文章编号: 2095-4980(2014)06-0783-05

太赫兹波在粗糙金属球体目标上的散射特性

杨洋

(承德石油高等专科学校 河北省仪器仪表工程技术研究中心,河北 承德 067000)

摘 要:太赫兹波在粗糙金属球面散射中相干散射与非相干散射同时存在。在低频端散射主 要为相干散射,而相干部分随球表面粗糙度增大迅速递减;在高频端散射主要为非相干散射,且 散射结果与辐射的分布方式及分布规律有关,结果通常不是唯一的。高端与低端的散射结果通常 相差很大,但当粗糙金属球表面的粗糙度服从高斯分布时,高频端雷达散射截面的结果与低频端 雷达散射截面的结果近似一致。

关键词:太赫兹雷达散射截面;相干散射;非相干散射;粗糙金属球体;目标特性 **中图分类号:**TN957 **文献标识码:**A **doi:**10.11805/TKYDA201406.0783

Scattering characteristics of THz wave on rough metal sphere target

YANG Yang

(Hebei Instrument and Meter Engineering Technology Research Center, Chengde Petroleum College, Chengde Hebei 067000, China)

Abstract: Coherent scattering and incoherent scattering can be both found in the scattering research of terahertz wave on rough metal sphere target. Coherent scattering mainly happens in low frequency region, which will decrease rapidly as the sphere roughness increase. Incoherent scattering is mostly found in high frequency region, which is related to the mode and the regularity of radiation distribution as well. According to the study, the scattering results in low and high frequency regions are quite different from each other. The two scattering results appear to be approximately consistent when the sphere roughness is in Gaussian distribution.

Key words: Terahertz Radar Cross Section; coherent scattering; incoherent scattering; rough metal sphere; target characteristics

随着太赫兹技术的发展,太赫兹雷达目标特性受到有关人员的高度重视,国内外围绕这一领域的研究工作已 经取得了多项研究成果^[1-5]。在众多雷达目标体中球型目标是最重要且最简单的目标体,而且无论在微波还是红 外领域,雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)中针对球型目标都具有严格的解析解,因此被广泛用于微波雷 达与激光 RCS 的定标^[6-8]。太赫兹位于微波与红外(激光)之间,微波雷达与激光雷达的结论对太赫兹雷达具有重 要的借鉴意义。伴随着太赫兹技术的发展,太赫兹 RCS 的测试技术也得到了快速发展。目前,国内外太赫兹 RCS 测量中被选定的定标体一般都沿用微波 RCS 测量中的金属球或圆柱体等^[9-10],而专门针对太赫兹 RCS 的定标体 的相关内容未见报道。本文力图探究 2 个问题:一是微波在金属球形目标的散射一般为相干散射,而红外光在球 形目标的散射一般为非相干散射,那么位于微波与红外之间的太赫兹波在粗糙金属球体目标上的散射特性将会呈 现什么规律? 二是如果利用微波 RCS 中所选用的标准体来测量太赫兹 RCS,会对实验结果产生多大影响?

1 相干散射与非相干散射

有关金属球面的微波RCS与激光RCS的理论研究都已成熟^[11-13],2个领域中针对粗糙金属球表面的散射会有不同的表现:在微波领域,由于波长较长,RCS的大小除与各子波源的振幅有关外还与其相位有关,因此是矢量的叠加,各散射波之间的散射是相干散射,利用电磁散射理论中的Maxwell方程可以得到理想导体球的RCS的解析解,此时金属球面粗糙度对RCS的影响一般可以忽略^[14];而在红外光学领域,RCS的大小就只与各子波源的振

(1)

幅有关,因为此时各子波源之间散射是非相干散射,使用红外辐射场理论可以得到朗伯导体球的RCS的解析解^[15],此时金属球面粗糙度对RCS的影响变为核心因素。当频率位于红外与微波之间时,上述影响就会变得模糊或者复杂,前面提到的微波的相干散射和红外的非相干散射的特征会同时存在。

根据有关理论可知,一般粗糙物体的散射截面由相干部分和非相干部分共同构成^[16-17],即:

$$\sigma = \sigma_{\rm c} + \sigma_{\rm i}$$

对于微波,一般金属物体可近似视为理想光滑导体。但对于可见光和近红外,金属的表面粗糙度和有限介电 常数将对散射截面有明显影响。下面对粗糙表面最简单的目标体,同时也是最重要的球面体进行探讨。文献表明: 当粗糙球表面的高度起伏可以表示为高斯分布时,粗糙球表面的相干后向散射截面^[16]:

$$\sigma_{\rm c} = \pi a^2 \left| R(0) \right|^2 e^{-k_0^2 \delta^2} \tag{2}$$

式中: R(0)为垂直人射时的菲涅尔反射系数; δ为粗糙表面高度起伏均方根; a为粗糙球面的半径。

显然,随球表面粗糙度增大, σ_{c} 减小,当 $k_{0}\delta > 1.5$ 时, σ_{c} 几乎衰减为0。

按照文献[10]中的有关结论,粗糙球的非相干后相散射截面为:

$$\sigma_{i} = \int_{S} \sigma_{0} 2\pi a^{2} \sin\theta d\theta, \quad (0 \le \theta \le \frac{\pi}{2})$$
(3)

式中 σ_0 为单位面积上的RCS。

上式表明非相干后相散射截面由 σ_0 决定,因此 σ_0 不同,将导致 σ_i 不同。根据散射模式的不同,文献[15],[18] 给出了相应的 σ_0 的表达式。

若球面为理想朗伯散射面:

$$\sigma_0 = 4\rho_{2\pi}\cos^2\theta \tag{4}$$

而当散射面适合基尔霍夫近似中的条件,且金属粗糙表面粗糙度呈现高斯分布的情况下:

$$\sigma_0 = \frac{\sec^4 \theta}{s^2} |R_{11}(0)|^2 e^{-\frac{\tan^2 \theta}{s^2}}$$
(5)

式中:s称为均方根斜率, $s=4\delta^2/l^2$,其中l为相关长度,因此在一般情况下球面的RCS可以表示为:

$$\sigma = \sigma_{\rm i} + \sigma_{\rm c} = \pi a^2 \left| R(0) \right|^2 e^{-k_0^2 \sigma^2} + \int_{\rm c} \sigma_0 2\pi r^2 \sin\theta d\theta \tag{6}$$

该公式就是RCS理论的一般表达式,当然这个公式也可用于微波、红外领域。

2 太赫兹在粗糙金属球表面散射特性的分析

对公式(6)进行深入分析后可以得到:在低频的微波情况下,由于一般非相干散射中 $\sigma_0 \rightarrow 0 \pm \lambda >> \delta$,即 $k_0 \delta \rightarrow 0$,同时 $R(0) \rightarrow 1$,则上式中

$$\sigma = \pi a^2 \tag{7}$$

从这一结果可以看出,在低频情况下粗糙物体的散射截面与光滑物体的散射截面无明显差异。

在高频情况下(红外)粗糙球面通常满足 $\lambda << \delta$,即 $k_0 \delta$ 比较大,故雷达散射截面中相干散射部分 $\sigma_i \rightarrow 0$,因此

上式中 $\sigma = \sigma_{\rm c} = \int \sigma_0 2\pi a^2 \sin\theta d\theta_{\rm o}$

此时,当目标为朗伯体时,由式(4)得到:

$$\sigma = \frac{8}{3}\rho_{2\pi}\pi a^2 \tag{8}$$

而在基尔霍夫近似中,由式(5)得到:

$$\sigma = \pi a^2 \left| R(0) \right|^2 (1 + \frac{s^2}{2}) \tag{9}$$

式(8)、式(9)说明高频情况下RCS的结果与辐射的分布规律有关,其结果不是唯一的。

这种不同可以通过图1、图2给出的式(5)与式(4)的函数关系图得知。

当频率位于太赫兹领域时,从理论上讲,太赫兹雷达金属球面的散射截面可用式(6)表述,但在实际应用中,

太赫兹RCS计算关键要得到公式中 σ_0 与散射角及粗糙系数的函数关系,而这种函数规律一般需要通过散射实验得到,特别是要根据频率的大小及金属表面的粗糙程度来确定。



对于太赫兹高频段,例如当波长为30 μm,如果取 δ =50 μm,且*s*=0.25,此时满足 $k_0\delta$ >1.5 的条件,即此时相 干散射部分趋于0,而此时对于非相干部分,如果认为高度起伏符合高斯分布,则按照式(9)可以得到 σ = πa^2 。

而在太赫兹低频段,例如当波长为1 mm,如果仍然取 δ =50 μm,且s=0.25,此时满足 $k_0\delta \rightarrow 0$,即 $\lambda >> \delta$,相干散射部分趋于 π a^2 ,而此时非相干部分变得复杂得多,既不能简单地用式(8)表示,也不能随意地用式(9)表示,但 $\lambda >> \delta$ 的条件,导致粗糙金属表面可近似看作是光滑的,这样使得 σ_0 很小^[11],但具体函数关系式不确定。

如果利用微波RCS中所选用的标准体来测量太赫兹雷达的散射截面,对实验结果影响有多大?这个问题可以 在这里找到一些答案。

在太赫兹波段,当粗糙球表面的粗糙度通常服从高斯分布时,可以认为散射模式利用基尔霍夫近似的表达式 更为恰当,而当利用基尔霍夫近似时,由有关理论可以得到R(0)→1,且满足 s^2 <<1,此时式(9)的结论与式(7)中的 结论将会趋于一致,即: $\sigma = \pi a^2$ 。

这一结果表明,太赫兹高端与低端的金属球 面RCS一般情况下不同,但在一定条件下,结果 可以是一致的。而由于太赫兹低端就是微波,这 也就是为什么可以近似用微波的标准体作为太赫 兹RCS的标准体的缘故。

3 实验测试

由于验证太赫兹理论的实验往往受到实验条 件和实验系统体制的制约,因此只对上述理论分 析中所涉及的部分内容予以验证^[19],即上文中提 到的"太赫兹低端,通常可以近似用微波的标准 体作为太赫兹RCS的标准体,而不会给实验结果 带来大的差异","在低频情况下粗糙物体的散射 截面与光滑物体的散射截面无明显差异"。实验测 试系统的结构示意图如图3所示。



Fig.3 Experimental system diagram of terahertz target RCS 图 3 太赫兹目标雷达散射截面实验系统框图

上述太赫兹实验测试系统中太赫兹源的工作频率是位于低端的206.2 GHz,测试系统中的数据读取单元用来获得焦热电探测器的电压信号,这一电压信号的大小与太赫兹雷达目标散射截面的大小成正比^[20]。

验证内容时分别选择同一材质、表面粗糙、金属良导体、球型,且其半球反射率分别为ρ₂_π=0.38(对应 λ=1.06 μm) 和ρ_{2π}=0.7 的 2 个标准体的 RCS,且 2 个球的直径均为 3.00 cm ± 0.01 cm。按照红外辐射理论,激光 RCS 的大小与目标体半球反射率的大小直接相关,2 个同尺寸、同一材质的球型目标的 RCS 的大小差异可由式(8) 给出,即由这个球型目标体的表面粗糙度的半球 反射率所决定。而在太赫兹频段,这种差异给结 果带来的影响是很小的。在前期工作中测试了在 太赫兹低频端,由于半球反射率,即表面粗糙度 不同给被测目标 RCS 带来怎样的变化。实验数 据分别由表 1、表 2 给出^[19]。

上述测试结果(电压平均值)表明在太赫兹 低频端,金属球面的表面粗糙度的大小对 RCS 的影响是微小的,对于半球反射率相差近一半的 同尺寸、同材质的球型目标体,其 RCS 结果的 差异不超过 2%。

表1ρ2π=0.38 粗糙金属铝球型目标散射截面测量数据

Table1 Cross section measurement data about rough metal aluminum spherical targets of $\rho_{2\pi}$ =0.38

| display voltage | | average voltage/mV | | | | |
|-----------------|-------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|
| detection | 0.184 | 0.185 | 0.193 | 0.183 | 0.186 | 0.100 |
| signal | 0.188 | 0.193 | 0.196 | 0.194 | 0.188 | 0.189 |

表 2 ρ_{2π}=0.7 粗糙金属铝球型目标散射截面测量数据 Table2 Cross section measurement data about rough metal aluminum spherical

| targets o | $1 \rho_{2\pi} = 0.7$ | | | | | |
|-----------------|-----------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|
| display voltage | | the average voltage/ mV | | | | |
| detection | 0.197 | 0.188 | 0.199 | 0.185 | 0.179 | 0.102 |
| signal | 0.188 | 0.192 | 0.196 | 0.198 | 0.196 | 0.192 |

4 结论

1) 对太赫兹在粗糙金属球体目标上散射特性的研究结果表明:太赫兹雷达目标体上的散射由相干散射与非相干散射共同构成,在太赫兹领域的低频端,散射主要为相干散射,相干部分随球表面粗糙度增大迅速递减;而 在太赫兹领域的高频端,散射主要为非相干散射,散射结果与辐射的分布规律有关,结果通常不唯一。

2) 对于同一目标体太赫兹高端与低端的散射结果通常相差很大,但当粗糙金属球表面的粗糙度服从高斯分布时,高频端的激光 RCS 的结果与低频端微波 RCS 的结果趋向一致。

3) 太赫兹 RCS 的大小与目标体表面的粗糙度直接相关,但伴随不同的散射模式,散射截面与表征粗糙度的 函数关系是不同的,可能是显函数,也可能是隐函数,而这种不同又往往取决于太赫兹所处的频段。

4) 利用微波 RCS 中所选用的标准体来测量太赫兹雷达的散射截面时,实验结果影响是存在的,但影响不大, 也就是说如果在低频太赫兹领域分别用微波的标准体与太赫兹波的标准体测量同一目标的 RCS 时,不会对实验 结果带来大的差异,但在高频太赫兹领域情况如何还有待实验来加以检验。

鸣谢:本文实验内容是在天津大学攻读博士期间完成的,感谢姚建铨教授等老师给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 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研究[J]. 红外与毫米波学报, 2013,32(1):672-676.
 (YANG Yang,YAO Jian-Quan,ZHANG Jing-Shui, et al. Experimental research of terahertz scattering on rough copper surface[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012,32(1):672-676.)
- [2] 葛新浩,吕默,钟华,等.反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用[J].红外与毫米波学报,2010,29(1):15-18. (GE Xin-Hao,LV Mo,ZHONG Hua, et al. Terahertz wave reflection imaging system based on backward wave oscillator and its application[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010,29(1):15-18.)
- [3] Iwaszczuk K, Heiselberg H, Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements [J]. Optics Express, 2010,18(25): 26399-26408.
- [4] Goyette T M,Dickinson J C,Gorveatt W J,et al. X-band ISAR imagery of scale- model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact range[J]. SPIE Proceedings, 2004,5427:227-236.
- [5] 江舸,成彬彬,张健,等. 基于0.14 THz成像雷达的RCS测量[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):19-23. (JIANG Ge,CHENG Bin-bin,ZHANG Jian, et al. 0.14 THz radar imaging based Radar Cross Section measurement[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):19-23.)
- [6] 杨洋,姚建铨,宋玉昆,等. 球型目标在不同波段的雷达散射截面[J]. 激光与红外, 2011,41(5):552-556. (YANG Yang, YAO Jian-Quan,SONG Yu-kun, et al. The radar scattering cross section of different wave band for spherical targets[J]. Laser & Infrared, 2011,41(5):552-556.)
- [7] 梁子长,李鸣,岳慧,等. 高频区金属球定标RCS的近场修正[J]. 制导与引信, 2012,33(9):20-24. (LIANG Zi-chang,LI Ming,YUE hui,et al. Near field revision for RCS of metal sphere in high-frequency region[J]. Guidance &Fuze, 2012,33(9):20-24.)
- [8] 刘君,马瑶,渠立永,等. 微波暗室微散射目标RCS测量方法[J]. 解放军理工大学学报, 2013,14(2):19-24. (LIU Jun, MA Yao,QU Li-yong,et al. Research on radar cross section measurement method of low-scattering objects in microwave anechoic chamber[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2013,14(2):19-24.)

- [9] McGowan R W, Chevillee R A, Grischkowsky D R. Experimental study of the surface waves on a dielectric cylinder via terahertz impulse radar ranging[J]. IEEE Trans. on Microwave Theory and Technology, 2000,48(3):471-481.
- [10] 武亚君,黄欣,徐秀丽. 太赫兹目标RCS缩比测量技术[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(6):1541-1544. (WU Ya-jun, HUANG Xin,XU Xiu-li. Radar cross section measurement technique of targets at terahertz scale model. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(6):1541-1544.)
- [11] 张善杰. 工程电磁理论[M]. 北京:科学出版社, 2009:451-454. (ZHANG Shan-jie. Engineering Rectromagnetic Theory[M].
 Beijing:Science Press, 2009:451-454.)
- [12] 江长阴. 均匀圆球对平面波的散射[J]. 电波科学学报, 1996,11(3):65-88. (JIANG Chang-yin. The scattering of a planar wave by homogeneous sphere[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996,11(3):65-88.)
- [13] 杨洋,王晓鸥,陈历学,等. 1.06 μm激光雷达目标散射特性的实验研究[J]. 红外与激光工程, 2000,29(3):52-59. (YANG Yang, WANG Xiao-ou, CHEN Li-xue, et al. Experimental study of target scattering characteristic of radar for 1.06 μm[J], Infrared and Laser Engineering, 2000,29(3):52-59.)
- [14] 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. (YANG Yang, YAO Jian-Quan, TANG Shi-Xing, et al. The influence of the rough surface on radar target scattering cross section[J]. Laser & Infrared, 2011,41(7):800-803.)
- [15] 杨洋.激光雷达标准目标散射截面的研究[J].光学技术, 2000,26(4):344-347. (YANG Yang. Research of laser radar standard target cross section[J]. Optical Technique, 2000,26(4):344-347.)
- [16] 吴振森. 任意形状粗糙物体的激光后向散射[J]. 电子科学学刊, 1993,15(4):359-365. (WU Zhen-sen. Laser backscattering by an arbitrarily shaped dielectric object with rough surface[J]. Journal of Electronics, 1993,15(4):359-365.)
- [17] 王明军,李应乐,张辉,等.复杂目标激光雷达散射截面的数值计算[J]. 咸阳师范学院学报, 2007,22(4):12-14. (WANG Ming-jun,LI Ying-le,ZHANG Hui,et al. Numerically computed the Laser Radar Cross Section(LRCS) of complex targets[J]. Journal of Xianyang Normal University, 2007,22(4):12-14.)
- [18] 刘云飞,王福恒,董雁冰. 粗糙金属球体的激光散射截面的理论计算[J]. 系统工程与电子技术, 1992,3(5):69-76. (LIU Yun-fei,WANG Fu-heng,DONG Yan-bing. Theoretical calculation of the Laser Radar Cross Section of rough metallic spherical object[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 1992,3(5):69-76.)
- [19] 杨洋,姚建铨,钟凯. 太赫兹雷达散射截面测量中定标体的确定[J]. 激光与红外, 2014,44(10):1149-1153. (YANG Yang, YAO Jian-Quan,ZHONG Kai. Determine the terahertz radar cross section measurement calibration body[J]. Laser & Infrared, 2014,44(10):1149-1153.)
- [20] 杨洋. 点目标激光雷达散射截面的实验研究[J]. 承德石油高等专科学报, 2003,5(3):35-38. (YANG Yang. Experimental study on the radar scattering cross section of point target[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2003,5(3):35-38.)

作者简介:



杨 洋(1958-),男,河北省承德市人,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹雷达目标散射特性研究,获得市级以上教科研奖励6项,国家专利5项,发表论文90余篇.email:yangy1958@sohu.com.