

文章编号: 1001-3806(2006)06-0608-03

空间交会激光雷达信息测量技术

刘长久¹, 杨华军¹, 赖 潘²

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054; 2. 西安通信学院 基础部, 西安 710106)

摘要: 为了测量目标飞行器的位置及速度等信息, 提出采用模拟插入脉冲计数法测距, 最小二乘曲线拟合微分法测速, 四象限 (QD) 光斑定位法测角。并在 MATLAB/SMULINK 环境下, 对采用该方法的脉冲激光雷达信息测量系统进行了计算机仿真。结果表明, 距离测量精度高, 误差小于 0.01m, 速度精度也高, 误差小于 0.02m/s。采用该测量技术的脉冲激光雷达是可靠的。

关键词: 激光技术; 激光雷达; 距离测量; 速度测量; 角度测量; 计算机仿真

中图分类号: V556.7 **文献标识码:** A

Technology of the rendezvous lidar measuring the object's position

LIU Chang-jiu¹, YANG Hua-jun¹, LAI Fan²

(1. School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Foundation Department, Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract In order to measure the object's position and velocity, the method of counting pulse with analog interpolation is used to measure the distance, and the method of differential coefficient of the fitting curve based on least square curve fitting that takes the exponential function is used to measure velocity, and the method of orientating facula with quadrant detector is selected to measure the orientation angles in the pulsed lidar measuring system. Computer simulation is performed with the MATLAB/SMULINK. As a result, the distance precision is less than 0.01m, the velocity error is smaller than 0.02m/s. It can be concluded that the information measuring technology of pulse lidar is reliable.

Key words laser technique; lidar; distance measurement; velocity measurement; angle measurement; computer simulation

引 言

追踪飞行器是由地面测控系统导航, 机动飞入其自身探测系统能够捕获目标飞行器的范围内, 当追踪飞行器与目标飞行器相距在 20km~30m 以内时, 现在一般不用微波雷达了, 因为在这个阶段, 交会对接的精度要求很高, 很短的距离对于微波雷达来说是测量盲区, 而且其精度也远远不能满足要求。这时需要改用追踪飞行器自身的探测系统——脉冲激光雷达来测定目标飞行器的距离、速度和方位等信息, 这是因为激光测量动态范围很宽, 精度极高等。欧空局、日本及美国已经有实用的空间交会激光雷达, 但国内还没有成熟实用的空间交会激光雷达技术, 且这一高新技术无法从别人那里获得, 只有自己搞^[1]。作者采用模拟插入脉冲计数法测距, 以幂函数族为基的最小二乘曲线拟合微分法测速, 四象限光斑定位法测角, 并在 MATLAB/SMULINK 环境下, 对采用该方法的脉冲激光雷

达信息测量系统进行了计算机仿真。

1 距离测量

选择模拟插入脉冲计数法测量距离。脉冲激光测距系统由 5 个部分组成^[2]: 激光发射单元、两个接收通道、时间鉴别单元、时间间隔测量单元 (包括模拟插值电路) 和处理控制单元, 如图 1 所示。

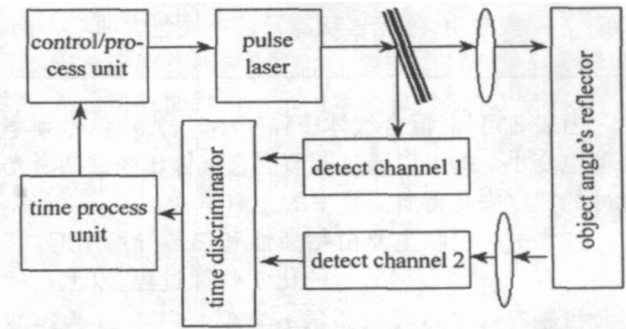


Fig 1 Pulse laser telemeter system

脉冲激光测距的工作过程如下: 激光发射单元发射一系列脉冲激光, 分出其中极少部分功率直接进入接收通道 1, 经过时间鉴别单元产生起始信号, 开始时间间隔测量; 其余功率从发射天线向目标发射出去, 接收通道 2 接收经目标反射后返回的脉冲, 再经放大进入

作者简介: 刘长久 (1964-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事光通信及计算机光学方面的研究。

Email: liucj@126.com

收稿日期: 2005-10-24; 收到修改稿日期: 2005-11-25

时间鉴别单元,产生一终止信号,终止时间间隔测量,通过模拟插值处理后得出测量结果 t_R ,并将测量结果输出到处理控制单元,最后得到距离 R 。

脉冲激光测距的关键就是如何精确测量脉冲激光传播时间 t_R 。通常是利用一同步时钟脉冲对时间间隔进行计时:利用石英振荡器产生一高频时钟脉冲序列(其频率可高达 300MHz),起始脉冲信号将触发计数器的电门使之开启,时钟脉冲进入计数器进行计数,直至终止脉冲信号到达,计数器的电门被关闭^[3]。设钟频脉冲的振荡周期是 τ 则目标飞行器的距离可进一步表示为:

$$R = \frac{c\tau}{2}n = \frac{c}{2f}n = l \cdot n \quad (1)$$

式中, c 为自由空间中的光速; n 表示光脉冲从发出到返回这段时间内进入计数器的钟频脉冲的个数; $f = 1/\tau$ 为钟频脉冲的振荡频率; $l = c/2f$ 表示每一个钟频脉冲所代表的距离基准,它的值确定了测量精度,例如取 $f = 150\text{MHz}$ 则 $l = \pm 1\text{m}$ ^[4,5]。

为了提高测距精度,需要从以下两个方面进行考虑:首先要解决待测时间段起始时刻和终止时刻的精确确定问题;其次要解决对这两时刻的时间间隔进行精密测定的问题。这里采用模拟插入法测量起始时刻和终止时刻。经过模拟插入处理后的脉冲计数法的测距精度为:

$$\delta R = C/(2^{m+1}f) \quad (2)$$

式中, C 为模拟插值电容器的电容量; m 为模数转换器位数; f 为钟频脉冲的振荡频率。若 $f = 0.3\text{GHz}$, $m = 6$ 则由 (2) 式可算得测距误差的理论值为 $\delta R \approx 0.0078\text{m}$ 。

2 速度测量

在空间交会过程中,目标飞行器的速度的测量也是非常重要的,它是随后的对接过程能否安全进行的保证。一般来讲,激光器所测量的速度包含两个方面,即切向速度和径向速度。本文中只涉及到径向速度。

采用以幂函数族为基的最小二乘曲线拟合微分法测速。由速度与距离的关系式 $\dot{v} = \Delta R / \Delta t$ 可知:只要采样频率足够大,即可得到每一时刻的瞬时速度。但是利用这种方法时,距离的测量值只要有一小的误差,所得的速度误差将很大。为了降低速度的测量误差,可以采用最小二乘法来拟合速度,其基本原理是根据所测得的一系列距离-时间点,用最小二乘法拟合出距离-时间的数学模型曲线,在将其进行微分即可得所需的速度-时间的曲线。

2.1 算法分析

利用最小二乘法进行曲线拟合的原理如下:给定一组实验数据 $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, m\}$, 其中 $y_i = f(x_i)$, $i = 0, 1, \dots, m$ 。要求一个函数 $y = S^*(x)$ 与所给

数据 $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, m\}$ 拟合,若记误差 $\delta_i = S^*(x_i) - y_i$, $i = 0, 1, \dots, m$, $\delta = (\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_m)^T$, 设 $\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)$ 是连续函数空间 $C[a, b]$ 上线性无关幂函数族,在多项式拟合函数 $\varphi = \text{span}\{\varphi_0(x), \varphi_1(x), \dots, \varphi_n(x)\}$ 中找一函数 $y = S^*(x)$, 使误差平方和:

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) \delta_i^2 = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) [S^*(x_i) - f(x_i)]^2 = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) [S(x_i) - f(x_i)]^2 \quad (3)$$

取极小值。其中 $\omega(x) \geq 0$ 是 $[a, b]$ 上的权函数,它表示不同点 $(x_i, f(x_i))$ 处的数据比重不同:

$$S(x) = a_0 \varphi_0(x) + a_1 \varphi_1(x) + \dots + a_n \varphi_n(x), \quad (n < m) \quad (4)$$

问题可转化为求多元函数:

$$I(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=0}^m \omega(x_i) \left[\sum_{j=0}^n a_j \varphi_j(x_i) - f(x_i) \right]^2 \quad (5)$$

的极小点 $(a_0^*, a_1^*, \dots, a_n^*)$ 问题。

这里可假定 $R = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$, 即选取 $\varphi = \text{span}\{1, t, t^2\}$, 约定各点的权函数值 $\omega(x_i) \equiv 1$, 即各测量点的影响相同。这样,问题就明确为根据一组测量点 $\{(t_i, R_i), i = 0, 1, \dots, m\}$, 由矩阵式: $G\mathbf{a} = \mathbf{d}$ 确定 a_0, a_1, a_2 的值,其中 $G = (\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n)$, $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_n)^T$, $\mathbf{d} = (d_0, d_1, \dots, d_n)^T$, $\sum_{j=0}^n (\varphi_k, \varphi_j) a_j = d_k$ 。

对距离-时间曲线进行微分即可得速度-时间曲线: $v = a_1 + 2a_2 t$ 实际上并不需要在 $\{t_i\}_{i=0}^m = \{0, \tau, 2\tau, \dots, m\tau\}$ 各时刻的值,只需要求得最后一个时刻的瞬时值: $v(m\tau) = a_1 + 2a_2 \cdot (m\tau)$ 。可解得:

$$v(m\tau) = \frac{1}{\tau |G_0|} \sum_{i=0}^m [(k_2 k_3 - k_1 k_4) + (k_0 k_4 - k_2^2) \times i + (k_1 k_2 - k_0 k_3) \cdot i^2] \cdot R_i + \frac{2m}{\tau |G_0|} \sum_{i=0}^m [(k_1 k_3 - k_2^2) + (k_1 k_2 - k_0 k_3) \cdot i + (k_0 k_2 - k_1^2) \cdot i^2] \cdot R_i \quad (6)$$

式中, $k_0 = m + 1$, $k_1 = m(m + 1)/2$, $k_2 = m(m + 1) \times (2m + 1)/6$, $k_3 = [m(m + 1)/2]^2$, $k_4 = m(m + 1) \times (2m + 1)(3m^2 + 3m - 1)/30$ 。

2.2 误差分析

由于每次的测量值 R_i 的精度相等,设其误差限为 Δ , 并且每次测量的误差在 $[-\Delta, \Delta]$ 上每一处机会均等的出现,故而可以认为测量误差服从均匀分布,并根据误差的传递理论,可得速度的标准方差为^[2]:

$$\sigma_v = \frac{2\Delta}{\tau} \sqrt{\frac{(2m + 1)(8m - 3)}{m(m - 1)(m + 1)(m + 2)(m + 3)}} \quad (7)$$

因此,速度的标准方差与测量的时间间隔成反比,与距离精度成正比,与采样点数的 1.5 次方成反比。

速度的拟合可看为是等精度的, 则得出测速的精度为:

$$\delta v = \sqrt{3}\sigma_v \tag{8}$$

假设激光器发射的光脉冲频率为 5kHz 即每秒可进行 5000 次距离信息的测量, 则相邻的两个测量时刻相隔 $\tau = 2 \times 10^{-4} \text{ s}$ 若距离精度为 $\Delta = 0.0078 \text{ m}$ ^[6], 采样点数 $m = 1000$, 由 (7) 式可得 $\sigma_v = 0.0098 \text{ m/s}$ 由 (8) 式即得相应的速度误差的理论值为 $\delta v = 0.017 \text{ m/s}$ 提高距离的测量精度或加大采样点数, 都可以进一步降低速度的测量误差。

3 角度测量

脉冲激光雷达所要测量的目标飞行器的角度信息应包括两个分量: 方位角 (即两飞行器连线在探测器平面上的投影与 x 轴的夹角) 和仰角 (即两飞行器连线与探测器平面的夹角)。完整的角度信息应当是在前段导航装置 (如微波雷达) 所测的角度基础上, 用激光雷达来对之进行精化, 这是因为当目标飞行器与跟踪飞行器之间越来越近时, 微波雷达所测的角度信息的精度达不到实际要求^[7]。

脉冲激光经目标飞行器上的三维直角反射镜反射回到安装在跟踪飞行器上的光接收机, 且经过透镜的会聚后, 落在位于透镜焦平面的光电探测器的 $m'(x_0, y_0)$ 点。实际上, 由于透镜的衍射效应, 落在焦平面的其实是一个光斑, 如图 2 所示。此时, 点 $m'(x_0, y_0)$ 即

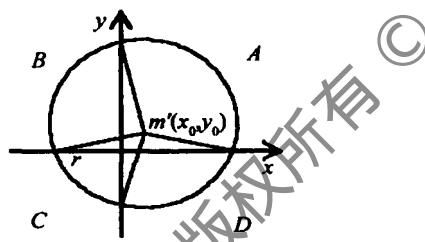


Fig 2 Sketch map of quadrant detector focus

为光斑的中心。则易知目标飞行器所处位置的方位角 α 和俯仰角 β 分别为:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{y_0}{x_0} \right) \tag{9}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{F}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2}} \right) \tag{10}$$

式中, F 表示透镜的焦距。

选用四象限探测器作为空间目标定位与跟踪的光电探测器。设落在四象限探测器上的光斑能量分布是均匀的, 则各象限所接收到的光能量与落在其中的光斑成正比, 而每个象限的输出电流与该象限所接受到的光能量成正比, 故而通过各象限的输出电流可以得到光斑的位置^[8]。

设光斑中心离坐标原点 (即四象限探测器的几何中心) 很近, 即 $|x_0|$ 和 $|y_0|$ 远小于光斑半径 r , 经近似

可得:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{\pi_r}{2} \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ y_0 = \frac{\pi_r}{2} \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases} \tag{11}$$

4 测量系统仿真结果

在 MATLAB/SIMULINK 环境下, 对采用该方法的脉冲激光雷达信息测量系统进行了计算机仿真^[6,9], 初始距离为 $2.0 \times 10^4 \text{ m}$, 距离仿真结果如图 3 所示, 仿真距离误差如图 4 所示, 误差在 $[-0.0076, 0.0076] \text{ m}$ 之间, 这与理论误差 $\delta R \approx 0.0078 \text{ m}$ 相吻合。

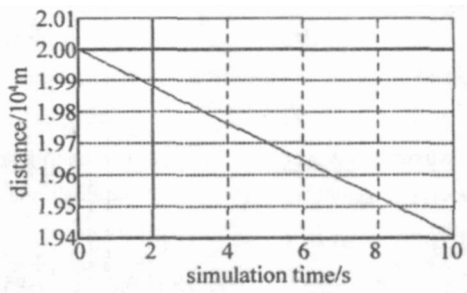


Fig. 3 Simulation distance

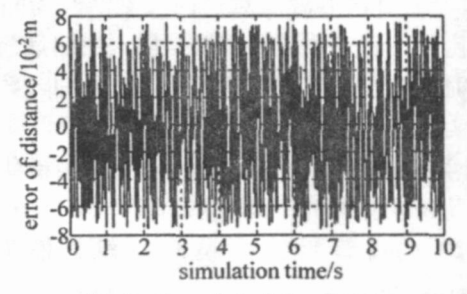


Fig. 4 Error of simulation distance

将所得的距离-时间结果进行曲线拟合, 然后进行微分处理, 得到速度信息, 其结果如图 5 所示。仿真中

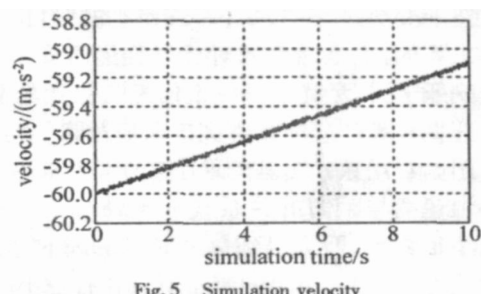


Fig. 5 Simulation velocity

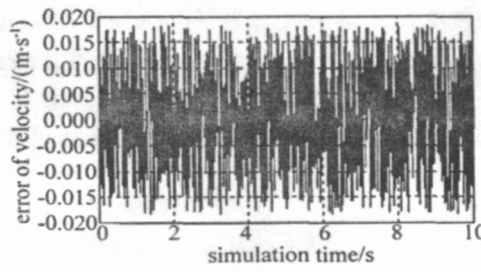


Fig. 6 Error of simulation velocity

Table 1 The contrast between the results that are measured by instrument and by eye

number of glass	values are measured by instrument/(°)	values are measured by eye/(°)
1	48.6	48.5
2	57.0	57.0
3	62.0	61.0
4	44.6	44.0
5	65.2	66.0
6	55.8	56.0
7	59.6	60.0
8	70.4	70.0
9	54.0	55.0

精确度和可靠性。

4 结 论

根据传统的浮法玻璃光学变形的斑马法测量原理,提出了利用莫尔条纹测量斑马角的方法,并设计了测量的光路图;对该仪器进行了实验。实验结果表明,仪器能够分辨玻璃转动 0.2°所引起的变形,仪器的重复性很好且具有良好的线性度,其线性度相对偏差在±2%以内,其平均偏差为 0.87%,大大优于国标所规定的技术指标。

参 考 文 献

[1] POWELL G L. Floating glass thickness measurement on-line [J]. NonContact System Announced Glass International 1989, 25 (12)

(上接第 610 页)

的取样点数 $m = 1000$, 初始速度为 -60m/s , 仿真速度误差为 $[-0.018, 0.018]\text{m/s}$, 如图 6 所示, 与理论误差 $\delta v = 0.017\text{m/s}$ 一致。

5 结 论

用脉冲激光雷达测量目标飞行器的距离、速度和方位信息是切实可行的, 完全能达到空间交会的要求。误差分析表明: 使用模拟插入脉冲计数法进行距离测量精度高, 误差小于 0.01m 。根据距离误差计算 (2) 式可知, 如果增大模数转换器的位数即增加 m 的值, 距离的精度还可以进一步提高。采用最小二乘法来拟合速度所得的速度精度也高, 误差小于 0.02m/s 。根据速度误差的计算 (7) 式和 (8) 式可知, 如果增加采样点数即增大 m 的值, 则速度精度还会更高。随着距离、速度精度的提高方位角及仰角精度也会随之提高。

参 考 文 献

[1] MA T T, WEI Ch X. The development of the space rendezvous measurement technology [J]. Aerospace China 2004, 18 (7): 30 ~ 32 (in Chinese).

61 ~ 65

[2] SHAO H G, MAO Q H, PANG ShH *et al*. Numerical model of stretching process of float glass [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society 2004, 32 (8): 1025 ~ 1028 (in Chinese).

[3] LI D Sh, DONG Sh X. An on-line thickness intelligent measuring instrument for floating process flat glass [A]. The First International Symposium on Measurement Technology Intelligent Instruments Proceeding (ISMTIF 89) [C]. Wuhan: Wuhan University Press, 1989, 392 ~ 399 (in Chinese).

[4] ZHANG Q Y, LI D Sh. Research for large area ribbons' thickness on-line measuring method [A]. The 3rd International Symposium on Measurement Technology Intelligent Instruments Proceeding (ISMTIF 93) [C]. Wuhan: Wuhan University Press, 1993, 1133 ~ 1138 (in Chinese).

[5] CHEN Y, WANG Y L, ZHOU D F. Faint signal processing of lidar based on wavelet multiresolution analysis [J]. Laser Technology 2005, 29 (3): 278 ~ 280 (in Chinese).

[6] WANG Ch, ZI Y, ZHANG G Y *et al*. Analysis of laser measurement for thin-film stress [J]. Laser Technology 2005, 29 (1): 98 ~ 100 (in Chinese).

[7] CHEN Ch H, HUANG Y Q. Image acquisition and data management system in laser cleanroom machine [J]. Applied Laser 2005, 25 (4): 264 ~ 266 (in Chinese).

[8] GUO J, LIU B, LAI H Y. Tracing edge algorithm and application based on binary image [J]. Infrared Technology 2005, 27 (5): 416 ~ 418 (in Chinese).

[9] CHENG L. Optical principle and its development [M]. Beijing Science Technology Press, 1990, 314 (in Chinese).

[10] YU M W, ZHANG J F. Optical holography and information processing [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1984, 31 (in Chinese).

[1] DAI Y J. Laser lidar theory [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 236 ~ 240 (in Chinese).

[3] HE Q Sh, MAO J T. Micro-pulse lidar and its applications [J]. Meteorological Science And Technology, 2004, 32 (4): 220 ~ 224 (in Chinese).

[4] HUO Y J, CHEN Q S, PAN Zh W. Review on time-of-flight measurement of pulsed laser radar [J]. Laser & Infrared 2001, 31 (3): 136 ~ 139 (in Chinese).

[5] ZHANG R J. Semiconductor photoelectricity detector newest progress and newest equip development [J]. The Communication of Integrated Circuit 2004, 22 (9): 24 ~ 30 (in Chinese).

[6] CHEN Y, WANG Y L. Faint signal processing of lidar based on wavelet multiresolution analysis [J]. Laser Technology 2005, 29 (3): 278 ~ 280 (in Chinese).

[7] GUO G J, LI Sh K, HU Y H. Study on the ranging performance of the airborne lidar [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2001, 12 (6): 592 ~ 595 (in Chinese).

[8] WANG F R, ZHAO D X, ZHANG Y. Research of laser spot center space orientation [J]. Laser Technology 2005, 29 (1): 87 ~ 89 (in Chinese).

[9] KUANG C F, FENG Q B, LIU B. Methods for simultaneously measuring three-dimension information by laser [J]. Laser Technology 2005, 29 (3): 322 ~ 324 (in Chinese).