

太赫兹时域光谱系统静区测试及数据处理

张旭涛, 孙金海, 蔡 禾, 张少华

(电磁散射重点实验室, 北京 100854)

摘 要: 为测量太赫兹时域光谱散射测量系统的静区场强分布, 以确定后续测量目标的尺寸, 将金属球在静区三维方向上移动测量回波, 分别采用不同软件处理实验数据并得到不同类型的数据拟合曲线, 由拟合曲线得到了静区的三维空间范围。通过不同类型的曲线拟合发现, 相对于入射波方向在静区横截面的两维方向上, 电场强度分布近似为高斯分布, 而在入射波方向上的场强分布在某一范围内存在波动现象。还对系统的线性度进行了测量, 结果显示了系统具有良好的线性度。

关键词: 太赫兹时域光谱; 静区; 场强; 拟合曲线

中图分类号: TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1125003

Quiet zone measurements and data processing of THz-TDS experiment system

Zhang Xutao, Sun Jinhai, Cai He, Zhang Shaohua

(Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: The quiet zone of terahertz time-domain spectroscopy experiment system was measured, which was very important for targets measurements. Experimental data had been processed with software packages of MATLAB and Origin respectively and corresponding fitting curves were gotten as a result. Relative to the travelling direction of electromagnetic wave, different fitting formulas including Gaussian were found describing the electric field intensity distribution very well in the cross section of the quiet zone transversely and vertically. However, there was fluctuation in quiet zone longitudinally. Additionally, the linear relationship between peak scattered electric field and metal sphere diameter was studied with this experiments.

Key words: terahertz time-domain spectroscopy; quiet zone; electric field intensity; fitting curve

收稿日期: 2016-03-11; 修订日期: 2016-04-20

作者简介: 张旭涛(1989-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹频段目标特性方面的研究。Email: mi_zhangxt@163.com

导师简介: 孙金海(1974-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事太赫兹技术方面的研究。Email: jinhaisun@126.com

0 引言

目前,针对太赫兹目标特性的测量系统通常包括两类:一类是基于微波上倍频的太赫兹系统,如国内中国工程物理研究院在 2011 年基于倍频发射链路和谐波混频接收方法实现了 140 GHz 的成像雷达实验系统^[1],这也是国内首部实现成像功能的固态电子学太赫兹实验雷达系统,美国马萨诸塞大学亚毫米波技术实验室(STL)建立的多套基于全固态电子学源的太赫兹紧缩场测量实验系统^[2-4],工作频点包括 240 GHz、350 GHz、524 GHz 等;另一类是基于激光下变频的太赫兹系统,如 STL 搭建的基于抽运气体激光源的 1.56 THz 紧缩场测量实验系统^[5];而太赫兹时域光谱技术作为激光下变频中的一种,其短脉冲探测技术与其他连续波探测技术截然不同。目前,国内外的研究主要集中于倍频连续波测量系统,对太赫兹时域光谱系统的报道较少。而涉及太赫兹时域光谱(THz-TDS)目标特性测量的报道中对静区测量的介绍更少,大多只是简单介绍一下太赫兹波束的峰值半高宽,如参考文献[6]中提到该系统目标处的太赫兹电场峰值半高宽(FWHM)为 73 mm。目前这种基于 THz-TDS 的目标特性测量系统所能达到的静区范围往往非常有限,不足十厘米,这就限制了 THz-TDS 对更大尺寸目标的测量,在只需对目标做定性分析的情况下,目标大小通常是按照波束的峰值半高宽来确定的,有时甚至会超过这个范围。文中将采用一种较为直接的方法来测量目标放置区三维空间的电场分布,作为放置目标的依据。静区通常是指暗室内受杂散波干扰小且满足远场条件的区域,是满足目标测试条件的暗室内最佳测试区域。通常暗室静区性能指标主要包括以下几个方面:场幅度均匀性-通常暗室内静区幅度锥削小于 1 dB,相位锥削小于 $\pi/8$,工作频率、交叉极化、背景等效 RCS 等。文中主要针对时域光谱系统静区的电场幅度做相应的测量和数据分析。

1 静区场强分布测试

文中的时域光谱系统如图 1 所示,采用球面镜作为太赫兹波扩束后的收发装置,暂假定与球面镜中心同一高度水平面上,两球面镜中心法线交点为

静区中心位置,以该位置作为测量参考点 O 。参照参考文献按照如下步骤对静区进行测试。

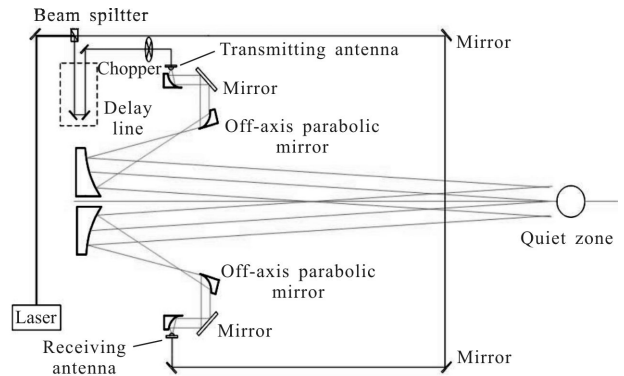


图 1 太赫兹时域光谱散射测量系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of THz-TDS experiment system setup

- (1) 测量空背景回波。由此观察静区空背景杂波。
- (2) 测量背景(泡沫支架)回波。由此观察静区背景杂波及泡沫支架对回波的贡献。
- (3) 在参考点放置平面镜,测量回波,以此作为系统最大发射信号。
- (4) 强散射体的选择,在光学区,两面角反射器最大 RCS 为 $8\pi a^2 b^2 / \lambda^2$, 三角形三面角反射器最大 RCS 为 $4\pi a^4 / (3\lambda^2)$, 方形三面角反射器最大 RCS 为 $12\pi a^4 / \lambda^2$, a, b 为边长;金属圆柱 RCS 为 $2\pi a l^2 / \lambda$, a 为半径, l 为柱长。金属球的 RCS 为 πa^2 , a 为球半径^[7]。考虑到金属球 RCS 与频率、姿态无关,且放置起来相对简便,所以在此次测量中采用直径 2 cm 的金属球(在保证灵敏度的前提下使用小于静区范围的金属球)。按图 2 所示方向,在参考点 O 附近 XOZ 平面内按照“十”字移动金属球,测量时均以 0.5 cm 为测量步长。将“十”字沿 Y 方向分别前移、后移一定距离后,按照上述测“十”字方法分别步进测量回波,多次测量。

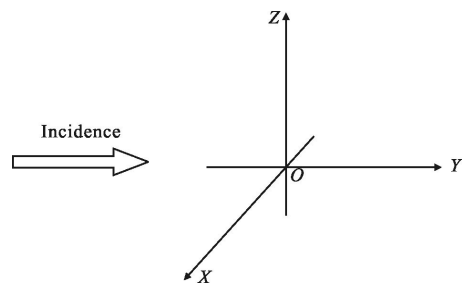


图 2 静区方向示意图

Fig.2 Schematic diagram of orientation in quiet zone

- (5) 选取回波场强最大值的平均值做出静区场

强分布图,目前太赫兹时域光谱系统所能做到的静区范围有限,这就限制了测试目标的尺寸,所以仅作定性分析的话可以对静区指标要求有所放宽,电场幅度起伏不超过 3 dB;若对 RCS 做定量分析,则需要静区的指标较高,要求场强起伏不超过 1 dB。

2 数据处理

首先在参考点处放置平面镜测回波信号作为参考。图 3 信号是平面镜的时域回波,图 4 是对整个时域回波做快速傅里叶变换(FFT)之后得到的幅度谱。可以看到太赫兹波脉冲能量主要集中在 0.1~1.1 THz 的范围内。

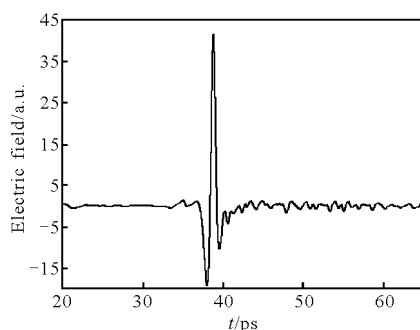


图 3 太赫兹波时域信号

Fig.3 Terahertz waveform in time domain

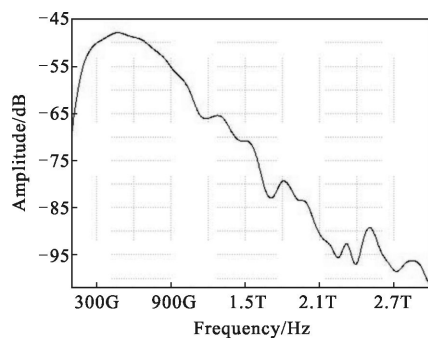


图 4 太赫兹波频谱

Fig.4 Amplitude spectrum of THz

下面分别采用 MATLAB、Origin 软件对测得的数据进行处理。

2.1 MATLAB 处理结果

MATLAB 的 cftool 工具箱是基于最小二乘法做出的曲线拟合^[8],拟合结果给出了拟合公式、SSE(误差平方和)、R-square(拟合优度,越接近 1,拟合结果越好)、Adjusted R-square(相比 R-square,剔除了自变量个数的影响)、RMSE(均方根误差)。选取各次测量最大值作图,拟合的结果如下。

X 轴方向拟合结果如图 5 和表 1 所示。

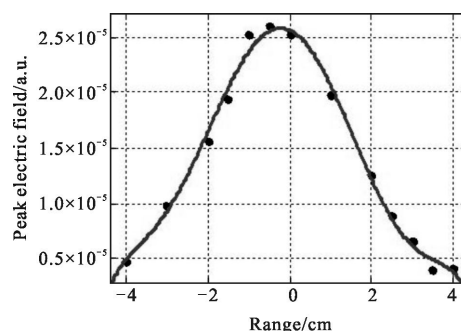


图 5 X 轴方向多项式拟合

Fig.5 Polynomial fitting of the X axis

表 1 X 轴场强 MATLAB 各拟合结果表
Tab.1 Fitting result along the X axis using MATLAB

Formula	$f(x)=p1*x^6+p2*x^5+p3*x^4+p4*x^3+p5*x^2+p6*x+p7$
SSE	7.102e-12
Adjusted R-square	0.983
RMSE	1.088e-6

Y 轴方向场强分布图如图 6 所示。

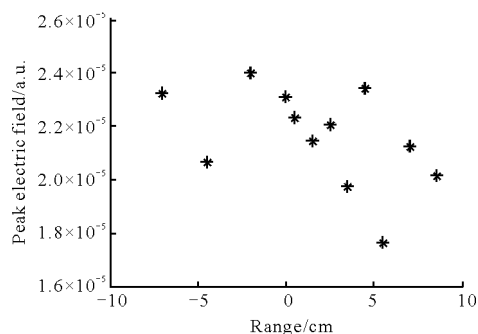


图 6 Y 轴方向场强分布图

Fig.6 Intensity of the electric field along the Y axis using MATLAB

从图中可以清楚看到 Y 轴方向的场强分布是在一定范围的无规律波动。分析认为波动主要是由于太赫兹波与背景噪声的相位差造成的;另外,系统误差及环境温湿度也会对测量结果造成一定影响。

Z 轴方向场强分布多项式拟合如图 7 和表 2 所示。X 轴和 Z 轴的场强分布可以通过多项式达到较好的拟合效果,通过拟合便能得到静区尺寸。另外,

测量中难免存在误差, 其中主要原因是在金属球移动过程中难以保证其位置绝对准确。

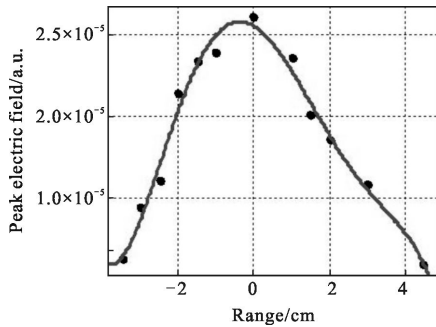


图 7 Z 轴场强分布多项式拟合图

Fig.7 Curve fitting of polynomial distribution along the Z axis

表 2 Z 轴场强 MATLAB 各拟合结果表

Tab.2 Fitting result along the Z axis using MATLAB

Formula	$f(x)=p1*x^5+p2*x^4+p3*x^3+p4*x^2+p5*x+p6$
SSE	5.19e-12
Adjusted R-square	0.966 4
RMSE	9.3e-7

2.2 Origin 处理结果

Origin 中的多项式拟合与 MATLAB 中类似, 在此只使用 Origin 的 Nonlinear Curve Fit (非线性曲线拟合) 中的 GaussAmp 拟合函数对数据做拟合。Origin 的曲线拟合同样是基于最小二乘做出的拟合, 对拟合参数做出了修正, 将差值最小的参数定义为最佳的拟合结果。

X 轴方向场强分布高斯拟合图如图 8 所示。

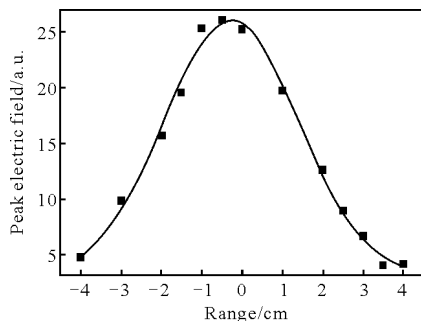


图 8 X 轴方向场强分布高斯拟合图

Fig.8 Curve fitting of Gaussian distribution along the X axis using Origin

Origin 给出的 Adj. R-Square 为 0.99, 由此可见 Origin 给出的 GaussAmp 拟合结果非常好, 拟合优度与 MATLAB 的多项式拟合相当。

Origin 给出 GaussAmp 拟合公式为 $y=y_0+A*\exp(-0.5*((x-x_c)-w)^2)$ 。

Z 轴方向场强分布高斯拟合图如图 9 所示。

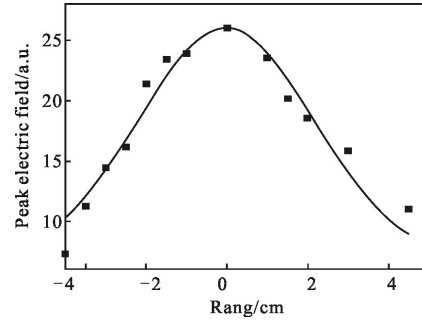


图 9 Z 轴方向场强分布高斯拟合图

Fig.9 Curve fitting of Gaussian distribution along the Z axis using Origin

Adj. R-Square 为 0.974。同样, Z 轴的 GaussAmp 拟合效果也较好。

2.3 线性度测量

另外, 由参考文献[6]可知, 电场峰值与金属球的直径应是线性关系, 使用不同直径的金属球测量回波, 最小可测金属球直径为 2 mm(有完整回波波形), 结果如图 10 所示。

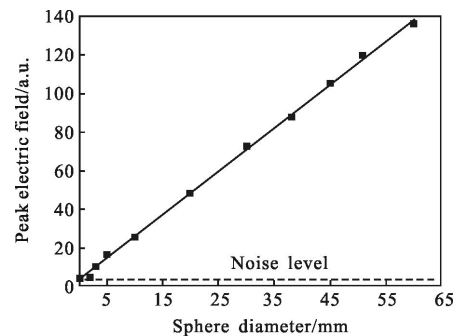


图 10 不同直径金属球场强峰值与直径拟合曲线

Fig.10 Curve fitting of the peak electric field of scattered THz radiation from a conducting sphere as a function of sphere diameter

由雷达方程可得 $\sigma=KP_0$, 其中 σ 为目标 RCS, P_0 为接收机输出功率, $K=\frac{(4\pi)^3R^4P_r}{P_tG^2\lambda^2LP_0}$ 为定标函数, 若 K 的表达式中各参数不变且在接收机线性动态范围

内, K 为一常数^[2]。由此得到 $\sigma \propto P_0$, 而对光学区的金属球 RCS 有 $\sigma \propto r^2$, r 为金属球半径。所以 $P_0 \propto r^2$, 结合太赫兹时域光谱系统的离散时域回波信号, 可得

$$P_0 \propto \sum_{i=1}^T E_i^2, \quad \sum_{i=1}^T E_i^2$$

表示对包含回波主脉冲的时间 T 内的场强平方求和。由此得到 $\sum_{i=1}^T E_i^2 \propto r^2$, 即 $E_p^2 + E'^2 \propto r^2$,

E_p 为回波峰值, E'^2 表示除去峰值场强的所有时间 T 内回波场强的平方和。最终得 $E_p \propto r$, 即金属球时域回波的峰值电场与金属球的半径成正比。

对测试数据做线性拟合, 拟合优度为 0.994, 所以可以初步判断系统线性度较好。图 10 中虚线表示噪声水平, 按照拟合出的直线计算噪声所对应的球直径在 1 mm 以下(即图中实线与虚线的交点)。值得注意的是, 通常线性度是针对尺寸在静区范围内的目标来做测试, 而在这里金属球直径已经超过了静区范围依然表现出良好的线性度, 这主要是因为此时球的散射中心为镜面散射中心, 是靠近球面镜的金属球表面的一小部分。

2.4 小结

综合 MATLAB 与 Origin 的数据处理结果, 可以发现 MATLAB 与 Origin 的拟合结果均达到了精度要求, 而 MATLAB 通过编程同样可以做到对各种曲线的理想拟合效果。当使用这两种软件进行拟合时, 需要根据不同的数据分布类型选择合适的拟合公式。由拟合结果便能找到对应的静区范围。

3 结论

通过在目标放置区的三维空间移动金属球并测量其回波的方法得到了太赫兹时域光谱系统的静区范围和线性度等重要参数, 为下一步的目标测试和实验系统的自身评定奠定了良好的技术基础。在数据处理中, 综合 MATLAB 与 Origin 两种软件的拟合结果, 得到了静区范围。测得的静区范围可为后续的

定标等测量打下坚实的基础。

参考文献:

- [1] Cai Yingwu, Yang Chen, Zeng Genghua, et al. Experiment research on high resolution terahertz radar imaging [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(1): 7-9. (in Chinese)
蔡英武, 杨陈, 曾耿华, 等. 太赫兹极高分辨力雷达成像试验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(1): 7-9.
- [2] Demartinis G B, Michael J C, Thomas M H. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements [C]//Proceeding of Antenna Measurements and Techniques Association(AMTA), 2010: 3-8.
- [3] Goyette T M, Dickison J C, Gorveatt W J, et al. X-band ISAR imagery of scale-model tactical targets using a wide bandwidth 350 GHz compact range [C]//SPIE, 2004, 5427: 227-236.
- [4] Coulombe M J, Horgan T, Waldman J. A 524 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements [C]//Proceeding of Antenna Measurements and Techniques Association(AMTA), 1997.
- [5] Goyette T M, Dickison J C, Waldman J, et al. 1.56 THz compact range for W-band imagery of scale-model tactical targets[C]//SPIE, 2000, 4053: 615-622.
- [6] Krzysztof Iwaszczuk, Henning Heiselberg, Peter Uhd Jepsen. Terahertz radar cross section measurements [C]//Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010.
- [7] Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojiao. Radar Target Characteristic [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 48-49. (in Chinese)
黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 48-49.
- [8] Chen Lanfeng. Matlab simulation of curve fitting based on least-squares [J]. *Journal of Shenyang Normal University (Nature Science Edition)*, 2014, 32(1): 75-79.
陈岚峰. 基于 MATLAB 的最小二乘曲线拟合仿真研究[J]. *沈阳师范大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(1): 75-79.