

傅里叶变换红外成像光谱仪实时光谱复原 FPGA 芯片系统研究

殷世民, 梁永波, 朱健铭, 梁晋涛, 陈真诚

(桂林电子科技大学 生命与环境科学学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对傅里叶变换红外成像光谱仪实时数据处理技术的要求, 研究了一种基于 FPGA 的集干涉图非均匀性校正、光谱复原、光谱辐射定标于一体的傅里叶变换红外成像光谱仪实时光谱复原芯片系统。该系统对输入信号做了标准化设计, 以流水线方式输出目标的复原光谱信息, 可嵌入到各种类型的红外/可见光傅里叶变换成像光谱仪的实时数据处理系统中, 具有体积小、运算速度快、稳定可靠及易于升级等优点, 为基于光谱特征的目标实时识别奠定了良好的技术基础。

关键词: 傅里叶变换; 红外成像光谱仪; 实时; 光谱复原; 芯片系统

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3580-07

Study on real-time spectrum recovery system on a FPGA chip for Fourier transform infrared imaging spectrometer

Yin Shimin, Liang Yongbo, Zhu Jianming, Liang Jintao, Chen Zhencheng

(School of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In view of the real-time data processing requirements of Fourier transform infrared imaging spectrometer, a real-time spectrum recovery system on a FPGA chip for the spectrometer was studied which integrates the functions of interferogram nonuniformity correction, spectrum recovery and spectral radiation calibration. The system has made a standardized design of the input signals. It can be run in line way, output target's spectrum in real-time and be embedded in the real-time data processing system for various types of infrared/visible Fourier transform imaging spectrometer which has some specialties such as small volume, fast computing speed, good stability, high reliability and easy to upgrade. The system can establish a good technical foundation for the real-time target recognition based on the spectral characteristics.

Key words: Fourier transform; infrared imaging spectrometer; real-time; spectrum recovery; chip system

收稿日期: 2015-04-04; 修订日期: 2015-05-13

基金项目: 国家自然科学基金(61265006, 61271119)

作者简介: 殷世民(1968-), 男, 研究员, 博士, 主要从事信号处理方面的研究。Email: hawk_ysm@163.com

通讯作者: 陈真诚(1965-), 男, 教授, 博士, 主要从事医学信号处理方面的研究。Email: chenzhcheng@163.com

0 引言

傅里叶变换红外成像光谱仪能够获得目标的红外光谱信息,具有昼夜工作能力,可用于大气探测、环境监测、空间遥感、物质分析、以及军事侦查等各种领域^[1-2]。

一般的红外成像系统获得的是场景目标上每一点的灰度信息,而傅里叶变换红外成像光谱仪获得的是场景目标上每一点的干涉数据,通过对干涉数据进行傅里叶变换而获得目标上每一点的光谱信息,因此傅里叶变换红外成像光谱仪获取的信息量通常非常庞大,其信息获取与处理方式与一般红外成像系统也不一样,如星载成像光谱仪系统一般都是在空间轨道上实时获取目标的干涉图信息并压缩后传输到地面数据处理系统,后期再对获取的干涉数据进行光谱复原处理而获得目标的光谱信息^[3]。随着现代社会的发展,基于傅里叶变换成像光谱仪优点的对目标的实时监测成为当前光谱仪研究领域的一个热点问题,而实时光谱复原技术成为该问题有效解决的关键。

由于成像光谱仪帧频高、信息量大,成像光谱仪实时数据处理系统通常都以高速 DSP 器件或 Fourier 变换专用芯片为核心处理部件,这种系统体积大,算法复杂,研制周期长,而且针对特定的光谱仪系统研制成功后,一旦外部条件稍有变化,其硬件处理电路修改起来较为困难,不便于移植和推广;另外,傅里叶变换红外成像光谱仪采用 IRFPA 器件获得目标的干涉图信号,IRFPA 器件的非均匀性^[4-5]对复原光谱的精度会产生较大的影响,因此在光谱复原之前对干涉图信号进行非均匀性校正^[6]通常是必须的。

基于这种思想,文中研究了一种基于 FPGA 的傅里叶变换红外成像光谱仪实时光谱复原芯片系统,如图 1 所示,它具有实时干涉图非均匀性校正、

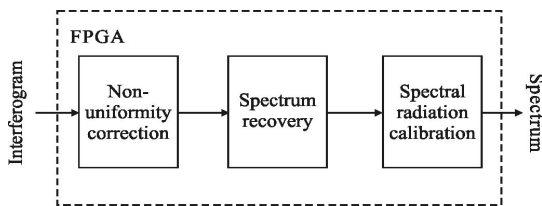


图 1 实时光谱复原系统

Fig.1 Real-time spectrum recovery system

光谱复原及光谱辐射定标功能,能够嵌入到红外/可见光傅里叶变换成像光谱仪的数据处理部分完成实时光谱的复原处理。

1 系统数据处理算法

1.1 干涉图非均匀性校正算法

由于傅里叶变换红外成像光谱仪结构的特殊性,目前在工程上对其干涉图的非均匀性校正主要有两种方式。

第一种称为先定标方式,如图 2 所示,它是在光谱仪系统组装之前,对光谱仪使用的 IRFPA 器件进行单独定标而获取定标图像;在光谱仪系统组装完成之后,在光谱仪的数据处理系统中利用定标图像实现对干涉图非均匀性的校正;该定标方式由于没有光学系统的支持,通常在定标图像中会引入光分布不均匀性噪声,使得对定标图像的处理较为困难;另一个缺点是在光谱仪系统组装完成之后无法再对其 IRFPA 重新定标^[7]。

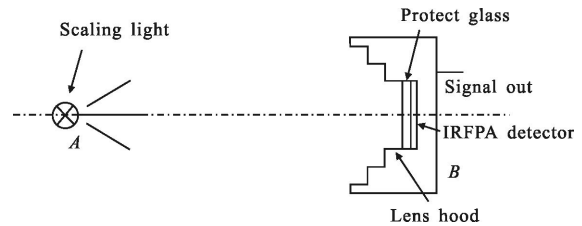


图 2 光谱仪非均匀性先定标方式

Fig.2 Non-uniformity calibration of spectrometer in advance

第二种称为后定标方式,如图 3 所示,它是在光谱仪系统组装完成之后,利用黑体等均匀辐射源作为光谱仪的输入,采集光谱仪输出的干涉图像作为定标图像,在光谱仪的数据处理系统中利用定标图像实现对干涉图非均匀性的校正;该定标方式可以有效校正 IRFPA 等引入的干涉图非均匀性噪声,并可对光谱仪非均匀性进行重复定标,但对定标数据的获取及处理有特殊的方法^[8]。

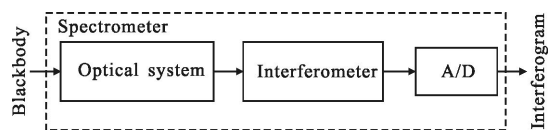


图 3 光谱仪非均匀性后定标方式

Fig.3 Non-uniformity calibration of spectrometer in future

在获取了有效的定标图像之后,对时间调制型、空间调制型及时间空间联合调制型傅里叶变换红外成像光谱仪干涉图非均匀性的校正可以采用下面的两点校正算法来进行。

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}(\varphi_1) \quad (1)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij}(\varphi_2) \quad (2)$$

$$I'_{ij}(\varphi) = K_{ij} I_{ij}(\varphi) + Q_{ij}, \quad \begin{matrix} i=1 \sim M \\ j=1 \sim N \end{matrix} \quad (3)$$

$$K_{ij} = \frac{\bar{I}_2 - \bar{I}_1}{I_{ij}(\varphi_2) - I_{ij}(\varphi_1)} \quad (4)$$

$$Q_{ij} = \frac{I_{ij}(\varphi_2) \bar{I}_1 - I_{ij}(\varphi_1) \bar{I}_2}{I_{ij}(\varphi_2) - I_{ij}(\varphi_1)} \quad (5)$$

在两点校正算法公式(1)~(5)中,假定 IRFPA 为 $M \times N$ 的阵列; $I_{ij}(\varphi_1)$ 、 $I_{ij}(\varphi_2)$ 为获取的两帧定标图像; $I_{ij}(\varphi)$ 为校正前的干涉图像; $I'_{ij}(\varphi)$ 为校正后的干涉图像; K_{ij} 、 Q_{ij} 为校正系数矩阵。

1.2 光谱复原算法

根据傅里叶变换光谱学原理,干涉仪输出的目标上某点的干涉图 $I(x)$ 与该点的光谱图 $B(v)$ 之间的关系互为傅里叶变换关系,即

$$I(x) = FT[B(v)] \quad (6)$$

$$B(v) = FT^{-1}[I(x)] \quad (7)$$

式中: x 为两相干光束之间的光程差; v 为目标上某点发射光束的频率。从该式可以看出,可以通过对干涉图的傅里叶变换来获得目标点的光谱信息。

另外,由于极大光程差 L 的限制,在工程上需要截取 $-L \sim L$ 范围内的干涉图;对干涉图截短将会导致变换光谱的频谱泄露与谱间干扰;为了减少这种效应,在工程上需要对干涉图进行加窗处理,即用一个窗函数与干涉图相乘,这一过程被称为切趾,相应的窗函数被称为切趾函数^[9]。在工程上可取三角形窗、高斯窗、哈明窗、贝塞尔窗等进行切趾运算。

通过傅里叶变换得到目标点的光谱信息后,还要对其进行相位修正以减少光谱仪设计过程中各种误差对光谱信息的影响;相位修正的方法通常有绝对值法、乘法及卷积法等^[10]。绝对值法算法简单,便于硬件实现;而乘法及卷积法算法相对复杂,不便于硬件实现。绝对值法相位修正的计算公式为:

$$|B(v)| = \sqrt{B_r^2(v) + B_i^2(v)} \quad (8)$$

式中: $B_r(v)$ 、 $B_i(v)$ 分别为干涉图 $I(x)$ 的傅里叶变换的实部、虚部。

另外,干涉图中包含了直流信号成分,在对干涉图进行傅里叶变换之前必须要去除直流信号,最简单的方法是对干涉图进行差分运算。

图 4 为光谱复原算法的主要过程,包括对干涉图进行去直流、切趾、傅里叶变换及对光谱进行相位修正等。

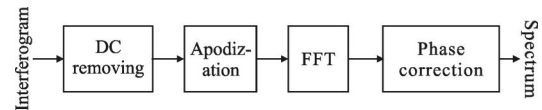


图 4 光谱复原算法

Fig.4 Algorithm of spectrum recovery

1.3 光谱辐射定标算法

成像光谱仪的辐射定标是要建立复原光谱与地面光谱辐射亮度之间的定量关系,其过程是将光谱仪获得的光谱数据与标准光谱辐射度仪器获得的光谱数据进行比对,从而得到特定条件下的辐射定标数据^[11]。

设标准光谱辐射度仪对定标辐射光源输出的标准光谱为 R_i ,而成像光谱仪对定标辐射光源输出的光谱为 D_i ,则光谱辐射定标系数为:

$$C_i = R_i/v, \quad i=1 \sim N \quad (9)$$

式中: N 为光谱信号的长度。设光谱仪正常工作时对实时场景输出的光谱为 P_i ,则对其经过辐射定标校正的光谱 P'_i 为:

$$P'_i = C_i \times P_i, \quad i=1 \sim N \quad (10)$$

2 系统的 FPGA 设计

2.1 系统的 FPGA 设计思想

傅里叶变换成像光谱仪种类多,结构各异,文中的设计思想是设计一种通用的成像光谱仪实时光谱复原 FPGA 芯片系统,能够将之嵌入到各种成像光谱仪的数据处理单元中实现对复原光谱的实时处理。为此对 FPGA 芯片的输入输出信号须做一个统一的标准,如图 5 所示:输入信号为时钟信号 clk ,帧干涉图信号 I , I 的帧起始位置信号 SOI 、帧结束位置信号 EOI , I 中的某行干涉图的始位置信号 sop 、结束位置信号 eop ; 输出信号为帧光谱图信号 $spectrum$, $spectrum$ 的帧起始位置信号 e_SOI 、帧结束位置信号 e_EOI , $spectrum$ 中的某行光谱的始位置信号 e_sop 、

结束位置信号 e_eop。

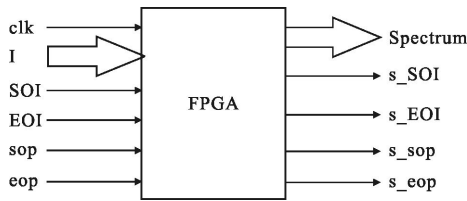


图 5 FPGA 芯片的输入输出信号

Fig.5 Input and output signals of FPGA

输入信号的时序关系如图 6 所示。图 6 中示例的输入干涉图信号每帧有 4 行干涉图，每行干涉图数据的长度为 4，因此每帧干涉图信号有 16 个数据。输出信号时序关系与输入信号类似。

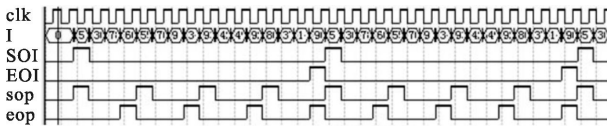


图 6 输入信号的时序关系

Fig.6 Sequence diagram of input signals

在实时光谱复原 FPGA 芯片系统的输入输出信号关系确定之后，设计了如图 7 所示的傅里叶变换红外成像光谱仪实时光谱复原芯片系统，它主要由七大部分组成。第 i 部分为控制信号产生单元，它主要是根据 clk、SOI、EOI、sop、eop 信号的时序关系产生只读存储器 K 与 Q（分别存储一行校正系数用于对干涉图非均匀性的校正）的读出地址信号 adder_V、只读存储器 win（存储一行窗函数数据用于对一行干涉图数据的切趾）的读出地址信号 adder_H 以及 FFT 单元的控制信号 sop_fft、eop_fft。第 ii 部分为干涉图信号非均匀性校正单元，它根据地址信号 adder_V 将只读存储器 K、Q 中存储的非均匀性校正系数依次读出并实现对输入干涉图信号 I 的非均匀性校正处理，该部分的关键是要将输入信号 I、校正系数 K 与 Q 的时序关系对正以正确实现 $I' = K * I + Q$ 的非均匀性校正处理算法。第 iii 部分为差分去直流部分，主要目的是去除干涉图信号中的直流成分。第 iv 部分为干涉图切趾部分，它根据地址信号 adder_H 将只读存储器 win 中存储的窗函数数据依次读出并与输入的每一行干涉图的对应数据相乘。第 v 部分为快速傅里叶变换单元，它实现对输入干涉图信号

的 FFT 变换，该部分的关键是使得第 i 部分产生的 sop_fft、eop_fft 与输入的干涉图信号的每一行要正确对正，即要使 sop_fft 的高电平部分与每行干涉图的起始位置对正、使 eop_fft 的高电平部分与每行干涉图的结束位置对正。FFT 单元输出每行干涉图对应的复原光谱的实部、虚部信号以及 src_sop、src_eop 等控制信号，并以 src_sop 信号的高电平部分对应每行复原光谱的起始位置，以 src_eop 信号的高电平部分对应每行复原光谱的结束位置。第 vi 部分为绝对值法复原光谱相位修正部分。第 vii 部分为复原光谱辐射定标部分，复原光谱辐射定标数据存储在只读存储器 C 中，该部分利用时钟信号 clk 以及 FFT 变换单元输出的控制信号 src_sop、src_eop 产生只读存储器 C 的读地址信号 adder_H，使得从只读存储器 C 中读出的光谱辐射定标数据与相位修正后的复原光谱数据对应相乘。最后 FPGA 芯片系统顺序输出每一行复原光谱信号 spectrum 及其对应的起始位置信号 s_sop、结束位置信号 s_eop、光谱数据有效信号 s_ready 等。

图 7 中所有单元都在时钟的控制下运行，整个系统以流水线方式运行，图中的延时单元都是为控制信号的时序而设。对可见光傅里叶变换成像光谱仪，由于不需要进行非均匀性校正处理，可将只读存储器 K 中所有数据设为 1，而将只读存储器 Q 中所有数据设为 0 即可。因此文中设计的实时光谱复原芯片系统可用于红外/可见光傅里叶变换成像光谱仪实时数据处理系统。

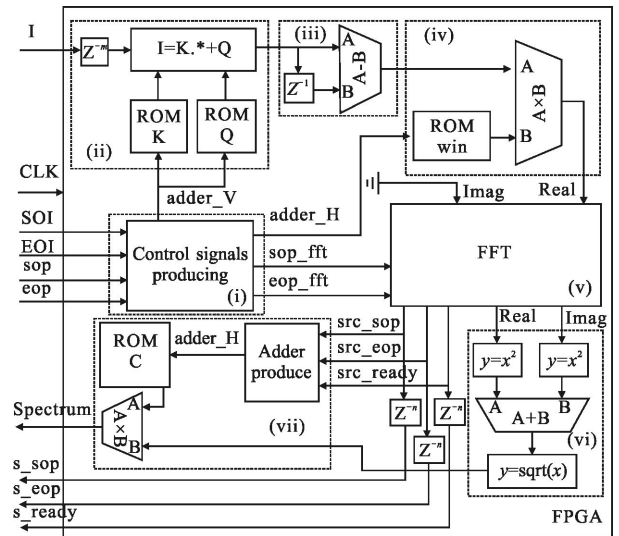


图 7 实时光谱复原芯片系统设计

Fig.7 Design of real-time spectrum recovery FPGA chip

2.2 核心功能模块的实现

(1) 控制信号产生模块的实现

根据图 6 输入信号之间的时序关系知道,SOI 信号的高电平对应着某一帧干涉图的开始位置,而随后的 EOI 高电平对应着该帧干涉图的结束位置,因此,可以设计一个计数器,对 SOI 高电平与随后的 EOI 高电平之间的时钟脉冲进行计数即可得到地址信号 *adder_V*。同样,对相邻的 *sop*、*eop* 高电平之间的时钟脉冲进行计数并经过适当的周期延迟即可得到地址信号 *adder_H*。而 *sop_fft*、*eop_fft* 可分别通过对 *sop*、*eop* 适当的信号延迟而得到。

(2) 非均匀性校正模块的实现

根据公式(1)、(2)、(4)、(5),通过定标数据求得的非均匀性校正系数 *K*、*Q* 通常为小数,为保证计算的精度,需要对校正系数进行量化处理。量化的过程是将 *K*、*Q* 的值同时乘以 210 并取整之后存入对应 ROM 中,在后面对得到的校正数据 *I_C* 进行 10 位算术右移运算。非均匀性校正框图如图 8 所示。由于从 ROM 中读取校正系数需要二个时钟周期,所以对输入数据 *I* 进行二个时钟周期的延迟,以便数据的对正。

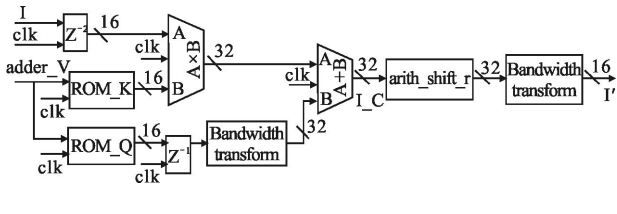


图 8 非均匀性校正设计

Fig.8 Design of non-uniformity correction

(3) FFT 模块的实现

对于 FFT 模块可利用 QuartusII 软件自带的 FFT 模块来设计,结果如图 9 所示。该模块中, *data_in* 为待进行傅里叶变换的数据,其开始位置用 *fft_sop* 高电平确定,其结束位置用 *fft_eop* 高电平确定。转换后数据分为实部 *src_real*、虚部 *src_imag* 及指数 *src_exp* 三部分输出,输出数据的起始位置对应 *src_sop* 高电平,输出数据的结束位置对应 *src_eop* 高电平, *src_valid* 高电平表示 FFT 变换输出数据有效。实际变换结果等于 $src_real * 2^{-src_exp}$ 与 $src_imag * 2^{-src_exp}$ 。

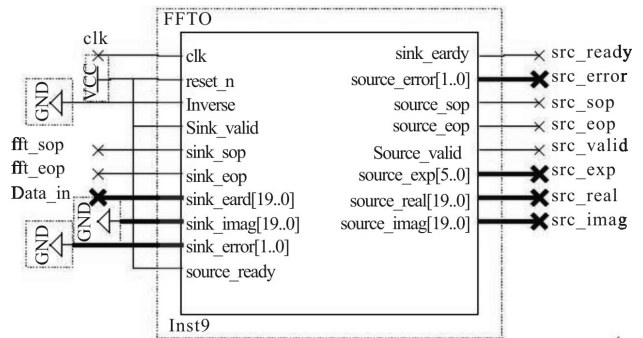
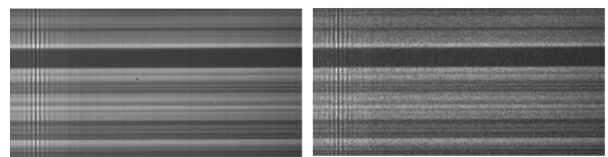


图 9 FFT 模块设计

Fig.9 Design of FFT module

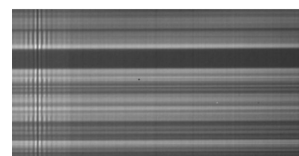
3 仿真结果

切趾函数选为矩形函数,光谱辐射定标系数设为 1,利用某风云系列气象卫星上搭载的傅里叶变换成像光谱仪获得的一帧 128×256 干涉图数据进行仿真实验,结果如图(10)~(12)所示。图 10(a)为原始干涉图像 I,图 10(b)为非均匀性干涉图像 I2(相对于 I 的非均匀性为 10.19%);图 10(c)为基于 Matlab 的非均匀性校正干涉图像 I3(相对于 I 的非均匀性为 0.93%)。图 11 为基于 QuartusII 的仿真输出。利用 QuartusII 将图 11 的仿真波形保存为 *.tbl 文件并利用 Matlab 读出数据,结果如图 12 所示。图 12(a)为第 100 行的非均匀性干涉图,图 12(b)为其非均匀性校正干涉图,图 12(c)为其复原光谱图。图 12(d)为利用 Matlab 仿真得到的其复原光谱图。比较图 12(c)与图 12(d),可以看出 QuartusII 输出的光谱图与 Matlab 仿真输出的光谱图是非常一致的。



(a) 原始干涉图 I (b) 非均匀干涉图 I2(10.19%)

(a) Original interferogram I (b) Nonuniformity interferogram I2(10.19%)



(c) 校正干涉图 I3(0.93%)

(c) Corrected interferogram I3(0.93%)

图 10 干涉图非均匀性校正结果

Fig.10 Nonuniformity correction results of interferogram

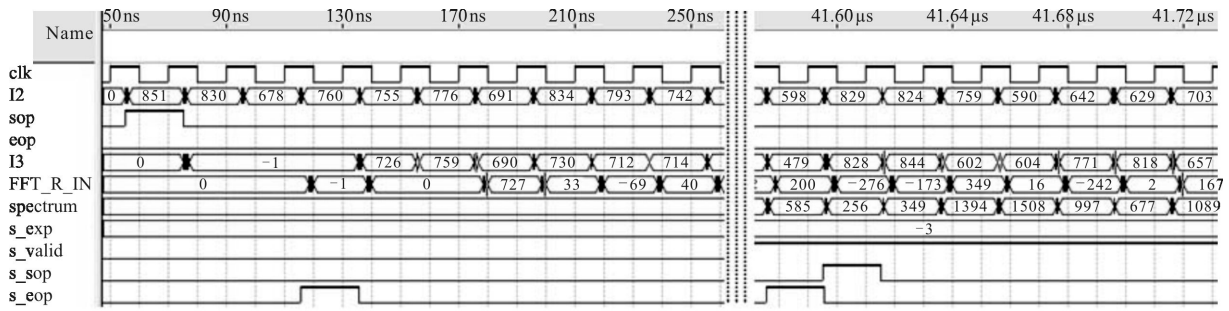


图 11 实时光谱复原 QuartusII 仿真结果

Fig.11 Simulation results of real-time spectrum recovery using QuartusII

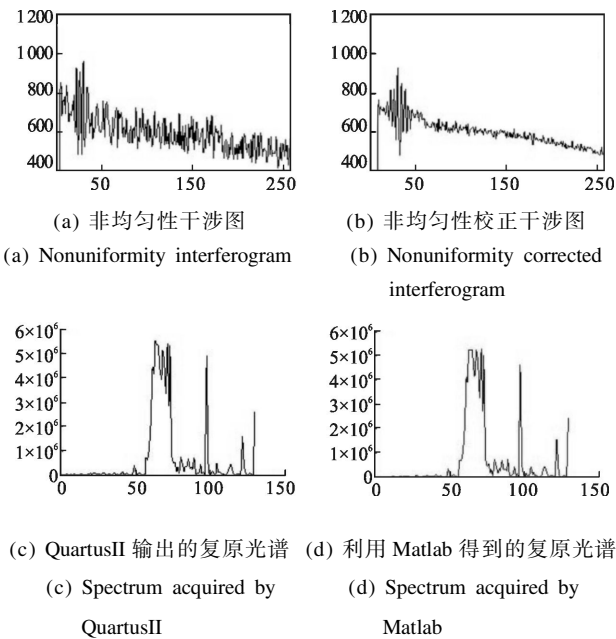


图 12 实时光谱复原图形

Fig.12 Diagram of real-time spectrum recovery

文中对 FPGA 系统的输入输出信号做了标准化设计,原则上该实时光谱复原芯片系统能够嵌入到各种类型的红外/可见光傅里叶变换光谱仪的实时数据处理系统中,其要求是光谱仪的数据采集单元输出的干涉图信号的格式要与文中 FPGA 输入的干涉图信号格式一致。这个要求对于时间调制型和空间调制型成像光谱仪比较容易做到,但对于时间空间联合调制型成像光谱仪如 LASIS 等,由于其获得的像面干涉图像是由目标场景图像叠加目标干涉图而成,需要在其数据采集单元之后增加从像面干涉图中提取出干涉图的数据处理环节。

4 结论

(1) 文中设计的傅里叶变换红外成像光谱仪实

时光谱复原 FPGA 芯片系统集成干涉图非均匀性校正、光谱复原、光谱辐射定标于一体,以流水线方式运行,能够实时输出目标的复原光谱信息。

(2) 该实时光谱复原 FPGA 芯片系统对输入信号做了标准化设计,能够较方便的嵌入到红外/可见光傅里叶变换光谱仪的实时数据处理单元中。

(3) 系统以 FPGA 芯片为载体,具有体积小、运算速度快、稳定可靠及易于现场修改等优点。

(4) 光谱仪实时光谱复原芯片的研制为基于光谱特征的目标实时识别奠定了良好的技术基础,在军事领域具有重要的现实意义。

参考文献:

[1] Liu Bin, Liu Jianzhong, Zhang Guangliang. Correlation analysis and partial least square modeling to quantify typical minerals with Chang'E-3 visible and near-infrared imaging spectrometer's ground validation data[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, 33(1): 86-94. (in Chinese)

[2] Meng Hemin, Gao Jiaobo, Zheng Yawei, et al. Long-wave infrared interferential imaging spectroscopy system based on split-type Sagnac interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 19-25. (in Chinese)

孟合民, 高教波, 郑雅卫, 等. 基于分体式 Sagnac 干涉仪的长波红外干涉成像光谱系统[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 19-25.

[3] Su Lijuan, Yuan Yan, Bin Xiangli. Spectrum reconstruction method for airborne temporally-spatially modulated Fourier transform imaging spectrometers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3720-3728.

[4] Rossi Alessandro, Diani Marco, Corsini Giovanni. Bilateral filter-based adaptive nonuniformity correction for infrared focal-plane array systems [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(5): 057003.

- [5] He Ming, Zhang Tianyi, Wang Yadi, et al. Non-uniformity correction algorithm based on wavelet transform histogram normalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 42 (12): 3481–3485. (in Chinese)
贺明, 张天一, 王亚弟, 等. 基于小波变换直方图规定的非均匀性校正算法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 42(12): 3481–3485.
- [6] Zhang Honghui, Luo Haibo, Yu Xinrong, et al. Adaptive non-uniformity correction algorithm based on multi-point correction [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (11): 3651–3654. (in Chinese)
张红辉, 罗海波, 余新荣, 等. 多点标定的自适应非均匀性校正方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3651–3654.
- [7] Yin Shimin, Ji Zhongying, Cui Yan, et al. Research on pixel response nonuniformity correction of CCD in interferential imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38 (4): 880–884. (in Chinese)
殷世民, 计忠瑛, 崔燕, 等. 干涉成像光谱仪 CCD 象元响应非均匀性校正研究 [J]. 光子学报, 2009, 38 (4): 880–884.
- [8] Yin Shimin, Ying Xiaofan, Chen Hongbo, et al. Study on nonuniformity of online calibration and correction of Fourier transform infrared imaging spectrometer [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(7): 567–572. (in Chinese)
殷世民, 应小凡, 陈洪波, 等. 傅里叶变换红外成像光谱仪非均匀性在线定标与校正研究[J]. 红外技术, 2014, 36(7): 567–572.
- [9] Zhang Peng, Zhang Zhihui, Han Shunli. The research of apodization method of Fourier transform spectrometer [C]// International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Imaging Spectrometer Technologies and Applications, Proceedings of SPIE, 2013, 8910.
- [10] Takada Kazumasa, Aoyagi Hirotsuka, Okamoto Katsunari. Correction for phase-shift deviation in a complex Fourier-transform integrated-optic spatial heterodyne spectrometer with an active phase-shift scheme [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(7): 1044–1046.
- [11] Miles A J, Wien F, Lees J G. Calibration and standardisation of synchrotron radiation and conventional circular dichroism spectrometers. Part 2: Factors affecting magnitude and wavelength [J]. *Spectroscopy –AN International Journal*, 2005, 19(1): 43–51.