

# 无线激光图像传输收发电路的设计与实现

刘 杰<sup>1,2</sup>, 陈 涛<sup>1</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 董 磊<sup>1</sup>, 阴玉梅<sup>1</sup>, 乔 兵<sup>1</sup>

(1.中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2.中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 设计并实现了激光发射与接收电路模块, 每个模块主要由激光收发电路、数据处理器、存储器和视频转换电路等 4 部分组成, 具有体积小、使用灵活的特点。重点介绍了 622 Mbit/s 高速激光收发电路的设计。研究并实现了对视频数据流的时序控制, 如有效图像数据的提取与重新组合、存储等, 采用曼彻斯特编码保证了激光信号接收与时钟恢复的稳定。在使用一组简易光学天线的情况下, 理论通信距离大于 6 km, 并成功地完成了距离大于 100 m 的实验。结果表明: 该系统可以稳定地传输图像, 适合地面短距离高速接入等应用, 为进一步研究无线激光通信技术提供了实验平台。

**关键词:** 无线激光通信; 图像传输; 高速激光收发; 曼彻斯特编码; FPGA

中图分类号: TN929.12 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2009)06-1008-06

## Design and implementation of transmitting and receiving circuits in image transmission of wireless laser

LIU Jie<sup>1,2</sup>, CHEN Tao<sup>1</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, DONG Lei<sup>1</sup>, YIN Yu-mei<sup>1</sup>, QIAO Bing<sup>1</sup>

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2.Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Laser transmitting and receiving circuit modules mainly consisting of laser transmitting/receiving circuit, data processor, memory and video invert circuit, were designed and implemented. The modules are small in dimension and flexible in usage. The design of 622 Mbit/s high speed laser transmitting/receiving circuit was mainly studied. The control on video data flow such as the extraction, reconstruction and storage of effective image data was researched and realized. Moreover, Manchester code was employed to guarantee the stability of signal receiving and clock data recovery (CDR). A theoretical communication distance of more than 6 km was obtained with a pair of simple optical antennas. Experiments under distance of more than 100 m were conducted successfully. Results show that the transmission system designed in this paper is able to transmit and receive image data stably and suitable for high speed access application on the ground. It also provides an experimental platform for further research on wireless laser communication.

**Key words:** Wireless laser communication; Image transmission; High speed laser transmitting & receiving; Manchester code; FPGA

收稿日期: 2009-02-27; 修订日期: 2009-04-17

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2008AA8080502)

作者简介: 刘杰(1985-), 男, 江苏连云港人, 硕士生, 主要从事自由空间激光通信技术方面的研究。Email: jijieliu@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 陈涛(1965-), 男, 内蒙古赤峰人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电精密跟踪测量技术的研究。Email: chent@ciomp.ac.cn

王建立(1971-), 男, 山东曲阜人, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像光电望远镜总体技术方面的研究。Email: wangjianli@ciomp.ac.cn

## 0 引言

无线激光通信是以激光作为信息载体,以大气作为传输信道的一种新型通信手段,具有传输速率高、传输带宽大等优点,主要应用于空间通信、地面近距离快速接入等场合。

随着技术的不断进步,数据量传输需求变得更加庞大,如视频和高分辨率图像等。这使得传统的微波传输方式在如深空探测等很多领域,已经不能满足通信需求。作为下一代的新型通信方式,无线激光通信将成为解决这类应用的主要手段之一。

国外在研究无线激光通信方面起步较早,并且已经完成了许多空间通信实验,正在向实用化和工程化转变<sup>[1]</sup>。国内研究主要还处于理论分析和小型实验验证阶段。在学习和借鉴国内外前人研究的基础上,文中设计了一套以FPGA为数据处理核心的激光通信图像传输电路系统,将图像采集和输出、数据存储和处理以及激光高速收发等功能集中在单块电路板上,具有高度的独立性,体积小并且使用方便,实现数据的高速传输的同时,也为进一步研究适合的无线激光通信协议和信道编码等技术提供了基础。

## 1 系统组成

传输系统分别由发送和接收模块组成,信号传输流程图如图1所示。发送模块由AD转换、FPGA、SRAM、并串转换、激光驱动器、激光二极管以及光学天线等7部分组成。接收模块的工作流程与发送模块相反,由光学天线、光电二极管、互阻放大器、限幅放大器、串并转换芯片、FPGA、SRAM和DA转换等8部分组成。此系统的激光二极管和光电二极管均为适

用于自由空间通信的TO Window封装,给下一步光学天线的重新设计与安装带来了方便。

## 2 系统实现

### 2.1 发送模块

发送端传送的数据为标准PAL视频信号,经过AD转换芯片SAA7113转换,输出8 bit并行数据和27 MHz时钟。每帧图像为625行,每行1 728 B,其中有效数据为576行,每个有效数据行中有效图像数据为1 440 B,总的有效图像数据量为810 kB。

数据进入FPGA后,由FPGA截取一帧完整的图像,去掉行场消隐和控制数据,将有效的图像数据存入片外SRAM。所采用的SRAM容量为1 MB,由前文所述可知满足一帧图像的存储需求。仅传输有效图像数据的另一个优势为避免了控制数据在传输过程中发生错误最终导致图像的误差或者不稳定。完成上述工作后即开始发送过程。根据8 B/10 B编码在光纤通信中的功能,产生足够的边沿跳变,消除直流分量,得到稳定的恢复时钟,另外,为易于边界检测和观察波形,以降低数据速率为代价,采用了Manchester编码的方式将SRAM中的图像数据发送出去<sup>[2]</sup>。

采用了专用并串转换芯片,这样在得到高速串行数据流的同时既避免了使用带高速SERDES功能的高成本FPGA,又减少了高速电路板设计的难度,提高了系统的可靠性。并串转换将8 bit 77.76 Mbit/s的并行数据串化为622 Mbit/s的差分信号后送入激光器驱动器。

针对文中选择的激光二极管设计了简易的透镜组作为光学天线,将出射光束的发散角压缩到1.5 mrad左右,大大提高了通信距离,因此而损失的光功率为3 mW。

### 2.2 激光器调制及驱动

MAX3668是一款622 Mbit/s并且带有自动功率控制(APC)的SDH/SONET专用激光二极管(LD)驱动芯片,最高可以支持80 mA的偏置电流和75 mA的调制电流。综合功率、速率及大气传输等要求,采用了JDSU公司生产的适用于自由空间激光通信的LD5410。该二极管工作波长为处于大气窗口内的850 nm,最大连续输出功率可以达到100 mW,阈值电流35 mA,工作电流160 mA,发散角 $90^{\circ} \times 30^{\circ}$ ,理

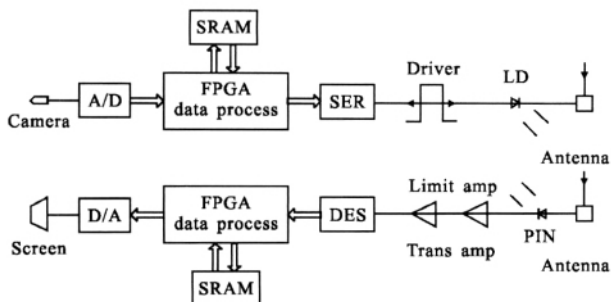


图1 系统框图

Fig.1 Block diagram of the system

论调制速率可达 Gbit/s。

由于激光高速发射模块是整个系统中最关键的部分之一,因此,在设计中要特别注意几方面,以保证高速信号的完整性。

调制驱动电路部分原理如图 2 所示。首先需要在偏置电流输出 BIAS 和 LD 之间增加一个磁珠,使 LD 引脚寄生电容的影响最小。为了避免电压快速变化产生的过冲以及 LD 正向压降等原因引起工作电压变化范围没有足够的余量,需要在调制电流输出 OUT+ 与 LD 之间采用交流耦合。驱动芯片的最佳负载阻抗为  $20\ \Omega$ , LD 的阻抗为  $4\ \Omega$ , 需要增加串联电阻以获得阻抗匹配。为了补偿二极管引脚的寄生电感,改善输出光信号的偏移和畸形,需要增加 RC 分流网络。为使 LD 工作稳定,保持平均光功率的连续性,启用

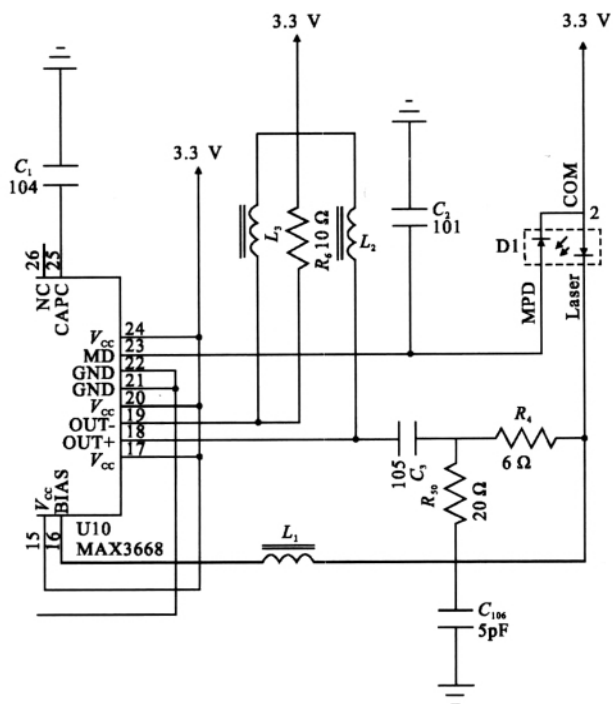


图 2 调制驱动电路

Fig.2 Driving circuit for modulation

了 LD 内部的监视二极管 MD 和驱动芯片的 APC 功能,PD 将激光器的光强变化转换成电流反馈给激光驱动器,通过调整偏置电流,来补偿因环境变化造成的阈值电流的电化。此外,还需要特别注意的是高速 PCB 板设计,尤其是布局、差分线的走线以及传输线阻抗控制等方面<sup>[3]</sup>。

为获得最大的出光功率,将 LD 偏置电流设置为 40 mA,调制电流设置为 60 mA,根据驱动芯片和 LD

的参数,可以计算出 LD 的平均出射功率为 36.7 mW,因偏置电流略大于 LD 阈值电流,使消光比为 2.67。

## 2.3 接收模块

串并转换器将 622 Mbit/s 的串行数据恢复为 8 路 TTL 信号,同时输出 77.76 MHz 时钟给 FPGA 作为工作时钟。值得注意的是它具有一位用于数据重新对齐和重组的同步输入,由 FPGA 进行适当控制可以保证从串行数据流中正确地检测出并行字节的边界。

当并行数据进入 FPGA 以后,通过检测两组同步头来启动有效数据的接收和存储,由于发送的是经过简单编码的数据,需要经过处理后才送入片外 SRAM 存储。接收完毕后即可启动视频输出进程,按照 PAL 信号格式插入行场消隐和控制信号,有效图像数据则从 SRAM 中读取。

与 SAA7113 配套使用的 DA 转换芯片为 SAA7121,它们的原理基本相同,在此不再详述。

## 2.4 光电二极管及放大电路

光电二极管采用 GT106,该二极管适用于自由空间光通信及光检测等场合,光敏面直径  $100\ \mu\text{m}$ ,响应时间 0.7 ns,在 850 nm 达到响应峰值  $0.3\ \text{A/W}$ ,暗电流 1 nA,满足通信需求。

响应电流送入互阻放大器 MAX3665,该放大器具有  $8\ \text{k}\Omega$  的互阻增益和 470 MHz 带宽。根据次级放大器最小输入电压 3 mV 的要求,可以计算互阻放大器所需最小输入电流 375 nA,进一步计算得到光电二极管所需要的光功率为  $1.25\ \mu\text{m}$  即 -29 dBm,也就是接收模块灵敏度的理论值。

限幅放大器采用的是 MAX3676,具有不需要外部参考时钟进行时钟数据恢复的特点,工作速率 622 Mbit/s,它将前级信号再次放大,同时输出串行数据流和 622 MHz 的时钟,均为 PECL 标准差分信号。

为了减小电源噪声对互阻放大器的影响,需在光电二极管附近并行地放置一个电容,以对电源噪声电流进行分流。互阻放大器的性能还受到电路板带宽的影响,因此,在其输出端增加 LC 滤波器。此外,受到限幅放大器内部补偿-校正环路的影响,与互阻放大器之间的互连需要采用交流耦合的方式。还需注意的是这 3 个器件之间的高速互连走线的设计,尤其是互阻放大器与限幅放大器之间的 622 MHz 差分时钟走线,除了采用控制阻抗、减小干扰等措施,还要借助布线工具软件进行走线等长控制等<sup>[3]</sup>,原理如图 3 所示。

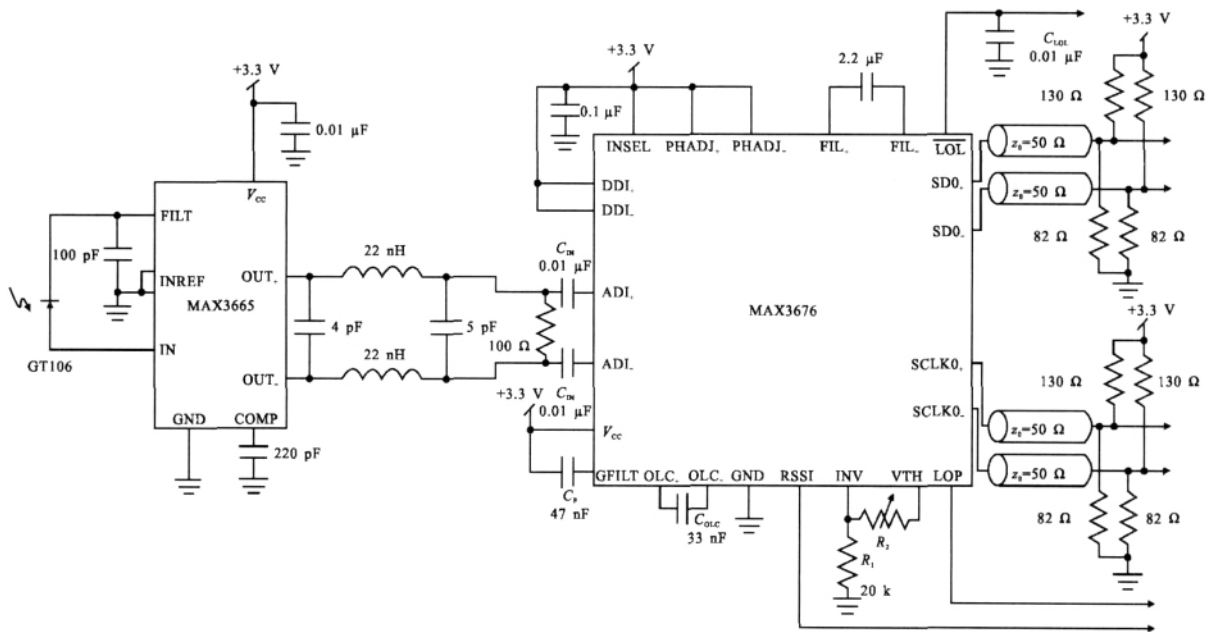


图3 光电接收电路

Fig.3 Photoelectric receiving circuit

## 2.5 最大工作距离

根据激光收发模块参数,可以粗略计算出理论最大工作距离。认为准直后的出射光束为高斯圆分布,并且假定接收透镜和光敏面均垂直地处于光斑中心,透镜口径为75 mm。由 $z$ 处光束振幅的高斯分布公式为:

$$E(x,y,z) = \frac{A_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}\right] \quad (1)$$

式中: $\frac{A_0}{\omega(z)}$ 为振幅; $\omega(z)$ 为接收点光束腰粗<sup>[4]</sup>。

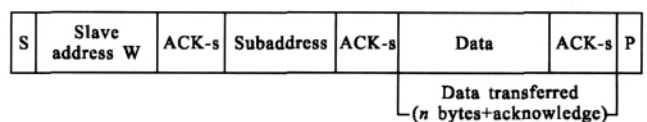
假设 $z_0$ 处接收透镜口径内光功率满足探测器最小灵敏度,经积分得到 $\frac{A_0}{\omega(z_0)} \approx 447.6 \text{ pW/mm}^2$ 。再根据发射端最小发射功率及发散角,进一步计算得到最大工作距离约为6.3 km,满足地面短距离快速传输应用。

考虑到收发望远镜损耗、大气损耗、精确对准难度大、光强非标准高斯分布以及聚焦光斑大小等客观因素,实际通信距离将小于理论值。在没有完善的跟瞄装置的情况下,进行了楼内实验,距离约为110 m,传输稳定。下一步将重新设计样机,增加跟瞄系统和信标光等方法,进一步提高传输距离。

## 3 软件控制

### 3.1 视频转换芯片配置

本系统采用的视频转换芯片均为I<sup>2</sup>C可编程控制,在每次使用前需要对其内部的寄存器进行初始化。I<sup>2</sup>C总线的配置时序(写)如图4所示。

图4 I<sup>2</sup>C写过程Fig.4 I<sup>2</sup>C writing procedure

图中S为起始信号;Slave address W为芯片地址;ACK-s为芯片响应信号;Subaddress为寄存器地址;DATA为要写入的寄存器值;P为结束信号。

在配置程序中,采用了六状态的状态机完成配置,并根据写过程中地址自增的特点,采用写完芯片地址和首个寄存器地址后连续写寄存器的方法,减少程序量和配置时间,状态机流程如图5所示<sup>[5]</sup>。

在系统的软件配置中,收发模块的其他功能均在



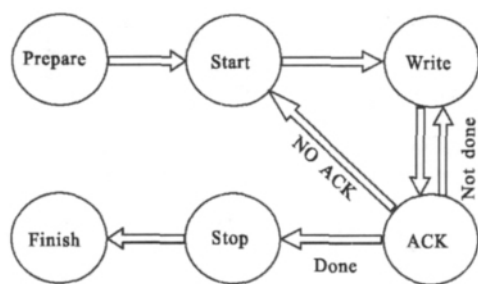


图 5 配置状态机

Fig.5 Configuration of FSM

视频转换芯片配置结束并发出使能信号后开始工作。

### 3.2 图像数据提取和发送编码控制

FPGA 一个重要的工作是进行图像数据流处理和时序控制。在发送模块中,为了减小发送数据量,将 SAA7113 输出的数据进行有效图像数据提取处理,去掉每帧图像中的行场消隐和控制信号。通过仔细研究 PAL 电视信号标准,将 625 行数据划分为 4 个区间,即两个消隐区间和两个数据区间,消隐区间内的数据全部丢弃,数据区间内每行最后的 1 440 有效字节存入外部 SRAM。接收模块的工作过程正好相反,当接收全部的有效数据并存储以后,按照 PAL 标准编写消隐和控制信号,有效图像数据则从 SRAM 中读取并插入。利用这种方法,一帧图像可以节省约 245 kB 的存储空间,减少了硬件成本和存储时间,同时做到每帧图像完整的缓存与收发,避免了因为分割存储产生的可能的图像不连续。

在收发模块的调试过程中,为了得到稳定的恢复时钟和串行数据流,并且易于边界检测及在逻辑分析仪上观察,经过反复实验,采用了 Manchester 编码方式<sup>[2]</sup>。每个比特编码为 2 bit,即逻辑 1 映射为 01,逻辑 0 映射为 10。这样可以使接收模块的恢复时钟最稳定,消除直流分量,易于观察波形。除此之外,在每次循环发送的开始加入两组 0xCC 作为同步信号,当接收端 FPGA 检测到这两组同步字节以后即启动有效数据接收和存储<sup>[6]</sup>。每次发送的有效字节只有 18 个值,接收过程中只要接收字节一直处于这个集合中即可认为边界检测成功。图 6 为利用此方法得到的接收波形图,从图中可以直观地看出:同步字节和编码后的全 1 或全 0 字节。

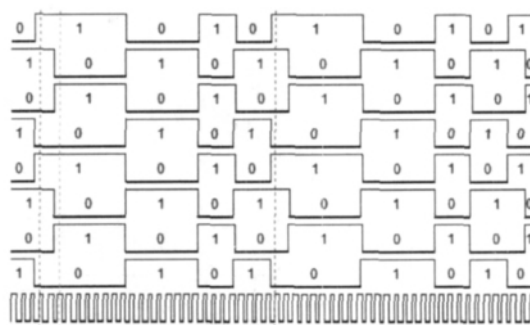


图 6 接收波形图

Fig.6 Chart of receiving waveform

## 4 实验结果

在室内,用文中设计的传输系统,成功地进行了图像传输实验。

在发送端和接收端相距约 110 m 发送测试数据时,经过接收电路放大并恢复后的时钟(上)和串行数据波形(下)如图 7 所示,由于信号上升沿较快及采用的高速信号测量方法不完善等原因,波形有一定过冲甚至退化为正弦波。从图中仍可以看出:时钟和数据恢复较理想。串并转换后的时钟及数据如图 4 所示。

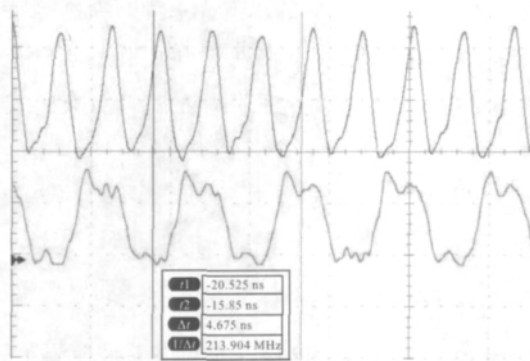


图 7 恢复后的时钟和数据

Fig.7 Recovered clock and data

## 5 结论及展望

实验表明:文中所设计的无线激光通信系统可以稳定高速地传输数据,完成了有效图像数据的提取和存储、视频重新生成及时序控制,在满足系统通信需求的前提下采用相应的编码变换,可以成功地收发图像。适用于地面快速接入,如临时通信传输、安防监控等领域。

在此工作基础上,参考国内外成熟的激光通信系统,包括光纤通信系统等设计及指导思想,开展完整样机的研制工作。除实现视频实时传输之外,还有结合长春光机所传统优势技术设计完善的光学天线系统和跟瞄装置、编写适当的通信协议、研究并实现如RS纠错编码等工作,进一步提高通信距离和系统性能。

#### 参考文献:

- [1] WANG Xiao-hai. The latest progress of technology of space laser communication system abroad [J]. **Telecom Information** (王晓海. 国外空间激光通信系统技术最新进展. 电信快报), 2006(7): 16-21.
  - [2] SUN Wei, AI Yong, HUANG Hai-bo, et al. 42.24 Mbits/s multi-service atmospheric laser communication system [J]. **Infrared and Laser Engineering** (孙未, 艾勇, 黄海波, 等. 42.24 Mbits/s 多业务大气传输光通信系统的研制. 红外与激光工程), 2004, 33(1): 88-92.
  - [3] WIDMER A X, FRANNSZEK P A. A DC-balanced, partitioned-Block, 8B/10B transmission code [J]. **Journal of Research and Development**, 1983, 27(5): 439-451.
  - [4] Peking University, 701 Institute of Guangdong Province. **Principles of Lasers** [M]. Beijing: Peking University Press (北京大学, 广东省七〇一研究所. 激光原理. 北京: 北京大学出版社), 1976: 45-49.
  - [5] FENG Bo-tao, FANG Jian-an. Realization of I<sup>2</sup>C-bus interface based on FSM [J]. **Information Technology** (冯波涛, 方建安. I<sup>2</sup>C总线接口模块的有限状态机实现. 信息技术), 2008(7): 68-70.
  - [6] BERNARD S. **Digital Communications - Fundamentals and Applications** [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, (B Sklar. 数字通信-基础与应用. 第2版. 北京: 电子工业出版社), 2002: 486-489.
- 
- (上接第950页)
- Photoica Sinica** (邢强林, 黄惠明, 熊仁生, 等. 红外成像探测系统作用距离分析方法研究. 光子学报), 2004, 33(7): 894-897.
  - [3] YIN Shi-min, FU Xiao-ning, LIU Shang-qian. Research for infrared mono-station passive location on stationary platform [J]. **Acta Photoica Sinica** (殷世民, 付小宁, 刘上乾. 对固定平台红外单站被动定位技术研究. 光子学报), 2004, 33(2): 237-239.
  - [4] LU Yuan, LING Yong-shun, WU Han-ping, et al. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation [J]. **J Infrared Millim Waves** (路远, 凌永顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究. 红外与毫米波学报), 2004, 23(1): 77-80.
  - [5] LU Yuan, LING Yong-shun, SHI Jia-ming. Measurement of aerial point target distance using dual-band infrared imaging system [J]. **Optics and Precision Engineering** (路远, 凌永顺, 时家明. 双波段红外成像系统对空中点目标测距的方法. 光学精密工程), 2004, 12(2): 161-164.
  - [6] FENG Guo-qiang, ZOU Qiang, LI Wei-ren. Algorithm of passive ranging by single station [J]. **Infrared Technology** (冯国强, 邹强, 李伟仁. 单站双波段红外被动测距算法研究. 红外技术), 2005, 27(4): 295-298.
  - [7] DAHLBERG A G M, OHOLMGREN O. Range performance modeling for staring focal plane array infrared detectors [C]// **Proceedings of SPIE, Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVI**, 2005, 5784: 81-90.
  - [8] WANG Bing-xue, ZHANG Qi-heng, CHEN Chang-bin, et al. A mathematical model for operating range of a staring IR search and track system [J]. **Opto Electronic Engineering** (王兵学, 张启衡, 陈昌彬, 等. 凝视型红外搜索跟踪系统的作用距离模型. 光电工程), 2004, 31(7): 8-11.
  - [9] WANG Wei-hua, NIU Zhao-dong, CHEN Zeng-ping. Research on the operating range of staring IR imaging system in sea-sky background [J]. **Journal of Infrared And Millimeter Waves** (王卫华, 牛照东, 陈曾平. 海空背景凝视红外成像系统作用距离研究. 红外与毫米波学报), 2006, 25(2): 150-153.
  - [10] JACOBS P A. **Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds** [M]. Translated by WU Wen-jian, HU Bi-ru, MAN Ya-hui. Beijing: National Defense Industry Press (Pieter A. Jacobs. 吴文健, 胡碧茹, 满亚辉译. 地面目标和背景的热红外特性. 北京: 国防工业出版社), 2004: 18-19.