

粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究

江月松 聂梦瑶 张崇辉 辛灿伟 华厚强

Terahertz scattering property for the coated object of rough surface

Jiang Yue-Song Nie Meng-Yao Zhang Chong-Hui Xin Can-Wei Hua Hou-Qiang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 024101 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.024101

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024101>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于双三角形金属条的二维可衍生超材料性能分析

Performance analysis of double incidence derivative metamaterial based on double-triangular structure

物理学报.2015, 64(3): 034101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.34101>

热防护层覆盖弹体目标雷达散射截面的修正的等效电流近似法和图形电磁学法分析

Modified equivalent current approximation and graphical electromagnetic computing method of analyzing radar cross section of missile target scatterer covered with thermal protection layer

物理学报.2014, 63(24): 244101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244101>

一种新型宽带定向性贴片天线设计

Design of a novel wideband directivity patch antenna

物理学报.2014, 63(24): 244102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.244102>

同轴交错圆盘加载波导慢波结构高频特性的研究

Dispersion characteristics of the coaxial interlaced disk-loaded waveguide slow-wave structure

物理学报.2014, 63(22): 224101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224101>

一种兼具宽带增益改善和宽带、宽角度低雷达散射截面的微带天线

A broad-band gain improvement and wide-band, wide-angle low radar cross section microstrip antenna

物理学报.2014, 63(22): 224102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.224102>

粗糙表面涂覆目标的太赫兹波散射特性研究

江月松 聂梦瑶[†] 张崇辉 辛灿伟 华厚强

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191)

(2014年6月13日收到; 2014年7月22日收到修改稿)

对具有涂覆层目标的太赫兹波段粗糙表面的散射特性进行了研究. 考虑到表面粗糙度的影响, 可先对反射系数进行修正, 再利用反射系数对等效电磁流进行修正, 得到粗糙涂覆表面的等效电磁流, 然后在物理光学方程的基础上得到粗糙表面涂覆目标的雷达散射截面; 最后进行图形电磁学可视化计算, 并采用 Visual C++ 对模型进行 OpenGL 显示, 提取像素面元的有效信息对所得理论进行了仿真分析, 研究了不同入射角度、不同频率、不同介质、不同粗糙度和不同涂层厚度下的太赫兹波电磁散射特性, 得到了一些有参考价值的结论.

关键词: 太赫兹, 雷达散射截面, 粗糙度, 涂覆介质**PACS:** 41.20.Jb, 42.68.Mj**DOI:** 10.7498/aps.64.024101

1 引言

太赫兹雷达具有优良的特性^[1]——较微波雷达有更高的空间分辨率和角分辨率, 较激光雷达具有适中的搜索能力和覆盖范围, 因而, 太赫兹雷达在太空目标探测等方面具有广泛而诱人的应用前景. 太赫兹波目标散射特性是太赫兹雷达探测和成像应用的物理基础, 同时也是太赫兹雷达系统进行链路设计、特征提取以及成像算法的重要依据. 因而, 对于太赫兹波段的目标散射特性的研究具有重大的意义. 常见的目标散射特性研究主要是在微波波段^[2-8], 并且大多是针对于金属目标^[2,3]或光滑表面涂覆目标^[3-7], 本文将其扩展到太赫兹波段, 并综合考虑了涂覆介质以及粗糙表面的情况, 采取等效电流近似, 使用物理光学(PO)和图形电磁学(GRECO)相结合的方法, 研究了粗糙表面涂覆目标的散射特性, 并且对于不同入射角、不同频率、不同涂覆介质、不同粗糙度和不同涂层厚度的情况下, 分别进行了粗糙表面涂覆目标雷达散射截面(RCS)的仿真计算和比较分析.

2 粗糙表面的等效电流近似

2.1 粗糙表面反射系数

在 0.1—3 THz 内, 根据测量和计算, 对于粗糙表面和光滑表面的反射系数有如下关系^[9]:

$$R_{\text{rough}}(f) = R_{\text{smooth}}(f) e^{-(4\pi\sigma_h f/c)^2}, \quad (1)$$

其中, σ_h 为粗糙度, f 为频率, 光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

将其转换为波长 λ 的关系, 可得到

$$R_{\text{rough}} = R_{\text{smooth}} e^{-(4\pi\sigma_h/\lambda)^2}. \quad (2)$$

而对于光滑表面时, 涂覆目标的 TE 波反射系数 R_{TE} 和 TM 波反射系数 R_{TM} 为^[7]

$$R_{\text{TE}} = \frac{Z_{\text{TE}} \cos \theta_i - 1}{Z_{\text{TE}} \cos \theta_i + 1}, \quad (3)$$

$$R_{\text{TM}} = \frac{Z_{\text{TM}} - \cos \theta_i}{Z_{\text{TM}} + \cos \theta_i}, \quad (4)$$

其中,

$$Z_{\text{TE}} = j \frac{\sqrt{\mu_{11}^r \mu_{33}^r}}{\sqrt{\mu_{33}^r \epsilon_{22}^r - \sin^2 \theta_i}}$$

[†] 通信作者. E-mail: nmynol@163.com

$$\times \tan(kd\sqrt{\mu_{11}^r \varepsilon_{22}^r - \mu_{11}^r \sin^2 \theta_i / \mu_{33}^r}), \quad (5)$$

$$Z_{\text{TM}} = j \frac{\sqrt{\mu_{22}^r \varepsilon_{33}^r - \sin^2 \theta_i}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^r \varepsilon_{33}^r}} \times \tan(kd\sqrt{\mu_{22}^r \varepsilon_{11}^r - \varepsilon_{11}^r \sin^2 \theta_i / \varepsilon_{33}^r}), \quad (6)$$

其中, k 为波数, θ_i 为入射角, d 为涂层厚度. 涂层介质的介电常数和磁导率为

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \text{diag}[\varepsilon_{11}^r, \varepsilon_{22}^r, \varepsilon_{33}^r],$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \text{diag}[\mu_{11}^r, \mu_{22}^r, \mu_{33}^r],$$

且对于各向同性材料来说, $\varepsilon_{11}^r = \varepsilon_{22}^r = \varepsilon_{33}^r$, $\mu_{11}^r = \mu_{22}^r = \mu_{33}^r$.

则结合 (1), (3) 和 (4) 式, 可得到粗糙涂层表面的反射系数:

$$R'_{\text{TE}} = \frac{(Z_{\text{TE}} \cos \theta_i - 1)}{(Z_{\text{TE}} \cos \theta_i + 1)} e^{-(4\pi\sigma_h f/c)^2}, \quad (7)$$

$$R'_{\text{TM}} = \frac{(Z_{\text{TM}} - \cos \theta_i)}{(Z_{\text{TM}} + \cos \theta_i)} e^{-(4\pi\sigma_h f/c)^2}. \quad (8)$$

$$\begin{cases} J_s = \hat{n} \times H^{\text{tot}}|_S = \frac{1}{\eta} \{ E_{\text{TE}}^i \cos \theta_i (1 - R_{\text{TE}}) \hat{e}_{\text{TE}} + E_{\text{TM}}^i (1 - R_{\text{TM}}) (\hat{n} \times \hat{e}_{\text{TE}}) \}|_S, \\ J_{\text{ms}} = -\hat{n} \times E^{\text{tot}}|_S = \{ E_{\text{TE}}^i (1 + R_{\text{TE}}) (\hat{e}_{\text{TE}} \times \hat{n}) + E_{\text{TM}}^i \cos \theta_i (1 + R_{\text{TM}}) \hat{e}_{\text{TE}} \}|_S, \end{cases} \quad (9)$$

其中, η 为固有阻抗.

同理, 可以用粗糙表面的反射系数得到粗糙表面的等效电磁流密度:

$$\begin{cases} J'_s = \hat{n} \times H^{\text{tot}}|_S = \frac{1}{\eta} \{ E_{\text{TE}}^i \cos \theta_i (1 - R'_{\text{TE}}) \hat{e}_{\text{TE}} + E_{\text{TM}}^i (1 - R'_{\text{TM}}) (\hat{n} \times \hat{e}_{\text{TE}}) \}|_S, \\ J'_{\text{ms}} = -\hat{n} \times E^{\text{tot}}|_S = E_{\text{TE}}^i (1 + R'_{\text{TE}}) (\hat{e}_{\text{TE}} \times \hat{n}) + E_{\text{TM}}^i \cos \theta_i (1 + R'_{\text{TM}}) \hat{e}_{\text{TE}}|_S. \end{cases} \quad (10)$$

3 粗糙表面涂层目标 RCS

3.1 粗糙表面涂层目标 RCS

根据物理光学涂层目标的远场散射场方程 [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_s(\mathbf{r}) = & -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \iint_S \left\{ \eta [\mathbf{J}_s - (\mathbf{J}_s \cdot \hat{s}) \hat{s}] \right. \\ & \left. + \mathbf{J}_{\text{ms}} \times \hat{s} \right\} e^{jk\hat{s} \cdot \hat{r}'} d\mathbf{s}', \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $\mathbf{r}$ 表示散射体上的积分点到原点的径向矢量, $\hat{s} = \hat{r}$ 为从原点到远场点的单位径向向量, 具体形式为

$$\begin{aligned} \hat{s} = \hat{r} = \mathbf{r}/r \\ = \hat{x} \sin \theta_s \cos \varphi_s + \hat{y} \sin \theta_s \sin \varphi_s + \hat{z} \cos \varphi_s. \end{aligned}$$

2.2 粗糙表面的等效电磁流密度

对于表面涂层介质的雷达散射目标, 可以利用反射系数来修正表面电磁流密度, 进而利用物理光学散射表达式来求解散射场. 光滑表面的散射场中各矢量关系如图 1 所示, $\hat{k}^i$ 表示单位入射方向, $\hat{k}^s$ 表示单位散射方向, θ_i 为入射角, $\hat{n}$ 为表面法向量, d 为涂层厚度, $\hat{e}_{\text{TE}}$ 和 $\hat{e}_{\text{TM}}$ 分别是入射电场的 TE 分量和 TM 分量方向的单位矢量.

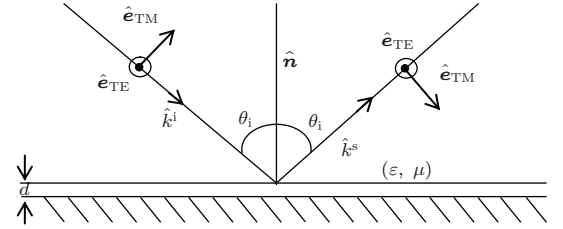


图 1 介质涂层表面的散射各向量的关系

根据 TE 场的反射系数 R_{TE} 和 TM 场的反射系数 R_{TM} , 可得到光滑接触面上的等效电磁流密度 [5,6]:

相应地, 可得到粗糙表面涂层目标的远场散射场方程:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}'_s(\mathbf{r}) = & -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \iint_S \left\{ \eta [\mathbf{J}'_s - (\mathbf{J}'_s \cdot \hat{s}) \hat{s}] \right. \\ & \left. + \mathbf{J}'_{\text{ms}} \times \hat{s} \right\} e^{jk\hat{s} \cdot \hat{r}'} d\mathbf{s}'. \end{aligned} \quad (12)$$

结合上面的分析和计算, 将 (11) 代入 (12) 式中, 可得到

$$\mathbf{E}'_s(\mathbf{r}) = -\frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \iint_S A e^{-jk(\hat{k}_i - \hat{s}) \cdot \hat{r}'} d\mathbf{s}', \quad (13)$$

其中,

$$A = \left\{ \hat{e}_{\text{TE}} \left[\hat{e}_{\text{TM}} (\hat{n} \times \hat{e}_{\text{TE}}) (1 + R'_{\text{TM}}) E_{\text{TM}}^i \right] \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + (\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \times \hat{\mathbf{n}})(1 + R'_{\text{TE}})E_{\text{TE}}^i \} \times \hat{\mathbf{s}} \\
& + \left\{ E_{\text{TE}}^i \left[\hat{\mathbf{e}}_{\text{TM}}(\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}})(1 - R'_{\text{TE}})\hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}} \right] \right. \\
& \left. + E_{\text{TM}}^i(1 - R'_{\text{TM}})(\hat{\mathbf{n}} \times \hat{\mathbf{e}}_{\text{TE}}) \right\} \times \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{s}}. \quad (14)
\end{aligned}$$

根据雷达散射截面的定义, 有^[10]

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E^i|^2}, \quad (15)$$

其中, E^i 是照射到目标处的入射波电场强度, E_s 是雷达所在处散射波的电场强度, R 是雷达和目标间的距离.

然而只有在接收天线电场极化方向 $\hat{\mathbf{e}}_r$ 上的分量被雷达接收, 则(15)式可写为

$$\sqrt{\sigma} = \lim_{R \rightarrow \infty} 2\sqrt{\pi} R \frac{E_s \cdot \hat{\mathbf{e}}_r}{E_0} e^{jkR}. \quad (16)$$

3.2 可视化图形电磁学 RCS 计算

在物理光学近似中, 只有被雷达照射的那部分目标对雷达散射截面有贡献, 因而需要将雷达“看不见”的部分消隐, 图形电磁学中采用 Z 缓存 (Z-Buffer) 隐面消除算法^[11], 通过对视区所有像素点进行深度值的比较处理, 得到可视点, 进而得到可视点的 RGB (red-green-blue) 值^[4,12].

为了求解目标的电磁散射场, 需要在所显示的图像上提取目标面的法矢量信息. 图形电磁学采用二次成像的方法, 得到目标面上每一像素点对应的法矢量 $(\mathbf{n}_x, \mathbf{n}_y, \mathbf{n}_z)$.

对于目标是导体情况下, z 轴为入射方向, 可由物理光学远场散射场的表达式和雷达散射截面的定义直接得到^[12]:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{s1} (\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{n}}) e^{2jkz} ds \right|^2. \quad (17)$$

运用图形电磁学进行可视化计算, (17)式可写为^[12]

$$\begin{aligned}
\sigma &= \frac{k^2}{\pi} \left(\frac{l_p}{m} \right)^4 \left| \sum_{\text{pixels}} \cos \theta_i \right. \\
&\quad \left. \times \text{sinc} \left[\frac{kl_p \sin \theta_i}{m \cos \theta_i} \right] e^{2jkz} \right|^2, \quad (18)
\end{aligned}$$

其中, $\cos \theta_i = \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{n}}$, l_p 为屏幕坐标系下的像素边长, m 是用户坐标系与屏幕坐标系的比例常数.

结合导体目标的 RCS 可视化计算方法, 结合(18)式对涂覆目标 RCS 进行可视化计算, 同理可

得到其单站 RCS 表达式. 当水平发射水平接收时, 为^[12]

$$\begin{aligned}
\sigma_{\text{HH}} &= \frac{k^2}{\pi} \left(\frac{l_p}{m} \right)^4 \left| \sum_{\text{pixels}} \left[\frac{R_{\text{TM}} \mathbf{n}_x^2 - R_{\text{TE}} \mathbf{n}_y^2}{\mathbf{n}_x^2 + \mathbf{n}_y^2} \right] \right. \\
&\quad \left. \times \cos \theta_i \cdot \text{sinc} \left[\frac{kl_p \sin \theta_i}{m \cos \theta_i} \right] e^{2jkz} \right|^2. \quad (19)
\end{aligned}$$

则粗糙表面的涂覆目标 RCS 为

$$\begin{aligned}
\sigma'_{\text{HH}} &= \frac{k^2}{\pi} \left(\frac{l_p}{m} \right)^4 \left| \sum_{\text{pixels}} \left[\frac{R'_{\text{TM}} \mathbf{n}_x^2 - R'_{\text{TE}} \mathbf{n}_y^2}{\mathbf{n}_x^2 + \mathbf{n}_y^2} \right] \right. \\
&\quad \left. \times \cos \theta_i \cdot \text{sinc} \left[\frac{kl_p \sin \theta_i}{m \cos \theta_i} \right] e^{2jkz} \right|^2. \quad (20)
\end{aligned}$$

由(19)和(20)式, 可得到粗糙表面的 RCS 与光滑表面的 RCS 的关系如下:

$$\sigma' = e^{-2(4\pi\sigma_h/\lambda)^2} \sigma, \quad (21)$$

其中, σ' 是考虑目标粗糙度影响后的雷达散射截面, σ 是未考虑表面粗糙度影响时的雷达散射截面.

则当垂直发射垂直接收时, 粗糙表面的 RCS 为

$$\begin{aligned}
\sigma'_{\text{VV}} &= \frac{k^2}{\pi} \left(\frac{l_p}{m} \right)^4 e^{-2(4\pi\sigma_h/\lambda)^2} \\
&\quad \times \left| \sum_{\text{pixels}} \left[\frac{R'_{\text{TM}} \mathbf{n}_y^2 - R'_{\text{TE}} \mathbf{n}_x^2}{\mathbf{n}_x^2 + \mathbf{n}_y^2} \right] \right. \\
&\quad \left. \times \cos \theta_i \cdot \text{sinc} \left[\frac{kl_p \sin \theta_i}{m \cos \theta_i} \right] e^{2jkz} \right|^2. \quad (22)
\end{aligned}$$

当水平发射垂直接收或垂直发射水平接收时, 粗糙表面的 RCS 为

$$\begin{aligned}
\sigma'_{\text{HV}} &= \sigma'_{\text{VH}} \\
&= \frac{k^2}{\pi} \left(\frac{l_p}{m} \right)^4 e^{-2(4\pi\sigma_h/\lambda)^2} \\
&\quad \times \left| \sum_{\text{pixels}} \left[\frac{(R_{\text{TM}} + R_{\text{TE}}) \mathbf{n}_x \mathbf{n}_y}{\mathbf{n}_x^2 + \mathbf{n}_y^2} \right] \right. \\
&\quad \left. \times \cos \theta_i \cdot \text{sinc} \left[\frac{kl_p \sin \theta_i}{m \cos \theta_i} \right] e^{2jkz} \right|^2. \quad (23)
\end{aligned}$$

4 仿真与分析

先运用 HyperMesh11.0 对模型进行网格划分, 再运用 Visual C++ 对模型进行 OpenGL 显示, 提取像素面元的法矢量和深度缓存信息, 运用前面所得的结论进行仿真运算.

先通过下面的例子来验证程序的可靠性. 考虑一个直径为 9 cm, 长度为 12 cm 的圆柱, 且涂层的

介电常数为 $\varepsilon = 4 - 1.5j$, 磁导率为 $\mu = 2 - j$, 涂层厚度为 0.04λ , 在 $f = 10 \text{ GHz}$ 情况下的RCS值如图2所示.

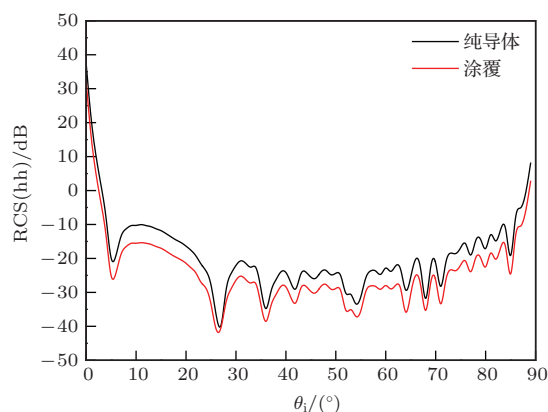


图2 (网刊彩色) 纯导体以及涂覆圆柱的RCS (10 GHz)

图2所示结果和文献[13]中的结果基本相符, 涂覆后的目标RCS值下降了约5 dB. 通过此例, 验证了程序的可靠性, 以方便后面的仿真分析.

4.1 不同频率下粗糙表面涂覆目标RCS比较

根据上面得到的理论结果, 可知在微波波段时, 在 $1-100 \mu\text{m}$ 之间的粗糙度远小于入射波长, 此时, 粗糙度对RCS的影响可忽略, 这一点在下面的例子中也得到了证实.

下面考虑一个直径为3 mm, 长度为4 mm的圆柱, 且涂层的介电常数为 $\varepsilon = 4 - 1.5j$, 磁导率为 $\mu = 2 - j$, 涂层厚度为 0.04λ , 分别在 $f = 100 \text{ GHz}$, $f = 1.0 \text{ THz}$ 和 $f = 3.0 \text{ THz}$ 情况下的光滑表面和粗糙表面涂覆目标RCS的比较, 如图3所示. 这里需要注意的是, 由于本文主要讨论的是粗糙度的影响, 所以, 对于涂覆介质的特性参数, 我们假定它在一定频率下是保持不变的.

从图3中可以看到, 频率为100 GHz时, 光滑表面和粗糙度为 $50 \mu\text{m}$ 的目标RCS值基本一致, 即此时粗糙度对于RCS值的影响可忽略不计; 但频率为1.0 THz时, 粗糙度为 $50 \mu\text{m}$ 的RCS值比光滑目标低了约5 dB; 频率为3.0 THz时, 粗糙度为 $50 \mu\text{m}$ 的RCS值比光滑目标低了约30 dB. 故在太赫兹波段, 粗糙度对RCS的影响不可忽略, 并且随着频率的增大, 粗糙度对RCS的影响也越明显.

分别在 $f = 0.3, 1.0, 3.0 \text{ THz}$ 时, 粗糙表面涂

覆目标RCS变化情况如图4所示.

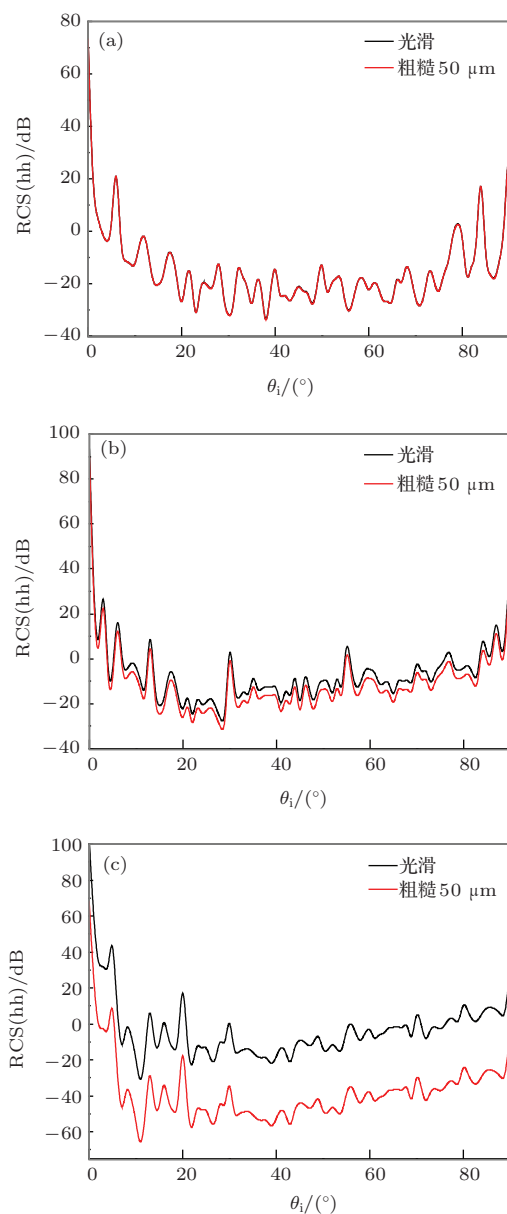


图3 (网刊彩色) 粗糙表面与光滑表面的涂覆圆柱RCS
(a) $f = 100 \text{ GHz}$; (b) $f = 1.0 \text{ THz}$; (c) $f = 3.0 \text{ THz}$

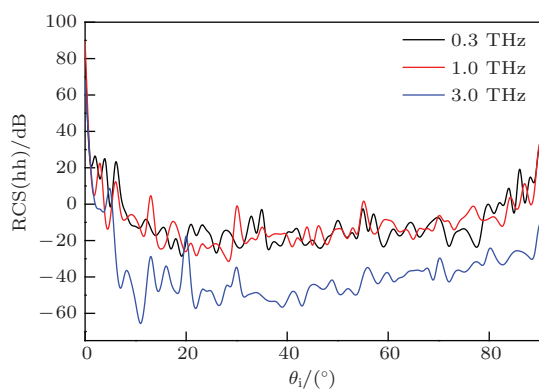


图4 (网刊彩色) 不同频率下的粗糙表面涂覆圆柱RCS ($50 \mu\text{m}$)

由上面的算例可知, 对于粗糙表面涂覆目标, 在微波波段, 粗糙度对 RCS 的影响可忽略, 但在太赫兹波段, 在相同粗糙度下, 随着频率的增大, 粗糙表面 RCS 相对于光滑表面 RCS 值下降得越多, 即同一粗糙度对 RCS 的影响越明显.

4.2 太赫兹波段粗糙表面各向异性介质涂覆目标的 RCS

前面的示例都为各向同性材料涂覆下的计算结果, 下面考虑涂覆各向异性介质的情况下, 太赫兹波段 RCS 值的变化. 采用的介质参数如下 [7]:

$$\mu = \begin{bmatrix} 2.24 - 1.68j & & \\ & 3.5 - 1.6j & \\ & & 3.5 - 1.6j \end{bmatrix},$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 10 - 2j & & \\ & 10 - 2j & \\ & & 29.39 - 0.94j \end{bmatrix}.$$

采用与前面相同的圆柱模型, 涂层厚度为 0.04λ , 在 $f = 1.0$ THz 情况下的 RCS 如图 5 所示.

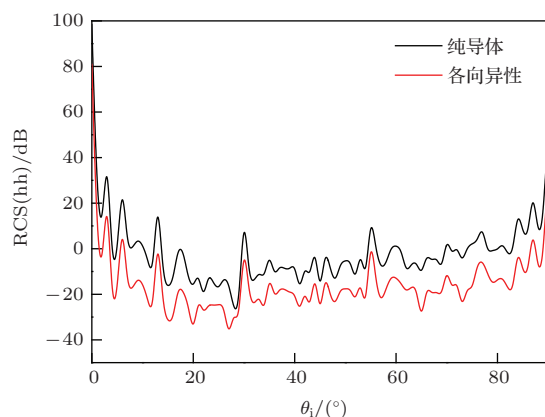


图5 (网刊彩色) 纯导体以及涂覆各向异性介质圆柱的 RCS (1.0 THz)

在涂覆各向异性介质的基础上, 考虑粗糙度的影响, 仍然可得到前面所得的结论, 即太赫兹波段粗糙度的影响不可忽略. 如图 6 所示, 在 $f = 1.0$ THz 时, 粗糙度为 $50 \mu\text{m}$ 的涂覆目标比光滑表面目标的 RCS 值下降了 4 dB 左右.

由前面的算例可知, 在 1.0 THz 时, 虽然涂覆介质有所不同, 但涂覆目标 RCS 相比纯导体的 RCS 值均有一定的下降, 涂覆目标 RCS 与涂覆

介质的特性参数相关.

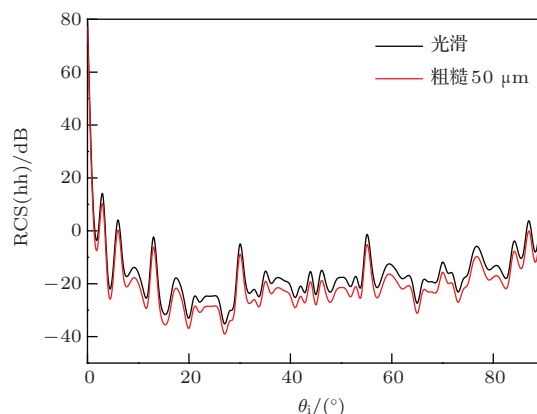


图6 (网刊彩色) 光滑表面涂覆各向异性介质圆柱与粗糙表面的 RCS (1.0 THz)

4.3 太赫兹波段不同粗糙度下的 RCS

考虑一个底面直径为 3 mm, 顶面直径为 0.1 mm, 高 4 mm 的锥台, 其顶部连接一个直径为 0.1 mm 的半球, 此复合体的顶部如图 7 所示. 涂覆介质参数为 $\varepsilon = 4 - 1.5j$, $\mu = 2 - j$ 时, 当粗糙度分别为 30, 50, 70 μm 的情况下, 太赫兹波段 RCS 值如图 8 所示.

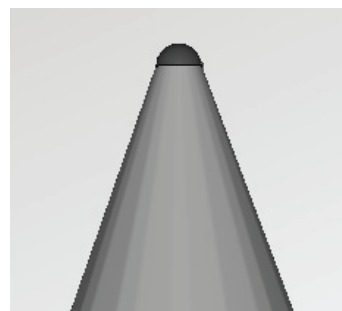


图7 复合模型的顶部结构图

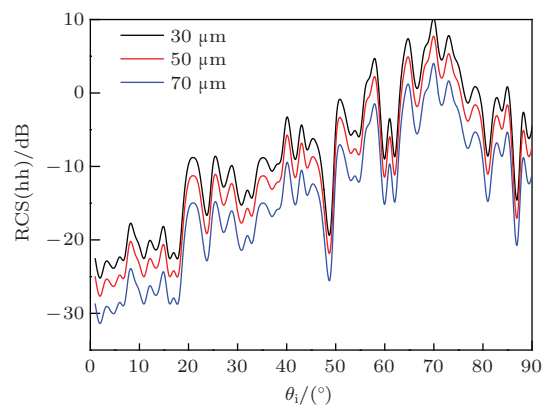


图8 (网刊彩色) 涂覆各向同性介质复合体不同粗糙度下的 RCS (1.0 THz)

同样地, 对于涂覆各向异性介质的复合体目标在不同粗糙度下的 RCS 如图 9 所示, 各向异性介质的参数和前面所提到的一致.

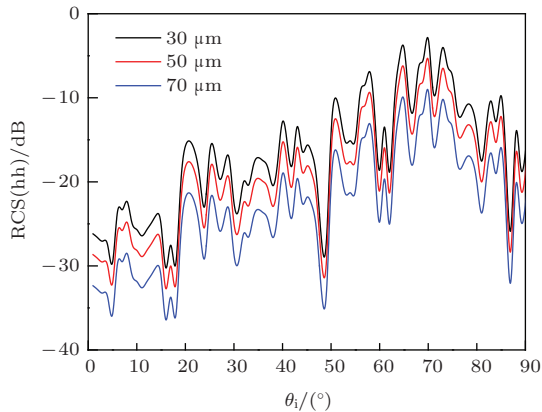


图 9 (网刊彩色) 涂覆各向异性介质复合体不同粗糙度下的 RCS (1.0 THz)

由图 8 和图 9 可知, 对于处在相同涂覆条件下的目标来说, 在 1.0 THz 时, 随着粗糙度的增大, 其 RCS 值均在不断变小, 即粗糙度越大, 对 RCS 的影响越大.

4.4 太赫兹波段不同涂层厚度下的 RCS 比较

根据先前推导的理论结果, 可以知道涂覆目标的 RCS 与涂层厚度也有一定的关系. 下面考虑在不同涂层厚度的情况下, 涂覆圆柱体的 RCS 变化, 如图 10 所示.

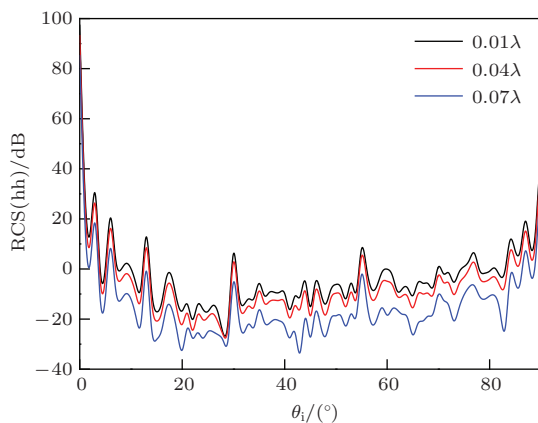


图 10 (网刊彩色) 涂覆圆柱体不同涂层厚度下的 RCS (1.0 THz)

由图 10 可看出, 涂层厚度为 0.04λ 的 RCS 值相对于 0.01λ 的 RCS 值下降了约 4 dB, 涂层厚度为 0.07λ 的 RCS 值相对于 0.04λ 的 RCS 值下降了约

8 dB, 即随着涂层厚度的增大, RCS 值不断降低.

5 结 论

本文对于太赫兹波段粗糙表面涂覆目标的雷达散射特性进行了研究. 在已有的涂覆目标散射特性研究的基础上引入了粗糙度对 RCS 的影响, 得到了太赫兹波段粗糙表面涂覆目标的 RCS 方程, 并得到了粗糙表面 RCS 与光滑表面 RCS 之间的关系. 结合 GRECO 方法, 运用 Visual C++ 对模型进行显示, 提取像素面元的信息对结论进行了仿真分析, 并从不同入射角、不同频率观察了太赫兹波段粗糙表面涂覆目标 RCS 的变化情况, 讨论了不同介质、不同粗糙度和不同涂层厚度情况下太赫兹波段的 RCS, 得到了以下一些结论:

- 1) 在微波频段, 由于波长远大于 $1\text{--}100\ \mu\text{m}$ 之内的粗糙度, 所以粗糙度的影响可基本忽略, 但在太赫兹波段, 波长与粗糙度相当, 需要考虑粗糙度的影响;
- 2) 在太赫兹波段不同频率下, 频率越高, 同一粗糙度对目标 RCS 的影响越大;
- 3) 对于不同的涂覆材料, 在相同涂层厚度时, 涂覆目标的 RCS 均低于纯导体目标 RCS, 且 RCS 与其特性参数相关;
- 4) 在同一频率、相同涂覆条件下, 粗糙度越大, 目标 RCS 值越小;
- 5) 在同一频率和相同涂覆介质情况下, 随着涂层厚度增加, 目标 RCS 值越小.

参考文献

- [1] Feng W, Zhang R, Cao J C 2013 *Physics* **42** 846 (in Chinese) [冯伟, 张戎, 曹俊诚 2013 物理 **42** 846]
- [2] Kolbehdari M A 1994 *Microwaves, Antennas and Propagation* **141** 536
- [3] Wang L, Zhong Y C, Zhang K Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234101 (in Chinese) [王龙, 钟易成, 张堃元 2012 物理学报 **61** 234101]
- [4] Li X F, Xie Y J, Wang P, Yang R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2930 (in Chinese) [李晓峰, 谢拥军, 王鹏, 杨锐 2008 物理学报 **57** 2930]
- [5] Meana J G, Martinez-Lorenzo J A, Las-Heras F 2011 *Electromagnetic Waves Propagation in Complex Matter* (Rijeka: InTech) p207
- [6] Meana J G, Martinez-Lorenzo J A, Las-Heras F, Rapaport C 2010 *Antennas and Propagation* **58** 3757

- [7] Yin H C, Huang P K, Liu X G, Guo H P 2003 *J. Syst. Engineer. Electron.* **14** 1
- [8] Wang A Q, Guo L X, Chai C 2011 *Chin. Phys. B* **20** 050202
- [9] Herrmann M, Wiegand C, Jonuscheit J, Beigang R 2009 *Infrared, Millimeter, Terahertz Waves* Busan, September 21–25 2009 p1
- [10] Yang H H, Cao X Y, Gao J, Liu T, Li S J, Zhao Y, Yuan Z D, Zhang H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214101 (in Chinese) [杨欢欢, 曹祥玉, 高军, 刘涛, 李思佳, 赵一, 袁子东, 张浩 2013 物理学报 **62** 214101]
- [11] Booth K S, Forsey D R, Paeth A W 1986 *Comput. Graph. Appl.* **6** 31
- [12] Rius J M, Ferrando M, Jofre L 1993 *Trans. Antenn. Propag.* **41** 1308
- [13] Lü D, Tong C M, Gao Y, Su M 2008 *Syst. Engineer. Electron.* **30** 1024 (in Chinese) [吕丹, 童创明, 高阳, 苏敏 2008 系统工程与电子技术 **30** 1024]

Terahertz scattering property for the coated object of rough surface

Jiang Yue-Song Nie Meng-Yao[†] Zhang Chong-Hui Xin Can-Wei Hua Hou-Qiang

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 13 June 2014; revised manuscript received 22 July 2014)

Abstract

The scattering of the radar signal by the coated target of a rough surface in the terahertz wave is studied. Considering the roughness of the surface, reflection coefficient is modified for the rough surface. The modified equivalent current can be obtained by using the reflection coefficient. Then using the modified equivalent current and the physical optics solution, the radar cross section of the coated object with the rough surface is obtained. And combining the graphical electromagnetic computing method, simulations to validate the formulation are performed. Numerical results for several coated bodies such as cylinder and cone-sphere geometry are given and discussed from different angles of incidence, different frequencies, different materials, different roughness values, and different coating thickness values.

Keywords: terahertz, radar cross section, roughness, coating

PACS: 41.20.Jb, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.64.024101

[†] Corresponding author. E-mail: nmyno1@163.com