

# 改进型 Mertz 法在多光谱数据重建中的应用\*

李娟, 孙秀玲, 孙海峰

(长春理工大学光电信息学院, 吉林 长春 130000)

**摘要:** 为了克服单一波长标定引入的误差, 提出了一种针对多特征波长的并行采集与特征提取方法。在多光谱数据获取过程中相位误差成因分析的基础上, 设计了一种改进型 Mertz 法; 该算法采用 DSP 中不同寄存器进行交替参数变化, 实现了对不同特征波长校正参数的调整, 抑制了零点偏移造成的相位误差。由 DSP6713、Roper 公司的高速线阵 CCD、静态干涉具、聚焦透镜组等构建了实验系统, 系统测试激光的中心波长分别是 632.0、650.0 以及 660.0 nm。最后, 将本算法的测试结果与实验数据进行了对比, 结果表明: ① 传统标定方法进行相比, 特征峰值更明显、旁瓣更小、信噪比提高; ② 相比 TENSOR-27 型光谱仪的测试数据, 噪声均值从 -30 dB 下降到了 -32 dB。

**关键词:** 多光谱处理系统; 改进型 Mertz 法; 多光谱区分; 相位标定

**中图分类号:** TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2018) 04-0104-06

## Research on improved Mertz method for application of multispectral data reconstruction

LI Juan, SUN Xiuling, SUN Haifeng

(College of Optical and Electronical Information, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

**Abstract:** In order to overcome the error introduced by single wavelength calibration, a parallel acquisition and feature extraction method is proposed for multi-feature wavelength. Based on the analysis of phase error causes, an improved Mertz method was designed for multi-spectral data acquisition. In this algorithm, the parameters in different registers of the DSP are alternated. It realizes the adjustment of the different characteristic wavelength correction parameters and suppresses the phase error caused by the zero offset. The experimental system was constructed by DSP6713, Roper's high-speed linear array CCD, static interference tool and focusing lens group. The center wavelengths of the system test laser were 632.0, 650.0 and 660.0 nm, respectively. Finally, the test results of this algorithm are compared with the experimental data. The results show that: ① Compared with the traditional calibration method, the characteristic peak is more obvious, the side lobes are smaller, and the signal-to-noise ratio is improved. ② Compared with the test data of the TENSOR-27 spectrometer, the mean of noise dropped from -30 dB to -32 dB.

**Key words:** multispectral processing system; modified Mertz method; multi-spectral discrimination; phase calibration

\* 收稿日期: 2017-04-22

基金项目: 国家自然科学基金 (61672019)

作者简介: 李娟 (1976 年生), 女; 研究方向: 数据库设计及应用、计算机网络、DSP 数据处理等;  
E-mail: lijuanuc@sina.com

光谱检测在航空航天、医药、科研等领域<sup>[1]</sup>都有广泛的应用。随着其技术的不断发展，对光谱数据处理的要求也日新月异。多光谱数据分析因能够同时完成对不同波长光谱的反演，一直是研究的热点，例如：多光谱的高速采集与处理、多光谱标定与重建等<sup>[2-5]</sup>。其中，存在多个特征峰值时如何准确地判断其波长及振幅是光谱测试的重点。

依据其工作原理，光谱探测主要分为光栅型和干涉型<sup>[6]</sup>。光栅型精度高，分光特性好，但狭缝结构的存在必然影响系统的光通量，使其在微弱光信号测试中难以应用<sup>[7-8]</sup>。干涉型主要是通过相干作用分析光谱分布，分时间型和空间型<sup>[9]</sup>。目前，常见的傅里叶型光谱测试<sup>[10]</sup>中光谱的标定与重建是采用标定波长在区间中的两个特征位置实现的<sup>[11]</sup>。对于单一特征波长的测试而言，该方法适用的，而且简单方便<sup>[12]</sup>；但存在多个特征波长时，该方法从工作原理上就存在明显的误差引入。已有的报道中多采用单一波长标定的方法，或应用 Mertz 法校正相位误差。采用单一特征波长的

测试，虽然方法简单易行、运算量小，但缺点是当存在多个特征波长时，无法同时对多个波长进行校正。本文主要针对多波长入射条件下的光谱校正与重建，提出了一种新型的多光谱数据处理算法，该算法可以在基本不改变总运算量的前提下同时对多个特征波长进行校正与重建。

## 1 系统设计

系统由光学天线、傅里叶干涉具、聚焦透镜组、CCD、DSP6713（DSP，digital signal processing）及显示单元组成<sup>[13]</sup>，如图 1 所示。测试用的半导体激光器的中心波长为 632.0、650.0 和 660.0 nm。光学天线收集待测光进入系统，通过傅里叶干涉具完成相干处理，然后由 CCD 将干涉条纹采集传输给 DSP6713，在处理系统中完成条纹滤波、抽样及分组，然后再由改进型 Mertz 法对各个特征波长的光谱数据进行校正，实现多光谱同时校正与重建。

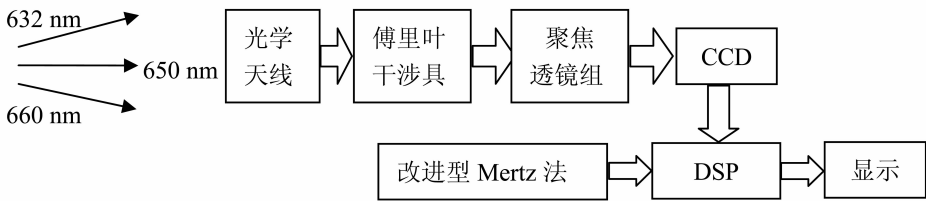


图 1 基于改进型 Mertz 法的多特征波长校正与重建系统

Fig. 1 Multi-feature wavelength correction and reconstruction system based on the improved Mertz method

线阵 CCD 采集的干涉条纹进入 DSP 后，对混合了三个特征波长的光源进行分析处理，即分别对各个特征波长的光谱进行相位校正。在本系统中采用的是静态傅里叶干涉具，属于空间干涉条纹的处理。对于不同波长的光而言，其构成的相位误差是不同的，所以本系统设计了一种改进型 Mertz 法，用于对多个特征光谱分别进行校正与重建。

## 2 高速采集模块

高速采集模块的硬件连接主要通过 TTL/LVDS 与 McBSP，LVDS/TTL 与 EMIF 实现。其中，LVDS/TTL 与 EMIF 的数据通信由 DMA 完成。因为线阵 CCD 的 Camera-Link 接口为 LVDS 信号，所以是不能与 DSP 直接通讯的。在本系统中采用 DS90CR286 实现对应的电平转换，再与 EMIF 数据总线相连完成数据通信。其中，DMA 将源地址定

义为外部存储地址。由 CCD 获取的数据可以导入虚拟存储区，再通过 DSP 的内核完成光谱数据的分析与处理。此设计不需要增加 FIFO 结构同样可以完成数据的缓冲，不需要进一步增加运行时间。因此，该种设计可以快速的完成数据处理，结构简单，速度快。

## 3 改进型 Mertz 法

对采集得到的干涉条纹进行光谱分析，可以获得其对应的光谱分布。对于傅里叶系统而言，其干涉图的光强分布为：

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) \cos(2\pi vx) dv \quad (1)$$

其中， $v$  表示波数， $x$  表示对应位置。

设某一波长位置上产生的相位误差为  $\theta_x(\sigma)$ ，则可以将不同波长对应的相位误差分别表示为

$\theta_{x_1}(\sigma)$ 、 $\theta_{x_2}(\sigma)$ 、 $\dots$ 、 $\theta_{x_i}(\sigma)$ , 则式 (1) 可表示为

$$I(t) = I_{x_1}(t) + I_{x_2}(t) + \dots + I_{x_i}(t)$$

且

$$\begin{cases} I_{x_1}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) e^{i\theta_{x_1}(\sigma)} e^{i2\pi v t} dv \\ I_{x_2}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) e^{i\theta_{x_2}(\sigma)} e^{i2\pi v t} dv \\ \dots \\ I_{x_i}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) e^{i\theta_{x_i}(\sigma)} e^{i2\pi v t} dv \end{cases} \quad (2)$$

光强分布经 Fourier 变换后, 有

$$B(v) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \cos(2\pi v x) dx \quad (3)$$

包含相位误差的光谱分布, 有

$$B'(\sigma) = \int_0^{-\frac{T}{4}} I'(t) e^{-i2\pi v t} dt \quad (4)$$

式 (1)、(2) 与 (3)、(4) 的变换就是空间干涉条纹与频域光谱的之间的转换。通过采样将干涉条纹转换成实序列, 再通过 FFT 计算得到光谱数据, 并在光谱分布重建中, 将不同相位误差的参数分别代入光谱函数中即可。

Mertz 法常用于频谱相位校正。在单波长相位校正中, 用 Mertz 法对线性相位误差进行校正很实用。但, 对多特征波长并不适合直接使用 Mertz 法。本文在传统 Mertz 法基础上, 通过采用 DSP 中的不同寄存器进行交替参数变化, 设计了一种改进型 Mertz 法, 以实现针对不同波长校正参数的调整。算法采用相同运算规则对特征波长进行处理, 但在波长变换时采用多寄存器流水操作, 调制运算参数, 实现对不同波长的分类处理的。改进型 Mertz 法的运行时间与传统方法基本一致, 其流程如图 2 所示。

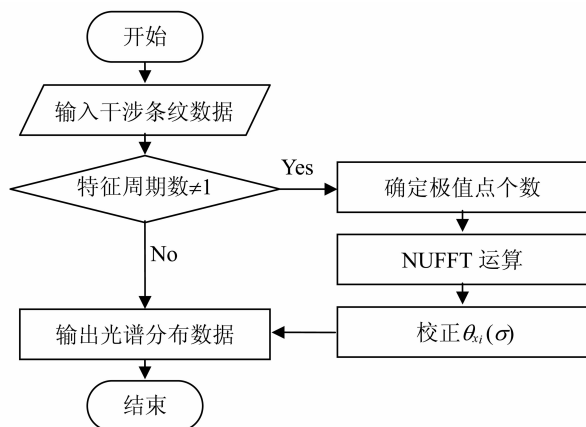


图 2 改进型 Mertz 法程序流程图

Fig. 2 Program flow chart of modified Mertz method

改进型 Mertz 算法具体步骤如下:

1) 对所有数据点循环检测, 寻找干涉条纹数据中的极值点, 根据特征周期数分析特征波长个数, 然后设定极值点个数;

2) 以每个极值点为 midpoint 进 NUFFT 行运算, 由此可以得到其对应的实部  $\text{Re}(\sigma)$  和虚部  $\text{Im}(\sigma)$ , 则其相位误差为:

$$\theta(\sigma) = \arctg \frac{\text{Im}(\sigma)}{\text{Re}(\sigma)} \quad (5)$$

3) 对所有干涉数据进行插值补零处理, 从而得到校正后相位误差  $\theta_i(\sigma)$ 。计算其光谱:

$$B(\sigma) = \text{Re}[B'(\sigma)] \cos[\theta_i(\sigma)] + \text{Im}[B'(\sigma)] \sin[\theta_i(\sigma)] \quad (6)$$

采用本算法可以有效地抑制由于零点偏移造成的相位误差, 即不同波长在同一干涉系统中产生的误差。由此可见, 算法实现了多个波长同时存在条件下的分别处理, 提高了系统光谱的可分性。从运行速度上看, 本算法需两次 FFT、一次插值运算和两次乘法运算。与传统算法相比, 在不增加运算时间的前提下, 本算法抑制了多波长光谱重建中的误差。

## 4 实验

实验采用基于 DSP6713 的处理系统, 以及 Roper 公司 CoolSNAPMYO 型 CCD 作为传感器件, 光谱范围为 400 ~ 1 000 nm, 像元数为 1 940 (1 460, 单个像元尺寸为 4.54  $\mu\text{m}$  × 4.54  $\mu\text{m}$ )。待测激光选用 GYL@632 nm、GYL@650 nm 和 GYL@660 nm 型激光器, 对比用光谱仪选用 Bruker 公司 Tensor-27 型光谱仪。

### 4.1 干涉条纹滤波

因为本文设计的多光谱测试系统针对的是脉冲激光信号, 并非连续光信号, 所以 CCD 采集的图像中会每隔一定时间有背景光噪声出现。相比待测光源而言, 这些背景光是缓变信号, 也就是实验环境下的背景光, 在本系统中采用低频滤波的形式消除。与此同时, 干涉条纹图中还存在频率较高的散斑噪声<sup>[14-15]</sup>, 而条纹信号相比散斑噪声频率较低, 故可采用低通滤波消除, 即只保留一定范围的低频分量, 滤掉其中的高频分量。实验分别对未加滤波算法和加入滤波算法的干涉条纹图像进行了对比, 结果如图 3 所示。在本系统中采用了抽样平均滤波的方法, 对干涉条纹数据先进行抽样提取再平均, 抽样间隔依据各特征波长的时间周期设定, 当对每个特征波长数据均遍历抽取及平均后, 获得滤波后

的效果。如图 3 (b) 所示, 滤波后干涉条纹中噪声减小。

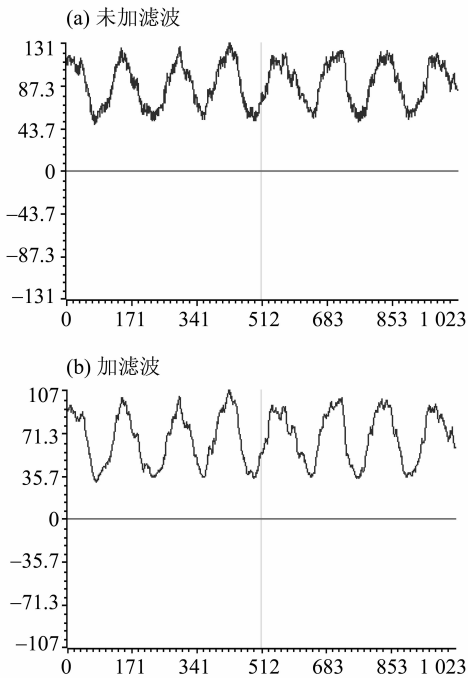


图3 未加滤波与加滤波的光谱图对比

Fig. 3 Spectral contrast of unfiltered and filtered

## 4.2 光谱校正与重建

为了实现对多光谱的快速校正与重建, 同时用三个中心波长不同的激光器入射系统 (@ 632.0、@ 650.0 和 @ 660.0 nm), 然后在 CCD 上得到三组波长混叠在一起的干涉条纹。再利用上文中提到的分周期提取方法完成数据的采样, 然后用不同的相位补偿参数分别对不同特征波长的干涉条纹进行校正, 从而可以得到其相应的光谱分布, 如图 4 (b) 所示。而, 未校正直接进行光谱反演的光谱分布如图 4 (a) 所示。

对比图 4 (a) 和图 4 (b) 可以看出, 未校正的光谱分布图虽可以看到三个特征波长位置, 但其峰值半宽大、旁瓣噪声明显, 光谱可区分度较低。尤其是当两个特征波长的中心位置较近时, 主峰更是难以分辨。相比之下, 光谱分布数据经过校正后, 每个特征波长光谱振幅的绝对值虽然略有降低, 但其锐度提高, 旁瓣噪声的降幅更大, 即其信噪比提高了、且光谱可区度增大。实验还采用布鲁克公司 TENSOR-27 型光谱仪对同一组光学信号进行了处理, 其测试结果如图 5 所示。

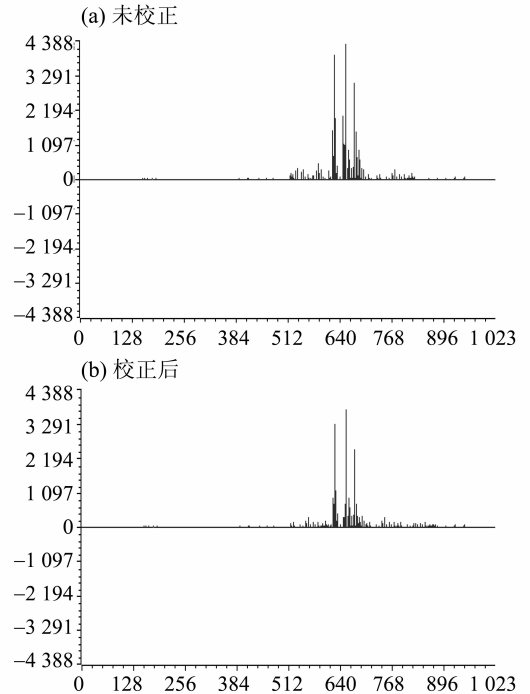


图4 未校正与校正后的测试结果对比

Fig. 4 Comparison of uncorrected and corrected test results

将校正后的数据与光谱仪测试数据进行对比可知, 经校正后的光谱分布图与 TENSOR-27 型光谱仪的测试结果基本一致, 三个不同中心波长的特征峰都十分明显。在 632.0 nm 处, 本系统的测试结果为 632.3 nm, 光谱仪的测试结果为 632.10 nm; 在 650.0 nm 处, 本系统的测试结果为 649.7 nm, 光谱仪的测试结果为 650.24 nm; 在 660.0 nm 处, 本系统的测试结果为 660.8 nm, 光谱仪的测试结果为 660.47 nm, 平均误差都在 1.0 nm 以内。同时, 两者都具有很好的光谱区分能力, 本系统的噪声集中在  $-30 \sim -34$  dB 的范围 (均值为  $-32$  dB), 而 TENSOR-27 型光谱仪得到的光谱分布噪声响应集中在  $-28 \sim -32$  dB 范围 (均值为  $-30$  dB), 可见本系统测试得到的旁瓣噪声也优于 TENSOR-27 型光谱仪。这说明本系统符合多光谱快速校正及重建的设计要求。如果以相同硬件在不采用本算法的条件下仅对单特征波长测试, 则其平均误差小于 1.0 nm, 但当同时存在多个特征波长时, 不采用本算法的测试平均误差为 2.4 nm。因此, 本算法的引入可以大幅提高多波长同时测试条件下的光谱数据重建的准确度, 提高系统测试精度。

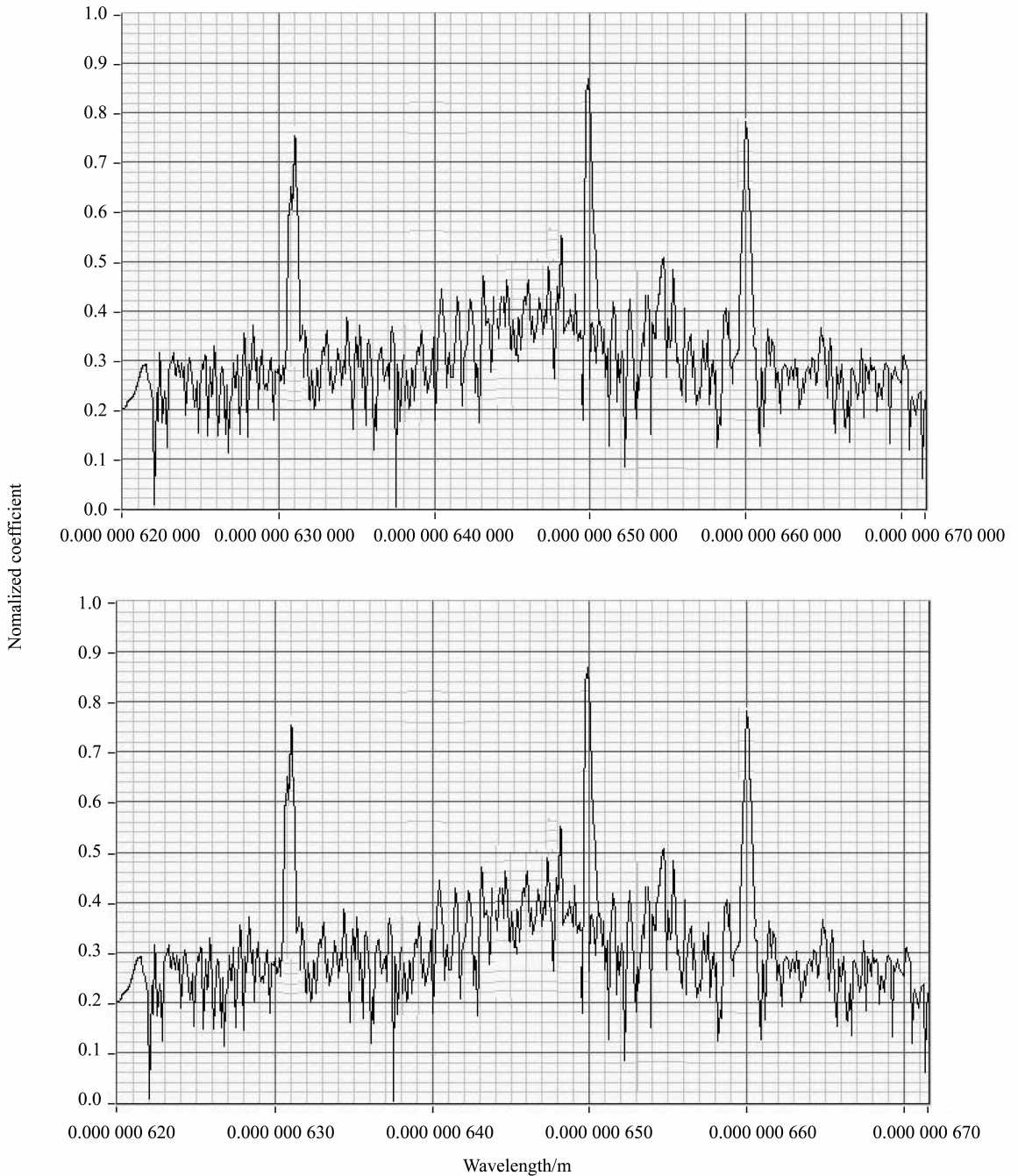


图 5 TENSOR-27 型光谱仪的测试数据

Fig. 5 Test data of the TENSOR-27 spectrometer

## 5 结 论

针对传统光谱分析算法中多特征波长同时反演时存在误差的问题, 本文提出了一种改进型的 Mertz 法。该算法利用不同中心波长具有不同干涉条纹周期的特性, 将不同特征波长的数据组分别进

行相位校正, 从而提高光谱分布反演的准确度。对三个中心波长不同的激光同时入射系统进行光谱反演, 结果显示: 经本算法得到的光谱分布特征峰信噪比高、噪声平均强度低、且处理速度较快。因此, 本设计算法是可行的, 提高了在多特征波长条件下系统测试精度。

## 参考文献:

- [1] 周志娟, 张玉贵, 樊奔. 基于 FPGA 的干涉信号双 ADC 采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 12(4): 123-128.  
ZHOU Z J, ZHANG Y G, XIAO B. Design of interference signal double ADC acquisition system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 12(4): 123-128.
- [2] 王明艳, 王志斌, 张记龙, 等. 基于 DSP 的弹光调制干涉干涉数据的实时处理系统[J]. 光电子技术, 2013, 33(1): 41-44.  
WANG M Y, WANG Z B, ZHANG J L, et al. DSP based real time processing system for photoelastic modulator interferometer data [J]. Optoelectronic Technology, 2013, 33(1): 41-44.
- [3] 贺刚, 柏鹏, 彭卫东, 等. 一种基于 IP 核通信系统中滑动相关捕获算法的 FPGA 实现[J]. 江西师范大学学报(自然科学版), 2011, 35(2): 151-154.  
HE G, BO P, PENG W D, et al. The design and realization for slip correlation capture algorithmic of a sort of communication systems based on FPGA IP core[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science Edition), 2011, 35(2): 151-154.
- [4] TAKADA K. 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.
- [5] 郭文记, 曾晓茹, 赵宝玮, 等. 高光谱 RX 异常检测的多 DSP 并行化处理技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1383-1387.  
GUO W J, ZENG X R, ZHAO B W, et al. Design of interference signal double ADC acquisition system based on FPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 34(5): 1383-1387.
- [6] 戴军, 唐湘成, 高志峰. 海空背景下红外图像处理系统设计及实现[J]. 红外技术, 2016, 38(2): 121-125.  
DAI J, TANG X C, GAO Z F. Design and implementation of an infrared image processing system under sea and sky background[J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 121-125.
- [7] 李婵, 万晓霞, 谢伟, 等. 多通道光谱采集系统滤光片设计方法研究[J]. 应用光学, 2016, 37(5): 639-643.  
LI C, WAN X X, XIE W, et al. Color filter design method for multi-channel spectral acquisition system[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(5): 639-643.
- [8] ROSSI A, DIANI M, CORSINI G. Bilateral filter-based adaptive non-uniformity correction for infrared focal-plane array systems[J]. Optical Engineering, 2010, 49(5): 057003.
- [9] 王伟, 陆亦怀, 陆钊, 等. 基于 DSP 的傅里叶变换红外光谱仪动镜控制系统设计[J]. 量子电子学报, 2015, 32(1): 8-16  
WANG W, LU Y H, LU F, et al. Design of moving mirror control system of Fourier transform infrared spectrometer based on DSP[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2015, 32(1): 8-16.
- [10] 张多利, 沈休奎, 宋宇鲲, 等. 基于异构多核可编程系统的大点 FFT 卷积设计与实现[J]. 电子技术应用, 2017, 43(3): 16-20.  
ZHANG D L, SHEN X L, SONG Y K, et al. Design and implementation of large FFT convolution on heterogeneous multicore programmable system[J]. Application of Electronic Technique, 2017, 43(3): 16-20.
- [11] 常丽, 李健强. 基于 CCD 和 FPGA 的光栅位移测量系统[J]. 仪表技术与传感器, 2010(5): 103-105.  
CHANG L, LI J Q. Grating displacement measurement system based on CCD and FPGA[J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(5): 103-105.
- [12] 李珊, 陈媛媛, 王志斌, 等. 弹光调制傅里叶变换光谱仪中数据通信[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(10): 2821-2825.  
LI S, CHEN Y Y, WANG Z B, et al. Data communication in photo-elastic modulation Fourier transform spectrometer[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(10): 2821-2825.
- [13] 余福荣, 罗海波, 胡宇, 等. 基于 DSP 处理系统的多路数据传输方法与实现[J]. 电子技术应用, 2014, 40(4): 25-28.  
YU F R, LUO H B, HU Y, et al. The method and implementation of multi-channel data transmission based on DSP processing systems[J]. Application of Electronic Technique, 2014, 40(4): 25-28.
- [14] 伏思华, 于起峰. 数字散斑条纹图的滤波方法[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 5-8.  
FU S H, YU Q F. Filtering methods of the digital speckle fringe pattern[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(4): 5-8.
- [15] 刘利力, 舒宁, 龚衍, 等. 基于梯度的干涉条纹图圆周期滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学), 2005, 30(8): 1-5.  
LIU L L, SHU N, HONG Y, et al. Gradient weighted periodic median algorithm for filtering interferogram noise [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(8): 1-5.