

· 光电系统 ·

全光纤高速模拟信号偏振态测量系统的研究

孙明璇, 王 健, 吴重庆, 邱 敏, 尚 超, 李善勇

(北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室 光信息科学与技术研究所, 北京 100044)

摘要: 全光纤高速偏振态测量, 尤其是模拟信号的偏振态高速测量在光纤通信和光纤传感等领域中有着重要应用。在深入研究光电探测器放大电路的基础上, 搭建了基于光纤偏振控制器(PC)、偏振分束器(PBS)以及模拟光电探测器的全光纤高速偏振态测量系统。用搭建的系统对0~50 MHz模拟信号的偏振态进行了测量, 并与商用偏振分析仪进行了误差比较。实验表明, 此偏振态测量系统可实现速率0~50 MHz模拟信号Stokes参量的准确测量, 显示在邦加球上的测量误差半径在0.03以下, 与商用偏振分析仪处于同一量级。系统重复性良好, 且可测模拟信号的速率远超目前商用偏振分析仪, 为许多待测光为模拟信号的光纤传感系统提供了有效的测量手段。

关键词: 光偏振态测量; 模拟信号; Stokes参量

中图分类号: O436.3; TP212.14

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-02-0017-06

Research on All Optical Fiber High-speed Analog Signal Polarization State Measurement System

SUN Ming-xuan, WANG Jian, WU Chong-qing, QIU Min, SHANG Chao, LI Shan-yong

(Institute of Optical Information Science and Technology, Key Laboratory of Education Ministry on Luminescence and Optical Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: All optical fiber high-speed state of polarization (SOP) measurement, especially the high-speed SOP measurement of analog signal, has important applications in optical fiber communications and sensing areas. Based on deeply researching on amplifying circuit of the photoelectric detector, an all optical fiber high-speed SOP measurement system is developed on the basis of a polarization controller (PC), a polarization beam splitter (PBS) and a photoelectric detector. The SOP of 0~50 MHz analog signal is measured by the system and the errors are compared with that of a commercial polarization analyzer (PA). Experimental results show that the SOP measurement system can accurately measure Stokes parameters of 0~50 MHz analog signal and the error radius on the Poincaré sphere is less than 0.03, which is the same order of magnitude as that of commercial PA. The system has good repeatability, and the measure rate is faster than that of the current commercial PA. So it provides an effective mean for fiber sensing systems which use the light to be measured as analog signals.

Key words: state of polarization (SOP) measurement; analog signal; Stokes parameters

偏振是光的基本特征之一, 无论在光纤通信、光纤传感、光信息处理以及其他光学应用中, 光的偏振特性都是不可回避的基本问题。几十年来, 对光纤内双折射的性质、来源及测量的研究^[1-2], 特别是光纤

中偏振模色散的研究, 如偏振模色散的模型以及数学描述^[3-4]、偏振模色散的测量和分布式测量^[5-6]、偏振模色散对光脉冲形状和系统特性的影响^[7]、如何减小光纤的偏振模色散^[8]、偏振模色散补偿^[9]、偏振模

收稿日期: 2015-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(61275075); 北京市自然科学基金(4132035)资助课题

作者简介: 孙明璇(1990-), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感及光偏振态测量方面的研究。

色散的应用等方面,都需要测量光的偏振态,因此偏振态检测的研究得到了人们的广泛重视。

但是,随着高速光纤通信以及其他高速系统的应用,如何提高偏振态测量速率的研究显得更加重要。例如,在光纤通信中,对偏振模色散测量与补偿中所使用的方法大多都是测量差分群时延随光频的变化或它的平均值。但当光纤周围环境干扰比较大时,即使在实验室条件下,光纤中偏振态的变化也非常快。因此为了有效地补偿偏振模色散,还是需要知道偏振态的瞬时值。这样,如何提高测量速度,从而高速地测量偏振态,就成为实现偏振模色散补偿的关键。又比如,在偏振光时域反射计(P-OTDR)的应用中,其背向散射信号是一条随时间快速变化的斜坡信号,准确探测每一时刻的偏振态成为影响传感准确性的关键。

从以上的举例可以看出,无论是在光纤通信还是传感领域中,在测量快速随机变化的偏振态时,数字信号偏振态的测量已不能满足要求。因此,全光纤高速模拟信号偏振态测量系统的研制就显得尤为重要,而这也是文中要着重研究的问题。

1 偏振态的测量原理及系统结构

光的偏振态可以用Stokes矢量表示,对于Stokes矢量的四个参量,可以用如下的光强来表示

$$\begin{aligned} S_0 &= I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ S_1 &= I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ S_2 &= I_{45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ S_3 &= I_R - I_L \end{aligned} \quad (1)$$

其中, I_{0° 、 I_{90° 、 I_{45° 、 I_{-45° 、 I_R 和 I_L 分别表示 x 轴、 y 轴、 45° 方向、 -45° 方向、左旋和右旋分量的光强。可见,Stokes矢量各参量都是可测量的量,只要测出上述各光强分量,即可从式(1)中得到光的偏振态。

在实验系统中,模拟偏振调制光信号由光源、函数发生器和偏振调制器产生。图1为自建SOP测量模块结构图。光源是中心波长为1552.52 nm的激光器,函数信号发生器可以产生不同速率、不同波形的电信号来驱动偏振调制器,对光源发出的连续直流光的偏振态进行调制,产生随时间变化的偏振态。此调制光经过图1中的偏振控制器PC0后,进入一个分光比为1:9的1×2耦合器(Coupler)分光,10%的光进入校准偏振分析仪(即校准PA,此处采用的是General Photonics公司POD-101D型偏振分

析仪,最高可测量20 kHz模拟信号的偏振态),90%的光进入自建的高速SOP测量模块(图中虚线框内的部分)。SOP测量模块输出的Stokes矢量 $s_0 \sim s_3$ 由高速示波器显示和记录,以便于后续的分析 and 处理。

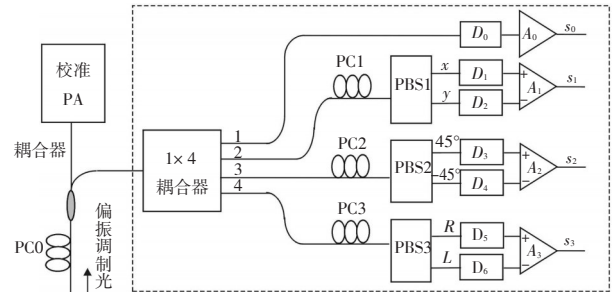


图1 自建SOP测量模块结构图

当光进入SOP测量模块后,首先由一个分光比相同的1×4耦合器把光分成功率相等的4路。支路1输出的光直接进入光电探测器 D_0 , 输出的信号值为 s_0 。其他三路先通过偏振控制器PC1~3,再进入偏振分束器PBS1~3。调节各偏振控制器,使三个偏振分束器输出的两正交偏振光分别与校准PA的 x 轴、 y 轴、 45° 、 -45° 、左旋(R)和右旋(L)相一致,这样支路2中由探测器 D_1 、 D_2 和电压放大器 A_1 组成的差分光电探测器输出信号为Stokes参量 s_1 ,同理支路3、4的输出信号分别为 s_2 和 s_3 。为了能探测模拟光波的偏振态,光电探测器采用交直流同时响应的模拟光电探测器,支路1单端输出,2、3、4差分输出。

由于上述高速SOP测量模块存在各支路光纤长度不等,1×4耦合器输出功率不完全相同的问题,因此系统还存在着时间同步和功率均衡的需要。

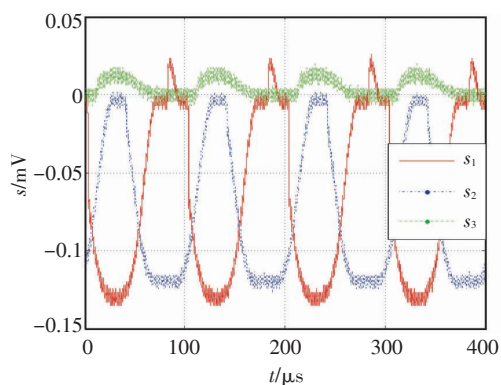
(1) 时间同步。模拟信号的偏振态一般是变化的,因此从SOP测量模块输出的信号要严格同步。然而购买的商用PC、PBS等器件,不能保证模块中各光纤支路长度完全相等,因此先用方波信号的上升沿为基准对各光路的光纤进行截取,以保证光纤等长。然后用等长的同轴电缆连接光电探测器与示波器,保证电路等长。这样就保证了 $s_0 \sim s_3$ 的4路输出信号严格同步,测量结果代表同一时刻的4个Stokes参量。

(2) 功率均衡。由于1×4耦合器的制作误差,4路输出功率不完全相同,因此要调节差分探测器的反馈电阻,使每一路放大倍数不同但输出电信号的功率相同。这样就用电的方式对输出光功率的差异

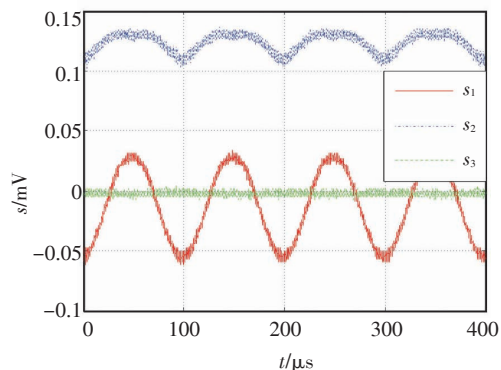
进行了补偿。调节后的光路可等效为1×4耦合器输出光功率完全相同且差分探测器放大倍数完全相同的测量光路。

2 SOP测量模块光电放大电路的研制

光电探测器作为SOP测量模块的核心部分,决定着探测到的模拟信号的带宽和波形质量,而光电放大电路的研制是该部分的关键。传统的差分电路一般选择电压差分电路,但因为运放对电压放大时有一个很小的阈值,在小于这个阈值时,会出现过零失真,导致测得的波形不能准确反映偏振态,因此选用电流差分电路作为光电探测放大电路。图2为电压差分和电流差分电路探测器测量曲线。若偏振调制信号是一个正弦信号,当选用电压差分电路作为光电放大电路时,SOP模块测得的Stokes参量曲线如图2a。而当改用电流差分电路作为放大电路时,曲线如图2b。可见,当用电压差分电路作为光电放大电路时, s_1 和 s_3 信号在零点附近有明显失真,而电流差分电路能够很好地解决电压差分电路存在的过零失真问题。



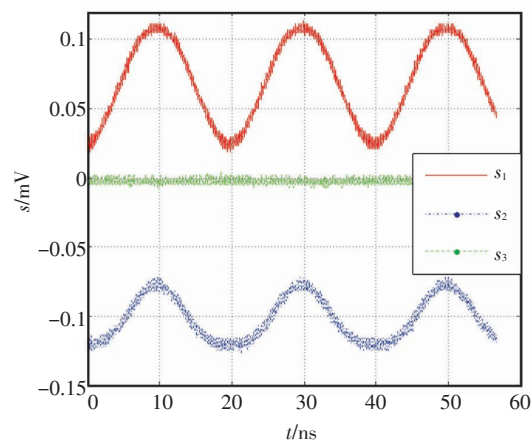
(a)电压差分



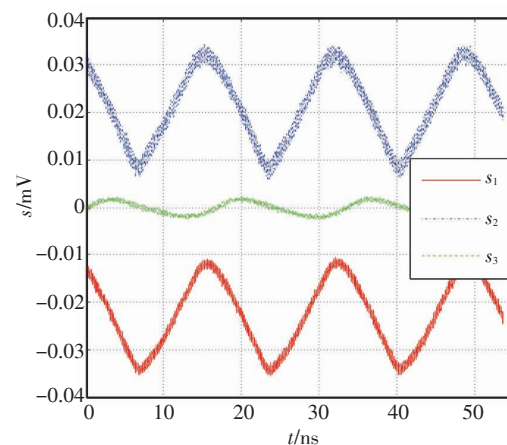
(b)电流差分

图2 电压差分和电流差分电路探测器测量曲线

SOP测量模块的光电探测器采用1550 nm时响应度为0.9 A/W的PIN光电二极管。为使得探测器能测量速率尽量高的模拟信号偏振态,选用OPA847运放。其增益带宽积 G_{BP} 为3.9 GHz,反馈电阻 R_f 为12 k Ω , C_d 是OPA847本身的共模输入电容1.2 pF和差模输入电容2.5 pF,以及PIN光电二极管的电容0.8 pF三者之和,根据3 dB带宽计算公式 $f_{-3dB} = \sqrt{G_{BP}/2\pi R_f C_d}$ Hz可以计算出电流差分放大电路的带宽约为107 MHz。实验中为了进行功率均衡,需要将反馈电阻改为可调变阻器,并增大输出功率偏大支路的反馈电阻阻值,使得光电探测器整体带宽下降。实验测得,对于50 MHz左右的信号,能够实现无失真探测,当信号频率高于50 MHz时,测量结果失真。图3的图3a和图3b分别为模拟信号频率为50 MHz、60 MHz时,电流差分电路作为放大电路时,SOP测量模块的测量结果。结果表明,该探测器能够对速率0~50 MHz模拟信号偏振态进行无失真的测量。



(a)50 MHz模拟信号的SOP模块测量结果



(b)60 MHz模拟信号的SOP模块测量结果

图3 电流差分电路作为探测电路时SOP测量模块的输出

3 系统定标与测试

3.1 定标

系统定标的步骤如下:(1)固定系统中所有的光纤和器件,输入不经调制的直流光;(2)调整PC0,使得校准PA检测到的偏振态 S_p 为 $[1, 1, 0, 0]^T$;(3)分别调整支路2、3、4上的偏振控制器PC1、PC2、PC3,使示波器检测到的信号 $s_1、s_2、s_3$ 尽量接近 $s_0、0、0$ (s_0 为支路1的输出值);(4)调整PC0,使校准PA检测到的偏振态 S_p 分别改为 $[1, 0, 1, 0]^T$ 和 $[1, 0, 0, 1]^T$,重复步骤(3)使 $s_1、s_2、s_3$ 尽量接近 $0、s_0、0$ 与 $0、0、s_0$ 。这样 $D_1\sim D_6$ 所在光路坐标分别与校准PA的 x 轴、 y 轴、 45°

方向、 -45° 方向、右旋 R 和左旋 L 相一致,从而完成系统定标。

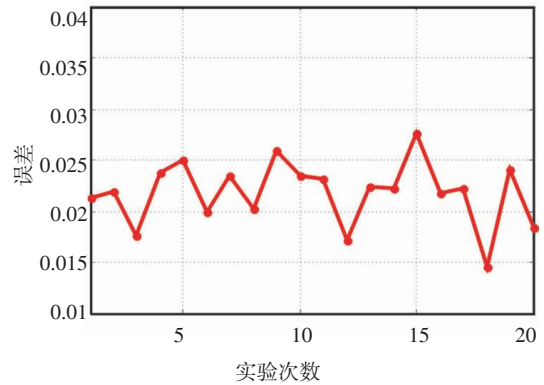
系统定标时的测量结果如表1所示。其中每组归一化SOP模块测量值 $S_0\sim S_3$ 为SOP模块测量值 $s_0\sim s_3$ 与 s_0 的比值。邦加球上每点表示一个偏振态,两偏振态的差别可用二者在邦加球上对应点的距离来表示,因此SOP模块测量值与校准PA测量值在邦加球上的距离 $\Delta S = \sqrt{(S_{p1} - S_1)^2 + (S_{p2} - S_2)^2 + (S_{p3} - S_3)^2}$ 可表示定标误差。按照表1的测量结果,三次定标误差 ΔS 分别为0.020 3、0.019 5和0.021 7,这一误差与校准PA测量时抖动产生的误差为同一量级,因此可认为定标结果是准确的。

表1 定标时校准PA和SOP模块的Stokes矢量测量值

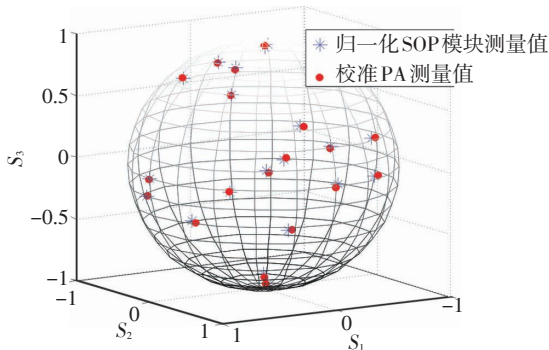
输入值	校准PA测量值				SOP模块测量值/mV				归一化SOP模块测量值			
S_p	S_{p0}	S_{p1}	S_{p2}	S_{p3}	s_0	s_1	s_2	s_3	S_0	S_1	S_2	S_3
$[1,1,0,0]^T$	1.000 0	0.997 6	-0.001 2	0.003 9	423.20	415.80	-3.86	-3.05	1.000 0	0.982 5	-0.009 1	-0.007 2
$[1,0,1,0]^T$	1.000 0	-0.000 8	0.984 0	0.000 8	418.10	-0.89	404.80	4.96	1.000 0	0.002 1	0.968 2	0.011 9
$[1,0,0,1]^T$	1.000 0	-0.004 6	0.001 5	0.989 3	422.35	-0.23	4.89	409.91	1.000 0	-0.000 5	0.011 6	0.970 5

3.2 低速模拟信号SOP的测量实验

上述定标完成后,首先对直流光信号的SOP进行多次测量:保持支路2~4上的偏振控制器PC1~3拨片的位置固定不变,调节偏振控制器PC0的拨片,输入不同的偏振态。在每次测量中,同时记录校准PA测量值和SOP模块测量值。图4为直流信号SOP测量结果与误差。按照定标时的方法计算归一化SOP模块测量值,与同次测量的校准PA测量值画在同一邦加球上,如图4a所示。测量误差 ΔS 如图4b所示。



(b)测量误差曲线



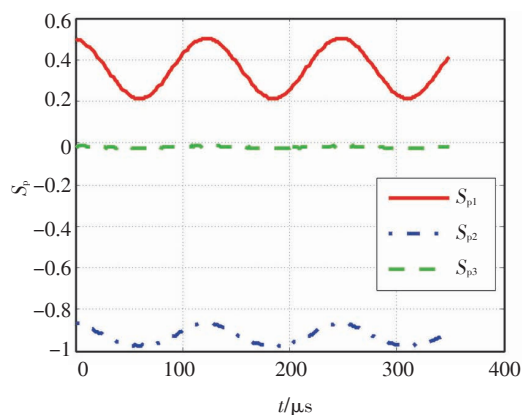
(a)校准PA与归一化SOP测量模块测量值对照图

图4 直流信号SOP测量结果与误差

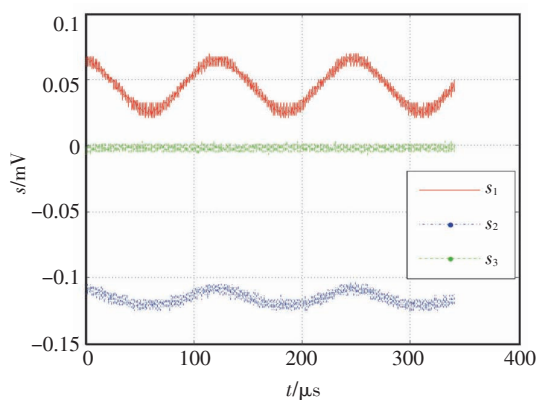
通过图4a可见,对于同一次测量,SOP模块测量值和校准PA的测量值在邦加球上非常接近,有些近似重合。图6的误差曲线显示,多次测量的误差介于0.01~0.03之间,这与定标时的误差属于同一量级,但总的来讲偏大一些。这是由于定标后的系统虽然固定了光路中各器件,但仍无法避免外界轻微振动和环境温度变化对偏振态的影响。因此,对于直流信号的测量,实验所用SOP测量模块能够达到准确测量偏振态的要求,并有着很好的重复性。

下面再对 20 kHz 以下的低速模拟信号进行测量并与校准 PA 进行误差比较:保持定标后各支路偏振控制器拨片的位置不变,将函数信号发生器产生的正弦信号加载至偏振调制器上,使其输出偏振调制模拟信号。让正弦信号的频率分别为 1, 2, ..., 19, 20 kHz, 记录每次测量的校准 PA 测量曲线和高速 SOP 模块测量曲线,并对后者进行归一化,再计算误差随时间的变化。

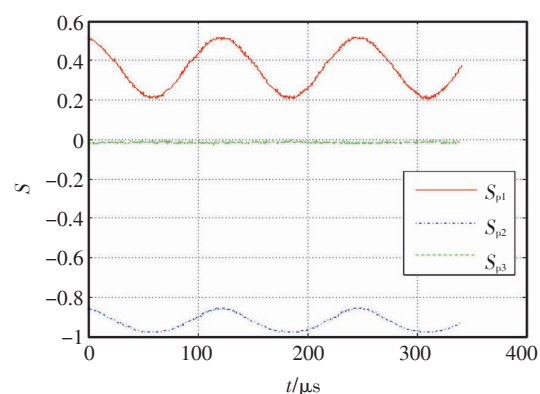
以频率 7 kHz 为例,校准 PA 测量值 $S_{p1} \sim S_{p3}$ 随时间变化的曲线如图 5a。高速 SOP 模块测值 $s_1 \sim s_3$ 随时间变化的曲线如图 5b。可见,校准 PA 和 SOP 模块的测量曲线有一致的形状,只是由于示波器的基底噪声,后者的测量曲线较宽。对 SOP 模块测量值进行归一化,并用小波函数进行滤波去噪,得到归一化 SOP 模块测量值随时间变化的曲线,如图 5c。此时可见滤波去噪后的归一化 SOP 模块与校准 PA 在每一时刻测得的偏振态都非常接近,二者误差随时间变化的曲线如图 5d。误差在 0~0.025 之间波动,与直流时基本相同。因此可以认为对于频率为 7 kHz 的模拟信号,其每一时刻的偏振态测量都是准确的。



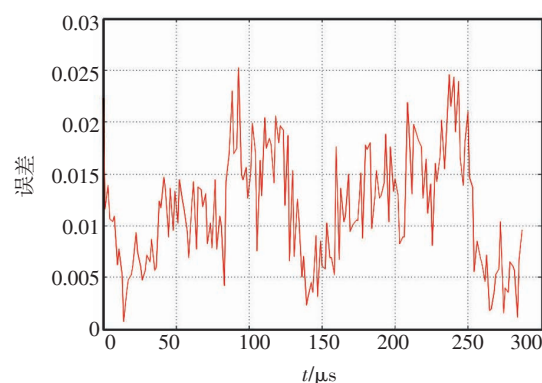
(a) 校准 PA Stokes 参量测量曲线



(b) SOP 测量模块 Stokes 参量测量曲线



(c) 归一化 SOP 测量模块 Stokes 参量测量曲线



(d) 误差曲线

图5 7 kHz时校准 PA 和 SOP 测量模块的测量结果

对其他频率的信号分别进行上述实验,都能够得到和 7 kHz 信号类似的测量结果。其中,当速率达到校准 PA 最高测量值 20 kHz 时的误差曲线如图 6。因此,通过与校准 PA 比较的方法,说明 SOP 测量模块可准确测量 0~20 kHz 速率范围模拟信号的偏振态。

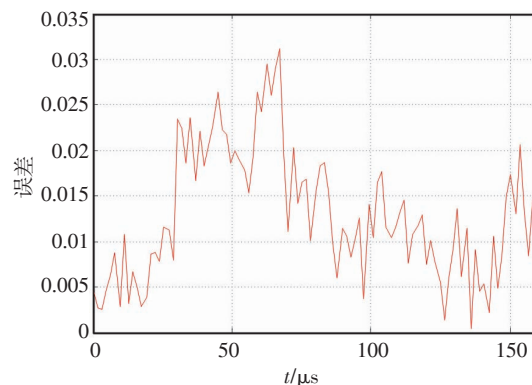
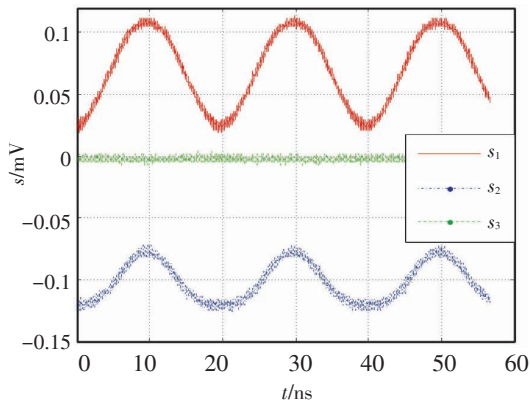


图6 20 kHz 模拟信号偏振态测量的误差曲线

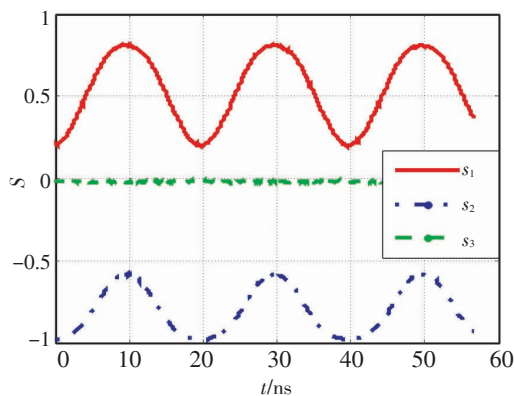
3.3 高速模拟信号 SOP 的测量实验

若继续提高模拟信号的速率,校准 PA 已无法测

量其偏振态,不能再采用比较方法判断测量结果的准确性。因此,使用另外一种方法来判断:根据函数发生器驱动信号的类型及频率,从理论上推出SOP测量模块的每个Stokes参量的变化规律,然后进行实验测量,若实验结果与理论分析一致,可认为SOP测量模块的测量结果是准确的。实验中使用的驱动信号是不同频率的正弦信号,通过理论分析,测量到的每个Stokes参量应按同频率的正弦规律变化。通过第三部分放大电路的分析可知,SOP测量模块的探测速率可以达到50 MHz,测量结果如图7。与理论分析一致;当频率高于50 MHz时,Stokes参量的变化频率虽然与驱动信号的频率相同,但其波形出现了严重失真,这说明SOP测量模块可准确测量0~50 MHz速率范围模拟信号的偏振态。



(a) 50 MHz SOP测量模块Stokes参量测量曲线



(b) 归一化SOP模块Stokes参量测量曲线

图7 50 MHz SOP测量模块Stokes参量测量曲线及归一化SOP模块Stokes参量测量曲线

终选择电流差分电路作为模拟光电探测器的放大电路。使用这种电路后,光电探测部分具有低噪声、高带宽、交直流同时响应的优点。然后,使用搭建了全光纤模拟信号偏振态测量系统,实现了0~50 MHz范围模拟信号的偏振态检测,且重复性良好,邦加球上的检测误差半径小于0.03,与商用偏振分析仪达到了同一量级,但能够检测的模拟信号速率远高于目前商用偏振分析仪的1 MHz。不但如此,本系统仍可以准确测量数字信号的偏振态,成功拓宽了偏振态检测适用的信号类型和速率,为许多光纤传感系统提供了准确的测量手段,可极大提高传感的精度和分辨率。

参考文献

- [1] Grant Nicholson, Douglas J. Polarization fluctuation measurements on installed single-mode optical fiber cables [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(8): 1197-1200.
- [2] Yoshinori Namihira, Hiroharu Wakabayashi. Real-time measurements of polarization fluctuations in an optical fiber submarine cable in a deep-sea trial using electrooptic LiNbO₃ device[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(8): 1201-1206.
- [3] Poole C D, Wenters J H, Nangel J A. Dynamic equation for polarization dispersion [J]. *Optics Lett*, 1991, Mar, 16: 372-374.
- [4] 吴重庆,付松年,董晖,等. 偏振模色散矢量的研究[J]. *物理学报*, 2002, 51(11):2543-2546.
- [5] Poole C D. Measurement of polarization mode dispersion in single-mode fiber with random mode coupling [J]. *Optics Lett*, 1989, 14:532.
- [6] Jopson R M, Nelson L E, Kogelnik H. Measurement of second-order polarization-mode dispersion vectors in optical fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(9): 1153-1155.
- [7] Kaminow I P, Koch T L. *Optical fiber telecommunications III A*[M]. Eds. San Diego, CA: Academic, 1997:114-161.
- [8] 邸金红,刘兆瑜,赵雨斌. 偏振模色散的抑制技术[J]. *电子工程师*, 2007, 33(1):24-26.
- [9] Nelson L E, Karlsson M, Chowdhury D Q, et al. Special issue on polarization mode dispersion[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(4): 951-952.

4 结论

首先研究了两种不同差分放大电路的特点,最