

基于时域光谱系统的太赫兹圆柱 RCS 测量

蒋彦雯¹, 邓彬¹, 王宏强¹, 吕治辉², 秦玉亮¹

(1. 国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 雷达散射截面(RCS)测量对于太赫兹雷达系统论证设计具有重要意义。详细描述了时域光谱(TDS)系统测量 RCS 的原理, 以及实验方案的设计。基于 TDS 系统对太赫兹频段圆柱 RCS 进行了测量实验, 获得光滑和粗糙圆柱在太赫兹频段下的回波, 对光滑圆柱回波进行傅里叶变换得到其宽带 RCS, 与理想圆柱 RCS 的物理光学解进行比较, 发现 RCS 理论值与测量值基本一致, 验证了 TDS 系统可用于太赫兹频段目标 RCS 的测量; 同时将光滑圆柱和粗糙圆柱的 RCS 测量值进行对比分析, 结果表明: 太赫兹频率越高, 粗糙面对 RCS 的影响越大, 粗糙度大于八分之一波长为粗糙面的传统定义须重新考虑。

关键词: 太赫兹; 雷达散射截面; 时域光谱系统; 粗糙表面; 圆柱

中图分类号: TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)07-2223-05

RCS measurement of cylinders in terahertz band based on the time-domain spectroscopy system

Jiang Yanwen¹, Deng Bin¹, Wang Hongqiang¹, Lv Zhihui², Qin Yuliang¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Radar cross section(RCS) measurement is of great significance to terahertz(THz) radar system design. Firstly, the principle and experimental design of RCS measurement based on time-domain spectroscopy (TDS) system were introduced. Secondly, by using TDS system, the time-domain echo of smooth and rough cylinder were obtained. The measured RCS value can be given after Fourier transform. Compared the measured value with the physical optics solution of the same size cylinder, the results shows that calculation and measurement have the same result which prove the TDS system can be used to measure RCS in terahertz band. Finally, comparison of measured RCS value between the smooth and rough cylinder indicates that the higher frequency, the greater impact of rough surface on RCS in terahertz band, and the traditional definition of rough surfaces which roughness more than one eighth of the wavelength is not suitable any more.

Key words: terahertz; radar cross section; time-domain spectroscopy system; rough surfaces; cylinder

收稿日期: 2013-11-03; 修订日期: 2013-12-05

基金项目: 国家 863 计划(2012AA8126xxxx); 国家自然科学基金(61302148)

作者简介: 蒋彦雯(1991-), 女, 硕士生, 主要从事太赫兹雷达成像技术与散射中心估计方法方面的研究。Email: j1991yuwen@163.com

导师简介: 王宏强(1970-), 男, 研究员, 博士, 主要从事太赫兹技术、雷达信号处理方面的研究。Email: oliverwhq@vip.tom.com

0 引言

太赫兹(terahertz, THz)技术^[1]在成像、探测等方面相比微波波段所体现的优势使其成为近几年新的研究热点之一,准确测量太赫兹频段目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)是太赫兹技术发展的研究基础。RCS 是度量雷达目标对照射电磁波散射能力的一个物理量。目前,太赫兹频段 RCS 测量系统按所用太赫兹源可划分为三类:时域光谱(time-domain spectroscopy, TDS)系统、远红外激光器系统、微波倍频源系统。THz-TDS 是一种相干探测技术,能够同时获得太赫兹脉冲的振幅信息和相位信息。2000 年,美国利用太赫兹时域光谱系统进行了 0.2~1.4 THz 的导体和介质圆柱 RCS 的测量^[2]。2010 年,丹麦技术大学基于飞秒激光器建立了太赫兹时域脉冲系统,获得了远场条件下 1:150 缩比 F-16 飞机的不同姿态角 RCS 结果^[3]。2012 年,德国布伦瑞克太赫兹通信实验室基于 RCS 时域测量系统获得了旋风 200 战机与 F-117 战机缩比模型 RCS 随频率与角度变化曲线^[4]。2010 年,美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室利用太赫兹雷达紧缩场系统研究了粗糙面圆柱的电磁散射行为^[5]。国内,首都师范大学^[6-7]、天津大学^[8]、中国航天科工二院 207 所^[9]利用 TDS 系统对目标的反射、吸收、透射和散射特性进行了测量分析,但并未直接对目标 RCS 进行测量。文中利用 TDS 系统获得光滑和粗糙圆柱在太赫兹频段下回波,并通过傅里叶变换获得圆柱宽带 RCS,与理想圆柱 RCS 的物理光学(Physical Optics, PO)解进行比较,揭示粗糙表面对太赫兹频段目标 RCS 的影响。

1 实验原理与方案设计

1.1 实验原理

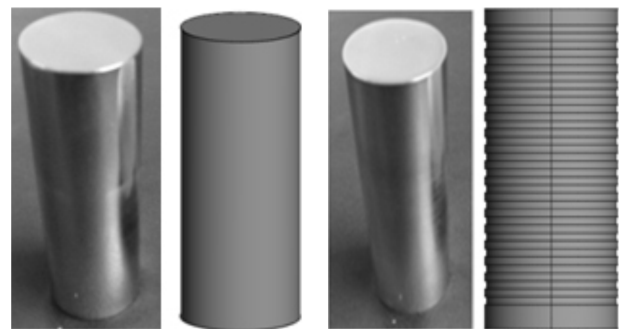
TDS 能够测量目标瞬态电场响应,具有宽带 RCS 测量能力。THz-TDS 就是利用太赫兹辐射脉冲从样品上散射,记录时域电场回波波形,对其傅里叶变换可得到频域波形,然后对频谱数据进行分析和处理就可得到目标的复 RCS。根据复 RCS 定义,有

$$T(f) \triangleq 2\sqrt{\pi} r e^{jkr} \frac{E_s(f)}{E_i(f)} \triangleq a \frac{E_s(f)}{E_i(f)} = T_{ref}(f) \frac{FFT\{e_m(t)\}}{FFT\{e_{mref}(t)\}} \quad (1)$$

式中: f 为频率; r 为目标与收发装置间的距离; k 为

波数; $E_i(f)$ 为目标入射频域电场; $E_s(f)$ 为目标散射频域电场; $T_{ref}(f)$ 为参考目标的复 RCS; t 为时间; $e_m(t)$ 和 $e_{mref}(t)$ 分别表示由待测目标和参考目标测得的时域电场; FFT 表示对时域电场的进行傅里叶变换。上式得到的实际上是宽带频率响应,即各个频点下的复 RCS (模方为 RCS),求单个频点的 RCS 可用周围一小段数据平均得到。参考目标一般选球、圆板等,若选半径为 a 的金属球,则 $T_{ref}(f) = \sqrt{\pi a^2} \exp(j4\pi a f l c)$,若选半径为 a 的圆板,则 $T_{ref}(f) = 2\pi \sqrt{\pi} a^2 f l c$ 。该实验采用圆板作为定标体(圆板反射比球强,便于采集回波)。

图 1 为实验所用光滑圆柱和粗糙圆柱的实物及几何模型,圆柱直径 3 cm,高 8 cm,材质为不锈钢。文中采用 R_a 来定量表征金属表面粗糙度,通过与哈尔滨量具刃具集团有限责任公司生产的表面粗糙度比较样块相比较,光滑圆柱模型 R_a 为 0.012 μm ,加工工艺为研磨;粗糙圆柱模型 R_a 为 5 μm ,加工工艺为刨,表面为周期刻痕。实验所用圆形光滑平板直径 8 cm,不锈钢材质, R_a 为 0.012 μm ,加工工艺为研磨。



(a) 光滑圆柱 (b) 粗糙圆柱
(a) Smooth cylinder (b) Rough cylinder

图 1 待测目标实物及几何模型

Fig.1 Entity and geometric model of measured target

1.2 方案设计

文中采用反射式 THz-TDS 系统测量目标 RCS,主要由飞秒激光器、太赫兹辐射产生装置、太赫兹辐射、探测装置和时间延迟控制系统组成^[10],如图 2 所示。飞秒激光器采用电离空气的方式产生激光脉冲,激光脉冲经过半波片和偏振分束器后分为激发脉冲和探测脉冲,激发脉冲经过光学延迟线后,通过光整流效应产生太赫兹辐射,照射到 1 m 远的目标模型处,目标反射的太赫兹波经探测器接收,由光电转换器转换为电场信号,通过锁相放大器后进入计算机,

锁相时间设定为 300 ms。通过改变激发脉冲的延迟,可采集到太赫兹辐射的时域波形,延迟时间每次增加 0.67×10^{-13} s,采样频率可等效视为 15 THz。

实验中需保证整个系统的光路始终处于同一水平面上,且太赫兹波垂直照射在目标中心(圆柱侧面

中心或平板圆心)。先后将光滑圆板、光滑圆柱以及粗糙圆柱固定在 1 m 远处的平台上,分别记录各个目标的时域回波,为提高测量精度,应将多次测量得到的多组数据进行平均处理,按公式(1)的计算方法即可得到相应目标在太赫兹频段下的复 RCS 值。

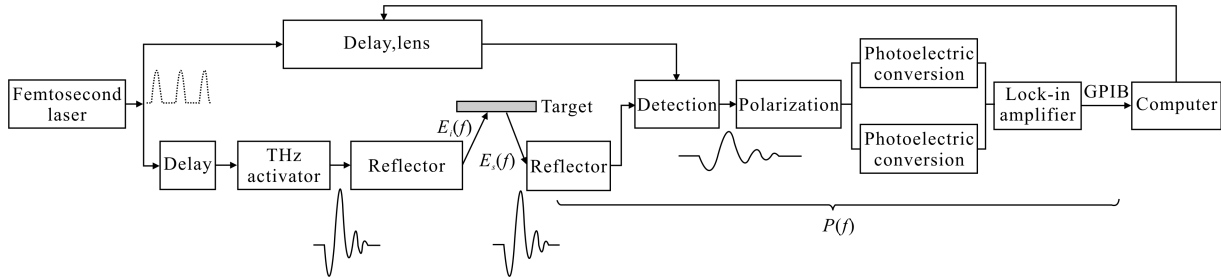
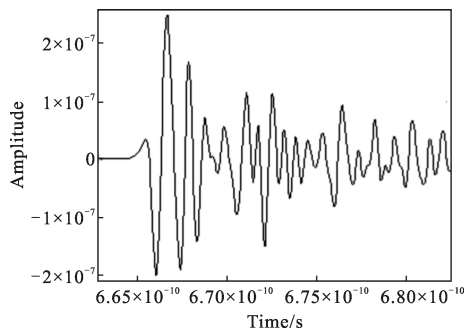


图 2 TDS 系统组成

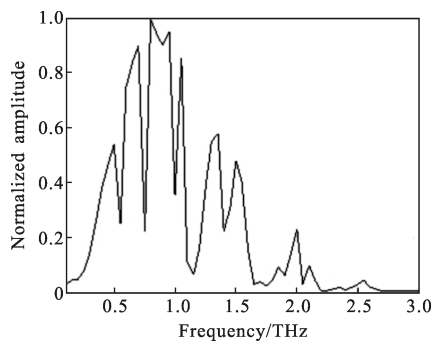
Fig.2 TDS system composition

系统发射的太赫兹波波形如图 3 所示,输出频率为 0.1~2 THz,由于实验条件的限制,仅对实验环境进行了除尘处理,无法进行干燥处理,空气中的水蒸气使得系统接收到少许杂波。



(a) 时域

(a) Time domain



(b) 频域

(b) Frequency domain

图 3 太赫兹发射波形图

Fig.3 THz transmitted waveform

2 测量与分析

2.1 光滑圆柱

光滑圆柱复 RCS 的 PO 表达式^[11]为:

$$\sqrt{\sigma(f, \theta)} = \sqrt{ka^2 \sin^2 \theta} \exp(i2kasin\theta) \text{sinc}(kl\cos\theta) \quad (2)$$

式中: f 为频率; k 为波数; a 为半径; l 为圆柱高; θ 为入射光线与圆柱对称轴夹角,相位参考中心设在圆柱的几何中心。公式(1)只给出圆柱侧面的复 RCS。

对回波进行处理,得到光滑圆柱太赫兹频段的时域和频域回波波形如图 4 所示。在图 4(a)中,由于圆柱距离系统收发装置约 1 m,因而时域波形在 $t=66.6$ ns 时取得最大值。将 TDS 测量值与公式(1)中给出的理论值进行比较,如图 5 所示,通过分析可得出以下结论:

(1) 测量得到的光滑圆柱 RCS 曲线与理论值是基本一致的,验证了 TDS 系统测量太赫兹目标 RCS 的可行性。

(2) 虽然太赫兹辐射源的发射频率为 0.1~2 THz,但从图 3(b)、图 4(b)中发射频域波形和光滑圆柱频域回波波形可知太赫兹波能量主要集中在 0.3~1.7 THz 之间,频率低于 0.3 THz 时太赫兹波能量太小,从而导致图 5 中 0.3 THz 以下频段圆柱 RCS 的测量值与理论值相差较大。

(3) RCS 定义要求按理想平面波入射计算,而实验中采用的太赫兹源不能给出理想的均匀平面波,且往往呈高斯分布,相位分布呈非线性,虽然实验中

将目标置于太赫兹波束的束腰处，但最终圆柱 RCS 测量值与理论值之间还是存在一定误差。

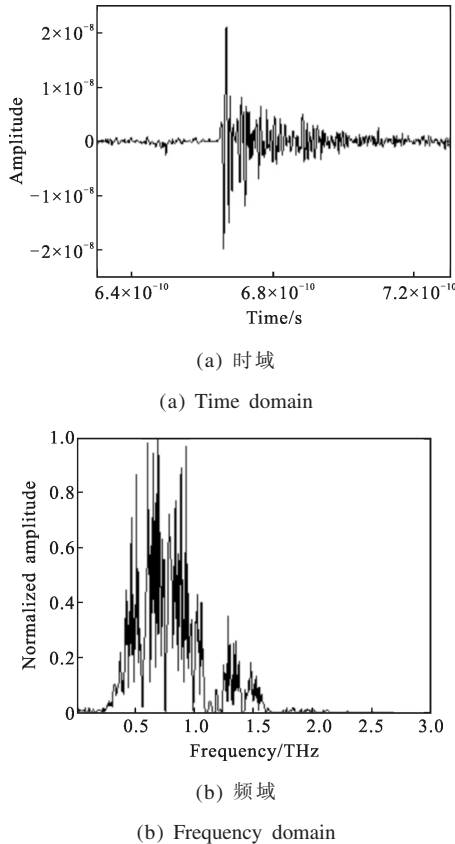


图 4 光滑圆柱回波波形图

Fig.4 Echo waveform of smooth cylinder

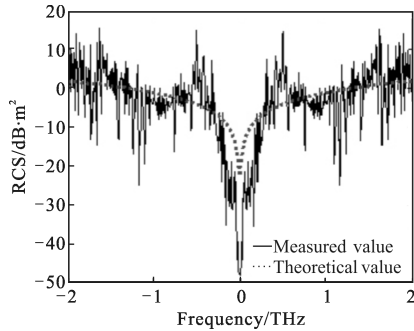


图 5 光滑圆柱 RCS 测量值与理论值对比图

Fig.5 Comparison of the measured and theoretical value of smooth cylinder's RCS

2.2 粗糙圆柱

对计算机采集到的时域波形进行处理得到粗糙圆柱的回波波形如图 6 所示。由于目前并没有粗糙圆柱 RCS 的理论解,因此实验中将测量得到粗糙圆柱 RCS 与光滑圆柱的 RCS 进行对比,如图 7 所示,通过分析可得出以下结论:

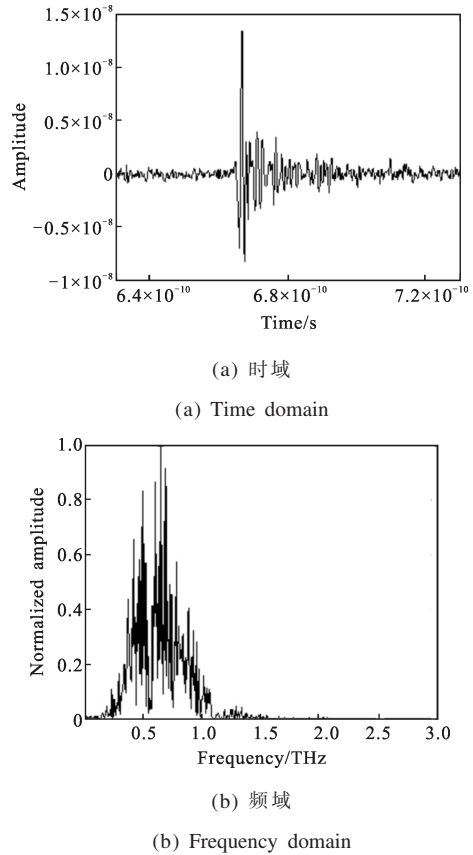


图 6 粗糙圆柱回波波形图

Fig.6 Echo waveform of rough cylinder

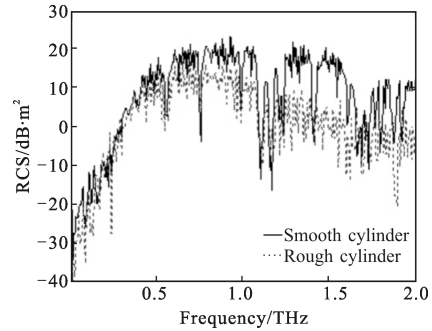


图 7 光滑圆柱与粗糙圆柱 RCS 对比图

Fig.7 Comparison of the smooth cylinder's RCS and the rough cylinder's

(1) 0.75 THz 以下粗糙圆柱和光滑圆柱的 RCS 测量值基本一致,说明粗糙面($R_a=5 \mu\text{m}$)对 0.75 THz 以下的太赫兹散射影响不大,此时 $R_a=5 \mu\text{m}$ 的粗糙面仍可视作光滑。但是,随着频率的升高,粗糙圆柱和光滑圆柱的 RCS 测量值呈现差异,且频率越高差异越大。由太赫兹波散射理论分析可知表面粗糙导致目标镜像方向太赫兹散射减弱,RCS 值减小。因此,太赫兹频率越高对粗糙面的影响愈发显著。

(2) 按照传统粗糙面定义,粗糙度大于八分之一波长时可视为粗糙。 R_a 为 $5\ \mu\text{m}$ 的粗糙面在 $7.5\ \text{THz}$ 以下可视为光滑表面而忽略粗糙影响,但实测数据表明 $0.75\ \text{THz}$ ($R_a/\lambda=1/80$, λ 为波长) 以上不锈钢粗糙面影响极为严重,不能忽略,因此传统粗糙面定义在太赫兹波段难以适用,需要重新对粗糙面进行定义。参考文献[5]中利用太赫兹紧缩场雷达系统测量数据获得了粗糙圆柱在 $0.16\ \text{THz}$ 时的 ISAR 成像结果,发现 R_a 为 $0.15\ \mu\text{m}$ ($R_a/\lambda \approx 1/11\ 000$) 周期粗糙介质圆柱的二维 ISAR 成像结果的中间位置多了几个散射点,表明粗糙表面影响太赫兹频段的电磁散射行为,得出与文中一致的结论:传统粗糙面定义在太赫兹波段不再适用。

3 结论

综上所述,由 TDS 系统测量得到的光滑圆柱的 RCS 曲线和理想圆柱的 PO 解是一致的,说明 TDS 系统能够准确测量出太赫兹频段目标的 RCS,由光滑圆柱和粗糙圆柱之间 RCS 对比可知,频率越高,粗糙表面对太赫兹频段目标的 RCS 影响越大,太赫兹波能够区分目标表面粗糙水平,且粗糙度大于八分之一波长为粗糙面的传统定义不再适用。但是,由于 TDS 系统中激光器水平的限制,发射波束宽度有限,无法对实际军事目标的 RCS 进行测量,且由于功率限制,发射距离有限,无法达到实际雷达适用距离要求。另外,该实验中由于实验环境的限制,没有进行空测实验,空测对消后可适当消除环境对测量的影响,大大提高 RCS 测量精度,且该系统中 TDS 信号信噪比有待增强,这是下一步实验的开展方向。

参考文献:

- [1] Liu Shenggang, Zhong Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2009, 38(5): 481-486. (in Chinese)
刘盛纲, 钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展 [J]. *电子科技大学学报*, 2009, 38(5): 481-486.
- [2] McGowan R W, Cheville R A, Grischowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging [J]. *IEEE Trans Microwave Theory & Techn*, 2000, 48(3): 417-418.
- [3] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26399-26408.
- [4] Gente R, Jansen C, Geise R, et al. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2012, 2(4): 424-431.
- [5] Jagannathan A, Gatesman A J, Horgan T, et al. Effect of periodic roughness and surface defects on the terahertz scattering behavior of cylindrical objects[C]//SPIE, 2010, 7610: 76710E.
- [6] Hu Ying, Wang Xiaohong, Guo Lantao, et al. Terahertz time-domain spectroscopic study of carbon monoxide [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(6): 1008-1011. (in Chinese)
胡颖, 王晓红, 郭澜涛, 等. 一氧化碳的太赫兹时域光谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(6): 1008-1011.
- [7] Zhu Siyuan, Zhang Man, Shen Jingling. Terahertz fingerprint spectra of sulbenicillin, sultamicillin, mezlocillin, and ticarcillin [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 626-630. (in Chinese)
朱思源, 张曼, 沈京玲. 磺苄西林、舒他西林、美洛西林、替卡西林的太赫兹指纹谱研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 626-630.
- [8] Yang Yang, Yao Jianquan, Zhang Jingshui, et al. Terahertz scattering on rough copper surface [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2013, 32(1): 36-39, 79. (in Chinese)
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 [J]. *红外与毫米波学报*, 2013, 32(1): 36-39, 79.
- [9] The terahertz spectrometer of China Aerospace Science & Industry Corp is Available[Z]. <http://www.sasac.gov.cn/n1180/n1226/n2410/n314319/15069350.html>, 2013. (in Chinese)
中国航天科工太赫兹光谱仪面世 [Z]. <http://www.sasac.gov.cn/n1180/n1226/n2410/n314319/15069350.html>, 2013.
- [10] Zhang Dongwen. Research on terahertz time-domain spectroscopy of GaSe and difference frequency generation of terahertz radiation in GaSe [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
张栋文. GaSe 晶体太赫兹时域光谱及差频产生太赫兹辐射源研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [11] Deng Bin. Research on synthetic aperture radar micro-motion target indication [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
邓彬. 合成孔径雷达微动目标指示 (SAR/MMTI) 研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.