

文章编号: 1001- 2486(2010) 06- 0026- 06

宽带单脉冲雷达实测数据三维成像的平面视觉形态表示*

高磊, 黄小红, 陈曾平

(国防科技大学 ATR 重点实验室, 湖南长沙 410073)

摘要: 针对宽带单脉冲雷达实测数据三维成像结果难以直观表示的问题, 研究了平面视觉形态表示方法。所谓平面视觉形态, 是指用设想的人眼沿着雷达波束方向观测得到的目标结构向适当平面的投影。为获得波束依赖平面视觉形态表示, 给出了从实测数据中计算雷达波束方向的方法并从目标尺寸准确估计的角度分析了获取雷达波束方向的必要性, 在确定波束方向的基础上, 根据投影平面确定新的坐标系, 并给出了从雷达观测坐标系到新坐标系的坐标旋转方法。给出了某民航飞机实测数据三维成像处理结果在雷达观测坐标系中的投影表示和新坐标系中的平面视觉形态表示, 通过两种表示的对比分析, 显示了平面视觉形态表示对特征提取的价值。

关键词: 实测数据; 宽带单脉冲雷达; 三维成像; 平面视觉形态; 坐标旋转

中图分类号: TN911 文献标识码: A

Denotation by Visual Modality in Plane for Three-dimensional Imaging with Real Data of Broadband Monopulse Radar

GAO Lei, HUANG Xiaohong, CHEN Zengping

(ATR Key Laboratory, Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to solve the problem that three-dimensional imaging result with real data of broadband monopulse radar cannot be displayed directly, an expressive method using visual modality in plane was studied. The visual modality in plane is the projection of target structure which was obtained by hypothetical people's eyes when they observed target according with direction of radar beam. In order to obtain the expression with visual modality in plane, firstly, the method for calculating direction of radar beam from real data was given and the necessity for obtaining the beam direction was analyzed by considering the exact estimation of target's size. Secondly, under the basis of having obtained the direction of beam, a new reference frame was formed according to the plane for projection and the method of coordinate rotation from reference frame in radar observation to new reference frame was also presented. In the end, three-dimensional imaging results of some real data for planes in civil aviation were presented with projection in reference frame in radar observation and visual modality in plane in new reference frame respectively, the comparison between two kinds of expression brings forth the value of denotation by visual modality in plane for acquisition of characteristic.

Key words: real data; broadband monopulse radar; three-dimensional imaging; visual modality in plane; coordinate rotation

单脉冲雷达在目标角度测量与跟踪中发挥了重要的作用。国内外在单脉冲雷达理论和应用方面的工作一直在进行^[1-3]。宽带单脉冲雷达将传统的单脉冲雷达加载宽带信号, 使其功能从测角和跟踪延拓到三维成像。在宽带信号观测下, 目标可认为由一系列孤立的散射点组成^[4]。宽带单脉冲雷达通过发射宽带信号实现散射点在径向距离上的分辨, 得到散射点的距离信息, 再利用单脉冲测角技术获得散射点偏离波束方向的仰角和方位角信息, 实现目标散射点的三维定位^[4-5]。文献[6-9]分别研究了宽带单脉冲测角、角闪烁抑制、单脉冲三维成像及其改进措施, 文献[10]将宽带单脉冲技术应用到更广泛的场景中。

从已有的宽带单脉冲三维成像算法中得到的目标信息通常包括: 散射点的距离、偏离波束方向的方位角和仰角以及散射点的强度信息。由散射点的距离和方位角、仰角可得到散射点的三维空间位置, 再

* 收稿日期: 2010-09-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61002025)

作者简介: 高磊(1983-), 男, 博士生。

结合散射点的强度信息, 即得到三维成像结果。三维成像结果在二维平面中难以直观显示, 因此通常考虑用平面视觉形态来表示三维成像结果, 所谓平面视觉形态, 是指设想用人眼沿着雷达波束方向观测得到的目标结构向平面的投影。目前三维成像显示中常用的三视图^[11]: 方位-距离平面投影、方位-俯仰平面投影、距离-俯仰平面投影就是一种平面视觉形态表示方式, 这三种投影通常也称之为: 俯视图、后视图、侧视图。

目前的成像方法研究多以仿真数据来验证, 在仿真数据中, 雷达波束方向和观测坐标系之间的相对位置可自由选择, 平面视觉形态表示易于得到。而在实测数据的录取过程中, 由于目标机动使得波束方向不断变化, 而雷达观测坐标系在一次数据录取过程中是固定的, 从而使得波束方向与坐标轴难以重合。因此, 为了依然能够方便地实现三维成像的平面视觉形态表示, 需要为实测数据的三维成像结果寻找一个合适的坐标系, 使得在新的坐标系下, 仍可用向坐标平面投影的方法得到三维成像的平面视觉形态表示。

由平面视觉形态的含义, 雷达波束方向的获得是平面视觉形态表示的前提。下面的分析首先给出从实测数据中计算波束方向的方法, 并分析获取雷达波束方向的必要性。在获得波束方向的基础上, 确定新观测坐标系, 并给出从雷达观测坐标系到新坐标系的坐标变换方法, 以方便地获得平面视觉形态表示。

1 宽带单脉冲雷达三维成像的基本原理

宽带单脉冲雷达三维成像主要的基本原理是宽带单脉冲测角。一般的单脉冲雷达的测角方式主要有比幅式和比相式^[9]。比幅式测角原理可表示为:

$$\frac{\Delta}{\Sigma} = \mu \cdot \theta \quad (1)$$

其中 Σ 、 Δ 分别为和、差通道的幅度, $\mu = F'(\theta_0)/F(\theta_0)$ 为雷达系统的角误差斜率, θ_0 为其波束宽度, $F(\theta)$ 为天线方向图, 可通过对雷达系统测试得到, θ 是待测量的偏离波束方向的角度(以下简称“偏角”)。偏角的方向利用数字比相技术确定^[8]。

考虑宽带情况下的测角^[8], 雷达信号为线性调频信号: $s(t) = A \exp[j2\pi(f_c t + Kt^2/2)]$, $0 \leq t \leq T$, 其中 A 为信号的幅度, f_c 为载频, K 为调频斜率。后向散射回波经 Stretch 处理后^[4], 和、差通道中频信号可表示为:

$$s_{IF} = \sum_{i=1}^M \alpha_i F_X(\theta_i) \exp\left\{j2\pi\left[f_c(t_{di} - t_0) + Kt(t_{di} - t_0) - K(t_{di}^2 - t_0^2)/2\right]\right\} \quad (2)$$

其中 $F_X(\theta) = F_\Sigma(\theta)$ 或 $F_\Delta(\theta)$ 对应和通道或差通道, $F_\Sigma(\theta)$ 、 $F_\Delta(\theta)$ 分别为和、差通道方向图函数。 α_i 、 θ_i 、 $t_{di} = 2R_i/c$ 、 R_i 依次为第 i 个散射点散射强度、偏角、回波延时、到雷达的距离。 $t_0 = 2R_0/c$ 为参考信号延时。

对(2)式进行快速傅立叶变换, 得到和、差通道的一维距离像, 从一维距离像中得到散射点在径向上的距离, 实现距离分辨。

比较相同径向距离上的散射点在和、差通道一维距离像中幅度信息, 结合方向图信息($F_\Sigma(\theta_i)/F_\Delta(\theta_i)$ 在 θ_i 为小角度的情况下, 可近似成(1)式中的 μ 的表达式), 可计算散射点偏角, 即实现宽带单脉冲测角。用上述宽带单脉冲测角方法测量目标散射点偏离波束方向的仰角和方位角, 结合距离信息, 确定散射点的空间位置, 再结合散射强度信息, 构成了目标的三维图像, 这便是宽带单脉冲三维成像的原理。

2 雷达波束方向的确定及其在目标尺寸准确估计中的必要性

2.1 雷达波束方向的确定

工程中的宽带雷达系统通常辅以窄带系统进行目标搜索, 引导宽带系统将波束指向合适的区域, 宽

窄带脉冲交替发射。在窄带系统确定目标方位后,再用宽带系统观测目标,获得包含目标信息的宽带回波。因此,可通过计算窄带回波数据中的目标坐标信息来计算宽带雷达波束的方向。窄带脉冲的回波数据会记录下每个时刻的目标坐标值,表1便是某窄带雷达跟踪测量的部分数据。

表1 窄带回波数据(部分)

Tab. 1 Data of narrowband echo (segment)

序号	探测周期计数	...	主通道本地直角坐标值 X	主通道本地直角坐标值 Y	主通道本地直角坐标值 Z
89	313 090	...	- 39 612	1376	2257
90	313 091	...	- 39 611	1376	2258
91	313 092	...	- 39 611	1376	2258

建立雷达观测坐标系。实际的雷达观测坐标系通常选择竖直方向为 OY 轴方向,在地面上选择某个方向(正北或正东)为 OX 轴方向,按照 OX, OY, OZ 轴构成右手系的准则确定 OZ 轴,如图1所示。在上述雷达观测坐标系下,波束方向 OB 的方向为 (ϕ, θ) , ϕ 和 θ 分别为轴线的方位角和仰角。在图1坐标系下,设窄带数据中的点目标的 X, Y, Z 坐标分别为 x_0, y_0, z_0 , 则:

$$\theta = \arccos \left(\frac{y_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \right);$$

$$\phi = \begin{cases} \arcsin \left[\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \sin \theta} \right] & x_0 \geq 0 \\ \pi - \arcsin \left[\frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \sin \theta} \right] & x_0 < 0 \end{cases} \quad (3)$$

由(3)式,可根据窄带回波数据中的坐标信息计算波束方向。

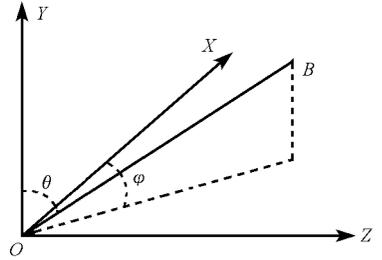


图1 雷达观测坐标系
Fig. 1 Observation reference frame of radar

2.2 在目标尺寸准确估计中的必要性

考虑波束方向如图1中的 OB 所示,设两个散射点 $P_1(R_1, \Delta\phi_1, \Delta\theta_1)$, $P_2(R_2, \Delta\phi_2, \Delta\theta_2)$, R_1, R_2 为散射点到雷达的距离, $\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ 为方位上偏离轴线的角度, $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 为仰角上偏离轴线的角度。下面计算 P_1, P_2 之间的距离 d 。先考虑 $R_1 = R_2 = R$ 的特殊情况,即两个散射点同在距离雷达为 R 的球面上。

利用两个散射点在坐标系 $OXYZ$ 中的直角坐标,距离 d 满足:

$$d^2 = R^2 [\sin(\theta + \Delta\theta_1) \cos(\phi + \Delta\phi_1) - \sin(\theta + \Delta\theta_2) \cos(\phi + \Delta\phi_2)]^2 + R^2 [\cos(\theta + \Delta\theta_1) - \cos(\theta + \Delta\theta_2)]^2 + R^2 [\sin(\theta + \Delta\theta_1) \sin(\phi + \Delta\phi_1) - \sin(\theta + \Delta\theta_2) \sin(\phi + \Delta\phi_2)]^2$$

$$= 2 \times R^2 [1 - \sin(\theta + \Delta\theta_1) \sin(\theta + \Delta\theta_2) \cos(\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2) - \cos(\theta + \Delta\theta_1) \cos(\theta + \Delta\theta_2)] \quad (4)$$

如果 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$, 则 $d^2 = 2 \times R^2 [1 - \cos(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)]$, 则 d 只决定于 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 之差,与轴线方向 (ϕ, θ) 无关。但 $\Delta\phi_1 = \Delta\phi_2$ 并不总是成立的,如果 $\Delta\phi_1 \neq \Delta\phi_2$, 则 d 受轴线仰角 θ 的影响。以上分析是在两个散射点在同一个小球面上的情况,对于两个散射点不在同一个球面的情况,则距离 d 与波束方向的关系会更加复杂。根据上述分析,两个散射点之间的距离与轴线的方向是存在关系的,故目标的尺寸估计结果与轴线方向有关,为了获得目标尺寸的准确估计,确定波束方向是必要的。

3 平面视觉形态表示的获得

3.1 新坐标系的选择

比照人眼观测情况,确定雷达观测情况下的投影平面:后视图的投影平面是雷达波束方向的垂面,侧视图的投影平面是由竖直方向与雷达波束方向确定的平面,俯视图的投影平面可由已确定的两个投影平面确定。为了获得平面视觉形态表示的便捷,选择合适的直角三维坐标系,使得上述投影平面是坐标系的坐标平面,同时为了避免坐标系平移,考虑新坐标系的坐标原点与雷达观测坐标系相同,这便是新坐标系的选择准则。

根据坐标系选择准则,后视图投影平面垂直于波束方向,故波束方向 OB 可作为一个坐标轴;侧视

图投影平面是由竖直方向 OY 与波束方向 OB 确定的平面, 记为 \overline{BOY} 。考虑平面 \overline{BOY} 垂线 OC , \overline{BOY} 是投影平面, 故 OC 可作为坐标轴。在 \overline{BOY} 平面中, 选择 OB 的垂线 OA , 使得 OA 、 OB 、 OC 的方向满足右手系, 则 OA 也是一条坐标轴, 从而构成新坐标系 $OABC$ 。三维成像结果向 $OABC$ 的坐标平面投影即得到平面视觉形态表示。

3.2 坐标转换方法

处理实测数据得到的散射点位置信息是它们在雷达观测坐标系 $OXYZ$ 中坐标, 为了方便地得到散射点在新坐标系 $OABC$ 的坐标平面上的投影, 即获得平面视觉形态表示, 需要将散射点坐标从 $OXYZ$ 坐标系转换到 $OABC$ 坐标系。

坐标转换通常包含两部分: 坐标平移和坐标旋转, 因为 $OXYZ$ 和 $OABC$ 的坐标原点相同, 因此, 只需要坐标旋转。又

坐标系的三个坐标轴之间满足右手系关系, 因此, 每次转换只需要考虑其中的两条坐标轴的旋转。这里考虑旋转 OX 、 OY 两条坐标轴使其 OA 、 OB 重合。下面将坐标旋转分两步进行:

第一步: 将 OX 、 OY 旋转到 \overline{BOA} 平面中。

由坐标系 $OABC$ 的确定方法可知 OY 轴在 OA 和 OB 确定的平面 \overline{BOA} 中, 因此, 只需旋转 OX 轴到 \overline{BOA} 中即可。旋转方法如下: 从 OY 轴正向朝负向看过去, 以 OY 轴为旋转轴, 将 OX 轴沿顺时针方向旋转 ϕ 。这样便可得到 $OX'Y'Z'$ ($OX'Y'Z'$) 坐标系, 这样旋转后的 $\overline{X'OY'}$ 平面与 \overline{BOA} 平面重合, 如图 3(a) 所示。在旋转 OX 的同时, OZ 轴也进行了相应的旋转, 且旋转结果与 OC 重合。

设某个散射点 P 在坐标系 $OXYZ$ 中的坐标为 $[x, y, z]^T$, 旋转之后的坐标为 $[x', y', z']^T$, 则两者之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (5)$$

第二步: 在 \overline{BOA} 平面内将 OX' 、 OY' 旋转, 使其分别与 OA 、 OB 重合。

因为是在平面内旋转, 只需考虑旋转 OY' 使其与 OB 重合。旋转方法如下: 从 OZ' 正向朝负向看过去, 以 OZ' 为轴, 将 OY' 轴顺时针旋转 θ , 这样便得到了 $OABC$ 坐标系, 如图 3(b) 所示。

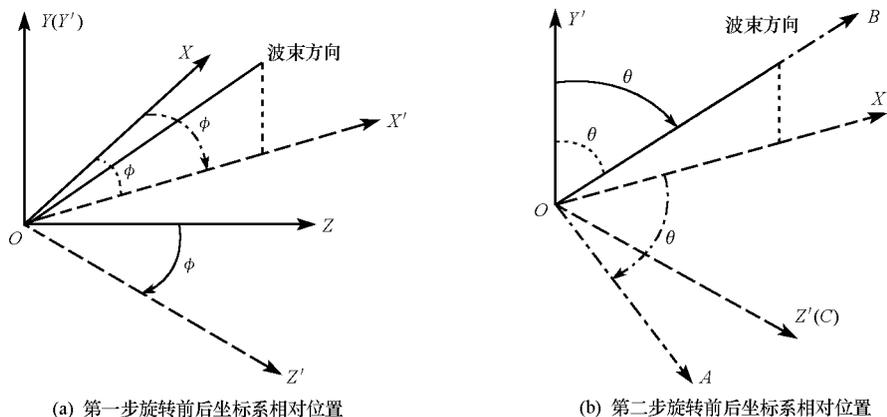


图 3 坐标旋转前后坐标系相对位置 ($OXYZ \rightarrow OX'Y'Z' \rightarrow OABC$)

Fig. 3 Relative position between reference frames fore- and- aft coordinate rotation ($OXYZ \rightarrow OX'Y'Z' \rightarrow OABC$)

与上述旋转过程类似, 设上述散射点 P 在 $OABC$ 中的坐标为 $[a, b, c]^T$, 则其与 $[x', y', z']^T$ 的关系为

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} \quad (6)$$

经上述两步旋转之后,散射点在 $OXYZ$ 坐标系中的坐标便转换为 $OABC$ 坐标系中的坐标。从而可简单地得到散射点在 BOA 平面、 BOC 平面、 AOC 平面内的投影,即侧视图、俯视图和后视图,也即获得了三维成像的平面视觉形态表示。

4 实测数据成像结果的平面视觉形态表示

下面对某民航飞机实测数据进行处理,处理算法采用文献[8]中的方法。根据获得的散射点位置信息,结合散射点的散射强度进行结果显示,用实心圆来表示散射点,用圆的半径来区分散射强弱。首先给出常规表示:将 $OXYZ$ 坐标系下的散射点坐标向 ZOY 平面投影,得到图 4(a)。再给出平面视觉形态表示:将 $OABC$ 坐标系下的散射点坐标向 BOC 平面投影,得到俯视图,如图 4(b) 所示(限于篇幅,其余视图略去)。

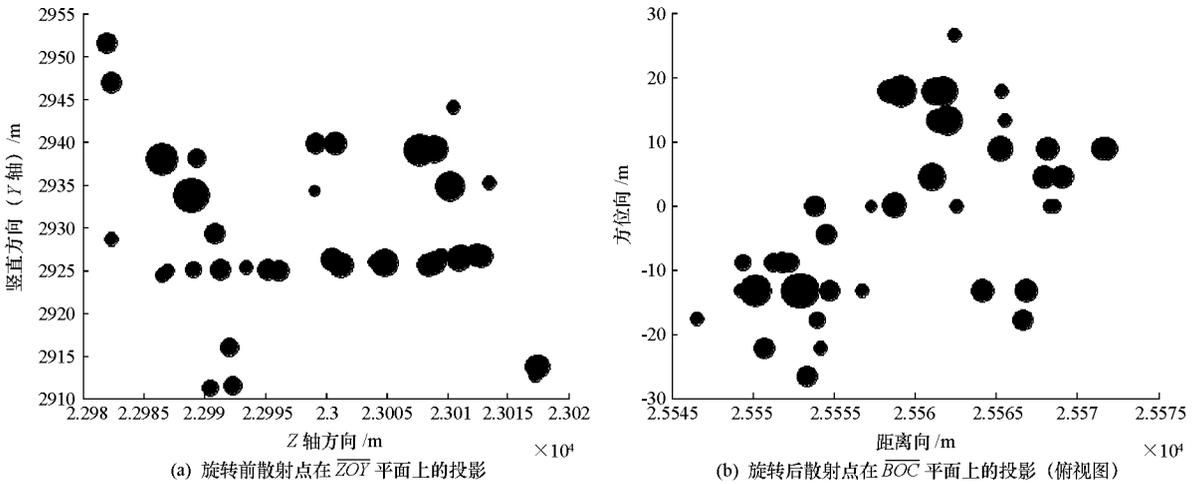


图 4 民航飞机成像结果在雷达观测坐标系中的投影和平面视觉形态表示

Fig. 4 Projection in observation reference frame of radar and denotation by visual modality in plane for the imaging result of plane in civil aviation

对比两种结果可以发现,图 4(a) 的投影未反映与雷达波束方向的关系:图 4(a) 中的 Y 轴是竖直地面的方向,不考虑地面曲率,其坐标可认为是飞机的高度; Z 轴上的坐标,反映了飞机位置在雷达观测坐标系 $OXYZ$ 中的坐标,均与波束方向关系不明显。而图 4(b) 中的坐标均与波束方向有密切联系:首先,距离向坐标反映了飞机在波束方向上的距离;其次,方位向的坐标反映了飞机上的散射点偏离波束方向情况,坐标的正负表明散射点偏离的方向,坐标的绝对值则表明偏离的大小,这均与人眼观测的情况具有类比性。

详细分析俯视图。首先从俯视图中估计出目标的轮廓(点划线)和骨架(实线),如图 5(a) 所示。图 5(b) 给出了雷达录取数据时所摄制的视频录像中截屏得到的目标飞机的图片。比较目标轮廓估计和飞机的形状,可以看出二者有一定程度的相似性。分析图 5(a) 中的目标骨架,可以提取目标的特征参数:结合观测目标为民航飞机的先验信息,图中 W_1 、 W_2 为机翼的两端, H 和 T 则分别表示飞机的头部和尾部, W_1 、 W_2 的坐标分别约为: $(25\ 561, 18)$ m、 $(25\ 568, -19)$ m, 故 W_1 、 W_2 之间的距离约为 37.66m; H 和 T 的坐标约为 $(25\ 573, 8)$ m、 $(25\ 553, -5)$ m, 从而机身的估计长度约为 23.85m, 机翼和机身的长度估计结果均落在飞机参数的正常范围内。这表明平面视觉形态表示有助于便捷的获得具有物理意义的目标特征参数。

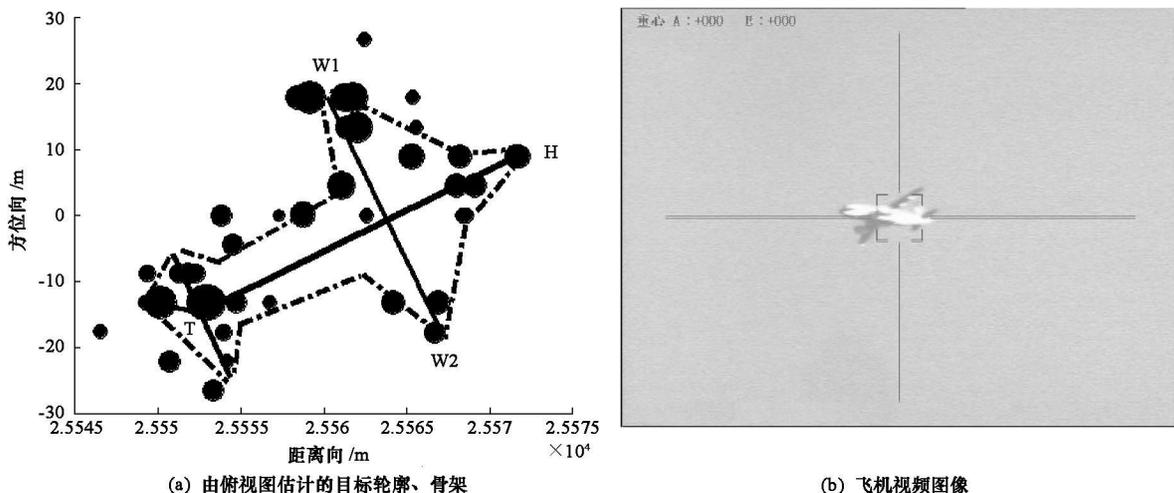


图 5 俯视图轮廓、骨架估计与飞机视频图像

Fig. 5 Estimation of framework and profile from planform and figure of plane from video

5 结束语

本文研究了宽带单脉冲雷达实测数据三维成像结果的平面视觉形态表示问题。针对实测数据处理过程中的情况, 先给出了获取波束方向的方法并从目标尺寸准确估计的角度讨论了获取波束方向的必要性。为了方便地得到三维成像结果的平面视觉形态表示, 根据投影平面确定了新坐标系, 并给出了从雷达观测坐标系到新坐标系的坐标旋转方法。最后给出了以民航飞机为观测目标的实测数据的三维成像结果, 分别给出了在雷达观测坐标系中的平面投影和坐标旋转之后的平面视觉形态表示(俯视图), 对比旋转前后的结果, 体现了平面视觉形态表示的意义。此外, 从俯视图中勾勒出目标轮廓, 与视频截屏得到的飞机图像对比, 具有一定程度的相似性, 从俯视图的骨架估计中估算了飞机的参数, 估算结果均落在飞机的正常参数范围内, 这进一步体现了平面视觉形态表示在目标特征提取中的价值。

参考文献:

- [1] 胡体玲, 李兴国. 单脉冲探测技术的发展综述[J]. 现代雷达, 2006, 28(12): 24- 29.
- [2] Kirkpatrick G M. Development of A Monopulse Radar System [J]. IEEE Trans. on AES. 2009, 45(2): 807- 818.
- [3] Barton D K. History of Monopulse Radar in the US [J]. IEEE Mag on AES, March 2010, INSERT, C1- C15.
- [4] Wehner D R. High Resolution Radar [M]. Boston: Artech House Inc, 1995.
- [5] Zhang X, Willett P K, Bar-shalom Y. Detection and Localization of Multiple Unresolved Extended Targets via Monopulse Radar Signal Processing [J]. IEEE Trans. on AES. 2009, 45(2): 455- 472.
- [6] 李强, 张守宏, 张焕颖, 等. 宽带单脉冲跟踪雷达的最大测角新方法[J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2180- 2184.
- [7] 李保国, 肖怀铁, 付强, 等. 基于 ABA 处理和幅度加权的频率捷变单脉冲雷达角闪烁抑制技术[J]. 国防科技大学学报, 2005, 27(6): 57- 60.
- [8] 胡体玲. 基于高分辨距离像的单脉冲雷达三维成像方法研究[J]. 探测与控制学报, 增刊, 2008(30): 43- 47.
- [9] 张超峰, 刘丹, 程臻. 采用 RELAX 算法提高单脉冲三维成像横向分辨率[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(11): 2063- 2065.
- [10] 吴迪, 朱岱寅, 朱兆达. 机载雷达单脉冲前视成像算法[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(3): 462- 469.
- [11] 李强. 单脉冲雷达目标三维成像与识别研究[D]. 西安电子科技大学, 2007.