

doi: 10.7690/bgzdh.2016.11.015

# 激光多普勒三维导航系统方案

徐君明<sup>1</sup>, 李 静<sup>1</sup>, 左 斌<sup>2</sup>

(1. 海军航空工程学院七系, 山东 烟台 264001; 2. 装备发展部, 北京 100013)

**摘要:** 为解决激光多普勒测速仪在三维导航应用中存在的问题, 对飞行器在平飞、转弯 2 种状态下的激光多普勒测速问题进行了研究。与现有研究文献中将载体姿态变化视为误差量的研究思路不同, 笔者将飞行器姿态角视为拟求取的状态量, 利用多普勒频移理论建立了相应的激光多普勒导航状态方程, 再通过推导得到了飞行器的速度和姿态解算公式, 实现了飞行器在平飞、转弯 2 种状态下的导航状态解算。仿真结果表明: 飞行器的真实值与估计值基本吻合, 充分验证该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 激光多普勒测速仪; 波束配置; 三维导航

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## Laser Doppler 3D Navigation System Scheme

Xu Junming<sup>1</sup>, Li Jing<sup>1</sup>, Zuo Bin<sup>2</sup>

(1. No. 7 Department, Naval Aeronautical Engineering Academy, Yantai 264001, China;

2. Department of Equipment Development, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to solve existing bottleneck of laser Doppler velocimeter (LDV) in the 3D navigation application, study on the laser Doppler velocity measure problem of aircraft flying in horizontal and turning mode. We treat the attitude angles of aircraft as unknown variables to resolve, which is quite different from the way considering attitude angles as error factors in existing references. Using Doppler's frequency shift theory, the corresponding laser Doppler navigation equations were established, the equation to compute velocity and attitude of aircraft was obtained by deduce, thus the navigating calculation of aircraft in horizontal and turning mode was realized. The simulation results verified the correctness and effectiveness of our method which the aircraft real value is basically meet the estimation value.

**Keywords:** laser Doppler velocimeter; beam configuration; 3D navigation

### 0 引言

激光多普勒测速仪 (laser doppler velocimeter, LDV) 利用运动微粒散射光的多普勒频移来获得被测物体速度信息, 具有精度高、空间分辨率好、测速范围宽、动态性能好以及非接触测量等优点, 在航空、航天、机械、能源等领域得到广泛应用和快速发展<sup>[1-4]</sup>, 是当前速度测量技术的重要发展方向。

笔者对现有文献的研究内容分析后发现<sup>[5-12]</sup>, 当前激光多普勒测速技术的应用仅限于二维运动载体, 造成这一现状的主要原因在于现有激光多普勒测速计算公式中, 将载体的姿态变化作为误差量考虑。对于二维运动载体而言, 通常只有受地形影响导致的姿态变化, 因此姿态变化所导致的测速误差一般不大。但对三维运动载体 (例如飞行器) 而言, 在导航过程中可能需要始终保持一定的姿态, 而且姿态角可能并不是小量, 若仍然采用传统的激光多普勒测速公式必然会导致较大的计算误差。

笔者将对激光多普勒测速技术在三维运动载体导航中的应用进行探索性研究, 通过合理的设计激

光探测波束配置方案, 再利用理论推导, 得到适用于三维导航的激光多普勒测速方法, 进一步拓展激光多普勒技术的应用范围。

### 1 问题描述

笔者以车载激光多普勒测速系统为例, 对基于 Janus 配置的参考光束型激光多普勒测速方案的设计思想和原理进行描述。图 1 为基于双波束 Janus 配置的参考光束型激光多普勒测速原理图。

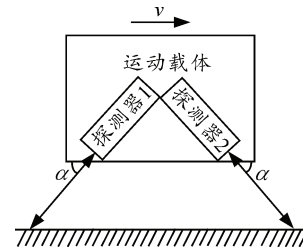


图 1 双波束 Janus 配置的参考光束型激光多普勒测速原理图

图 1 中:  $v$  为载体速度;  $\alpha$  为激光多普勒测速仪相对于载体的波束发射角度。假设  $f_{D1}$ 、 $f_{D2}$  为激光多普勒测速仪所测得的多普勒频移,  $\lambda_c$  为激光波

收稿日期: 2016-07-16; 修回日期: 2016-08-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (43511131K); 总装备部装备预研基金项目 (43511132G)

作者简介: 徐君明 (1978—), 男, 山东人, 硕士, 副教授, 从事弹道导弹指挥与控制系统工程、武器系统建模与仿真研究。

长, 利用激光多普勒测速方程可得载体速度<sup>[2]</sup>为:

$$v = \lambda_c (f_{D_1} + f_{D_2}) / 4 \cos \alpha. \quad (1)$$

然而在实际运行中, 载体经常会遇到路面不平整的情况, 如图 2 所示。

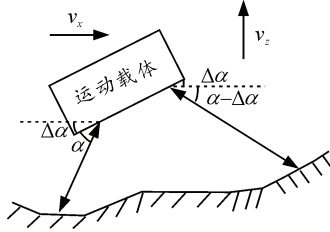


图 2 双波束 Janus 配置测速仪在路面不平时的测速情况

图 2 中  $\Delta\alpha$  为载体因地形变化产生的姿态角,  $v_x$  为载体的水平速度,  $v_z$  为载体的垂直速度,  $f'_{D_1}$ 、 $f'_{D_2}$  为激光多普勒测速仪所测得的多普勒频移, 由此可求得车辆的运行速度<sup>[10]</sup>为

$$v_x = \lambda_c (f'_{D_1} + f'_{D_2}) / 4 \cos \alpha \cos \Delta\alpha. \quad (2)$$

显然, 式(1)为式(2)在车辆平稳运行(即  $\Delta\alpha = 0$ ) 时的特殊情况。从上述双波束 Janus 配置计算原理不难发现, 基于 Janus 配置的方法在路面平整时具有较高的计算精度, 但是当路面存在起伏时, 计算公式会出现一定的误差, 而且这仅仅是车载测速的情况。如果以飞行器作为载体, 采用类似的 Janus 配置技术进行测速, 虽然在空中不会受到地形起伏的影响, 但对于固连在机体的测速装置而言, 当机体姿态改变(例如进行俯仰、滚转运动)时, 产生的俯仰角、滚转角实际上也会带来与车载平台类似的发射倾角变化量  $\Delta\alpha$ , 而且这个角度增量在很多情况下并不是小量, 无法忽略不计; 因此, 传统的适用于车载平台的激光多普勒测速方案将无法在飞行器平台上实现准确测速。

为解决该问题, 笔者尝试转换研究思路: 既然飞行器的姿态变化本身是无法避免的, 能否提出新的波束配置方案, 使得激光多普勒测速系统在对多普勒频移进行测量的同时, 还能对载体的姿态进行估计, 并利用姿态的估计值对载体的速度进行计算。显然, 现有的基于 Janus 配置的测速方案无法实现对载体姿态的估计, 需要提出新的激光多普勒测速设计方案。

在文中的设计中, 将会用到几个常用的坐标系: 地面坐标系( $t$ 系)、载体坐标系( $b$ 系)、测量坐标系( $m$ 系), 与之相对应的 3 个描述飞行器姿态的角度分别是俯仰角  $\vartheta$ 、偏航角  $\psi$  和滚转角  $\gamma$ , 这些坐标系

和姿态角的定义请参考文献[11]。

## 2 激光多普勒测速方案设计

这里先考虑飞行器平飞和转弯 2 种最典型的运动模式。对于普通飞行器而言, 这 2 种模式通常能占到整个飞行过程的 80% 以上。下面将分别对这 2 种模式下的激光多普勒测速方案进行设计。

### 2.1 平飞+倾斜转弯

在平飞+倾斜转弯模式下, 飞行器在纵向平面内俯仰角不为零, 滚转角为零, 由于需要进行倾斜转弯 (slide-to-turn, STT), 偏航角也不为零。偏航角运动不会导致激光波束的角度变化, 但可能会导致侧向速度  $v_z$  的产生; 因此飞行器在  $m$  系下的速度分量  $v_x$ 、 $v_z$  不为零, 纵向速度  $v_y = 0$ , 则平飞模式下飞行器在测量坐标系中的速度矢量为  $\mathbf{v} = [v_x, 0, v_z]^T$ 。

在这种模式下, 笔者提出如图 3、图 4 所示的三波束激光多普勒测速方案: 假设 1、2 号激光多普勒测速仪的安装发射方向与载体  $x_b o z_b$  平面的夹角为  $\alpha$ , 3 号激光多普勒测速仪的安装发射方向与载体  $x_b o z_b$  平面的夹角为  $\beta$ 。为了使符号的表示更加清楚和统一, 这里用  $\Delta\alpha$  表示飞行器的俯仰角, 用  $\Delta\beta$  表示飞行器的滚转角。

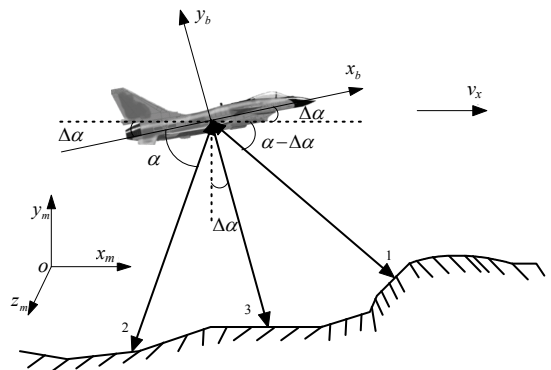


图 3 平飞+倾斜转弯模式下激光测速三波束方案(侧视图)

波束 1 测得的多普勒频率与各状态量的关系为:

$$f_{D_1} = 2v_x \cos(\alpha - \Delta\alpha) / \lambda_c. \quad (3)$$

同理可得波束 2 的多普勒频移方程为:

$$f_{D_2} = -2v_x \cos(\alpha + \Delta\alpha) / \lambda_c. \quad (4)$$

同理可得波束 3 的多普勒频移方程为:

$$f_{D_3} = 2(v_x \sin \beta \sin \Delta\alpha + v_z \cos \beta) / \lambda_c. \quad (5)$$

分别对式(3)、式(4)进行加减运算并整理可得:

$$v_x \sin \Delta\alpha = \lambda_c (f_{D_1} + f_{D_2}) / 4 \sin \alpha; \quad (6)$$

$$v_x \cos \Delta\alpha = \lambda_c (f_{D_1} - f_{D_2}) / 4 \cos \alpha. \quad (7)$$

用式(6)除以式(7)可得：

$$\tan \Delta\alpha = \frac{\cos \alpha (f_{D_1} + f_{D_2})}{\sin \alpha (f_{D_1} - f_{D_2})} \quad (8)$$

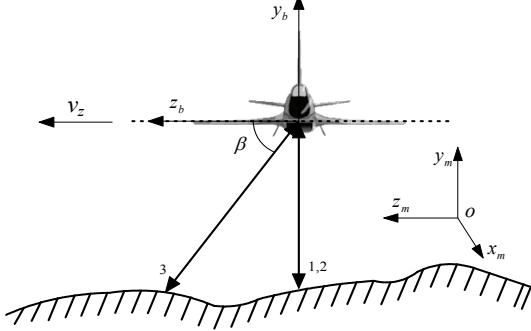


图 4 平飞+倾斜转弯模式下激光测速三波束方案(正视图)

由此可得：

$$\Delta\alpha = a \tan \left( \frac{\cos \alpha (f_{D_1} + f_{D_2})}{\sin \alpha (f_{D_1} - f_{D_2})} \right) \quad (9)$$

用式(6)×sin Δα+(7)×cos Δα，可得：

$$v_x = \frac{\lambda_c \sin \Delta\alpha}{4 \sin \alpha} (f_{D_1} + f_{D_2}) + \frac{\lambda_c \cos \Delta\alpha}{4 \cos \alpha} (f_{D_1} - f_{D_2}) \quad (10)$$

将式(10)代入式(5)可得：

$$v_z = \frac{1}{\cos \beta} \left( \frac{\lambda_c}{2} f_{D_3} - v_x \sin \beta \sin \Delta\alpha \right) \quad (11)$$

以上推导表明：只要通过传感器测得多普勒频移  $f_{D_1}, f_{D_2}, f_{D_3}$ ，再根据已知的波束发射角度  $\alpha, \beta$ ，就可以利用式(9)解算得到平飞+倾斜转弯模式下，飞行器的俯仰角  $\Delta\alpha$ ，再用式(10)和式(11)可进一步得到飞行器在  $m$  系中的纵向和侧向速度  $v_x, v_z$ 。

## 2.2 平飞+滚转转弯

除了前面提到的 STT 转弯，当前飞行器比较常用的是利用滚转运动进行转弯的方式，即所谓的 BTT (bank-to-turn) 转弯方式。在这种模式下，飞行器在纵向上基本保持平飞状态，而且为保证飞行器在纵向上的平稳，通常飞行器的攻角会稍微增大，考虑到这一角度变化并不大，笔者假设飞行器在 BTT 转弯过程中的俯仰角  $\Delta\alpha$  已知且保持不变。

根据上面的假设，可以得到飞行器在平飞+滚转转弯模式下的基本状态：飞行器俯仰角  $\Delta\alpha$ 、滚转角  $\Delta\beta$  不为零，速度分量  $v_x, v_z$  也不为零，而纵向速度  $v_y=0$ 。则平飞+滚转转弯模式下飞行器在测量坐标系中的速度矢量为  $\mathbf{v} = [v_x, 0, v_z]^T$ 。

在平飞+滚转转弯模式下，笔者提出三波束激

光多普勒测速方案配置结构如图 5 和图 6 所示。假设 1、2 号测速仪的安装发射方向与载体  $x_b O z_b$  平面的夹角为  $\beta$ ，3 号测速仪的安装发射方向与载体  $x_b O z_b$  平面的夹角为  $\alpha$ 。

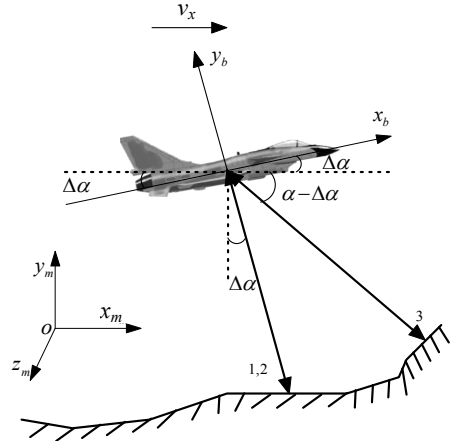


图 5 平飞+滚转转弯模式下测速三波束方案(侧视图)

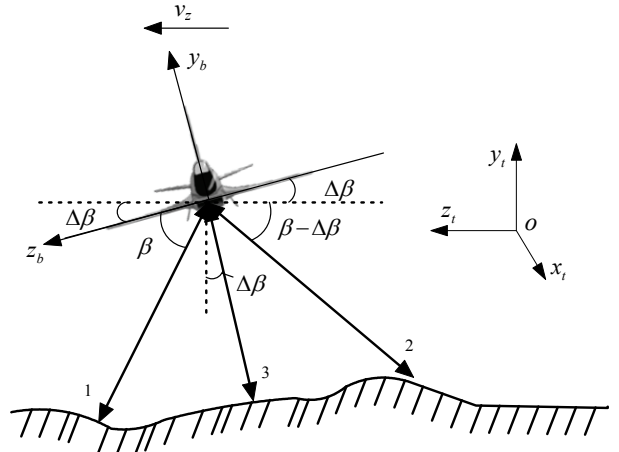


图 6 平飞+滚转转弯模式下测速三波束方案(正视图)

波束 1 测得的多普勒频率与各状态量的关系为：

$$f_{D_1} = \frac{2}{\lambda_c} (v_x \sin \Delta\alpha \sin (\beta + \Delta\beta) + v_z \cos (\beta + \Delta\beta)) \quad (12)$$

同理可得波束 2 的多普勒频移方程为：

$$f_{D_2} = \frac{2}{\lambda_c} (v_x \sin \Delta\alpha \sin (\beta - \Delta\beta) - v_z \cos (\beta - \Delta\beta)) \quad (13)$$

同理可得波束 3 的多普勒频移方程为：

$$f_{D_3} = \frac{2}{\lambda_c} (v_x (\cos \alpha \cos \Delta\alpha + \sin \alpha \sin \Delta\alpha \cos \Delta\beta) - v_z \sin \alpha \sin \Delta\beta) \quad (14)$$

对式(12)和式(13)进行与前面类似的运算，可得：

$$\frac{\lambda_c}{4 \sin \beta} (f_{D_1} + f_{D_2}) = v_x \sin \Delta\alpha \cos \Delta\beta - v_z \sin \Delta\beta \quad (15)$$

$$\frac{\lambda_c}{4 \cos \beta} (f_{D_1} - f_{D_2}) = v_x \sin \Delta \alpha \sin \Delta \beta + v_z \cos \Delta \beta \quad (16)$$

利用式(15)和式(16)可得:

$$v_x = \frac{\lambda_c}{4 \sin \beta \sin \Delta \alpha} (f_{D_1} + f_{D_2}) \cos \Delta \beta + \frac{\lambda_c}{4 \cos \beta \sin \Delta \alpha} (f_{D_1} - f_{D_2}) \sin \Delta \beta \quad (17)$$

$$v_z = \frac{\lambda_c}{4 \cos \beta} (f_{D_1} - f_{D_2}) \cos \Delta \beta - \frac{\lambda_c}{4 \sin \beta} (f_{D_1} + f_{D_2}) \sin \Delta \beta \quad (18)$$

将式(17)、式(18)代入式(14), 整理可得:

$$A \cos \Delta \beta = C - B \sin \Delta \beta \quad (19)$$

其中:

$$A = \frac{1}{2 \sin \beta} (f_{D_1} + f_{D_2}) \cos \alpha \cos \Delta \alpha; \quad (20)$$

$$B = \frac{1}{2 \cos \beta} (f_{D_1} - f_{D_2}) \cos \alpha \cos \Delta \alpha; \quad (21)$$

$$C = f_{D_3} \sin \Delta \alpha - \frac{1}{2 \sin \beta} (f_{D_1} + f_{D_2}) \sin \alpha \sin \Delta \alpha \quad (22)$$

对式(19)两边取平方, 并进行变换可得:

$$(A^2 + B^2) \sin^2 \Delta \beta - 2CB \sin \Delta \beta + (C^2 - A^2) = 0 \quad (23)$$

求解式(23)可得:

$$\Delta \beta = a \sin \left( \frac{CB \pm |A| \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{A^2 + B^2} \right) \quad (24)$$

$\Delta \beta$ 的具体计算值应根据飞行器的实际情况, 利用条件 $\Delta \beta \in (-\pi/2, \pi/2)$ 进行判断。

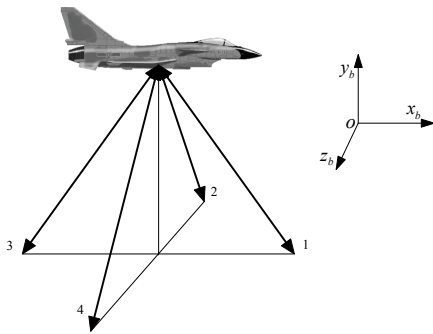


图 7 基于 Janus 配置的四波束多普勒测速方案

至此, 得到了飞行器在 2 种飞行模式下的激光多普勒波束配置方案及速度、姿态角解算公式。

考虑到不同飞行模式下的配置方案及计算公式稍有区别, 为了适应飞行器不同的飞行模式, 在实际应用中, 综合为如图 7 所示的四波束 Janus 配置方案。显然, 这种四波束的配置方案既能满足平飞+倾斜转弯模式的三波束测速需求, 也可以满足平飞+滚转模式的三波束测速需求, 只需根据飞行器

的实际情况, 采用相应的公式进行计算即可。

### 3 数值仿真

笔者拟通过对某飞行器进行六自由度仿真, 得到适合不同配置方案的特征轨迹, 并基于所设计的特征轨迹对配置方案和算法的正确性进行验证, 下面将分别针对 2 种模式进行仿真分析。

根据图 7 所示四波束配置方案, 在飞行器上安装 4 个激光多普勒测速仪, 其安装角度为  $\alpha = \beta = 45^\circ$ 。假设激光器所发射激光束的波长为 532 nm。设定仿真步长为  $T=0.01$  s, 仿真时间将根据实际情况确定。

#### 3.1 平飞+倾斜转弯模式

对于平飞+倾斜转弯模式, 设计了一段 300 s 的飞行轨迹, 该飞行轨迹的特征如表 1 所示。

表 1 平飞+倾斜转弯模式对应的特征轨迹描述

时间段/s	俯仰通道	偏航通道	滚转通道
0~100	5 km 高度平飞	无偏航	无滚转
100~200	5 km 高度平飞	左偏航	无滚转
200~300	5 km 高度平飞	右偏航	无滚转

利用所提出的激光多普勒测速方案得到的仿真结果如图 8~图 10 所示。图 9 和图 10 分别为飞行器水平速度  $v_x$  和侧向速度  $v_z$  的估计值。经对比可见: 速度的估计值与真实值基本吻合, 俯仰角  $\Delta \alpha$  估计误差对速度估计的影响基本可以忽略不计。仿真结果充分验证了所提出设计方案和计算公式的正确性。

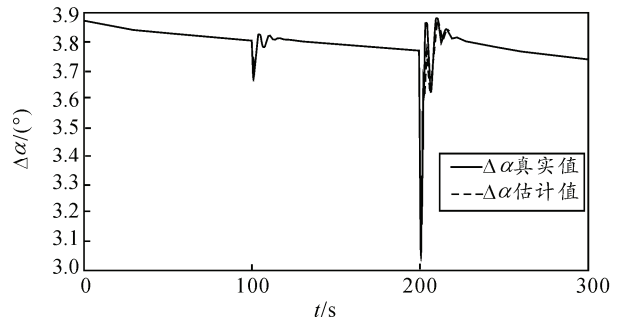


图 8 平飞+倾斜转弯模式  $\Delta \alpha$  估计值与真实值对比

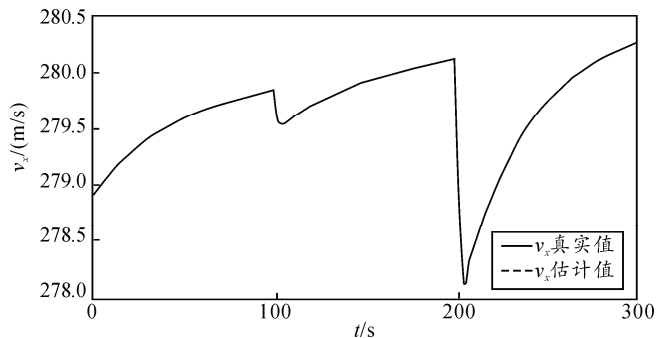


图 9 平飞+倾斜转弯模式下  $v_x$  估计值与真实值对比



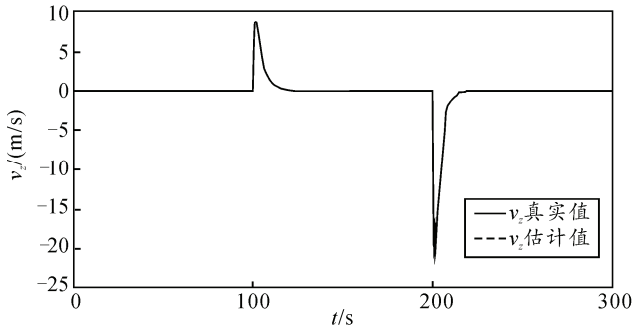


图 10 平飞+倾斜转弯模式下  $v_z$  估计值与真实值对比

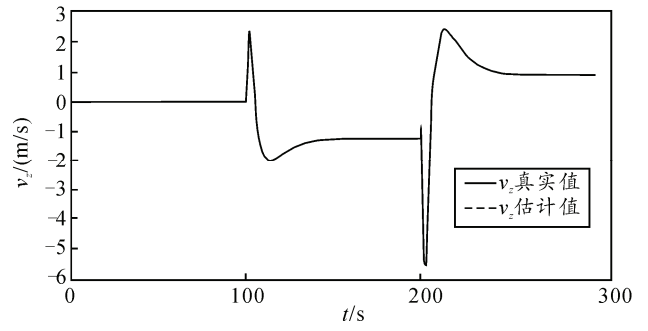


图 13 平飞+滚转转弯模式下  $v_z$  估计值与真实值对比

### 3.2 平飞+滚转转弯模式

对于平飞+滚转转弯模式，笔者也设计了一段 300 s 的飞行轨迹，该飞行轨迹的特征如表 2 所示。

表 2 平飞+滚转转弯模式对应的特征轨迹描述

时间段/s	俯仰通道	偏航通道	滚转通道
0~100	5 km 高度平飞	无偏航	无滚转
100~200	5 km 高度平飞	无偏航	左滚转
200~300	5 km 高度平飞	无偏航	右滚转

利用所提出的激光多普勒测方案得到的仿真结果如图 11~图 13 所示。仿真结果表明：利用所提出公式能够对  $\Delta\beta$ 、 $v_x$ 、 $v_z$  进行准确估计，充分验证了所提出设计方案和计算公式的正确性。同样地，在飞行器的滚转角指令转换过程初期也存在一定的动态变化，从而导致短时间内对各状态量的估计存在一定的误差，但总体估计精度能够满足要求。

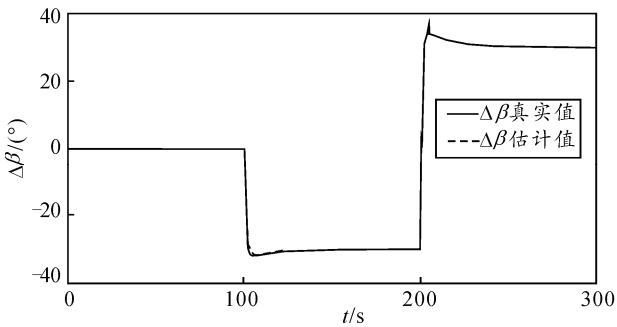


图 11 平飞+滚转转弯模式下  $\Delta\beta$  估计值与真实值对比

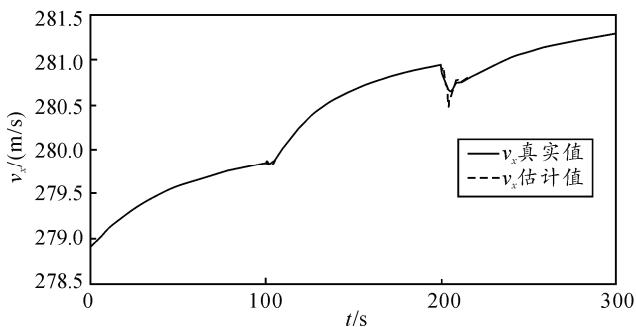


图 12 平飞+滚转转弯模式下  $v_x$  估计值与真实值对比

## 4 结束语

与现有研究文献的建模思路不同，笔者将载体姿态视为拟求取的状态量，通过引入新的波束并建立数学模型，在一定假设的基础上实现了对载体姿态的解算，从而进一步得到飞行器在三维空间中的速度，实现了当前基于激光多普勒测速仪的导航解算方法所不能实现的三维导航信息解算。

对某飞行器的六自由度仿真结果表明：飞行器的真实值与估计值基本吻合，充分验证了所建立数学模型和所给出解算公式的正确性和有效性。

## 参考文献：

- [1] Snyder J. Doppler velocity log (DVL) navigation for observation-class ROVs[J]. IEEE Oceans, 2010: 1-9.
- [2] 范哲, 张春熹, 欧攀, 等. 车载三波束多普勒激光雷达波束配置研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 2-14.
- [3] 聂晓明, 周健, 魏国, 等. 分光再利用型激光多普勒测速仪及其与捷联惯导组合导航[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(4): 510-513.
- [4] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 1-6.
- [5] 李亮. SINS/DVL 组合导航技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011: 65-68.
- [6] 刘帆, 金世龙, 周健. 自适应滤波技术在激光多普勒测速仪中的应用[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 570-574.
- [7] 周健, 龙兴武. 用于车载自主惯导系统的激光多普勒测速仪[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1316-1321.
- [8] 周健, 龙兴武. 频谱分析型激光多普勒测速仪信号处理技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(8): 1865-1869.
- [9] 周健, 龙兴武. 基于 Janus 配置的激光多普勒测速仪[J]. 光电子与激光, 2011, 22(2): 266-271.
- [10] 周健. 用于车载自主导航激光多普勒测速仪的初步研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 41-46.
- [11] 吕召鹏. SINS/DVL 组合导航技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011: 31-33.
- [12] 周金男, 邬战军, 范哲, 等. 车载激光多普勒测速仪的卡尔曼滤波算法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 106-111.