

## 基于微波倍频源太赫兹频段雷达散射截面测量

吴洋<sup>①</sup> 白杨\*<sup>①②</sup> 殷红成<sup>①</sup> 张良聪<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(电磁散射重点实验室 北京 100854)

<sup>②</sup>(中国传媒大学信息工程学院 北京 100024)

**摘要:** 在220~330 GHz频段, 采取自由空间场形式, 采用扫频连续波信号进行目标雷达散射截面(RCS)测量。系统由矢量网络分析仪, 毫米波混频器, 馈源及目标支撑系统组成。多种散射测量技术将通过实验验证并应用于目标测量中。最终保证系统对-23.6 dBsm目标的测量精度达到 $\pm 3$  dB。

**关键词:** 雷达散射截面(RCS); 太赫兹; 散射

中图分类号: TN953

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)01-0147-06

DOI: 10.12000/JR17099

**引用格式:** 吴洋, 白杨, 殷红成, 等. 基于微波倍频源太赫兹频段雷达散射截面测量[J]. 雷达学报, 2018, 7(1): 147-152. DOI: 10.12000/JR17099.

**Reference format:** Wu Yang, Bai Yang, Yin Hongcheng, *et al.*. Terahertz radar cross section measurements based on millimeter-wave converter[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(1): 147-152. DOI: 10.12000/JR17099.

## Terahertz Radar Cross Section Measurements Based on Millimeter-wave Converter

Wu Yang<sup>①</sup> Bai Yang<sup>①②</sup> Yin Hongcheng<sup>①</sup> Zhang Liangcong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(*Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China*)

<sup>②</sup>(*Information Engineering School, Communication University of China, Beijing 100024, China*)

**Abstract:** The measurement system has been built with Stepped Frequency Continuous Wave (SFCW) signal for Radar Cross Section (RCS) measurements in free-space at 220~330 GHz. The system consists of vector network analyzer, Millimeter-Wave Converters and target support structure. The measurement techniques which are used in scattering measurements are verified by RCS measurement data. The system measurement accuracy is control within about  $\pm 3$  dB at -23.6 dBsm.

**Key words:** Radar Cross Section (RCS); Terahertz; Scattering

### 1 引言

随着隐身技术的发展, 隐身性能已逐步成为武器装备发展中的重要指标与特征<sup>[1]</sup>, 隐身测试技术是展开武器装备隐身技术研究的重要手段。目前对于大型目标如: 飞机、坦克等难以直接获得全尺寸目标的测量数据。采用目标的缩比模型, 利用小尺寸目标模型在高频测量结果推导获得目标全尺寸结果是日前一种可行的方案。但是对于超大目标如: 航母、大型飞机等, 其缩比模型尺寸在微波频段依然超出了多数测量场地的尺寸要求, 难以实现实际

测量。所以需要更大的缩比比例, 更高的测量频段。太赫兹因为具有较高的测量频段, 而且可以满足大尺寸目标大比例缩比模型的测量需求。

太赫兹频段的缩比目标雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)测量最先报道于20世纪70年代<sup>[2]</sup>。该系统基于光学激光激发的窄带亚毫米波信号, 典型的测量频率约700 GHz。目前在太赫兹频段用于RCS测量的主要方案有两种, 其一为时域光谱(Time Domain Spectroscopy, TDS)测量方案, 德国布伦瑞克大学<sup>[3]</sup>和丹麦技术大学<sup>[4]</sup>都有相关论文发表。另一种为微波倍频源太赫兹散射测量方案, 由Massachusetts Lowell大学的亚毫米波技术实验室组建了一系列基于快速变频连续波信号的太赫兹测量系统<sup>[5-7]</sup>, 实现了中心频点160 GHz, 240 GHz, 520 GHz带宽约10~20 GHz的太赫兹测量。

收稿日期: 2017-11-06; 改回日期: 2018-01-30; 网络出版: 2018-02-07

\*通信作者: 白杨 Poplarby@163.com

基金项目: 国家部委基金

Foundation Item: Ministry Level Major Project

在本文中，详细说明一种频率范围在220~330 GHz，基于矢网实现的微波倍频源太赫兹散射测量系统的组建方式和实验结果及相关测试技术。在第2节详细阐述测量系统的组成及原理，第3节阐述测量技术，第4节对验证实验及测量结果进行分析。

## 2 测量系统组成

太赫兹散射测量系统采取自由空间场的场区形式，采用扫频连续波的测量信号，测量频率范围：220~330 GHz。系统主要由商用矢量网络分析仪(矢网)及其配套毫米波混频器、馈源及目标支撑系统组成。矢网工作频率10 MHz~24 GHz，发射功率-30 ~10 dBm；配套的毫米波混频器频率范围为220~330 GHz，发射功率-9 dBm，动态范围≥100 dB；太赫兹馈源工作频率220~330 GHz，增益≥21 dBi，可在1.5 m测试距离上形成≥0.3 m的主瓣范围。系统基本构架如图1所示。

矢网提供Ku(12~18 GHz)波段的射频信号，通过18倍频的毫米波变频前端获得220~330

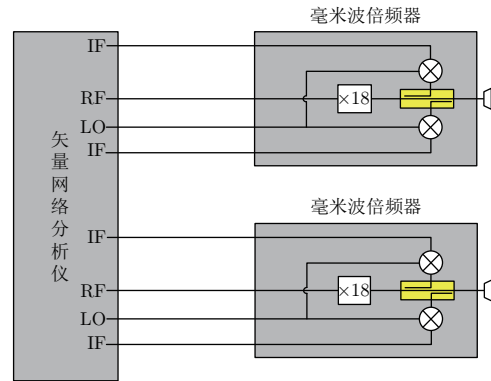


图 1 系统构架示意图

Fig. 1 Measurement system's sketch map

GHz的太赫兹测量信号。目标支架可以实现方位向360°连续旋转。实际测量系统如图2所示。

## 3 测量技术及验证实验

本系统中散射测量定标方法采用相对定标法<sup>[8]</sup>，定标体为107.5 mm(直径)标准球。测试总流程如图3所示。



图 2 太赫兹散射测量系统

Fig. 2 Terahertz scattering measurement system

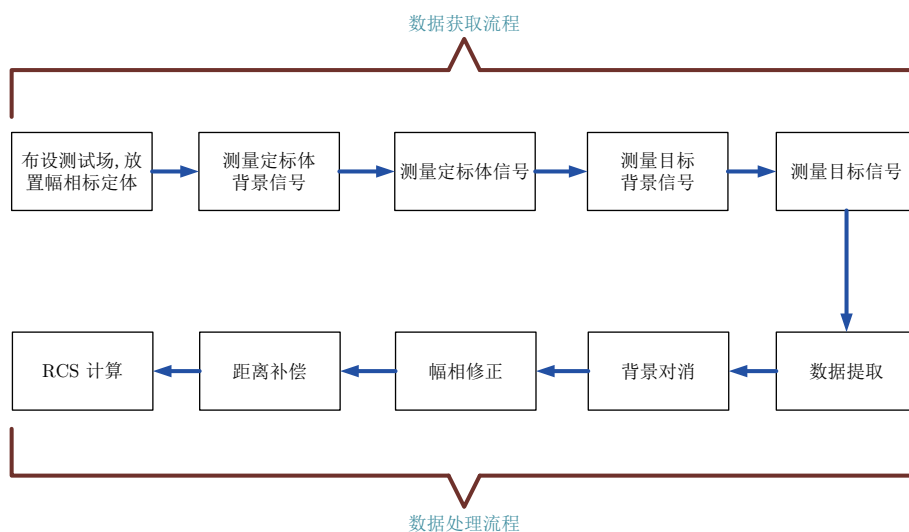


图 3 测量流程图

Fig. 3 Measurement flow chart

实际测量流程分为数据获取和数据处理两部分,在数据获取流程中,共获取包括幅相修正信号数据在内的,目标背景数据、目标数据、定标背景数据、定标数据共4组数据。将这4组数据带入数据处理流程,通过数据提取获得测试区原始数据,再通过背景对消、距离补偿、幅相修正等测量技术降低散射测量误差,最终计算获得目标RCS。

### (1) 背景对消

图4中测量结果是对背景对消技术在太赫兹频段应用的验证结果。其中待测目标为75 mm(直径)标准球。从图4(a)中可以得到,在未加入频域窗的情况下,背景对消技术在目标区可以提高10~15 dB的信噪比。从图4(b)中的结果可得,测量结果的最大偏差量由对消前的3.67 dB降至对消后的

1.45 dB,均方根误差由2.00 dB降至0.92 dB。

### (2) 距离补偿

由于测量采用自由空间场的场区形式,测量距离较近,空间衰减明显。因而需要对定标体与待测目标之间由于距离差引起的固定误差进行补偿。误差量可根据式(1)获得:

$$\Delta\sigma_r(\text{dB}) = 10 \times 4 \times (\log(R_1) - \log(R_2)) \quad (1)$$

图5为距离补偿前后的结果对比,在测量中目标(75 mm(直径)标准球)测量距离为1.500 m,定标球测量距离为1.481 m。根据公式计算得出距离补偿量为0.2185 dB。补偿前后均方根补偿为:补偿前1.184 dB,补偿后1.059 dB。经过距离补偿后,待测目标测量结果更符合理论结果,但其中还存在信号幅相抖动,支架耦合等其他误差。

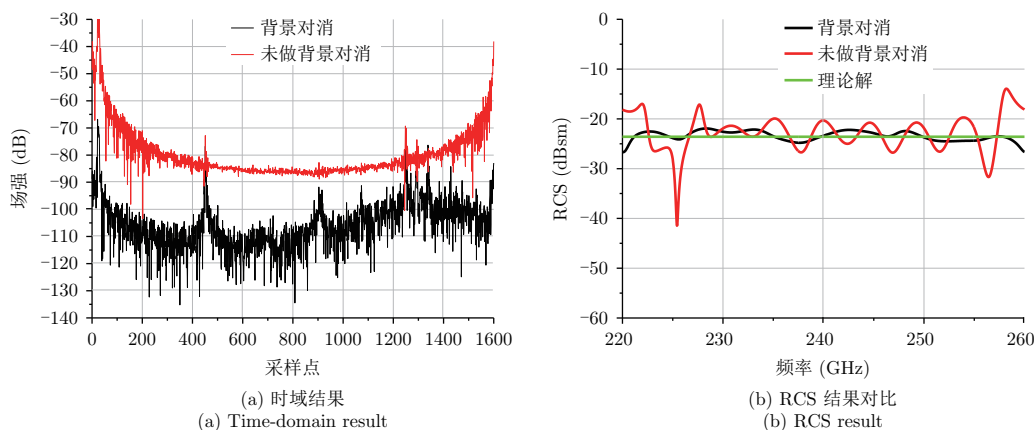


图4 背景对消测量结果

Fig. 4 Background subtraction results

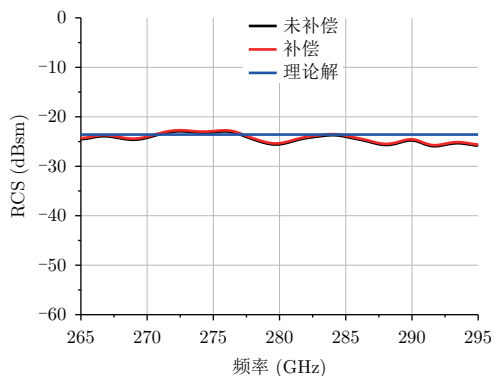


图5 距离补偿测量结果

Fig. 5 Range distance compensation result

### (3) 幅相修正

幅相修正技术主要针对由迹线噪声,发射/参考信号抖动,温飘,或非比值数据测量等原因引起的测试信号不稳,导致定标测量信号和目标测量信号不一致引起的误差进行修正。为了降低测量过程中信号不一致对测量结果造成的影响,采用设置固定

幅相标定体的方法检测信号,对测量信号进行幅相修正。

幅相标定体需要具有较强的后向散射,摆设位置与被测目标互不遮挡。幅相标定体与被测目标位置足够远,以降低两者之间互耦对测试精度造成的影响。一般可将幅相标定体放置于测量区域以外,将其置于测量天线副瓣范围内,这样可保证与测量目标距离足够远,而幅相标定体后向散射足够高可以保证信噪比。摆放示意图如图6所示。

一般经背景对消后相对测量法的目标RCS计算公式<sup>[6]</sup>表示为:

$$\sqrt{\sigma} = \frac{(T - B_t)}{(C - B_c)} \sqrt{\sigma_0} \quad (2)$$

其中,  $C$ 为定标体信号;  $T$ 为目标信号;  $B_c$ 为定标体背景信号;  $B_t$ 为目标背景信号; 此处  $C/T/B$  皆为频域信号。在此基础上引入幅相标定体,在测量中其摆放如图6所示。由于在定标体和目标测量中该幅相标定体位置不变,保证了其回波信号的稳定,

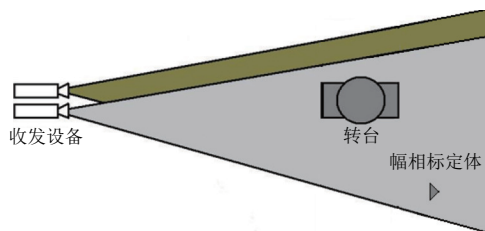


图6 幅相修正摆放示意图

Fig. 6 Position sketch map of amplitude-phase calibration

从而可以作为信号变化的检测信号，目标和定标信号可以向其归一化以降低信号抖动引起的误差。

在不放置物体及幅相定标体时测量背景信号  $B_c$ ,  $B_t$ ，放置目标和幅相定标体测量目标信号，保持幅相定标体不动，将目标换为定标体，测量定标体信号。通过测量信号1维距离像，选取出幅相定标体信号，作为测量信号的幅相变化的监测信号。将目标区信号向定标体信号进行归一，以达到降低测量信号抖动引起的测量误差。设： $D$ 为目标幅相修正信号； $D'$ 为定标体幅相修正信号； $A$ 为定标体理论解。则式(2)变为：

$$\sigma(\text{dB}) = 10 \times \log \left( \frac{[(T - B_t) / (D - B_t)]}{[(C - B_c) / (D' - B_c)]} \right) + A(\text{dB}) \quad (3)$$

由于采用自由空间场的场区形式，测量天线主瓣及第一副瓣成扇形展开，定标体放置于目标之前会影响照射目标的测量信号，所以将幅相定标体放置于目标之后。由于幅相定标体放置位置较远且位于非主瓣区域，所以应选取RCS较高，随频率较稳定的目标。实际中选择三面角反射器作为幅相定标体，尺寸150 mm。

如图7，图8所示，测量信号在测量过程中较为稳定。去除边频结果，修正前最大偏差量3.01 dB，修正后为2.99 dB最终结果均方根误差由1.38 dB降为1.32 dB。

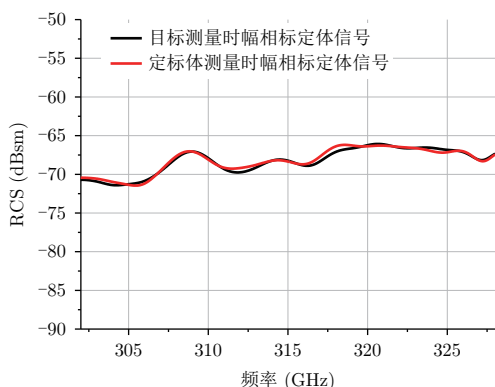


图7 幅相标定体信号对比

Fig. 7 Amplitude-phase Calibrator's signal

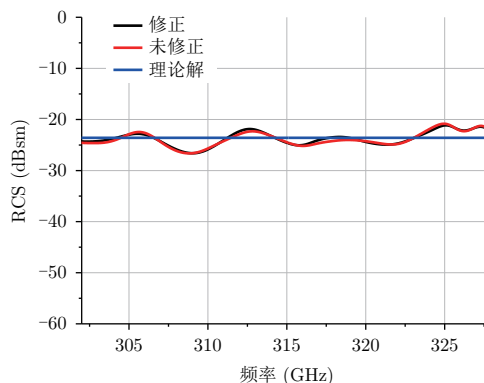


图8 修正结果对比

Fig. 8 Correction results

## 4 测量结果

作为系统测量能力和测量精度的验证，我们对75 mm(直径)标准球进行了220~330 GHz频段的测量。

图9为数据处理前后结果的RCS对比，数据处理中应用了背景对消、距离补偿和幅相修正。最终均方根误差由2.077 dB降至0.938 dB。

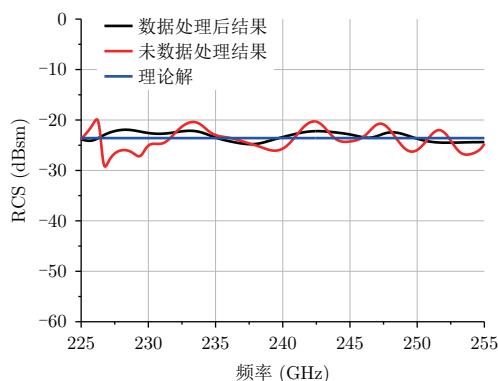


图9 75 mm标准球RCS数据处理结果对比

Fig. 9 75 mm Calibration ball's RCS data processing comparison results

图10给出了75 mm(直径)标准球(RCS=-23.6 dBsm)在系统全频段内的测量结果(定标体为107.5 mm(直径)标准球)。通过距离门提取及采用上述误差抑制方法处理后，误差限基本控制在2 dB左右，均方根误差在1 dB左右。具体统计结果如表1所示。

## 5 结论

本文中，我们利用矢网搭建了微波倍频源太赫兹散射测量系统，对75 mm(直径)标准球(RCS=-23.6 dBsm)，测量试验中对背景对消、距离补偿、幅相修正等误差抑制技术进行了验证。通过多种误差抑制技术的应用，明显地提高了目标测量精

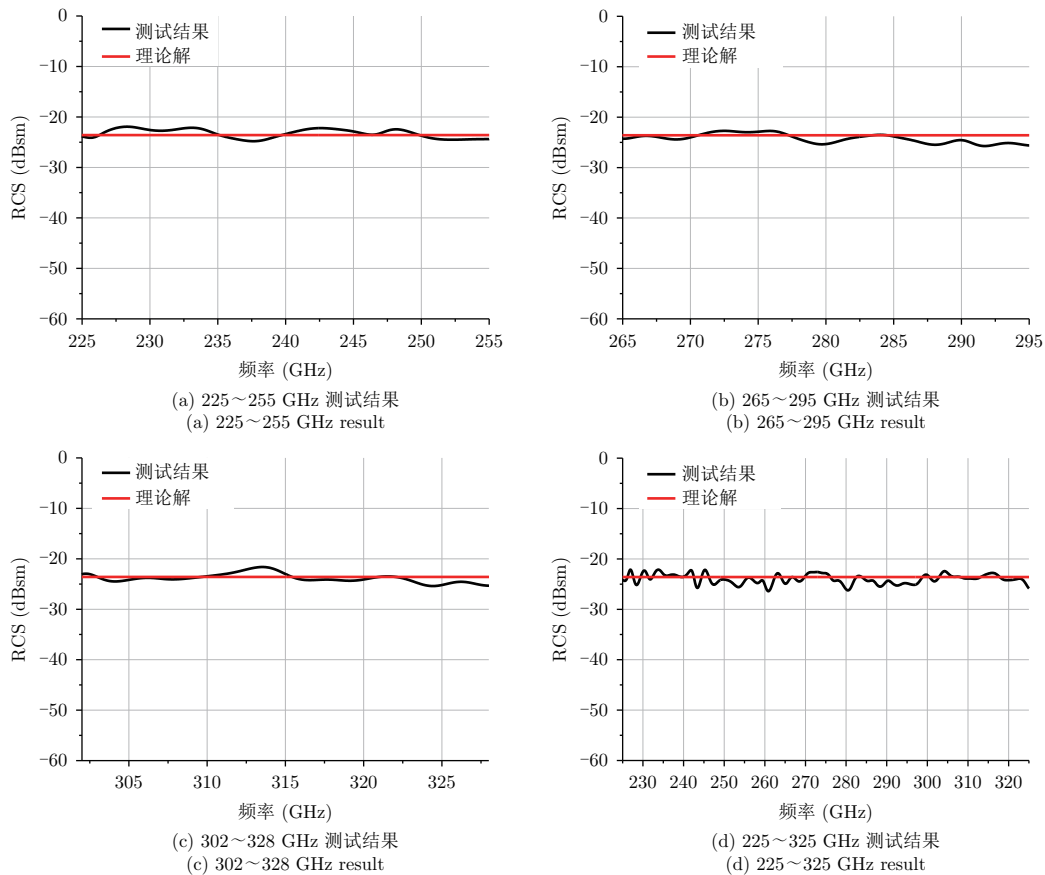


图 10 75 mm标准球RCS测量结果对比

Fig. 10 75 mm Calibration ball's RCS results

表 1 75 mm(直径)标准球测量误差统计

Tab. 1 75 mm Calibration ball's measurement error statistical result

频率(GHz)	最大上偏量(dB)	最大下偏量(dB)	均方根误差(dB)
225~255	1.66834	-1.20310	0.938
265~295	0.88109	-2.12946	1.052
302~328	1.97491	-1.79818	0.878
225~325	1.47898	-2.80198	0.994

度，最终测量结果均方根误差控制在1 dB左右。在残留误差中，目标与泡沫支撑柱之间的耦合、目标摆放、环境多径影响、环境震动是主要误差源，其误差抑制方法，耦合抑制方法，需要今后继续进行有针对性的设备设计及相应研究。

参 考 文 献

[1] 黄培康. 雷达目标特征信号[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.  
Huang Pei-kang. Radar Target Signature Signal[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 1993: 59-74.

[2] Waldman J, Fetterman H R, Duffy P E, et al. Submillimeter model measurements and their applications to millimeter radar systems[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Infrared Near-Millimeter Waves, Miami

Beach, FL, USA, 1979: 49-50.

[3] Jansen C, Krumbholz N, Geise R, et al. Scaled radar cross section measurements with terahertz-spectroscopy up to 800 GHz[C]. Proceedings of the 3rd European Conference on Antennas and Propagation, Berlin, Germany, 2009: 3645-3648.

[4] Iwaszczuk K, Heiselberg H, and Jepsen P U. Terahertz radar cross section measurements[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26399-26408. DOI: [10.1364/OE.18.026399](https://doi.org/10.1364/OE.18.026399).

[5] Coulombe M J, Horgan T, and Waldman J. A 160 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, Seattle, WA, USA, 1996: 239-244.

[6] Coulombe M J, Horgan T, Waldman J A, et al. A 524 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, Monterey, CA, USA, 1999: 458-463.

[7] DeMartinis G B, Coulombe M J, Horgan T M, et al. A 240 GHz polarimetric compact range for scale model RCS measurements[C]. Proceedings of the Antenna Measurements and Techniques Association, Atlanta, GA, USA, 2010: 3-8.

[8] GJB5022-2001室内场缩比目标雷达散射截面测试方法[S]. 2001.

GJB5022-2001 Method for measurement of radar cross section of scale target indoor range[S]. 2001.

### 作者简介



吴 洋(1984-), 男, 北京人, 高级工程师, 2014年于北京理工大学获得电磁场与微波技术专业博士学位, 现为电磁散射重点实验室高级工程师, 主要研究方向为雷达目标特性、电磁散射辐射测量。

E-mail: damingbaie@sina.cn



白 杨(1986-), 男, 河北保定人, 工程师, 2012年于北京理工大学获得硕士学位, 现为中国传媒大学电磁场与微波技术专业在读博士研究生, 电磁散射重点实验室工程师, 主要研究方向为电磁散射与逆散射、雷达目标特性。

E-mail: Poplarby@163.com



殷红成(1967-), 男, 江西余江人, 研究员, 现为电磁散射重点实验室专业总师, 博士生导师, 主要研究方向为电磁散射、雷达目标特性、目标识别等。

E-mail: Yinhc207@126.com



张良聪(1990-), 男, 福建三明人, 工程师, 2015年于中国航天二院研究生院获得硕士学位, 现为电磁散射重点实验室工程师, 主要研究方向为电磁散射与逆散射、电磁散射辐射测量。

E-mail: Zhangliangcong1990@163.com