

基于 AOTF 的近红外成像系统研究

李 晓^{1,2}, 师艺杰¹, 宋雁鹏^{1,2}, 刘 顺^{1,2}, 张 惠¹

(1. 中北大学 计算机与控制工程学院, 山西 太原 030051; 2. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051)

摘 要:以声光可调谐滤光器(AOTF)作为分光器件,采用 FPA-640×512 InGaAs 焦平面阵列探测器作为光学敏感接收器件,设计了近红外成像系统。该系统由 AOTF 光路模块、射频驱动源模块及阵列探测器成像模块 3 大部分组成。首先介绍了 AOTF 的工作原理,并根据该原理设计了高频信号发生电路和功率放大电路,用来驱动 AOTF 衍射出不同波长的光波;以现场可编程门阵列(FPGA)作为核心处理单元的探测器成像模块,在接收到来自射频驱动同步接口电路的上升沿信号后,产生探测器正常工作所需时序,最终通过数据采集存储实现图像复原。搭建了近红外成像系统,实验表明,在 0.9~1.7 μm 近红外波段范围内系统成像质量清晰,具有较高的应用价值。

关键词:成像系统;焦平面阵列探测器;声光可调谐滤光器(AOTF);近红外;同步

中图分类号:TN216

文献标识码:A

Study on Near-infrared Imaging System Based on AOTF

LI Xiao^{1,2}, SHI Yijie¹, SONG Yanpeng^{1,2}, LIU Shun^{1,2}, ZHANG Hui¹

(1. School of Computer and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shanxi Research Center of Opto-electronic Information and Instrument Engineering Technology, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An near-infrared imaging system was designed by using the acousto-optic tunable filter (AOTF) as the spectroscopic devices and FPA-640×512 InGaAs focal plane array detector as the sensitive optical receiving device. The system consists of three parts including of a radio frequency driving source module, AOTF optical module and array detector imaging module. First, the operating principle of AOTF was introduced, and the high frequency signal generating circuit and power amplifier for driving AOTF to diffract different light wavelength were designed based on the principle. The detector imaging module used FPGA as the core processing unit, received the rising edge signal from the RF driven synchronous interface circuit, then generated the time sequence for detectors to work, finally restored the image through the data acquisition and storage module. The near-infrared imaging system was set up. The experimental results showed that the image quality was very clear in the near infrared wavelength range of 0.9~1.7 μm, which has a high application value.

Key words: imaging system; focal plane array detector; acousto-optic tunable filter (AOTF); near-infrared; synchronization

0 引言

传统的光栅、棱镜光谱成像系统虽然在高光谱甚至超光谱领域具有很大优势,但其光谱响应固定不变,不能满足对目标探测的多光谱响应的需求。与之相比,声光可调谐滤光器(AOTF)成像光谱仪光谱扫描速度快,光谱范围宽,入射角孔径及视场角大,可实现波长任意、快速选择,在多光谱成像领域具有广泛的应用前景^[1-4]。

目前,美国对 AOTF 光谱成像技术的研究一直走在世界前沿。21 世纪初,美国将高光谱 AOTF 成像系统应用于农业系统,其探测范围为 0.45~0.9 μm,光谱分辨率为 3~5 nm^[5]。国内对 AOTF 的研究起步较晚,且大多数是将 AOTF 应用于非成像光谱探测方面,对于 AOTF 光谱成像技术的研究近几年才开始。2013 年,刘济帆等^[6]设计了一款光谱范围 0.5~0.9 μm,光谱分辨率 3~8 nm 的

收稿日期:2016-06-12

基金项目:国际科技合作基金资助项目(2013DFR10150);国家自然科学基金仪器专项基金资助项目(61127015)

作者简介:李晓(1972-),女,山西运城人,副教授,主要从事光电信息检测、电气控制等方面的研究。E-mail:379851822@qq.com;lixiaoydx@163.com

AOTF 成像系统;2015年,刘康等^[7]设计的 AOTF 成像光谱仪探测范围为 $0.55\sim 1.00\ \mu\text{m}$,在 $632\ \text{nm}$ 处光谱分辨率可达 $2.6\ \text{nm}$,并将其应用于同色异谱目标鉴别中。国内上述系统大多应用于可见光波段,对于近红外成像系统的研究还较少见。本文将 AOTF 与非制冷焦平面阵列探测器相结合对近红外多光谱成像技术进行了研究。该系统能实现光谱的快速扫描与快速切换,对于光谱成像的进一步研究具有重要意义。

1 系统结构和 AOTF 分光原理

1.1 系统结构

图 1 为成像系统结构,主要包括 AOTF 模块、射频驱动模块、探测器模块及信号采集与处理模块^[8-10]。

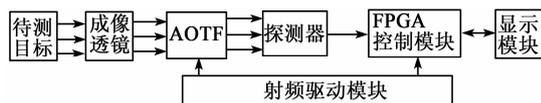


图 1 成像系统结构

被测目标反射的光信号经过成像透镜后准直入射到 AOTF 通光面上,在 AOTF 内部与超声波信号发生相互作用产生衍射光,衍射光信号经过探测器与后续信号处理系统最终在上位机实现图像复原。

1.2 AOTF 分光原理

以氧化碲 (TeO_2) 晶体为材料的非共线型 AOTF 具有来源广泛,结构简单,视场角大,衍射光和非衍射光易分离等优点,常被用于光谱检测与光谱成像。非共线型 AOTF 基于反常布喇格衍射原理,射频驱动源产生的高频信号加载在压电换能器上时,会转换为高频振荡的超声波,并以一定的入射角 θ_a (θ_a 为超声波入射角) 在声光介质 TeO_2 中传播,同时另一束复色光以一定的入射角 θ_i 准直入射到声光晶体中,超声波信号与入射光信号相互作用,对 TeO_2 的折射率和应变产生周期性调制,从而使光的偏振状态发生改变。

当满足反常布喇格衍射条件时,在 TeO_2 通光面上会有三束光出现,其中一束光为沿着入射光方向的未衍射光,即 0 级光;另外两束光为衍射出的 ± 1 级光,此处要获得成像效果,所用的即为衍射光,图 2 为 AOTF 结构^[11-13]。

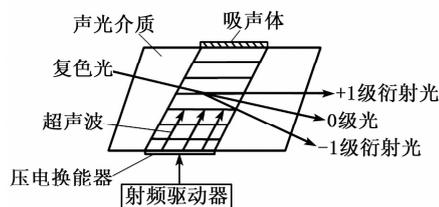


图 2 AOTF 结构图

当发生反常布喇格衍射时,入射光波矢量 k_i 与衍射光波矢量 k_d 的关系^[10-12]为

$$k_d = k_i \pm k \quad (1)$$

式中: $|k_d| = \frac{2\pi n_d}{\lambda}$, $|k_i| = \frac{2\pi n_i}{\lambda}$, $|k| = \frac{2\pi f}{v_a}$, n_i 为入射光折射率, n_d 为衍射光的折射率, λ 为真空光波长, f 为超声波频率, v_a 为超声波传播速度。

图 3 为入射光与衍射光的三角矢量图。图中, θ_i 为复色光入射角, θ_d 为衍射角。

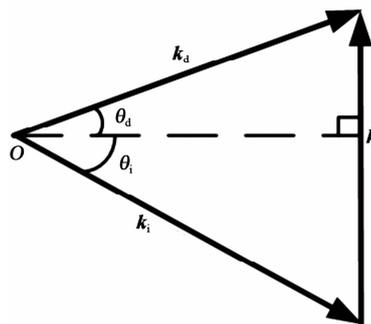


图 3 反常布喇格衍射动量匹配矢量图

在反常布喇格衍射中,衍射光的偏振方向与入射光不同, $n_i \neq n_d$, 因此 $k_d \neq k_i$ 。由图 3 可知,根据余弦定理可得出 θ_d 与 θ_i 之间的关系,即狄克逊 (Dixon) 方程^[12,14-15]为

$$\sin \theta_i = \frac{\lambda}{2n_i(\theta_i)v_a} \left\{ f + \frac{v_a^2}{\lambda^2 f} [n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d)] \right\} \quad (2)$$

$$\sin \theta_d = \frac{\lambda}{2n_d(\theta_d)v_a} \left\{ f - \frac{v_a^2}{\lambda^2 f} [n_i^2(\theta_i) - n_d^2(\theta_d)] \right\} \quad (3)$$

n_i 与 n_d 分别是 θ_i 与 θ_d 的函数,当确定了某声光介质 TeO_2 的折射率随角度变换关系后,即可得出 θ_d-f 及 θ_i-f 的关系,从而确定反常布喇格衍射的几何关系,为获得最大效率的衍射提供依据。

由式(1)及反常布喇格衍射动量匹配矢量关系可得衍射光的波长与超声波频率满足^[10-12]:

$$f(\lambda) = \frac{v_a [n_i^2 + n_d^2 - 2n_i n_d \cos(\theta_i - \theta_d)]^{\frac{1}{2}}}{\lambda} \quad (4)$$

由式(2)可看出,当 n_i 和 n_d 、 θ_i 和 θ_d 确定后,衍射波波长仅受超声波频率的影响,而超声波频率由射频驱动源频率决定。因此,本系统通过改变射频驱动源频率改变衍射光的波长,以获得不同波长下的近红外图像。

2 射频驱动模块

要得到较为清晰的成像效果,探测器需要接收到足够强的红外光谱,这就要求 AOTF 具有较高衍射效率,而 AOTF 衍射效率又与射频驱动源的能量输出有关,这就对射频驱动源的带宽及功率输出提出了一定的要求。系统选用美国 Brimrose 公司的近红外 AOTF,其波长范围覆盖 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 。根据该 AOTF 性能参数,设计的射频驱动源如图 4 所示,其性能的好坏可根据 AOTF 衍射效率的高低来衡量。



图 4 射频驱动源结构图

AOTF 所需信号由信号发生电路与功率放大电路两部分组成,其中信号发生电路采用频率合成的方法,即通过直接数字频率合成器(DDS)产生。上位机向单片机下达指令后,单片机产生所需要的频率控制字发送到 DDS 中;同时,DDS 接收外部时钟信号,经内部锁相环倍频到 1 GHz 后使得 DDS 正常工作,通过改变频率控制字即可控制 DDS 输出不同频率的正弦信号。由于 DDS 输出信号频谱还存在很多杂散,经低通椭圆滤波器(LPF)滤除杂波后得到较平滑的信号,信号大小约为 -5 dBm 。

LPF 滤波后的信号传递给功率放大电路进行功率放大,由于 AOTF 所需信号为 35 dBm 左右的高频信号,需采用两级级联方式,其级联增益为 40 dB ;第一级选用高线性、低噪声功放管,其输出增益为 22 dB ,末级选用高效率 N 沟道增强型 MOSFET。由于功放管的输入输出阻抗是随频率变化的非线性复杂函数,故需要在两级之间加入阻抗匹配网络,从而减少能量反射,使得信号能以最大功率传输。经调试后,驱动源在带宽范围内平稳度小于 $\pm 1.6 \text{ dBm}$,AOTF 衍射效率大于 70% ,满足系统要求。

3 探测器成像模块

系统采用 FPA- $640 \times 512 \text{ InGaAs}$ 非制冷型焦

平面阵列探测器接收 AOTF 产生的近红外信号^[16]。与线阵探测器相比,它具有更大的感光面,像元规模为 640×512 个像素点,像元间距为 $25 \mu\text{m}$,最大像素率为 10 MHz ,光谱响应范围为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$,其高的分辨率、采样速率及精度等优点可提高系统的成像质量。

设计选用 Altera 公司的 EP1C6Q240C8 型现场可编程门阵列(FPGA)作为核心处理单元,产生探测器正常工作所需时序逻辑信号,控制探测器将光信号转换为电信号,同时控制 A/D 进行微弱电信号的快速采集与处理,采集到的数据缓存至外扩的静态随机存储器(SRAM),最终经过 USB 传输到上位机,上位机通过 LabVIEW 实现图像复原,系统结构如图 5 所示。由于 FPGA 产生信号为 3.3 V 的 TTL 电平,探测器时序驱动和 A/D 的时钟输入为 5 V 的 CMOS 电平,设计了电平转换电路实现了 3.3 V 和 5 V 的相互转换。电源采用 5 V 直流输入,通过两片低压稳压芯片产生 3.3 V 和 1.5 V 的稳定电压,供给系统各部分所需电压。此外,为了控制探测器根据需要进行图像采集,避免资源浪费,设计了射频驱动同步接口电路。由于篇幅限制,本文重点介绍射频驱动同步模块和探测器驱动控制模块的软硬件设计。

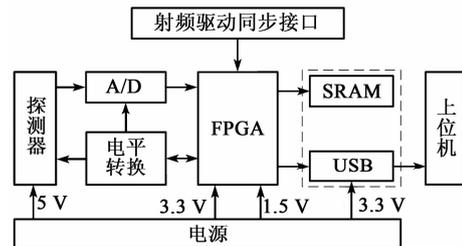


图 5 信号采集系统结构图

3.1 成像模块硬件电路设计

3.1.1 探测器外围电路设计

探测器为 28 个引脚的面阵探测器,共有 4 路输出,通过配置其内部寄存器设置为 OUTA 单路输出模式。其所需的时序逻辑信号由 FPGA 提供,即 RESET_B、CLK、LSYNC、FSYNC、DATA 和 FIELD 引脚与 FPGA 相连,获取复位、时钟、行信号、帧信号、工作模式以及探测器的有效范围等时序信号。 V_{OUTREF} 为 1.6 V 输出参考电压; V_{REF} 为探测器内部放大器工作电压,其电压范围是 $2.2 \sim 3.2 \text{ V}$;探测器基准电压为 $2.7 \sim 5.5 \text{ V}$,接入

V_{DETCOM} 引脚,在实际调试中分别通过精密电位器来调整到最佳工作状态。图 6 为电路设计图。

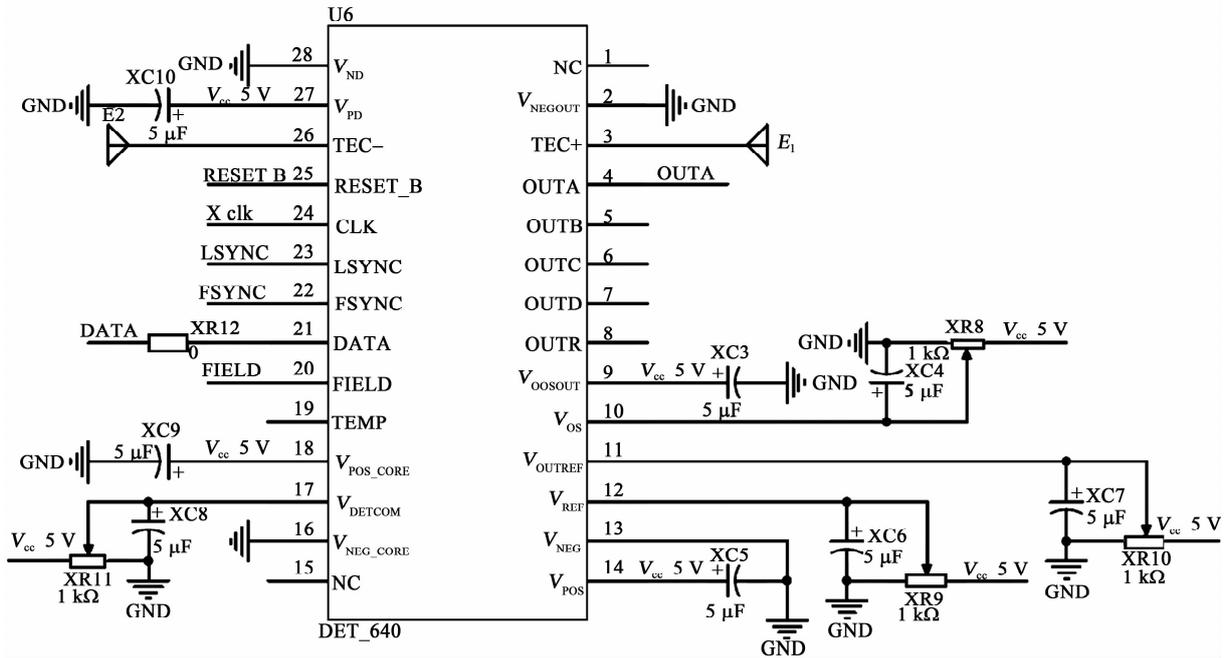


图 6 探测器外围电路

3.1.2 射频驱动同步接口电路设计

设计中,利用射频驱动同步接口电路来控制探测器开始工作的时间。如图 7 所示,P1、P2、P3、P4 是 4 个射频驱动同步接口,FLAG1、FLAG2、FLAG3、FLAG4 为相应波长的射频驱动同步信号,实验时,利用 4 根射频线将 FPGA 与 AOTF 驱动控制系统相连,使 FPGA 根据 AOTF 控制系统的指令进行图像采集。

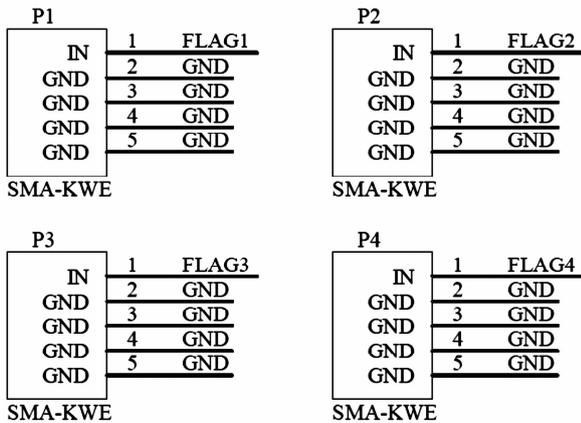


图 7 射频驱动同步接口电路图

3.2 成像模块软件程序设计

3.2.1 探测器时序控制设计

为实现对探测器的窗口大小、扫描方式、输出模式的灵活控制,设计中将探测器通过 FPGA 设置为

控制状态工作模式。将探测器设置为单路输出、非隔行顺序扫描方式、窗口大小为 640×512 。探测器采集的每一帧图像中,共有 516 个数据行,其中前 3 行为无效数据行,最后一行为测试行,每行间共有 640 个有效数据。其读出一帧的时间 T_{frame} 为

$$T_{\text{frame}} = (M+3) \cdot T_{\text{line}} + 1\text{CLK} \quad (5)$$

$$T_{\text{line}} = T_{\text{analog}} + T_{\text{active}} + T_{\text{dead}} \quad (6)$$

式中: M 为有效数据行数; T_{line} 为行时间; T_{analog} 为模拟设置时间; T_{active} 为有源像素输出时间; T_{dead} 为死区时间; CLK 为时钟周期。

由于探测器工作在单路输出模式,所以 $T_{\text{active}} = 640/2\text{CLK}$ 。根据探测器手册知, $T_{\text{analog}} = 13\text{CLK}$, $T_{\text{dead}} = 3\text{CLK}$,代入式(5)、(6)中可得系统读出一帧所需时间为 173 377 CLK。探测器工作时序仿真如图 8 所示。

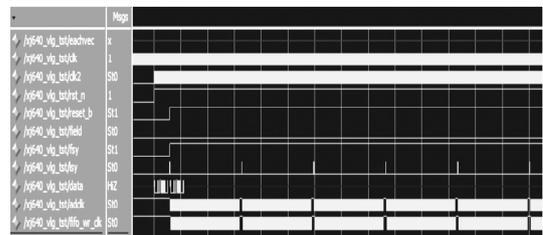


图 8 探测器时序仿真

FPGA 在进行数据处理的同时不断检测帧信号,若检测到帧起始信号,则开始将图像数据缓存到

SRAM 中,以免数据丢失,经过一帧所需时间后缓存完毕,等待下一次数据缓存,并由 FPGA 控制 USB 将缓存的图像数据发送到上位机进行显示。

3.2.2 射频驱动同步模块设计

AOTF 驱动控制系统发出的射频驱动同步信号,用于控制探测器工作^[17-18]。将 AOTF 驱动控制器接入 FPGA 控制模块,选取 900~1 700 nm 波段,以 10 nm 为单位,每隔 0.5 s 发射一次射频驱动同步信号。当 FPGA 检测到该同步信号上升沿时,探测器即采集一幅图像,并通过上位机 LabVIEW 软件显示图像;若未检测到该信号上升沿,FPGA 不向探测器发送时序信号,探测器不工作,并向上位机发送数字 0。FPGA 控制程序流程图如图 9 所示。

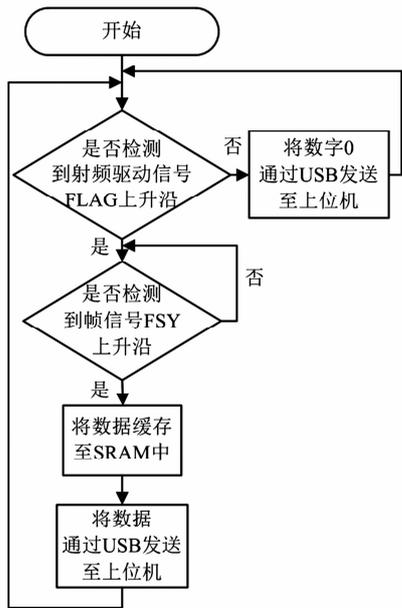


图 9 射频驱动同步模块控制流程图

4 实验验证

搭建的近红外成像系统(见图 10)对室外环境进行成像实验。



图 10 近红外成像实验装置

物体反射的光经前置透镜准直入射到 AOTF 中,同时给 AOTF 施加一定频率的驱动信号使 AOTF 发生衍射,衍射光经后置透镜被探测器接收后转换为电信号,送到 FPGA 控制电路中进行采集和处理,最终通过 USB 将图像数据发送到上位机进行显示。利用该实验装置对室外进行成像实验,通过射频驱动源控制衍射波波长,探测范围为 900~1 700 nm,选取其中几个波长进行观察。图 11 分别为 960 nm、1 166 nm、1 410 nm、1 554 nm 的成像效果图。

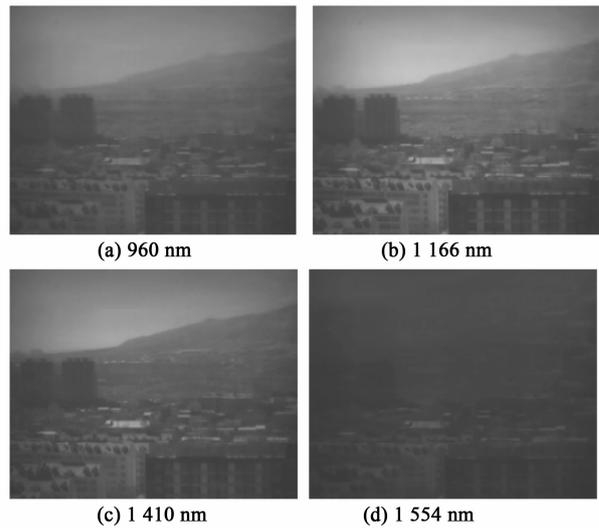


图 11 近红外成像效果图

由图 11 可知,由于不同物体对不同波长的光具有不同的反射率,造成不同波长下成像效果的差异。在 1 166 nm 处,各种地物对该波长的光的反射率较高;其图像辨识度也较高,在 1 410 nm 处,各种地物对该波长的光的反射率相对较低,故其图像较难辨识。

5 结束语

本文通过对 AOTF 的工作原理进行分析,将 AOTF 与近红外焦平面探测器相结合应用到近红外多光谱成像领域。根据 AOTF 设计了相应的射频驱动器,分析并设计了探测器外围电路、信号采集和处理电路,最终搭建了近红外成像实验装置。经实验验证,在近红外波段 900~1 700 nm 内,系统采样率为 3.28 Msps,可获得 10 帧/s 的图像数据,且成像较清晰,可辨识出不同的物体。该系统具有较好的成像效果,且结构简单、操作方便,对于 AOTF 成像光谱仪的研究具有重要的参考价值。

参考文献:

- [1] PUSTOVOIT V I, POZHAR V E, MAZUR M M, et al. Double-AOTF spectral imaging system[J]. SPIE, 2005, 5953: 5953-5953.
- [2] GUPTA N, SUHRE D R, GOTTLIEB M. Long-wave infrared spectral imager with an 8 cm^{-1} passband acousto-optic tunable filter[J]. Optical Engineering, 2005, 44(9): 094601.
- [3] GUPTA N. Acoustooptic tunable filter based spectropolarimetric imagers for medical diagnostic applications instrument design point of view[J]. Journal of Biomedical Optics, 2005, 10(5): 051802.
- [4] 陈海燕, 王艳奎, 赵松庆, 等. 半实物仿真红外干扰弹运动特性模拟方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016(6): 69-71.
- [5] INOUE Y, PENUELAS J. An AOTF-based hyperspectral imaging system for field use in ecophysiological and agricultural applications[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18): 3883-3888.
- [6] 刘济帆, 马艳华, 张雷, 等. 基于 AOTF 的新型成像光谱系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 43(11): 3065-3069.
LIU Jifan, MA Yanhua, ZHANG Lei, et al. New hyperspectral imaging system based on AOTF[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 43(11): 3065-3069.
- [7] 刘康, 高志帆, 吴琼水, 等. 基于 AOTF 的成像光谱仪及其在同色异谱目标鉴别中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 1134-1137.
LIU Kang, GAO Zhifan, WU Qiongshui, et al. AOTF-based imaging spectrometer and its applications in the identification of metameric targets [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(4): 1134-1137.
- [8] SUZUKI T, KUROSAKI H, ENKYO S, et al. Application of an AOTF imaging spectro-polarimeter[J]. SPIE, 1997, 3121: 356-365.
- [9] NEELAM G. Development of spectropolarimetric imagers from 400 to 1 700 nm [J]. SPIE, 2014, 9099: 9099N.
- [10] NEELAM G. Acousto-optic tunable filters for infrared imaging[J]. SPIE, 2005: 5953-5959.
- [11] 俞宽新, 丁晓红, 庞兆光. 声光原理与声光器件[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [12] 张春光, 王号, 邱怡申. 440~800 nm 非共线声光可调滤波器设计及其性能分析[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2011, 27(6): 44-48.
ZHANG Chunguang, WANG Hao, QIU Yishen. The design of 440~800 nm noncollinear acousto-optic tunable filter and the character analysis[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2011, 27(6): 44-48.
- [13] GEORGIEV G, GLENAR D A, HILLMAN J J. Spectral characterization of acousto-optic filters used in imaging spectroscopy[J]. Applied Optics, 2002, 41(1): 209-217.
- [14] DIXON R W. Acoustic diffraction of light in anisotropic media[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1967, 3(2): 85-93.
- [15] 张春光. 基于超光谱成像系统的声光可调谐滤波技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [16] 赵慧洁, 刘小康, 张颖. 声光可调谐滤波成像光谱仪的 CCD 成像电子学系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1291-1296.
ZHAO Huijie, LIU Xiaokang, ZHANG Ying. CCD imaging electrical system of AOTF imaging spectrometer [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1291-1296.
- [17] 汪建元, 陈松岩, 李成. Si 基多层 Ge 量子点近红外光电探测器研制[J]. 传感技术学报, 2015, 28(5): 660-664.
WANG Jianyuan, CHEN Songyan, LI Cheng. The development of multilayer Ge based Si quantum dots near infrared photodetector[J]. Journal of Sensing Technology, 2015, 28(5): 660-664.
- [18] 张航, 刘栋斌, 李帅, 等. InGaAs 探测器总剂量辐照性能实验分析[J]. 传感器学报, 2015, 28(1): 19-22.
ZHANG Hang, LIU Dongbin, LI Shuai, et al. Experimental analysis of total dose irradiation performance of InGaAs detector[J]. Journal of Sensing Technology, 2015, 28(1): 19-22.