

角反射器在太赫兹波段的散射特性研究

梁美彦¹, 张存林²

(1. 山西大学电子信息工程系, 山西 太原 030013;

2. 首都师范大学物理系 太赫兹波谱与成像北京市重点实验室 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要: 太赫兹雷达散射特性的研究对于目标识别、跟踪以及截获有重要意义. 设计了 0.22 THz 频率步进雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量系统, 提出了针对频率步进太赫兹雷达信号体制下, 角反射器 RCS 的提取方法. 采用实验与仿真相结合的方式, 得到了单个角反射器和角反射器组在 4° 范围内的太赫兹雷达散射截面. 结果表明, 角反射器类目标的 RCS 实验测量结果与理论计算结果在误差范围内一致性较好, 为进一步精确测量目标在太赫兹波段的散射特性奠定了研究基础.

关键词: 太赫兹; 目标特性; 雷达散射截面; 频率步进

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A

Scattering characters of the corner reflectors in THz band

LIANG Mei-Yan^{1*}, ZHANG Cun-Lin²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China;

2. Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: The study of terahertz radar scattering characteristics is important for target identification, tracking, and interception. A 0.22 THz stepped-frequency Radar Cross Section (RCS) measurement system is designed, and the RCS extraction method is also proposed. Using the combination of experiments and simulations, the terahertz radar cross section of a single corner reflector and corner reflector group within 4° is obtained. The results show that the RCS experimental results and the theoretical calculation results of the corner reflector target are in good agreement within the error range, which lays the foundation for further accurate measurement of the scattering characteristics of the target in the THz band.

Key words: THz, target properties, radar cross section, stepped-frequency

PACS: 87.50.U-84.40.Xb 41.20.Jb

引言

雷达散射截面(Radar Cross Section, 简称 RCS)是描述目标对电磁波散射能力的物理量, 是目标特性中的重要参数. 在太赫兹波段开展目标散射特性的研究, 是太赫兹雷达探测和成像的物理基础, 也是军事目标隐身研究的技术基础. 目前, 军事上常用的隐身手段主要有两种, 一种是基于形状的隐身, 另一种是基于材料的隐身, 本质都是通过减少目标的雷达散射截面, 从而达到隐身的目的. 但是, 这些隐身

手段都是针对军事上成熟雷达频段的隐身, 尚未发现一种材料可以实现全波段隐身. 因此, 超宽带太赫兹雷达通过测量不同频率和不同入射角下目标 RCS 的响应, 获得其形状、体积、姿态、表面材料的电磁特性参数以及粗糙度等物理量, 对于隐身目标的探测、识别、跟踪以及截获都有重要意义^[1-2].

国内外各大研究机构已经开展了太赫兹波段目标 RCS 的研究. 代表性的成果有 2010 年, 丹麦技术大学基于太赫兹时域光谱的紧缩场模型, 选择 0.3 THz、0.7 THz、1.1 THz 三个频点, 在不同入射角上

收稿日期: 2017-09-22, 修回日期: 2017-12-31

Received date: 2017-09-22, revised date: 2017-12-31

作者简介(Biography): 梁美彦(1984-), 女, 山西太原人, 讲师, 博士. 主要研究领域为太赫兹雷达、合成孔径雷达. E-mail: norways_forest@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: norways_forest@163.com

得到了 F-16 战斗机缩比模型的 RCS^[3], 该实验结果将与标准 X 波段目标的 RCS 精确对比, 为军事目标的探测和识别提供了理论依据; 2010 年, 美国麻省理工学院亚毫米波实验室用量子级联激光器作为发射机, 在频率为 2.4 THz 时, 对坦克 T-80BV 的缩比模型进行了实验研究, 在方位角为 $\pm 4.8^\circ$ 的范围内, 测得 RCS 的最大值为 22.3 dBsm^[4]; 国内关于太赫兹波段目标 RCS 的研究起步较晚, 2013 年, 哈尔滨工业大学的李慧宇等^[5-7] 基于 2.52 THz 实验系统, 研究了高斯波束对圆柱、球等标准体目标太赫兹 RCS 的影响; 同年, 中国工程物理研究院江舸^[8] 等采用 0.14 THz 雷达系统, 对航母缩比模型的 RCS 进行了研究, 通过近-远场变换, 并利用 CLEAN 算法, 提高了 RCS 测量的精度. 2014 年, 天津大学以钛宝石飞秒激光振荡级为抽运源, 搭建了 0.1 ~ 1.3 THz 的近单站式宽带太赫兹 RCS 测量实验系统, 以陆、海、空目标—装甲车、航母、战斗机的缩比模型为研究对象, 探测了这些模型在 360° 范围内, 太赫兹 RCS 的分布, 为太赫兹波段目标的隐身设计和散射特性的研究奠定了基础^[9]; 2015 年, 国防科技大学研究了太赫兹频段目标介电系数、粗糙度对简单目标散射特性的影响^[10].

虽然国内外相关研究机构已经陆续开展了太赫兹雷达散射截面的研究, 也取得了一系列的成果. 但是, 由于影响雷达散射截面测量的因素较多, 加之太赫兹在电磁波谱上位置的特殊性, 国内对太赫兹波段 RCS 的研究起步较晚, 目前尚未形成常见军事目标的 RCS 的特征库, 而常见军事目标在太赫兹波段的 RCS 特征库, 对于目标识别以及跟踪有重要意义. 因此, 本文采用中心频率为

0.22 THz、带宽为 12 GHz 的频率步进雷达散射截面测量系统, 对常见军事目标一角反射器的 RCS 进行了实验研究. 由于频率步进雷达信号形式为时域一系列载频线性跳变的脉冲, 每个频率点的信号分时发射, 这种体制的雷达更易于提取目标在发射频点上的 RCS, 得到目标在每个频点上的 RCS, 进而在大带宽上对目标的散射特性进行研究, 为了验证实验结果与仿真的一致性, 每次实验都选取两次代表性的结果作为对比.

1 0.22 THz 雷达散射截面测量系统

图 1 为 0.22 THz 雷达散射截面测量系统, 主要包括频率源、天线系统、射频前端、中频模块、信号采集与处理模块五个部分. 系统工作时, RCS 测量系统接收上位机串口 RS232 发送的频率控制命令, 通过 FPGA 控制单元将命令转换为频综参数信息, 完成系统频综控制, 这些信息包括工作模式、脉冲宽度、脉冲重复频率等参数; 其次, 产生的低频信号经过倍频、滤波后, 最终产生脉宽和脉冲重复周期可调的频率步进太赫兹脉冲信号, 再经发射天线辐射到自由空间; 最后, 在 FPGA 的控制下, 中频模块和信号处理模块将回波信号下变频后, 进行信号处理, 经以太网回传到上位机. 太赫兹雷达散射截面测量系统的具体参数见表 1, 该系统主要功能是用于成像以及目标散射特性的测量.

由表 1 可知, 太赫兹 RCS 测量系统功率约为 5 mW, 中心频率为 0.22 THz. 0.22 THz 在电磁波谱上位于大气窗口, 空气中的水蒸气在这个频点附近的吸收较少(~7 dB/km), 因此, 该雷达可探测距离为

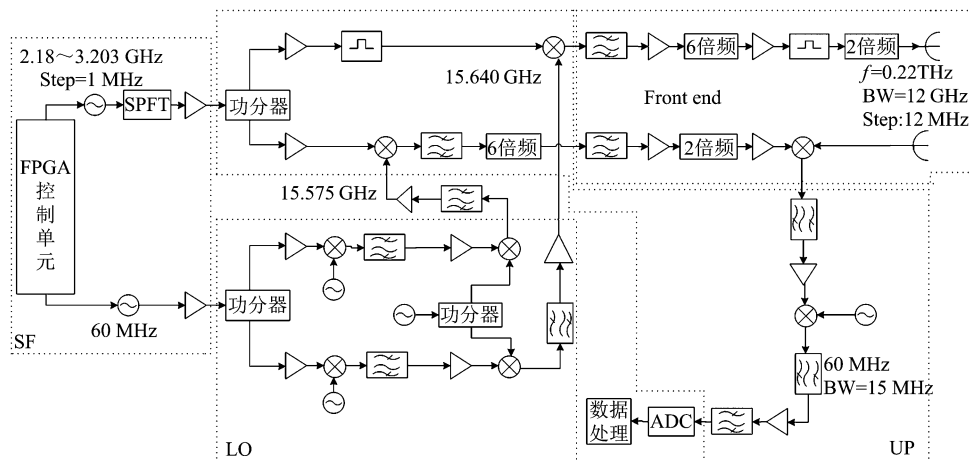


图 1 0.22 THz 雷达系统框图
Fig. 1 Block diagram of 0.22 THz radar system

几十米的强反射目标^[11].

表 1 RCS 测量系统参数

Table 1 The parameters of the RCS measurement system

中心频率(f_0)	0.22 THz
频率范围	220 ± 6 GHz
工作模式	RCS 测试
输出功率 (P)	5 mW
波形	频率步进
步进量 (Δf)	12 MHz
脉冲数目	1 024
总带宽 (B)	12 GHz
脉宽(τ)	100 ns
脉冲重复周期	60 μ s
探测角度范围	4°
天线波束宽度	14°
接收机噪声系数	< 12 dB

太赫兹 RCS 测量系统产生的信号形式如图 2 所示,频率步进信号是一串载频连续线性变化的矩形脉冲序列组成,其中,脉冲起始频率 $f_0 = 0.214$ THz,脉冲时间宽度 $\tau = 100$ ns,重复周期 $T_r = 600$ μ s,每帧信号由 N 个脉冲组成, $N = 1 024$,频率步进量 $\Delta f = 12$ MHz,由于每帧信号所包含的脉冲序列载频是线性跳变的,因此,更易于提取目标在发射频点上的雷达散射截面.

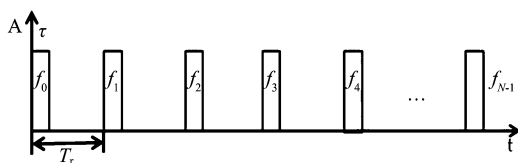


图 2 太赫兹频率步进信号形式

Fig. 2 Wave form of THz step-frequency signals in a burst

2 RCS 的计算方法

2.1 RCS 的理论计算

当电磁场入射到被测目标表面后,电磁波发生后向散射,这些散射场包括波阻抗的变化导致的反射场、目标的棱角结构产生的绕射和多重散射场等.雷达散射截面就是用来表征被测目标散射波能量大小的物理量,用符号 σ 来表示.由于 RCS 的计算较为复杂,一般采用远场近似计算.在远场情况下,入射波可以看作平面波.根据电磁散射理论,定义散射体的广义雷达散射截面^[12-13]如下:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{p_s}{p_i} = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (1)$$

其中 σ 为雷达散射截面, p_i 和 p_s 为入射波和散射波的功率密度, E_i 和 E_s 为入射波和散射波的电场强度, R 为目标与雷达之间的距离.

由式(1)可知,使 $R \rightarrow \infty$ 是为了满足雷达入射波为平面波的条件,也就是远场条件.但实际测量过程中,目标与雷达之间距离总是有限的,因此人们规定了常用的标准远场测量条件,即:

$$R \geq 2 \frac{d^2}{\lambda}, \quad (2)$$

其中 d 为被测目标的尺度, λ 为入射电磁波波波长.

用式(1)计算一个特定目标的 RCS 是比较复杂的,从物理意义上来说, RCS 可以看作是目标后向散射投影截面(投影截面)、探测目标截获雷达总能量的比例(反射率)、目标二次辐射后,返回接收天线方向的能量比例(方向性)三个因素共同作用的结果,可以简单表示为:

$$\sigma = \text{投影截面} \times \text{反射率} \times \text{方向性}. \quad (3)$$

目标的雷达散射截面 σ 具有面积的量纲,当 RCS 动态范围较大时,常用其相对于 1 m^2 的对数来表示,即分贝数,用公式表示为:

$$\sigma(\text{dBsm}) = 10 \lg \frac{\sigma(\text{m}^2)}{1(\text{m}^2)}, \quad (4)$$

式(3)和式(4)对目标雷达散射截面进行理论计算的基础.

2.2 RCS 的估算方法

影响目标雷达散射截面的因素较多,总的来说主要有四个方面:第一,目标的几何参数,包括目标的形状、尺寸和结构等参数;第二,目标材料的电磁特性参数,包括介电参数、磁导率和波阻抗等;第三,入射电磁波参数,这些参数是指入射波的频率、波形以及极化形式等;第四,目标相对于电磁波入射和散射方向的夹角.

为了优化雷达总体设计、开发鲁棒识别算法,对目标的 RCS 的准确估算非常关键.准确估算目标 RCS 需要综合考虑目标几何结构、材料电磁特性、入射波参数以及电磁波散射方向等.目前,对目标 RCS 的估算有两种方法:即精确估算和粗略估算.精确估算目标的 RCS 需要多领域的技术知识为背景,但即使对于形状简单的目标,精确计算 RCS 都非常困难.这是因为精确估算目标的 RCS 需要求解由多个边界条件组成的目标散射波微积分方程组,这些方程不但非常复杂,而且边界条件还需要同时满足麦克斯韦方程.即使得到一个特定的解,这个解也很难得到理论解释,并且几乎不可能通过计算机编程实

现,因此,对目标 RCS 的粗略估计是一个切实可行的选择.一般而言,RCS 近似估算都要求目标位于光学区,在这种情况下,大多估算方法得到的 RCS 值与真实值相差几个 dB,这种浮动是可以被接受的.研究表明,RCS 粗略估算的方法同样也适用于复杂目标,因此,采用转台旋转扫描的方法,探测不同入射角情况下,角反射器在太赫兹波段的雷达散射截面,并与仿真结果进行对比.

3 实验装置

RCS 测量实验场景如图 3 所示,被测目标置于转台上,调节目标与雷达天线等高,确保雷达天线主瓣能够覆盖所有被测目标.实验时,通过理想转台的旋转来改变雷达入射角,从而提取不同视角下,目标的 RCS 对频率的响应.一般而言,RCS 测量需要满足远场条件,同时背景杂波和噪声足够低,才能准确而有效地测出目标在该频率点下的 RCS,如果背景噪声太高,或被测目标的 RCS 太低,将严重影响测量精确度.

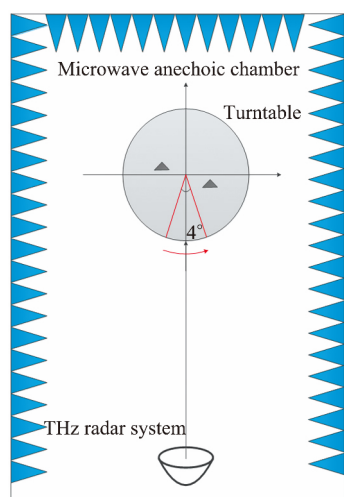


图 3 太赫兹雷达散射截面测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of THz RCS measurement system

太赫兹 RCS 测量系统的功率在毫瓦量级,因此选择角反射器为被测目标,这是因为角反射器的后向散射方向图主瓣较宽,其 3dB 波瓣宽度约为 40° ,因此其散射波幅度随视角变化较缓,稳定性强,这样可以保证系统最大程度的接收回波能量,从而提高 RCS 的测量精度.综合考虑回波信噪比和实验中需要满足的标准远场条件,将转台置于距离雷达天线约为 6 m 的位置,同时,整个系统位于微波暗室中,通过将吸波材料遮盖实验中不需要的反射体以及转

台表面,来降低支撑转台以及周围反射体对环境背景的影响.

图 4 为实验场景对应的实物照片,其中 (a) 为实验环境和实验装置,(b) 为太赫兹雷达散射截面测量系统,(c) 为被测角反射器.实验时,将目标置于被吸波材料覆盖的转台上,转台匀速旋转,转速约为 $0.21^\circ/\text{s}$,采样间隔为 0.01 度.在转台旋转时,太赫兹 RCS 测量系统发送频率步进信号,在规定 0° 为正入射的前提下,整个测量过程位于正入射方向 -2° 到 $+2^\circ$ 的范围,即转台在整个测量过程中产生 4° 的转角,期间,太赫兹 RCS 测量系统共发送 312 帧跳频信号,每帧信号由 1024 个频率线性步进的脉冲串组成,频率范围为 $0.214 \sim 0.226 \text{ THz}$,系统通过采集每个角度上的回波信号,经过定标计算后,得到目标在该角度和频率下的 RCS.

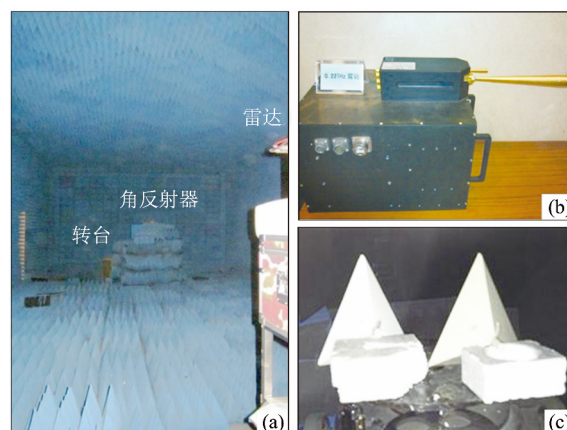


图 4 实验装置实物照片 (a) 实验环境 (b) 太赫兹 RCS 测量系统 (c) 角反射器

Fig. 4 Photographs of the experiment setup (a) Experimental environment (b) THz RCS measurement system (c) Corner reflectors

4 仿真和实验结果

由于目标的 RCS 是频率(波长)和雷达视线角的函数.就三角形三面角反射器而言,当雷达正入射角反射器时,它的 RCS 最大,其主瓣部分散射截面的经验公式为:

$$\sigma = 10 \log\left(\frac{4\pi b^4}{3\lambda^2}\right) \quad (5)$$

其中, b 为角反射器的直角边长, λ 为入射波的波长.由公式(5)可知,对于角反射器类的目标,雷达波长越短,其 RCS 越大.下面采用太赫兹 RCS 测量系统对单个角反射器(选择 $b_1 = 12 \text{ cm}$ 、 $b_2 = 20 \text{ cm}$ 的两个角反射器)和角反射器组(两个角反射器边

长 $b_1 = b_2 = 12$ cm) 进行实验测试, 并与理论/仿真结果进行了对比。

4.1 角反射器在太赫兹波段的 RCS

4.1.1 理论计算结果

对于直角边长为 12 cm 和 20 cm 的角反射器, 在频率为 0.22 THz 的入射波照射下, RCS 的最大值分别为:

$$\sigma_{1\max} = 10 \log \left(\frac{4\pi b_1^4}{3\lambda^2} \right) = 10 \log \left[\frac{4\pi \times (0.12)^4}{3 \times (1.36 \times 10^{-3})^2} \right] \approx 27 \text{ dBsm} \quad (6)$$

$$\sigma_{2\max} = 10 \log \left(\frac{4\pi b_2^4}{3\lambda^2} \right) = 10 \log \left[\frac{4\pi \times (0.2)^4}{3 \times (1.36 \times 10^{-3})^2} \right] \approx 35.6 \text{ dBsm} \quad (7)$$

4.1.2 实验结果

图 5 是对单个角反射器 RCS 测量场景的示意图, 角反射器置于转台上, 规定 0° 为正入射(图示方向为 0°), 转台角度从 -2° 到 $+2^\circ$ 变化, 实验中, 分别对直角边长为 12 cm 和 20 cm 的角反射器进行了测试。



图 5 单个角反射器 RCS 测试场景示意图

Fig. 5 Scene view of RCS measurement model for a single corner reflector

图 6 和图 7 分别代表直角边长 $b_1 = 12$ cm 和 $b_2 = 20$ cm 的角反射器 RCS 实验结果. 其横坐标为观测角度, 纵坐标为目标 RCS 随观测角的变化曲线. 为了排除实验的偶然性, 每个角反射器采用两次代表性的测试结果作为对比. 图 6 中蓝、绿、红三条线分别表示边长为 12 cm 的角反射器在 220 GHz、222 GHz 和 224 GHz 三个频率点上的实验结果, 将两次实验得到的 RCS 值平均后, 得到该角反射器在这三个频率点上的 RCS 值, 分别为 31 dBsm、34 dBsm 和 35.8 dBsm; 为了便于对比, 系统还测试了边长为 20 cm 的反射器(图 7), 其 RCS 在这三个频率点上的测试结果分别为 38 dBsm、39.5 dBsm 以及 40.5 dBsm. 图 6 和图 7 中的 RCS 都是通过校准体定标得到的, 定标体为直角边长为 30 cm 的角反射器。

从实验结果可以看出, 对于角反射器类常见军事目标, 散射截面随着雷达入射频率增加而越大, 与

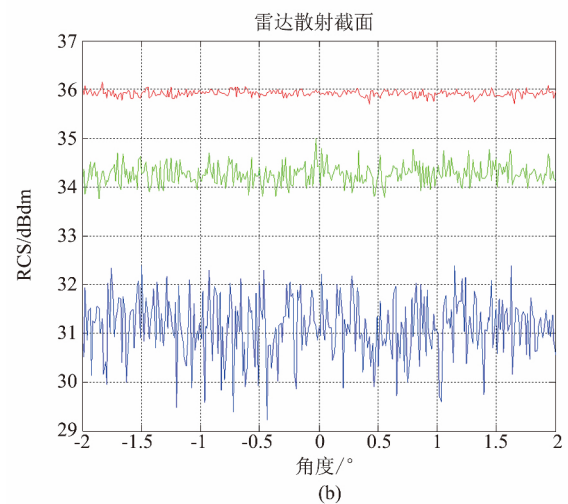
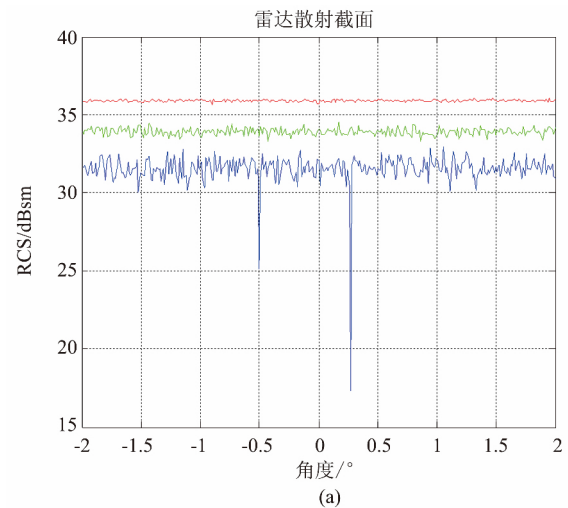


图 6 边长为 12 cm 的角反射器 RCS 随观测角的变化 (RCS ~ θ)

Fig. 6 The RCS changing curve for a corner reflector $b = 12$ cm

理论分析一致. 同时, 在观测范围内, 单个角反射器的 RCS 的值基本保持恒定, 只存在一定范围内的微小起伏, 这是由于角反射器后向散射方向图的主瓣较宽、变化较缓, 其散射特性在一定角度范围内, 具有很强的稳定性, 因此, 实验结果与理论分析取得了较好的一致性。

4.2 角反射器组在太赫兹波段的 RCS

对角反射器组测试的实验场景如图 8 所示, 将两个角反射器置于转台上, 距离为 d , 两个目标关于雷达视线对称, 规定图示位置雷达入射角为 0° . 用同样的方法对角反射器组在 4° 范围内的 RCS 进行测试。

4.2.1 仿真结果

在理想条件下, 角反射器组满足远场近似, 可以

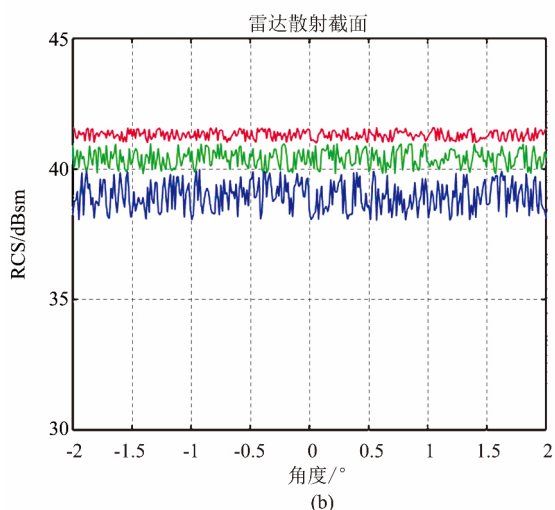
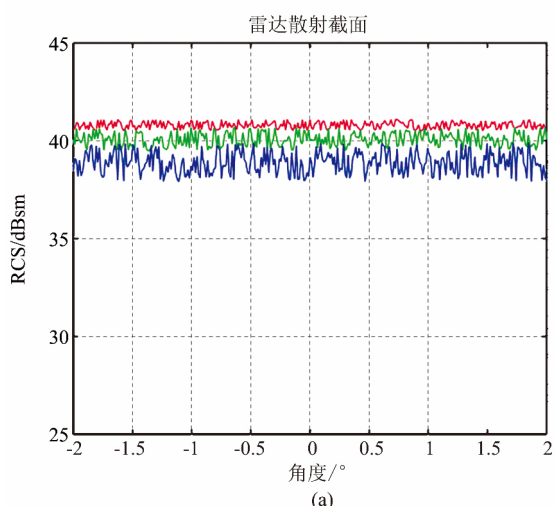


图7 边长为 20 cm 的角反射器 RCS 随观测角的变化 (RCS ~ θ)
Fig. 7 The RCS changing curve for a corner reflector $b = 20$ cm



图8 角反射器组 RCS 测试场景示意图
Fig.8 Scene view of RCS measurement model for corner reflectors group

等效于两个强散射点 因此 该实验采用理想散射点模型来对其仿真. 图9 是入射波频率 $f = 0.22$ THz 时 对相距为 d 的两个理想射点 RCS 的仿真结果, 图9(a) 是两个散射点的横向距离 $d = 12$ cm 时 RCS 随观测角的变化; 图9(b) 是两个散射点的横向距离 $d = 15$ cm 时 RCS 随观测角的变化.

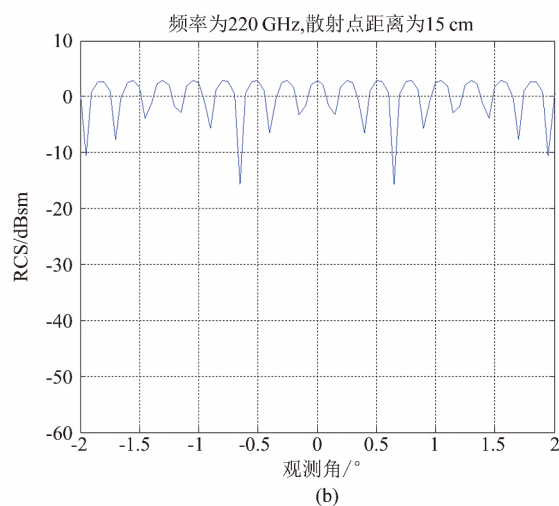
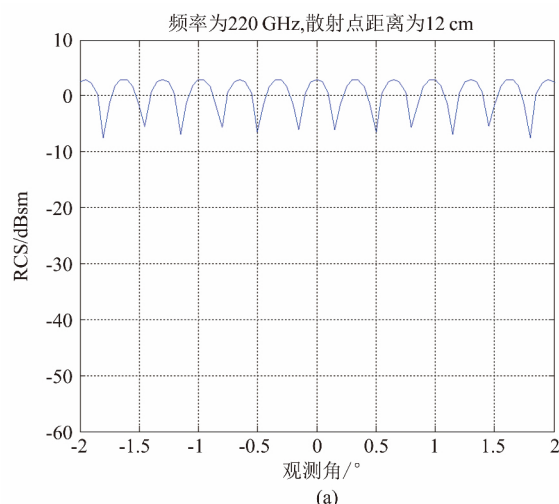


图9 两个散射点的仿真结果 (RCS ~ θ)
Fig.9 The simulation results for the two scattering points (RCS ~ θ)

4.2.2 实验结果

图10 是入射波频率 $f = 0.22$ THz 时 角反射器组 RCS 的实验结果. 角反射器组直角边长都为 12 cm 横向距离为 d . 由于目标尺度大于雷达波长 ($\lambda = 1.36$ mm) 因此 角反射器处于光学区 目标可以近似看作两个强散射点. 其中 图10(a) 是两个目标距离 $d = 12$ cm 时 RCS 的测量结果; 图10(b) 是两个散射点距离增加到 $d = 15$ cm 时 RCS 的测量结果.

从图9 的仿真结果和图10 的实验结果 可以得到下面结论:

第一 当入射波频率 $f = 0.22$ THz 观测范围为 4° 时 角反射器组 RCS 的幅度随着观测角在一定范围内起伏;

第二 随着两个散射点间距离 d 的增大 RCS 的

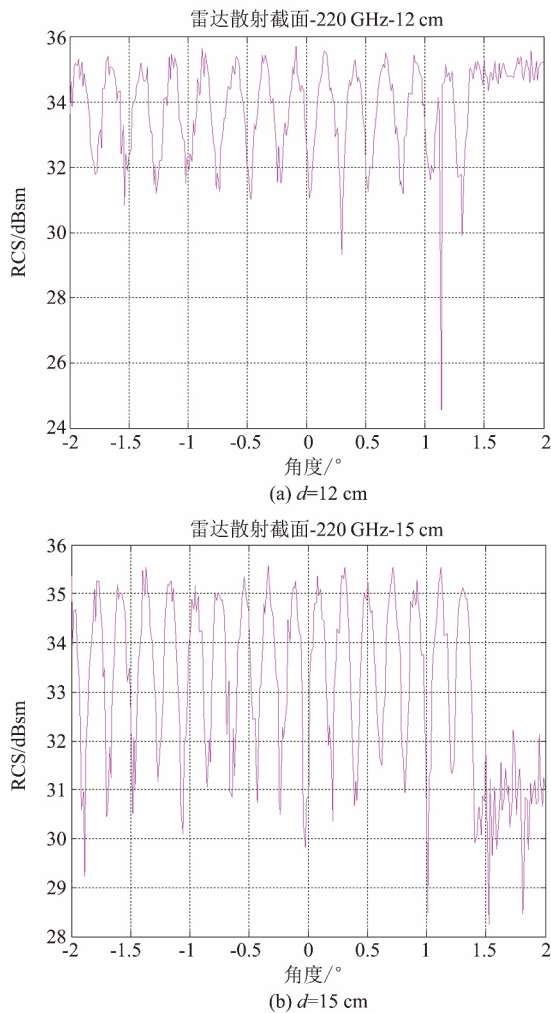


图 10 角反射器组的实验结果 (RCS ~ θ)
Fig. 10 The RCS changing curve for the corner reflector group

幅度变化范围更加大,同时起伏次数增加。

这是由于两个角反射器(或散射点)之间满足干涉条件,总的散射幅度由两个散射中心的散射波幅度相干叠加形成,所以 RCS 值会随着观测角的变化产生起伏。同时,根据波动理论,随着相干散射点距离 d 的增加,回波相邻两干涉波动峰值之间的角宽度就会变小。因此,实验中表现为,RCS 起伏次数增加。实验测量 RCS 曲线与理论仿真曲线变化规律具有很好的一致性。

4.3 分析与讨论

4.3.1 单个角反射器 RCS 结果分析

对单个角反射器实验结果可知,随着入射波频率的增加,RCS 呈逐渐增大的趋势,与理论分析完全吻合。但是,在 0.22 THz 这个频率点上,边长为 12 cm/20 cm 角反射器实测值约为 31 dBsm/38 dBsm,

而理论值为 27 dBsm/35.6 dBsm,理论和实验结果的平均误差在 3 dB 左右。这种误差的产生是由于:

第一,实验中有多重不可控因素。例如,理论计算时,只计算了远场条件下的反射波,而实际中目标的回波包括:波阻抗的变化导致的反射场、电磁波在导体中传播时,所激发的感应电流产生的散射场、目标的棱角结构产生的绕射以及多重散射场等,因此,实际测量数值会比理论值偏大。

第二,实验测量中没有严格满足远场近似。对于频率为 0.22 THz 的测量系统和边长为 12 cm 的角反射器,标准远场条件至少应满足 $R \geq 2d^2/\lambda = 2(0.12)^2/(1.36 \times 10^{-3}) = 21$ m,对于 20 cm 的角反射器,远场条件定义的距离更远。而实验中,为了降低背景噪声对 RCS 测量的影响,在综合考虑系统接收端信噪比与远场近似条件后,被测目标置于距离雷达 6 m 的转台上进行测量,这个距离远小于 21 m 的理论值,从而导致实际测量值比理论值偏大。

第三,受目前太赫兹器件的限制,太赫兹 RCS 测试系统发射功率较低,杂波和噪声对目标的影响较大。实验中,尽管已经考虑了环境影响,但环境影响没有完全消除,在一定程度上存在支架的反射、收发天线耦合以及多径效应,都会对实验结果带来一定影响,其中,由于支架回波在距离上和目标回波相同,因此,是重要的背景噪声来源,而背景噪声会在很大程度上影响 RCS 的测量精度。

第四,目标的雷达散射截面与目标本身的电磁特性有关。电磁特性主要是指金属的相对介电常数随频率的变化。由于金属材料的介电常数具有强烈的频率依赖性,介电参数作为影响目标散射特性研究的条件之一,必须建立目标材料在特定频率下的介电参数模型,同时结合目标的几何结构,才能实现目标散射特性进行精确计算。

第五,定标体选择对 RCS 测量结果的影响。目前,尚未针对太赫兹雷达散射截面定标体的报道,实验中一般都沿用微波波段常用的高精度金属球或圆柱体等定标,本实验中,由于太赫兹雷达系统的发射功率较低,若使用金属球定标,回波会被周围背景杂波与雷达系统噪声淹没,使 RCS 测试结果收到严重影响,因此,本文选择了直角边长为 30 cm 的角反射器为定标体,这也使实验结果与理论结果存在误差。

第六,角反射器的加工和装配误差对 RCS 的影响。一般而言,被测角反射器表面不是严格的光滑平面,在加工过程中,表面粗糙度、划痕、装配误差、接

触点的裂纹以及棱角都会对 RCS 的测量结果造成影响. 在微波频段时, 入射波长较长, 加工装配误差等对 RCS 的影响基本可以忽略. 在太赫兹波段, 波长与粗糙度的比值变小, 因此, 粗糙度^[14]、安装角度公差、裂纹、棱角等对 RCS 的影响不能忽略. 而且随着频率的增加, 加工误差对 RCS 的影响越大^[15].

第七, 转台误差. 在相应点频上测试角反射器的 RCS 时, 要利用外部触发将转台的角度变化作为触发信号, 因此转台的机械误差、转台转速不均匀性以及转台的卡顿都会对测试精度造成影响.

第八, 目标的 RCS 还与发射波和反射波的极化有关, 在不同极化方式下, 所测目标 RCS 的变化规律也是不同的.

4.3.2 角反射器组 RCS 结果分析

对于角反射器组而言, 在实验所观测的 4° 范围内, 可以等效为两个强散射点, 但其 RCS 值要远大于球形目标. 研究结果显示, 在观测范围内, 目标 RCS 实验结果与理论仿真结果表现出了较好的一致性. 但是, RCS 值存在一定偏差, 角反射器组 RCS 实验结果在 31 ~ 35 dBsm 之间起伏, 波动幅度范围为 4 dB 左右. 而对两个散射点 RCS 的仿真结果是在 0 dB 左右起伏, 产生这种情况的原因除了对单个角反射器所分析的几种因素以外, 还存在下列原因:

第一, 仿真采用的模型为理想散射点模型, 而实验中采用的是角反射器这类强散射点. 理论上, 在观测角度范围内, 角反射器的 RCS 要远大于球形目标. 例如: 尺度都为 0.1 m 的角反射器目标和球形目标其 RCS 最大值相差约为 $\sigma_c - \sigma_s = 10 \log\left(\frac{4\pi b^4}{3\lambda^2}\right) - 10 \log(\pi r^2) \approx 35$ dB, 因此, 测量的 RCS 值与仿真结果的绝对值存在较大差异.

第二, 由于太赫兹属于电磁波频段与光学频段之间的过渡区域, 该频段电磁波的散射特性有别于微波与红外频段, 尚无成熟的目标散射分析理论. 使用传统的电磁计算理论或者几何光学理论对该频段目标散射特性进行分析, 都会产生较大的误差.

5 结论

目标雷达散射截面的探测与获取能力是评价雷达系统性能的指标之一. 雷达散射截面的获取不但对反隐身的研究意义重大, 而且通过太赫兹波段目标缩比模型 RCS 的测量, 为微波波段目标的 RCS 的估算提供了理论依据. 本文以雷达方程为基础, 利用中心频率为 0.22 THz 的频率步进雷达, 研究了单个

角反射器和角反射器组在观测角为 4° 的范围内的 RCS, 实验结果与理论仿真取得了较好的一致性, 误差也在允许范围之内. 但是, 由于 RCS 是一个比较复杂的物理量, 引起误差的原因与诸多因素有关, 文章最后从不同角度分析了目标几何结构、材质、电磁特性等因素对目标 RCS 的影响. 基于太赫兹雷达散射截面测量系统对目标 RCS 的研究, 存在很大潜力, 在未来战争中将用于隐身目标的探测、识别、跟踪以及截获, 有重要的实用价值和现实意义.

References

- [1] XU Jing-Zhou, Zhang Xi-Cheng. *Applications of Terahertz Science and Technology* [M]. Beijing: Peking 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.
- [2] LEE Yun-Shik. *Principles of Terahertz Science and Technology* [M]. translated by Cui W Z, Beijing: National Defense Industry Press (Lee Yun-Shik 著. 太赫兹科学与技术原理, 崔万照译, 北京: 国防工业出版社), 2012.
- [3] IWASZCZUK K, HEISELBERG H, JEPSEN P U, Terahertz radar cross section measurements [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26399-26408.
- [4] DANYLOV A A, GOYETTE T M, WALDMAN J, et al. Terahertz Inverse Synthetic Aperture Radar (ISAR) Imaging with quantum cascade laser transmitter [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(15): 16264-16272.
- [5] LI Hui-Yu, LI Qi, XIA Zhi-Wei, 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.
- [6] LI Hui-Yu, LI Qi, SHE Jian-Yu, et al. Research into Influence of Gaussian Beam on Terahertz Radar Cross Section of a Semicircular Boss [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, **34**(7-8): 480-487.
- [7] LI Hui-Yu, LI Qi, XUE Kai, et al. Research into influence of Gaussian beam on terahertz radar cross section of a conducting cylinder [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, **34**(3-4): 289-298.
- [8] JIANG Ge, CHENG Bin-Bin, ZHANG Jian, 0.14 THz radar imaging based Radar Cross Section measurement [J]. *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology*, (江舸, 成彬彬, 张健. 基于 0.14 THz 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.
- [9] LIANG Da-Chuan, WEI Ming-Gui, GU Jian-Qiang, et al. Broad-band time domain terahertz radar cross-section research in scale models [J]. *Acta Physica Sinica*, (梁达川, 魏明贵, 谷建强, 等. 缩比模型的宽频时域太赫兹雷达散射截面 (RCS) 研究. 物理学报), 2014, **63**(21): 85-94.
- [10] WANG Rui-Jun. Research on Key Technology of Target Scattering Characteristics at Terahertz Frequencies [D], Changsha: National Defense University, (王瑞君. 太赫兹目标散射特性关键技术研究, 长沙: 国防科技大学), 2015.

(下转第 324 页)

分辨率的视在发射率增量均方差分别为 0.4731×10^{-4} 、 0.52497×10^{-6} 和 0.19074×10^{-6}), 直至消失.

References

- [1] LI X, WANG Yi-Ting. Prospects on future developments of quantitative remote sensing [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, **68**(9): 1163-1169. (李小文, 王祎婷. 定量遥感尺度效应当议[J]. *地理学报*, 2013, **68**(9): 1163-1169.)
- [2] Li X, Strahler A H, Friedl M A. A conceptual model for effective directional emissivity from nonisothermal surfaces [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1999a, **37**(5): 2508-2517.
- [3] Raffy M, Gregoire C. Semi-empirical models and scaling: A least square method for remote sensing experiments [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(13): 2527-2541.
- [4] Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1997, **35**(3): 747-755.
- [5] LI X, ZHAO H, ZHANG H, et al. Global change study and quantitative remote sensing for land surface parameters [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(2): 365-370. (李小文, 赵红蕊, 张颢, 等. 全球变化与地表参数的定量遥感[J]. *地学前缘*, 2002, **9**(2): 365-370.)
- [6] QUAN J, ZHAN W, CHEN Y, et al. Downscaling remotely sensed land surface temperatures: A comparison of typical methods. *Journal of Remote Sensing*, 2013, **17**(2): 361-387. (全金玲, 占文凤, 陈云浩等. 遥感地表温度降尺度方法比较: 性能对比及适应性评价. *遥感学报*, 2013, **17**(2): 361-387.)
- [7] Balick L K, Scoggins R K, LINK L E. Inclusion of a simple vegetation layer in terrain temperature models for thermal IR signature prediction [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1981 (3): 143-152.
- [8] Norman J M, Becker F. Terminology in thermal infrared remote sensing of natural surfaces [J]. *Remote Sensing Reviews*, 1995, **12**(3-4): 159-173.
- [9] Wan Z, Dozier J. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 1996, **34**(4): 892-905.
- [10] Li X, Wang J. The definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(23): 2154-2158.
- [11] Albers B J, Strahler A H, Li X W, et al. Radiometric measurements of gap probability in conifer tree canopies. [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(3): 179-192.
- [12] Li X W, Wang J D. The definition of effective emissivity of land surface at the scale of remote sensing pixels. *Chinese Science Bulletin*, 1999, **44**(23): 2154-2158.
- [13] Li X, Wang Z. Comments on reciprocity in the BRDF modelling. *Progress in Natural Science*, 1999, **3**: 99-103.
- [14] Hu Z, Islam S. A framework for analyzing and designing scale invariant remote sensing algorithms. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **13**: 747-755.
- [15] LIU L. Simulation and correction of spatial scaling effects for leaf area index [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014, **18**(6): 1158-1168. (刘良云. 叶面积指数遥感尺度效应与尺度纠正[J]. *遥感学报*, 2014, **18**(6): 1158-1168.)
- [16] Feng G, Wang M, Wang M, et al. Connotations of pixel-based scale effect in remote sensing and the modified fractal-based analysis method [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, **103**(C): 183-190.
- [17] Greenhagen B T, Lucey P G, Wyatt M B, et al. Global silicate mineralogy of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer [J]. *Science*, 2010, **329**(5998): 1507-1509.
- [18] Allen C C, Greenhagen B T, Donaldson hanna K L, et al. Analysis of lunar pyroclastic deposit FeO abundances by LRO Diviner [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, **117**(E12).
- [19] MA M, CHEN SB, ZHOU C, et al. Major Element Abundances at the Apollo 15 Landing Site: Results from Diviner Data. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, **32**(1): 144-150. (马明, 陈圣波, 周超, 等. 基于 Diviner 热红外数据的 Apollo 15 登陆区元素含量反演 [J]. *岩石学报*, 2016, **32**(1): 144-150.)
- [20] Bandfield J L, Ghent R R, Vasavada A R, et al. Lunar surface rock abundance and regolith fines temperatures derived from LRO Diviner Radiometer data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2011, **116**(12): 96-111.
- [21] MA M. Study on the Lunar Surface Emissivity Inversion and Scale Effect Based on the Diviner Thermal Infrared Data of LRO Satellite [D]. Jilin University, 2016. (马明. 基于 LRO 卫星 Diviner 热红外数据的月表发射率反演及其尺度效应研究 [D]. 吉林大学, 2016.)

(上接第 314 页)

- [11] LIANG Mei-Yan, ZHANG Cun-Lin, Improvement in the range resolution of THz radar using phase compensation algorithm [J], *Acta Physica Sinica*. (梁美彦, 张存林. 相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究. *物理学报*), 2014, **63**(14): 148701-148701.
- [12] E. F. Knott, Radar cross section measurements (Van Nostrand Reinhold, New York, 1993).
- [13] D. L. Mensa, High resolution radar cross-section imaging (Artech House, Boston, 1991).
- [14] JIANG 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**(2): 24101-024101.
- [15] JIANG Shan, WANG Guo-Dong, WANG Hua-Shen, Effects Analysis of Machining Tolerance on Monostatic RCS of Triangular Trihedral Corner Reflectors [J]. *Aero Weaponry*, (姜山, 王国栋, 王化深. 三角形三角反射器加工公差对其单站 RCS 影响研究. *航空兵器*), 2006, (4): 24-27.