

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209289

# 太赫兹混频器扫频测试技术

王旭<sup>1,3</sup> 年夫顺<sup>2,3</sup> 邓建钦<sup>2,3</sup> 王沫<sup>2,3</sup> 贾定宏<sup>2,3</sup>

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 中电科思仪科技股份有限公司 青岛 266555;

3. 电子测试技术重点实验室 青岛 266555)

**摘要:** 针对目前太赫兹混频器测试方法功能单一、测试效率低等缺点,文章在基于矢网的微波混频器扫频测试方法的基础上,提出了适用于太赫兹混频器的扫频测试方法。该方法将矢网的测试频率由微波波段提高到110 GHz以上的太赫兹波段,实现了太赫兹混频器的快速测试。为了证明新方法的可靠性,分别用“信号源+频谱仪”测试方法和本文提出的测试方法对150~170 GHz四次谐波混频器进行实验验证。本文提出的扫频测试方法,不仅实现了太赫兹混频器的变频损耗、回波损耗等参数的快速测试,而且与“信号源+频谱仪”测试方法所测得变频损耗结果互相吻合,对矢量网络分析仪在太赫兹频段的测试应用具有重要意义。

**关键词:** 矢量网络分析仪;太赫兹混频器;变频损耗;回波损耗

中图分类号: TM931 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.1025

## Sweep frequency measurement technique of terahertz mixer

Wang Xu<sup>1,3</sup> Nian Fushun<sup>2,3</sup> Deng Jianqin<sup>2,3</sup> Wang Mo<sup>2,3</sup> Jia Dinghong<sup>2,3</sup>

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Ceyear Technologies Co., Ltd., Qingdao 266555, China;

3. Technology on Electronic Test &amp; Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

**Abstract:** Aiming at the disadvantages of the terahertz mixer test method, such as single function and low-test efficiency, this paper proposes a terahertz mixer sweep frequency test method based on the sweep test method of microwave mixer. This method can increase the test band from microwave band to terahertz band above 110 GHz, and realize the frequency sweep frequency test of conversion loss and return loss of the terahertz mixer. Furthermore, the “signal generator+ spectrum analyzer” test method and the test method proposed in this paper are used to verify the 150~170 GHz fourth-harmonic mixer. The results show that the sweep frequency test method proposed in this paper not only achieves the rapid measurement of conversion loss and return loss of the terahertz mixer, but also agrees with the conversion loss measured by the “signal generator+ spectrum analyzer” test method, which is of great significance to the test application of the vector network analyzer in the terahertz band.

**Keywords:** vector network analyzer; terahertz mixers; conversion loss; return loss

## 0 引言

混频器是一个能够实现频率转换功能的三端口器件,在生物医学、安全检测、空间探测和通信等领域都具有广泛地应用。作为接收机系统的重要组成部分,混频器的性能对整个系统都有着重要影响。由于太赫兹波具有穿透性强、安全性高、频谱资源宽等优点,使得太赫兹技术的应用愈发广泛。而太赫兹混频器作为整个系统的关键核心部件,在研发与生产的过程中,对其变频损耗、回波损耗等指标进行快速、准确地测试<sup>[1-2]</sup>显得尤为重要。

混频器工作时需要提供两个输入信号并同时输出中频信号。根据该特点,通过2台信号发生器与1台频谱分析仪便能够实现混频器变频损耗的测试,且由于该方法的测试结果准确、可重复性高等优点,至今仍是测量混频器最常用的方法之一;此外,由于早期的二端口矢网中只有1个微波信号源,因此在测量混频器的过程中需额外使用信号发生器来提供本振信号<sup>[3]</sup>;如今,随着国内外电子测量仪器的不断发展,内置2个微波信号源的四端口矢网已逐渐普及。四端口矢网不需要额外的信号发生器便可独立完成对混频器变频损耗、相位等参数的测试<sup>[4-5]</sup>,但是受限于仪器

收稿日期:2022-03-16

本身工作频率,无法对太赫兹频段的混频器进行测量。

矢量网络分析仪对太赫兹频段的混频器进行扫频测试,需解决的问题则是对目前的测试方法进行扩频处理。文章以微波混频器的扫频测试方法为基础,在充分了解各种仪器的工作原理后,通过对矢量网络分析仪、S 参数测试模块等测试设备的灵活应用,解决了矢量网络分析仪在混频器测试过程中的扩频问题,最终实现了对太赫兹混频器变频损耗、端口驻波等重要参数的扫频测试,在一定程度上填补了国内矢量网络分析仪对太赫兹变频器件测试的技术空白。

## 1 太赫兹混频器重要性能参数

变频损耗与回波损耗是太赫兹混频器两个重要的性能指标,文章中提出的扫频测试方法也是主要对这两个参数进行测量。

### 1.1 变频损耗

变频损耗是混频器最重要的一项性能指标,它体现了信号在频率变换过程中功率损耗的多少,可通过对数公式表示为:

$$CL(\text{dB}) = P_{RF}(\text{dBm}) - P_{IF}(\text{dBm}) \quad (1)$$

在实际应用中,混频器 RF、LO 与 IF 三个端口信号之间的频率关系通常可表示为:

$$f_{RF} - n \cdot f_{LO} = f_{IF} \quad (2)$$

其中, $n$  为混频器的谐波次数, $f_{RF}$ 、 $f_{LO}$ 、 $f_{IF}$  分别为射频信号、本振信号与中频信号的频率。

根据上述公式可知,在测量过程中,为混频器的两个输

入端口提供频率不同的信号,并对 RF 输入信号、IF 输出信号的功率之差,便可完成混频器变频损耗的测量。

### 1.2 回波损耗

输入端口的回波损耗需通过矢量网络分析仪测量端口的 S11 参数得到,体现了信号在输入端口的反射情况,单位为 dB,可用公式表示为:

$$RL(\text{dB}) = P_{\text{输入}}(\text{dBm}) - P_{\text{反射}}(\text{dBm}) \quad (3)$$

回波损耗值越大,表示信号在端口的反射系数越小,性能则越好。

## 2 传统的混频器测试方法

目前,常见的混频器测试方法有两种,在这里将分别对这两种方法进行简单介绍。

### 2.1 “信号源+频谱仪”测试方法

“信号源+频谱仪”测试方法由 2 台微波信号发生器和 1 台频谱分析仪组成,对变频损耗的测试精度较高,但是早期需要手动改变信号发生器的输出频率,对宽带混频器来说测试效率较低。日前,该方法可通过搭配太赫兹倍频源模块与计算机对太赫兹波段的混频器进行测量<sup>[6-7]</sup>,其示意图如图 1 所示。其中,外配计算机通过 GPIB (general-purpose interface bus) 总线和工作于 Test Center 或 LabVIEW 软件环境的测试程序,可对信号发生器和微波频谱仪进行控制,从而实现逐点测量。利用计算机对比射频信号和中频信号的幅度,快速得出太赫兹混频器变频损耗结果。目前,这种测试方法通过配置不同波段的太赫兹倍频源模块,最高测试频率可达 1.1 THz。

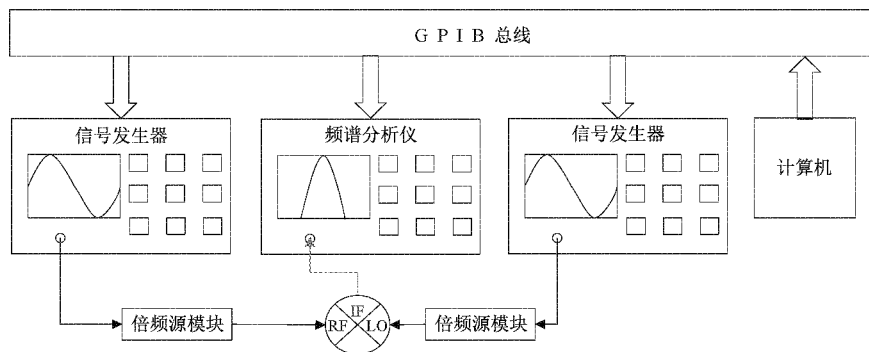


图 1 混频器的“信号源+频谱仪”测试方法

通过“信号源+频谱仪”测试方法,可以准确地测试混频器的变频损耗,且利用计算机程序控制代替手工操作,可在一定程度上提高测试效率。但是受仪器功能得限制,这种测试方法无法对其他参数进行测量。

### 2.2 基于矢网的混频器扫频测试方法

利用四端口矢量网络分析仪,无需外配计算机,便可完成对混频器变频损耗、回波损耗等参数的同步扫频测试<sup>[8-9]</sup>。

该测试方法的示意框图如图 2 所示。四端口矢量网

络分析仪内置两个微波信号源,其中测试端口 1 和 2 共用信号源 1,测试端口 3 和 4 共用信号源 2<sup>[10]</sup>。每个端口都具有参考接收机和测试接收机,所需信号由另外的本振源提供。混频器测试过程中,这两个微波信号源可分别为混频器提供射频和本振信号,同时将混频器产生的中频信号直接送到矢量网络分析仪的中频接收机。

这种方法测试速度快,可测量参数多,但是受到矢量网络分析仪自身工作频率的限制,通常无法对频率过高的混频器进行测试。

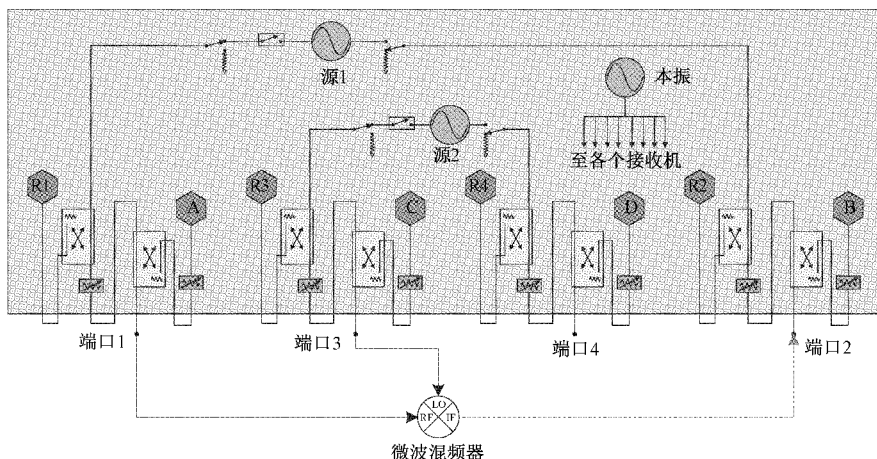


图 2 基于矢网的微波混频器扫频测试方法

### 3 太赫兹混频器扫频测试方法

基于矢量网络分析仪的太赫兹混频器扫频测试,关键在于如何对矢网进行扩频的同时,还能够令矢网为被测混频器提供本振信号。

目前,对矢量网络分析仪进行频率扩展,需用到相应频段段的 S 参数测试模块。S 参数测试模块的原理框图如图 3 所示,共有 4 个接口需与矢量网络分析仪相连,分别

为射频输入、本振输入、参考中频和测试中频。其中,射频信号、本振信号、被测信号通过内部混频产生的两个中频信号,被分别传输至矢网内部的参考接收机与测试接收机,从而完成对太赫兹信号的测试。通常情况下,矢网内部的两个微波信号源要分别为 S 参数测试模块提供射频输入信号与本振输入信号<sup>[11]</sup>。但是这种方法会导致矢网中没有微波信号源能够为被测混频器提供本振信号,并不适用于太赫兹混频器的测试系统。

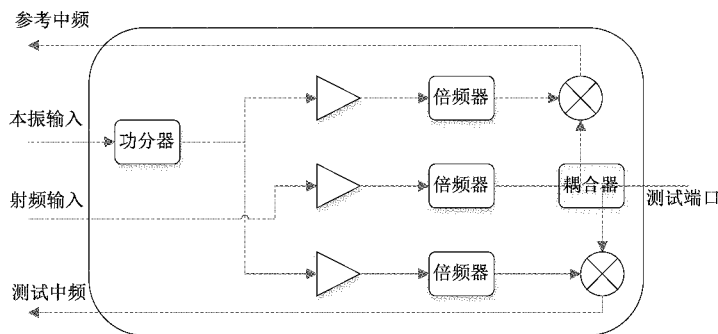


图 3 太赫兹 S 参数测试模块原理框图

为了解决这个技术困难,在这里建立了矢网扩频控制机的模拟工作环境。如图 4 所示,矢量网络分析仪的 4 个接口:本振输出、A、R1、端口 1,分别与 S 参数测试模块的四个接口:本振输入、测试中频、参考中频、射频输入相连。该方法主要利用了矢网内部为接收机提供信号的本振源,将其输出信号进行放大后,可为 S 参数测试模块提供本振输入信号<sup>[12]</sup>,从而完成对整个混频器测试系统的扩频。该方法只用到了矢网仪器内部的一个微波信号源,便实现了对整个系统的扩频,使另一个微波信号源依然能够为本测的太赫兹混频器提供本振信号。被测混频器所需的本振信号可由端口 3(或端口 4)处输出,可运用太赫兹倍频链路或放大器,以保证混频器能够正常工作。

在利用 S 参数测试模块对矢网进行扩频后,需对射频和中频测试端口进行功率校准和 S 参数校准<sup>[13-14]</sup>。端口

功率校准需分别对测试 S 参数测试模块的输出端口和矢量网络分析仪端口 2 的输出功率进行测量标定,以确定射频和中频的端口功率,并按照功率测量结果,调整参考接收机至相同的功率值;端口 S 参数校准,需在各自的工作频段内对这两个端口分别进行单端口校准。在完成全部校准之后,便可实现对混频器变频损耗及端口回波损耗等参数的测量。

### 4 测试验证

针对上文提出的太赫兹混频器扫频测试方法,选用了  $\Delta V3672E$  矢量网络分析仪组建相应的测试系统。测试系统实物装置如图 5 所示。作为核心仪器,矢量网络分析仪 AV3672E 具有四个测试端口,最高工作频率为 67 GHz,性能稳定且具备多种测试功能,完全符合测试系统的需求。

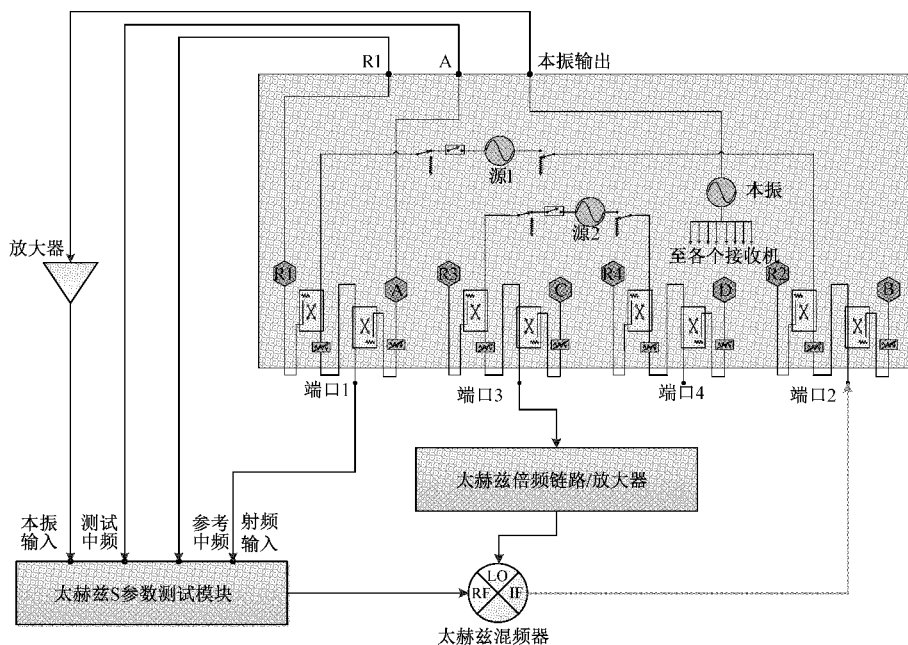


图 4 基于矢量网络分析仪的太赫兹混频器测试方法

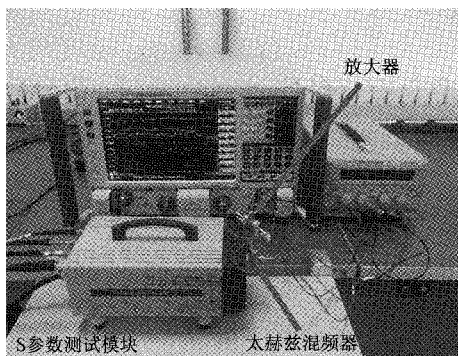


图 5 测试系统实物装置

选用一款 150~170 GHz 四次谐波混频器作为被件;选用型号为 3643Q 的 S 参数测试模块,其工作频率为 110~170 GHz。在 150~170 GHz 范围内,其端口输出功率为  $6 \pm 2$  dBm,能够为混频器提供射频信号。混频器本振信号由矢量网络分析仪的端口 3 提供,通过放大器后,信号最大功率不小于 15 dBm;上变频所需的中频信号由矢量网络分析仪端口 2 直接提供,其输出功率可调。

为了验证测试结果的准确性与可靠性,这里进行多次重复对比试验,将太赫兹扫频测试系统测得的变频损耗结果与“信号源+频谱仪”测试结果进行对比。此处将变频损耗测试结果的平均值进行对比展示,如图 6 所示。从图中可看出,基于矢量网络分析仪的扫频测试结果与“信号源+频谱仪”的混频器测试结果可以较好地吻合,两种方法所测得的变频损耗均在 13~17 dB 之间,证明了太赫兹混频器扫频测试方法的准确性。此外多次重复测试的结果具有高度一致性,也证明了该方法具备良好的可重复性。

最终,基于矢量网络分析仪对太赫兹混频器进行了扫

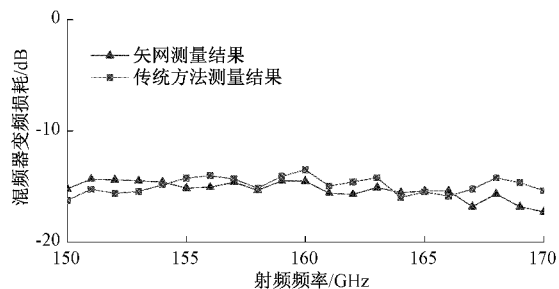


图 6 两种测试方法的变频损耗对比

频测试,其结果如图 7 所示,SC 12 表示混频器上变频的变频损耗,约为 10~12 dB;SC 21 表示下变频的变频损耗,约为 14~17 dB;S11 为射频端口的回波损耗,为 -5~-7.5 dB, S22 为中频端口的回波损耗,为 -18~-35 dB。本文利用 AV3672E 网络分析仪等设备搭建的测试系统,实现了太赫兹混频器的高效扫频测试,且与“信号源+频谱仪”的混频器测试方法相比,该扫频测试系统功能更加多元化,对矢量网络分析仪的测试应用进行了拓展。

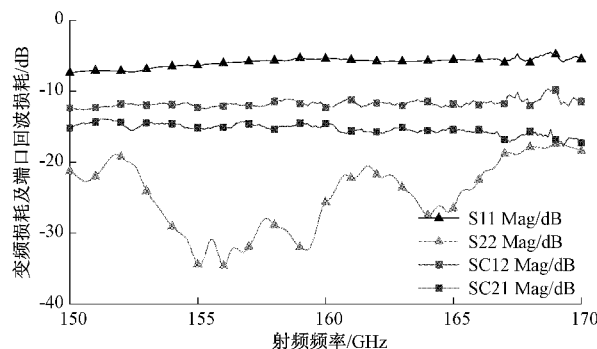


图 7 基于矢量网络分析仪的太赫兹混频器的扫频测试结果



## 5 结 论

本文针对太赫兹混频器测试方向的应用与需求,在基于矢量网络分析仪微波混频器扫频测试的基础上,通过灵活利用 S 参数测试模块将混频器测试频率提高至太赫兹波段,实现了一种基于矢量网络分析仪的太赫兹混频器快速扫描测试方法。通过与“信号源+频谱仪”测试方法的结果进行对比,验证了新方法的可靠性和准确性。且相比“信号源+频谱仪”混频器测试方法,新方法的测试效率显著提高,并能够同时完成混频器的上下变频损耗以及射频、中频的回波损耗的测试,实现了“一表多参数”的高效测量。综上,所设计的太赫兹混频器扫频测试方法拓展了矢量网络分析仪对太赫兹变频器件测试领域的应用,在工程实践应用方面具有重要意义。

### 参考文献

- [1] 姜万顺,邓建钦. 太赫兹测试测量技术与仪器研究进展[J]. 国外电子测量技术,2014,33(5): 20-23.
- [2] 张娜. 矢量网络分析仪在混频器测试中的应用[J]. 国外电子测量技术,2006,25(10):11-13.
- [3] 宋翔,年夫顺. 基于矢量网络分析仪的混频器测试技术[J]. 电子测量技术,2011,34(11): 113-117.
- [4] 宁欣. 基于四端口矢量网络分析仪 AV3672 的混频器测试应用[J]. 电子科技,2016,(20),DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2016.20.002.
- [5] LIU S, GAO Z, JIA Y, et al. Measurement of mixer based on vector network analyzer[C]. 2021 IEEE 15th International Conference on Electronic Measurement & Instruments(ICEMI), 2021: 466-471.
- [6] 杨婷. 混频器测试方法的研究[J]. 黑龙江科技信息, 2016,(36):60-61.

- [7] 潘积文. 微波混频器测试研究[J]. 宇航计测技术, 2009,29(5):20-23.
- [8] 孙宏军. 基于矢量网络分析仪的频率变换期间测试技术[C]. 2017 年全国微波毫米波会议电子科技,2017: 249-253.
- [9] 黄志芳,罗宏伟. 基于频谱仪和矢网的混频器变频损耗测量技术[J]. 电子测量技术,2015,38(11):85-87,105.
- [10] 罗文强,胡岸勇,陈曦,等. 一种混频器自动测试平台的设计[J]. 仪器仪表与传感器技术,2017,(5):108-111.
- [11] 姜丽菲,王瀚卿,黄理勇,等. 太赫兹扩频测试系统的测试与分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报,2013, 11(5):690-692.
- [12] 李文军,姜信诚,邓建钦,等. THz 矢量网络分析仪扩频系统设计[J]. 微波学报,2015, 31(S1): 73-75.
- [13] DUMSMORE J P. 微波器件测量手册[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [14] 林茂六,张亦弛,张喆,等. 基于混频器的非线性矢量网络分析仪双端口校准方法[J]. 仪器仪表学报,2010, 31(10):2386-2393.

### 作者简介

王旭,硕士研究生,主要研究方向为微波与太赫兹电路设计及部件开发。

E-mail: 15536989766@163.com

年夫顺,硕士,研究员,主要研究方向为毫米波太赫兹测量与应用开发技术。

邓建钦,博士,研究员,主要研究方向为毫米波太赫兹测量与应用开发技术。

王沫,工程师,主要研究方向为毫米波太赫兹测量与应用开发技术。

贾定宏,博士,主要研究方向为毫米波太赫兹测量与应用开发技术。