

非均匀不稳定表面粗糙目标的 太赫兹波段散射特性分析

李昌泽¹, 童创明¹, 王童¹, 王伟杰¹, 齐立辉²

(1. 空军工程大学 防空反导学院 微波应用教研室, 陕西 西安 710051;

2. 中国人民解放军 786 厂军代室, 陕西 西安 710051)

摘要:研究了不同粗糙度的非均匀不稳定表面粗糙导体目标在太赫兹波段的散射特性,区别于采用经验公式的建模方法,提出把随机粗糙面的建模理念应用到太赫兹波段的非均匀不稳定表面粗糙目标的建模中,用描述随机粗糙面的均方根高度(h)和相关长度(l)两个物理量来调节目标表面的粗糙度变化.首先用高斯随机粗糙面模拟非均匀不稳定粗糙目标的表面,然后采用物理光学和等效电流相结合的方法进行仿真计算,分别对不同入射角、不同频率和不同粗糙度的不同非均匀不稳定表面粗糙导体目标,在太赫兹波段散射特性进行了分析,最后得出相关的结论.

关键词:太赫兹波;表面粗糙目标;雷达散射截面;粗糙度

中图分类号:TN015 **文献标识码:**A

Analysis of terahertz wave scattering characteristics of non-uniform unstable roughness surface target

LI Chang-Ze¹, TONG Chuang-Ming¹, WANG Tong¹, WANG Wei-Jie¹, QI Li-Hui²

(1. Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Military Representative office of PLA in 786 Factory, Xi'an 710051, China)

Abstract: The Electromagnetic (EM) scattering characteristics in terahertz (THz) band of non-uniform unstable electrical conducting target with different roughness surface is studied in this paper. The modeling concept of randomly rough surface is applied to model the target with non-uniform unstable roughness surface. Here, the root mean square (RMS) height and the correlation length of rough surface are applied to describe the roughness of different target surfaces. Firstly, the Gaussian surface is generated to model a non-uniform random unstable target, then a combined method of physic optics and equivalent current is employed to simulate the EM scattering in THz band. The scattering characteristics of the target with different roughness scales at different incident angles and radar frequencies are analyzed and discussed. Finally, the relevant conclusions are drawn.

Key words: terahertz wave, roughness surface target, radar cross section, roughness

PACS: 41.20.Jb, 42.68.Mj

引言

太赫兹(THz)波段位于微波与红外波之间,其频率范围为 0.1 ~ 10 THz(1THz = 10^{12} Hz),对应的

波长为 $30\mu\text{m} \sim 3\text{mm}$. 太赫兹雷达相比于一般微波雷达的载频频率更高,更容易发射大带宽信号,从而具有更高的分辨率,可以实现更小尺寸目标的探测、更精确目标的运动与物理参数反演^[1-3],是未来高精度

收稿日期:2015-05-09,修回日期:2015-12-20

Received date: 2015-05-09, revised date: 2015-12-20

基金项目:国家自然科学基金(61372033)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61372033)

作者简介(Biography):李昌泽(1980-),男,四川射洪人,助理工程师,博士研究生,主要研究领域为计算电磁学、目标电磁散射特性. E-mail: babilun_2003@163.com

雷达发展的方向^[4-5]. 太赫兹目标的特性包括透射特性、反射特性和散射特性三个部分. 目前,我国关于太赫兹目标透射和反射特性的研究已取得了一些成果^[6-8],但在目标散射特性方面的工作才刚刚起步^[9],而对于太赫兹雷达散射截面(RCS)的研究目前在国内外更是一个全新的课题^[10]. 太赫兹波段目标表面的细微结构、粗糙度等细节会显著影响其后向散射特性,相关的研究已经论证了对于理想导体目标,高频电磁计算方法是分析太赫兹波段目标散射特性的有效途径^[11]. 如物理光学法(PO)可有效计算理想导体目标在太赫兹波段的 RCS^[12].

针对非均匀不稳定表面粗糙目标在太赫兹波段的散射问题,目前还没有检索到相关研究成果. 首先,本文在建模方法上采用高斯随机粗糙面来模拟目标的粗糙表面,区别于以往采用经验公式的建模方法^[13],把随机粗糙面的建模理念应用到太赫兹波段非均匀不稳定表面粗糙目标的建模中,以此建立的模型更具有普遍性和一般性. 然后,采用物理光学(PO)和等效电流(MEC)相结合的方法,考虑目标的棱边绕射作用,计算其散射特性,并针对不同入射角、不同频率和不同粗糙度下的不同表面粗糙导体目标的 RCS,分别进行了仿真和比较分析. 在研究时读者还可参考文献^[13]进行对比.

1 表面粗糙度

表面粗糙度是用来表述表面粗糙程度的指标,它是一个相对指标. 当入射角一定时,在低频段某一光滑表面,在高频段(特别是在毫米波、太赫兹波段)则可能变成粗糙表面. 如图 1 所示,AB、DE 是波长为 λ 、入射角为 $\theta = \pi/2 - \beta$ 的两条入射线;两条反射线为 BC、EF;BD、CG 为入射波和反射波的等相位面. 当 AB、DE 投射到光滑表面上时,其反射线没有相位差;现投射到一个高低起伏均方根值为 h 的表面上时,两射线之间的相位差为 $\Delta\varphi = (4\pi h \sin\beta)/\lambda = (4\pi h \cos\theta)/\lambda$.

一般取 Rayleigh 条件 $\Delta\varphi = \pi/2$ 作为区分光滑表面和粗糙表面的分界线. 在 1971 年 Peake 和 Oliver 进一步修改了 Rayleigh 判据,并将表面区分为:光滑表面、中等粗糙表面和粗糙表面,使之适合于中等粗糙度的表面. 即当 $h < \lambda/(25\sin\beta)$ 时,表面为光滑表面;当 $\lambda/(25\sin\beta) < h < \lambda/(4.4\sin\beta)$ 时,表面为中等粗糙表面;当 $h > \lambda/(4.4\sin\beta)$ 时,表面为粗糙表面. 由此可知,表面的粗糙度不仅取决于表面起伏的均方根值 h ,还与波长 λ (或频率 f)有关.

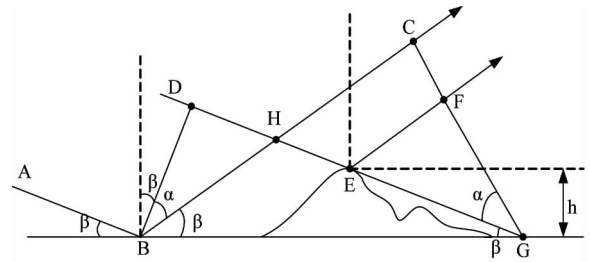


图 1 粗糙表面与电磁波相互作用的机制示意图
Fig. 1 Electromagnetic scattering mechanism from rough surface

为了证明表面粗糙度对目标电磁散射特性的影响,首先求解一个典型算例,仿真结果如图 2 所示.

考虑尺寸为 $8\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ 、均方根高度值 h 为 0.1 mm 的表面粗糙导体平板的电磁散射,采用 PO + MEC 计算其双站 RCS,如图 2 所示(图中均为水平同极化的结果). 图 2(a) 给出了入射波频率为 $f = 30\text{ GHz}$ 、入射角分别为 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、 $\theta = 80^\circ$ 时,导体平板的双站 RCS;图 2(b) 给出了入射角为 $\theta = 45^\circ$ 、入射波频率分别为 $f = 10\text{ GHz}$ 、 $f = 50\text{ GHz}$ 、 $f = 100\text{ GHz}$ 时,导体平板的双站 RCS;图 2(c) 给出了入射波频率为 $f = 30\text{ GHz}$ 、入射角为 $\theta = 45^\circ$ 时,均方根高度值 h 分别取 $\lambda/(30\sin 45^\circ)$ 、 $\lambda/(10\sin 45^\circ)$ 和 $\lambda/(4\sin 45^\circ)$ 时,导体平板的双站 RCS.

由图 2(a)、(b) 可知,与环境表面粗糙度对电磁散射特性的影响一样,随着入射角的减小或频率的增大,表面粗糙导体平板的漫反射增强,镜面反射减弱,这表明目标表面粗糙度与入射角和入射频率有很大关系. 由图 2(c) 可知,对于确定的入射频率和入射角,当平板表面粗糙度不同时,其 RCS 有非常明显的差别. 因此,目标表面粗糙度对其散射特性的影响不可忽略. 可见,表面粗糙度尽管是表征目标表面起伏的微观几何形状特性的参数,但随着频率的升高,当目标表面粗糙的起伏尺寸与波长接近甚至超过波长时,目标的散射特性对其表面粗糙度更加敏感;表面越粗糙,目标散射的回波功率越大. 所以,表面粗糙度是决定雷达回波振幅的主要因素之一,可作为目标探测与识别的一项重要依据.

2 表面粗糙目标的分类与几何建模

根据目标表面粗糙度的分布情形,可分为以下两种不同的类型:

(1) 第一类:均匀表面粗糙目标,即表面粗糙度分布是均匀的,它是由相同属型材质的部件构成,如图 3(a) 所示. 对于这类表面粗糙目标的建模和散射

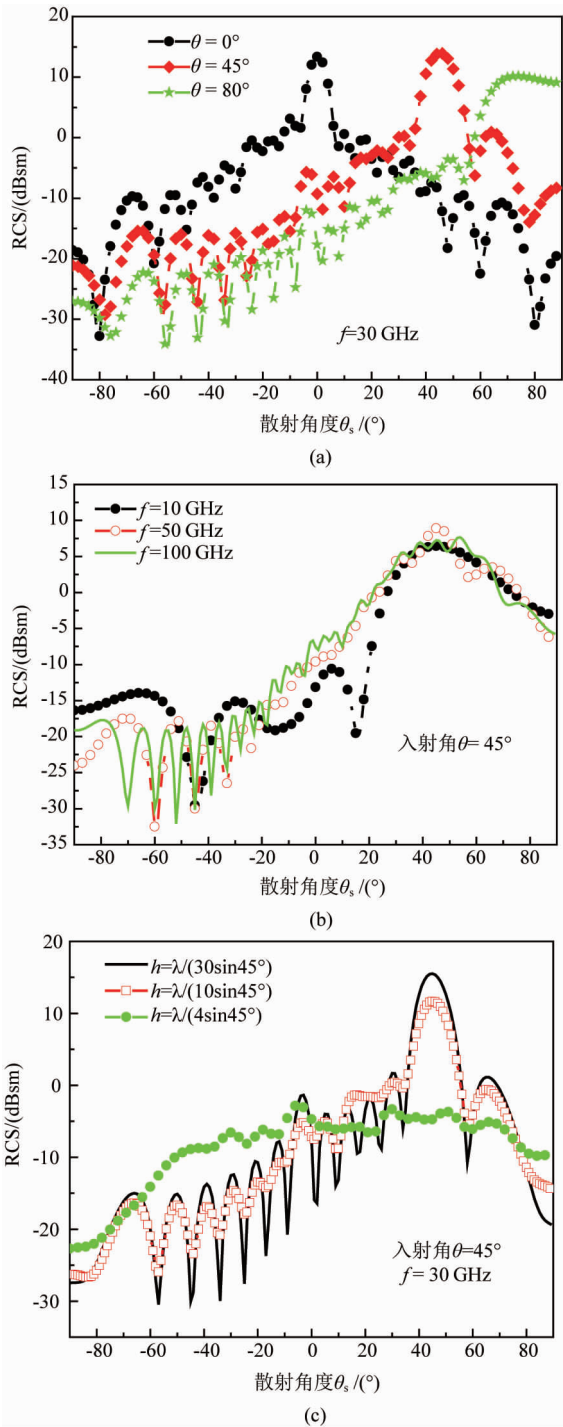


图2 不同频率、照射角下粗糙表面平板的 RCS 比较 (a) 下不同入射角导体平板的 RCS 比较, (b) 同一入射角不同频率下导体平板的 RCS 比较, (c) 不同均方根高度下导体平板的 RCS 比较

Fig. 2 Comparisons of RCS from an electrical conducting plate at different frequencies and different incident angles (a) frequency , different incident angles, (b) different frequencies, incident angle 45°, and (c) frequency , incident angle 45°, different rough surface cases

特性的计算,文献[13]已对作了较为详细的叙述和分析.

(2) 第二类:非均匀表面粗糙目标,即表面粗糙度分布是非均匀不稳定的,如图3(b)所示.当目标高速运动时,均会产生高速运动的高温流体,流体中可能有微小的颗粒和电离粒子,其分布是非均匀和不稳定的,这些流体覆盖在目标周围,就会影响目标表面的粗糙度,此时目标表面粗糙度分布是非均匀不稳定的.

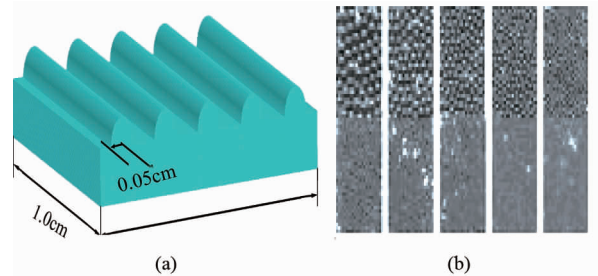


图3 表面粗糙目标分类 (a) 第一类表面粗糙目标, (b) 第二类表面粗糙目标
Fig. 3 Classification of rough surface (a) the first roughness, and (b) the second roughness

实际上在自然界中存在的均匀表面粗糙目标较为理想化而且较少,或者说仅仅是作为一类特例存在,而更多的是由于受加工精度影响或者目标高速运动,在目标表面产生高温的流体,导致分布是非均匀和不稳定,具有随机性特点的第二类表面粗糙目标.对于分析这类表面粗糙目标的散射问题,关键在建模的方法上,为此本文提出其建模的思路为:通过光滑目标表面几何建模结合粗糙面随机生成的方法,对表面粗糙目标进行交互式几何建模;然后,结合两者各自的剖分模型完成非均匀不稳定表面粗糙目标的几何建模.

以目前完全成熟和应用广泛的随机粗糙面理论为基础,把利用功率谱函数和采用蒙特卡罗方法模拟生成随机高斯粗糙面的环境建模方法作为出发点,提出非均匀不稳定表面粗糙目标的具体建模方式为:

(1) 表面光滑目标的几何建模是根据目标表面的几何结构,通过常用 CAD 造型软件生成目标表面,然后通过剖分软件(如 Hypermesh 软件)进行网格剖分,将目标的表面剖分成若干三角形面元(双线性四边形面元\NURBS 参数面元),从而获取目标表面造型的面元编号及相应坐标;

(2) 用随机生成的粗糙面元模型来模拟目标表面的粗糙度,通过随机粗糙面环境的建模方法来完成,生成与目标表面相对应的粗糙面元,不同之处是

它的作用区域与目标表面在坐标平面上的投影区域应保持一致;

(3) 由于目标表面粗糙度引起的表面起伏一般在其对应的光滑表面的法线方向. 因此,对于二维目标,粗糙面元退化为粗糙线元模型,它的作用区域是目标在两个坐标轴上的投影区域,此时,需在这两个投影区域上分别生成两条粗糙线元,即二维粗糙目标表面上某一点的坐标是其对应的光滑目标在该点坐标与两条粗糙线元坐标的叠加;对于三维目标,粗糙面元模型的作用区域是目标在三个坐标面上的投影区域,此时,需在这三个投影区域上分别生成三个粗糙面元,即三维粗糙目标表面上某一点的坐标是其对应光滑目标在该点坐标与三个粗糙面元坐标的叠加,具体方法通过数学上的映射投影和坐标变换来实现.

3 理论算法

3.1 物理光学法

物理光学(PO)法是求解高频 RCS 问题最常用的方法,它是用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为散射源,然后对表面感应电流积分而求得散射场. 在平面波入射的情况下,根据 Stratton-Chu 公式,物体表面远区散射场的一般计算公式为^[14]

$$E_s(r) = \frac{ik}{4\pi} \frac{e^{-ik_0 r}}{r} \int_S \hat{s} \times (\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') + \eta_0 \hat{s} \times \mathbf{J}_s(\mathbf{r}')) \exp[ik_0 \mathbf{r}' \cdot (\hat{s} - \hat{i}) ds'] \quad (1)$$

式中, \hat{i} 和 \hat{s} 是入射方向和观察方向的单位矢量, k_0 为自由空间波数, η_0 为波阻抗, S 为目标表面的照明区域,其具体参数定义如图4所示.

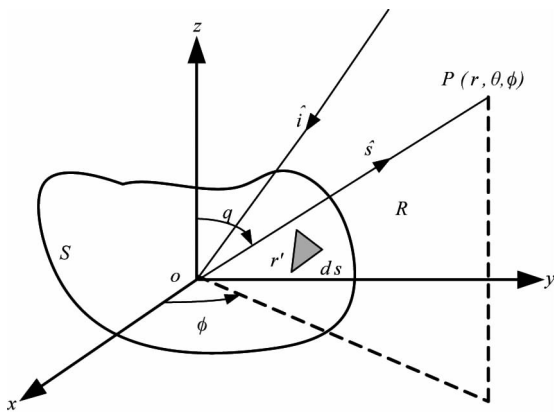


图4 电磁坐标示意图

Fig. 4 Coordinate system for EM scattering

$\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 表示 S 上的电流与磁流矢量幅

度,其中相位因子已被分离出来,并包含在指数项中. $\mathbf{J}_s(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{M}_s(\mathbf{r}')$ 在两个基本物理光学假定的条件下,根据等效原理

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') = \mathbf{E}(\mathbf{r}') \times \hat{n}, \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') = \hat{n} \times \mathbf{H}(\mathbf{r}') \quad (2)$$

式中, $\mathbf{E}(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{H}(\mathbf{r}')$ 是目标表面被照明部分的总电场和总磁场. 在物理光学近似的条件下,目标表面的总场可以认为是入射场和几何光学(GO)反射场之和,即

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}') = \mathbf{E}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{E}_r(\mathbf{r}'), \mathbf{H}(\mathbf{r}') = \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{H}_r(\mathbf{r}') \quad (3)$$

式中, $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}')$, $\mathbf{H}_i(\mathbf{r}')$ 和 $\mathbf{E}_r(\mathbf{r}')$, $\mathbf{H}_r(\mathbf{r}')$ 分别为入射场矢量和GO反射场矢量. 利用图4中定义的矢量表达

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_i(\mathbf{r}') &= E_{e\perp} \hat{e}_{\perp} + E_{e\parallel} \hat{e}_{\parallel}, \\ \mathbf{E}_r(\mathbf{r}') &= R_E E_{e\perp} \hat{e}_{\perp} + R_H E_{e\parallel} \hat{e}_{\parallel}, \\ \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') &= -E_{e\parallel} \hat{e}_{\perp} + E_{e\perp} \hat{e}_{\parallel}, \\ \mathbf{H}_r(\mathbf{r}') &= -R_H E_{e\parallel} \hat{e}_{\perp} + R_E E_{e\perp} \hat{e}_{\parallel} \end{aligned} \quad (4)$$

将式(4)代入到式(3)中,可得目标表面上被照明部分的总电场和总磁场

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}') &= \mathbf{E}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{E}_r(\mathbf{r}') \\ &= E_{e\perp} \hat{e}_{\perp} + E_{e\parallel} \hat{e}_{\parallel} + R_E E_{e\perp} \hat{e}_{\perp} + R_H E_{e\parallel} \hat{e}_{\parallel} \\ \mathbf{H}(\mathbf{r}') &= \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') + \mathbf{H}_r(\mathbf{r}') \\ &= -E_{e\parallel} \hat{e}_{\perp} + E_{e\perp} \hat{e}_{\parallel} - R_H E_{e\parallel} \hat{e}_{\perp} + R_E E_{e\perp} \hat{e}_{\parallel} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, R_H 为水平(TE)极化入射时目标表面的反射系数, R_E 为垂直(TM)极化入射时目标表面的反射系数,具体定义如图5所示.

对于理想导体目标而言,反射系数为

$$R_H = -1, R_E = 1 \quad (6)$$

所以,由式(2)、(3)可得被照明区域的表面电磁流分别为

$$\mathbf{M}_s(\mathbf{r}') = 0, \mathbf{J}_s(\mathbf{r}') = 2 \hat{n} \times \mathbf{H}_i(\mathbf{r}') \quad (7)$$

3.2 等效电流法

等效电流法(MEC)是处理劈边绕射贡献最好的方法之一. 为了进一步改进PO的结果,考虑目标的棱边绕射,Michaeli在分析了等效方法的基础上提出了等效电磁流的概念^[15],Michaeli认为边缘的绕射是边缘等效电磁流所致,通过将等效电磁流代入辐射积分可以计算任意方向的散射场. 其基本思想是:如果用一个辐射积分来计算任何有限电流或磁流分布的远区绕射场,则所得的远区场是有限的. 因此,只要能通过某种方法找到这种电流或磁流分布,就可以计算绕射射线焦散区的场.

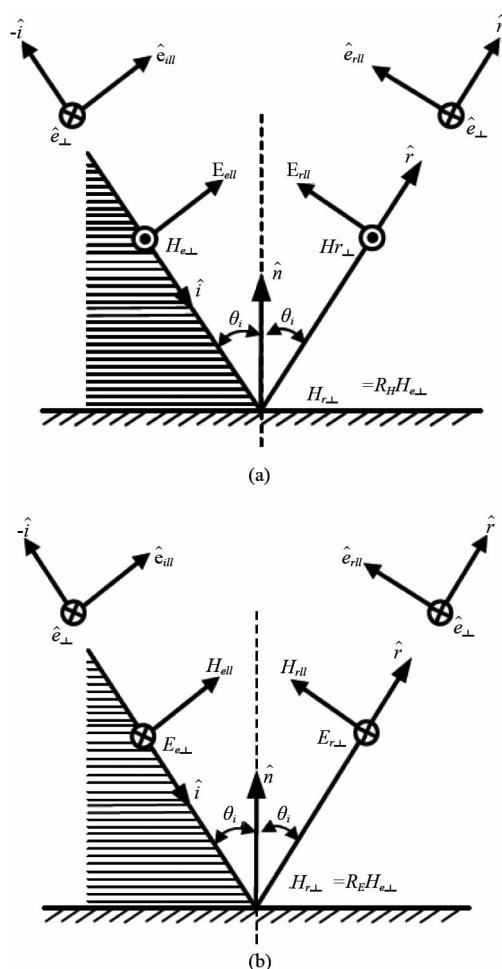


图5 电磁波反射时场分量和单位矢量的定义示意图 (a) 垂直极化(TM), (b) 水平极化(TE)

Fig. 5 The definition of the field component and unit component of electromagnetic wave reflection (a) vertical polarization(TM), and (b) horizontal polarization(TE)

对于物理光学和等效电流相结合的计算方法属于较为成熟的算法,相关的书籍^[16]已作了详细的推导,这里限于篇幅的原因不再进行重复介绍,读者可自行查阅。

4 算法验证

以金属立方体为例,验证算法的正确性,如图6所示.考虑频率 $f=9.375$ GHz的平面波沿着 $\theta_i=0^\circ \sim 90^\circ$ 、 $\varphi=90^\circ$ 的方向入射到一个边长为 $a=0.3$ m,轴线平行于 z 轴的金属立方体上。

图7(a)、(b)分别给出了该金属立方体在发射和接收均为水平极化以及发射和接收均为垂直极化情况下后向RCS随 θ_i 的变化曲线,图中同时给出了矩量法(MOM)和PO+MEC算法的计算结果.从图

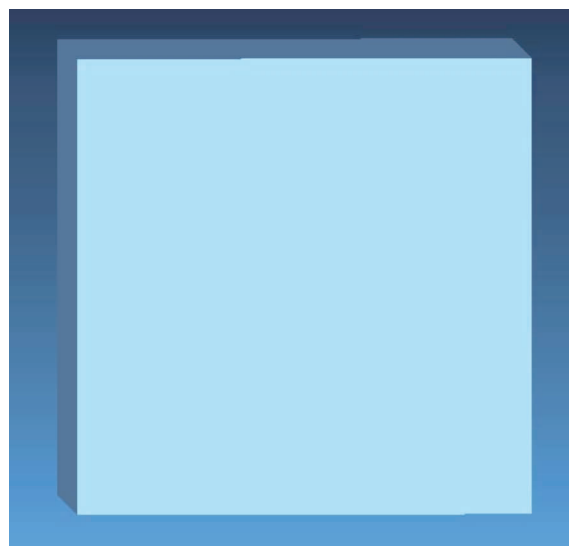


图6 金属立方体结构示意图
Fig. 6 The structure of metal cube

中可以看出,在考虑了边缘绕射影响的PO+MEC算法和传统数值算法(MOM)的计算结果吻合得很好,从而验证了算法的有效性和正确性。

5 仿真分析

5.1 模型仿真

根据前面提出的建模方法,首先对两个典型的目标进行几何建模,如图8和图9所示为一个正方体和正四面体模型,在微波频段为光滑的体目标,如图8(a)和图9(a)所示;但在太赫兹波段,则体现为非均匀不稳定表面粗糙目标,如图8(b)和图9(b)所示。

图8(b)和图9(b)中是采用随机高斯粗糙面来模拟实际目标的表面.而对于随机粗糙面的建模,其基本思想是在频域用功率谱对其进行滤波,再作逆快速傅里叶变换(IFFT)得到随机粗糙面的高低起伏.这样把随机粗糙面的建模理念应用到太赫兹波段非均匀不稳定表面粗糙目标的建模中,目标表面的粗糙度就不再是以往根据经验公式得到的具体数值^[13],而是像随机粗糙面一样,由2个主要参数即相关长度(l)和均方根高度(h)来决定;再结合常用CAD造型软件生成的光滑目标表面,就可以交互式生成任意非均匀不稳定表面粗糙目标的模型。

5.2 不同频率非均匀表面粗糙导体目标RCS比较

下面考虑一个高为1 m的正四面体,在微波频段频率为 $f=10$ GHz时的光滑表面与粗糙度为 $h=3$ mm, $l=30$ mm的表面粗糙目标的后向RCS比较,

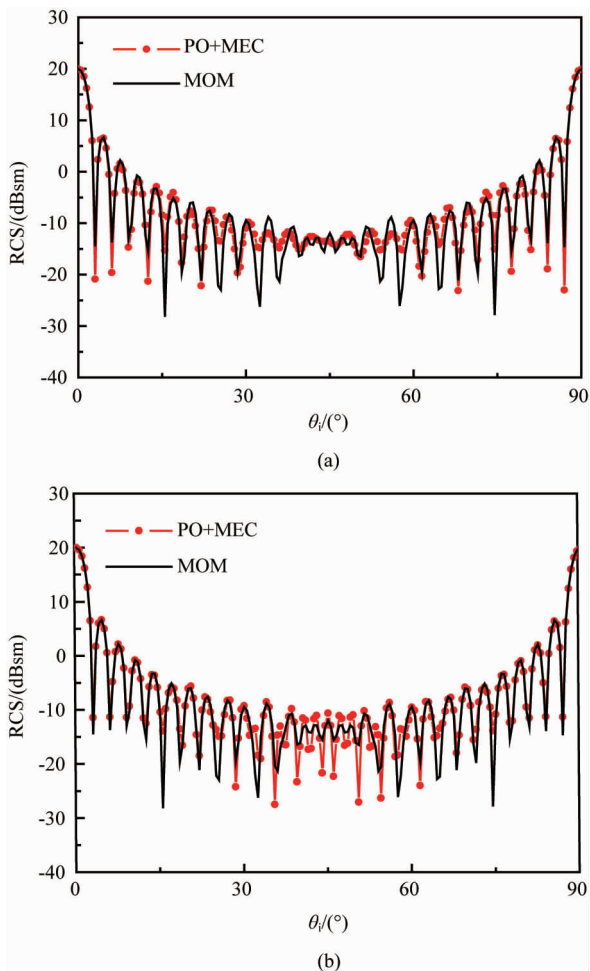


图 7 不同极化金属立方体后向 RCS 曲线 (a) 水平-水平极化, (b) 垂直-垂直极化
 Fig. 7 The metal cube of different polarization back RCS curve (a) Horizontal- Horizontal polarization, and (b) vertical- Vertical polarization

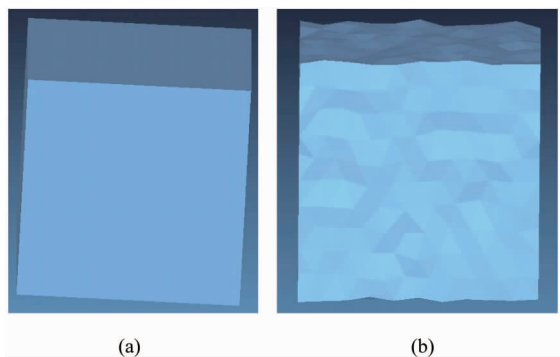


图 8 正方体模型 (a) 光滑目标, (b) 非均匀表面粗糙目标
 Fig. 8 Cube model (a) smooth target, and (b) non-uniform target of rough surface

如图 10 所示. 可以看出此时光滑目标和表面粗糙目标在曲线上波动不大, RCS 的值最多相差不超过

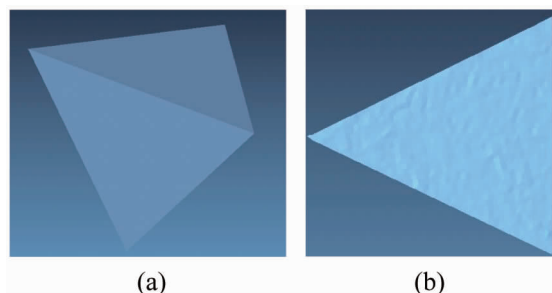


图 9 正四面体模型 (a) 光滑目标, (b) 非均匀表面粗糙目标
 Fig. 9 Tetrahedron model (a) smooth target, and (b) non-uniform target of rough surface

5 dB, 固在微波频段粗糙度对目标的 RCS 影响不大, 可以忽略.

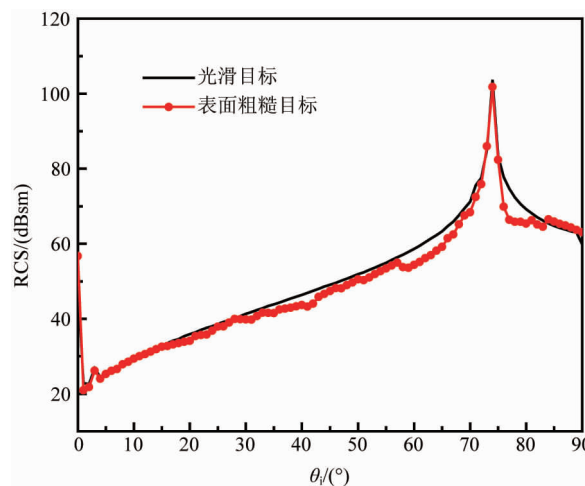


图 10 微波频段光滑目标与非均匀表面粗糙目标的后向 RCS 比较
 Fig. 10 Comparison of backscattered RCS between smooth target and non-uniform rough surface target

当频率升高到太赫兹波段, 考虑频率分别为 $f = 0.8 \text{ THz}; f = 1 \text{ THz}; f = 3 \text{ THz}; f = 6 \text{ THz}$ 时光滑表面目标与表面粗糙导体目标的后向 RCS 比较, 如图 11 所示. 从图中可以看出在太赫兹波段, 对于同一粗糙度 $h = 3 \text{ mm}, l = 30 \text{ mm}$, 随着频率的升高, 表面粗糙目标的 RCS 值下降得很明显, 在频率为 $f = 0.8 \text{ THz}; f = 1 \text{ THz}; f = 3 \text{ THz}; f = 6 \text{ THz}$ 时, RCS 值相对于在微波频段分别下降了约 30 dB、40 dB、60 dB、70 dB.

从以上两个算例可知, 在微波频段, 粗糙度对于导体目标 RCS 值的影响可以忽略. 但在太赫兹波段, 对于同一粗糙度下的表面粗糙目标, 随着频率的升高, 目标的后向 RCS 值相对于光滑表面目标下降

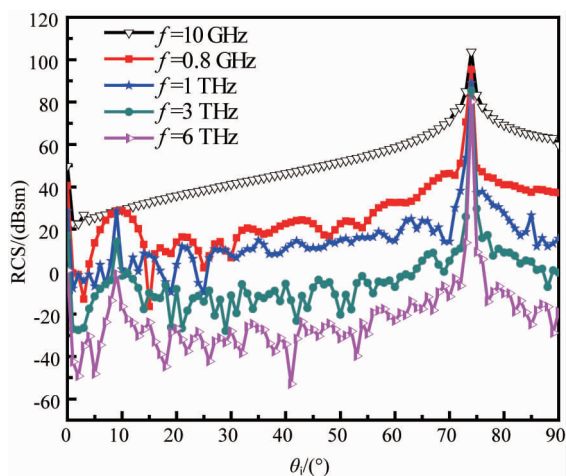


图 11 不同频率下非均匀表面粗糙导体目标的后向 RCS 比较

Fig. 11 Comparison of backscattered RCS of non-uniform rough surface target at different frequencies

得很明显;频率越高,RCS 值下降得越多,RCS 值的曲线波动越大,高低起伏也越大.固在太赫兹波段,粗糙度对导体目标的 RCS 影响相当明显,不可忽略.

5.3 不同粗糙度非均匀表面粗糙导体目标 RCS 比较

同样考虑上面的模型,一个高为 1m 的正四面体.在频率为 $f=3$ THz 时,粗糙度分别为 $h=3$ mm, $l=60$ mm; $h=3$ mm, $l=30$ mm; $h=9$ mm, $l=30$ mm 的情况下,其后向 RCS 值,如图 12 所示.

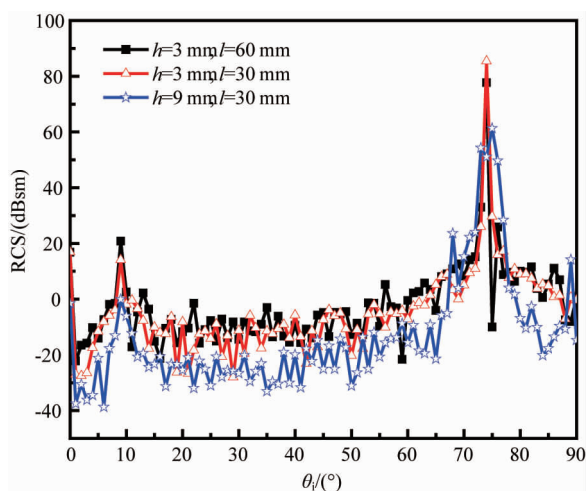


图 12 不同粗糙度下非均匀表面粗糙导体目标的后向 RCS 比较

Fig. 12 Comparison of backscattered RCS of non-uniform rough surface target at different roughness scales

从图中可以看出,在太赫兹波段,对于同一频率

不同粗糙度下的导体表面粗糙目标,随着粗糙度的增大,目标的 RCS 值总体呈逐渐下降的趋势.粗糙度越大,RCS 值的曲线波动越大,高低起伏也越大,而且 RCS 值的曲线变化也越复杂,说明随着目标表面粗糙度的变大,镜面反射变弱,散射范围扩大并增强.而不是如文献[13]中的均匀表面粗糙目标那样随着粗糙度的增大,目标的 RCS 值曲线只是相对的向下平移几个到十几个 dB.同时,从以上 RCS 值的曲线变化,也进一步说明了非均匀不稳定表面粗糙目标相对于均匀稳定表面粗糙目标,在太赫兹波段的散射特性呈现出更加复杂的变化趋势,不仅仅只是随着粗糙度的增大,其 RCS 值整体下降那么简单;而是随着入射角的不同,呈现出更为复杂的变化,在大部分角度下其 RCS 值是下降的,在某些角度其 RCS 值还有可能升高.这也验证了非均匀不稳定表面粗糙目标的不稳定性和随机性的特点.

5.4 典型非均匀表面粗糙目标在太赫兹波段的 RCS 仿真

F117“夜鹰”是美国空军在 20 世纪 80 年代装备的一种隐形战斗机,正是它掀起了军用飞机隐身化的浪潮.飞机整机长 20.1 m,机翼展 13.2 m,机身高度 3.8 m.如图 13 所示为飞机原型和用 CAD 造型软件生成飞机模型.

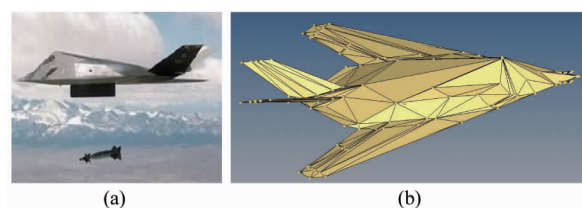


图 13 F117 飞机原型和模型示意图(a)F117 飞机原型,(b) F117 飞机 CAD 模型

Fig. 13 F117 and model (a) F117, and (b) CAD model of F117

5.4.1 同一粗糙度不同频率的 RCS 比较

下面考虑 F117 模型,在粗糙度为 $h=3$ mm, $l=30$ mm,频率分别为 $f=1$ THz; $f=4$ THz; $f=8$ THz 时,其后向 RCS 值曲线,如图 14 所示.从图中可以得出与前面同一粗糙度不同频率下表面粗糙目标的后向 RCS 值曲线相类似的结论;即在太赫兹波段,对于同一粗糙度下的非均匀不稳定表面粗糙目标,频率越高,目标的 RCS 值下降得越多,而且频率越高其 RCS 值的曲线波动越大,高低起伏也越大.

5.4.2 同一频率不同粗糙度的 RCS 比较

同样考虑上述 F117 模型,在频率为 $f=4$ THz,

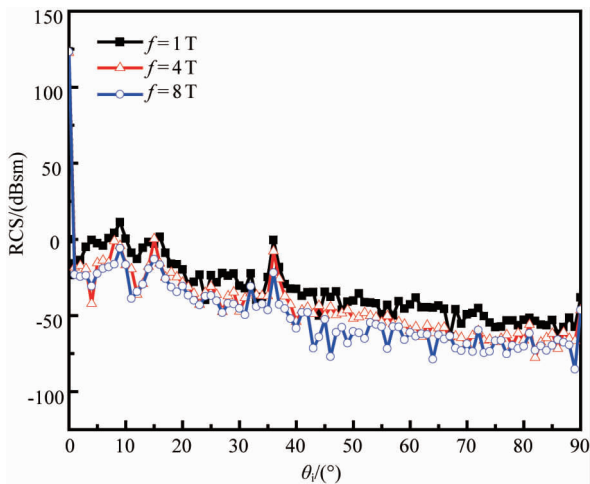


图 14 不同频率下 F117 飞机的后向 RCS 比较
Fig. 14 Comparison of backscattered RCS of F117 at different frequencies

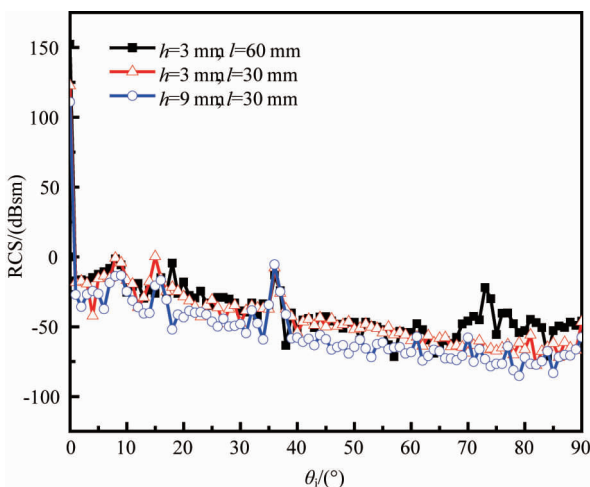


图 15 不同粗糙度下 F117 飞机的后向 RCS 比较
Fig. 15 Comparison of backscattered RCS of F117 at different roughness scales

粗糙度分别为 $h = 3 \text{ mm}$, $l = 60 \text{ mm}$; $h = 3 \text{ mm}$, $l = 30 \text{ mm}$; $h = 9 \text{ mm}$, $l = 30 \text{ mm}$ 时, 其 RCS 值曲线, 如图 15 所示. 从图中可进一步验证, 对于同一频率不同粗糙度下的非均匀不稳定表面粗糙目标的 RCS 变化特性. 即随着粗糙度的增大, 目标 RCS 值曲线呈下降的趋势, 但同时随着入射角的不同呈现出不同的变化趋势, 在大部分角度下其 RCS 值是下降的, 在某些角度其 RCS 值却可能升高.

6 结论

采用随机高斯粗糙面来模拟非均匀不稳定表面粗糙目标的粗糙表面, 通过调整均方根高度和相关

长度来改变目标表面的粗糙度, 依靠这种建模方法来体现这类目标在太赫兹波段下的非均匀性、不稳定性 and 随机性等特点. 再采用物理光学和等效电流相结合的方法进行仿真, 分别对不同入射角、不同频率和不同粗糙度下的不同非均匀不稳定表面粗糙目标的散射特性进行了分析, 得出如下结论:

(1) 提出目标由于受加工精度的影响或者目标高速运动, 在目标表面产生高温流体, 其表面粗糙度分布是非均匀和不稳定的, 具有随机性的特点. 在计算这类目标在太赫兹波段下表面粗糙度对散射特性的影响时, 不能像均匀表面粗糙目标那样简单的在光滑表面的反射系数上乘以一个粗糙度因子.

(2) 在太赫兹波段, 对导体目标的散射特性曲线与在微波频段的散射特性曲线其包络相似, 并具有红外朗伯体散射特性曲线呈余弦规律下降的趋势; 这表明在太赫兹波段下导体粗糙目标的散射特性中, 导体表面感应电流产生的电磁散射和导体表面引起的朗伯散射同时存在. 所以, 从定义上讲, 通常称“目标在太赫兹波段的电磁散射特性”这种说法是不准确的, 而只能称为“目标在太赫兹波段的散射特性”.

(3) 在太赫兹波段, 对于同一粗糙度的导体表面粗糙目标, 频率越高, 其 RCS 值下降得越多, 并且随着频率的升高, 其 RCS 值波动也越大; 对于同一频率不同粗糙度的导体表面粗糙目标, 随着粗糙度的增大, 其 RCS 值呈逐渐下降的趋势, 粗糙度越大, RCS 值波动越大, 且 RCS 值变化也越复杂, 散射范围也随之扩大.

(4) 表面粗糙度对目标散射特性的影响, 过去没有引起人们足够的重视, 但随着雷达工作频率的升高, 当目标表面粗糙的起伏尺寸与波长接近甚至超过波长时, 表面粗糙度对目标散射特性的影响将很明显, 表面粗糙度越大, 目标散射的回波功率也越大, 这对雷达目标探测与识别、遥感信息处理都具有重大的理论和现实意义.

References

- [1] Liu H B, Zhong H, Karpowicz N. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications [J]. *Proc. IEEE*, 2007, **95**(8): 1514–1527.
- [2] XU Jing-Zhou, ZHANG Xi-Cheng. *The science, technology and applications of terahertz* [M]. Beijing: Beijing University Press (许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用), 北京: 北京大学出版社, 2007: 5–20.
- [3] ZHANG Zhen-Wei, CUI Wei-Li, ZHANG Yan, et al. Terahertz Time-domain spectroscopy imaging [J]. *J. Infrared*

- Millim. Waves* (张振伟, 崔伟丽, 张岩, 等. 太赫兹成像技术的实验研究. *红外与毫米波学报*), 2006, **32**(3): 217-220.
- [4] Cooper K B, Dengler R J, Lombart N L. Penetrating 3-D imaging at 4 and 25 m rang using a submillimeter-Wave radar [J]. *IEEE Tanas on Microwave Theory and Techniques*. 2008, **56**(12): 2771-2778.
- [5] JIANG Ge, CHENG Bin-Bin, ZHANG Jian. 0.14THz radar imaging based Radar Cross Section measurement [J]. *Journal of Terahertz Scince and Electronic Information Technology* (江舸, 成彬彬, 张健. 基于 0.14THz 成像雷达的 RCS 测量. *太赫兹科学与电子信息学报*), 2014, **12**(1): 19-23.
- [6] YANG Hang, ZHAO Hong-Wei, ZHANG Jian-Bing, *et al.* The dehydration processes of biological tissues investigated by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *J. Infrared. Millim Waves* (杨航, 赵红卫, 张建兵, 等. 生物组织脱水过程的太赫兹时域光谱. *红外与毫米波学报*), 2014, **33**(3): 263-267.
- [7] XIONG Wei, YAO Jun, LI Wei, *et al.* THz transmission investigation of composed rectangular hole array [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (熊伟, 姚军, 李伟, 等. 复合型金属孔周期阵列的 THz 透射特性. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(1): 32-35.
- [8] WU Xue, ZHU Qiao-Fen, ZHANG Yan. Generation of arbitrary terahertz pulse in non-periodically poled lithium niobate [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (毋雪, 朱巧芬, 张岩. 基于非周期极化铌酸锂晶体产生任意频率太赫兹辐射. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(3): 221-223.
- [9] YANG Yang, YAO Jian-Quan, ZHANG Jing-Shui, *et al.* Terahertz scattering on rough copper surface [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (杨洋, 姚建铨, 张镜水, 等. 粗糙铜表面对低频太赫兹波的散射实验. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(1): 36-39.
- [10] Gente R, Jansen C, Robert G. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fibercoupled THz time-domain spectrometer [J]. *IEEE Trans. on Terahertz Science and Technology*. 2012, **2**(4): 424-431.
- [11] Li Z, Cui T J, Zhong X J. Electromagnetic scattering characteristics of PEC targets in the terahertz regime [J]. *IEEE Antennas Propagation Magazine*. 2009, **51**(1): 39-50.
- [12] LI Chun-Chun, DENG Bin, WANG Hong-Qiang, *et al.* Radar scattering characteristics of parabolic reflector antenna targets in terahertz [J]. *Laser & Infrared* (李纯纯, 邓斌, 王宏强, 等. 抛物面天线目标太赫兹雷达散射特性. *激光与红外*), 2013, **43**(6): 671-677.
- [13] JING Yue-Song, NIE Meng-Yao, ZHANG Chong-Hui, *et al.* Terahertz scattering property for the coated object of rough surface [J]. *ACTA PHYSICA SINICA* (江月松, 聂梦瑶, 张崇辉, 等. 粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究. *物理学报*), 2015, **64**: 024101.
- [14] Gordon W B. High frequency approximations to the physical optics scattering integral [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1994, **42**(3): 427-432.
- [15] Michaeli A. Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.* 1984 **32**(3): 252-258.
- [16] NIE Zai-Ping, FANG Da-Gang. *The electromagnetic scattering characteristics modeling of target and environment - theory, method and application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (聂在平, 方大纲. *目标与环境电磁散射特性建模-理论、方法与实现(基础篇)*, 北京: 国防工业出版社, 2009: 177-212.