

文章编号:1001-9014(2007)04-0274-05

基于FPGA的干涉式成像光谱仪实时 数据处理系统研究

殷世民^{1,2}, 相里斌¹, 周锦松¹, 黄旻¹

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068;

2. 中国人民解放军空军试验训练基地一区, 甘肃 酒泉 735018)

摘要:根据干涉式光谱仪系统数据处理技术,研究了一种基于大容量高速现场可编程门阵列(FPGA:Field Programmable Gate Array)器件的干涉式成像光谱仪实时数据处理片上系统,它将干涉图采集和光谱复原集成在一个FPGA芯片内,可实时完成干涉图采集和光谱复原处理,具有体积小、运算速度快以及稳定可靠等优点,为成像光谱仪对目标的实时探测和识别等应用奠定了良好的技术基础。

关键词:成像光谱仪;干涉图采集;光谱复原;实时数据处理

中图分类号:TN731 **文献标识码:**A

REAL-TIME DATA PROCESSING OF INTERFERENTIAL IMAGING SPECTROMETER BASED ON FPGA

YIN Shi-Min^{1,2}, XIANGLI Bin¹, ZHOU Jin-Song¹, HUANG Min¹

(1. Xi'an Institute of Optics & Precision Mechanics, The Academy of Sciences of China, Xi'an 710068, China;

2. First Field of Trial and Training Air Base of the Chinese People's Liberation Army, Jiu Quan 735018, China)

Abstract: Based on the data processing technologies of interferential spectrometer, a sort of real-time data processing system on chip of interferential imaging spectrometer was studied based on large capacitance and high speed field programmable gate array (FPGA) device. The system integrates both interferogram sampling and spectrum rebuilding on a single chip of FPGA and makes them being accomplished in real-time with advantages such as small cubage, fast speed and high reliability. It establishes a good technical foundation in the applications of imaging spectrometer on target detection and recognition in real-time.

Key words: imaging spectrometer; interferogram sampling; spectrum rebuilding; data processing in real-time

引言

成像光谱技术^[1]是一类新型的多维信息获取技术,它能够获得被探测目标的空间信息和光谱信息,在航天航空遥感^[2]、工农业、生物医药、物质分析与分类、环境与灾害监测^[3]、大气探测以及军事应用等领域具有非常广泛的应用。

干涉型成像光谱仪是依据傅里叶变换光谱学原理^[4],通过采集景物目标的干涉图像,由干涉图像抽取目标上所有采样点的点干涉数据,对点干涉数据进行傅里叶变换得到该点的光谱信息,它具有多通道、高通量和精度高等优点。

目前,由于成像光谱仪获取的信息量非常大,成像光谱仪系统一般都是将实时获取的干涉图信息进行压缩存储,后期再对之进行复原处理。这种工作方式固然有其优点,但对军事侦查等实时应用场合显得过于迟缓,如能将干涉图采集和光谱复原处理实时化,就可以即时获得目标的光谱特征从而为基于光谱的目标实时探测和识别等应用场合奠定良好基础,对民用和军用都具有非常重要的现实意义。

基于这种思想,本文研究了一种基于现场可编程门阵列(FPGA:Field programmable Gate Array)的干涉式成像光谱仪实时数据处理片上系统,它将干涉图采集和光谱复原集成在一个FPGA芯片内,可

收稿日期:2006-08-08,修回日期:2007-01-29

基金项目:国家自然科学基金(60532070)资助项目

作者简介:殷世民(1968-),男,河南罗山人,博士后,主要从事光电信号处理及成像光谱仪等方面的研究工作。

Received date: 2006-08-08, revised date: 2007-01-29

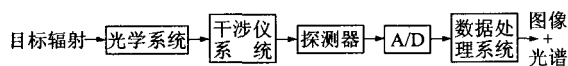


图1 干涉式成像光谱仪基本原理

Fig.1 Interferential imaging spectrometer principle

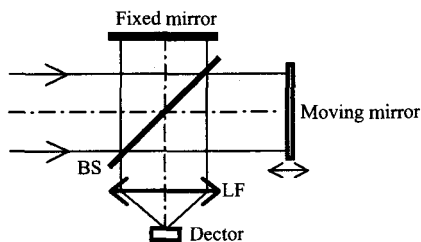


图2 迈克尔逊干涉仪原理

Fig.2 Michelson interferometer principle

实时完成干涉图采集和光谱复原处理,具有体积小、运算速度快和稳定可靠等优点。

1 系统数据处理技术研究

干涉式成像光谱仪基本原理如图1所示。目标辐射经光学系统入射到干涉仪系统,干涉仪获得目标干涉图信号并将之成像在探测器上,模数转换器 A/D 将探测器输出的目标干涉图信号转换成数字信号送入光谱仪数据处理系统以获得目标的图像和光谱数据。

通常,由于成像光谱仪获得的信息量很大,光谱仪数据处理系统一般都是采取先将干涉图数据进行压缩存储,之后再利用计算机等对之进行光谱复原的事后处理方式。为了使成像光谱仪能有效适应目标实时探测和识别等军用和民用应用场合,本文目标为研究利用目前大容量高速 FPGA 器件研制干涉式成像光谱仪实时数据处理系统的技术。

图2所示为迈克尔逊干涉仪基本原理,下面通过对迈克尔逊干涉仪产生干涉图的定量分析来简单阐述干涉式光谱仪系统的数据处理技术。

如图2所示,设有一束振幅为 a 、波数为 ν 的理想准直单色光束入射到理想分束板 BS 上,分束板振幅反射率为 r 、透射率为 t ,它使入射光束分束为振幅为 ra 的反射光束和振幅为 ta 的透射光束。这两束光束经固定镜 (Fixed mirror) 和动镜 (Moving mirror) 反射后返回到分束板 BS 形成两束相干光束,其中一束返回光源,另一束沿与入射方向垂直的方向传输并在成像平面 LF 上成像,此时成像平面信号振幅为

$$A_i = rta(1 + e^{-i2\pi\nu x}) \quad (1)$$

信号强度为

$$I(x, \nu) = 2RTB_0(\nu) + 2RTB_0(\nu)\cos(2\pi x\nu) \quad (2)$$

式(2)中, $R = r^2$ 、 $T = t^2$ 是分束板的反射率和透射率, $B_0(\nu) = aa^*$ 是入射光束强度, x 是来自固定镜和动镜反射光束间的光程差。像面上信号由直流分量和交流分量组成,因为交流分量反映了输入光谱的特征,故忽略直流成份定义干涉图 (interferogram) 为

$$I(x, \nu) = 2RTB_0(\nu)\cos(2\pi x\nu) = B(\nu)\cos(2\pi x\nu) \quad (3)$$

式(3)是理想状态下单色光的干涉图, $B(\nu)$ 是修正后的光源强度,它是光源频率的函数。

对输入辐射具有任意的光谱分布,假定单色辐射的线宽为 $d\nu$,此时式(3)可改写为

$$dI(x, \nu) = B(\nu)\cos(2\pi x\nu)d\nu \quad (4)$$

对式(4)在所有波数范围内积分得

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu)\cos(2\pi x\nu)d\nu \quad (5)$$

一般地,我们假设光谱图为一偶函数,即 $B(-\nu) = B(\nu)$,考虑到在理想干涉情况下,干涉图也是一个偶函数,式(5)可改写为

$$I(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\nu)e^{i2\pi x\nu}d\nu = FT[B(\nu)] \quad (6)$$

式(6)中 FT 表示傅里叶积分变换。于是可得到光谱图的表达式,它是干涉图的傅里叶逆变换

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x)e^{-i2\pi x\nu}dx = FT^{-1}[I(x)] \quad (7)$$

式(7)中 $B(\nu)$ 即为复原光谱。

工程中由于极大光程差 L 的限制,利用式(7)计算复原光谱 $B(\nu)$ 时,实际上计算的是

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{x}{2L}\right)I(x)e^{-i2\pi x\nu}dx \quad (8)$$

式(8)中 $\text{rect}(x/2L) = 1(|x| \leq L)$ 为一矩形截短函数,其作用是截取区间 $-L$ 到 L 范围内的干涉图。

由于矩形截短函数的影响,导致干涉图在极大光程差处出现尖锐的不连续性,使得变换光谱在极大波数范围内的“微扰”。工程上,常用一个渐变权重函数来乘干涉图,以缓和这种不连续性。该渐变权重函数被称为切趾函数,这一抑制旁瓣微扰的做法通常被称作切趾^[5],常用的切趾函数一般有三角形函数、高斯函数等。

通常复原光谱由式(8)表示的双边加窗傅里叶变换获得,但为了节省测量及计算时间,常采用单边干涉图进行积分变换,即

$$B(\nu) = \int_0^L A(x)e^{-i2\pi x\nu}dx \quad (9)$$

式(9)中 $A(x)$ 为切趾函数. 从该式可知, 计算复原光谱时必须要知道零光程差的准确位置, 否则得到的复原光谱将是失真的畸变光谱, 这种由原点误差引起的复原光谱误差可以用一相位项 $e^{i\varphi(v)}$ 来表示, 因而被称为相位误差. 实际工程中, 干涉图难于正巧从 $x = 0$ 的原点开始读出、干涉仪两臂的垂直误差、光束准直性误差、分束板的吸收与损耗、探测器光谱响应的非均匀性、电子线路误差以及采样过程中的晃动、步距不均等原因都会导致干涉图的不对称和相位误差.

相位修正的方法主要有绝对值法、乘法及卷积法等, 在此仅介绍比较适于硬件设计的绝对值法^[6], 以便于本系统的硬件设计.

非对称干涉图的傅里叶变换表达式如下

$$I_D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} B(v) \exp[i\varphi(v)] \exp[i2\pi xv] dv \quad (10)$$

式中 $B(v)$ 为真实光谱, $I_D(x)$ 为非对称干涉图的实函数, $\varphi(v)$ 为相位因子, 于是有

$$\begin{aligned} & B(v) \exp[i\varphi(v)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} I_D(x) \exp(-i2\pi xv) dx \\ &= B_r(v) + iB_i(v) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $B_r(v)$ 、 $B_i(v)$ 分别为干涉图 $I_D(x)$ 的傅里叶变换的实部、虚部. 对上式取绝对值, 则可得到校正后的真实光谱为

$$|B(v)| = \sqrt{B_r^2(v) + B_i^2(v)} \quad (12)$$

从以上分析可以看出, 光谱复原主要由干涉图去直流、切趾、傅里叶变换和相位修正等几个主要步骤完成.

2 系统 FPGA 实现

2.1 系统 FPGA 实现原理

根据以上分析, 我们利用 Altera 公司大容量高速 FPGA 器件^[7] 设计了干涉式成像光谱仪实时光谱复原片上系统, 其原理框图如图 3 所示. 图中虚线框 I 部分为系统的控制核心, 它根据外部输入的复位信号、时钟信号以及其他诸如行、场同步信号等产生 A/D 变换所需的控制信号 controls 以控制 A/D 对干涉图模拟信号的采集过程, 并根据 A/D 反馈给它的转换结束数据准备好信号 ready 产生双口 RAM 的写地址计数信号 wraddress 将 A/D 转换好的干涉图数字信号存入 RAM 中, 同时将写地址计数信号 wraddress 延迟 n 个时间单位作为 RAM 的读地址计数信号 rdaddress 将 RAM 中的数据由 dataout1

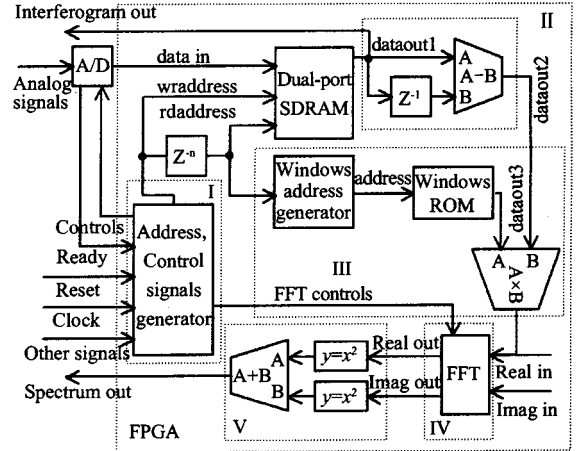


图 3 系统 FPGA 实现原理框图
Fig. 3 System realization principle with FPGA

读出. dataout 1 信号馈入虚线框 II 差分去直流部分得到干涉图的交流成分 dataout 2. 虚线框 III 为切趾部分, 它根据 rdaddress 信号产生 ROM 的读地址信号 address 将 ROM 中存储的切趾窗函数数据由 dataout 3 读出并与 dataout 2 信号相乘得到 Real in 信号而完成切趾过程. 虚线框 IV 为 FFT 部分, 它根据控制核心 I 送来的变换控制信号 FFT controls 将切趾部分馈入的 Real in 信号进行快速傅里叶变换, 变换后数据的实部由 Real out 输出、虚部由 Imag out 输出. 虚线框 V 为相位修正部分, 它根据相位修正的绝对值法将 Real out、Imag out 信号进行平方相加得到经过相位修正处理的光谱信号 Spectrum out. 由于乘法和开方会占用较多硬件资源, 为提高系统性价比, 本文相位校正简化为由 FFT 变换输出数据的实部与虚部绝对值相加的方法得到复原光谱, 这样, 虽然复原光谱的幅度有所变化, 但谱线位置不会变化. 当然, 为了得到准确的复原光谱, 亦可采用 FFT 变换输出数据的实部与虚部平方相加的方法.

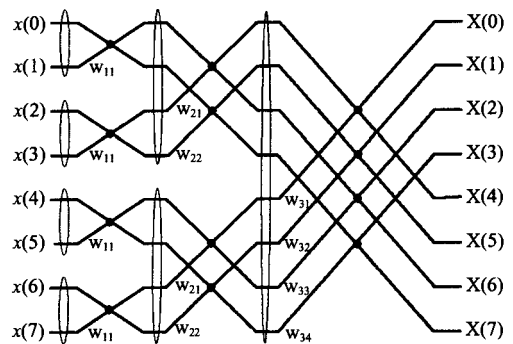


图 4 FFT 运算流程图
Fig. 4 FFT computation diagram

2.2 核心功能模块 FFT 的实现

长度为 N (以 $N=8$ 为例) 的基 2FFT 运算流程图如图 4 所示。

从图 4 可以看出,长度为 $N=8$ 的基 2FFT 共分为三级:第一级分为 $N/2$ 组运算,每组的旋转因子都相同,为 w_{11} ;第二级分为 $N/2^2$ 组运算,每组的旋转因子都相同,为 w_{21}, w_{22} ;第三级分为 $N/2^3$ 组运算,每组的旋转因子都相同,为 $w_{31}, w_{32}, w_{33}, w_{34}$. 由于 FPGA 内部资源有限,对 FFT 运算不能采用图 4 所示的并行结构,只能采用数据流结构,对每级的各组顺次计算,每级每次仅有一个蝶形运算进行. 为此,本文设计了图 5 所示乒乓结构的 FFT 运算模

块,在保证 FFT 具有较快处理速度的同时,有效节约了 FPGA 内部资源。

图 5 中,在时钟信号 $clock$ 及地址信号 $ad[k..0]$ 等的驱动下,首先将 FFT 某一级的输入数据 $dataIn$ 的前半部分顺次存储在双口 RAM0 中,随后,再从 RAM0 中顺次读出前半部分数据 q_1 与对应的 $dataIn$ 的后半部分数据 q_2 同时送到蝶形运算器 Butterfly 中进行运算. Butterfly 输出的上半部分数据 q_3 顺次输出到多路选择器 MUX 的 $x1$ 口,同时 Butterfly 输出的下半部分数据 q_4 顺次存储在双口 RAM1 中并继 Butterfly 的上半部分数据输出后紧接着输出到多路选择器 MUX 的 $x0$ 口. MUX 在时钟 $clock$ 和最

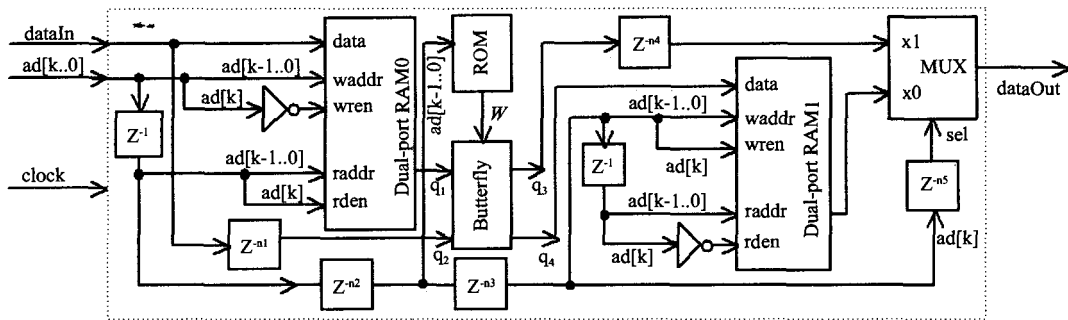


图 5 FFT 某一级运算结构
Fig. 5 Operation structure of one stage of FFT

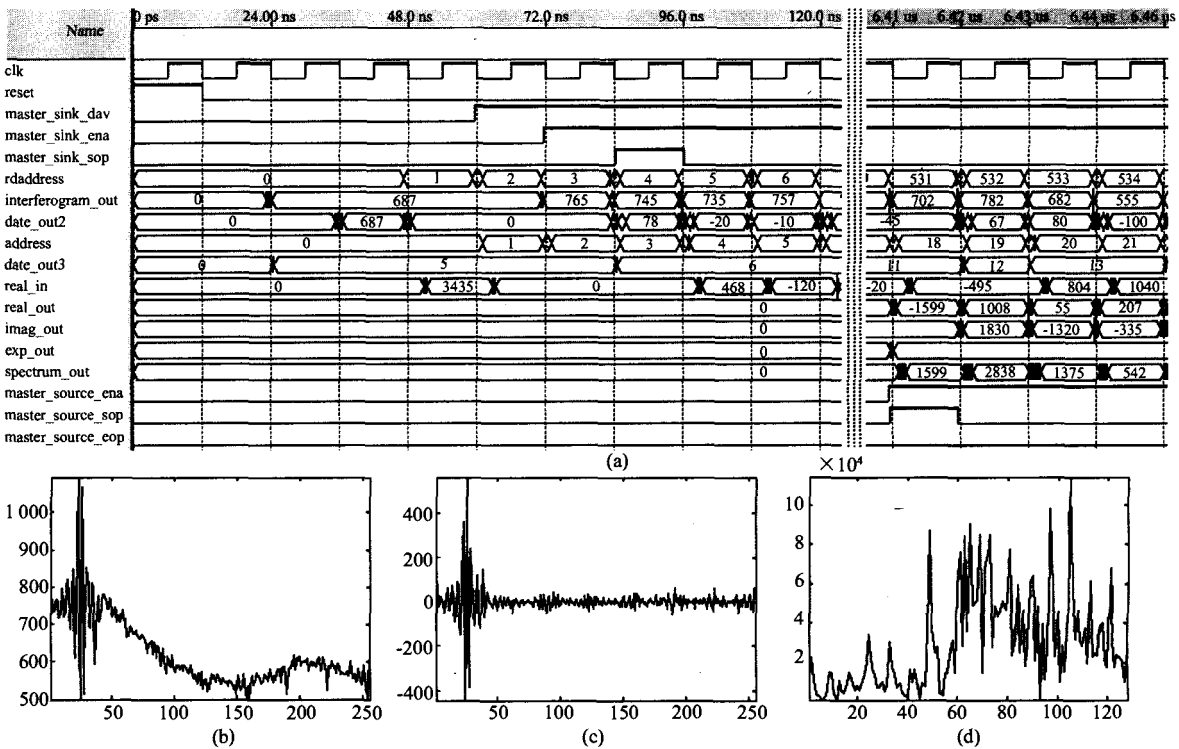


图 6 FPGA 系统实现仿真结果 (a) FPGA 系统实现仿真波形 (b) 干涉图信号 (c) 去直流干涉图信号 (d) 复原光谱信号
Fig. 6 Simulation results of FPGA system (a) simulation waveform of FPGA realization (b) interferogram signal (c) wipe off direct current signal of interferogram (d) rebuilding spectrum signal

高位地址信号 $ad[k]$ 的驱动下,将 Butterfly 输出的上半部分数据和下半部分数据顺次由 dataOut 输出.这样,在 RAM0 写入数据时,RAM1 读出数据;而在 RAM0 读出数据时,RAM1 写入数据,整个结构类似于一个乒乓开关来完成输入数据流到输出数据流的蝶形运算.整个 FFT 运算由这样相同的结构级联而成.考虑到复数运算情形,Butterfly 设计为四引擎结构.实现时还应考虑到倒序、数据量化及数据带宽等复杂问题.

3 仿真结果及结论

利用 Altera 公司 FPGA 设计软件 QuartusII5.1,选用 Stratix II 系列高速器件 EP2S30F484C3,切趾函数选为高斯函数,根据实际获得的干涉图数据进行仿真实验,结果如图 6 所示.图 6(a)为仿真波形,在系统复位后控制单元产生 master_sink_dav 信号给 FFT 变换单元表示外部数据准备好,FFT 变换单元接到该信号后置位 master_sink_ena 信号表示有能力接收数据,随后控制单元产生 256 计数脉冲 master_sink_sop 给 FFT 变换单元表示 256 点傅里叶变换输入数据 real_in 的开始和结束.傅里叶变换完成后,FFT 变换单元置位 master_source_ena 信号表示数据输出开始,同时输出 master_source_sop 和 master_source_eop 计数脉冲分别表示 256 点傅里叶变换输出数据 real_out 和 imag_out 的开始和结束.系统以数据流的方式连续运行,光谱数据在复位后大约 $6\mu\text{s}$ 开始连续输出,仿真表明系统运行时钟频率可达 112MHz,相应于 1024×1024 的干涉图像其帧采样频率可达 106Hz,而对于 512×256 的干涉图像其帧采样频率可达 854Hz.图 6(b)为 6(a)中第一个 256 点干涉图信号 interferogram_out 的图形显示,图 6(c)为其去直流后的干涉图信号 data_out2,图 6(d)为该干涉图信号的复原光谱 Spectrum out.

根据以上数据分析及仿真结果可得如下结论:

(1) 利用大容量高速 FPGA 器件设计干涉式成像光谱仪实时数据处理片上系统是行之有效的,其

性能可有效满足目前成像光谱仪的工程使用要求,并具有体积小、运算速度快、稳定可靠及易于现场修改等优点.

(2) 本文设计的基于 FPGA 的干涉式成像光谱仪实时数据处理片上系统适用于时间调制和空间调制的干涉式光谱仪系统,对于时间-空间联合调制的干涉式光谱仪系统如 LASIS 等由于其获得的像面干涉图像由目标场景图像叠加目标干涉图像而成,需要增加从像面干涉图像提取出干涉图的硬件处理环节.

(3) 光谱仪实时数据处理系统的研制成功为基于光谱特征的目标探测和识别等实时应用场合奠定了良好的技术基础,对民用和军用都具有重要的现实意义.

REFERENCES

- [1] Porter W M, Enmark H T. A system overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer [J]. *SPIE*, 1987, **834**:166—174.
- [2] ZHANG Yong, GU Xing-Fa, YU Tao, *et al.* Radiometric cross-calibration of cbers-02 irmss thermal channel. *J. Infrared Millim. Waves* (张勇, 顾行发, 余涛, 等. 中巴地球资源卫星热红外通道的交叉辐射定标. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(4): 261—266.
- [3] ZHANG Xiao-Hua, ZHANG Ren-Cheng, GONG Xue, *et al.* Detection and estimation of early fires' process character by using infrared spectrum [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (张晓华, 张认成, 龚雪, 等. 火灾早期过程特征的红外光谱探测和诊断. *红外与毫米波学报*), 2006, **25**(5): 382—385.
- [4] Persky M J. A review of spaceborne infrared fourier transform spectrometers for remote sensing [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**: 4763—4797
- [5] XIANGLI Bing. Study on the fourier transform imaging spectrometry. Post-doctoral final report. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS (相里斌. 干涉成像光谱技术研究. 博士后研究工作总结报告. 西安:中国科学院西安光机所), 1995. 8 ~ 1997. 8.
- [6] Connes J. Recherches sur la spectroscopie par transformation de Fourier [J]. *Rev. Opt.*, 1961, **40**: 40—45.
- [7] REN Ai-Feng, CHU Xiu-Qin. *Embedded System Design Based on FPGA* [M]. Xi'an: XIDIAN University Press (任爱锋, 初秀琴. 基于 FPGA 的嵌入式系统设计. 西安:西安电子科技大学出版社), 2004:41—126.