

基于时频的逆合成孔径雷达的距离—瞬时多普勒成像方法*

黄小红,姜卫东,邱兆坤,陈曾平

(国防科技大学 ATR 实验室,湖南长沙 410073)

摘要: 为了对机动目标进行 ISAR 成像,以在时间和频域同时具有高分辨率的时频变化替代傅氏变换作谱分析,得到机动目标距离—瞬时多普勒像。实测数据处理结果表明,与直接用距离—多普勒(R-D)算法相比,该方法得到的图像质量有明显提高。

关键词: 逆合成孔径雷达;机动目标;时频分析;Fourier 变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Range-instantaneous Doppler Imaging in ISAR Based on Time-frequency

HUANG Xiao-hong, JIANG Wei-dong, QIU Zhao-kun, CHEN Zeng-ping

(ATR Lab, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to get the ISAR images of maneuvering targets, Fourier transformation is replaced by time-frequency transformation with high resolution in both time and frequency domains. Range-instantaneous Doppler images of maneuvering targets are got. The imaging result using real data shows that this method is better than R-D algorithms.

Key words: ISAR; maneuvering targets; time-frequency analysis; Fourier transformation

传统的 ISAR 成像算法采用距离—多普勒算法(R-D),由于采用快速傅氏变换(FFT),具有速度快的优点,对平稳飞行目标成像时,往往可以得到较为清晰的目标 ISAR 图像,但对运动较为复杂的机动目标成像时,得到的目标 ISAR 图像就会模糊,难以辨识。本文在分析机动目标回波特点的基础上,以时频变换替代傅氏变换进行高分辨成像,真实飞机目标外场实测数据成像结果表明了该方法的有效性。

1 ISAR 成像的基本原理

雷达与目标的空间关系如图 1 所示,目标以 O 为旋转中心, Y 轴和 X 轴固定在目标上, X 轴为方位轴, Y 轴为雷达视线方向。 X 轴和 Y 轴所在的平面为成像平面。假设不存在目标和雷达之间的平动分量,目标以均匀角速度作旋转运动,雷达与目标旋转中心之间的距离为 r_a ,目标绕 O 点旋转的角频率为 ω 。在起始时刻目标上某点 (r_0, θ_0, z_0) 到雷达的距离为:

$$r = [r_0^2 + r_a^2 + 2r_0 r_a \sin(\theta_0 + \omega t)]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

当雷达与目标之间的距离远大于目标的几何尺寸时,可得 r 的近似表达式

$$r = r_a + x_0 \sin \omega t + y_0 \cos \omega t \quad (2)$$

$$x_0 = r_0 \cos \theta_0 \quad y_0 = r_0 \sin \theta_0$$

那么,回波信号的多普勒频率可以写成

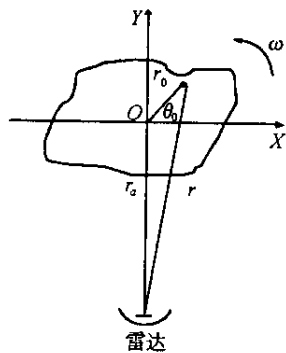


图 1 雷达与目标的空间关系

Fig. 1 Geometry of radar and moving target

* 收稿日期:2002-08-01

基金项目:国家部委基金资助项目(4130304)

作者简介:黄小红(1975—)男,博士生。

$$f_d = \frac{2}{\lambda} \frac{dr}{dt} = \frac{2x_0\omega}{\lambda} \cos\omega t - \frac{2y_0}{\lambda} \sin\omega t \quad (3)$$

其中 λ 为雷达信号波长。通常在 $t = 0$ 附近一个较小时间内对信号进行处理, $\cos\omega t \approx 1$, $\sin\omega t \approx 0$, 则(2)式和(3)式可以近似为

$$r = r_a + y_0 \quad (4)$$

$$f_d = \frac{2x_0\omega}{\lambda} \quad (5)$$

从式(4)式(5)可以看出,通过分析回波信号的距离延时和多普勒频率,散射点(x_0, y_0)的位置参数就能被估计出来。以上推导过程是在假设目标作匀速转动的条件下得到的。当目标作机动飞行时, ω 不再为常数,往往是时变的,而且成像平面也会发生变化,此时多普勒频率 f_d 和散射点方位向上坐标 x_0 的关系就比较复杂,全过程的多普勒频谱不能表明散射点的横向分布。

2 传统的距离-多普勒 ISAR 成像算法的局限性分析

传统的 ISAR 成像算法采用距离-多普勒算法,通过雷达发射大带宽信号获得到径向距离高分辨率,利用多普勒信息得到横向分辨率。在传统的成像方法中采用傅氏变换进行谱分析得到多普勒信息,这就对成像条件作了限制:(1)要得到较高横向谱分辨率,成像需一定的持续时间;(2)在成像时间内目标散射点没有产生距离单元游动;(3)目标平稳飞行,使得各散射点回波多普勒谱为常数。

在目标平稳飞行且速度不是很高的情况下,这些条件一般可以满足。但当目标机动飞行时,运动过程就很复杂,这时各个散射点的多普勒频率变化差异很大,而且是时变的,此外目标散射点还会产生距离单元游动。在不考虑散射点产生距离单元游动的情况下,在对各个散射点进行复杂的运动补偿后,用傅氏变换进行谱分析也可得到清晰的目标图像,但存在散射点产生距离单元游动时,目标图像就会变得模糊。考虑到用傅氏变换进行谱分析得到的是某一段时间内信号所包含的频率,由于目标机动飞行时各散射点回波多普勒谱是时变的,可以用时频变换代替傅氏变换,分析信号不同时刻的频率,从而得到目标的距离-瞬时多普勒像。用时频的方法不仅可以得到清晰的目标图像,而且不需要对各个散射点进行复杂的运动补偿^[1]。

3 Wigner-Ville 分布

原则上任何在时间和频域同时具有高分辨率的时频变换都可以用来替换傅氏变换进行谱分析,本文就以常见 Wigner-Ville(WV)分布来进行距离-瞬时多普勒成像。

Wigner-Ville 分布定义:

$$W_s(t, \omega) = \int s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (6)$$

其中 $s(t)$ 为分析信号。通常一个距离单元包含多个散射点,此时 $s(t)$ 为多分量信号,具有如下形式:

$$s(t) = \sum_{i=1}^p s_i(t) \quad (7)$$

其中 p 为距离单元包含的散射点数,将式(7)代入式(6)中,得

$$W_s(t, \omega) = \sum_{i=1}^p W_{s_i}(t, \omega) + \sum_{i,j=1, i \neq j}^p W_{s_i s_j}(t, \omega) \quad (8)$$

上式中第一项为信号自身项,是对信号进行谱分析所需要的;第二项为交叉项,会对分析结果产生不利影响。为了降低交叉项干扰,可以在式(6)中增加一核函数 $\phi(\theta, \tau)$,使得交叉项减小。当 $\phi(\theta, \tau) = e^{-\theta^2 \tau^2 / \sigma}$ 时得到的分布称为乔伊-威廉斯分布(CWD)^[6]:

$$CWD(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \iint s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \phi(\theta, \tau) e^{-j\theta t - j\tau\omega + j\theta u} du d\tau d\theta$$

为了说明 CWD 对交叉项的抑制作用,以两线性调频信号的和信号为例进行说明。

从图 2 可以看出,信号 WVD 图有明显的交叉项,它位于两自身项之间,而且幅度较强,如果不设法

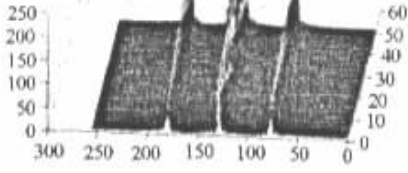


图2 信号 WVD
Fig.2 Signal WVD

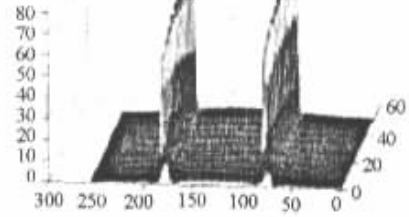


图3 信号 CWD
Fig.3 Signal CWD

消除或减弱就会产生虚假的谱分量,这直接影响到目标图像质量。图3为信号CWD图,可以看出交叉项非常弱,几乎看不出来。

4 实测数据 ISAR 成像

对安-26飞机机动飞行段的实测数据进行了处理,图4是采用距离—多普勒方法成像结果,图像模糊,难以辨识。图5是用CWD作谱分析得到的某时刻的距离—瞬时多普勒图像,图像质量较好。

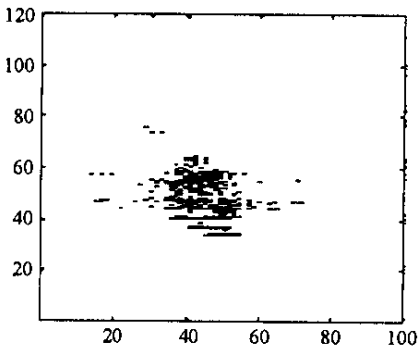


图4 距离—多普勒图像
Fig.4 Range-Doppler image

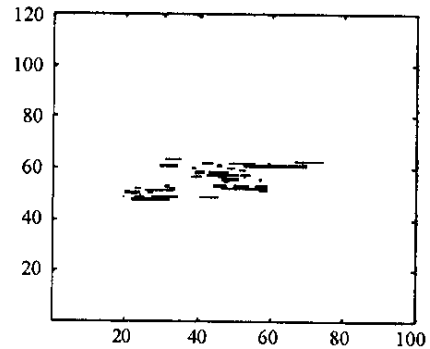


图5 距离—瞬时多普勒图像
Fig.5 Range-instantaneous Doppler image

5 结束语

分析了目标机动飞行的特点,针对传统的ISAR成像算法采用FFT进行谱分析的局限性,以在时间和频域同时具有高分辨率的时频变换代替傅氏变换进行谱分析,得到了较为清晰的目标ISAR图像。

参考文献:

- [1] Chen V C, Qian Shie. Joint Time-frequency Transform for Radar Range-Doppler Imaging [J]. IEEE Trans. AES 1998, 34(2):486-499.
- [2] 保铮,王根原,罗琳.逆合成孔径雷达的距离—瞬时多普勒成像方法[J].电子学报,1998,26(12):79-83.
- [3] 张贤达,保铮.非平稳信号分析与处理[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [4] Chen V C. Applications of Time-frequency Processing to Radar Imaging [J]. Opt. Eng., 36(4):1152-1161.
- [5] 刘永坦.雷达成像技术[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999.
- [6] L.科恩著,白居宪译.时—频分析 理论与应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,1997.

