doi:10.3788/gzxb20174606.0612005

基于双边带调制的频率扫描干涉型激光测距技术

陈希伦,王祥传,潘时龙
(南京航空航天大学 电子信息工程学院 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室,南京 210016)

摘 要:提出并论证了一种基于双边带调制的双扫频干涉测距技术,利用电-光双边带调制产生的-1和+1阶边带分别作为扫描方向相反的两个扫频信号,在接收端各获得一个频率与相对距离相关的拍频信号,通过将这两个拍频信号相乘的方式来减小由光路中扰动引起的测量误差.利用 Optisystem 软件进行系统仿真,结果表明,该方法能够有效抑制由于光路中扰动产生的测量误差.设计了实验验证系统,在光路中引入小幅振动作为扰动时,该方法对扰动的抑制比超过 14 dB,有效地提升了测距准确度.

关键词:激光应用;干涉法;双边带调制;激光测距;扰动抑制;扫描
中图分类号:TN247 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-4213(2017)06-0612005-7

Laser Ranging of Frequency Scanning Interferometry System Based on Double-sideband Modulation

CHEN Xi-lun, WANG Xiang-chuan, PAN Shi-long
(*Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing* 210016, *China*)

Abstract: A laser ranging of dual-sweep frequency scanning interferometry system based on double-sideband modulation was demonstrated. The electro-optic double-sideband modulation was used to create dual swept signals with opposite scanning directions. For each receiving terminal, the beat frequency signal related to relative distance was obtained. By multiplying both beat signals, measurement errors caused by disturbances in the optical path could be greatly reduced. The system was simulated in Optisystem. The simulation results indicate that the variations in the optical path length are eliminated efficiently. In addition, an experimental structure was proposed with vibrations in the optical path length. The experimental results show that the vibrations are suppressed for over 14 dB, which indicates that the precision can be improved effectively.

Key words: Laser applications; Interferometry; Double-sideband modulation; Laser ranging; Disturbances rejection; Scanning
OCIS Codes: 120.1880; 120.3180; 280.3400

0 引言

高准确度的激光测距技术在雷达系统、地质研究和工业生产中都有着重要的应用价值[1-3],因此受到广泛重视.常见的激光测距方法有三角法、脉冲法、相位法和干涉法等[4-6].频率扫描干涉法是一种新型高准确度的激光测距方法,经过十几年的研究发展[7],其测距准确度通常能够达到微米量级.该方法基于迈克尔逊干涉结构[8-9],根据光的干涉原理,扫频信号光经过参考臂和测量臂后在接收端会进行干涉,经由光电转换为电信号,两臂之间的相对距离可以根据该电信号的相位或者频率信息确定.相较于脉冲法等激光测距方法,该方法更适用于短距离的高准确度测量.然而,单扫频的频率扫描干涉系统在测量时对光路的变化十分

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61605077, 61527820, 61422108)和中央高校基本科研业务费专项资金(No. NJ20160009)资助
第一作者:陈希伦(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为激光测距技术. Email:cxllegend@163.com
导师(通讯作者):潘时龙(1982-),男,教授,博士,主要研究方向为微波光子学. Email:pans@ieee.org
收稿日期:2016-12-29;录用日期:2017-02-16

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

敏感，光路中的微小扰动会造成明显的测量误差[10]. 近年来，如何有效抑制系统光路中的微小扰动成为了对频率扫描干涉法的研究热点[11]. 2014 年，在传统单扫频频率扫描干涉系统的基础上，Tao Long 等提出了一种卡尔曼滤波算法[12]，对光路中微小振动的抑制比达到 12 dB. 此外，基于双扫频信号的频率扫描干涉法是另一种有效的解决方法[13]. 2007 年和 2012 年，Yang H J 等和 Kakuma S 等分别提出了使用两台扫频激光器的频率扫描干涉系统[14-15]，对光路中微小扰动的抑制分别达到 12 dB 和 11 dB. 此外，2015 年 Martinez J J 等提出了一种基于四波混频的双扫频系统[16]，不同于使用两台扫频激光器的方法，该系统中分别采用一台固定激光器和一台扫频激光器，利用四波混频效应产生另一扫频激光信号，使得两个扫频信号具有更好的相干性，其对光路中振动影响的抑制比达到了 12.2 dB.

本文提出一种基于双边带调制的双扫频频率扫描干涉(Frequency Scanning Interferometry，FSI)技术，利用电-光双边带调制和固定波长激光器产生扫频方向相反的两个扫频激光源，将这两个扫频激光源分别在两臂之间干涉产生的拍频信号相乘，可以有效地减小由于光路中扰动引起的测量误差.

1 基于双扫频信号频率扫描干涉法的测距原理

在单扫频频率扫描干涉系统中，激光扫频信号被分为两路，一路为距离已知的参考臂，另一路为长度待测的测量臂. 由于路径差的存在，两路信号之间会存在一个时延 τ，因此干涉后会获得一个具有固定频率的拍频信号，可表示为[15]

$$I(t,\tau)=A\cos\left[2\pi(\alpha\tau t+f_0\tau)\right] \tag{1}$$

式中，f_0 为扫频信号的初始频率，A 为信号幅度，α 为扫频速率.

然而在实际的测量中，光路中通常由于外部的环境的影响存在变化或者连续的轻微扰动，这种情况下式(1)可表示为

$$I(t,\tau)=A\cos\left\{2\pi\left[\alpha(\tau+\delta_t)t+f_0(\tau+\delta_t)\right]\right\} \tag{2}$$

式中，δ_t 表示光路中轻微扰动造成的距离变化.

为了消除由于光路径中扰动造成的测量误差，本文提出了图 1 所示的基于双边带调制的双扫频频率扫描干涉测距技术. 通过一个高速扫频微波信号对固定激光器进行抑制载波的双边带调制，产生的±1 阶边带可视为具有不同速度和相反方向的两个扫描激光源. 在光电探测模块中分离这两个扫频信号，最终可以获取两个拍频信号. 这两个拍频信号可表示为

$$I_{1,2}(t,\tau)=A_{1,2}\cos\left\{2\pi\left[\alpha_{1,2}(\tau+\delta_t)t+f_{1,2}(\tau+\delta_t)\right]\right\} \tag{3}$$

式中，$f_{1,2}$ 分别是两个扫频信号的初始频率，$A_{1,2}$ 为相应的幅度，α_1 和 α_2 分别为扫频信号的扫频速率.

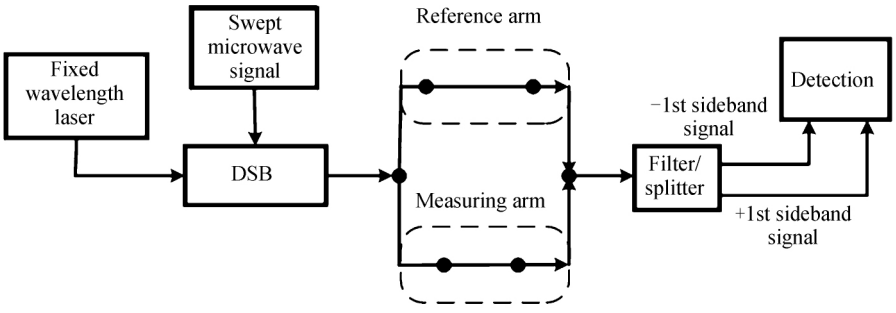


图 1 双扫频频率扫描干涉结构

Fig. 1 Structure of dual sweep FSI structure

将两个拍频信号相乘可得到

$$\begin{aligned}I(t,\tau)=A_3\cdot\{&\cos\left[2\pi((\alpha_1-\alpha_2)(\tau+\delta_t)t+(f_1-f_2)(\tau+\delta_t)\right]+\\&\cos\left[2\pi((\alpha_1+\alpha_2)(\tau+\delta_t)t+(f_1+f_2)(\tau+\delta_t)\right]\}\end{aligned} \tag{4}$$

在式(4)中，由于通过双边带调制产生的±1 阶边带扫频方向相反，可得 $\alpha_1=-\alpha_2=\alpha$，因此式中第二项可以通过电滤波器去除. 由于调制后的两个扫频激光起始频率非常接近($f_1-f_2\approx0$)，第一项中相位项的影响可以被消除. 另外，当扰动的变化距离 δ_t 远小于光路长度时，第一项中的频率可以近似为 $2\alpha\tau$. 因此两个拍频信号相乘后得到的信号频率可以作为新的测距信号，且该测量信号不受光路中微小扰动的影响，从而可有

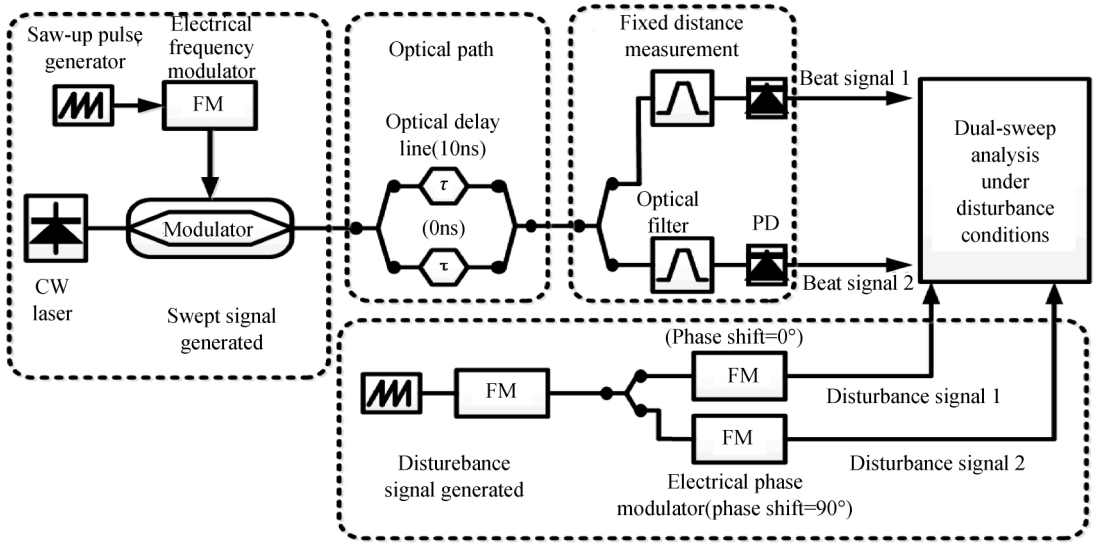
?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

效消除光路中微小扰动引起的测量误差.

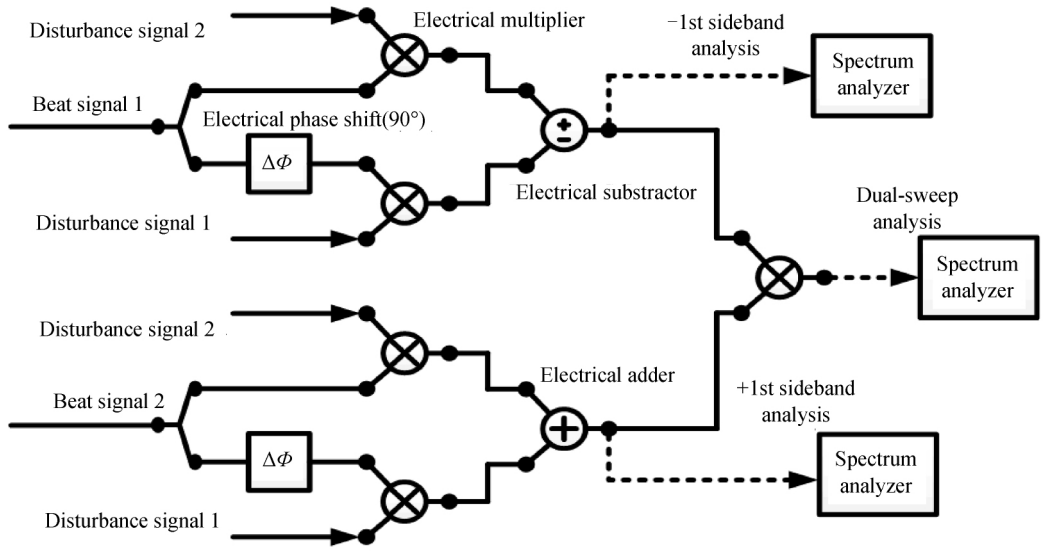
2 系统仿真

2.1 仿真结构

在 Optisystem 中建立如图 2 所示的仿真系统. 系统时间窗口长度为 0.5 μs，信号长度为 1 bit. 在固定距离测量部分的扫频信号产生模块中，通过一个锯齿波信号对 20 GHz 的载波进行频率调制产生扫频微波信号，扫频速度 62.5 GHz/μs. 该信号再经由马赫曾德调制器(Mach－Zehnder Modulator，MZM)对波长为 1 550 nm的激光器进行抑制载波的双边带调制，以获取两个方向相反的扫频光信号；测量光路由两个光时延线组成，其中参考臂距离为 0，测量臂距离的初始值设为 3 m(10 ns)；之后通过两个滤波器滤出±1 阶边带的扫频光，分别进行光电探测，最终获得两个距离测量信号.



(a) System of dual-sweep FSI



(b) Component of the dual-sweep analysis under disturbance conditions

图 2 基于双边带调制的双扫频频率扫描干涉法的 Optisystem 系统仿真

Fig. 2 Simulation of dual－sweep FSI based on double－sideband of Optisystem

该系统的其余部分用于仿真在光路受到扰动条件下双扫频频率扫描干涉法测量结果. 为了在本系统的仿真光路中加入小幅变化，将式(4)分别展开为

$$I_1(t,\tau)=A_1\cos\left[2\pi(\alpha\tau t+f_1\tau)\right]\cdot\cos\left(2\pi f_1\delta_t\right)-A_1\sin\left[2\pi(\alpha\tau t+f_1\tau)\right]\cdot\sin\left(2\pi f_1\delta_t\right) \tag{5}$$

$$I_2(t,\tau)=A_2\cos\left[2\pi(\alpha\tau t+f_2\tau)\right]\cdot\cos\left(2\pi f_2\delta_t\right)+A_2\sin\left[2\pi(\alpha\tau t+f_2\tau)\right]\cdot\sin\left(2\pi f_2\delta_t\right) \tag{6}$$

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由式(5)、(6)可知，为了在仿真光路中引入小幅扰动，可以通过对固定距离测量信号加载一个频率为 $f_{1,2}\delta_t$ 的扰动信号来实现. 另外由于在双边带调制中，载波频率与两个扫频边带的起始频率十分接近，可以近似为 $f_c=f_1=f_2$. 因此，在图 2 的扰动信号产生模块中使用一个锯齿波信号，以锯齿波信号电压的变化来模拟光路长度的变化 δ_t. 该锯齿波信号在系统时间窗口内的电压 U 变化范围为 0～5 V，电相位调制器的调制系数为 1 000，即 $f_c\delta_t=1\,000U$，可知对应的 δ_t 长度变化约为 0～7.7 mm. 通过乘法器将两个受到扰动影响的测量信号相乘获得双扫频方法的测距频谱.

2.2 仿真结果及分析

在系统仿真中，首先进行固定距离测量，将测量臂中的延时线设为 3 m(10 ns)，通过±1 阶扫频边带对该距离进行测量.

图 3 为测量臂为 3 m 时固定测距的频谱，可知－1 和＋1 阶边带的测量结果均为 626 MHz，可以求得相对应的距离为 3.004 8 m(10.016 ns). 固定距离测量系统的误差为 0.16%，主要受限于系统的频率分辨率，在仿真中，由于系统的频率分辨率为 2 MHz，对应的距离分辨率为 9.6 mm.

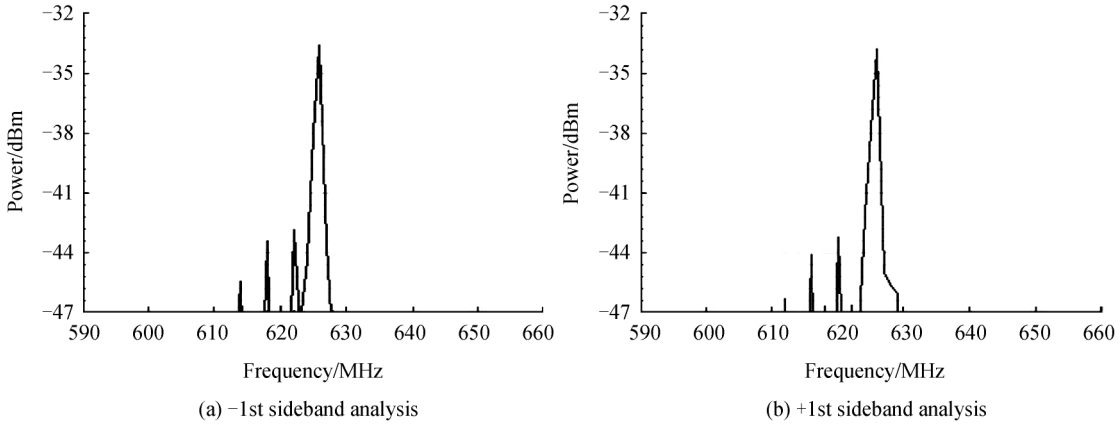


图 3 距离为 3 m 时的测距频谱

Fig. 3 Measured spectra of the distance of 3 m

在进行光路受外部扰动下的测距仿真前，为了验证测量误差主要来源于式(2)中由光路变化所造成的相位调制，而不是因为距离变化直接表现在频率项上，在仿真中将测量臂的延时线距离设为 3.007 7 m，将测量频谱作为对照.

图 4 为将测量臂的延时线改为 3.007 7 m 时，－1 和＋1 阶边带分别测量获得的频谱. 由图 4(a)、(b)可知，测得的拍频信号的频率仍均为 626 MHz(3.004 8 m)，因此 7.7 mm 的固定距离变化无法通过对频率项的测量而得到.

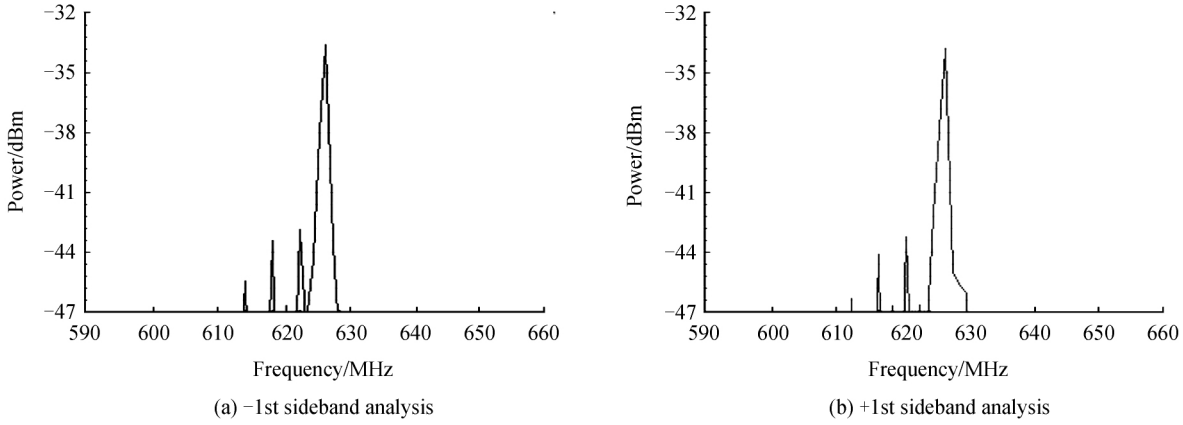


图 4 距离为 3.007 7 m 时的测距频谱

Fig. 4 Measured spectra of the distance of 3.007 7 m

为了进一步验证光路中扰动在相位项中对测量频谱造成的影响，将测量臂长度设为 3 m，并通过锯齿波信号在光路中引入 0～7.7 mm 随时间变化的小幅扰动，对单扫频测量方法和双扫频方法进行仿真，结果如

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 5. 分析测量结果可知由于光路扰动的存在，两个边带的测量结果不再相同，分别为 612 MHz 和 640 MHz，对应的距离为 2.938 m 和 3.072 m，在固定距离为 3 m 时误差分别为 2.07%和 2.40%.

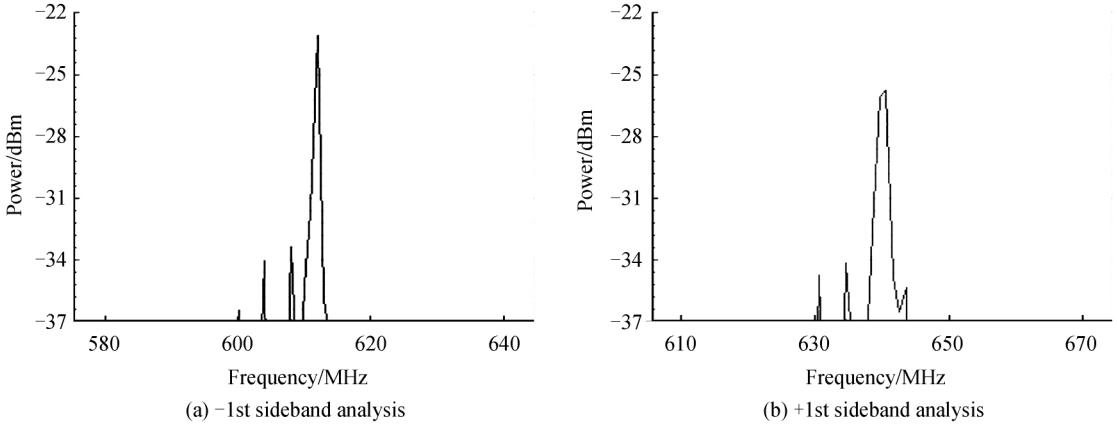


图 5　光路中引入 0～7.7 mm 扰动时的测距频谱

Fig. 5　Measured spectra when the perturbation in the optical path is 0～7.7 mm

由仿真结果分析可知，由于系统的距离分辨率为 9.6 mm，因此光路中距离为 7.7 mm 的扰动无法通过频率测量直接获得，而存在扰动时单扫频方法的测量结果存在明显的测量误差，由此可知该测量误差均来自于扰动引起的相位变化，进而对频率测量造成影响.

根据所提方法将两个干涉信号相乘，得到最终信号频谱如图 6，其主频频率为 1.252 GHz. 由于相乘后的信号频率为单一扫频中干涉信号频率的两倍，因此 1.252 GHz 对应的距离为 3.004 8，误差为 0.16%. 由此可知，双扫频方法在光路扰动时的测量距离与单扫频方法的固定距离测量结果完全相符，测量准确度仅受限于系统的频率分辨率.

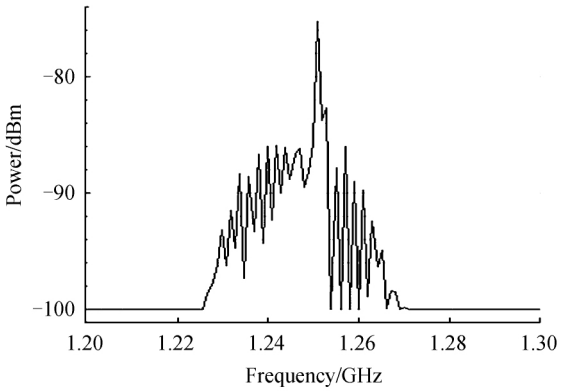


图 6　双扫频频率扫描干涉法在光路中引入 0～7.7 mm 扰动的测距频谱

Fig. 6　Measured spectra of the dual sweep FSI analysis when the perturbation in the optical path is 0～7.7 mm

综上，在单扫频频率扫描干涉系统中，光路的小幅扰动会造成测量误差，仿真结果显示，在 3 m 的测量距离条件下，如果光路中存在幅度为 7.7 mm 的扰动，两个独立的扫频边带分别存在 2.07%和 2.40%的测量误差. 而利用基于双边带调制的双扫频频率扫描干涉测距方法，测距误差仅为 0.16%，说明光路中扰动引起的测量误差被有效抑制，抑制比超过 11 dB.

3　实验系统验证

3.1　实验系统

为了验证仿真结果与系统的可行性，提出如图 7 所示的基于双边带调制的双扫频 FSI 实验系统. 其中，固定波长激光器使用 2 kHz 的窄线宽激光器(Teraxion)，波长为 1 550 nm，输出功率 16 dBm. 任意波形发生器(Keysight M8195A)用以产生扫频微波信号，其速度为 625 GHz/ms，带宽为 6～7 GHz. 利用马赫曾德调制器(MZM, Lucent, 10 GHz)实现双边带调制，并通过调整调制器上的偏置电压以达到抑制载波的目的. 经过调制后的信号经过掺饵光纤放大器(Erbium－Doped Fiber Amplifier，EDFA)放大后，由光耦合器分为参考臂和测量臂两路，其中参考臂为固定长度 0.5 m 的单模光纤(Single Mode Fiber，SMF)，测量臂为电控可调光延时线(General photonics). 为了验证光路的扰动对测量结果的影响，该延时线被设定在“扫描”模式下，即在某个固定位置附近进行来回运动，其频率为 64 Hz，振动幅度为 0.3 mm. 当延时线被设置在振动中心位置的情况下时，经测量，测量臂与参考臂之间的相对距离为 3.48 m. 两路信号再通过另一耦合器合并，通过可编程的光滤波器(Waveshaper 4 000 s, Finisar)将 ±1 阶边带分别滤出，在光电探测器

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(Photodetector,PD)中实现光电转换,最后进行信号处理.

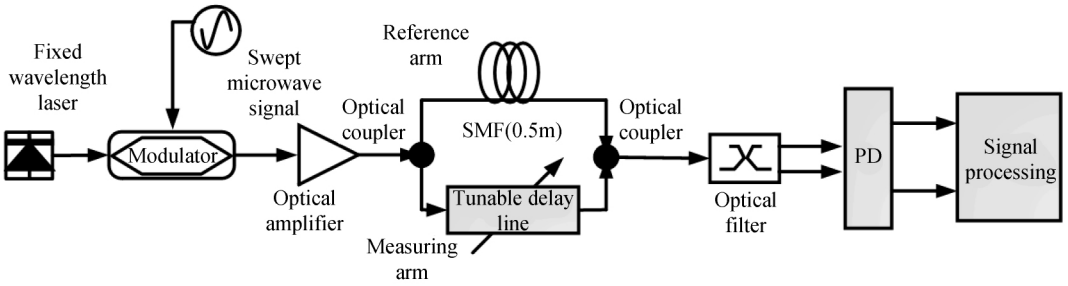


图 7 基于双边带调制的双扫频频率扫描干涉实验系统

Fig. 7 Schematic of the double-sideband modulated FSI

3.2 实验结果及分析

在可调光延时线设定为"扫描"模式下,即光路中存在小幅振动的情况,通过实时示波器记录下该系统在 50 ms 的时间内-1 和+1 阶边带测量所获得的信号,将这 50 ms 的数据均分为 25 组,每组长度为 2 ms,在后期信号处理部分中对每组数据进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform,FFT),用以获得在 2 ms 的时间内±1 阶边带和双扫频 FSI 测量的光路长度.

当延时线扫描频率设为 64 Hz、幅度为 0.3 mm 时,±1 阶独立边带和双扫频 FSI 方法的测距如图 8,图中的零点表示振动的中心位置. 由图 8 可知,在光路中存在小幅振动的情况下,±1 阶扫频边带测得的距离随时间变化十分明显,而双扫频方法获得的距离则趋近于一个稳定值. 在这 25 组数据中,-1 阶、+1 阶扫频边带测得的相对距离的平均值分别为 1.54 mm 和 1.49 mm,而双扫频方法的结果为 0.06 mm,由此可见所提出的双扫频 FSI 可以有效地降低测距系统中由外部扰动引起的测量误差,对光路中振动的抑制比超过了 14 dB.

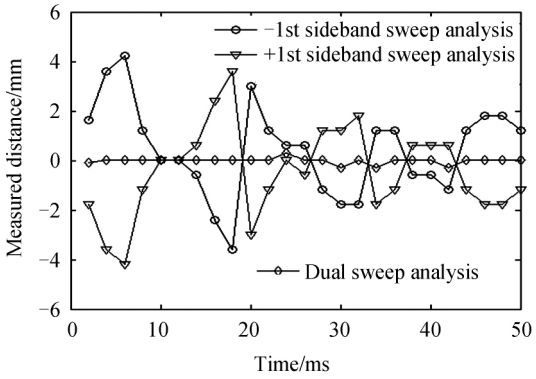


图 8 ±1 阶边带和双扫频频率扫描干涉法测量结果

Fig. 8 Measured distance of each sideband sweep and dual sweep distance estimations

另外由于电控可调光学延迟线以恒定速度来回运动,根据式(3)可知,振动引起的测量误差应该是恒定的. 这意味着当延迟线向某一方向移动时,同一边带的测量结果在理论上应当为一个固定的距离值,但是在图 8 所示的实验结果中,同一边带测得的相对距离在不同时刻并不相等. 主要原因为:1) 任意波形发生器产生的扫频信号线性度较差,导致扫频速度 α 存在非线性变化,从而引起幅度的波动; 2) 两个扫频边带线宽均大于 2 kHz,在快速傅里叶变换中,较大的线宽会影响信号最终的频率测量.

4 结论

本文提出了一种基于双边带调制的双扫频 FSI 测距技术,利用电-光双边带调制产生的-1 和+1 阶边带分别作为扫描方向相反的两个扫频信号,在接收端分别获得一个频率与相对距离相关的拍频信号,将这两个拍频信号相乘,有效地减小了由于光路中扰动引起的测量误差. Optisystem 仿真结果表明在 3 m 的测量距离条件下,光路中存在 7.7 mm 的扰动时,传统单扫频方法会造成超过 2%的测量误差,而双扫频方法的测量误差仅为 0.16%,有效地降低了由外部扰动引起的测量误差;实验验证结果表明在测量距离为 3.48 m,光路中的扰动幅度为 0.3 mm 时,双扫频频率扫描干涉法的结果对振动的抑制比超过了 14 dB,有效地提升了测距准确度. 该方法仅利用一个固定频率的激光器和电光双边带调制技术获得两个扫频激光信号,相比使用两个独立的扫频激光源,系统更加简洁且成本更低.

参考文献

[1] LEE J, KIM Y J, LEE K, *et al*. Time-of-flight measurement with femtosecond light pulses[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(10): 716-720.

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[2] SA V D B, PERSIJN S T, KOK G J, *et al*. Many－wavelength interferometry with thousands of lasers for absolute distance measurement.[J]. *Physical Review Letters*, 2012, **108**(18):1002－1006.

[3] SCHNEIDER R, THU P, STOCKMANN M. Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar[J]. *Optical Engineering*, 2001, **40**(1): 33－37.

[4] CHENG Peng－fei. Research of key technologies of wide dynamic range and high precision laser distance measurement [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics (SITP) of the Chinese Academy of Sciences, 2014.
程鹏飞. 大动态范围高准确度激光测距关键技术研究[D]. 上海：中国科学院研究生院上海技术物理研究所, 2014.

[5] YAO Ting－feng, ZHU Dan, LIU Shi－feng, *et al*. Wavelength－division multiplexed fiber－connected sensor network for source localization[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, **26**(18): 1874－1877.

[6] FU Jian－bin, PAN Shi－long. Fiber－connected UWB sensor network for high－resolution localization using optical time－division multiplexing[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(18): 21218－21223.

[7] MARRON J C. Frequency－scanning interferometry[C]. Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America, 2004: OMA3.

[8] LEE S H, KIM M Y, SER J I, *et al*. Asymmetric polarization－based frequency scanning interferometer[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(6):7333－44.

[9] COE P A, HOWELL D F, NICKERSON R B. Frequency scanning interferometry in ATLAS: remote, multiple, simultaneous and precise distance measurements in a hostile environment[J]. *Measurement Science & Technology*, 2004, **15**(11): 2175－2187.

[10] LI Zhi－dong. Movement error compensation in frequency scanning interferometry for absolute distance measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 152－157.

[11] PRELLINGER G, MEINERS－HAGEN K, POLLINGER F. Spectroscopically in situ traceable heterodyne frequency －scanning interferometry for distances up to 50 m[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, **26**(8): 084003.

[12] TAO Long, LIU Zhi－gang, ZHANG Wei－bo, *et al*. Frequency－scanning interferometry for dynamic absolute distance measurement using Kalman filter[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(24): 6997－7000.

[13] DALE J, HUGHES B, LANCASTER A J, *et al*. Multi－channel absolute distance measurement system with sub ppm －accuracy and 20 m range using frequency scanning interferometry and gas absorption cells[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(20): 24869－24893.

[14] KAKUMA S, KATASE Y. Frequency scanning interferometry immune to length drift using a pair of vertical－cavity surface－emitting laser diodes[J]. *Optical Review*, 2012, **19**(6): 376－380.

[15] YANG H J, NYBERG S, RILES K. High－precision absolute distance measurement using dual－laser frequency scanned interferometry under realistic conditions[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **575**(3): 395－401.

[16] MARTINEZ J J, CAMPBELL M A, WARDEN M S, *et al*. Dual－sweep frequency scanning interferometry using four wave mixing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, **27**(7): 733－736.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61605077, 61527820, 61422108) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. NJ20160009)

?1994-2017 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net