

Research on High Speed Sparse Sampling System for Wide Spectral Fiber Fabry Sensor Signals Based on FPGA

Lin Zhang, Weimin Chen*, Yi Qi, Jianghua Feng, Juxia Xie

School of Opto-Electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing
Email: 15123031295@163.com, *wmchen0802@126.com

Received: Nov. 5th, 2018; accepted: Nov. 20th, 2018; published: Nov. 27th, 2018

Abstract

The existing fast demodulation model of the wide-spectrum fiber fabry interference signal can demodulate the signal based on the reduction of the spectral sampling points of two orders of magnitude to ensure the original accuracy, which lays the foundation for greatly improving the demodulation speed of wide-spectrum fiber fabry system. In this paper, a high-speed sparse sampling hardware system with 40 sampling points for wide-spectrum interference signals is designed. By comparing the results of dense sampling and sparse sampling of the same Fabry-spectrum interference signal, the conclusion that the sparse sampling hardware system can reproduce the wide-spectrum interference signal well is obtained. This is of great significance for the application of wide-spectrum fiber fabry sensors in high-speed monitoring.

Keywords

Wide-Spectrum Fiber Fabry Sensing, Spectral Acquisition, FPGA, Sparse Sampling

基于FPGA的宽光谱光纤法珀干涉信号的稀疏采样系统的研究

张 林, 陈伟民*, 齐 翊, 冯江华, 谢菊霞

重庆大学光电工程学院, 重庆
Email: 15123031295@163.com, *wmchen0802@126.com

收稿日期: 2018年11月5日; 录用日期: 2018年11月20日; 发布日期: 2018年11月27日

*通讯作者。

文章引用: 张林, 陈伟民, 齐翊, 冯江华, 谢菊霞. 基于 FPGA 的宽光谱光纤法珀干涉信号的稀疏采样系统的研究[J]. 电路与系统, 2018, 7(4): 101-110. DOI: 10.12677/ojcs.2018.74013

摘要

现有的宽光谱光纤法珀干涉信号快速解调算法模型能在减少两个数量级的光谱采样点的基础上对信号进行解调, 保证原有精度, 这为大幅度提高光谱探测型宽光谱光纤法珀系统的解调速度奠定了基础。本文设计了一种对宽光谱干涉信号进行40个采样点的高速稀疏采样硬件系统。通过对同一法珀宽光谱干涉信号进行光谱仪密集采样与稀疏采样的结果对比, 得出稀疏采样硬件系统能很好地复现宽光谱干涉信号的结论。这对宽光谱光纤法珀传感器应用于高速监测领域具有重要意义。

关键词

宽光谱光纤法珀传感, 光谱采集, FPGA, 稀疏采样

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在各类光纤传感器中, 宽光谱干涉型光纤传感器的具有测量精度高、抗干扰能力强、动态范围大的特点, 广泛应用于航空航天、大型结构健康监测等领域。而在高速动态监测领域中, 宽光谱干涉型光纤法珀传感器的应用是受限的。根据信号解调的不同原理及采用的元器件, 干涉型光纤法珀传感器解调的硬件系统有光谱探测型、硬件相关解调型及调制解调型[1]等。

光谱探测型是光纤法珀解调仪的主流形式, 精度高, 但主要应用于静态解调。硬件相关型以硬件代替软件, 提高了解调速度, 但由于白光光源的使用寿命及信号强度等方面受到极大地限制。调制解调型是针对光纤光栅法珀的解调系统, 应用于超声传感等场合。

光谱探测型硬件解调系统首先获取被测对象的宽光谱干涉信号, 再利用相关算法、快速傅里叶变换[2]等解调出被测对象的位移/间隙信息。其干涉信号的宽光谱特征, 是保证其高精度测量的关键; 但因宽光谱干涉信号是几千个波长光信号的组合, 因而宽光谱干涉解调仪需要对几千个数据的完整光谱进行采样与运算解调后, 才能完成一次测量结果, 导致光谱的采样和信号的解调都面临数据量大、速度慢的问题, 这极大地制约了这类传感器在高速动态微位移/间隙测量中的发展。

针对宽光谱干涉型光纤传感系统的整体测量速度慢的问题。本文从理论上分析了对宽光谱干涉信号进行稀疏采样的可行性, 从采样定理的角度确定稀疏采样点数[3], 在减少采样点数后, 并没有与之配套的针对光谱稀疏采样的硬件采集系统, 因此本文提出并设计稀疏采样硬件系统, 通过实验对稀疏采样系统的功能进行验证。这对宽光谱干涉型传感器应用于高速动态监测领域具有重大意义。

2. 稀疏采样的可行性分析

2.1. 光纤法珀传感器系统原理

如图1所示, 将导管内的两个光纤端面看做两个平行平板, 从而形成法-珀腔。

当一束相干光通过光纤入射到该法-珀腔内时, 在法-珀腔的两端面发生多次反射和透射, 形成多光束干涉。根据多光束干涉原理, 当两端面之间的介质为空气, 光纤端面未做特殊处理, 其反射率很小

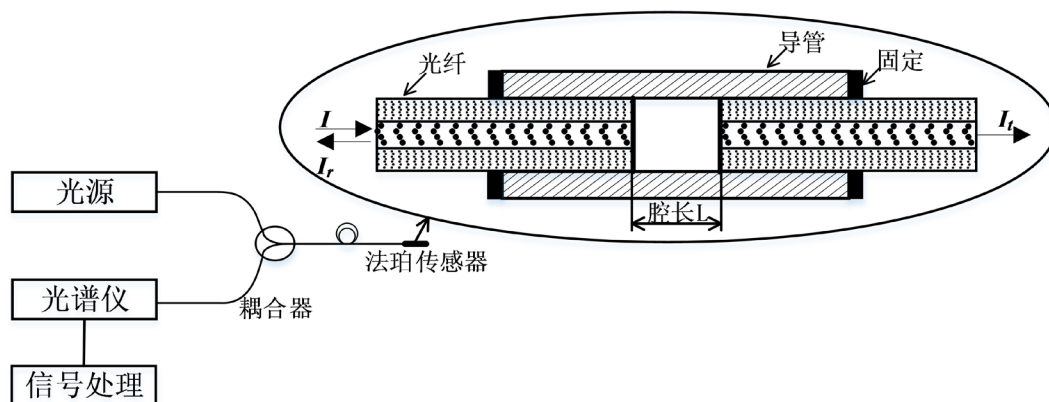


Figure 1. Fiber fabry sensor measurement system and sensor structure diagram

图 1. 法珀传感器测量系统及传感器结构示意图

时，法 - 珀信号可以简化为双光束干涉，反射光光强为：

$$I_r(\lambda) = 2R \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}L\right) \right] \cdot I(\lambda) \quad (1)$$

其中： R 是法 - 珀腔两端面的反射率， $I(\lambda)$ 为入射光强， L 为法珀腔腔长， λ 为光波长。

根据式(1)可知，当入射光为单一波长时， $I_r(\lambda)$ 只与腔长值 L 有关；当入射光为 ASE 或扫频激光器 等宽带光源时， $I_r(\lambda)$ 是与腔长 L 与光波长 λ 有关的双参数函数。

2.2. 稀疏采样的可行性分析

从傅里叶变换角度分析采样点数对法珀传感器的宽光谱干涉信号解调的影响。对法珀传感器输出的宽光谱干涉信号式(1)分别进行密集采集(如图 2(a))与稀疏(少点)采样(如图 2(b))，将密集采样数据与稀疏采样数据做 FT 变换(如图 3)。

从 FT 变换结果图(如图 3)中可以看出，宽干涉光谱进行稀疏采样的 FT 变换结果与密集采样的 FT 变换结果中的频率基本重合，这对法珀传感器腔长信号的解调基本没有影响，而从密集采样 FT 变换图中看

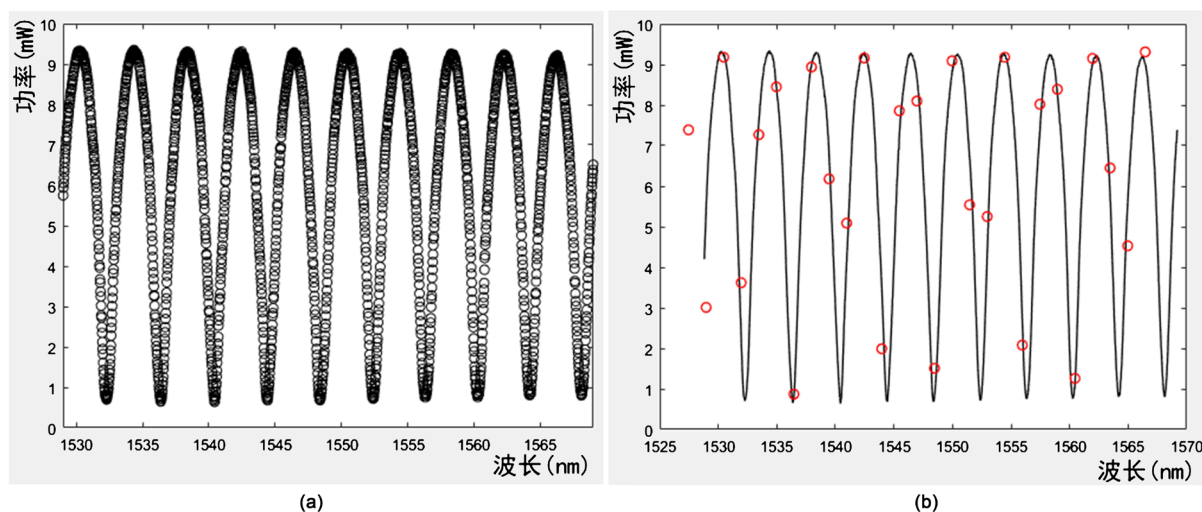


Figure 2. Two ways to sample wide-spectrum interference signals. (a) Dense sampling; (b) sparse sampling

图 2. 对宽光谱干涉信号进行两种方式的采样。(a) 密集采样；(b) 稀疏采样

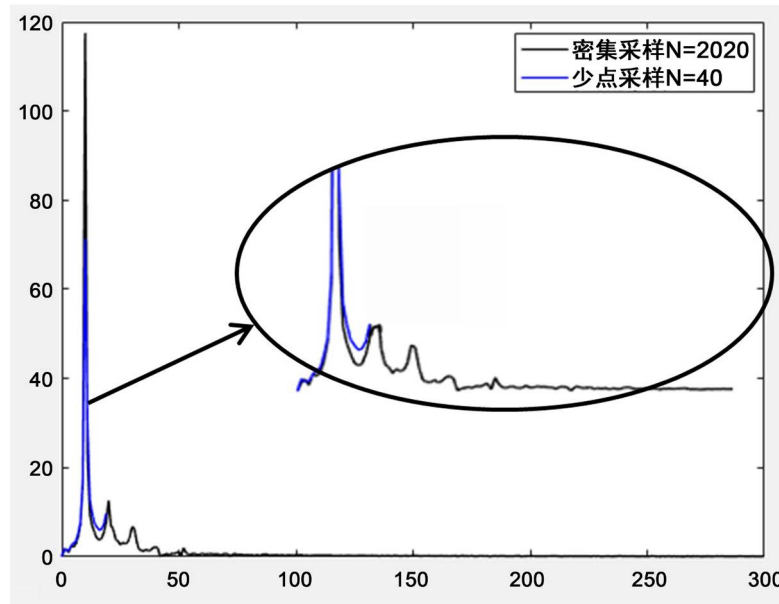


Figure 3. The results of FT transformation for spectral data of dense sampling and sparse sampling.
图 3. 对密集采样与少点采样的光谱数据做 FT 变换结果

出后面大部分数据点对腔长解调并没有影响。因此，对于低反射率单个光纤法珀的宽干涉光谱信号，稀疏采样依然可以解调。

3. 宽光谱干涉信号稀疏采集系统总体设计方案

目前市场上并没有针对宽光谱干涉型光纤法珀传感器干涉信号的稀疏采样系统，因此，为了解决传感器的高速测量问题，就需要搭建一套宽光谱干涉信号高速稀疏采集硬件系统，系统总体设计方案如图 4 所示。

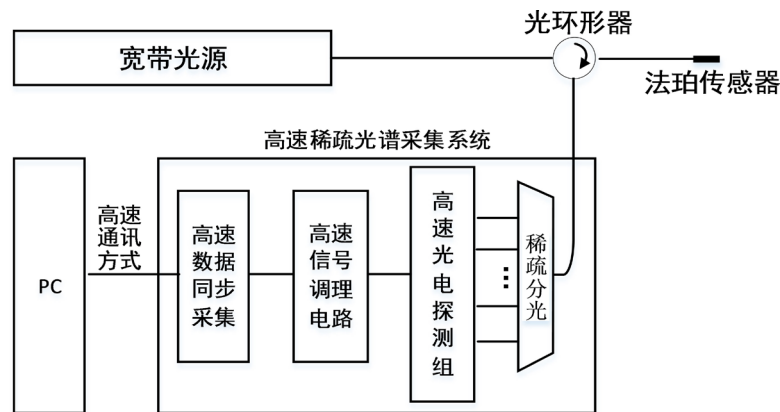


Figure 4. Total design of high-speed sparse acquisition hardware system for wide-spectrum interference signals
图 4. 宽光谱干涉信号高速稀疏采集硬件系统总体设计方案

3.1. 光谱稀疏分光

从宽光谱干涉信号特征出发，干涉信号无非是携带了多个波长信息。一方面，应该实现以恒定带宽对信号进行分光；另一方面，还需满足同步分光(非扫描式)的要求。从这两方面考虑，通信上的密集波分

复用器满足要求，且是市场上已经非常成熟的分光器件。

3.2. 光谱稀疏采样点数的理论依据

通过波分复用器进行稀疏分光，分出的光通道即采样点数应满足奈奎斯特采样定理的要求。

首先，定义如下参数：1) 波长 λ ：1530~1565 nm；2) 中心波长 λ_0 ：1550 nm；3) 光频率 ν ：191.6~195.9 THz；4) 波数 k ： $k=1/\lambda$ ，638,977~653,594 m^{-1} ；5) 法珀腔长 L ：300 μm ， $200 \mu\text{m} \leq L \leq 400 \mu\text{m}$ ；6) 光程差 Δ_{OPD} ： $\Delta_{OPD} = 2nL$ 。

干涉光谱信号在波数域上的表达式：

$$I_r(\lambda) = 2R \cos(2\pi\Delta_{OPD}k) \cdot I_0(\lambda) \quad (2)$$

根据采样定理：采样率应大于等于信号频率的 2 倍以上，工程常取 10 倍。那么有

$$\frac{F_s}{\Delta_{OPD}} = 2 \sim 10 \text{ 倍} \quad (3)$$

其中， $F_s = \frac{1}{\Delta\delta}$ ， $\Delta\delta$ 为波数间隔。

由式(3)可得：

$$\frac{1}{10\Delta_{OPD}} \leq \Delta\delta \leq \frac{1}{2\Delta_{OPD}} \quad (4)$$

法珀传感器腔长变换范围： $200 \mu\text{m} \leq L \leq 400 \mu\text{m}$ 。推导不同腔长下的采样点数见表 1。

Table 1. Number of sampling points of fiber fabry sensor under different cavity lengths

表 1. 法珀传感器不同腔长下的采样点数

	$L_1 = 200 \mu\text{m}$	$L_1 = 400 \mu\text{m}$
波数间隔	$250 \text{ 1/m} \leq \Delta\delta_1 \leq 1250 \text{ 1/m}$	$111 \text{ 1/m} \leq \Delta\delta_2 \leq 555 \text{ 1/m}$
波长间隔	$0.59 \text{ nm} \leq \Delta\lambda_1 \leq 3 \text{ nm}$	$0.3 \text{ nm} \leq \Delta\lambda_2 \leq 1.3 \text{ nm}$
采样点数	$12 \leq M_1 \leq 59$	$27 \leq M_2 \leq 131$

综上，为了准确并不失真地解调光谱信号，由采样定理推导，得出采样点数(稀疏分光的光通道)应满足： $27 \leq M \leq 59$ 。因此，选择市场上成熟的 40 通道波分复用器，波长间隔 0.8 nm。

3.3. 模拟电路调理

光电探测器将光强转换为微弱的电流信号[4]通过电流/电压转换电路将电流信号转换为电压信号，同时进行前置放大[5] [6] [7]。另一方面，为了满足 AD 采集电压 0~5 V 的需求，前置放大后接电压放大电路[8]进一步放大。两级放大电路如图 5 所示。

电流/电压转换电路中采用高精度低噪声跨阻运放芯片 OPA4228($GBP_1 = 33 \text{ MHz}$)， $R_1 = R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ ，在 R_2 两端并联小电容 $C_1 = 22 \text{ pF}$ 防止电路产生自激振荡；电压放大电路中运放采用电压放大运放芯片 ADA4851 ($GBP_2 = 70 \text{ MHz}$)， $R_3 = R_5 = 5 \text{ k}\Omega$ ， $R_4 = R_6 = 200 \text{ k}\Omega$ 。

模拟电路计算可得电路总增益计算

$$A = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (5)$$

电路总带宽计算

$$B_1 = \sqrt{\frac{GBP_1}{2\pi R_2 C_j}} \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{GBP_2}{A_2} \quad (7)$$

$$B = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2}}} \quad (8)$$

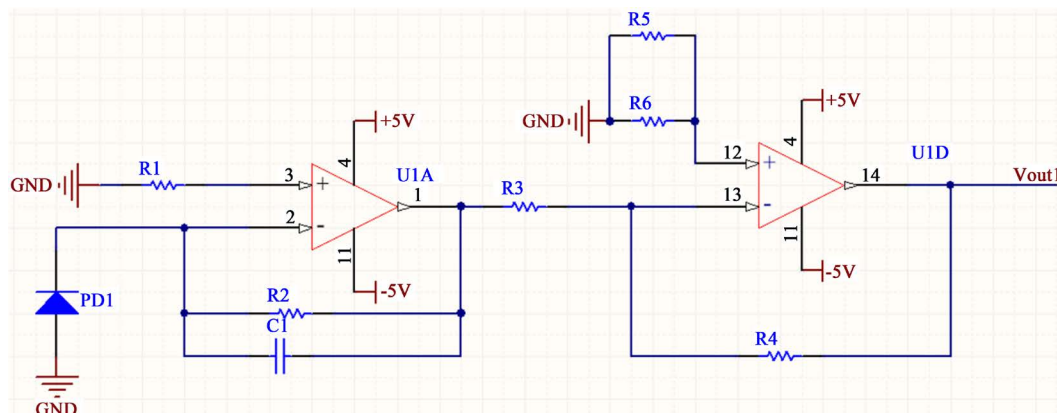


Figure 5. Analog circuit conditioning
图 5. 模拟电路调理

其中, C_j 是光电探测器工作在反偏模式下的结电容为 400 pF。

计算可得, 电路总增益为 $A = 2 \times 10^5$, 第一级电流/电压转换电路带宽 $B_1 = 1.62$ MHz, 第二级放大电路带宽 $B_2 = 1.75$ MHz, 总带宽 $B = 1.189$ MHz。

通过 Multisim 仿真, 利用示波器与波特测试仪测试电路总增益及总带宽。

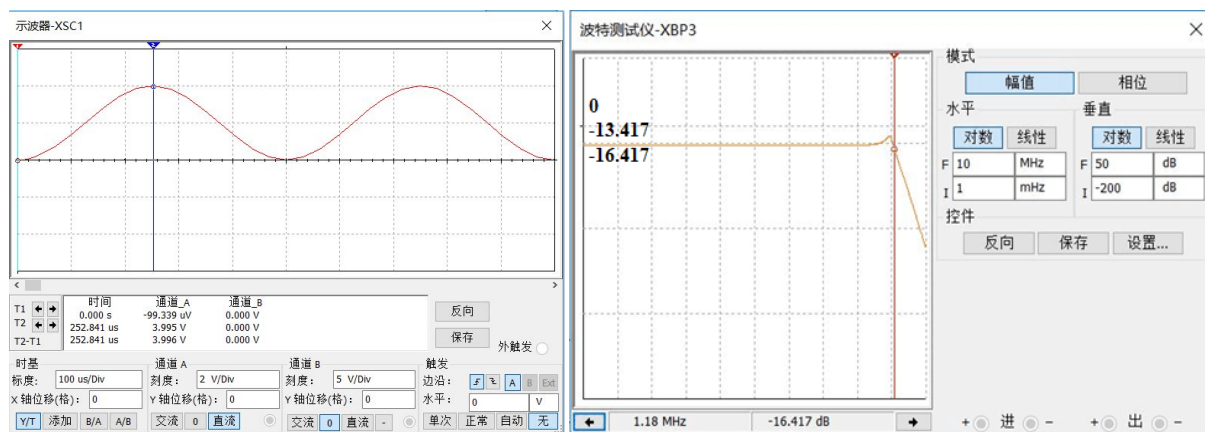


Figure 6. The simulation results of analog circuit's total gain and total bandwidth by Multisim
图 6. Multisim 仿真模拟电路总增益及总带宽

在图 6 中, 当向电路输入 20 μ A 电流时, 经过两级放大电路后根据示波器输出电压为 3.996 V, 电路总增益为 1.998×10^5 , 与理论计算一致。根据波特测试仪得到 -3 dB 带宽为 1.18 MHz, 与理论计算近似。

3.4. 高速同步采集

由于宽光谱干涉型传感器用于动态测量,在进行数据采集时需要对每一通道的信号值进行同步采集[9][10],否则会造成光谱畸变。选用8通道同步采集模块AN706,且每一通道均以200 KSPS的采样率进行采集。利用FPGA核心板输出一组控制信号同时启动5块AN706工作以实现对40路信号的同步采集。

3.5. 高速通讯

在通讯方面,串口通讯传输数据稳定可靠,但速度慢,传输速度最快是0.88 Mb/s;USB通讯,可以进行高速数据传输,高速是480 Mb/s;以太网,可进行高速数据传输,有百兆Mb/s与千兆Gb/s两种方式。为保证数据的高速传输,选择千兆以太网的通讯方式。FPGA将采集的40路信号数据存于IP核的双端口RAM[11]中,通过千兆以太网发送至上位机。数据采集与通讯硬件连接如图7。

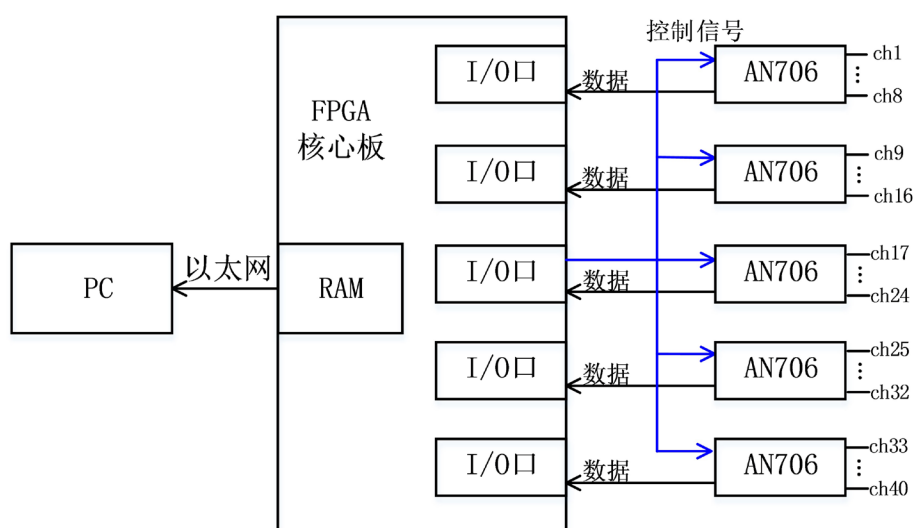


Figure 7. FPGA realizes synchronous acquisition and communication with PC by Ethernet
图7. FPGA实现40路同步采集及以太网与PC通讯

3.6. 搭建宽光谱干涉信号高速稀疏采集硬件系统

通过分析与器件选型,搭建了如图8所示的稀疏光谱高速采集系统及实物如图9。

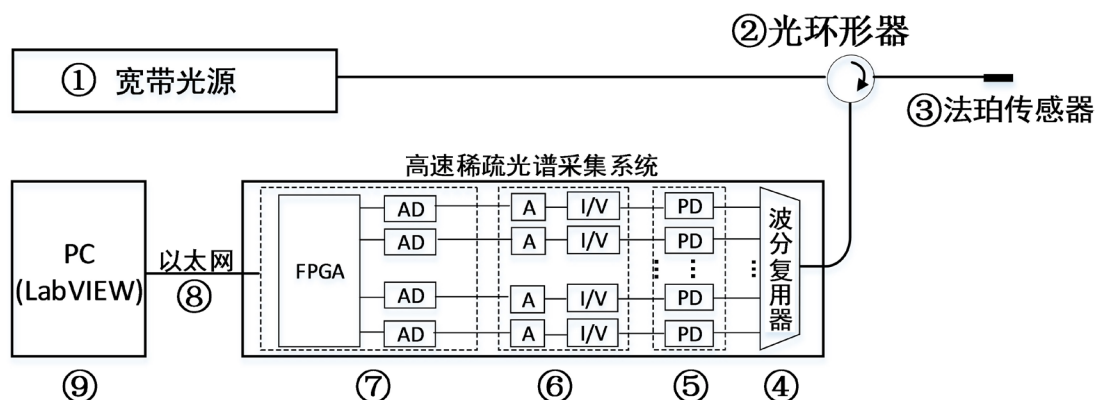


Figure 8. High-speed sparse acquisition hardware system for wide-spectrum interference signals
图8. 宽光谱干涉信号高速稀疏采集硬件系统

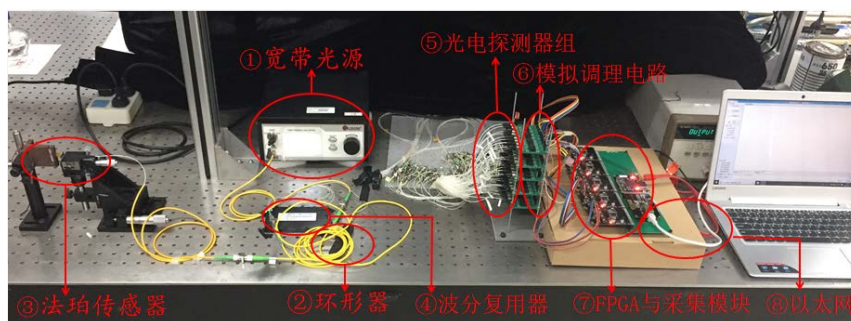


Figure 9. The physical picture of high-speed sparse acquisition hardware system
图 9. 宽光谱干涉信号高速稀疏采集硬件系统实物图

4. 实验

4.1. 实验系统搭建

为了对宽光谱干涉信号的稀疏采集系统的功能进行验证, 设计了如下实验, 实验中包含两套系统如图 10 所示以及如图 11 所示的实验系统实物图: 系统 1 (黑色虚线框) 为宽光谱干涉信号的稀疏采集系统, 系统 2 (红色虚线框) 为光谱仪密集采样系统(标准系统)。系统间通过光开关进行切换。

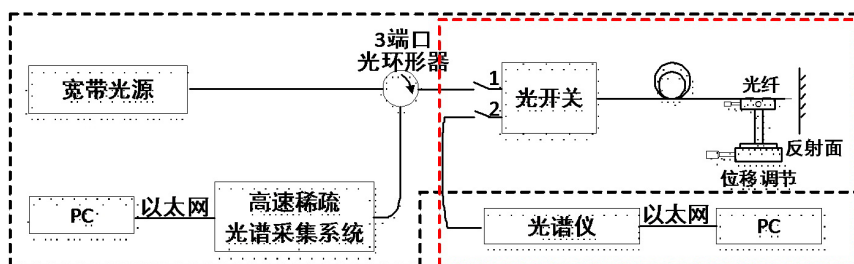


Figure 10. Experimental system
图 10. 实验系统

在实验系统中, 宽带光源为台式 ASE 宽带光源(波长: C 波段, 功率: 0~50 W), 3 端口环形器工作波长为 C 波段, 两套系统共用一支可调法 - 珀传感器, 可调法珀腔由精密机械控制仪控制腔长。在标准系统中, 光谱仪 Tspec8001 (光谱分辨率 20 pm, 光谱范围 1529~1569 nm)。

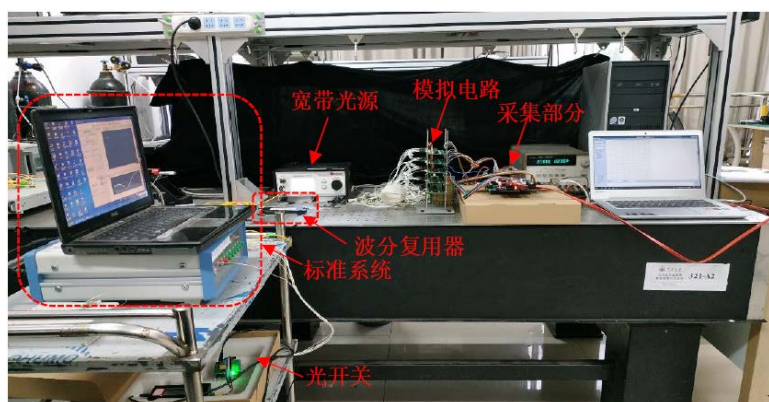


Figure 11. The physical picture of experimental system
图 11. 实验系统实物图

4.2. 采样功能验证实验过程及实验结果

调节精密机械装置使法珀传感器腔长 $L = 300 \mu\text{m}$ 左右。通过光开关切换通道至标准系统，根据光谱仪上的条纹数估算法珀腔长，保存数据，作为对比。再将切换光开关至待测系统，保存数据。

通过 FPGA 控制采集模块的采样速率为 10 kHz，保存标准系统(光谱密集采样)的数据与待测系统的采集数据并进行处理，得到如图 12 所示结果。

从图中可以看出，当对宽光谱干涉信号进行 40 点采样时，稀疏采样系统具备复现原始光谱的能力(如图 12(a))。由于采样点数是数量级上的减少，使得解调结果的精度下降，但对同一信号，无论是密集采样还是稀疏采样，FT 变换后的频率不会相差很大，从图 12(b)中可以看出密集采样与稀疏采样的信号光谱在频率域上基本吻合，只是由于采样点数不同造成强度有差距，并不影响光谱信号解调，与理论分析结果一致。

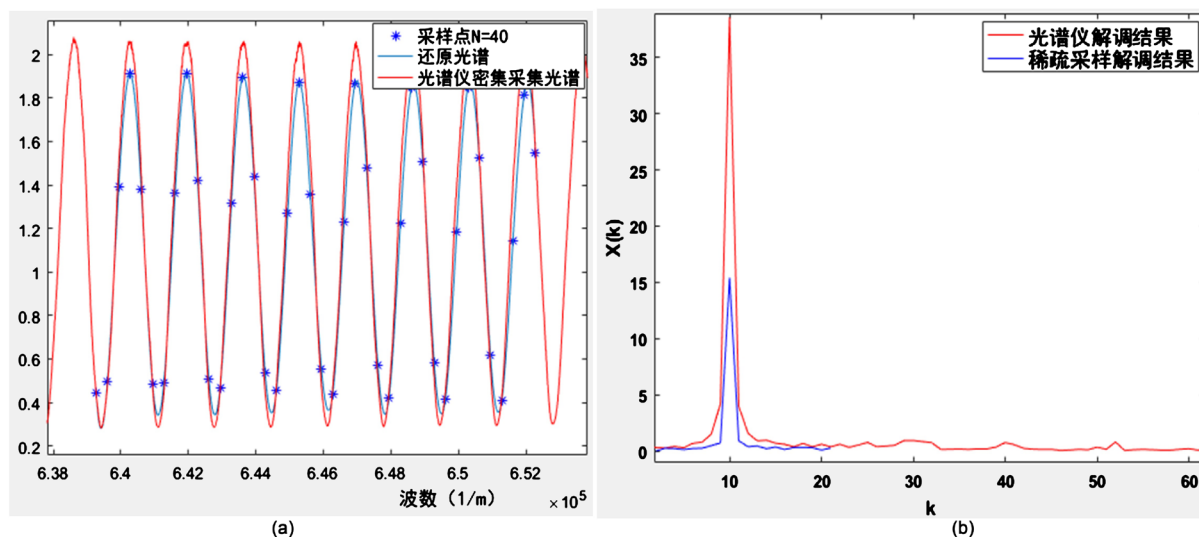


Figure 12. The experiment results of sparse sampling. (a) Sparse sampling and dense sampling recurring spectral signals; (b) sparse sampling and dense sampling FT transformation results

图 12. 采样功能验证实验结果。(a)稀疏采样与密集采样复现光谱信号；(b)稀疏采样与密集采样 FT 变换结果

在实验中，由于电路的模拟电路与数字电路的连接依靠杜邦线，未将电路部分集成在一块 PCB 板上等因素，当提高采样系统的速度时，噪声干扰很大，得到的结果很差，这是整套硬件系统有待改进的地方。

5. 结论

针对宽光谱干涉型光纤法珀传感器解调系统的整体测量速度慢的问题，从根源 - 光谱采样点数上出发，设计了宽光谱光纤法珀干涉信号的稀疏采样硬件系统，并通过实验对稀疏采样系统的功能进行验证。这对宽光谱干涉型传感器应用于高速动态监测领域具有重大意义。

基金项目

由重庆市科委基金项目 (No.cstc2017zdcy-zdyf0334_1495499677641) 和国家自然科学基金 (No.61405019) 资助。

参考文献

- [1] 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里 - 珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 132-145.
- [2] 章鹏, 朱永, 唐晓初, 陈伟民. 基于傅里叶变换的光纤法布里 - 珀罗传感器解调研究[J]. 光学学报, 2005, 25(2): 186-189.
- [3] Yu, Z.H. and Wang, A.B. (2016) Fast Demodulation Algorithm for Multiplexed Low-Finesse Fabry-Perot Interferometers. *Journal of Lightwave Technology*, **34**, 1015-1019. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2515943>
- [4] 怀鑫. 光纤传感网络中微弱光信号的检测[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [5] 杨小优, 唐政维, 周平等. PIN 光电探测器低噪声前置放大电路设计[J]. 电子质量, 2012(3): 43-45.
- [6] 胡涛, 司汉英. 光电探测器前置放大电路设计与研究[J]. 光电技术应用, 2010, 25(1): 52-55.
- [7] 宋涛, 张斌, 罗倩倩. 光电转换电路的设计与优化[J]. 光电技术应用, 2010, 25(6): 46-48.
- [8] 张国雄, 李醒飞. 测控电路[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [9] 张贵清, 朱磊, 颜露新, 等. 基于 FPGA 的多路同步实时数据采集方案设计 with 实现[J]. 测控技术, 2005, 24(12): 26-29.
- [10] 林长青, 孙胜利. 基于 FPGA 的多路高速数据采集系统[J]. 电测与仪表, 2005, 42(5): 52-54.
- [11] 胡波, 李鹏. 异步 FIFO 在 FPGA 与 DSP 通信中的运用[J]. 电子科技, 2011, 24(3): 53.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2327-0853, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: oics@hanspub.org