

文章编号: 2095-4980(2013)01-0070-03

亚毫米波与太赫兹信号的频谱分析

梁友焕, 李镇远, 冯进军

(中国电子科技集团公司 第 12 研究所, 北京 100015)

摘 要: 亚毫米波和太赫兹技术的发展对测试设备提出了更高的频率要求, 可以采用频谱仪外接混频器的方式测量亚毫米波和太赫兹信号的频谱。基于谐波混频的原理, 提出了利用较低频段的混频器测量更高频率的信号频谱的方法, 试验中选用了 W 波段的无预选器的谐波混频器, 测量对象是约 0.2 THz 的信号, 利用 Visual Basic 语言编写程序对测试结果进行分析, 测试结果表明这种方法切实可行。

关键词: 亚毫米波; 太赫兹技术; 频谱; 无预选器; 谐波混频

中图分类号: TN015

文献标识码: A

Spectra analysis of submillimeter wave and THz signals

LIANG You-huan, LI Zhen-yuan, FENG Jin-jun

(The No.12 Institute, CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: The developments of submillimeter wave and THz technologies demand test instruments at higher frequencies. The spectra of the submillimeter wave and THz signals can be measured using external mixing techniques. According to the theory of harmonic mixing, a method to measure the spectra of the higher frequency signal using external mixer at lower frequency is put forward. A W band mixer is selected to measure a signal whose frequency is about 0.2 THz. A Visual Basic program is used to analyse the test results. The results show that the method is effective to measure the spectra of higher frequency signal using external mixer at lower frequency.

Key words: submillimeter wave; THz technology; spectra; without preselector; harmonic mixing

目前 THz 技术的日益发展对测量设备提出了向更高频率扩展的要求, 频谱分析仪是测量信号频率的有效设备, 当前市场上的频谱仪主机的工作频率最高可以达到 67 GHz, 利用外接频谱仪扩频后工作频率可以达到 1 THz 以上。由于这类外部谐波混频器大部分都不带有预选器, 因此谐波混频结果必然会出现镜像信号和多重响应, 给信号的识别带来困难, 但是在理解外部谐波混频的实质并采取合适的手段进行信号识别后, 发现可以利用低频率的外接谐波混频器测量更高频率的信号, 为开展更高频段的频率测量创造条件。本文介绍利用低频率外接混频器测量更高频率信号频谱的原理, 并利用 W 波段(75 GHz~110 GHz)的谐波混频器对 Y 波段(170 GHz~260 GHz)的信号进行测量, 得到了满意的效果。

1 测量原理

每台频谱仪主机都有确定的工作频率范围, 如果要想测量更高频率信号的频谱就必须借助外接的混频器, 其连接方式见图 1。

图 1 中频谱仪输出本振信号到混频器, 由于混频器的非线性产生了丰富的本振谐波, 本振谐波与被测信号混频, 混频后的中频信号再送回频谱仪。这种情况下频谱仪采用外部谐波混频工作模式, 混频方程为^[1]:

$$f_s = n_x f_{LO} \pm f_{IF} \quad (1)$$

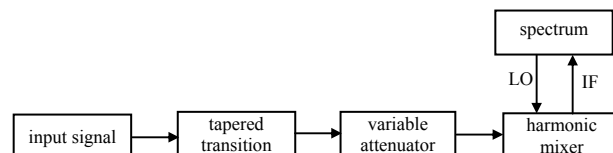


Fig.1 Block diagram of the test system

图 1 测试系统框图

式中： f_s 为被测信号频率； f_{LO} 为本振频率； n_x 为本振的谐波次数； f_{IF} 为频谱仪采用谐波混频时的第一中频。混频方程所表示的意义是当本振谐波与被测信号相差一个中频时，混频信号就能通过频谱仪的中频滤波器，最后在频谱上产生响应。对于同一扩频波段内的多重响应，频谱仪会选定一条响应谱线标示为被测信号的频率，该谱线被称为“真信号”谱线^[2]，其频率标示公式为：

$$f_N = n_N f_{LO} \pm f_{IF} \quad (2)$$

式中： f_N 为频谱仪显示多重响应谱线的标示频率； n_N 为频谱仪在所选工作频率范围内谐波混频的规定谐波次数；“ $\pm$ ”表示了所选谱线混频模式，选定谱线对应的本振谐波频率比被测信号频率高时选“-”，比被测信号频率低时选“+”，其他谱线的频率标示也要依据相同的公式。

谐波混频时的多重响应谱线是成对出现，每对谱线的频率间隔为：

$$\Delta f = 2 f_{IF} \frac{n_N}{n_x} \quad (3)$$

式中，当 n_x 与 n_N 相等时 Δf 为 $2f_{IF}$ ，以此可以判断“真信号”的位置，从而读出被测信号的频率。反过来也可以利用每对谱线的间隔来确定谐波混频的次数：

$$n_x = 2 f_{IF} \frac{n_N}{\Delta f} \quad (4)$$

由式(1)可知，满足混频方程会产生响应谱线，本振的谐波次数越高，能够混频的被测信号的频率也越高。对于波导输入端口的混频器，由于波导的高通性能，频率高于波导波段的信号也能进入混频器，只要混频器产生的本振谐波和被测信号混频后满足式(1)即可在频谱仪的显示器上显示出响应谱线，只不过谱线的标示频率仍要依据公式(2)。虽然谱线标示的频率不是信号的真实频率，但是根据式(2)可以反算出产生响应谱线的本振频率：

$$f_{LO} = \frac{f_N \mp f_{IF}}{n_N} \quad (5)$$

用式(6)或式(7)计算出实际的信号频率：

$$f_s = n_x f_{LO}^1 + f_{IF} \quad (6)$$

$$f_s = n_x f_{LO}^2 - f_{IF} \quad (7)$$

式中： f_{LO}^1 表示频率低的谱线对应的本振频率； f_{LO}^2 为标示频率高的谱线对应的本振频率。

2 测量实例

根据上述原理利用 W 波段的外接混频器对 Y 波段(170 GHz~260 GHz)的信号进行测试，见图 1。被测信号源 SMW24 是返波管振荡源，设置不同的阴极电压可以得到不同频率的信号，信号源设置为点频状态。信号源的输出波导为 WR-4，因此需要一个过渡波导过渡到 W 波段的标准波导 WR-10。由于谐波混频器的-1 dB 增益压缩点为-1 dBm，而信号源的最大输出功率为 20 dBm，因此在谐波混频器与信号源之间接入一个衰减量为 0~35 dB 的可变衰减器。测试中所选频谱仪为安捷伦公司的 E4447A，由谐波混频器扩频到 W 波段，在 W 波段该频谱仪选定的谐波混频次数 n_N 为 18^[3]，并且是“-”模式混频，因此本例中所用的式(2)的实际形式为：

$$f_N = 18 f_{LO} - f_{IF} \quad (8)$$

相应的，本振的计算公式(4)的实际形式为：

$$f_{LO} = \frac{f_N + f_{IF}}{18} \quad (9)$$

测试中由信号源产生的信号经过渡转换波导和可变衰减器后到达混频器，在混频器内与频谱仪给出的本振谐波进行混频，输出的中频信号再送回频谱仪，频谱仪显示出的谱线为多重响应谱线，见图 2。

由图 2 可以看出基本所有谱线都是成对出现的，精确读出每对谱线的频率，见表 1。

表 1 中 f_N^1 和 f_N^2 分别表示一对谱线中频率较低和较高的谱线，测试中所用频谱仪在外谐波混频工作时的第一中频为 321.4 MHz，将相应数值代入式(5)可以计算出这 2 条谱线的实际混频次数，见表 1，由于谱线的显示频率与频谱仪的显示精确度有关，由式(5)计算得到的谐波混

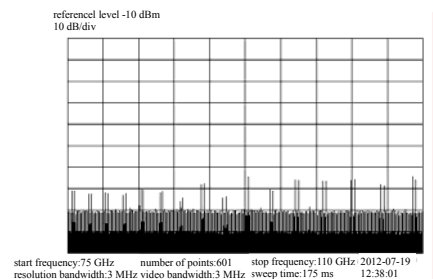


Fig.2 Spectrum diagram of multiple responses
图 2 多重响应谱线图

频次数不是整数,表中的数值 n_x 是经过四舍五入得到。由式(9)可以得到每条谱线对应的本振频率,再由式(6)和式(7)即可计算出信号源产生的实际信号的频率值。

表 1 多重响应谱线的频率

Table1 Frequencies of the multiple responses

item	f_N^1/GHz	f_N^2/GHz	n_x	f_{LO}^1/GHz	f_{LO}^2/GHz	f_s^1	f_s^2
1	75.487	75.722	49	4.211 6	4.224 6	206.688 7	206.685 6
2	77.066	77.306	48	4.299 3	4.312 6	206.687 8	206.685 0
3	78.713	78.961	47	4.390 8	4.404 6	206.689 0	206.693 8
4	80.433	80.686	46	4.486 4	4.500 4	206.693 8	206.697 5
5	82.225	82.483	45	4.585 9	4.600 2	206.687 4	206.689 6
6	84.102	84.364	44	4.690 2	4.704 7	206.689 7	206.687 4
7	86.067	86.335	43	4.799 4	4.814 2	206.693 7	206.691 1
8	88.119	88.393	42	4.913 4	4.928 6	206.682 3	206.678 9
9	90.280	90.559	41	5.033 4	5.048 9	206.691 3	206.684 0
10	92.540	92.831	40	5.159 0	5.175 1	206.680 1	206.683 9
11	94.926	95.221	39	5.291 5	5.307 9	206.690 8	206.687 1
12	97.432	97.737	38	5.430 7	5.447 7	206.689 7	206.690 8
13	100.072	100.385	37	5.577 4	5.594 8	206.685 6	206.686 2
14	102.863	103.182	36	5.732 5	5.750 2	206.690 2	206.685 4
15	105.812	106.143	35	5.896 3	5.914 7	206.691 9	206.692 7
16	108.926	109.267	34	6.069 3	6.088 2	206.677 6	206.678 9

由于频谱仪显示谱线频率的精确度与扫宽和分辨率带宽都有关系,因此需要设置合适的扫宽和分辨率带宽以获得足够精确的谱线频率,同时又由于被测信号源本身的频率稳定度的影响,故谱线的频率读取必然存在误差,进而导致最后得到的信号频率也存在误差。表 1 中计算得到的 f_s^1 和 f_s^2 之间差异即是这个原因,观察所得到的所有 f_s^1 和 f_s^2 ,其数值都在 206.7 GHz 附近,因此可以判断被测信号的频率约为 206.7 GHz。

3 结论

本方法依据频谱仪谐波混频的实质对亚毫米波信号在频谱仪上的多重响应进行分析,给出了当谐波混频器无预选器,且信号频率超过混频器工作频率上限时确定未知信号频率的方法。理论上只要通过混频器的输入端口的信号都能测到,但是混频器工作在更高频率时的灵敏度也会下降,同时变频损耗也会增大,因此利用低波段的谐波混频器扩频所能测到的信号频率也不能无限高。从实验结果上看,利用 W 波段测 Y 波段的信号是可以的,再高一波段到 J(220 GHz~300 GHz),甚至更高频段时就需要有相应频段的被测信号来验证本方法的实用性。

上述原理也适用于利用高频段的谐波混频器测量低频段的信号,但是当谐波混频器的输入端口为波导时,波导的下截止特性使得低频段的信号不能进入混频器内,因此不能采用本方法。本方法仅利用了多重响应信号谱线频率之间的关系,对谱线幅度特性未加分析,这是因为这种应用下的混频器在高频的变频损耗未知,高频信号在低波段波导中传输时的损耗也未知,因此所测谱线的幅度无法定标。如果需要进行与功率有关的测量项目,比如谐波和交调等,首先需要进行功率定标。

参考文献:

- [1] 安捷伦科技有限公司. 频谱分析基础[Z]. 2006.
- [2] Agilent Technologies, Inc.. External Waveguide Mixing and Millimeter Wave Measurements with Agilent PSA Spectrum Analyzers[Z]. 2007.
- [3] 张江岳,乔春丽,崔素玲,等. 频谱分析仪扩频原理和信号识别技术[J]. 电子测量技术, 2004,(4):1-3.

作者简介:



梁友焕(1975-),女,山东省茌平县人,硕士,高级工程师,授权专利 1 项,主要研究方向为行波管副特性测试、微波管常规冷测.email: lyh1123@163.com.

李镇远(1963-),男,辽宁省岫岩县人,本科,教授级高工,发表论文 34 篇,曾获 2 个部级奖,主要研究方向为微波测量。

冯进军(1966-),男,山西省运城市人,博士生导师,研究员,IEEE EDS 真空电子技术委员会委员,IEEE Beijing Section 副主席,发表论文 120 余篇,授权专利 4 项,主要从事真空电子学、微波电子学、等离子体电子学、MEMS 技术、太赫兹真空电子学、高频集成真空电子学等领域的工作。