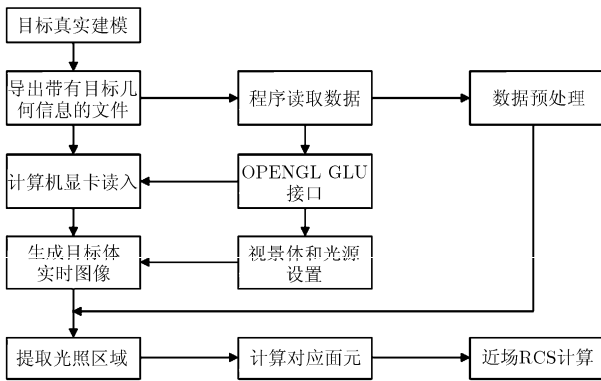


图 6 程序计算流程图

$$9 \times \max(L) \times \max(W) / (\lambda^2 \times pl \times pw)$$

其中  $\max(L)$ ,  $\max(W)$  分别为目标体最大长度和最大宽度,  $pl$ ,  $pw$  分别为显示区域像素的长度和宽度。该方法的计算量为  $18 \times \max(L) \times \max(W) / \lambda^2$ 。

### 3.3 计算量对比

射线法是通过判断各剖分面元中点与源点形成的射线与其他面元是否相交, 然后保留与源点最近的面元进行计算。DirectX 中采用的就是此方法, 其具体计算方法是: 通过求解三角形面元中两条边的权重  $u, v$ , 如果  $u + v \leq 1$  则判定射线与该面元存在交点。其计算量为:  $n(n - 1) \times [N(u) + M(v) + 1]$ , 其中  $n$  为面元数,  $N(u)$ ,  $M(v)$  分别为  $u, v$  的计算量。

表 1 为同样以半径 0.254 m 球体为目标体, 入射频率 300 GHz, 剖分精度为 0.0003 m 时, 采用射线法判断遮挡与面元像素方法的计算量对比。从表 1 可以看出, 采用本文提出的面元像素法大幅度减少了计算量。

表 1 射线法与面元像素法的计算量对比

方法	计算公式	计算量
射线判断法	$n(n - 1) \times [N(u) + M(v) + 1]$	$3.154 \times 10^{15}$
面元像素法	$18 \times \max(L) \times \max(W) / \lambda^2$	$1.16 \times 10^6$

## 4 计算结果及分析

(1) 目标体为半径 0.254 m 的球体。图 7 为入射频率 10 GHz, 距离 1~20 m, 计算间隔 0.1 m 时的计算结果与文献[16]的计算结果对比。图 8 为入射频率 300 GHz, 距离 2~60 m, 计算间隔为 0.5 m 时的计算结果。

由图 7 可以看出本文的计算结果与文献[16]中的结果吻合较好, 验证了方法的有效性和准确性。由图 8 可以看出其 RCS 值随着距离的增大而减小, 其减小速度随着距离的增大而减慢。当距离满足远场条件时, 其值与远场 RCS 解析解基本相同, 验证了方法的正确性。

(2)目标体为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的平板，计算频率 400 GHz，距离 5~1000 m，剖分精度为 0.0003 m，计算间隔 5 m。计算结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出 RCS 值基本随距离的增大而增大，其增大的速度随着距离的增大而减慢。满足远

场条件时，计算结果与解析解基本相同，误差小于 1 dB，验证了方法的正确性。

(3)目标体为卫星，如图 10 所示，计算频率 300 GHz，距离 10~3000 m，计算间隔 10 m，剖分精度为 0.0003 m，计算结果如图 11 所示。

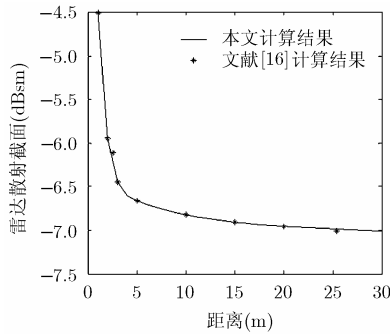


图 7 与文献[16]计算结果对比

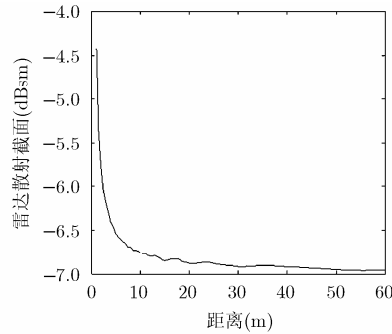


图 8 球体近场 RCS

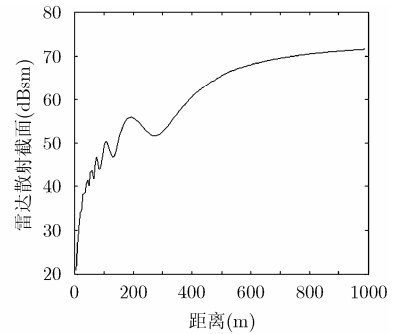


图 9 平板近场 RCS

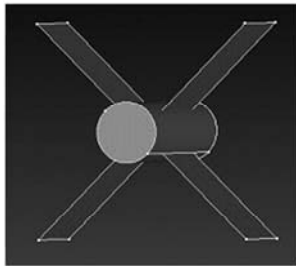


图 10 卫星模型

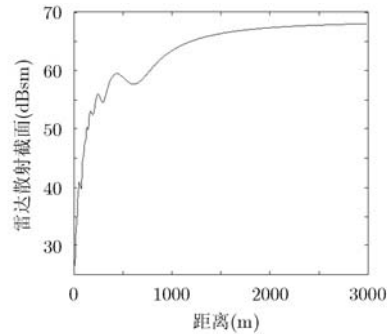


图 11 卫星近场 RCS

## 5 结论

本文研究了在太赫兹频段近场 RCS 的快速计算方法。以散射场积分方程为基础，推导了近场 RCS 的计算公式。基于对物理光学法和图形电磁学法的分析，提出了一种以面元为计算单位，以像素为遮挡判断单位的太赫兹近场 RCS 的快速计算方法。该方法通过数据预处理，利用 OpenGL 引入点光源和深度缓存结合的光照区域判断方法，由计算机硬件自动完成耗时的遮挡和消隐，以及建立面元与像素之间的对应关系，从而快速准确地计算出太赫兹目标的近场雷达散射截面。通过该方法计算了平板、球体和卫星在不同距离下的雷达散射截面，并与文献中数据进行了比较，验证了方法的有效性和准确性。

## 参考文献

[1] Solomon R C, Leong H, and Antar Y M. Forward scattering effects in RCS of complex targets in the 3-20 MHz high frequency range[C]. Antennas and Propagation Society

International Symposium, Boston, 2008: 1-4.

- [2] 李晓峰, 谢拥军, 杨锐. 半空间电大导体目标散射的高频分析方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1268-1270.
- Li Xiao-feng, Xie Yong-jun, and Yang Rui. High-frequency analysis on scattering from conductive targets with electrically large size in half space[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(5): 1268-1270.
- [3] Gillion E, Rochefort E, and Claverie J. Improvement of RCS estimation of large targets by using near-field approach [C]. Radar Conference (RADAR) IEEE, Ottawa, ON, Canada, 2013: 1-5.
- [4] Altin N and Yazgan E. RCS prediction using fast ray tracing in Plücker coordinates[C]. 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Gothenburg, 2013: 284-288.
- [5] Lipuma D, Méric S, and Gillard R. RCS enhancement of flattened dihedral corner reflector using reflectarray approach[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(2): 152-154.
- [6] Li Xiao-feng, Xie Yong-jun, and Yang Rui. High-frequency method for scattering from coated targets with electrically

- large size in half space[J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2009, 3(2): 181-186.
- [7] R Bhalla and Hao L. Near-field signature prediction using far-field scattering centers extracted from the shooting and bouncing ray technique[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2000, 48(2): 337-338.
- [8] Yang Yang, Yao Jian-quan, and Zhang Jing-shui. Terahertz scattering on rough copper surfaced[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 36-39.
- [9] Li Jing and Li Xiang-jun. An efficient algorithm for near field RCS of electrically large dynamic targets[C]. International Conference on Information Science and Technology, Nanjing, China, 2011: 413-415.
- [10] Pouliguen P, Damiens J F, *et al.* RCS computation in near field[C]. Proceedings of the International Conference Day on Diffraction, St. Petersburg, 2006: 252-265.
- [11] Li Xiao-feng, Xie Yong-jun, and Yang Rui. Bistatic RCS prediction for complex targets using modified current marching technique[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 1993, 93(2): 13-28.
- [12] Riu S J M and Ferrando M. High-frequency RCS of complex radar targets in real-time[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1993, 41(9): 1308-1319.
- [13] Zhang Jun, Ju Zhi-qin, and Jin Feng-jie. Improvement of graphical electromagnetic computing method to compute bistatic radar cross section[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2005, 30(5): 789-791.
- [14] Pouliguen P and Desclos L. A physical optics approach to near field RCS computations[J]. *Annales Des Telecommunications*, 1996, 51(5): 219-226.
- [15] Dave Shreniner and The Khronos OpenGL ARB Working Group 著, 李军, 徐波, 等译. OpenGL 编程指南[M]. 第 7 版, 北京: 机械工业出版社, 2010: 118-119.
- [16] Shyh-Kang Jeng. Near-field scattering by physical theory of diffraction and shooting and bouncing rays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1998, 46(4): 551-558.
- 程志华: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学、目标特性、天线工程、电磁兼容等.
- 谢拥军: 男, 1968 年生, 教授, 研究方向为计算微波与计算电磁学、微波通信、天线工程、电磁兼容等.
- 樊君: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为计算电磁学、目标特性、天线工程、电磁兼容等.