DOI: 10.13382/j.jemi.B2103963

光纤布拉格光栅解调系统的光谱数据高速传送方法*

王鹏飞[1,2] 宋言明[1,2] 王永千[1,2] 周康鹏[3] 吕 峥[1,2]

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100192;2. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室 北京 100016;3. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

摘 要:针对工程应用中使用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)测量炮膛温度瞬变、高频振动等信号时光谱成像法数据传输带宽高的需求,提出了一种基于直接存储器访问(direct memory access, DMA)的光谱数据高速传送方法,设计了基于 Zynq 的光谱数据高速传送硬件逻辑,利用光谱成像法原理搭建了 FBG 解调系统,实现了 DMA 方式的光谱数据同步传送以及 FBG 波长解调计算。数据传送仿真实验与 FBG 中心波长解调结果表明,解调系统可以将 FBG 光谱数据进行高速传送,数据传输带宽为 320 Mbit/s,解调速率达到 34 kHz,光谱数据传送具有较高的稳定性。

关键词: 光纤光栅解调;DMA;Zynq;高速传送

中图分类号: TH741;TN98 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.4030

High-speed transmission method of spectral data for FBG demodulation system

Wang Pengfei[1,2] Song Yanming[1,2] Wang Yongqian[1,2] Zhou Kangpeng[3] Lv Zheng[1,2]

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing, 100192, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing, 100016, China; 3. School of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to meet the demand of high data transmission bandwidth of spectral imaging method using fiber Bragg grating (FBG) in engineering applications for transient temperature and high frequency vibration signal measurement in the gun bore, a high-speed spectral data transfer method based on direct memory access (DMA) is proposed. A hardware logic of high-speed spectral data transmission based on Zynq is designed, and the FBG demodulation system is built with the principle of spectral imaging, which has realized the synchronous transmission of spectral data by DMA and FBG wavelength demodulation. The results of data transmission simulation experiment and FBG center wavelength demodulation show that the demodulation system can transmit FBG spectrum data at a high speed, the data transmission bandwidth is 320 Mbit/s, the demodulation rate reaches 34 kHz, and the spectrum data transmission has a high stability.

Keywords: FBG demodulation; DMA; Zynq; high-speed transmission

0 引 言

近年来,基于光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感网络的结构健康监测成为一大研究热点,正在从技术研究走向工程应用[1]。与传统电传感器相比,光纤光栅传感器以光纤为介质集信息传感与传输于一体,具有抗电磁干扰、体积小、重量轻、易于大规模组网等优势,可以实现温度、应变、压力、振动等多种物理量的测量[2-8]。FBG 传感器作为一种波长调制器件,由外界物理

收稿日期:2021-02-02 Received Date: 2021-02-02

*基金项目:国家自然基金(61903042,51535002)、高等学校学科创新引智计划(D17021)、北京信息科技大学师资补充与支持计划(2019-2021)(5029011103)项目资助

量对其中心波长进行调制,而目前制约其走向工程应用的关键问题之一是如何能够快速、精确地解调传感网络中的 FBG 传感器中心波长变化量[9]。

在工程应用中,往往需要将多个 FBG 传感器进行组网实现测量,FBG 解调系统需要具有较大的解调容量,在对炮膛温度瞬变或高频振动等信号进行测量时,FBG 解调系统在实现大容量的同时还必须实现高速解调。当前,常用的光纤光栅解调方法有滤波解调法、可调谐光源解调法、干涉仪解调法、光谱成像解调法等[10-11]。其中,滤波解调法受耦合器偏振特性和机械驱动结构影响,并且无法利用复用技术组建大规模传感网络,通常用于静态高精度测量;可调谐光源解调法中受电流环稳定时间和扫描光源的特性限制,一次扫描过程需要变化 2 000 组电流组合,该原理的解调速率超过 1 kHz 较为困难[12];干涉仪解调法是利用光学相干性将 FBG 的波长偏移转换成相位差变化,由于相位变化范围有限从而限制了解调范围,大规模传感网络需要时分复用进行解调,对于工程应用有一定的限制。基于线阵电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)的光谱成像法具有小体积、解调速率高、单通道容量大等优势,单通道能够实现多个 FBG 传感器的动、静态解调[13],解调速率可以满足工程应用中对 FBG 解调系统大容量和高波长采样率的需求。

2004 年,英国阿斯顿大学的 Simpson 等使用线阵 CCD 图像传感器和闪耀光栅设计了基于光谱成像法的解调系统,实现了 70 nm 光纤光栅解调带宽,该系统信噪比为 45 dB,相邻信道间隔为 75 pm。2016 年,中北大学研制的基于线阵 CCD 的 FBG 解调系统实现了解调速度达到 5 kHz。商用产品中以 Ibsen 公司为代表研发了许多性能优良的光谱成像解调仪,其解调速度最高可到 17 kHz。然而,FBG 传感器对高频物理信号采集时,要求解调速率达到 30 kHz 时,光谱成像法会产生大量的光谱数据,如何将光谱数据进行高速传送是光谱成像法 FBG 解调系统面临的一大技术难点,也是制约光谱成像法提升解调速率的瓶颈之一。因此,本文提出一种基于 DMA 的光谱数据高速传送方法,利用光谱成像法原理搭建 FBG 解调系统,实现光谱数据的同步传送以及 34 kHz 的 FBG 波长解调计算,为光纤传感网络监测在特殊工程应用测量中提供了新的技术思路。

1 FBG 反射光谱获取与传输

1.1 FBG 反射光谱的获取

根据 FBG 传感原理,被测物理量发生变化时,FBG 传感器的反射光谱也会随之改变,根据反射光谱的变化即可推算出此时中心波长的变化[14-16]。因此,准确获得 FBG 传感器的反射光谱是光谱成像法进行中心波长解调的前提。

如图 1 所示,光纤传感中的传感光波长通常为 1 525~1 565 nm,根据衍射光栅对该波段光具有不同的衍射角这一特性[17],可将频域中的 FBG 反射光谱与空间域中 CCD 像素点对应,通过读取 CCD 输出的各像素点电压就可以得知此时 FBG 传感器的反射光谱[18]。

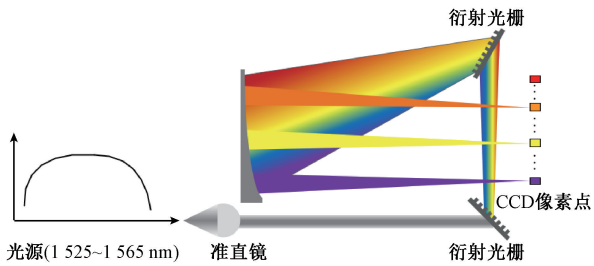

图 1 CCD 光谱成像法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CCD spectral imaging method

通常,FBG 反射光谱在线阵 CCD 上像素点光强分布可视为高斯分布,对各像素点进行分峰高斯拟合[19],由最小二乘法确定拟合函数的最优解后,通过标定以及高斯曲线特征参数即可得到 FBG 中心波长值。

拟合函数表达式为:

$$I(\lambda) = I_0 \exp\left[-4\ln 2\left(\frac{\lambda - \lambda_c}{\Delta\lambda}\right)^2\right] \tag{1}$$

式中:I_0 为反射光谱强度的峰值;λ_c 为反射光谱中心波长;$\Delta\lambda$ 为反射光谱的 3 dB 带宽。

对式(1)两边同取对数,即:

$$P(\lambda) = a_0 + a_1\lambda + a_2\lambda^2 \tag{2}$$

式中:$P(\lambda) = \ln I(\lambda)$;$a_0 = \ln I_0 - 4\ln 2\dfrac{\lambda_c^2}{\Delta\lambda_c^2}$;$a_1 = \dfrac{8\ln 2\lambda_c}{\Delta\lambda_c^2}$;$a_2 = -\dfrac{4\ln 2}{\Delta\lambda_c^2}$。

将 CCD 各像素点的光强数据(λ_i,I_i)代入式(2),由最小二乘法判定得到最佳高斯拟合函数[20]。

$$\sum_{i=0}^{N}\left[I_i - P(\lambda_i)\right]^2 = \min \tag{3}$$

式(3)取最小值时,得到 FBG 反射光谱的最佳拟合函数,即可确定 a_0、a_1、a_2 的值。根据高斯函数的特征参数,此时各段高斯函数的期望值就是对应 FBG 反射光谱的中心波长 λ_c。

1.2 FBG 反射光谱的传输

FBG 反射光谱经衍射光栅分光后线阵 CCD 可以探测到不同衍射角的光强,由电容积分电路和移位寄存器串行输出各像素点的模拟电压,即代表各像素点的光照强度大小。对 CCD 输出的模拟电压进行采样,FPGA 读取得到的数字电压,就可以知道此时 FBG 反射光谱的光

强数字量。

使用 16 bit 的 ADC 采样对 256 pixels 的 CCD 模拟电压进行采样，当 FBG 解调系统波长采样率达到 34 kHz 时，单位时间内输出的原始数据约为 17 MByte。光谱成像法使用光强度进行解调，因此需要将光谱数据从 Zynq 的 PL 端传输到 PS 端的 DDR 中，以便通过 TCP 进行数据传输。这种“准流式”光谱数据对于数据总线的传输性能与带宽有较高要求，适合采用基于 AXI 总线的 DMA 实现光谱数据高速传送[21]。

DMA 是一种内存访问技术，允许硬件子系统独立的直接读写内存，而不需要 CPU 介入处理，从而不需要 CPU 的大量中断负载。DMA 是用硬件实现存储器与存储器之间或存储器与 I/O 设备之间直接进行数据高速传送，使用 DMA 时，处理器向 DMA 控制器发送一个存储器传输请求，这样当 DMA 控制器在传输的时候，处理器同时可以执行其他的操作，传输完成时 DMA 以中断的方式通知处理器系统。因此，DMA 的使用能够提高数据吞吐量，减轻了处理器系统的负担，使得整个系统的性能得到提高。

在 Zynq 中，系统通过 AXI（advanced eXtensible interface）总线将 PL（programmed logic）的 AXI DMA 模块与 PS（process system）的 HP（high performance）接口进行互联，使得光谱数据可以直接传送到存储器中，实现 FBG 反射光谱在存储器与存储器之间进行高速数据传输。

图 2 所示为光谱数据高速传送方案。首先，由 PL 端实现对 FBG 反射光谱进行模数转换采集，将 ADC 采集得到的光谱数据缓存到 AXIS DATA FIFO 中；然后，在 PS 控制下，AXI DMA 模块根据 FIFO 发出的结束信号实现一次数据传送到存储器；最后，对存储器中的数据通过以太网进行传输。

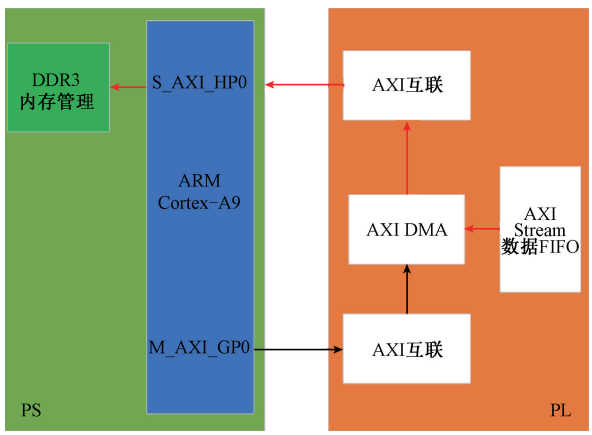

图 2　FBG 光谱数据传送方案

Fig. 2　Scheme of FBG spectral data transmission

2　基于 DMA 的光谱数据传输设计

由 FBG 光谱的获取与传输的分析，搭建图 3 所示的 FBG 解调系统。该系统由 Zynq 对 A/D 采集得到的光谱数据进行处理，PL 基于 DMA 技术对 FBG 反射光谱数据同步传送，PS 将 DDR 中的被传送数据通过以太网传输到上位机，由上位机对传输得到的光谱数据进行解调得到中心波长。

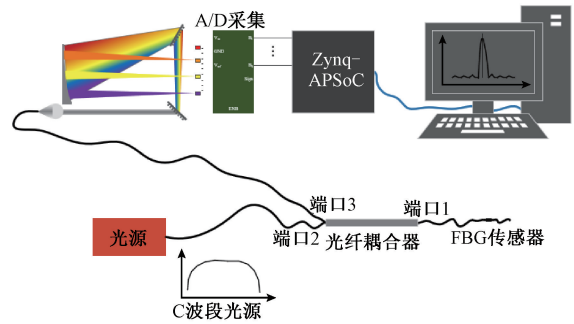

图 3　基于 Zynq-APSoC 的 FBG 解调系统示意图

Fig. 3　Schematic diagram of FBG demodulation system based on Zynq-APSoC

FBG 反射光谱数据高速传送过程如图 4 所示。PS 实现解调系统的参数配置，PL 对 CCD 分光模块输出的模拟电压进行模数转换（analog to digital conversion，ADC），PS 控制 AXI DMA 模块将采样数据传送到 DDR3 中后通过 TCP 通信将光谱数据发送到上位机进行解调计算[22-23]。

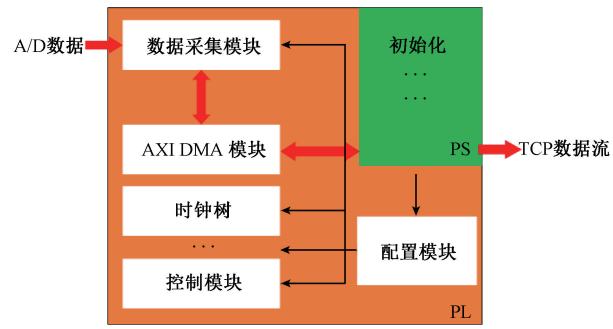

图 4　FBG 光谱 DMA 数据传送过程

Fig. 4　FBG spectrum DMA data transfer process

2.1　FBG 光谱采集电路实现

图 5 所示为线阵 CCD 时序图，线阵 CCD 的 VIDEO 引脚以串行方式输出 256 个像素点的模拟电压，ADC 对 CCD 输出的 VIDEO 信号进行采样得到各像素点 16 bit

的数据,Zynq 对该采样数据进行帧缓存后开始数据高速传送。

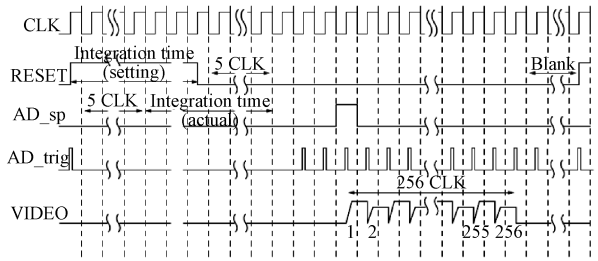

图 5 CCD 图像传感器的时序图

Fig. 5 Timing diagram of CCD image sensor

2.2 FBG 光谱数据传送实现

Zynq 的 PL 端使用 AXI DMA 模块和高性能接口对光谱采样数据进行高速传送。首先,使用 AXI-Stream 接口的异步 FIFO 缓存对光谱数据进行跨时钟域缓存;然后,在一帧光谱数据采集结束后将由 AXI DMA 模块通过 PS 的 HP 接口将数据传送到 DDR3;最后,由 PS 端对 DDR3 中的数据进行 TCP 传输。

根据 Zynq 中 DMA 数据传送方式以及 FPGA 模块化设计思想,使用 Verilog HDL 语言作为输入设计语言实现 FBG 光谱的数据采集与数据传送逻辑功能。其中,基于 AXI DMA 的 FBG 光谱数据传送逻辑设计如图 6 所示。

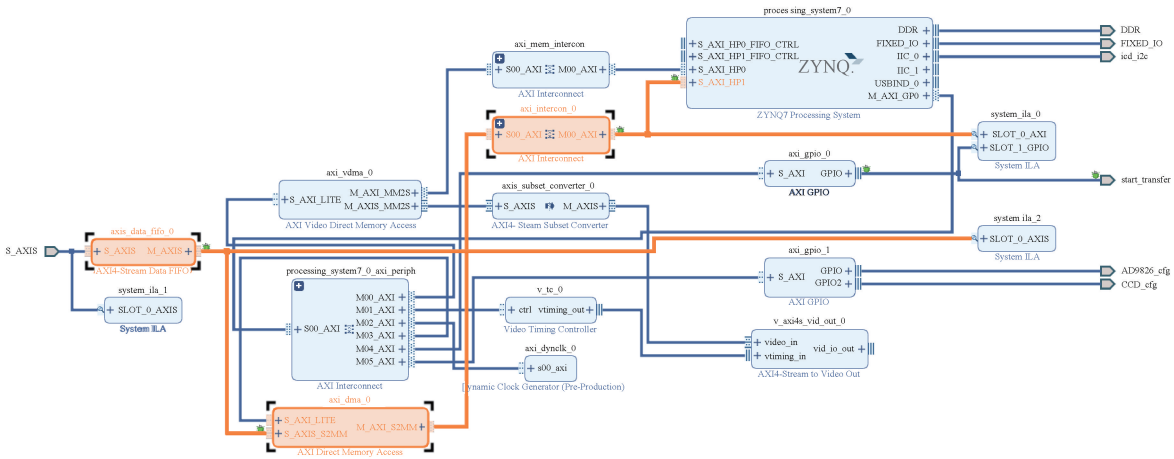

图 6 基于 AXI DMA 的 FBG 光谱数据传送设计框图

Fig. 6 Block diagram of FBG spectral data transmission design based on AXI DMA

3 实验与分析

3.1 FBG 光谱数据传送仿真

由于 ADC 的 16 bit 光谱数据在一个时钟周期内分为两个 8 bit 数据分时输出,因此利用一组 512×8 bit 的光谱数据对 FBG 光谱数据高速传送过程进行仿真。

PL 的 ROM 将光谱数据按顺序存储,根据 ADC 和 CCD 模块时序关系,PL 的逻辑电路分别在采样时钟的上升沿和下降沿将该数据组合为一个像素点的 16 bit 光谱采样数据,每一组数据均以 4 Byte 对其进行传输,其中高 2 Byte 补 0,低 2 Byte 为仿真数据,之后通过 AXI DMA 模块将光谱数据高速传送到 PS 端的 DDR3 中,PS 通过 TCP 传输仿真数据到上位机进行接收与存储,实现光谱的重构与中心波长解调计算。

如图 7、8 所示,在 PL 端使用片内逻辑分析仪对 DMA 传送数据进行观察,与上位机抓包数据进行比较,验证仿真光谱数据在数据高速传送过程中是否发生错误。

FBG 光谱数据传送仿真结果表明,FBG 解调系统通过 AXI DMA 实现了光谱数据高速传送,每一组数据均以 4 Byte 对其进行传输,数据传送过程稳定,以太网传输带宽为 320 Mbit/s 左右,解调系统在 34.587 kHz 波长采样率下可以实现 FBG 反射光谱重构与中心波长解调。

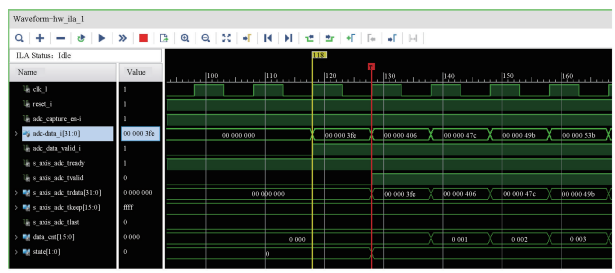

图 7 AXI DMA 传送数据

Fig. 7 AXI DMA transfer data

3.2 FBG 光谱采集与波长解调

搭建图 9 所示的 FBG 解调系统。由光源波长为 1 525~1 565 nm 的放大自发辐射光源(amplified spontaneous emission, ASE)、光纤耦合器(50∶50)、CCD 分光模块搭建 FBG 解调系统。ASE 光源经耦合器入射至 FBG 传感器,FBG 传感器的反射光谱进入 CCD 分光

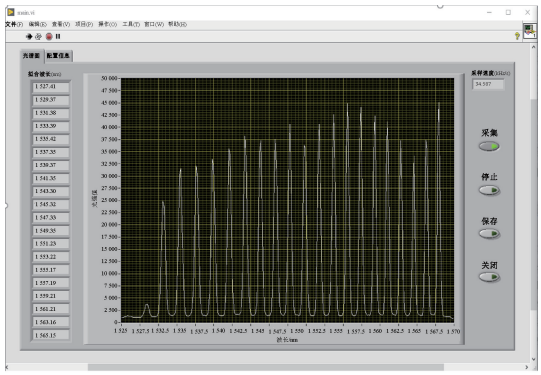

图 8　光谱重构及波长计算

Fig. 8　Spectral reconstruction and wavelength calculation

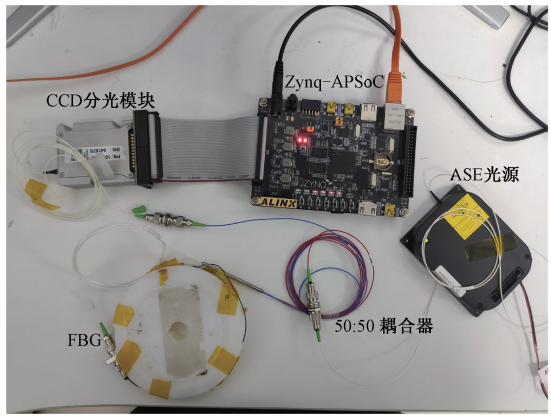

图 9　基于 Zynq-APSoC 的 FBG 解调系统

Fig. 9　FBG demodulation system based on Zynq-APSoC

模块,通过对 CCD 分光模块输出的模拟数据进行采集,即可以根据采集得到的数据对 FBG 光谱进行重构解调等。

使用 AQ6151 波长计对刻写了 12 个不同中心波长的 FBG 以 1 Hz 速率采集 10 s,其平均值即为各 FBG 的中心波长值。相同条件下,使用基于 DMA 进行数据高速传送的 FBG 解调系统对相同传感器以 34 kHz 速率采集 10 s,并存储波长解调结果。

如表 1 和图 10 所示,统计上述 AQ6151 波长计和基于 DMA 光谱数据高速传送方法搭建的 FBG 解调系统的测量结果中最大值与最小值之间的最大波长漂移量。

表 1　FBG 中心波长计算结果

Table 1　FBG center wavelength calculation results

序号	波长计均值/nm	最大漂移/nm	解调系统均值/nm	最大漂移/nm
1	1 528.571 1	0.000 9	1 528.571 2	0.004 8
2	1 530.581 1	0.002 5	1 530.581 6	0.007 4
3	1 532.580 0	0.004 7	1 532.580 4	0.005 1
4	1 538.592 6	0.001 1	1 538.592 9	0.004 8
5	1 540.618 1	0.011 6	1 540.618 7	0.003 9
6	1 546.607 1	0.001 4	1 546.607 6	0.004 5
7	1 552.503 8	0.000 7	1 552.503 8	0.005 0
8	1 554.428 0	0.002 3	1 554.428 9	0.005 5
9	1 556.517 2	0.000 8	1 556.517 5	0.005 8
10	1 562.428 1	0.001 3	1 562.428 5	0.006 1
11	1 564.525 3	0.001 5	1 564.526 1	0.003 9
12	1 566.443 0	0.004 6	1 566.443 8	0.004 1

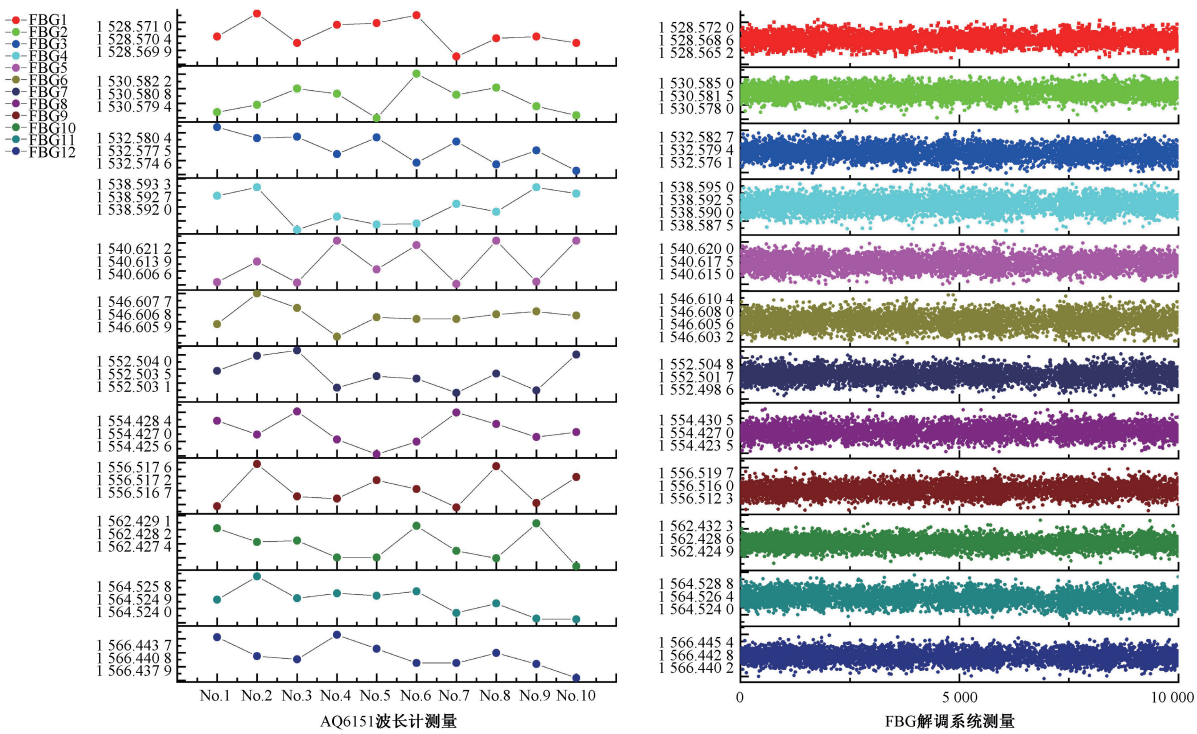

图 10　AQ6151 波长计与 FBG 解调系统测量结果

Fig. 10　AQ6151 wavelength meter measurement result

FBG 光谱采集和波长解调实验表明,AQ6151 波长计在 1 Hz 解调速率下,FBG 传感器最大漂移量为 0.011 6 nm;FBG 解调系统在 34 kHz 解调速率下,解调得到的传感器波长最大漂移量为 0.007 4 nm。一般情况下,使用 FBG 温度传感器测温时,温度变化 1 ℃对应 FBG 中心波长漂移为 0.012 nm,基于 DMA 光谱数据高速传送方法搭建的 FBG 解调系统能够满足实际工程应用需求。

4 结 论

针对 FBG 传感器在工程应用中测量温度瞬变场、高频振动等物理信号时,FBG 解调系统在高速波长采样率下光谱数据传送问题,采用了 Zynq 片上处理器 PL 端的 DMA 将光谱数据同步传送到 PS 的 DDR 中,搭建了基于光谱成像法的 FBG 解调系统。对该解调系统进行了光谱数据传送仿真实验与波长采集解调实验。实验结果表明,该解调系统实现了 34 kHz 波长采样率下的数据传送、光谱重构以及波长解调,数据传输带宽为 320 Mbit/s,数据传送具有较高的稳定性,能够满足实际工程应用需求。

参考文献

[1] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. 中国光学,2013,6(3):306-317.
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 6(3): 306-317.

[2] ZOU Y, DONG X P. Demodulation of the FBG temperature sensor with the tunable twin-core fiber[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2011, 53(1): 81-84.

[3] 倪凯,徐海松,董新永,等. 基于光纤布拉格光栅的温度不敏感的倾斜传感器[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2104-2107.
NI K, XU H S, DONG X Y, et al. Temperature-Independent Fiber Bragg grating tilt sensor [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(10): 2250-2252.

[4] 吴永红, 邵长江, 屈文俊,等. 简化的光纤光栅应变传感器光-力转换的时变方程[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 1965-1970.
WU Y H, SHAO CH J, QU W J, et al. Simplified time-dependent optical-mechanical transformation equation for FBG strain sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 1965-1970.

[5] 童杏林,何为,张翠,等. 光纤光栅与光纤法珀传感器在航空航天领域的研究与应用进展 [J]. 激光杂志, 2018, 39(7): 1-7.
TONG X L, HE W, ZHANG C, et al. Research and application progress of fiber Bragg grating and Fabry-Perot sensors in the field of aeronautics and astronautics[J]. Journal of Laser Science, 2018, 39(7): 1-7.

[6] 梁家伟, 赵党军, 翟雯婧. 基于 FBG 应变传感网络的梁结构振动参数辨识[J]. 电子测量技术, 2020, 43(9): 155-160.
LIANG J W, ZHAO D J, ZHAI W J. Identification of vibration parameters of beam structures based on FBG strain sensing network [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(9): 155-160.

[7] 戎丹丹,张钰民,宋言明, 等. 柱体金属化封装 FBG 传感器的传感特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1):117-124.
RONG D D, ZHANG Y M, SONG Y M, et al. Study on the sensing characteristics of cylindrical metallic-packaged FBG sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1): 117-124.

[8] 周湛,张志坤,赵振刚, 等. 基于光纤传感的输电线路悬垂绝缘子风偏角监测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(3):81-87.
ZHOU ZH, ZHANG ZH K, ZHAO ZH G, et al. Monitoring of wind deflection angle of suspension insulator string for power lines based on optical fiber sensing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3):81-87.

[9] 吴晶, 吴晗平, 黄俊斌等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519-531.
WU J, WU H P, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 519-531.

[10] 尚秋峰,秦文婕. FBG 传感系统信号处理方法研究进展[J]. 光通信技术, 2020, 44(5): 5-9.
SHANG Q F, QIN W J. Research progress of signal processing methods of FBG sensing system[J]. Optical Communication Technology, 2020, 44(5): 5-9.

[11] 毕继耀, 张大伟, 杨海马,等. 线阵 CCD 光谱分辨率检测系统设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1086-1092.
BI J Y, ZHANG D W, YANG H M, et al. Design of linear CCD spectral resolution detection system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 1086-1092.

[12] 刘佳,祝连庆,何薇, 等. 基于 MG-Y 型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(3):87-96.
LIU J, ZHU L Q, HE W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser[J].

Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 87-96.

[13] DAS B, CHANDRA V. Fiber-MZI-based FBG sensor interrogation: Comparative study with a CCD spectrometer. [J]. Applied Optics, 2016, 55(29): 8287-8292.

[14] 冯艳,张震,张华,等. 光纤 Bragg 光栅传感监测解调系统设计[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(1): 143-147.
FENG Y, ZHANG ZH, ZHANG H, et al. Design of optical fiber Bragg grating sensor monitoring and demodulation system[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(1): 143-147.

[15] 李红, 祝连庆, 张钰民,等. 线阵 InGaAs 扫描 FBG 反射谱的传感解调方法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 236-240.
LI H, ZHU L Q, ZHANG Y M, et al. Demodulation method for FBG reflection spectrum based on linear array InGaAs scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 236-240.

[16] 邹洁, 何超, 朱永凯. 基于 FBG 和小波包能量谱的风机叶片无损检测[J]. 电子测量技术, 2015,38(3): 133-138.
ZOU J, HE CH, ZHU Y K. Research on the NDT of fan blade based on fiber Bragg grating and wavelet packet energy spectrum technology[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(3): 133-138.

[17] PARK J S, SONG J K, YOON B W. Development of single channel interrogator for optical sensors [C]. International Conference on Intelligent Robotics & Applications, 2013.

[18] 严鹏飞, 高强, 邱俊彭,等. 基于 FPGA 的光纤光栅传感解调系统[J]. 应用光学, 2016,37(6): 942-947.
YAN P F, GAO Q, QIU J P, et al. Demodulation system of fiber Bragg grating sensor based on FPGA[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(6): 942-947.

[19] 孙杉杉,杨雄,王海勇, 等. 小型化光纤光栅解调系统设计及寻峰算法的模拟评测[J]. 应用光学, 2020, 41(3):618-625.
SUN SH SH, YANG X, WANG H Y, et al. Design of miniaturized fiber grating demodulation system and simulation evaluation of peak detection algorithm [J]. Applied Optics, 2020, 41(3): 618-625.

[20] 朱嘉齐,章家岩,冯旭刚. 柔性臂测量机的圆光栅偏心参数标定算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8):1-7.
ZHU J Q, ZHANG J Y, FENG X G. Calibration algorithm of circular grating eccentricity parameters of flexible arm measuring machine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8):1-7.

[21] 肖明国,董明利,刘锋,等. 基于 PCIe 总线的数据采集卡设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(3): 252-254, 266.
XIAO M G, DONG M L, LIU F, et al. PCIe bus data acquisition card design and implementation [J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(3): 252-254, 266.

[22] 刘爽, 李义, 杨培宇. 基于 Zynq SoC 的高速数据传输[J]. 科学技术创新, 2019(26): 83-84.
LIU S, LI Y, YANG P Y. High speed data transmission based on Zynq SoC [J]. Science and Technology Innovation, 2019(26): 83-84.

[23] 俞鹏炜, 任勇, 冯鹏,等. 基于 FPGA 的千兆以太网 CMOS 图像数据传输系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(11): 76-81.
YU P W, REN Y, FENG P, et al. Design of Gigabit Ethernet CMOS image data transmission system based on FPGA[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(11): 76-81.

作者简介

王鹏飞,2017 年于山西大同大学获得学士学位,现为北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为光纤光栅传感解调技术。
E-mail: Phil_CX@ hotmail. com

Wang Pengfei received his B. Sc. degree from Shanxi Datong University in 2017. Now he is a M. Sc. candidate at Beijing Information and Science Technology University. His main research interest includes fiber grating sensor demodulation technology.

宋言明(通信作者),2005 年于青岛农业大学获得学士学位,2008 年于甘肃农业大学获得硕士学位,2015 年于北京航空航天大学获得博士学位,现为北京信息科技大学讲师,主要研究方向为精密仪器与机械。
E-mail: sym0823@ 163. com

Song Yanming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Qingdao Agricultural University in 2005, M. Sc. degree from Gansu Agricultural University in 2008, and Ph. D. degree from Beihang University in 2015. Now he is a lecturer at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include precision instrument and machinery.