

· 电路与控制 ·

基于TDC-GP1的高精度激光测距研究

卢静怡¹, 杨志卿², 赵向凯², 李冰³

(1. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044;
2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083; 3. 潍坊港华燃气有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: 激光测距中, 时间间隔的测量精度对测距精度起决定作用。针对时间间隔的测量精度问题提出了一种基于TDC-GP1计数芯片高精度测量方法, 把时间间隔直接转化为高精度的数字, 并结合软硬件的实现方法, 通过DSP芯片控制TDC-GP1进行单通道的时间间隔测量, 由内部粗计数器和精延时通道合作完成时间间隔测量, 直接将待测时间间隔转换成数字量读出。实验结果表明, 该模块测量频率快, 单脉冲测量精度可达100 ps以内, 线性度良好, 可满足不同应用中的测速和精度要求。

关键词: 时间间隔测量; TDC-GP1; 高精度

中图分类号: TN710.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-01-0060-06

High Accuracy Laser Ranging Research Based on TDC-GP1

LU Jing-yi¹, YANG Zhi-qing², ZHAO Xiang-kai², LI Bing³

(1. School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Institute of Semiconductors Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 3. Weifang Hongkong-China Gas Limited Co., Weifang 261000, China)

Abstract: Measurement accuracy of time interval plays a decisive role in ranging accuracy in laser ranging process. According to measurement accuracy of time interval, a high accuracy measurement method is proposed based on TDC-GP1 counting chip. Time interval is directly converted into high accuracy number. Incorporated with the implement methods of software and hardware, TDC-GP1 is controlled by DSP chip to perform time interval measurement of single-channel. Time interval measurement process is completed by inner coarse counters and fine delay time channels. Time interval to be tested is directly converted into digital readout. The experiment results show that the module has fast measurement frequency, good linearity, and the single pulse measurement accuracy is less than 100 ps, which can meet the requirements of speed measurement and accuracy in different applications.

Key words: time interval measurement; TDC-GP1; high accuracy

在激光测距中, 时间间隔的测量精度对测距精度起决定性作用。传统时间间隔计数法包括数字计数法, 模拟计数法以及模拟插值法^[1-2]。数字计数法由于测量精度主要受时钟频率限制, 测量精度分辨率不会很高; 模拟计数法通过大电容充放电对时间间隔进行测量, 相对数字计数法而言精度大大提高, 但是充放电时间并非绝对线性关系, 存在非线性现象, 其大小大致为测量范围的万分之一, 随着测量范围的增加精度会降低。而且电容的充放电性能受温

度影响比较大(达10 ps/°C ~ 30 ps/°C); 模拟插值法虽然在一定程度上改善了模拟法在大测量范围条件下测量精度低以及数字法测量误差大的问题, 但是由于采用模拟电路, 容易受到噪声的干扰, 当要求连续测量时, 电路反应速度也是一个大问题^[3-7]。由此人们又提出了多次平均的方法, 利用统计规律来减少量化误差的影响, 从而提高了测量的分辨率。但是这种多次平均的方法存在一个问题, 就是测量的转换时间太长, 在需要实时测量的场合下, 这种方法显

收稿日期: 2012-12-27

作者简介: 卢静怡(1988-), 女, 河北省衡水市人, 硕士研究生, 研究方向为三维成像激光雷达系统的接收信号处理。

然不能满足要求^[9]。文中采用TDC(time-to-digital converter)时间数字转换器,能在低功耗的情况下达到100 ps的精度,这种方法基于TDC-GP1高精度测时芯片,把时间间隔直接转化为高精度的数字,它既弥补了脉冲计数法测量精度受限于计数脉冲的频率的不足,又改善了数字延迟链法测程较短的缺陷,具有测量精度高、测量范围大、系统功耗低、电路集成度高等优点,对于电路规模的扩大和完善具有很强的灵活性^[12-14]。针对TDC-GP1的基本原理提出了实现时间间隔测量的软硬件方法,还通过实验数据验证了噪声以及温度对测量结果误差的影响。

1 基于TDC-GP1的时间间隔测量原理

TDC-GP1是德国ACAM公司生产的一款通用的可多次采样的双通道时间-数字转换器(time to digital converter)。基于GP1的测量原理结合了脉冲测量法和数字延迟链法,是一种完全基于数字计数的测量方法,采用逻辑门阵列延迟的基本原理,分辨率取决于芯片的最小门传播延迟时间,如图1所示:输入START信号,芯片内部迅速测量出这个信号与下一个校准时钟上升沿的时差,记为 $FC1$ 。之后计数器启动,得到predivider的计数周期数 cc 。这时重新激活芯片内部测量单元,测量出输入的STOP信号的第一个脉冲上升沿与下一个校准时钟上升沿的时差,记为 $FC2$, $FC3$ 是STOP信号的第二个脉冲上升沿与校准时钟上升沿的时差, $Cal1$ 和 $Cal2$ 分别是一个和两个校准时钟周期,可得

$$\text{time} = \text{period} \times \left(cc + \frac{FC1 - FC2}{Cal2 - Cal1} \right) \quad (1)$$

式中,period为校准控制时钟周期,文中取值为30 MHz。

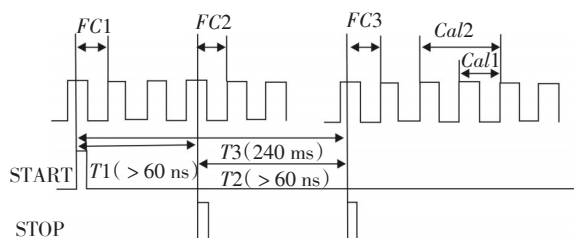


图1 TDC-GP1工作原理

由式(1)得到START与STOP的时间间隔中,则通过计算可以得到测量距离为

$$\text{Distance} = 0.5 \times c \times \text{time} \quad (2)$$

式中, c 为光速 3×10^8 m/s。

2 测量模块设计

2.1 硬件结构

利用TDC-GP1设计的高精度时间间隔测量硬件模块以TDC-GP1芯片为核心,通过TI公司生产的TMS320F28035作为系统的MCU(micro control unit)控制整个系统的时序以及数据的处理,TMS320F28035的工作时钟达到60 MHz,拥有很强大的对数据实时处理的能力,这就大大缩小了系统时延对测量精度的影响,同时也保证了系统连续测量的时效性。TMS320F28035通过内部的EPWM产生25.6 KHz的同步时钟,再使激光器发射重频和系统各部分的采样频率都为25.6 KHz,增强系统的同步性的同时也增强了电路的灵活性,可以根据不同的时序要求直接改写EPWM的基时周期。另外,TMS320F28035芯片通过16位通用I/O口与TDC-GP1的结果寄存器进行数据通信,在TDC测量结束后向DSP发中断信号然后读取测量数据。如图2所示,由于激光器在传输过程中会受各种噪声的干扰,可能会造成虚警,为了防止误触发,START开始信号和STOP终止信号先经过整形形成方波之后再进入GP1,其中START为起始脉冲,该脉冲是激光发射信号中的小部分由参考信号取样器直接送到接收系统,作为计时的起始点信号,而大部分激光射向目标,经目标反射后返回测量仪由雪崩光电二极管接收并放大后输出,最后再由计数器读数算出时间间隔信息。TDC-GP1的工作主频由30 MHz的外部晶振时钟提供,这作为它的基准时钟用来控制高速时钟和进行时钟校准,高速石英晶振在每次测量自动产生校准原始数据($Cal1$ 和 $Cal2$),通过时钟校准和式(1)的计算会得到测量结果,将结果存放到TDC-GP1的8 bit结果寄存器中,文中的测量结果包括整数部分和小数部分,因此每个结果值要占用两个寄存器。测量结束后TDC产生中断,由TMS320F28035读取结果寄存器中的值,并经过运算处理后通过仿真器传输到上位机上,以供显示和分析处理。

由于测量过程中激光雷达发射的激光在传输过程中会受背景反射、散射作用而进入光学探测器的杂波:包括大气、云层以及各背景的反射和散射等再进入光电探测器,会产生很多噪声信号,强度大的甚

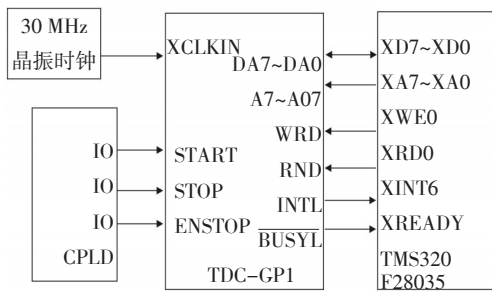


图2 基于TDC-GP1的时间间隔测量模块

至会造成虚警,因此通过DSP设置了严格的波门来限制其他信号的干扰,有效地筛选有用信号。而同步时统主要是为了给外部激光器提供发射重频,时序值可以由软件设定,这就大大增强了电路的灵活性,可以根据需要改变系统时统。另外同步时统在激光的接收电路中还起到限制偏置电压增益的作用,使放大后的电压控制在一定范围内,有效地减少了近距离时由于后向反射而造成的测量盲区。

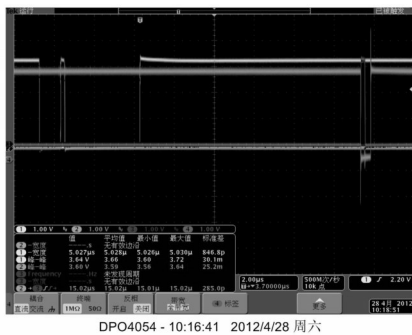


图3 TDC-GP1对时间间隔的测量波形图

图3所示输入是两个理论值为时间间隔为15 μs的脉冲波形,实验中使用示波器探测TDC-GP1的START和STOP两个引脚的实际信号,可以看到两个信号时间的时间间隔,由于波门的严格限制,大大减小了虚警信号的干扰。START和STOP端口的脉冲周期都为25.6 KHz,示波器显示两个脉冲间隔为15.02 μs,误差在0.01 ps范围内,可以忽略。由此可见,时间间隔测量芯片正常工作。

2.2 软件设计

TDC-GP1内部有7个控制寄存器用来选择不同的进程模式和其他可能被调节的模式,4个数值寄存器用来存储乘法因数和PLL调节因数。软件设计的重点在于内部控制寄存器的设置以及结果数据的读取。TDC-GP1在寄存器设置完毕后,上电复位系统

初始化,以便TDC能够接收START和STOP信号。GP1的测量是以START通道接收到一个脉冲信号开始的,以STOP通道接收到指定个数的脉冲信号结束的。算术逻辑单元ALU(arithmetic logic unit)按照设定的模式计算出START脉冲和STOP脉冲间的时间间隔后产生测量结束中断,若接收到START信号后在一定的时间内没有采样到STOP信号,TDC会产生溢出中断。系统可以通过读取GP1状态寄存器中的值来分辨上述两种中断,对于第一种正常测量产生的中断,当检测到中断信号的时候,TDC-GP1将测量结果写入结果寄存器并自动给外设MCU发一个复位脉冲信号,来触发硬件可被中断标志的上升沿启动从而进行读出操作。DSP会接着读取结果寄存器中的数据并发送给上位机,否则应该跳出中断,并重新初始化GP1,准备下一次测量。最后将结果由显示单元给出。流程图如图4所示。

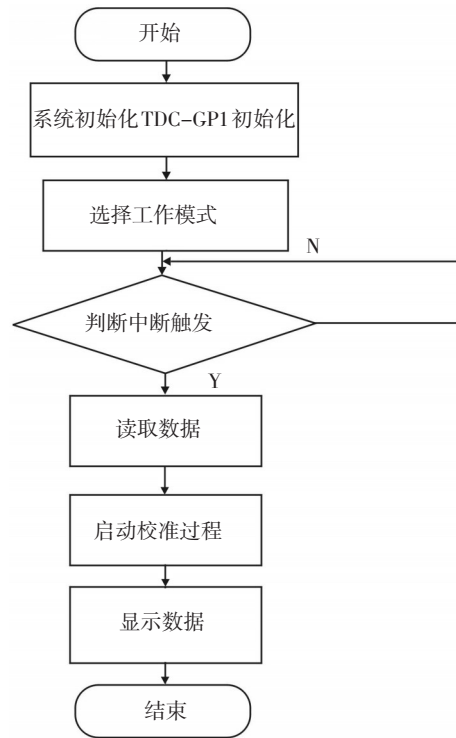


图4 TDC测量流程图

采用多个测量范围2,GP1相关寄存器的设置如下: REG11=0x07; REG0=0x78; REG1=0x4D; REG2=0x21; REG3=0x80; REG4=0x00; REG5=0x80; REG6=0x02; REG7=0x02; REG8=0x00; REG9=0x00; REG10=0x80; REG11=0x07。文中讨论的是只有单个回波的时间间隔测量,若有多个回波则可以改变寄存器2的

值,这些可以根据需要来设置。

由上述寄存器11的设置可知,在GP1进行测量之前先对它进行初始化,以免测量之前有干扰信号,对于寄存器0的设置可知测量芯片中的ALU设置了校准操作,而寄存器的数据结构和占用空间由其存储的数据是校准值还是非校准值而定,这里的一个校准值要占用两个8 bit结果寄存器,在测量芯片进行一次测量之后再对TDC单元初始化,以备下次测量使用。

数据读取与处理部分程序如下:

```
nk0=TdcRegs.TDCRREGS.ERGREG0.all;//小数部分低八位
nk1=TdcRegs.TDCRREGS.ERGREG0.all;//小数部分高八位
vk0=TdcRegs.TDCRREGS.ERGREG1.all;//整数部分低八位
vk1=TdcRegs.TDCRREGS.ERGREG1.all;//整数部分高八位
nk1=(nk1<<8)|(0x00FF&nk0);
vk1=(vk1<<8)|(0x00FF&vk0);
result=(1000.0/30.0)*(vk1+nk1/65536.0);//30MHz 参考时
```

钟,result单位是ns

Distance = 1.50*result;//1ns=0.15 m 即Distance量化单位为0.1m

3 影响精度因素分析

精度指的是区分接近相等的两个值的能力的一种度量,比如说精度是1 ns,是指确保能区分两个相差是1 ns的时间量。测量精度除了受硬件的影响之外通过软件处理也可以提高精度,另外精度还受统计规律的影响,比如可以通过多次测量取平均值的方法来提高测量精度。

工程中对测量精度的影响主要包括两个部分:

(1)噪声误差:只要是数字系统电路多次测量就一定会包含的不确定性。

(2)温度变化会影响整个系统的测量精度。

3.1 噪声对测量精度的影响

激光测距接收系统中,除了目标的回波信号外,其他进入接收系统的光电信号都是一种干扰,这些噪声信号按产生的根源来分类。可分为信号噪声、背景噪声、探测器噪声、电子元器件噪声等。目标的有用信号与各种背景噪声信号不可避免地混杂在一起,必须从中选出有用的目标信号。文中将光电转换后的信号原始数据通过示波器采样,如图4,横轴是绝对时间,纵轴是回波幅度,大量的高强度噪声信号几乎湮没了开始信号和终止信号。

可见,在测量过程中电路噪声的干扰和各种随机因素都会使测量结果精度下降,可通过多次测量

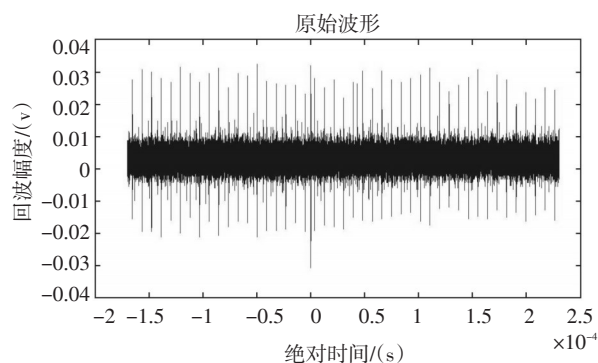


图5 受噪声影响的信号

取平均的方法改善。理论计算可知, N 次平均后可使测量精度提高 \sqrt{N} 倍,图6给出了在后续实验中,将16组数据取平均得到去噪后的信号。

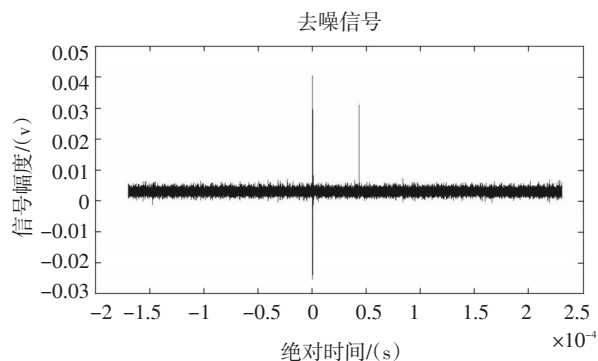


图6 去噪后的信号

由图可见,噪声的干扰不但会影响精度甚至会湮没有用信号,在实际电路中为了将微弱的目标信号从背景杂波中检测出来,就要尽量减小背景的影响,为此常采用空间滤波、光谱滤波、时间滤波三种方法的结合。空间滤波可通过减小瞬时视场,在观测目标时,使进入视场的背景尽量减小,这样做可减小背景辐射和背景回波的影响。光谱滤波是采用光学带通滤波器,滤去通带以外的背景辐射的影响,其带通宽度的选择与激光器发射的光谱宽度相匹配,考虑到激光器发射频率的稳定性,滤波器的稳定性和目标多普勒移动等因素,一般通带宽度略宽于激光器发射的激光频带宽度,该措施成为抑制宽频带的背景辐射的有效方法。时间滤波包含距离选通滤波和时间滤波方法。利用目标移动和运动方向的超前信息,设计距离选通器并实现距离跟踪是减小背景回波影响,克服大气散射后和云层反射的有效措施。

3.2 温度对测量精度的影响

对于TDC-GP1芯片自身来说,由于GP1的高分辨率来自于内部的门传播时间,而门传播时间又与电压、温度和制作工艺有关。所以精度主要受芯片自身三个参数的影响,它们分别是:制造过程中的工艺参数、供电电压的变化、温度的变化。由于工艺参数在芯片出厂后就已经确定,参数不可控,而供电电压与电路设计有关,参数也不易控制。因此文中只

对温度对TDC-GP1精度的影响进行了验证。

为了验证温度对于测量结果的影响,文中用Agilent 811A信号源发出两束时间间隔为15 μs信号,分别模拟START, STOP信号,将在各个温度试验点下计算得到的距离平均值与理论值取差值,得出随着温度的变化测量误差的变化表以及曲线图,由于距离的误差变化与时间间隔的变化成正比,因此根据下面的测量误差变化趋势可以得到时间间隔测量的变化趋势。

表1 温度对测量结果的影响

温度/(°C)	-40	-30	-25	-10	0	15	25	45	60	70	85
测量误差(m)	0.662	0.653	0.649	0.544	0.175	0.060	0.013	0.431	0.579	0.571	0.561

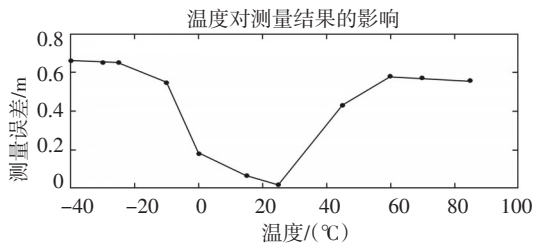


图7 测量误差随温度的变化(15 μs)

图中横坐标为温度值,共取了11个温度采样点,分别多次测量取平均值,再与理论值做差,得到纵坐标的测量误差值。由图可见,当芯片工作在25 °C附近的时候误差最小仅为0.01 m。而极高或者极低的温度都会造成0.1 m的误差范围,严重影响测量精度。

4 结束语

采用高精度测时芯片TDC-GP1进行时间间隔的测量,从而得到目标物的距离信息,这种测量方法与位于前端传感器和数字处理器之间的数模转换器非常相似,它完全适用于时间、相位、频率和被动传感器的测量,具有高精度、短时间、低功耗的优点。可广泛应用于距离测量、流量测量、温度测量等领域。

参考文献

- [1] 余金金, 邓若汉, 袁红辉, 等. 一种用于高速激光回波信号处理的专用CMOS集成电路芯片[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(17):4300-4303.
- [2] Jing Hou, Zhang Wanjiang, Sun Yanling. An effective thermal flow meter based on TDC-GP1 chip. 2012 International Symposium on Polymer Composites and Polymer Testing, ISPCPT 2012, March 23, 2012 – March 25, 2012. Hangzhou, Zhejiang, China: Trans Tech Publications, 2012: 409-413.
- [3] 张黎明, 张毅, 赵欣. 基于TDC的激光测距传感器飞行时间测量研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(12):71-74.
- [4] 虞静, 江虹, 唐丹. 一种提高脉冲激光测距中时间测量精度的方法[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2010, 40(1): 5.
- [5] Diao Jietao, Li Qingjiang, Wang Peng, et al. A correction method for time to digital converter. 2nd International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering, ADME 2012, August 16, 2012 – August 18, 2012. Taiyuan, China: Trans Tech Publications, 2012: 2138-2143.
- [6] 朱威, 王培源, 李欣, 等. TDC-GPX在卫星激光测距中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(z1):174-177.
- [7] 朱福, 林一楠. 一种提高脉冲激光测距精度的方法[J]. 光电技术应用, 2011, 26(2):42-45.
- [8] Amiri Amir Mohammad, Boukadoum Mounir, Khouas Abdelhakim. A multihit time-to-digital converter architecture on FPGA[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(3): 530-540.
- [9] 张琦, 张柯. 激光的特点及其在测距上的应用[J]. 办公自动化(综合版), 2011, (8):12-15.
- [10] 宋娜, 邓甲昊, 崔静. 基于高精度时间间隔测量芯片TDC-GP2的脉冲激光测距系统[J]. 兵工自动化, 2012(10):64-67.
- [11] 吕明爱, 柳建, 王江. 激光测距回波信号高速采样处理技术研究[J]. 光电工程, 2011, 38(5):59-63.
- [12] Hashimoto Tetsutaro, Yamazaki Hirotsuka, Muramatsu Atsu-

shi, et al. Time-to-digital converter with vernier delay mismatch compensation for high resolution on-die clock jitter measurement. 2008 Symposium on VLSI Circuits Digest of Technical Papers, VLSIC, June 18, 2008 – June 20, 2008. Honolulu, HI, United states: Institute of Electrical and

Electronics Engineers Inc., 2008: 156–157.

- [13] 贾方秀, 丁振良, 袁峰, 等. 激光测距温度控制系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 6.
- [14] 李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8):1469–1473.

(上接第11页)

6 结束语

美军各种作战直升机对红外定向对抗系统的需求由来已久,但受到成本、质量多种因素的限制,一直未能取得技术突破而大量装备。由于大型飞机红外对抗系统已经垄断了大型和固定翼飞机的红外定向对抗市场,通用红外对抗计划就成为机载电子战项目中下一块巨大的“蛋糕”。为了能在未来的市场竞争中占据主动,多家具有技术优势的公司(团队)通过自投资金及与陆、海、空军的合作开展了螺旋式技术升级和产品研发。技术与产品的竞争,推动着直升机载红外定向对抗装备向经济、轻型、先进有效的方向发展。前面提及的五家公司(团队)的竞标产品都通过了飞行测试并取得了较好的对抗效果。而BAE系统公司和诺斯罗普·格鲁曼公司团队的竞标成功,说明了其产品在技术创新及战场应用中的领先地位。

参考文献

- [1] Daniel Wasserbly. US Army Awards CIRC Development Phase Contracts [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(6): 11
- [2] Jen Judson. Acquisition Chief Directs Full Funding for CIR-

CM's Next Phase [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(2): 7

- [3] J. Knowles. US Army Issues CIRC REP [J]. The Journal of Electronic Defense, 2011, 34(3): 15
- [4] Skyler Frink. Northrop Grumman Chose for U.S. Army's Common Infrared Countermeasure Technical Demonstration Program [J]. Military & Aerospace Electronics, 2012, 23(4): 28
- [5] Jen Judson. GAO Denies ITT's Protest Over Army's Award of CIRC Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(21): 6
- [6] White Plains. ITT Adds Advanced Laser to CIRC [J]. Rotor & Wing, 2011, 45(11): 24
- [7] CIRC Not Just for Helos Anymore, Raytheon Says [J]. Unmanned Systems, 2011, 29(11): 12
- [8] Marina Malenic. US Army to Start CIRC Programme [J]. Jane's Defense Weekly, 2012, 49(3):11
- [9] Jen Judson. Northrop Grumman, BAE System Receive CIRC Development Contracts [J]. Inside the Pentagon, 2012, 28(5): 10
- [10] Daniel Wasserbly. US Army Takes Stock of Common Infrared Countermeasures Bids [J]. Jane's Defense Weekly, 2011, 48(20): 9
- [11] Tong Skinner. CIRC Program moves ahead [J]. Defense Helicopter, 2010, 29(1): 5
- [12] US Army Poised to Launch Infrared Protection Battle [J]. Flight International, 2010, 178(10): 16

(上接第15页)

- [6] 杨洋, 赵远. 1.06 μm 激光的大气传输特性[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(1): 15–19.
- [7] 程玉宝, 孙晓泉, 赵明辉, 等. 激光信号大气散射探测分析[J]. 激光技术, 2006, 30(3): 277–279.
- [8] 巨养锋, 梁冬明, 薛建国等. 威胁源参数对激光散射截获半径的影响[J]. 激光与红外, 2011, 41(4): 426–429.

- [9] 张建奇, 方小平. 红外物理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004: 141–185.
- [10] ACCETTA J S, SHUMKER D L. The infrared and electro-optical systems handbook [M]. 7th ed, Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 70–90.