

利用时-频分析进行合成孔径雷达运动目标成象的研究¹

潘润红 马平清* 朱锡兴 柴振明

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

*(北京理工大学电子工程系 北京 100081)

摘要 本文研究了利用时-频分析方法进行合成孔径雷达运动目标成象的若干问题。分析了三种时-频变换方法——短时傅里叶变换, 小波变换和 Wigner-Ville 分布 (WVD), 提出只有 WVD 才能满足要求。针对 WVD 的双线性特性所造成的交叉项干扰问题, 提出用 Hough 变换来抑制交叉项。实验证明, 即使在信噪比很低时, WVD 和 Hough 变换结合的方法仍能提供很好的检测性能。

关键词 合成孔径雷达, 运动目标成象, Wigner-Ville 分布, Hough 变换

中图分类号 TN958, TN953

1 引言

运动目标成象问题是合成孔径雷达 (SAR) 信号处理中的一个难题。常规 SAR 的距离向高分辨力是通过线性调频信号的脉冲压缩技术获得的, 方位向的高分辨力是通过接收数据与一个理论上的静止目标的冲击响应做匹配相关获得的。所以如果成象场景中有以未知方式运动的目标, 常规 SAR 的成象方法就不能正常工作, 从而造成运动目标图象的模糊和方位偏移。要解决该问题就必需设法获得运动目标的真实多普勒频率特性, 即两个关键参数——多普勒调频率和多普勒中心频率, 再利用它们调节成象过程, 聚焦在运动目标上。我们知道, SAR 信号的频率随时间连续变化。因此, 可以利用时-频分析的方法提取瞬时频率曲线。而且时频分析的方法并不需要知道关于目标的先验知识, 它能同时完成检测和参数估计。最近以来利用时频分析的方法解决 SAR 运动目标成象成为一个研究热点。本文对三种时-频分析方法——短时傅里叶变换 (STFT), 小波变换 (WT) 和 WVD 进行了对比, 提出只有 WVD 才能满足要求。但 WVD 也有致命的缺点: 由于它不是线性变换, 所以用于多点目标和面目标时会出现交叉项干扰, 严重降低了它的性能。我们提出用 Hough 变换 (HT) 来抑制交叉项。进一步分析表明, WVD 加 HT 的方法与匹配滤波理论是一致的。实验证明, 即使在信噪比很低时, WVD 与 HT 结合的方法仍能提供很好的检测性能。

2 SAR 运动目标成象问题

SAR 静止目标的后向散射信号可以表示为^[1]

$$S_S(x) = a(x) \exp\{-jkx^2/R_0\}, \quad x \in V_a T, \quad (1)$$

其中 T 为合成孔径时间, $k = 2\pi/\lambda$, λ 是工作波长, $a(x)$ 是天线方位向权函数, V_a 是雷达平台速度, R_0 是目标与雷达平台之间的距离。

如果目标是运动的, 并设 (V_r, a_r) 是运动目标的径向速度和加速度, (V_c, a_c) 是运动目标的方位向速度和加速度, 则其散射信号可以表示为

$$S_m = a[(1 - \varepsilon_c')x] \exp(-2jk\varepsilon_r'x) \exp\{-jkx^2[(1 - \varepsilon_c')^2 - \varepsilon_r']/R_0\}, \quad (2)$$

¹ 1997-03-18 收到, 1997-09-10 定稿

其中

$$\varepsilon_r = V_r/V_a \quad \varepsilon_c = V_c/V_a \quad \varepsilon_r'' = a_r R_0/V_a^2.$$

比较 (1) 式和 (2) 式可以看出, 运动目标和静止目标的主要差别在于它们的中心频率和调频率不同。在常规 SAR 中, 是用匹配滤波方法得到目标图象的, 参考函数选为理论上的静止目标的冲击响应。如果将静止目标对应的匹配函数用于运动目标, 则匹配滤波的最大输出将偏离原始位置, 而且运动目标图象会散焦。只有获得了运动目标的真实多普勒频率特性, 才能调节成像过程, 使其对运动目标聚焦成像。SAR 运动目标的回波信号是一种复杂的时变信号, 仅用时域或频域的一维表示方法已不能充分表征信号的特征。联合时-频分析的方法是解决这一问题的有效工具。

需要说明一点, 在 SAR 运动目标成像过程中, 首先要将运动目标与静止目标分开。我们知道, 当运动目标具有一定的距离向速度时, 其回波信号相对于静止目标的回波信号有一载频, 而静止目标的频谱是以 0 频率为中心的, 通常可用一高通滤波器滤去静止目标的回波信号。对于那些距离向速度很小或距离向速度进入盲速区的信号, 它们的频谱将有一部分或全部同静止目标回波的频谱重合。这时再进行时域或频域滤波就不可能保留运动目标的全部信息而有效地抑制静止目标的信号。这是单天线 SAR 运动目标检测中固有的问题, 只有用多天线系统才能解决。以下讨论中我们都假设已经过有效的滤波处理。

3 SAR 信号的时-频表示

常用时频分析方法有三种——STFT, WT 和 WVD。

3.1 短时傅里叶变换 (STFT)

对于信号 $f(t)$, 其 STFT 定义为

$$F(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)w[(\tau - t)f] \exp(-j2\pi f\tau) d\tau, \quad (3)$$

其中 $w(t)$ 是时间窗函数。STFT 本质上是对加时窗的信号进行傅里叶变换, 时窗中心沿时间轴平移, 从而得到信号的时频表示。所以它存在固有的缺点: 由于频率分辨率与时窗宽度成反比, 时窗越窄, 时间分辨率越好, 而频率分辨率越差, 反之亦然。

3.2 小波变换 (WT)

我们知道, WT 的窗函数宽度是可变的, 它巧妙地应用了非均匀分布的分辨率: 在低频处, WT 使用宽时窗, 虽然时间分辨率低但可以获得较高的频率分辨率。在高频处, WT 使用窄时窗, 虽然频率分辨率低但可以获得较高的时间分辨率。这一独特性质使它获得了广泛的应用。但是, WT 与 STFT 一样要受到时频分辨率不确定性的制约。

在 SAR 成像过程中, 我们需要瞬时频率的精确信息, 即要求时间分辨率和频率分辨率同时达到最佳。STFT 和 WT 都无法满足这个要求。大量的仿真实验证明, WVD 的分辨率远远高于 WT。

3.3 Wigner-Ville 分布 (WVD)

WVD 可以看成是输入信号在时频域上的能量分布。WVD 的时间和频率分辨率都很好。信号 $s(t)$ 的 WVD 定义为

$$\text{WVD}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (4)$$

WVD 有很多重要性质, 这里限于篇幅不做介绍。实际应用中, 考虑到信号的有限持续时间和减小的旁瓣, 积分函数都包含在一个窗函数内, 如高斯窗。SAR 运动目标的回波信号是线性调频信号, 让我们看一下线性调频信号的 WVD:

$$\text{设} \quad s(t) = Ae^{j(\varphi + 2\pi ft + \pi\mu t^2)}, \quad (5)$$

相应的 WVD 为

$$W_s(t, f) = |A|^2 2\pi \delta(\omega - 2\pi\mu t - 2\pi f). \quad (6)$$

可以看出, 线性调频信号的 WVD 在时频域上是沿信号瞬时频率分布的一串冲击脉冲。其峰值组成一条直线, 直线的斜率反应线性调频信号的调频率, 截距反应载频。由于信号的有限持续性, 真实 SAR 数据的 WVD 在频率域上是 sinc 函数的形状。

对于点目标, WVD 的性能是很理想的。但是, 由于 WVD 的双线性特性, 在处理含多个线性调频信号的复合信号时, 如 SAR 信号是多点目标或面目标信号时, 会出现交叉项。如对于含 N 个信号的复合信号, 其 WVD 含有 C_N^2 个交叉项。它们位于每两个时频分量之间, 并沿它们之连线垂直的方向振荡, 有些幅度很大, 这是它的致命缺

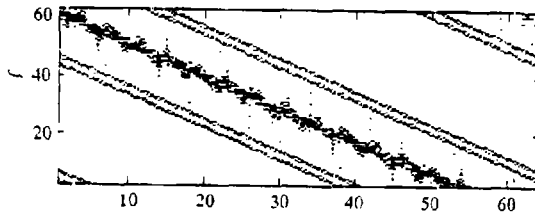


图 1

点。图 1 是两个具有不同调频率和频率分量的线性调频信号的 WVD 的等高线, 可以看出交叉项位于两分量之间。为消除或者衰减 WVD 中的交叉项, 近十年来提出了若干种平滑的 WVD。这些方法对于一定类型的信号确能较好地抑制交叉项。但都是以牺牲时间或/和频率分辨率为代价的^[3]。

4 Hough 变换 (HT)

线性调频信号的 WVD 产生的能量分布集中在一条直线上, 检测线性调频信号的问题就可以转化成为在 t - f 平面上检测直线的问题^[2]。Hough 变换通常用于检测图象中的直线。按照经典统计理论, 在高斯白噪声情况下检测信号 $s(t; \theta)$ (矢量 θ 为未知参数) 的最佳方法是对接收信号进行匹配滤波。滤波器的冲击响应 $h(t; \theta)$ 的特性由信号参数决定。在没有先验知识的情况下, 从原理上讲可以按照不同的冲击响应函数 (由假定的信号参数得到) 计算不同的输出, 与一门限比较, 产生最大输出的 $(t; \theta)$ 即是信号参数的最大似然估计, 即

$$\max_{\theta} \int h(t - \tau, \theta) r(\tau) d\tau \geq \text{门限}. \quad (7)$$

根据 WVD 的性质, 时域上两信号的标量积可以转变成其 WVD 的内积。由此可得

$$\max_{\theta} \left| \int h(\tau, \theta) r(\tau) d\tau \right|^2 = \max_{\theta} \left| \iint W_h(t, f; \theta) W_r(t, f) dt df \right|. \quad (8)$$

对线性调频信号来说, 其 WVD 是时频平面内的直线。因此 WVD 上的二维积分可变成一维积分, 即可看成沿信号参数所确定的时频直线累加信号的 WVD 的结果。这个操作实际上等价于对接收信号的 WVD 做 HT 变换。因此, 对信号的 WVD 做 HT, 等价于用不同参数的匹配滤波器对接收信号进行匹配滤波。因此该方法的抗噪性能非常好。

根据这一分析, 如果我们对线性调频信号的 WVD 作 HT, 由于 WVD 交叉项的幅度在正负值之间振荡, 累加计算将使交叉项受到抑制。同时, 由于自主项沿直线分布, 且总是正值, Hough 域中将产生高的峰值, 其位置由线性调频信号的中心频率和调频率决定^[4]。

5 模拟实验和结论

我们按照实际雷达系统, 选择参数如下: $\lambda = 0.03\text{m}$, $V_a = 150\text{m/s}$, $\text{PRF} = 900\text{Hz}$, $R_0 = 20\text{km}$, 分辨率为 10m 。目标 1 参数是: $V_r = 2\text{m/s}$, $a_r = 2\text{m/s}^2$, $V_c = 3\text{m/s}$; 目标 2 参数是: $V_r = 4\text{m/s}$, $a_r = 4\text{m/s}^2$, $V_c = 5\text{m/s}$, 距孔径中心 17m 。其余参数为零。

我们知道, V_c 将影响回波信号的调频率。从原理上讲, 对 V_c 的速度范围没有限制, 但对其精度却有限制。设

$$[(1 - \varepsilon_c)^2 - \varepsilon_r] = D, \quad (9)$$

则对 D 的估计的精度要求为

$$|\hat{D} - D| < 2(1/K), \quad (10)$$

K 为合成孔径雷达时带积。在此精度内, 最大二次相位误差对聚焦成像不会造成太大的影响, 否则将不能成像。在第 2 节我们提到, 如果 V_r 过小, 则无法将运动目标与静止目标分开, 即对 V_r 的检测有一个下限。现在我们讨论一下可检测 V_r 的上限。对于本文提出的方法, 因为离散 WVD 的周期是 π , 对应的 V_r 的周期是

$$r = \frac{\text{PRF}\lambda}{4} = 6.75(\text{m/s}) \quad (11)$$

可以看出 V_r 的周期很小, 速度大于 6.75m/s 的目标将引起速度模糊。因此该方法仅对慢速运动目标适用。上式也表明, 只有提高 PRF 才能使 V_r 的检测范围扩大。

图 2 为加噪后的 WVD(SNR=0dB), 从这幅图中无法判断有无运动目标, 交叉项的存在和信噪比的不足严重降低了 WVD 的性能。图 3 是图 2 信号的联合 WVD 和 HT。

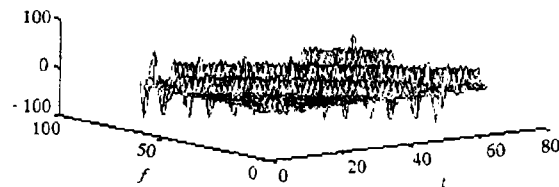


图 2

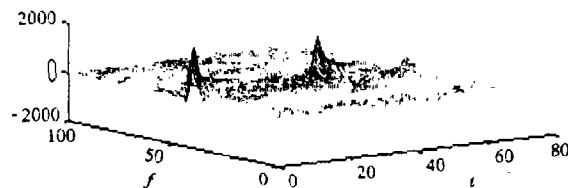


图 3

实验表明, WVD 非常适用于 SAR 运动目标检测和成像, 而辅以 Hough 变换有效地解决了交叉项干扰问题。在信噪比很低时, 用该方法仍能很好地检测信号参数。WVD 的数字化和快速算法, 使得它能借助 FFT 完成运算, 这里限于篇幅不做介绍。该方法的运算量还取决于估计精度。但可以肯定该方法有很好的应用前景。将此方法用于实际数据的性能正在研究之中。

参 考 文 献

- [1] Freeman A, Currie A. A synthetic aperture radar and moving targets. GEC Journal of Research, 1987, 5(2): 106-115.
- [2] Barbarossa S, Zanalda A. A Combined Wigner-Ville and Hough transform for crossterms suppression and optimal detection and parameter estimation, ICASSP'92, Mar., 1992, San Francisco: 173-176.
- [3] 刘贵忠, 刘志梅. 一种新的二次时频分布和几种主要二次时频分布的比较研究. 电子科学学刊, 1996, 18(5): 455-461.
- [4] 王 颖. SAR 运动目标检测、成像方法的研究: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 1995.

A RESEARCH OF SAR MOVING TARGETS IMAGING BY JOINT TIME-FREQUENCY ANALYSIS

Pan Runhong Ma Pingqing* Zhu Xixing Chai Zhenming

(*Institute of Electronics, Academic Sinica, Beijing100080*)

**(Department of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing100081)*

Abstract Some problems about SAR moving targets imaging by joint time-frequency analysis are discussed in this paper. Three kinds of time-frequency transforms — Short Time Fourier Transform(STFT), Wavelet Transform(WT) and Wigner-Ville Distribution (WVD) are compared. It is presented that only WVD could meet the requirement. Moreover, Hough Transform(HT) is employed in restraining the disturbing cross terms, produced by the WVD due to its bilinear property. Experiments test that the combined WVD and HT could provide satisfactory detection performance even if the signal-to-noise ratio is very low.

Key words Synthetic aperture radar, Moving targets imaging, Wigner-Ville distribution, Hough transform

潘润红: 女, 1969 年生, 博士生, 从事 SAR 数字信号处理方面的研究.

马平清: 男, 1969 年生, 博士生, 从事信号检测、信息处理方面的研究.

朱锡兴: 男, 1938 年生, 研究员, 从事 SAR 数字信号处理和高分辨率 SAR 的研究.

柴振明: 男, 1933 年生, 研究员, 博士生导师, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 从事信号和信息处理、视频技术的研究.