

高斯光束对平板上突起的单站太赫兹雷达散射截面的影响

李慧宇 李琦 余剑雨 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 缩比模型测量可以帮助缩短物体雷达散射截面(RCS)测量的时间,并减少其成本,而由于太赫兹波所处的波长范围的独特性,所以其在雷达散射截面缩比测量中有较多的应用。在对粗糙表面的散射截面计算中,可以将模型简化为带有突起的平板。单站散射(后向散射)是雷达系统中比较常用的一种测量方式,也有很多针对平面波入射情况下的计算,但是由于太赫兹源所产生的高斯光束的能量分布与平面波不同,得到的雷达散射截面的结果也与平面波不同,常常会导致测量结果和计算结果中有一定的误差。利用镜像法仿真计算了入射光为高斯光束时平板上的突起在 2.52 THz 频段处的雷达散射截面,详细比较了单站散射分别在二维和三维情况下,由于入射光为高斯光束对散射结果造成的影响。

关键词 遥感; 太赫兹; 雷达散射截面; 突起; 高斯光束

中图分类号 TN95 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s114001

Influence of Gaussian Beam on Monostatic Terahertz Radar Scattering Cross Section of a Boss on Flat Plate

Li Huiyu Li Qi She Jianyu Zhao Yongpeng Chen Deying Wang Qi

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

Abstract Terahertz technology is widely used in the radar cross section (RCS), because the wavelength of terahertz can help downsize the model to a proper range and the measurement of scale model can help decrease the cost of time and the expenditure of the experiment. In the calculation of the RCS of a rough surface, sometimes, the question is deduced into the calculation of the boss on a flat plate and the monostatic radar is the one that mass of radar system adopted. However, a plane wave is usually assumed in most of the RCS estimation, while in real measurements, the energy of the incident beam obeys the Gaussian distribution. In the estimation, the influence of 2.52 THz collimated Gaussian beam on monostatic RCS is studied in details and the relatively error is analyzed.

Key words remote sensing; terahertz; radar scattering cross section; boss; Gaussian beam

OCIS codes 280.5600; 040.2235

1 引言

太赫兹辐射介于微波和红外之间同时具有两者的优点,是目前的研究热点之一,在雷达、目标特性测量、成像、生物医学、无损探测等方面都有应用,具有较为广阔的发展前景^[1-6]。在实际应用中和微波

相比较,太赫兹的波长较短,在测量中具有更高的空间分辨率和角分辨能力以及良好的抗干扰能力。和激光相比,太赫兹具有更好的穿透的能力,可以用于一些较为复杂的测量环境。

雷达散射截面(RCS)是雷达系统中常用的一种

收稿日期: 2013-07-17; 收到修改稿日期: 2013-10-12

作者简介: 李慧宇(1989—),女,硕士研究生,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: liqi2013@hit.edu.cn

描述目标特性的数据,近年来,随着雷达技术的不断发展,对 RCS 数据精确度的要求也越来越高,这就需要在测量和计算中考虑较小尺寸部件对整体散射特征的影响。将太赫兹技术应用于 RCS 测量中,由于其特殊的波长范围,可以在测量中得到更加精确的数据。

始于 20 世纪 40 年代的缩比模型测量,通过抛物面反射镜和吸波材料等的应用,使得 RCS 测量能够在室内进行实验,从而大幅度减少了测量成本和操作难度,但是测量过程中对模型的加工要求很高。而应用太赫兹频段进行测量,可以将模型的尺寸控制在一个比较合适的范围,降低模型的加工难度,从而更好地发挥缩比模型测量的优势。

近年来涌现了越来越多的有关太赫兹 RCS 的实验报告^[7-13]。2012 年,Gente 等^[7]计算并测量了太赫兹频段下简单物体的 RCS 并与实验结果进行了对比。2010 年,Iwaszczuk 等^[8]设计并测量了飞机缩比模型的 RCS。2009 年,Jansen 等^[9]对平板的 RCS 进行了测量,并且与计算结果进行了对比,结果表明假设入射光为平面波会使计算结果产生一定的误差。Hillairet 等^[10-11]对高斯光束照射平板的散射问题进行了精确的计算并且针对结果做出了适当的改进,除此之外,也有一些针对导体球、圆柱等简单物体的相关计算^[12-13]。

本课题组已经仿真对比过太赫兹频段下,入射光分别为高斯光束和平面波对导体球、导体柱等 RCS 的影响^[14-15]。在此基础上,本文详细分析计算了二维和三维即柱形和球形突起的后向散射,仿真研究了在 2.52 THz 下,高斯光束和平面波分别入射时得到的 RCS 计算结果的变化曲线,讨论了不同波束宽度时高斯光束入射对计算结果的影响。

2 计算原理

根据 Sakurai 等^[13]提出的计算方法,物体表面上的突起可以看作是带有不规则突起的光滑表面的简化模型,是实际的粗糙表面模型的一种近似假设,而在计算突起的 RCS 中,又可以将其看作是两束以平板为对称面的光源照射在一个完整导体柱或者球上的情况,从而计算出突起的 RCS。

本文忽略随时间变化的相位因子 $\exp(j\omega t)$ 。用角谱法将入射光展开,把入射的高斯光束看作是很多平面波的叠加,然后再进行散射的计算^[14-15]。

首先考虑二维模型的散射问题。高斯光束照射到带有半径为 a_0 的柱形突起的光滑表面上,图 1 为利用 Eom 等^[12]提出的方法对模型进行简化后的示意图,图中将柱形突起的散射转换为以平板为对称面的高斯光束对导体柱的散射,图中虚线部分为补充的部分。这样需要计算的问题就简化成了对一个半径为 a_0 的导体柱的散射,柱的对称轴位于坐标轴的原点,光源与柱形突起对称轴距离为 z_0 。

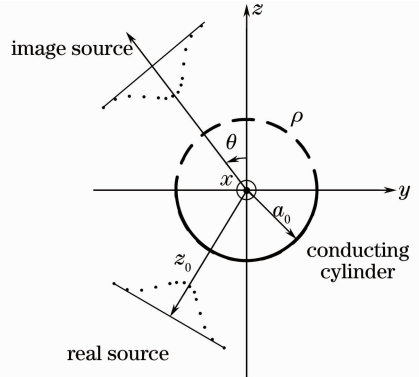


图 1 高斯光束与其镜像光源照射导体柱的几何模型

Fig. 1 Geometric model of Gaussian beam and its image source irradiation on two dimensional boss

将直角坐标 (y, z) 转变为极坐标 (ρ, θ) , 单站散射时平板上柱形突起的 RCS 的计算公式为^[13-14]

$$\sigma_{\text{semicircular}}(\theta) = 10 \lg \left[\frac{\left| \sum_{n=-\infty}^{\infty} [J_n(k_0 a)] / [H_n^{(2)}(k_0 a)] A_n^h [\exp(jn\theta_1) - \exp(jn\theta_2)] \right|^2}{\left| 1/\pi a \int \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^{-n} \exp(jn\theta) J_n(k_0 \rho) A_n^h d\theta \right|^2} \right], \quad (1)$$

式中 θ_1, θ_2 分别为原入射光和镜像光与接收天线之间的夹角, A_n^h 是权重。当 $A_n^h = 1$ 时, 入射光退化成平面波:

$$A_n^h = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\beta_0} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[-\frac{\alpha^2}{4\beta_0^2} - jz_0 (k_0^2 - \alpha^2)^{1/2} - jn\gamma(\alpha) \right] d\alpha, \quad (2)$$

$$\alpha = k_0 \sin \gamma(\alpha), \quad (3)$$

式中 $J_n(k_0\rho)$ 是第一类贝塞尔函数, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$,

$H_n^{(2)}(k_0\rho)$ 是第二类汉克尔函数, λ 代表波长。

将二维情况推广到三维情况,如图 2 所示,可以得到平板上球形突起的散射方程^[15]:

$$\sigma_{\text{hemisphere}}(\theta, \varphi) = \frac{8\pi}{k_0^2} \frac{|f_\theta(\theta)|^2 \cos^2 \varphi - |f_\varphi(\theta)|^2 \sin^2 \varphi}{\int |E^i|^2 ds}, \quad (4)$$

式中

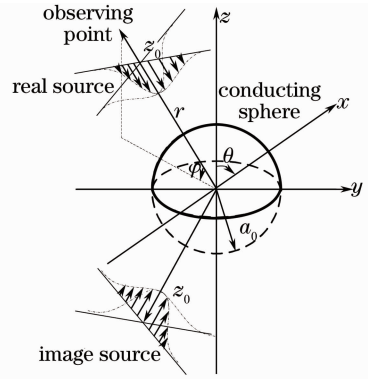


图 2 高斯光束与其镜像光源照射导体球的几何模型
Fig. 2 Geometric model of Gaussian beam and its image source irradiation on three dimensional boss

$$|f_\theta(\theta)|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} g_n \left\{ \begin{array}{l} b_n^s \left[\frac{\partial P_n^1(\cos \theta_1)}{\partial \theta_1} - \frac{\partial P_n^1(\cos \theta_2)}{\partial \theta_2} \right] \\ a_n^s \left[\frac{P_n^1(\cos \theta_1)}{\sin \theta_1} - \frac{P_n^1(\cos \theta_2)}{\sin \theta_2} \right] \end{array} \right\} \right|^2, \quad (5)$$

$$|f_\varphi(\theta)|^2 = \left| \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2(2n+1)}{n(n+1)} g_n \left\{ \begin{array}{l} b_n^s \left[\frac{P_n^1(\cos \theta_1)}{\sin \theta_1} - \frac{P_n^1(\cos \theta_2)}{\sin \theta_2} \right] \\ a_n^s \left[\frac{\partial P_n^1(\cos \theta_1)}{\partial \theta_1} - \frac{\partial P_n^1(\cos \theta_2)}{\partial \theta_2} \right] \end{array} \right\} \right|^2, \quad (6)$$

其中 $P_n^1(\cos \theta_1)$ 是 Legendre 函数, b_n^s, a_n^s 为系数, g_n 是权重, 当 $\beta\lambda$ 很小时, 定义为^[15]

$$g_n = \frac{1}{1 - jZ_0} \exp \left[- \frac{(n + 1/2)^2 (\beta_0^2 / k_0^2)}{1 - jZ_0} - jk_0 z_0 \right], \quad (7)$$

$$Z_0 = \frac{2\beta_0^2 z_0}{k_0}. \quad (8)$$

3 计算结果与分析

计算中辐射源频率为 2.52 THz, 位于 $z_0 = 1$ m 处, 照射到半径为 a_0 的位于理想导体平面上的导电突起上, 物体处于均匀、各向同性的无界空间中。本文分别计算并且讨论了散射角和入射光波束宽度对 RCS 的影响。同时, 与权重为 1 时退化得到的平面波入射情况下的 RCS 进行了对比。

图 3 为二维情况时利用(1)式计算得到的柱形突起在不同角度时的单站散射情况, 图中实线为入射光为平面波时计算得到的结果, 圆点为波束宽度为 40 mm 时的高斯光束入射得到的结果, 两种情况都是在突起半径为 10 mm 情况下得到的。从图中可以看到在此计算条件下, 计算角度范围内的单站散射在 28.1 dB~28.8 dB 之间震荡, 而由高斯光束

入射造成的误差大多在 0.03 dB 左右。

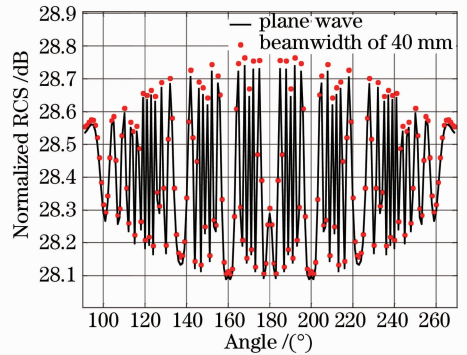


图 3 柱形突起在入射光为平面波和高斯光时的单站散射
Fig. 3 Monostatic RCS of semicircular boss when the incident beam is Gaussian or plane beam

图 4 为三维情况下利用(4)式计算得到的在不同入射角度时计算得到的单站散射情况, 图中实线为入射光为平面波时计算得到的结果, 三角为波束宽度为 40 mm 的高斯光束入射得到的结果, 计算过程中突起的半径均为 10 mm。图中可以看到, 不同角度的单站散射得到的结果波动比较大, 在 -38 dB 和 48 dB 之间震荡, 但是除了 0° 附近的个别点其他角度处的 RCS 值都较小, 基本上都在 15 dB 以下。由高斯光束入射造成的误差基本上都在 6 dB 左右,

明显高于二维时的误差情况,除此之外,RCS 整体的波动也要远大于二维情况下计算得到的柱形突起的情况。

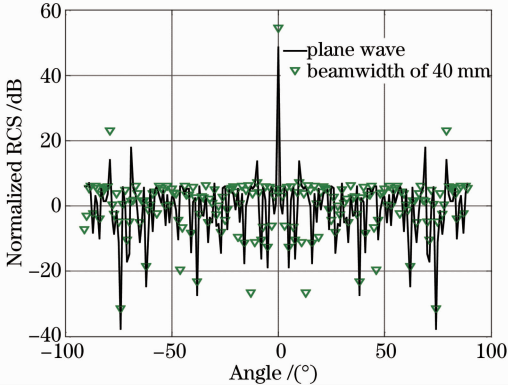


图 4 球形突在入射光为平面波和高斯光时的单站散射
Fig. 4 Monostatic RCS of hemisphere boss when the incident beam is Gaussian or plane beam

单站散射通常是指发射天线和接收天线在同一角度处的情况,然而大多数测量系统中使用的都是分离的发射天线和接收天线,虽然由于两个天线的张角很小,通常认为其得到的测量结果也是单站的,但是也会对结果造成误差。

图 5 给出的是接收天线和发射天线存在一个较小张角时柱形突起单站散射随入射光波束宽度变化的情况,这里认为张角为 6.6° 。图中可以看到当波束宽度小于 50 mm 时对计算得到的 RCS 影响非常大,但是当波束宽度大于 10 mm 后,随着波束宽度的增加,RCS 就没有非常明显的变化,基本成一条水平的直线,最后稳定在 28.2 dB 处。这种情况下,不考虑其他因素的干扰,如果希望高斯光束入射对结果的影响小于 0.3 dB,需要令入射光波束宽度大于 40 mm。

图 6 是同图 5 一样条件下计算得到的单站散射随高斯光波束宽度变化的曲线,此时的散射物体变

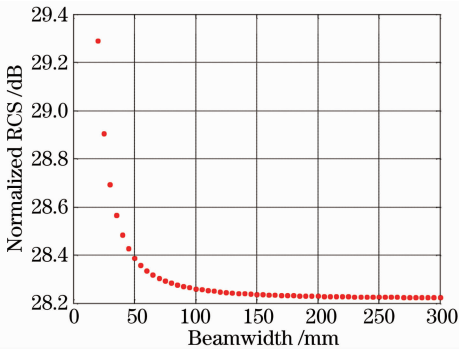


图 5 柱形突起单站散射随高斯光束波束宽度的变化
Fig. 5 Monostatic RCS of semicircular boss in dependence of Gaussian beamwidth

为球形突起。从图中看,球形突起的 RCS 变化与柱形突起的基本上一致,都是随着入射光波束宽度的变化而使计算得到的值趋近与一个稳定的值,不同的是,这种情况下,随着波束宽度的增加,RCS 随之增加,并且最后稳定在 12.08 dB 左右。并且这时由于入射光为高斯光束造成的误差很小,在图中所示的波束宽度变化的计算范围内的误差都在工程允许的误差范围之内。

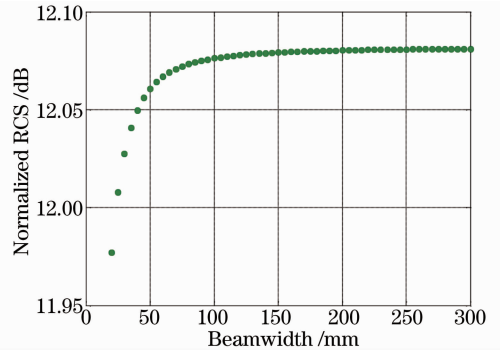


图 6 球形突起单站散射随高斯光束波束宽度的变化
Fig. 6 Monostatic RCS of hemisphere boss in dependence of Gaussian beamwidth

4 结 论

仿真研究了高斯光束在二维和三维情况下对带有突起的表面的 2.52 THz 单站 RCS 测量的影响,并对两种情况下计算得到的数据进行了比较分析。近似计算结果表明,实际测量系统的发射天线和接收天线不在同一位置,会对测量结果产生一定的影响。在高斯光束入射的单站 RCS 计算中,波束宽度越宽,计算结果越接近平面波入射时的结果。虽然计算得到的二维和三维情况下的数据不同,但是考虑实际测量的成本等因素后,认为当突起半径为 10 mm 时,选择宽度为 40 mm 的波束都可以使误差在允许范围内。

参 考 文 献

- Zhu Dechong, Zhang Liangliang, ZhaoYaqin, *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.
- 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.
- 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.
- 4 Wang Ruijun, Wang Hongqiang, Zhuang Zhaowen, *et al.*. Research progress of terahertz radar technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4): 040001.
王瑞君, 王洪强, 庄钊文, 等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4): 040001.
 - 5 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.
 - 6 Li Qi, Xue Kai, Li Huiyu, *et al.*. Advances in research of terahertz radar cross section measurements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(6): 060001.
李琦, 薛凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(6): 060001.
 - 7 Ralf Gente, Christian Jansen, Robert Geise, *et al.*. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time domain spectrometer[J]. IEEE Transaction on Terahertz Science and Technology, 2012, 2(4): 424–431.
 - 8 Krzysztof Iwaszczuk, Henning Heiselberg, Peter Uhd Jepsen. Terahertz radar cross section measurements[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26399–26408.
 - 9 C Jansen, N Krumbholz, R Geisb, *et al.*. Alignment and illumination issues in scaled THz RCS measurements [C]. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 2009, IRMMW-THz 2009. 34th International Conference on IEEE, 2009. 1–2.
 - 10 J Hillairet, J Sokoloff, S Bolidi. Uniform analytic scattered fields of a PEC plate illuminated by a vector paraxial Gaussian beam [J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2009, 14, 203–217.
 - 11 J Hillairet, J Sokoloff, S Bolioli, *et al.*. Analytical physical optics scattering from a PEC finite plate illuminated by a vector Gaussian beam[C]. Electromagnetics in Advanced Applications 2007. ICEAA 2007. International Conference on IEEE, 2007, 283–289.
 - 12 H J Eom, G Y Hur, T J Park, *et al.*. Gaussian beam scattering from a semicircular boss above a conducting plane[J]. IEEE Trans Antennas Propaga, 1993, 41(1): 106–108.
 - 13 H Sakurai, M Ohki, K Motojima, *et al.*. Scattering of Gaussian beam from a hemispherical boss on a conducting plane[J]. IEEE Trans Antennas Propaga, 2004, 52(3): 892–894.
 - 14 Li Huiyu, Li Qi, Xia Zhiwei, *et al.*. Influence of Gaussian beam on conductor cylinder terahertz radar cross section[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s111002.
李慧宇, 李琦, 夏志伟, 等. 高斯光圆柱太赫兹雷达散射截面的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s111002.
 - 15 Li Huiyu, Li Qi, Xia Zhiwei, *et al.*. Influence of Gaussian beam on terahertz radar cross section of a conducting sphere [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2013, 34(1): 88–96.

栏目编辑: 史敏