

逆合成孔径激光雷达空间目标成像研究

王晨阳, 杨进华, 刘智超, 姜成昊
(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:空间目标的运动模式综合了直线飞行和绕轴旋转两种运动,逆合成孔径激光雷达对其成像时要进行直线运动补偿。补偿过程中使用的目标飞行速度,可以由外差接收模式测得。这种方法不仅准确、快速,而且比过去使用的速度估计法精度更高。阐述了对空间目标外差测速、运动补偿、重构成像的原理,并使用 MATLAB 分别对外差测速法和速度估计法的成像效果进行了仿真和对比,证实了外差测速法具有成像分辨率高、信息处理量小、运算速度快等优势。

关键词:逆合成孔径激光雷达;外差探测;空间目标成像;平动补偿;速度估计

中图分类号:TN957 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.002

Research of ISAIL imaging for space targets

WANG Chen-yang, YANG Jin-hua, LIU Zhi-chao, JIANG Cheng-hao

(Faculty of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract:The moving patterns of space targets include both flying straight and rotation around the axis, it requires linear motion compensation in ISAIL imaging process. The target flight speed used in the compensation process can be measured by heterodyne receiver mode. This method is accurate and fast, it is more accurate than the speed estimating method used in the past. The principle of space target heterodyne velocity measurement, motion compensation and reconstruction imaging are presented. The effect of speed estimation method and heterodyne velocity measurement method are simulated and compared by MATLAB. The superiority of heterodyne velocity measurement method is confirmed, such as higher imaging resolution, less information processing, faster computing speed and so on.

Key words:ISAIL; heterodyne detection; space targets imaging; motion compensation; speed estimation

1 引言

逆合成孔径激光雷达 (ISAIL, inverse synthetic aperture imaging lidar) 的探测过程是保持雷达不动,发射激光束照射运动目标,使用数据处理的方法,将尺寸较小的真实天线孔径合成一个较大的等效天线孔径。空间目标的运动模式为直线飞行同时伴有自身的绕轴旋转。ISAIL 对其成像的过程如图 1 所示。发射光束经目标反射得到的回波携带着幅值强度、多普勒频率、相位等信息,它们都反应了目标的基本特征。目标直线运动在雷达视线方向上的平动

分量所产生的多普勒频率阻碍了转动分量多普勒频率的提取,进而影响了对目标的重构成像。所以,在回波重构成像时,首先需要对平动分量产生的多普勒频率进行补偿。但是,这种补偿的前提是需要预先知道目标与雷达的相对速度,以往经常使用速度估计的方法,根据估计的速度对回波进行运动补偿。但这种方法不仅误差较大,且信息处理量繁多,不利

作者简介:王晨阳(1988-),女,硕士研究生,研究方向为逆合成孔径激光雷达成像及其仿真。E-mail:xybyc@163.com
收稿日期:2013-08-06

于高分辨率和实时成像的实现。ISAIL 具有一种外差接收模式,可以高精度、实时的测量远距离目标的相对速度。使用该测量结果对目标进行运动补偿,重构成像时可以得到更高的分辨率。

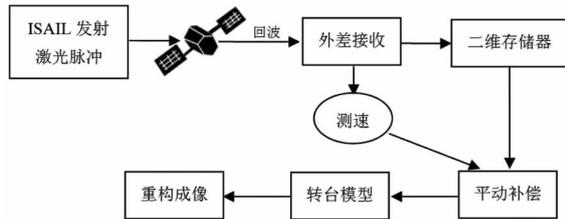


图1 ISAIL 空间目标成像原理图

Fig.1 ISAIL space target imaging schematic

2 ISAIL 的外差测速原理

光频外差探测是基于两束光在光电探测器光敏面上的相干效应。必须采用相干性好的激光器作光源,在接收信号光的同时加入本振光,它的频率与信号光频率极为接近,使本振光和信号光在光电探测器的光敏面上形成拍频信号。只要光电探测器对拍频信号的响应速度足够高,就能输出中频光电流,从而检测出信号光中的调制信号^[1]。

逆合成孔径激光雷达的发射信号为线性调频脉冲信号,它可以表示为^[2]:

$$F(\hat{t}) = E \cdot \exp(j2\pi f_0 t) \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp(j\pi K_r \hat{t}^2) \quad (1)$$

其中 f_0 为激光发射载频; t 为时间变量。脉冲内时间 $\hat{t} = t - n \cdot \text{PRT}$ 称为快时间; T_p 为脉宽; PRT 为发射脉冲重复周期; K_r 为发射线性调频信号的调频斜率。

设置外差接收的延迟参考时间 $t_{ref} = 2R_{ref}/c$ 。将经过该延迟时间的信号作为外差接收的本振信号,由式(1)可得 ISAIL 的本振信号为:

$$L(\hat{t}) = E_L \cdot \exp[j2\pi f_0 (t - t_{ref})] \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_{ref}}{T_{ref}}\right) \cdot \exp[j\pi K_r (\hat{t} - t_{ref})^2] \quad (2)$$

其中, T_{ref} 为本振信号脉宽。经过外差接收装置后,回波信号 $S_n(\hat{t})$ 与本征信号在光电探测器上叠加。将信号的检测限制在差频的通带范围内,可以建立以 Δf 为中心频率的带通滤波器,将直流分量滤去,得到中频信号的交流分量为:

$$I = \alpha E_L E_S \cdot \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \Delta t}{T_p}\right) \cos[2\pi \Delta f (\hat{t} - t_{ref}) + \Delta \phi] \quad (3)$$

由上式可以看出,接收信号是一个含有振幅、频率和相位等特征的,关于时间的一维电流函数。

每一个接收到激光脉冲,都被写入到 ISAIL 存储器的一行中。随着目标的移动,越来越多的脉冲从发射器中发出,相应的回波信号按行被连续写入存储器,直到最后一个回波能量到来后,结束采样。其存储形式如图 2 所示。每一行的起始时间相对于脉冲发射时间都有一个固定的时间延迟 T ,所以,同一列中每个采样至传感器的距离都是相等的^[3]。

式(3)中差频量为:

$$\Delta f = K_r (\Delta t - t_{ref}) = K_r \left(\frac{2R}{c} - \frac{2R_{ref}}{c} \right) = K_r \frac{2\Delta R}{c}$$

该量与雷达和目标之间的距离成正比关系,在成像带宽 $\Delta r = R_{max} - R_{min}$ 内,不同的距离对应着不同的 Δf 。由此便可求出不同各脉冲之间目标相对于雷达距离的变化,进而可以得到目标运动的速度。

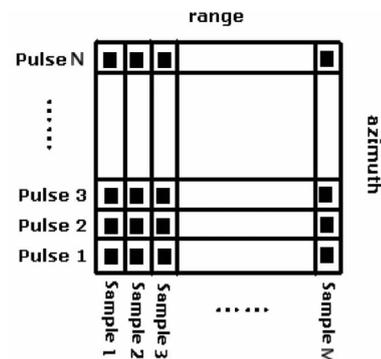


图2 ISAIL 二维存储示意图

Fig.2 ISAIL two-dimensional memory diagram

3 空间目标重构算法研究

空间目标的运动特征是:同时包含直线飞行和自身绕轴旋转两种运动。ISAIL 的反射回波中包含着相对运动产生的多普勒频率 f_d ,它与目标运动速度 v 的关系可表示为:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \quad (4)$$

不同的多普勒频率对应着不同运动速度的目标点。根据这个原理,可以在回波中区分目标上的各个不同点。

空间目标的直线运动可以分解成平动分量 and 转动分量。如图 3 所示,从 A 点运动到 B 点的目标,可等效分解为:目标从 A 点运动到 C 点,然后旋转 θ 角。A 到 C 的运动为平动分量,在这个过程中,所有的点在雷达视线方向上的运动速度一致,产生的多普勒频率也相同,所以无法用来区分不同的散射点,只有目标相对于参考点的旋转才能产生成像所需要的多普勒频率^[4]。所以,能否对空间目标进行成像,主要取决于能否准确的从目标的回波中提取出

转动分量带来的多普勒频率。这里,采用平动补偿的方法,先通过理论推导出平动分量产生多普勒频率的大小,然后在原始回波信号中将这一部分减去,所得到补偿后的信号即可等效为平面转台模型所产生的回波。

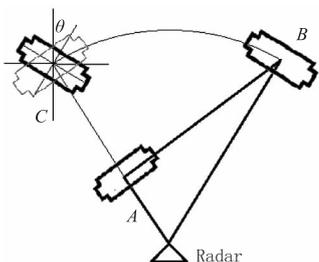


图3 目标相对于雷达运动分解示意图

Fig.3 Decomposing diagram of target's motion respect to the radar

3.1 空间运动目标的平动补偿分析

如图4所示,设目标以速度 $v(t)$ 沿 x 轴做直线运动,雷达处于 $X-Y$ 系中的点 $Q(0, -d)$ 。 $U-W$ 系固定在运动目标上,原点为 O ,它在 $X-Y$ 系中的坐标为 $[x(t), 0]$,其中 $x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$ 。再建立 $X'-Y'$ 系,使其 Y' 轴与雷达视线方向 OQ 重合,并使原点仍为 O 。雷达与 O 间的距离 $OQ = R_0(t)$,目标上任意一点 P 与雷达间的距离 $PQ = R(t)$, P 在 $U-W$ 系中的坐标为 $[u, w]$, d 为目标飞行高度^[5]。

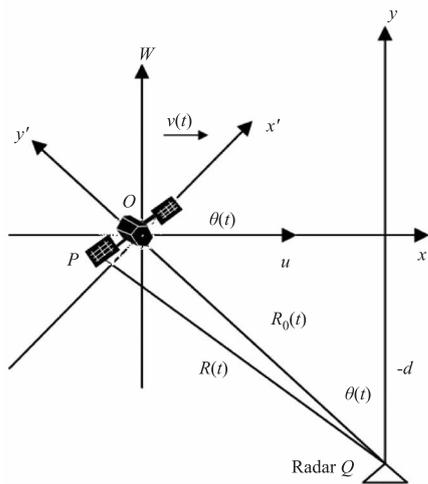


图4 直线运动几何关系

Fig.4 Linear motion geometric relationship

设 P 在 $X'-Y'$ 系中坐标为 $[x'(t), y'(t)]$, 则:

$$R(t) = \sqrt{x'^2(t) + [y'^2(t) + R_0(t)]^2}$$

根据 $U-W$ 系与 $X'-Y'$ 系之间的坐标转换关系,可得:

$$R(t) =$$

$$\sqrt{R_0^2(t) + u^2 + w^2 - 2uR_0(t)\sin\theta(t) + 2wR_0(t)\cos\theta(t)}$$

当雷达与目标间的距离远远大于目标本身尺寸时,即 $R_0(t) \gg$ 目标尺寸,可得近似结果:

$$R(t) \approx R_0(t) - u\sin\theta(t) + w\cos\theta(t) \quad (5)$$

假设目标作匀速直线运动,则 $v(t)$ 为常量, $x(t) = v \cdot t$ 。再根据 θ 在坐标系中的几何关系,可将式(5)转化为 $R(t) = R_0(t) + \frac{uvt}{R_0(t)} + \frac{wd}{R_0(t)}$,再求

$$\text{导,得 } R'(t) = \left[1 - \frac{ux(t)}{R_0^2(t)} - \frac{wd}{R_0^2(t)} \right] R'_0(t) + \frac{uv}{R_0(t)},$$

其中, $R_0^2(t)$ 很大,故 $R(t) \approx R'_0(t) + \frac{uv}{R_0(t)}$ 。

则根据式(4)可得 P 点相对于雷达运动产生的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{2}{\lambda} R'(t) = \frac{2}{\lambda} R'_0(t) + \frac{2uv}{\lambda R_0(t)} \quad (6)$$

可以看出,式(6)中前面一项代表的就是平动分量所产生的多普勒频率,后面一项代表的是转动分量所产生的多普勒频率。前一项中的 $R'_0(t)$ 即为目标在雷达视线方向上的相对速度,它可由前面介绍的外差探测原理测得,发射激光的波长通常情况下都是已知的,所以,平动分量的多普勒频率的大小可以求出。在接收到的原始回波信号中将它减去,所得到补偿后的回波便可以按照转台模型的方法进行重构成像。

3.2 转台模型的分析

如图5所示, $X-Y$ 坐标系的原点为 O ,雷达 Q 与 O 的间距 $QO = R_0$ 。 P 为转台上任意一点,其直角坐标为 (x, y) ,极坐标为 (r, θ) ,绕 O 点转动,其角速度为 $\omega(t)$, $PQ = R(t)$ 。根据余弦定理可求出某一瞬时 PQ 的值为:

$$R(t) = \sqrt{r^2 + R_0^2 + 2R_0r\sin(\theta + \omega(t) \cdot t)}$$

由于空间运动目标的自身尺寸相对于它和地面雷达之间的距离很小,即 $R \gg r$;同时,为了方便分析,将角速度近似看做常量,即 $\omega(t) = \omega$ 。则 PQ 可近似为^[6]:

$$R(t) \approx R_0 + x\cos\omega t + y\sin\omega t \quad (7)$$

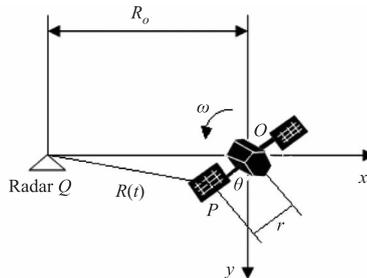


图5 转台模型几何关系

Fig.5 Turntable model geometry relationship

设激光的波长为 λ , 则 P 点相对于雷达的多普勒频率为:

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR(t)}{dt} \approx \frac{2\omega}{\lambda} y \cos\omega t - \frac{2\omega}{\lambda} x \sin\omega t \quad (8)$$

由于激光的脉冲重复频率很高, 采样时间 t 很小, 从而得到近似关系 $\sin\omega t \approx 0, \cos\omega t \approx 1$, 则式(7)、式(8)可分别简化为:

$$R(t) = R_0 + x, f_d = 2y\omega/\lambda$$

从这个结果可以看出, ω, λ 为常量, 不同的 y , 代表不同方位向上的点, 它们对应着不同的多普勒频率, 相同的 y 则对应着相同的多普勒频率, 所以可以根据不同的多普勒频率区分目标方位上的不同点。同样的, 不同的 x 值对应着不同的 R 值, 可以根据不同 R 值来区分目标距离向上的点。

4 仿真结果分析与比较

根据前面所叙述和推导的计算关系, 采用 MATLAB 软件对空间目标进行仿真。设置逆合成孔径激光雷达的系统参数和空间卫星的在轨状态如表 1 所示。

表 1 仿真原始数据

Tab. 1 Simulation raw data

激光信号波长	532 nm
发射 LFM 信号带宽	30 GHz
发射信号脉冲宽度	150ns
发射脉冲重复频率	50kHz
采样频率	$9 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$
卫星相对地面飞行速度	30000km/h
卫星自身旋转角速度	0.015 rad/s
卫星与地面间距	300 km

首先使用理想的卫星模型进行仿真, 其外观如图 6 所示。雷达发射器发射线性调频脉冲, 经过外差接收装置后保存在二维存储器中。假设起始角度为 θ_0 , 相邻两个脉冲转过的角度间隔为 $\Delta\theta$, 二维存储器对一个激光脉冲回波采样 M 次, 一共采样 N 个脉冲, 则每个采样角所对应的角度值为:

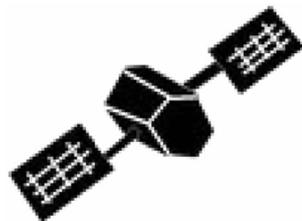


图 6 空间卫星理想外观模型

Fig. 6 Space satellite's ideal appearance model

$$\theta_j = \theta_0 + (j - 1) \Delta\theta, j = 1, 2, 3 \dots M, \text{ 可得回波}$$

矩阵:

$$\begin{bmatrix} S(\theta_1, f_1) & S(\theta_1, f_2) & \dots & S(\theta_1, f_M) \\ S(\theta_2, f_1) & S(\theta_2, f_2) & \vdots & S(\theta_2, f_M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S(\theta_N, f_1) & \dots & \dots & S(\theta_N, f_M) \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, f 为每个回波采样点所携带的多普勒频率。

仿真的过程就是根据逆合成孔径激光雷达的成像原理, 模拟卫星飞行过程中的几何关系, 同时考虑卫星相对于地面的直线飞行和自身绕轴旋转两种运动, 按照矩阵式(9)的形式生成回波信号, 其结果如图 7 所示。图中的每个采样点都携带着卫星综合运动产生的多普勒频率。

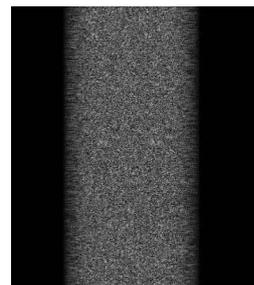


图 7 卫星飞行原始回波(其中包含直线和旋转两种运动)

Fig. 7 Satellite flight original echo

(Contains two movements of linear and rotary)

平动补偿的基本方法是: 以卫星的旋转中心为基准点, 计算出该点在运动中平动分量产生的多普勒频率, 然后令矩阵式(9)中的所有点都依次减去这部分多普勒频率。如前文所提到的, 计算平动分量时, 需要先知道目标的相对速度。以往的处理方法是, 先采用速度估计的方法求出目标的速度, 然后使用该估计速度进行补偿。速度估计的方法有很多, 如最小二乘法, 频域互相关法等, 但不论是哪一种, 都不可避免的与物体实际运动存在误差, 这将直接导致重构图像分辨率降低, 并且还会带来错误的干扰信息。图 8 为使用时域互相关法^[7]估计运动速

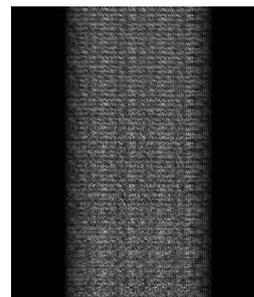


图 8 速度估计法平动补偿后回波

Fig. 8 Speed estimation method motion compensation echo

度后(估计误差约为 $\pm 12.5\%$),对回波进行平动补偿的结果,图 9 为补偿后的重构成像结果。可以看出,在图 9 中,有一部分回波能量并未反映出正确的目标,而是在目标周围形成不规则的散布。这是由于速度的估计误差造成的,它不仅降低了图像的分辨率,使目标的边缘和细节模糊,而且由于在错误成像点的能量损失,目标整体的亮度也有所减弱。



图 9 速度估计法重构图像

Fig. 9 Speed estimated method reconstructive image

ISAIL 的外差接收模式能够准确的测得目标的实时运动速度。文献[8]中通过实验的方法详细的分析了远距离非合作运动目标外差测速的误差,其理论误差不超过 $\pm 2\%$ 。使用该误差下的测量速度进行平动补偿,得到结果为图 10。其重构图像为图 11。可以看到,图 11 的结果照比图 9 的清晰了很多,也显示了目标上更多的细节,证实了使用外差测速的补偿方法确实能够带来更高的成像质量。

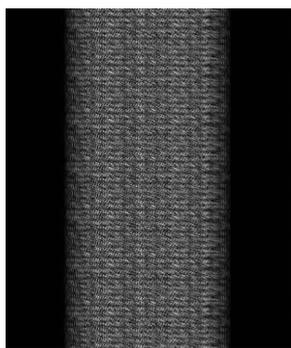


图 10 外差测速法平动补偿后回波

Fig. 10 Heterodyne velocimetry method motion compensation echo



图 11 外差测速法重构图像

Fig. 11 Heterodyne velocimetry method reconstructive image

在通过仿真理想卫星模型得出结果的基础之上,进一步对实际的卫星进行模拟。图 12 为一颗实

际人造卫星在太空背景下的运行图。沿用前面的步骤对其进行 ISAIL 成像模拟,仿真数据依然采用表 1 中的数值。在考虑外差测速误差的情况下,得到实际卫星的运动补偿重构图如图 13 所示。可以看到,在实际卫星情况下,卫星细节并没有理想模型中呈现的那么清晰,但基本还是很好的反应了卫星的外观特征。



图 12 实际人造卫星

Fig. 12 Actual satellite



图 13 实际卫星外差测速法成像图

Fig. 13 Actual satellite heterodyne velocimetry method image

为了方便对比,再采用速度估计法对该实际卫星进行成像模拟,得到结果为图 14。实际卫星在速度估计法下的重构图像比理想模型更为模糊,几乎只能辨认大体轮廓,许多分离结构如天线等都已连成一片无法分辨。造成这种现象的原因是:运动物体相对越细小的部位对速度越敏感,在运动补偿时对使用的速度精度要求越高。在这种情况下,速度估计的精度已经无法达到补偿的要求了。

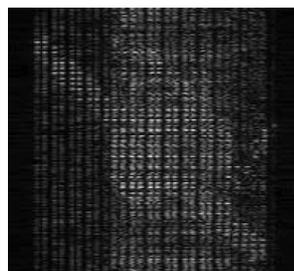


图 14 实际卫星速度估计法成像图

Fig. 14 Actual satellite speed estimation method image

另外还需要指出的是,速度估计的补偿方法涉及到矩阵的卷积,求逆,相关等运算,计算量十分巨大,回波数据处理时间长,对计算机系统要求也较高,难以实用于实时的成像系统。而外差测速最初

利用的是光学的相干原理,成像时计算量会比速度估计法小很多,数据处理时间比较短,对计算机配置要求也相对较低,可以应用于实时的测量。

5 结 论

空间目标的运动可以分解为平动分量和转动分量。平动分量对 ISAIL 的成像没有贡献,需采用平动补偿算法将其补偿掉,而在平动补偿前须先获取目标的运动速度。以往的速度估计补偿方法误差较大,数据处理时间长,计算机系统要求高,成为了高质量、实时成像的瓶颈。逆合成孔径激光雷达的外差接收模式可以测得实时、精确的速度,并且数据处理量小,成像精度高,利于高分辨、实时成像的实现。另外,如果 ISAIL 测量的是某些不规则的运动目标,速度估计的方法将很难得到准确的速度值,而外差方法根据的是光学相干原理,无论目标的运动模式如何,都不影响其测速的准确性。将外差测速的数据应用于 ISAIL 的各种运动补偿中,不失为测量更多不规则运动目标的新思路。

参考文献:

- [1] Yu Xiangju. Study on optical heterodyne detection for synthetic aperture radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2011. (in Chinese)
于香菊. 合成孔径激光雷达中光外差探测技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2011.
- [2] Zhang Wenrui. Study on optical heterodyne detection in synthetic aperture radar technology[D]. Xi'an: Xidian University, 2009:7-8. (in Chinese)
- [3] Ian G cumming, Frank H wong. Digital processing of synthetic aperture radar data: algorithms and implementation [M]. London: Artech House Publishers, 2005:95.
- [4] Zhang Yanfei. Echo simulation technology of ISAR[J]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2010. (in Chinese)
张燕飞. 逆合成孔径雷达回波模拟技术[D]. 南京:南京理工大学, 2010.
- [5] Fei Zhiting. Study of ISAR imaging for maneuvering target [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006:12-15. (in Chinese)
费燕婷. 机动目标的逆合成孔径雷达成像研究[D]. 成都:电子科技大学, 2006:12-15.
- [6] Zhang Zhizhong. SAR, ISAR and imaging radar [R]. 1986:119-121. (in Chinese)
张直中. 合成孔径、逆合成孔径和成像雷达[R]. 1986:119-121.
- [7] Wang Shaojiang. Study of the signal processing system of frequency step radar seeker[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2007:22-24. (in Chinese)
王绍江. 频率步进雷达导引头信号处理系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007:22-24.
- [8] Zhang Heyong, Peng Shuping, Zhao Shuai. Experimental research of heterodyne velocity measurement for non-cooperative rotatable target [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(3):784-790. (in Chinese)
张合勇, 彭树萍, 赵帅. 非合作转动目标相干测速实验研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3):784-790.