

基于双平行强度调制的宽带多普勒频移测量

张华林 陈福昌 余超群

闽南师范大学物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000

摘要 多普勒频移测量在电子战、雷达系统中有着重要的应用。电域测量方法存在带宽受限、抗电磁干扰能力弱的缺陷。提出并实验验证一种光辅助法测量多普勒频移,在光域,采用双平行强度调制器进行光双边带载波抑制调制、光带通滤波、低频光电转换,最后在电域进行低频频谱分析,从而实现多普勒频移测量,有效解决了电域测量方法的缺陷。实验结果表明,在微波/毫米波频率7~40 GHz、多普勒频移1 kHz~10 MHz实现了误差 ± 46 Hz的多普勒频移测量。

关键词 测量;微波光子;双平行马赫-曾德尔强度调制;多普勒频移

中图分类号 TN98 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071205

Wide Range Doppler Frequency Shift Measurement Based on Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator

Zhang Hualin Chen Fuchang Yu Chaoqun

College of Physics and Information Engineering, Minnan Normal University,
Zhangzhou, Fujian 363000, China

Abstract Doppler frequency shift measurement is widely used in electronic warfare and radar system. Measurement in electric domain suffers from narrow range and weak electro-magnetic interference resistance. This paper proposes and experimentally demonstrates an optics-assisted Doppler frequency shift measurement approach, which employs dual-parallel Mach-Zehnder modulator for double sideband carrier modulation, band pass filtering and low-frequency photoelectric conversion in optical domain, then analyses the low-frequency spectrum in electric domain, showing an effectively solution to the disadvantages of measurement in electric domain. Experimental results shows a measurement at 7~40 GHz microwave/millimeter wave of 1 kHz~10 MHz Doppler frequency shift with measurement error of ± 46 Hz.

Key words measurement; microwave photonics; dual-parallel Mach-Zehnder modulator; Doppler frequency shift

OCIS codes 120.1880; 070.6020; 350.4010; 350.5730

1 引言

在微波/毫米波测量、移动通信、雷达、电子战、射电天文学等领域广泛存在多普勒频移,对其进行精确测量有着重要的意义。传统的电域测量方法有傅里叶分析、时频分析、正交混频等^[1-3]。随着电子技术的不断发展,无线电信号频率变化范围由过去的数十兆赫兹发展到如今的数百吉赫兹,传统的电域测量方法因“电子瓶颈”带来的带宽限制,测量频率变化范围超过数十吉赫兹的微波/毫米波信号的多普勒频移越来越力不从心。随着电磁环境的不断复杂化,传统电域测量方法抗电磁干扰能力弱的缺陷越来越严重地影响多普勒频移的测量。

近年来,采用光子技术产生、传输、控制、处理微波/毫米波信号,因其极宽频率范围、低功耗、小体积、抗电磁干扰能力强得到广泛的重视和研究^[4]。因光子技术的优越性能,采用该技术进行微波/毫米波信号参数测量被大量研究^[5-17]。文献[5-7]采用双平行强度调制、两个光调制器串联或并联的方法测量微波/毫米波信号的频率、到达角、脉宽等参数。文献[8-17]将激光、微波/毫米波信号送入光强度调制器、光相位调制器、光偏振调制器、光双平行强度调制器等光子器件中进行调制,而后经过色散衰减、光电转换、电域后处理测得

收稿日期: 2015-01-14; 收到修改稿日期: 2015-03-02; 网络出版日期: 2015-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405086)、漳州市自然科学基金(ZZ2013J02)

作者简介: 张华林(1973—),男,硕士,副教授,主要从事微波光子信号处理方面的研究。E-mail: ZHL-5858@163.com

微波/毫米波信号的频率。鉴于微波光子技术在微波/毫米波频率测量领域的成功应用,类似地,微波光子技术应当可用于多普勒频移的测量。

本文提出并实验验证了一种采用光子技术的多普勒频移测量方法,将发射微波/毫米波信号和叠加多普勒频移的回波信号同时送入双平行强度调制器(DPMZM)对输入激光信号进行双边带载波抑制调制,然后进行光带通滤波、低频光电探测器(PD)拍频得到低频电信号,该信号频率即为多普勒频移,由低频电频谱仪分析即可得多普勒频移值。该光辅助多普勒频移测量方法可有效解决传统方法带宽受限、抗电磁干扰能力弱的问题。

2 原理

系统测量原理框图如图1所示。系统由连续激光器(LD)、偏振控制器(PC)、DPMZM、光带通滤波器、低频PD组成。DPMZM是一个特别的光调制器件,其内部含有上臂和下臂两个光强度调制器及一个光相位调制器。图1中,分取部分发射微波/毫米波信号从RF1输入对光信号进行双边带载波抑制调制;叠加了多普勒频移的回波信号从RF2端口输入,也对光信号进行双边带载波抑制调制;相位调制器相移量为0;最后上下臂光信号耦合一起输出。输出经过光带通滤波器滤出上边带,上边带光信号经过低频PD拍频输出信号频率即为多普勒频移。

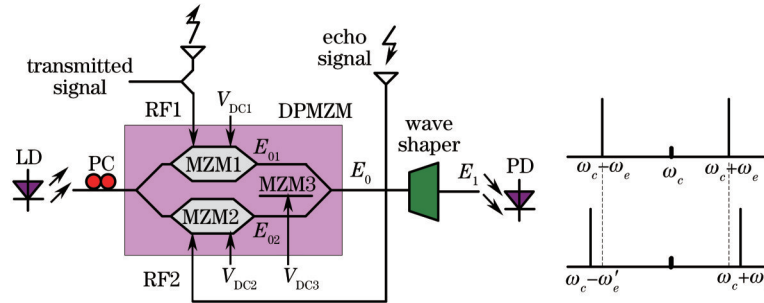


图1 多普勒频移测量系统原理框图

Fig.1 Schematic of the proposed approach for Doppler frequency shift measurement

设发射微波/毫米波信号频率为 f_e , 其角频率为 ω_e ; 发射微波/毫米波信号碰到运动目标反射回来, 此时回波信号叠加了多普勒频移, 其频率为 f'_e , 角频率为 ω'_e 。输入光信号为 $E_i \exp(j\omega_c t)$, E_i 为输入激光信号幅度, ω_c 为输入激光角频率。

调节 DPMZM 偏置电压 V_{DC1} 使上臂强度调制器 MZM1 偏置在最低点, 输入微波/毫米波信号幅度很小, 实现小信号调制, 忽略高阶边带, 实现载波抑制双边带调制, 则上臂输出为

$$E_{01} = E_i \beta_1 [\exp(j\omega_c t + j\omega_e t) + \exp(j\omega_c t - j\omega_e t)], \quad (1)$$

式中 $\beta_1 = \pi V_e / V_{\pi 1}$ 为 MZM1 的调制系数, V_e 为输入微波/毫米波信号幅度, $V_{\pi 1}$ 为 MZM1 的半波电压。

同理下臂输出为

$$E_{02} = E_i \beta_2 [\exp(j\omega_c t + j\omega'_e t) + \exp(j\omega_c t - j\omega'_e t)], \quad (2)$$

调节 DPMZM 偏置电压 V_{DC3} 使相位调制器 MZM3 对上下臂激光相移为零。则 DPMZM 输出为

$$E_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \{ \beta_1 [\exp(j\omega_c t + j\omega_e t) + \exp(j\omega_c t - j\omega_e t)] + \beta_2 [\exp(j\omega_c t + j\omega'_e t) + \exp(j\omega_c t - j\omega'_e t)] \}, \quad (3)$$

E_0 经 Wave shaper 带通滤波输出上边带为

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_i \gamma [\beta_1 \exp(j\omega_c t + j\omega_e t) + \beta_2 \exp(j\omega_c t + j\omega'_e t)], \quad (4)$$

式中 γ 为带通滤波器的插入损耗。 E_1 经低频 PD (带宽大于多普勒频移但小于发射微波/毫米波频率) 拍频输出两个上边带的差频电信号, 微波/毫米波信号因频率高于 PD 的响应带宽, 在 PD 中输出直流信号, PD 输出的交流信号 E_2 为发射微波/毫米波信号和回波信号的差频, 即多普勒频移, 可表示为

$$E_2 \propto \exp(j\Delta\omega_e t) \Rightarrow E_2 \propto \exp(j2\pi\Delta f_e t), \quad (5)$$

式中 $\Delta\omega_e = |(\omega_c + \omega_e) - (\omega_c + \omega'_e)| = |\omega_e - \omega'_e|$, $\Delta f_e = |f_e - f'_e|$ 。由图1也可清楚看出多普勒频移是两路光上边带的频率间隔, 即(5)式中的 Δf_e 。故而 PD 输出的交流电信号经过低频电频谱仪分析便可知其频率, 从而测得多

普勒频移。

由上述原理介绍可知:该测量方法其本质是光混频,避免了传统的电域方法放大及混频,从而解决了电域方法测量微波/毫米波信号多普勒频移的“电子瓶颈”问题;该测量方法与发射微波/毫米波信号频率无关,即使发射信号从数兆赫兹快速变化至数百吉赫兹,也可进行多普勒频移测量;该测量方法在光域进行多普勒频移测量,具有良好的抗电磁干扰性能。

3 实验

选用如下仪器及器件按图1所示搭实验链路:连续激光源选用安捷伦 N7714, DPMZM 选用 Fujitsu 公司的 FTM7962EP, 发射微波/毫米波信号源 RF1 选用安捷伦 E8257D, 回波信号源 RF2 选用安捷伦 E8267D, DPMZM 的偏置电压源选用两台普源 DP832A, 光带通滤波器选用 Yenista 公司的 XTM-50, PD 选用实验室拥有的带宽最低的北京莱普达光子科技有限公司出品的光电探测模块 PP-10G(响应带宽 10 GHz), 电频谱分析仪选用带频谱分析功能的安捷伦 86100A 型示波器。

安捷伦 N7714 连续激光源输出波长 1550 nm、功率 10 dBm 的激光送入 PC, 调节 PC 获得一合适的输入激光偏振态, 使 DPMZM 在三个偏置电压均为零时的输出光功率最强, 连接两台微波源同步输出, 光带通滤波器中心波长 1550.32 nm、带宽 0.64 nm。

设置 RF1 输出功率 10 dBm、频率 20 GHz 的微波信号, RF2 输出功率 10 dBm、频率 20 GHz 为基准步进 1 kHz 的微波信号, RF1 和 RF2 的频率差模拟多普勒频移。多普勒频移测量结果及其误差如图 2 所示。RF2 输出频率步进 10 kHz 时多普勒频移测量结果及其误差如图 3 所示。RF2 输出频率步进 100 kHz 时多普勒频移测量结果及其误差如图 4 所示。RF2 输出频率步进 1 MHz 时多普勒频移测量结果及其误差如图 5 所示。

由图 2~5 可知, 多普勒频移测量结果与理论值高度一致, 不论多普勒频移是数千赫兹还是数兆赫兹, 其测量误差均小于 ± 46 Hz。实验中, 超过 10 MHz 的多普勒频移也得到准确测量。

图 6 是 RF1、RF2 频率差(即多普勒频移)为固定 100 kHz, RF1 发射频率从 1 GHz 到 40 GHz 步进 1 GHz

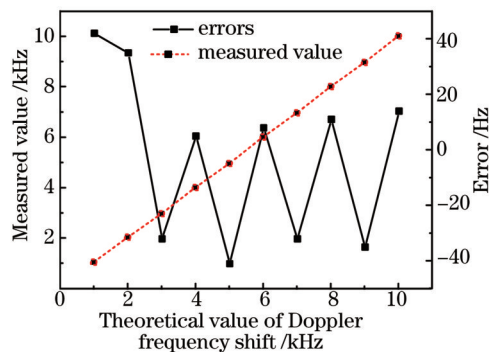


图 2 多普勒频移为 1~10 kHz 的测量值及误差曲线

Fig.2 Measured values and errors curves of Doppler frequency shift at 1~10 kHz

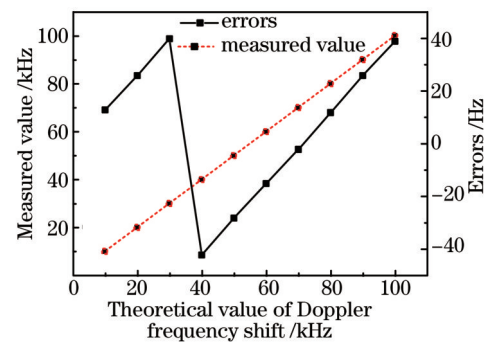


图 3 多普勒频移为 10~100 kHz 的测量值及误差曲线

Fig.3 Measured values and errors curves of Doppler frequency shift at 10~100 kHz

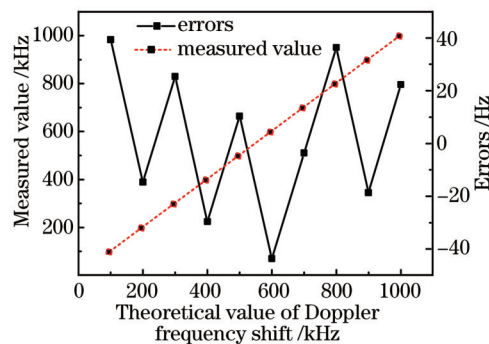


图 4 多普勒频移为 100~1000 kHz 的测量值及误差曲线

Fig.4 Measured values and errors curves of Doppler frequency shift at 100~1000 kHz

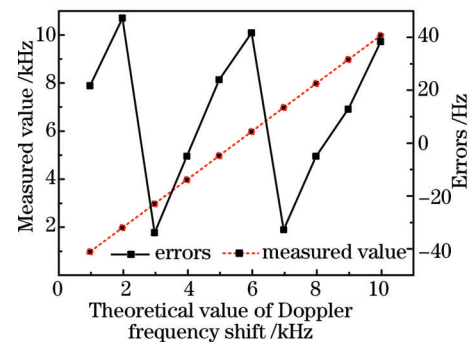


图 5 多普勒频移为 1~10 MHz 的测量值及误差曲线

Fig.5 Measured values and errors curves of Doppler frequency shift at 1~10 MHz

的多普勒频移测量结果。由图可看出,发射频率在1~6 GHz误差稍大,7~40 GHz误差37~43 Hz之间。

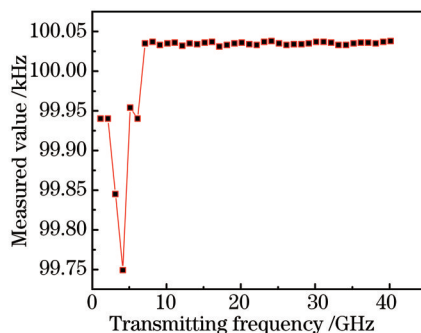


图6 不同发射频率多普勒频移测量值

Fig.6 Measured values of Doppler frequency shift at different transmitting frequencies

本实验误差来源主要有如下几点:

1) 由两台安捷伦微波源产生一定频率差的微波信号的稳定性不足,导致的误差。实验中产生 RF1 和 RF2 信号的两台安捷伦微波信号发生器通过 10 MHz 的时基相连,其连续波输出信号精度是一致的,故而其频率差值(即预设的多普勒频移)的误差可基本忽略。

2) 频谱分析仪的误差。本实验中选用带频谱分析功能的示波器进行频谱分析,其较大的底噪导致频谱分析误差较大,若选用专门的频谱分析仪进行测量,其较低的底噪可进一步降低测量误差。

3) 本测量装置的误差。DPMZM 存在半波电压随输入微波信号频率提高而增大及偏置点漂移的特性。当载波频率提高时,DPMZM 的半波电压也相应提高,DPMZM 的上下臂调制系数 β_1 、 β_2 缩小,导致测量动态范围缩小。实验中,要求 MZM1 和 MZM2 偏置在最低点,其输出仅包含正负一阶光边带而无光载波输出,偏置点漂移将导致输出光信号包含光载波,MZM3 偏置点的漂移将导致 DPMZM 上下臂输出光载波产生相移,链路中的光带通滤波器将滤除该光载波,然而,光带通滤波器的滤波截止特性不是垂直的导致测量载波频率在 6 GHz 以下的多普勒频移时误差增大,载波频率在 7 GHz 以上时各个偏置点漂移对实验误差基本无影响。

4 结 论

理论推导和实验结果表明,采用光子器件 DPMZM 对发射微波/毫米波信号及回波信号进行双边带载波抑制调制,经过光带通滤波、低频 PD 拍频、电频谱分析可有效测量多普勒频移,在发射频率 7~40 GHz、多普勒频移 1 kHz~10 MHz 测量误差小于 ± 46 Hz。该测量方法结构简单、测量频率范围宽、抗电磁干扰能力强,在电子战、移动通信、微波/毫米波信号测量等领域有广泛应用前景。

参 考 文 献

- 1 V C Chen. The Micro-Doppler Effect in Radar[M]. London: Artech House, 2011: 1-5.
- 2 M I Skolnik. Introduction to Radar Systems (3rd Edition)[M]. New York: McGraw-Hill, 2001: 1-15.
- 3 Liu Lizhe, Feng Dongsheng. Research on measure method of Doppler shift[J]. Radio Engineering, 2009, 39(5): 51-53.
刘丽哲,冯东升.多普勒频移测量方法研究[J].无线电工程,2009,39(5): 51-53.
- 4 J Yao. Microwave photonics[J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(3): 314-335.
- 5 S Pan, J Fu, J Yao. Photonic approach to the simultaneous measurement of the frequency, amplitude, pulse width, and time of arrival of a microwave signal[J]. Opt Lett, 2012, 37(1): 7-9.
- 6 B Vidal, M A Piqueras, J Marti. Direction-of-arrival estimation of broadband microwave signals in phased-array antennas using photonic techniques[J]. J Lightwave Technol, 2006, 24(7): 2741-2745.
- 7 S L Pan, J P Yao. Instantaneous microwave frequency measurement using a photonic microwave filter pair[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(19): 1437-1439.
- 8 D P Wang, K Xu, J Dai, et al.. Photonic-assisted approach for instantaneous microwave frequency measurement with tunable range by using Mach-Zehnder interferometers[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(2): 020604.
- 9 X Zou, W Li, W Pan, et al.. Photonic approach to the measurement of time-difference-of-arrival and angle-of arrival of a microwave signal[J]. Opt Lett, 2012, 37(4): 755-757.

- 10 L V T Nguyen, D B Hunter. A photonic technique for microwave frequency measurement[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2006, 18(9-12): 1188-1190.
- 11 X Zou, J Yao. An optical approach to microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2008, 20(23): 1989-1991.
- 12 B Vidal, T Mengual, J Marti. Photonic technique for the measurement of frequency and power of multiple microwave signals[J]. IEEE Trans Microwave Theory Techn, 2010, 58(11): 3103-3108.
- 13 W Li, N H Zhu, L X Wang. Brillouin-assisted microwave frequency measurement with adjustable measurement range and resolution[J]. Opt Lett, 2012, 37(2): 166-168.
- 14 H L Zhang, S L Pan. Instantaneous frequency measurement with adjustable measurement range and resolution based on polarisation modulator[J]. Electron Lett, 2013, 49(4): 277-279.
- 15 H L Zhang, S L Pan. High resolution microwave frequency measurement using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. IEEE Microwave Wireless Components Letters, 2013, 23(11): 623-625.
- 16 Wang Huan, Wu Xiangnong, Zhang Jing, *et al.*. Simulation of phase modulated instantaneous frequency measurement on optisystem[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 011202.
王欢, 武向农, 张静, 等. 相位调制的瞬时微波频率测量的Optisystem仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 011202.
- 17 Zhang Hualin. Instantaneous microwave frequency measurement with wide range and high resolution based on dual polarization modulation[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1108004.
张华林. 双偏振调制大范围高分辨率瞬时微波频率测量[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1108004.

栏目编辑: 何卓铭