

基于 WVD-HT 的 SAR/ISAR 多运动目标检测¹

毛引芳 陈国安

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘 要 本文提出和研究了基于 Wigner-Ville 分布 (WVD) 和 Hough 变换 (HT) 的合成孔径雷达 (SAR) 和逆合成孔径雷达 (ISAR) 对多运动目标成像的运动补偿新方法, 给出了多运动目标检测、参数估算和运动补偿的主要步骤。理论分析、计算机和微波暗室模拟实验的结果表明, 新方法对交叉项和噪声的抑制是有效的, 它与单一的 WVD 法相比, 提高了在噪声中对单个和多个运动目标检测及其参数估算的能力。

关键词 合成孔径雷达 / 逆合成孔径雷达, 多运动目标成像, Wigner-Ville 分布, 交叉项, Hough 变换

中图分类号 TN953

1 引 言

目前在合成孔径雷达 / 逆合成孔径雷达 (SAR/ISAR) 运动目标成像领域, 人们研究较多的是单目标情况, 对于多个具有不同运动规律目标成像则是一个新的研究课题。多个运动目标的回波信号是一种很复杂的时变信号, 由它来检测和估算目标运动参数的难度比单目标时大大增加。

WVD(Wigner-Ville Distribution) 是分析时变信号的一种有效工具^[1], 可用来检测和分析非平稳时变信号。因此用 WVD 来检测和估算 SAR/ISAR 目标运动参数已越来越引起人们的重视。但是, 由于多重信号的 WVD 中存在交叉项, 这严重地影响了它对多目标运动参数的检测和估算。虽然用指数分布 (ED)^[2,3] 可以降低交叉项的幅值, 但同时也降低了自主项的分辨力。文献 [4] 中用 WVD 结合 HT(Hough Transform) 抑制交叉项的方法显示了某些优点, 但对它的实用性无疑还需要作更多的研究和检验。

本文研究用 WVD-HT 解决 SAR/ISAR 多运动目标成像中的运动补偿问题。为此, 首先分析多重信号的 WVD 和 HT; 然后分析和讨论用 WVD-HT 检测和估算多目标运动参数问题; 提出在噪声和杂波环境中检测和估算多目标运动参数的方法和步骤; 最后给出证明此方法有效性的计算机模拟和微波暗室实验的结果。

2 多重信号的 WVD

设信号 $S_N(t)$ 由 N 个信号叠加而成:

$$S_N(t) = \sum_{i=1}^N S_i(t), \quad (1)$$

¹ 1995-10-30 收到, 1996-07-25 定稿
国家自然科学基金资助项目

则 $S_N(t)$ 的 WVD 可表示为

$$W_N(t, f) = \sum_{i=1}^N W_{S_i}(t, f) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \operatorname{Re}\{W_{S_i, S_j}(t, f)\}, \quad (i \neq j), \quad (2)$$

式中 $W_{S_i, S_j}(t, f)$ 是 $S_i(t)$ 和 $S_j(t)$ 的交叉项, 它可表示为

$$W_{S_i, S_j}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t + \tau/2) S_j^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi f t} d\tau. \quad (3)$$

现举例说明如下. 设信号 $S(t)$ 由两个线性调频信号合成:

$$S(t) = A_1 \exp\{j(\psi_1 + 2\pi f_1 t + \pi \mu_1 t^2)\} + A_2 \exp\{j(\psi_2 + 2\pi f_2 t + \pi \mu_2 t^2)\}. \quad (4)$$

由 (2) 式得 $S(t)$ 的 WVD 为

$$\begin{aligned} W(t, f) = & \sqrt{\pi/(2\sigma^2)} A_1^2 \exp\{-2\pi^2 \sigma^2 (f - f_1 - \mu_1 t)^2\} + \sqrt{\pi/(2\sigma^2)} A_2^2 \exp\{-2\pi^2 \sigma^2 (f - f_2 - \mu_2 t)^2\} \\ & + \sqrt{\pi/C} A_1 A_2 \exp\{[-\pi^2 (f - (f_1 + f_2)/2 - [(\mu_1 + \mu_2)/2]t)^2]/C\} \\ & \times \exp\{j(\psi_1 - \psi_2) + j2\pi(f_1 - f_2)t + j\pi(\mu_1 - \mu_2)t^2\} \\ & + \sqrt{\pi/C} A_1 A_2 \exp\{[-\pi^2 (f - (f_1 + f_2)/2 - [(\mu_1 + \mu_2)/2]t)^2]/C\} \exp\{-j(\psi_1 - \psi_2) \\ & - j2\pi(f_1 - f_2)t - j\pi(\mu_1 - \mu_2)t^2\}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 σ 为数据窗函数的标准偏差: $C = 1/(2\sigma^2) + j\pi(\mu_1 - \mu_2)/4$.

从 (5) 式可以看出, 多重信号的 WVD 具有下列性质: (1) 各线性调频信号的 WVD (即 (5) 式中第一、二项) 总是沿着各自的瞬时频率 (IF) 直线分布, 且其值始终为正; (2) 交叉项 (即 (5) 式中的第三、四项) 分布在两线性调频信号的 IF 之间, 且其值总是在正负之间振荡.

基于 WVD 的 SAR/ISAR 多运动目标成像中, 由于运动补偿的需要, 必须精确地估算各运动目标回波信号的 IF, 而交叉项和噪声的出现有碍于对它的检测. 为此必须研究交叉项和噪声的抑制问题.

3 霍夫变换 (HT)

设二维函数 $F(x, y)$ 定义在 X - Y 平面上, $G(a, b)$ 定义在 A - B 平面上. 将 $F(x, y)$ 影射成 $G(a, b)$, 其影射关系如下:

$$G(a, b) = \sum_i F(x_i, y_i), \quad (6)$$

其中 a 、 b 、 x_i 、 y_i 满足 $ax_i + by_i = 1$ 的关系式, x_i 、 y_i 是 $F(x, y)$ 在 X - Y 平面上有定义且分布在直线 $ax + by = 1$ 上所有可能的点. 这样, 如果 $F(x, y)$ 在直线 $a_1x + b_1y = 1$ 上所有可能的值为正, 并且在 X - Y 平面上其它点的值为零或者在正负之间振荡, 那么函数 $G(a, b)$ 在 A - B 平面上 (a_1, b_1) 点将出现一个峰值, 其它点的值相对很小或为零. 于是通过影射变换可以检测 $F(x, y)$ 函数在 X - Y 平面上分布直线 $a_1x + b_1y = 1$ 的参数 a_1, b_1 . 这样将一个平面上的一条直线影射为另一个平面上一个点, 且该点坐标为前一个平面直线参数的变换称为霍夫变换.

在 HT 中, 对于 $ax + by = 1$ 的直线, 尽管 x, y 可以定义在有限区域内, 而 a 和 b 值的可能变化范围是从 $-\infty$ 到 ∞ . 为计算方便, 可以将 $ax + by = 1$ 用极坐标形式表示:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta. \quad (7)$$

这样, 如果 $F(x, y)$ 定义在有限区域, 则参数 ρ 和 θ 也在有限区域内变化. 则此时的 HT 按下面的算法将 $F(x, y)$ 影射成为 $G(\rho, \theta)$

$$G(\rho, \theta) = \sum_i F(x_i, y_i), \quad (8)$$

式中 $\rho = x_i \cos \theta + y_i \sin \theta$, (x_i, y_i) 是 $F(x, y)$ 定义在 $X-Y$ 平面上的所有可能的点. 由于该算法仅仅是加法运算, 所以运算量不大. 它确定参数的精度和 ρ 、 θ 离散化的精细程度有关.

4 基于 WVD-HT 的 SAR/ISAR 多运动目标检测

雷达波束中存在多运动目标可能有两种情况: (1) 各目标位于不同的距离门, 此时可用子孔径法分别对各目标进行检测和成像; (2) 各目标回波信号在时间上是重叠的, 不能从空间角度或斜距上加以区分. 又由于存在相对运动而不能把多个目标视为一个整体目标. 因此一些单一运动目标的处理方法不能简单加以应用. 在此情况下利用 WVD 来检测运动目标和估算它们的运动参数较为方便. 但多运动目标的回波信号是多重信号, 它的 WVD 中存在交叉项, 它严重地干扰了对目标的检测和运动参数估算. WVD 和 HT 相结合的方法正是为了克服交叉项等干扰, 解决多运动目标成像中的运动补偿问题. 下面对这方法作一些分析和讨论.

设 $S(t)$ 为一目标回波信号, 则它的 WVD 可定义如下:

$$W(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int S(t + \tau/2) S^*(t - \tau/2) e^{-j\tau\omega} dt. \quad (9)$$

在 SAR/ISAR 中, 通常发射线性调频信号, 其多普勒回波信号仍具线性调频形式:

$$S(t) = \exp(j\pi f_0 t + j\pi k t^2), \quad |t| < T/2, \quad (10)$$

式中 f_0 为多普勒中心频率, k 为多普勒调频率, T 为脉冲持续时间. (10) 式的 WVD 可表示为

$$W_s(t, f) = 2(t - 2|t|) \sin c[2\pi(f - f_0 - kt)(T - 2|t|)]. \quad (11)$$

该分布的能量主要集中在如下方程的直线上:

$$f = f_0 + kt. \quad (12)$$

所以, 我们通过在时-频平面上最大能量分布直线可以直接估算线性调频回波信号参数.

当同一距离门中存在多运动目标时, 由于它们的分布位置和运动状态不同, 则在回波信号的 WVD 中分别对应着不同 IF 的能量分布直线 (代表不同的自主项). 但从 (2) 式可以看出, 除了这些自主项的能量分布直线, 还存在着一些代表交叉项的能量分布曲线. 后者严重地干扰了对前者直线参数的检测和估算.

然而 HT 是一种检测直线参数的好工具. 由于 WVD 中自主项的能量集中分布在沿 IF 直线上, 且始终为正, 所以此能量分布直线经 HT 处理后能影射成一个非常尖锐的峰值点. WVD

中的交叉项, 由于它的能量幅值呈正负交替变化, 所以经 HT 处理后其值较小, 不会形成峰值点。此外, 当回波信号中存在高斯白噪声时, 由于此噪声在 WVD 平面中的分布是分散的, 且能量密度较小, 所以经 HT 处理后其值很小, 也不会对有用信号的检测造成干扰。对于 WVD-HT 法抑制高斯白噪声的定量结果及其与其它方法的比较, 在下面第 5 节中给出。

用 WVD-HT 对多目标的运动检测、估算和补偿的主要步骤如下: (1) 对含地杂波的回波信号先作杂波对消处理。(2) 然后计算它的 WVD;(3) 再计算 WVD 的 HT。(4) 将 $\rho-\theta$ 平面上的每一点峰值与判别电平相比较: 如果大于判别电平, 则表示该点的坐标值是 WVD 平面上相应于 IF 直线的参数值, 并由该点坐标值算出 IF 直线; 若有好几个点的值大于判别电平, 则表示有好几个动目标所对应的 IF 直线; 若其值小于判别电平, 则表示无运动目标所对应的回波信号存在。(5) 由各目标的瞬时频率可以求出其对应的瞬时相位 $\psi_j(t)$, 即

$$\psi_j(t) = 2\pi \int_{t_0}^t f_j(\tau) d\tau + \psi(t_0), \quad (13)$$

式中 $j = 1, 2, \dots, N$, $f(t)$ 为 IF, $\psi(t_0)$ 为恒定相位项 (其具体数值多少并不重要)。(6) 用各瞬时相位分别对距离压缩后的多目标回波信号 $S_N(t)$ 进行运动补偿:

$$S'_j = S_N(t) \exp[\psi_j(t)] = S_j(t) \exp[\psi_j(t)] + \sum_{i \neq j} S_i(t) \exp \psi_j(t). \quad (14)$$

(7) 对已经分别作运动补偿后的回波信号再进行方位压缩, 就可获得各运动目标的清晰图象。

5 计算机和微波暗室模拟实验结果和讨论

首先是两运动目标叠加高斯白噪声时的计算机模拟。其模拟系统的参数如下: SAR 载机速度 $V_a=200\text{m/s}$; 两点目标沿方位向运动的速度分别为 $V_1=20\text{m/s}$ 和 $V_2=54.56\text{m/s}$, 其起始位置分别为 $x_1=0\text{m}$, $x_2=64\text{m}$; 雷达发射带宽为 150MHz 、重复周期为 5ms 的线性调频脉冲信号共 64 个; 雷达工作波长为 3cm ; 天线方位向长度 $D=2\text{m}$; $t=0$ 时刻目标与雷达之间的距离 $R_0=6.912\text{km}$; 并在回波信号中叠加了均值 $E=0$ 标准偏差 $\mu=1$ 的高斯白噪声。图 1 中给出了这两点运动目标回波的 WVD。可以看出, 由于噪声和交叉项的影响, 已模糊了对应于两运动点目标信号的 IF 轮廓。因此用迭代滤波法^[5]在 WVD 上已得不出 IF 曲线了。图 2 是由图 1 中的 WVD 得到的 HT 结果, 图中的两峰值点 1 和 2 分别对应了运动点目标 1 和 2。图 3 中给出了由图 2 中的峰值点 1 和 2 分别计算出来的线性、光滑的 IF 曲线。曲线很理想, 因此用此 IF 曲线数据补偿回波数据后可获得聚焦好的点目标 1 和 2 的图象。

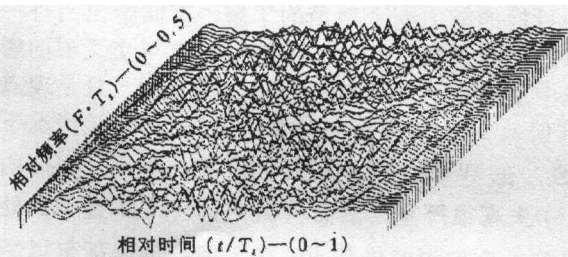


图 1 两运动点目标回波叠加高斯白噪声 ($E=0$, $\mu=1$) 的 WVD

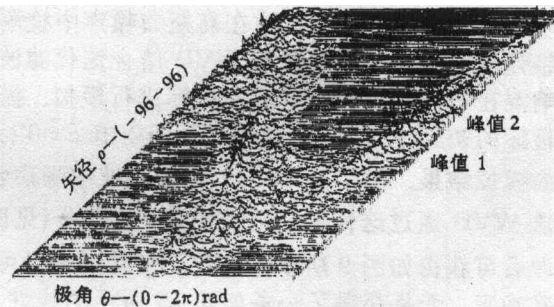


图 2 图 1 中 WVD 的 HT

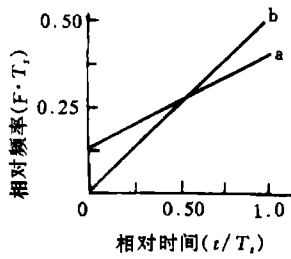


图 3 瞬时频率 (IF)
(a) 目标 1 (b) 目标 2

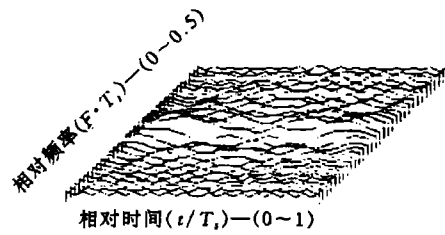


图 4 两金属球回波的 WVD ($V_{球2} = 2V_{球1}$)

另外，利用北京航空航天大学微波暗室实验系统模拟了 ISAR 多运动目标 (两转速不同的金属球) 的回波数据，并对上述新方法进行了检验。在图 4~6 中分别给出了采用此数据的一些处理结果。图 4 中给出了 WVD，由于两金属球的速度不同 ($V_{球2} = 2V_{球1}$)，且有多散射点组成，所以在 WVD 中交叉项影响比较严重，致使在 WVD 中已看不清对应两金属球的 IF 变化轮廓，已不能用迭代滤波法^[5]在 WVD 上得到 IF 曲线了。图 5 是由图 4 中 WVD 得到的 HT 结果，在图中可清楚地见到三个峰值点，即图中的 1、2 和 3。但点 3 实际上是 1 以 2π 为周期的重复点。图 6 是根据图 5 中的点 1 和 2 分别得出的两条 IF 曲线，可以看出它们的 IF 在合成孔径的短时间内近似不变，这符合转台成象的实际情况。利用图 6 中两条 IF 曲线的参数进行运动补偿后可成出聚焦好的两金属球图象。

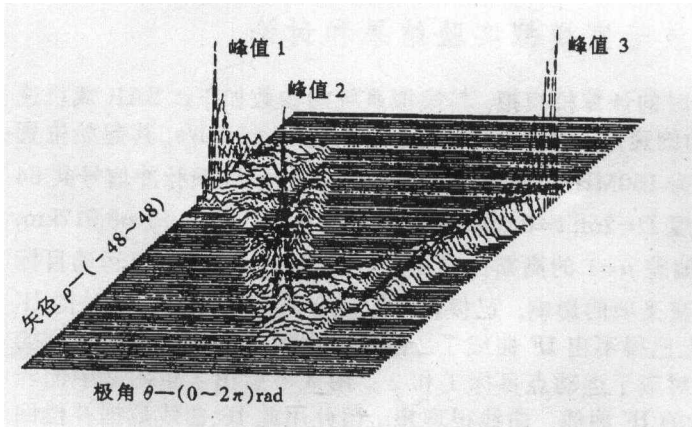


图 5 图 4 中 WVD 的 HT

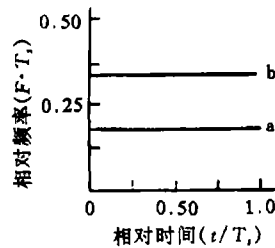


图 6 由图 5 中 HT 求得的 IF
(a) 目标 1 (b) 目标 2

为了对 WVD-HT 法在 Gaussian 白噪声中检测动目标的能力有个定量的了解，下面给出另外一组计算机模拟结果，并与 WVD 结合迭代滤波方法的结果作了比较。为避免噪声与交叉项的影响混在一起，我们用单点动目标进行模拟。模拟中所用雷达参数与本节第一例相同，只是现点目标的初始位置 $x=0$ ，又外加了期望值 $E=0$ 标准偏差 $\mu=1$ 的高斯白噪声。图 7~10 是该情况下的模拟结果。图 7 是 WVD，由于回波中噪声较强，在 WVD 中已看不清 IF 变化轮廓。因而由这 WVD 通过迭代滤波法求出的 IF 曲线 (见图 8) 失真很严重。然而将图 7 的 WVD 经 HT 处理后可获得如图 9 所示的结果，在此图中已可见到一个尖锐的峰值点。由于此点的坐标可以精确确定，于是获得了一条如图 10 所示的线性、光滑的较理想 IF 直线。再用此直线参数补偿目标运动后获得了较满意的成象结果；而用图 8 中的 IF 曲线参数补偿目标运动后已不能使动目标成象。

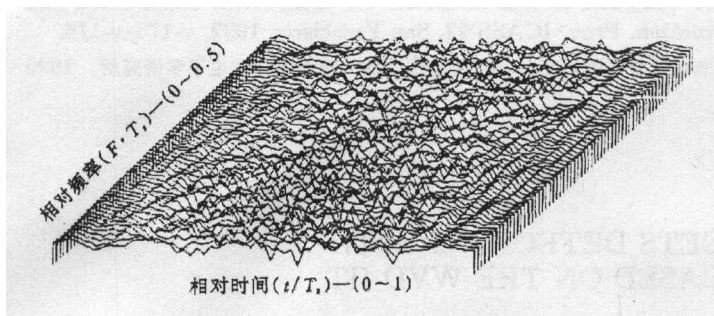


图 7 运动点目标回波叠加高斯白噪声 ($E=0, \mu=1$) 的 WVD

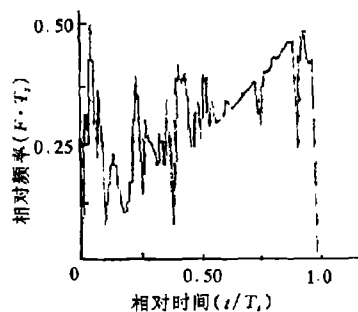


图 8 由图 7 中的 WVD ($E=0, \mu=1$) 用迭代滤波法求出的 IF

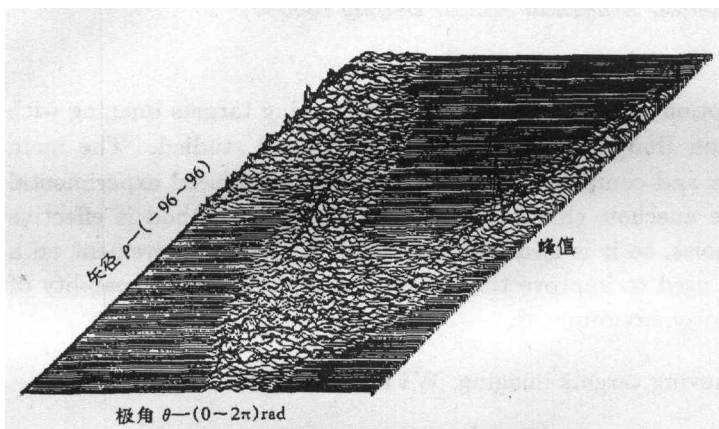


图 9 图 7 中 WVD 的 HT

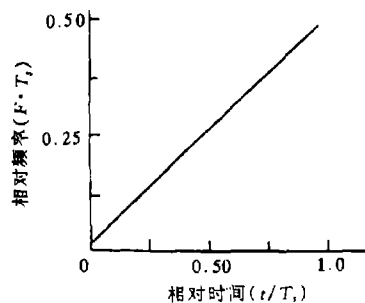


图 10 由图 7 中的 WVD ($E=0, \mu=1$) 用 HT 求出的 IF

此外, 在上例条件下还对更强高斯白噪声 ($E=0, \mu=1.5$) 中的单点运动目标进行了计算机模拟。由于噪声太强, 致使 WVD 中的 IF 轮廓更模糊, 用此 WVD 通过用迭代滤波法获得的 IF 曲线失真更严重, 导致用此 IF 曲线参数作运动补偿后已不能使目标成像了; 然而此 WVD 作 HT 处理后仍然能产生一个明显峰值点, 并由此得出了还可以的 IF 曲线, 以及用此曲线参数作目标运动补偿后成了还算基本可以的动目标象。

6 结 论

理论分析、计算机和微波暗室模拟实验的结果表明, 在基于 WVD 法的动目标检测中噪声和交叉项的影响较大, 但采用 WVD 和 HT 结合的动目标检测方法后可以降低上述影响, 提高在噪声中对单个和多个运动目标检测及其参数估算的能力。

参 考 文 献

- [1] Classen T A C M, *et al.* The Wigner distribution—A tool for frequency signal analysis, Part I. Philips J. Res. 1980, 35(3): 217-250.
- [2] Chois H I, *et al.* Improved time-frequency representation of multicomponent signals using exponential kernels, IEEE Trans. on ASSP, 1989, ASSP-37(6): 862-871.
- [3] Mao Y, *et al.* Motion compensation of multitargets imaging with ISAR based on the time-frequency distribution, ICCEA' 94, Beijing: 1994, 316-319.

- [4] Barbarsa S, *et al.* A combined Wigner-Ville and Hough transform for cross-terms suppression and optimal detection and parameter estimation, Proc. ICASS'92, San Francisco: 1992, v-173-v-176.
- [5] 陈国安. 合成孔径雷达对地面运动目标检测和成像方法的研究: [硕士论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1995年6月.

MULTITARGETS DETECTING WITH SAR/ISAR BASED ON THE WVD-HT

Mao Yinfang Chen Guoan

(Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080)

Abstract A new method for the motion compensation of multiple moving targets imaging with SAR/ISAR based on Wigner-Ville and Hough transform is presented and studied. The main steps for motion detection, estimation and compensation are given. The simulated experimental results with computer and microwave anechoic chamber show that the new method is effective for suppressing the cross-terms and noise, so it is clear the new method is an improvement on a unitary WVD method, and it can be used to improve the detection and estimation capability of single or multiple moving targets in noisy environment.

Key words SAR/ISAR, Multiple moving targets imaging, WVD, Cross-term, HT

毛引芳: 男, 1938年生, 副研究员, 现从事微波成像、雷达系统和信号处理等方面的研究工作。
陈国安: 男, 1969年生, 硕士, 从事雷达信号处理和通信方面的研究工作。