

基于飞秒脉冲的超宽带谐波混频微波测试

王昌雷¹ 梁铁柱² 武帅¹ 黄文华²

¹中国电子科技集团公司第三十八研究所微波光子学研究中心, 安徽 合肥 230088

²西北核技术研究所高功率微波技术重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 为实现超宽带的微波/毫米波测试, 基于飞秒激光技术设计并搭建了一套光学谐波混频系统。该系统采用飞秒激光脉冲序列作为光载波, 利用飞秒脉冲包络信号的高次谐波与被测信号进行混频, 将被测信号下变频至直流进行进一步测量。由于飞秒脉冲序列特有的宽带谐波成分, 该系统能够实现 100 GHz 以上测试带宽。利用该系统分别测试了 6.56 GHz 与 100 GHz 的天线口面场的电场幅度分布, 并与微波仿真结构进行了比较, 实验与仿真结果吻合, 验证了该设计的正确性。设计中采用的谐波混频器为基于泡克尔斯效应的铌酸锂电光晶体。

关键词 超快光学; 谐波混频; 电光效应; 超宽带

中文分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.093201

Ultra-Wideband Harmonic Mixing for Microwave Measurement Based on Femtosecond Pulses

Wang Changlei¹ Liang Tiezhu² Wu Shuai¹ Huang Wenhua²

¹Research Center of Microwave Photonics, East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei, Anhui 230088, China

²Science and Technology on High Power Microwave Laboratory Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

Abstract An optical harmonic mixing system based on femtosecond laser technology is designed and built for ultra-wideband microwave/millimeter wave measurement. In the system, femtosecond laser pulse train is utilized as the light carrier, and the signals under test are mixed with the high order harmonics of the femtosecond pulse envelope function, and then are down-converted into direct current (DC) for further measurement. Since femtosecond pulse train is characterized with wide-banded harmonics, the present system could cover a measurement bandwidth of 100 GHz. Aperture electric field amplitude distributions of 6.56 GHz and 100 GHz antennas are measured, respectively, using such system and the experiment results are corresponding well with electromagnetic simulations, which proves the correctness of the design. Besides, the harmonic mixer is achieved by using an electro-optic crystal (i.e. LiNbO₃) based on Pockels' effect.

Key words ultrafast optics; harmonic mixing; electro-optic effect; ultra-wideband

OCIS codes 320.7160; 250.4745; 060.2630

1 引言

随着人类对电磁频谱资源的日益开发, 可用的电磁频段越来越宽, 从早期的千赫兹到兆赫兹, 再到吉赫兹甚至是太赫兹波段都出现了不同层次的应用。因此宽带和超宽带的电磁波测试接收技术也受到了越来越多的关注, 特别对于电磁兼容以及电子战等领域, 该问题更为重要^[1-5]。通常对于微波信号的测量, 特别是大带宽的信号, 需要用到变频技术, 即需要把高频段的信号通过混频技术下变频至较容易处理的中低频段, 这在无线电和雷达等领域十分普遍。但随着信号带宽和频段的不断拓展, 原先基于半导体电子的混频技术已经远远不能满足要求。比如对于 DC-100 GHz 的测试带宽来说, 目前所有的电子类混频器均无法达到如此带宽, 只能通

收稿日期: 2015-01-24; 收到修改稿日期: 2015-02-26; 网络出版日期: 2015-08-12

基金项目: 国防科工局计量专项(JSJC2013210C42)、国家国际科技合作专项(2011DFA12430)、中电集团创新基金项目(JJ120224, JJ130103)、安徽省重大科学仪器专项(1310115190)

作者简介: 王昌雷(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要从事超快激光技术应用方面的研究。

E-mail: wangchanglei@cetc38.com

过多个混频器叠加才有可能实现,其设备量十分可观,已经到了令人难以忍受的程度,无法实用。

以上问题的根源在于绝大多数的电子器件均存在带宽限制,高频特性急剧恶化,而光混频技术的出现很好地解决了这个问题。由于光作为混频介质,其频率往往在几百太赫兹,而微波通常在几百吉赫兹以内,相对光来说是非常窄带的信号,因此微波与光的混频不会改变光的本质特性,不会影响光的传输和处理,这样就将在微波段的宽带问题变成了一个相对于光波段的窄带问题^[6-8]。尽管光与微波混频的问题得到了较为妥善的解决,但最终要实现超宽带微波接收则必须能够在超宽的频率范围内具有下变频至中低频的能力,如何在光域进行宽带的下变频则是问题的关键。

飞秒激光技术的出现,使得宽带微波信号的光处理又有了更进一步的发展,目前超快激光技术已经在微波信号产生和频率合成方面有了成功应用^[9-10],本文介绍的是利用飞秒激光技术完成以上功能,不同于一般光电直接混频过程,本文利用的是飞秒激光脉冲包络的谐波与被测电磁波进行混频,充分利用了飞秒脉冲的宽谱特性(通常为太赫兹量级)。

2 原 理

飞秒激光为一种锁模激光器,即锁定增益谱线内的纵模,从光谱上看,其分布为中心频率两旁一条条离散的谱线,谱线间隔为激光脉冲的重复频率。在时域上则为以一定频率重复出现的脉冲序列。

飞秒脉冲信号可以表示如下的时域形式:

$$E(t) = A(t)\exp(-i2\pi f_c t) + \text{c.c.}, \quad (1)$$

式中 $A(t)$ 为光载波的周期性包络函数, f_c 为激光的中心频率,c.c.为前一项的复共轭。 $A(t)$ 可以用傅里叶级数形式表示为:

$$A(t) = \sum_n A_n \cos(2\pi n f_r t), n = 0, 1, \dots, \quad (2)$$

式中 f_r 为激光脉冲的重复频率,因此飞秒脉冲可以表示为下面的形式:

$$E(t) = \sum_n A_n \{\exp[-i2\pi(f_c + n f_r)t] + \exp[-i2\pi(f_c - n f_r)t]\} + \text{c.c.}, \quad (3)$$

由包络函数表达式可知,该包络中包含了频率为 f_c 的基波成分以及频率为 $n f_r$ 的各阶谐波成分。其中 n 的大小满足如下条件:

$$2|n f_r| \leq \Delta\nu, \quad (4)$$

$\Delta\nu$ 为激光脉冲的频谱宽度,通常与激光器内部增益介质的增益谱宽度相当。通常来讲,脉冲宽度与其频谱宽度的乘积为一常值,脉宽越短其频谱宽度越大。对于飞秒脉冲来讲, $\Delta\nu$ 的典型值在太赫兹量级。因此包络函数的高次谐波频率成分也可以达到太赫兹频段。对于一般的飞秒激光器来说,其重复频率通常为百兆赫兹左右,因此包络函数的频谱成分从百兆赫兹一直延伸到太赫兹,这就为下面的超宽带谐波混频提供了充足的谐波本振。

频率为 f 的微波信号在非线性光学晶体的作用下(这里指线性电光效应),与飞秒激光脉冲发生混频,混频过程可以表示为:

$$E_m(t) = E(t) \cdot \cos(2\pi f t) = \cos(2\pi f t) \sum_n A_n \cos(2\pi n f_r t) \exp(-i2\pi f_c t) + \text{c.c.} = \sum_n A_n \cos(2\pi n f_r t) \cos(2\pi f t) \exp(-i2\pi f_c t) + \text{c.c.} = A_m(t) \exp(-i2\pi f_c t) + \text{c.c.}, \quad (5)$$

式中 $A_m(t)$ 为混频后的光包络信号。可以进一步表示为:

$$A_m(t) = \sum_n A_n \cos(2\pi n f_r t) \cos(2\pi f t) = \sum_n \frac{1}{2} A_n \{\cos[2\pi(n f_r + f)t] + \cos[2\pi(n f_r - f)t]\}. \quad (6)$$

由于光电探测器为光强响应型器件,因此上述混频光信号 $E_m(t)$ 经过光电探测器的光电转换后只有包络信号留下。显然由(6)式可知后一项可用于微波测试的下变频,对于频率为 f 的微波信号来说,总存在一个高次谐波,使得其与 f 差频后的频率在 $f_r/2$ 的范围内,当第 n 次谐波 $n f_r$ 与被测信号相等时,该项成为直流项。这样就实现了在兆赫兹到百吉赫兹的范围内进行超宽带下变频的目标。

3 实验

3.1 系统装置图

实验装置如图1所示,频率合成器输出待测的微波信号经过天线发射出去,同时产生一相干的80 MHz同步信号给飞秒激光器作为该激光器的同步信号。飞秒激光器在同步信号的控制下输出重复频率为80 MHz的飞秒激光脉冲序列。飞秒激光器为光纤输出,中心波长为1550 nm,图2为该输出脉冲的光谱,其3 dB半峰全宽(FWHM)为1.54 THz。激光脉冲宽度为180 fs。飞秒脉冲序列依次经过隔离器、光纤偏振控制器和光纤环形器后进入电光晶体。这里的电光晶体为横向调制工作模式的铌酸锂 LiNbO_3 晶体。偏振控制器的作用为调节进入电光晶体的激光的偏振态使之满足横向调制的要求。 LiNbO_3 晶体的底面镀有高反膜,可以将飞秒激光脉冲反射回环形器并进入偏振检测系统。微波射频信号通过铌酸锂晶体加载到飞秒激光脉冲序列的偏振态上,与光脉冲的包络信号混频。经过检偏器后混频后的包络信号被转换到光强变化上,通过光电探测器变为中低频的电信号后由数据采集模块(AD)模块检测。需要指出的是,进入光电探测器的光脉冲为展宽后的光信号,以确保探测器能够线性的响应光脉冲强度的变化。

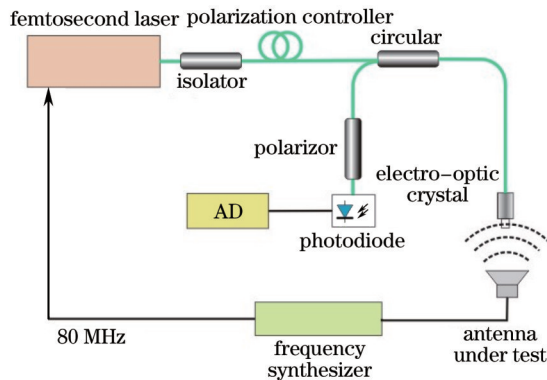


图1 实验装置图

Fig.1 Schematic setup of the experiment

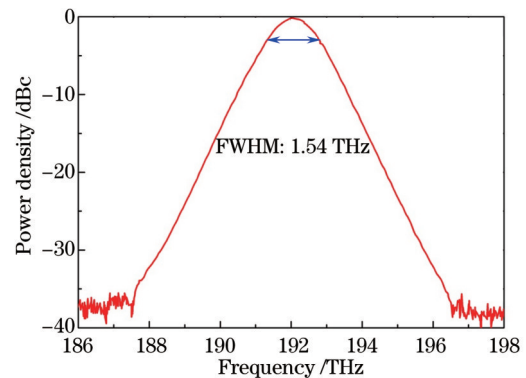


图2 飞秒脉冲的频谱

Fig.2 Spectrum of the femtosecond pulses

电光晶体在二维位移台的带动下,完成二维平面的移动,从而测出被测天线口面场的电场分布。为验证系统的宽带特性,分别选取了6.56 GHz的C波段贴片天线和100 GHz的毫米波角锥喇叭天线作为测试器件进行了口面场测试实验。

3.2 实验结果

6.56 GHz的天线为贴片印刷天线,其贴片结构如图3(a)所示,基板为FR4材料,图3(b)为实物图。

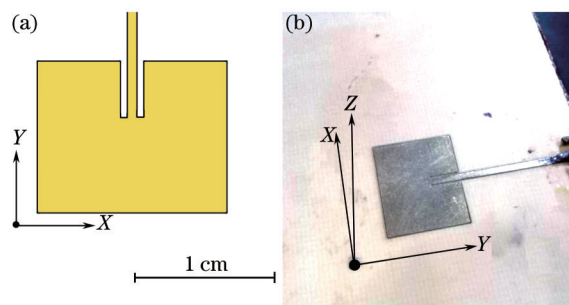


图3 6.56 GHz的测试贴片天线。(a) 天线的结构示意图;(b) 天线实物照片

Fig.3 Testing patch antenna resonating at 6.56 GHz. (a) Schematic of the patch; (b) photo of the antenna

图4为实验测量结果。其中 X, Y 为平行于天线口面的两个正交方向,由于电光晶体只能响应一个极化方向的电场分量,另一极化电场的获取是通过旋转电光晶体获得。电光晶体位置距天线表面为0.5 mm。基于时域有限积分法的电磁场仿真仿真结果如图4(b)和图4(d)所示。

100 GHz的毫米波测量采用的是商用的标准增益角锥喇叭天线,如图5所示,喇叭口为26.92 mm×18.27 mm的矩形,图5(b)为实物照片。

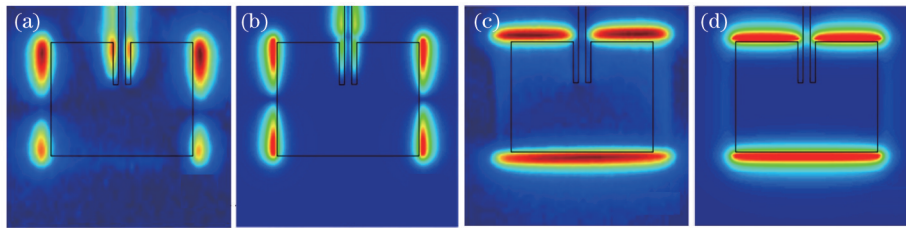


图4 贴片天线的测试与仿真结果。(a) X极化方向电场(测试); (b) X极化方向电场(仿真); (c) Y极化方向电场(测试); (d) Y极化方向电场(仿真)

Fig.4 Measurement and simulation result for the patch antenna. (a) X-polarized electric field(measurement); (b) X-polarized electric field(simulation); (c) Y-polarized electric field(measurement); (d) Y-polarized electric field(simulation)

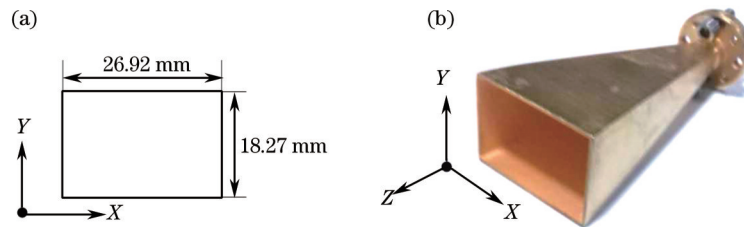


图5 100 GHz的测试角锥喇叭天线。(a) 天线口径的结构示意图; (b) 天线实物照片

Fig.5 Testing horn antenna of 100 GHz. (a) Structural schematic of the horn aperture; (b) photo of the antenna

图6(a)为实验测试结果,图6(b)为仿真结果,由于这种天线主要为Y极化,因此实验中未对X方向的电场进行测量。电光晶体位置距喇叭口面为0.5 mm。

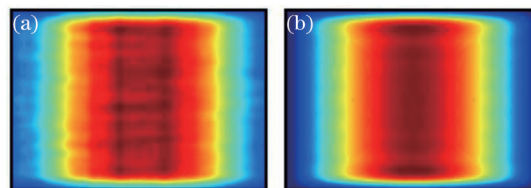


图6 喇叭天线的测试与仿真结果。(a) Y极化方向电场(测试); (b) Y极化方向电场(仿真)

Fig.6 Measurement and simulation result for the patch antenna. (a) Y-polarized electric field(measurement); (b) Y-polarized electric field(simulation)

4 分 析

由实验和仿真的对比可知,二者具有相当高的吻合度,这说明采用这种基于飞秒脉冲的谐波混频系统在超宽带的微波测试领域是可行的。为简单起见,本实验仅测试了6.56 GHz和100 GHz的频率,这两个频率均为飞秒脉冲的重复频率的整数倍,也就是说谐波混频后为直流成分,这对于检测来说比较容易。当然这并不意味着该系统只能测量频率为 Nf_r 的离散频率,实际上结合现有成熟的微波无线电接收技术,很容易实现40 MHz以内带宽的中频接收,这意味着该系统能够与传统中频接收技术兼容,从而对100 GHz频率范围的所有成分进行接收,这并非本文讨论的重点,在此不作赘述。

必须指出的是,根据本文前面的推导以及测量的脉冲频谱,不难发现,该系统能够支持更大频率的电磁波测量,理论上可达到太赫兹波段,由于发射源频率受限,并未进行更高频率的检测。

5 结 论

分析了基于飞秒脉冲的谐波混频实现超宽带接收的原理,并结合商用飞秒激光器搭建了一套超宽带的微波测试系统。通过对6.56 GHz和100 GHz的天线口面场的实验测试,并与电场仿真结果进行了对比,结果验证了该谐波混频系统的超宽带微波测试能力。

参 考 文 献

- Chai F K, To I, Hammock D, *et al.*. Tailoring on-chip inductors for low-noise ultra-wide-band receiver applications [C]. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 2006: 11-13.

- 2 Wong Tat Tung, Jiangzhou Wang. MMSE receiver for multicarrier CDMA overlay in ultra-wide-band communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 603-614.
- 3 Li Xuan, Zhao Shanghong, Zhang Wei, *et al.*. Analysis of intersatellite microwave photonic link performance under synchronous modulation of two-frequency-band signals[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(5): 050601.
李 轩, 赵尚弘, 张 薇, 等. 双频段信号同步调制下星间微波光子链路性能分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(5): 050601.
- 4 Hsin Liang Chen, Yi Tsung Li, Jen Shiun Chiang. A low power sigma-delta modulator for dual-mode wide-band receiver [J]. Analog Integrated Circuits and Signal Processing, 2012, 71(2): 179-185.
- 5 Wei Zhihu, Wang Rong, Pu Tao, *et al.*. Research of UWB pulse generation and transmission in fiber[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(8): 1482-1488.
魏志虎, 王 荣, 蒲 涛, 等. 超宽带信号的产生及光纤传输的研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(8): 1482-1488.
- 6 Liu Shuang, Qian Zuping, Wang Rong, *et al.*. Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406004.
刘 双, 钱祖平, 王 荣, 等. 光生频率大范围可调的相位编码微波信号[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406004.
- 7 Zhu Zihang, Zhao Shanghong, Zhao Hui, *et al.*. Optimization of optically preamplified inter-satellite microwave photonics links with two radio-frequency signals input[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0106003.
朱子行, 赵尚弘, 赵 辉, 等. 两路输入前置光放大星间微波光子链路优化[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0106003.
- 8 B Cabon. Microwave photonics mixing[J]. Computer Science & Engineering and Electrical Engineering, 2010, 17(2): 149-162.
- 9 Wei Zhang, Zhenyu Xu, Lours Michel, *et al.*. Advanced noise reduction techniques for ultra-low phase noise optical-to-microwave division with femtosecond fiber combs[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(5): 900-908.
- 10 Michael Y Peng, Aram Kalaydzhyan, Franz X Kärtner, *et al.*. Balanced optical-microwave phase detector for sub-femtosecond optical-RF synchronization[J]. Opt Express, 2014, 22(22): 27102-27111.

栏目编辑: 刘丰瑞