

高斯光圆柱太赫兹雷达散射截面的影响

李慧宇 李琦 夏志伟 赵永蓬 陈德应 王 骐

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

摘要 通过对缩比模型的太赫兹波段雷达散射截面(RCS)测量,可以获得微波波段全尺寸目标的 RCS 值,因此,RCS 估算和测量是当前太赫兹重要的应用技术之一。RCS 估算中,通常假定入射光为均匀平面波,但在实际测量应用中,常常采用发射类似高斯光束的太赫兹源。进行了横电波情况高斯光束入射时,无限长理想导体圆柱的太赫兹雷达散射截面估算。仿真研究了 2.52 THz 激光准直入射和相位变化对后向雷达散射截面的影响,给出了 RCS 与散射角的变化曲线;同时与均匀平面波入射结果进行了比较分析。仿真结果表明,在测量圆柱半径 10 mm 且入射光距圆柱轴心距离 1 m 处的后向 RCS 时,用光斑半径 30 mm 的高斯光束较好。

关键词 太赫兹技术;雷达散射截面;高斯光束;圆柱;理想导体

中图分类号 TN95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s111002

Influence of Gaussian Beam on Conductor Cylinder Terahertz Radar Cross Section

Li Huiyu Li Qi Xia Zhiwei Zhao Yongpeng Chen Deying Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract By measuring radar cross section (RCS) of scale model, the RCS of the full size target at microwave band is acquired. The estimation and measurement of the terahertz radar cross section is one of the most important applications in terahertz technique. In the RCS estimation, usually a plane wave is assumed; while in real measurement, generally a Gaussian beam or a similar beam resource is adopted. The RCS of an infinite perfect conductor cylinder is estimated under the condition that the incident wave is transverse electric wave. In the estimation, the influence of 2.52 THz collimated laser beam and phase variation on backward RCS are studied and the RCS with scattering angle is obtained; at the same time, a comparison between plane wave and Gaussian beam is also given. The estimation results show choosing facula radius 30 mm is appropriate when cylinder radius is 10 mm and the distance between the cylinder and the beam source is 1 m.

Key words terahertz technique; radar cross section; Gaussian beam; cylinder; perfect conductor

OCIS codes 040.2235; 280.5600; 010.3100

1 引 言

太赫兹技术是 21 世纪重要的发展领域^[1~5]。太赫兹雷达较一般激光雷达具有适中的搜索能力和覆盖范围,较微波雷达具有更高的空间分辨率和角分辨能力,而且具有良好的抗干扰能力,是目前国内外太赫兹技术的重点研究课题^[6,7]。

雷达散射截面(RCS)是雷达中非常重要的参

数,对雷达系统设计、目标识别、跟踪点选择和隐身技术等都具有重要的指导意义^[8,9]。随着太赫兹雷达技术的发展,对太赫兹目标散射特性的测量和估算日益受到关注。太赫兹 RCS 测量始于 20 世纪末,主要针对球、圆柱体等标准体和飞机、坦克等缩比模型。标准体测量结果可直接用于太赫兹雷达,缩比模型测量结果通过频率缩比计算,可用于微波

收稿日期: 2012-01-16; **收到修改稿日期**: 2012-02-24

作者简介: 李慧宇(1989—),女,本科,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: lihuiyu01@gmail.com

导师简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。E-mail: hit_liqi@yahoo.cn

波段全尺寸目标雷达散射截面的评估。太赫兹缩比模型 RCS 测量可大幅度节约微波波段全尺寸目标 RCS 测量成本,同时缩短测量周期。此方面应用是太赫兹 RCS 测量技术发展的主要动力。

RCS 定义要求按理想平面波入射计算。而在实际的雷达测量应用中,所采用的太赫兹源不能给出理想的均匀平面波,而往往呈高斯分布,且不可能完全准直,相位分布呈非线性。因此,仿真研究高斯光束对太赫兹 RCS 的影响是十分必要的。2009 年德国利用飞秒激光器组成的光纤耦合太赫兹时域光谱系统进行了 15 mm×15 mm 金属板的 0.3、0.5、1.0 THz 的 RCS 测量,研究了此太赫兹时域光谱系统高斯束宽、强度轮廓随辐射频率的变化关系,并将测量结果与利用物理光学模型近似计算结果相对比^[10]。结果表明,采用高斯光束照明较平面波近似存在较大偏差。

国外在其他波段针对高斯光束对球体、圆柱体的散射特性进行了一些研究工作^[11~14]。其中, Kozaki 等^[14]工作较为全面,不仅进行了理论推导,还进行了 9.6 GHz 散射特性测量。

我国尚未有关于高斯光束入射的太赫兹 RCS 估算的研究报道,而这方面的研究具有重要的实用价值。因此,本文从无限长理想导体圆柱入手,仿真研究了高斯光束参数对 RCS 的影响。

2 RCS 计算原理

为计算高斯光束入射的无限长理想导体圆柱雷达散射截面,实验中考虑横电波情况。

假设光束沿 z 轴方向入射,光源距圆柱中心 $-z_0$, 圆柱半径 a_0 ,圆柱体以 x 轴为对称轴,如图 1 所示。

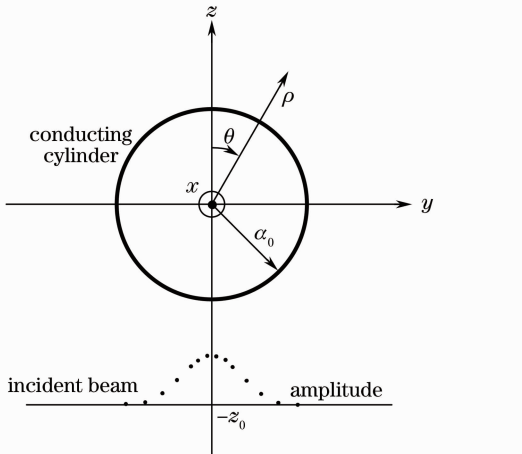


图 1 入射光与导体圆柱横截面几何空间示意图

Fig. 1 Geometry of the incident beam and the cylinder

在 $-z_0$ 处入射的高斯光束振幅可表示为

$$E_x(y_1, -z_0) = E_0 \exp(-\beta^2 y_1^2), \quad (1)$$

式中 $\beta^2 = a^2 + j b^2$ 。 $1/\sqrt{\text{Re } \beta^2}$ 对应束宽半径,对于准直光束 $\beta = a$ 。

假设 $\beta\lambda$ 远小于 1 (λ 为波长),在极坐标系中则可求得入射光场 $E_x(\rho, \theta)$ 与 E_0 比值的近似公式^[14]:

$$\frac{E_x(\rho, \theta)}{E_0} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \exp(jn\theta) J_n(k_0 \rho) A_n^h, \quad (2)$$

式中

$$A_n^h = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\beta} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{\alpha^2}{4\beta^2} - jz_0\sqrt{k_0^2 - \alpha^2} - jn\gamma(\alpha)\right] d\alpha, \quad (3)$$

$$\alpha = k_0 \sin \gamma(\alpha), \quad (4)$$

A_n^h 为权重,取 1 表示入射波为平面波; k_0 为波数; $J_n(k_0 \rho)$ 表示第一类贝塞尔函数。

散射场 $E_x^s(\rho, \theta)$ 与 E_0 比值可写为^[14]

$$\frac{E_x^s(\rho, \theta)}{E_0} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \exp(jn\theta) H_n^{(2)}(k_0 \rho) B_n^h, \quad (5)$$

式中 $H_n^{(2)}(k_0 \rho)$ 表示第二类汉开尔函数;对应后向散射, $\theta=180^\circ$,

$$B_n^h = -\frac{J_n(k_0 a_0)}{H_n^{(2)}(k_0 a_0)} A_n^h. \quad (6)$$

将(6)式代入(5)式可得

$$\frac{E_x^s(\rho, \theta)}{E_0} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[-j^{-n} \frac{J_n(k_0 a_0)}{H_n^{(2)}(k_0 a_0)}\right] \times \exp(jn\theta) H_n^{(2)}(k_0 \rho) A_n^h. \quad (7)$$

二维雷达散射截面公式可表示为

$$\sigma_{2D} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} 2\pi\rho \frac{|\mathbf{E}_x^s|^2}{|\mathbf{E}_x|^2}. \quad (8)$$

在计算远区散射场时,可采用汉开尔函数的大宗量渐进表达式:

$$H_n^{(2)}(k_0 \rho) \rightarrow \sqrt{\frac{2}{\pi k_0 \rho}} \exp\left\{-j \frac{[k_0 \rho - (2n+1)\pi]}{4}\right\}. \quad (9)$$

$k_0 \rho \rightarrow \infty$

在单位平面波入射近似条件下,可得无限长理想圆柱导体归一化雷达散射截面的近似公式:

$$\frac{\sigma_{2D}}{\pi a_0} = \frac{4}{\pi k a_0} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n(k_0 a_0)}{H_n^{(1)}(k_0 a_0)} \exp(jn\theta) \right|^2, \quad (10)$$

式中 $H_n^{(1)}(k_0 a)$ 表示第一类汉开尔函数。对于实际应用中束宽有限的高斯光束,在远场近似条件下的归一化雷达散射截面可表示为

$$\frac{\sigma'_{2D}(\theta)}{\pi a_0} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{2\pi\rho}{\pi a_0} \frac{|\mathbf{E}_x^s|^2}{|\mathbf{E}_x^i|^2}. \quad (11)$$

将(1)式和(5)式代入(11)式得

$$\frac{\sigma'_{2D}(\theta)}{\pi a_0} = \lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left[-j^{-n} \frac{J_n(k_0 a_0)}{H_n^{(2)}(k_0 a_0)} \right] \exp(jn\theta) H_n^{(2)}(k_0 \rho) A_n^h \right|^2}{\left| \exp(-\beta^2 y_1^2) \right|^2}, \quad (12)$$

将 $y_1=0$ 代入(12)式,并利用(9)式化简得

$$\frac{\sigma'_{2D}}{\pi a_0} = \frac{4}{\pi k a_0} \left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{J_n(k_0 a_0)}{H_n^{(2)}(k_0 a_0)} \exp(jn\theta) A_n^h \right|^2. \quad (13)$$

3 计算结果及分析

实验中辐射源频率为 2.52 THz,其入射角均为 0° ,后向散射对应散射角 θ 为 180° 。利用(13)式,分别讨论了散射角 $0^\circ \sim 360^\circ$,入射波光斑半径 5~100 mm 及与相相位关的参数 b 变化对 RCS 的影响。同时,与利用(10)式计算的均匀平面波入射时的 RCS 进行了对比。

图 2(彩图详见电子版)给出准直入射时归一化 RCS 随散射角的变化关系,圆柱半径 10 mm、 $z_0=1$ m 且光斑半径分别为 6、10、20 mm。红色圆圈表示光斑半径为 20 mm 的结果,蓝色方框表示光斑半径 6 mm 的结果,黑色倒三角表示光斑半径 10 mm 的结果,绿色圆点加实线表示均匀平面波的结果。由图 2 可知,均匀平面波在后向散射时,即散射角 180° 时,RCS 由负值趋于 0 dB,这与诸多文献结果相吻合;前向散射时,趋于 30 dB。高斯光束因光斑半径的不同,其 RCS 随散射角分布也不相同。随光斑半径的增大,RCS 由小于对应均匀平面波的结果向该值逼近。在光斑半径 20 mm,且散射角 $170^\circ \sim 190^\circ$ 范围内,高斯光束最大偏差约 0.04 dB。

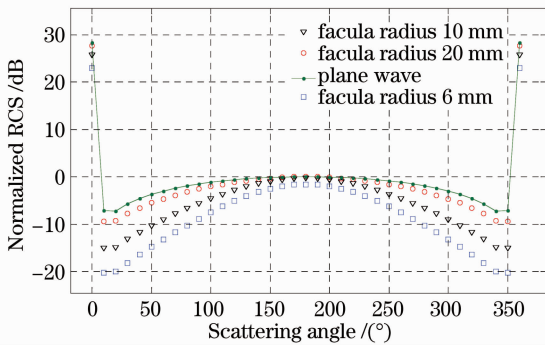


图 2 RCS 随散射角的分布

Fig. 2 RCS distribution with scattering angle

图 3 给出准直入射时后向散射归一化 RCS 随光斑半径的变化关系,圆柱半径 10 mm、 $z_0=1$ m。由图 3 可知,光斑半径从 5 mm 到 20 mm,RCS 迅速从约 -2.5 dB 上升至 -0.019 dB;然后,逐渐逼近

0 dB,即趋于均匀平面波情况。光斑 30 mm 时,归一化 RCS 约为 -0.004 dB。因此,在测量圆柱半径 10 mm 的无限长导体的 RCS 时,当 $z_0=1$ m,用光斑半径大于 30 mm 的高斯光束测得的 RCS 与均匀平面波吻合的较好;再兼顾扩束系统成本和制作精度等问题,用光斑半径为 20 mm 的高斯光束即可达到偏差不到 0.02 dB 的测量结果。

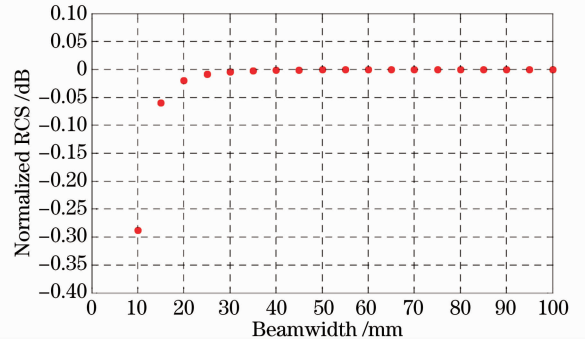


图 3 后向散射 RCS 随光斑半径的分布

Fig. 3 Backward RCS distribution with facula radius

图 4 给出 $b=5$ 时的归一化电场强度和相位分布。在 $-10 \sim 10$ mm 范围内的高斯光束的最大相位偏差为 0.0025 rad。图 5 给出 $\beta^2=2500+25j$ 时的 RCS 随散射角的变化关系,其中圆柱半径 10 mm、 $z_0=1$ m。为便于比较,图中黑色实线为 $b=0$ 时,即光斑半径 20 mm 的结果。 b 略有增加,使相位发生变化。从图 5 可以看出,RCS 分布较准直入射略有降低;后向散射 RCS 约为 -0.002 dB。

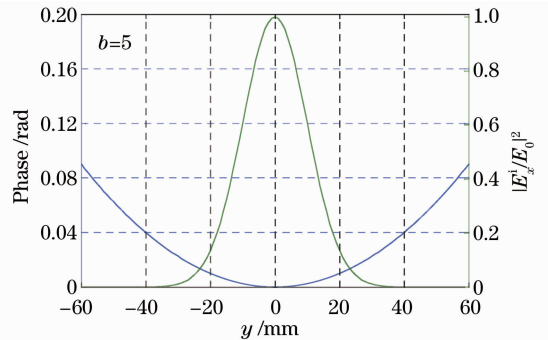


图 4 归一化电场强度和相位分布

Fig. 4 Distribution of the normalized intensity and the phase

4 结 论

仿真研究了高斯光束对无限长良导体 2.52 THz

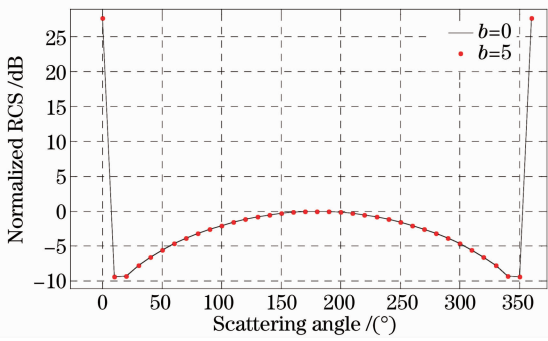


图 5 RCS 随散射角的分布

Fig. 5 RCS distribution with scattering angle

雷达散射截面测量的影响。近似计算结果表明,在测量圆柱半径 10 mm 的无限长导体的后向 RCS 时,当 $z_0 = 1$ m 时,用光斑半径 30 mm 的高斯光束较好;用光斑半径 20 mm 的高斯光束即可达到偏差不到 0.02 dB 的测量结果,且在偏离后向散射角 $\pm 10^\circ$ 范围内,高斯光束 RCS 最大偏差约 0.04 dB。

研究结果对太赫兹 RCS 测量有一定的指导作用。但目前只近似计算了无限长导体圆柱 2.52 THz 情况,还需要继续补充其他相位、工作频率和目标等的相关计算。

参 考 文 献

- 1 Zhu Dechong, Zhang Liangliang, Zhao Yaqin *et al.*. Terahertz broadband spectroscopic investigations of amino acid[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111008
祝德充, 张亮亮, 赵亚芹 等. 氨基酸的超宽带太赫兹光谱[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111008
- 2 Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines[J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(3): 752~757
赵树森, 陈思嘉, 沈京玲. 用支持向量机识别毒品的太赫兹吸收光谱[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 752~757
- 3 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001

- 姚睿, 丁胜晖, 李琦 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统的改进及分辨率分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0111001
- 4 Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s): 50~52
邓朝, 邢春飞, 吕默 等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s): 50~52
- 5 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100402
丁胜晖, 李琦, 姚睿 等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(s1): s100402
- 6 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008. 140~159
张存林, 张岩, 赵国忠 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 140~159
- 7 Li Jin, Pi Yiming, Yang Xiaobo. Research on terahertz radar target detection algorithm based on the extraction of micro motion feature[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2010, **24**(9): 803~807
李晋, 皮亦鸣, 杨晓波. 基于微动特征提取的太赫兹雷达目标检测算法研究[J]. *电子测量与仪器学报*, 2010, **24**(9): 803~807
- 8 Yang Yang, Yao Jianquan, Tang Shixing *et al.*. Influence of the rough surface on radar target scattering cross section[J]. *Laser & Infrared*, 2011, **41**(7): 800~803
杨洋, 姚建铨, 唐世星 等. 粗糙表面对雷达目标散射截面的影响[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(7): 800~803
- 9 Mao Shichun, Wu Zhensen, Xing Zanyang. Scattering by a homogeneous anisotropic elliptic cylinder: two-dimensional case[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, **38**(3): 529~533
毛仕春, 吴振森, 邢赞扬. 二维各向异性椭圆柱的电磁散射[J]. *电子学报*, 2010, **38**(3): 529~533
- 10 C. Jansen, N. Krumbholz, R. Geisb *et al.*. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements[C]. 34th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2009
- 11 W. C. Tasi, R. J. Pogorzelski. Eigenfunction solution of the scattering of beam radiation fields by spherical objects[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1975, **65**(12): 1457~1463
- 12 W. G. Tam, R. Corriveau. Scattering of electromagnetic beam by spherical object[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(6): 763~767
- 13 N. G. Alexopoulos, P. K. Park. Scattering of waves with normal amplitude distribution from cylinders[J]. *IEEE Trans. Antennas & Propaga.*, 1972, **20**(2): 216~217
- 14 S. Kozaki. A new expression for the scattering of a Gaussian beam by a conducting cylinder[J]. *IEEE Trans. Antennas & Propaga.*, 1982, **30**(5): 881~887

栏目编辑:李文洁