

基于互 Wigner-Ville 分布的 SAR 运动目标检测

孙泓波, 顾 红, 苏卫民, 刘国岁

(南京理工大学电子工程技术研究中心, 江苏南京 210094)

摘 要: 本文针对机载合成孔径雷达(SAR)运动目标回波信号的特点, 提出了基于互 Wigner Ville 分布(XWVD)的机载 SAR 运动目标检测方法, 分析了它在单目标和多目标情况下的检测性能. 实验证明, 该方法可以在较低的信噪比下实现目标的检测, 其性能大大优于常用的 Wigner Ville 分布方法. 为了抑制多个目标之间交叉项的影响, 本文还提出了一种基于逐次消去思想的互 Wigner Ville 分布检测方法, 它可以解决强度相差较大的多目标检测问题. 仿真实验的结果证明了算法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 运动目标检测; 互 Wigner Ville 分布

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2002)03-0347-04

SAR Moving Targets Detection Based on Cross Wigner-Ville Distribution

SUN Hong-bo, GU Hong, SU Wei-min, LIU Guo-sui

(Research Center of Electronic Engineering Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract: According to the features of airborne SAR moving target echoes, a new SAR moving target detection technique based on cross Wigner Ville distribution (XWVD) is proposed. Its detection performs on condition that single target and multiple targets exist respectively. The experiment validates that the performance of this new method can detect the signal with very low SNR. It is better than the common method based on Wigner Ville distribution. To eliminate the effects of cross terms, according to the idea of elimination one by one, a new detection scheme of XWVD is proposed, which can detect small target embedded in some large targets. The simulation results prove its effectivity.

Key words: synthetic aperture radar; moving target detection; cross Wigner Ville distribution

1 引言

机载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar—SAR)对地面运动目标的检测是当前 SAR 技术的一个研究热点^[1]. 由于机载 SAR 运动目标的回波可近似为线性调频信号, 而 Wigner Ville 分布(WVD)对线性调频信号具有理想的时频聚集性, 许多学者都将其用于 SAR 运动目标的检测和参数估计当中^[2], 后来又结合 Radon 变换(又称为 Hough 变换)进一步改善了其性能^[3,4]. 但是, WVD 只在信噪比较高的情况下才具有较好的性能. 另外, 在存在多目标的情况下, 信号之间的交叉项将严重影响目标检测, 弱目标很容易被强目标的交叉项所掩盖. 尽管通过一些技术可以在一定程度上抑制交叉项, 但其时频聚集性也随之降低.

本文提出的基于互 Wigner Ville 分布(XWVD)^[5]的 SAR 运动目标检测方法可以在更低的信噪比下实现对目标的检测. 现有的文献^[5]中仅讨论了 XWVD 对单个信号分量的检测, 本文将其推广到多个信号分量的情况. 同时为了克服 WVD 交叉项的影响, 我们提出了一种基于逐次消去思想的 XWVD 检测方法, 使得强度相差较大的多个运动目标都可以检测出来.

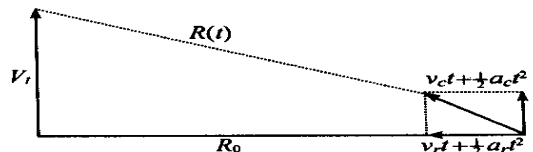


图 1 机载雷达与地面运动目标相对位置

2 机载 SAR 运动目标回波信号模型

假设 SAR 处于正侧视工作状态, 雷达载机与地面运动目标的几何位置关系如图 1 所示. 其中 R_0 为零时刻雷达与目标的距离, V 为载机运动速度. 我们将目标的运动分解为相对于飞机的径向分量和切向分量, v_r , a_r 分别为径向速度和加速度, v_c , a_c 分别为切向速度和加速度. 在 t 时刻雷达与运动目标的距离 $R(t)$ 可近似为

$$R(t) = R_0 - v_r t + [(V - v_c)^2 - R_0 a_r] \frac{t^2}{2R_0} \quad (1)$$

这里不考虑距离压缩的影响, 可假设雷达发射连续波信号, 则接收的回波信号为

$$s(t) = \sigma_T g(t) \exp(j\psi_T) \exp(-j4\pi R(t)/\lambda) \quad (2)$$

其中 Ψ_T 为一常数, 与目标的雷达反射截面积 (RCS) 有关; Ψ_T 为目标反射回波的起始相位; $g(t)$ 为雷达天线方位角的方向图. 这三项的影响一般不予考虑, 我们认为回波的全部信息体现在相位上. λ 为载波波长. 将式(1)代入式(2) (再忽略 R_0 引入的常数相位项), 得

$$S(t) = \exp(j2\pi f_{d0}t) \exp(j\pi Kt^2) \quad (3)$$

其中 $f_{d0} = 2v_r/\lambda$ 为多普勒质心, $K = (2/R_0)[-(V - v_c)^2 + R_0 a_r]$ 为调频斜率. 由上式可见, 正侧视情况下机载 SAR 地面运动目标的回波可近似为线性调频信号. 在实际当中, 目标只是在一个时间段内对线性调频信号逼近较好, 所以应当注意积累时间的选取.

3 WVD 与 XWVD 简介

Wigner Ville 分布是一种最基本、也是应用最多的一种时频分布. 设 τ 为时延参数, 则信号 $S(t)$ 的 Wigner Ville 分布定义为

$$W_S(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t + \tau/2) S^*(t - \tau/2) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (4)$$

WVD 对线性调频信号具有最理想的时频聚集性, 因而许多学者将其用于 SAR 运动目标检测当中^[2]. 线性调频信号在 Wigner Ville 平面上的分布为背鳍状, 因而通过 Radon 变换作直线积分可以使信号能量分布更加聚集, 也就提高了 SAR 运动目标的检测能力^[3, 4]. 但是, 在信噪比过低的情况下, WVD 将无法检测出目标的存在, 再作 Radon 变换也无能为力. 另外, 在存在多个信号分量的情况下, WVD 信号项之间的交叉项十分显著, 信号分量越多, 交叉项分布也越复杂. 为了抑制交叉项, 可以采用各种平滑或加核函数的方法, 但 WVD 的时频聚集性也随之降低.

信号 $S_1(t)$ 与 $S_2(t)$ 的互 Wigner Ville 分布定义为

$$W_{S_1, S_2}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(t + \tau/2) S_2^*(t - \tau/2) \exp(-j2\pi f\tau) d\tau \quad (5)$$

XWVD 对线性调频信号具有良好的估计性能, 文献[5]对利用 XWVD 进行单个信号分量的检测与估计进行了详细的讨论, 这里不再赘述. 下面将给出基于 XWVD 的机载 SAR 单个运动目标检测方法, 然后将其推广到多个运动目标的情况.

4 基于 XWVD 的单目标和多目标检测算法

4.1 单目标情况

在只有单个运动目标存在的情况下, 基于 XWVD 的机载 SAR 运动目标检测算法步骤如下:

- (1) 对含有地杂波的回波信号 $S(t)$ 作杂波对消处理;
- (2) 通过对回波信号作短时 Fourier 变换构造初始参考信号 $S_{\text{ref}}^{(i)}(t)$, 此时 $i = 0$.
- (3) 计算 $S(t)$ 和 $S_{\text{ref}}^{(i)}(t)$ 的互 Wigner Ville 分布 $W_{S, S_{\text{ref}}^{(i)}}(t, f)$.
- (4) 对每一个 t , 利用峰值检测得到新的瞬时频率估值

$$f^{(i+1)}(t) = \arg\max_f |W_{S, S_{\text{ref}}^{(i)}}(t, f)|$$

- (5) 合成新的参考信号

$$S_{\text{ref}}^{(i+1)}(t) = \exp[j2\pi \int_0^t f^{(i+1)}(u) du]$$

- (6) 令 $i = i + 1$, 转到步骤(3)进行迭代计算, 直到 $\|f^{(i+1)}(t) - f^{(i)}(t)\|_2 < \varepsilon$, 其中 $\|\cdot\|_2$ 表示矢量的 2-范数, ε 为预先设定的精度.

- (7) 作最终参考信号 $S_{\text{ref}}(t)$ 与回波信号 $S(t)$ 的互 Wigner Ville 分布, 进行 Radon 变换.

- (8) 根据 Radon 变换尖峰的位置确定目标信号的多普勒中心频率和调频斜率, 进一步可以求出目标的运动参数, 同时可以实现对运动目标的精确补偿和成像.

本算法的核心部分就是利用 XWVD 进行瞬时频率的估计, 对于线性调频信号而言其收敛是一定的, 并且信噪比在 -2dB 以上时可以达到理论上的 GR 界^[5]. 经过仿真实验表明, 这种基于 XWVD 的信号检测方法相比于普通的 WVD 可以在更低的信噪比下检测出目标, 并且其收敛速度很快, 在信噪比较高的情况下甚至仅需 2 次迭代就可达到收敛.

4.2 多目标情况

下面考虑多目标的情况. 根据上面叙述的 XWVD 检测方法, 可以根据实际系统参数确定多普勒中心频率和调频斜率的变化范围, 然后构造一系列的参考函数, 将其与回波信号作 XWVD 进行二维搜索, 然后根据背鳍线的分布确定目标的个数及参数. 这种想法是最直观的, 但是运算量较大, 而且对弱目标的检测特性虽然与普通的 WVD 相比有所提高, 但还没有本质上的改善.

为了避免强目标的交叉项对弱目标检测的影响, 我们基于逐次消去的思想提出以下算法: 首先根据回波信号的短时 Fourier 变换确定一个初始的参考信号, 按照上面叙述的算法进行迭代, 它必定收敛于最临近的一个强目标信号, 然后根据 Radon 变换确定其参数, 并且补偿掉这个强信号, 按照这样的方法, 强目标信号被逐个滤除, 最后就可以用 XWVD 检测出弱目标信号. 该算法的具体步骤如下:

- (1) 对含有地杂波的回波信号 $S(t)$ 作杂波对消处理;
- (2) 通过对回波信号作短时 Fourier 变换构造初始参考信号 $S_{\text{ref}}^{(0)}(t)$.
- (3) 按照上面叙述的方法进行迭代, 得到最终收敛的参考信号 $S_{\text{ref}}(t)$, 它就是与初始参考信号最临近的一个强目标信号的估计.

- (4) 对 $S_{\text{ref}}(t)$ 作 Radon 变换, 确定该目标信号的多普勒中心频率 f_{d0} 和调频斜率 K .

- (5) 构造解线性调频参考信号 $\exp(-j\pi Kt^2)$, 将其与原始回波信号相乘.

- (6) 对相乘后的回波信号作 Fourier 变换, 此时该强目标信号因被解线性调频而表现为窄谱, 其中心位于 f_{d0} , 其它的目标信号均为散开的宽谱.

- (7) 构造一个极窄的带阻滤波器, 其中心频率对准 f_{d0} , 则该强目标信号的主瓣分量被滤除, 只剩余很少的旁瓣分量. 当然这也影响到其它信号分量, 但由于阻带很窄, 故影响很小.

- (8) 对滤除第一个强目标分量后的频域信号作 Fourier 反变换变回时域, 再乘以 $\exp(j\pi Kt^2)$ 恢复成解线性调频以前的信

号. 此时就得到了第一个强目标基本被滤除, 而对其它信号影响很小的合成信号.

(9) 重复步骤(2) - (8), 强目标信号分量被逐个滤除, 弱目标信号被检测出来, 最后直到检测不出明显的目标信号为止.

这种基于逐次消去思想的 XWVD 检测方法可以有效地消除强目标信号的交叉项对弱目标信号分量的影响, 使得强度相差较大的多个运动目标都可以被依次检测出来.

5 仿真实验结果

考虑机载 SAR 处于正侧视工作状态, 雷达脉冲重复频率为 500Hz. 假设仅存在一个运动目标, 其回波信号的多普勒中心频率为 66.67Hz, 调频斜率为 100Hz/s. 这里我们在目标信号中加入了零均值的高斯白噪声以模拟对消后剩余的地杂波, 信噪比为 -10dB. 图 2(a) 为对回波信号直接作 WVD 的结果, 其分布杂乱无章, 无法看出目标信号的存在, 再作 Radon 变换才略微看出有一很小的尖峰, 但也很难据此作出信号检测, 如图 2(b) 所示.

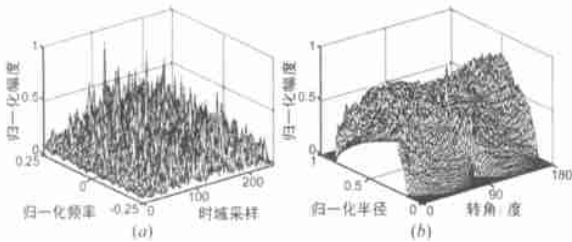


图 2 (a) 单目标信号的 Wigner-Ville 分布; (b) 图 2(a) 的 Radon 变换

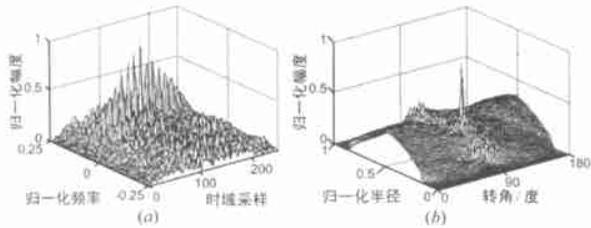


图 3 (a) 单目标信号与参考信号的互 Wigner-Ville 分布; (b) 图 3(a) 的 Radon 变换

我们应用前面介绍的基于 XWVD 的迭代算法进行检测, 最终达到收敛的参考信号与回波信号之间的 XWVD 如图 3(a) 所示, 图中可以明显看出信号分量的背鳍状分布, 再进行 Radon 变换可以得到一个尖锐的峰值, 见图 3(b). 实际上 XWVD 对弱目标信号的检测能力可达 -15dB 以上.

下面考虑多目标的情况. 假设有 3 个运动目标, 其回波信号的多普勒质心分别为 -50Hz, 100Hz, 30Hz, 调频斜率分别为 100Hz/s, 60Hz/s, 200Hz/s. 它们的散射系数分别设为 1, 0.7 和 0.5. 这里仍然在目标信号中加入零均值的高斯白噪声以模拟对消后剩余的地杂波, 三个目标的信噪比分别为 0dB, -3dB 和 -6dB. 图 4(a) 为对回波信号直接作 WVD 的结果, 从中只能分辨出两个较强的目标, 一个弱目标被强目标信号的交叉项所掩盖, 完全不可见(其位置如图中虚线所示), 应用本文提

出的逐次消去方法, 首先通过迭代得到收敛于第 1 个强目标的参考信号, 此时该参考信号与回波信号的 XWVD 如图 4(b) 所示. 这样再通过 Radon 变换估计出第 1 个强目标信号参数, 构造对该强目标的解线调参考信号, 经过时域相乘, 频域滤波和时域校正, 就得到第 1 个强目标分量被滤除后的回波信号, 此信号的 WVD 如图 4(c) 所示, 其中弱目标信号分量已经依稀可见. 然后重新生成初始参考信号, 再次经过迭代得到收敛于第 2 个强目标的参考信号, 它与滤除第 1 个强目标后回波信号的 XWVD 如图 4(d) 所示. 经过同样的过程滤除第 2 个强目标信号, 只剩下第 3 个弱目标信号分量和噪声, 此时的 WVD 如图 4(e), 其中的信号项已经比较明显, 但噪声的分布仍然很强. 再次构造参考信号进行迭代, 最终得到收敛于第 3 个弱目标信号的参考信号, 它与最后仅含第 3 个目标信号的回波信号之间的 XWVD 如图 4(f) 所示, 噪声分布被大大抑制, 此时通过 Radon 变换就可以精确求出第 3 个弱目标信号的运动参数.

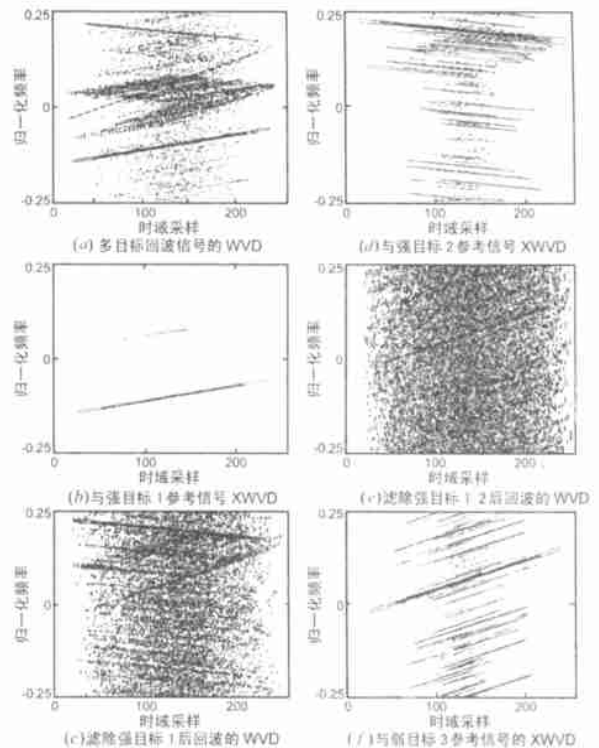


图 4

6 结束语

综上所述, 常用的 Wigner-Ville 分布的信号检测性能对信噪比要求较高, 而且在多目标情况下其交叉项很难消除, 严重影响到弱目标的检测. 本文提出的互 Wigner-Ville 分布方法可以在较低的信噪比下检测出目标, 性能大大优于普通的 Wigner-Ville 分布. 并且为解决强度相差较大的多目标检测问题, 本文提出基于逐次消去的 XWVD 检测方法十分有效, 仿真实验结果证明了这一点.

参考文献:

[1] H B Sun, H Gu, W M Su, G S Liu. A review of moving target detection and imaging by airborne synthetic aperture radar [A]. Proc. of EUSAR' 2000 [C], Munich, Germany, 2000: 544- 548.

[2] S Barbarossa, A Farina. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. Part 2: Joint time frequency analysis by Wigner Ville distribution [J]. IEE Proceeding F, 1992, 139(1): 89- 97.

[3] S Barbarossa. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined Wigner Hough transform [J]. IEEE Trans. on SP, 1995, 43(6): 1511- 1515.

[4] 毛引芳, 陈国安. 基于 WVD-HT 的 SAR/ ISAR 多运动目标检测 [J]. 电子科学学刊, 1997, 19(4): 464- 469.

[5] Boashash B, O' Shea P. Use of the cross Wigner Ville distribution for

estimation of instantaneous frequency [J]. IEEE Trans. on SP, 1993, 41 (3): 1439- 1445.

作者简介:

孙泓波 男. 1975 年生于河南省郑州市. 1997 年获南京理工大学电子工程专业学士学位. 同年免试进入通讯与信息系统学科攻读硕士学位. 1998 年开始提前攻读通讯与信息系统学科博士学位. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生. 主要研究方向为雷达成像、空时二维信号处理、机载雷达运动目标检测和非平稳信号处理等.

顾红 男. 1967 年生于江苏省启东市. 1995 年获西安电子科技大学通信与电子系统学科博士学位. 现为南京理工大学电子工程与光电技术学院副教授. 主要研究方向为噪声雷达和高速数字信号处理.

(上接封 4)

矢量变换域内灰度级数字水印嵌入算法	孙圣和	王秋生
合成孔径雷达卫星姿态指向稳定度与图像质量关系的研究	陈杰	周荫清
分支阻断干涉 SAR 相位展开算法的解析与实现	李笑郁	李春升
基于全局运动信息的视频检索技术	俞天力	毛士艺
多径环境中的盲空时降维多用户检测	王玮 李少洪	章毓晋
一种新的信源、信道编码和差错隐藏的联合优化方法	苏英俊	杨晨阳
用整体最优准则实现 ISAR 成像的包络对齐	邢孟道	王京
地面数字电视广播系统中的视频传输容错算法	李楚翔	陆建华
一种基于双星系统的导航定位新方法在 CNS/ ATM 中的潜在应用	于耕	王海芳
高分辨率 SAR 图像地物分类算法研究	付琨	郁文贤
基于运动参数估计的 SAR 成像	邢孟道	保铮
基于多时间尺度复合子带噪声语音识别新方法	蒋文建	韦岗
HMM 转移概率的重估算法	李健	王作英
Web 信息的分布式在线评测技术	毛昀 汪东升	郑纬民
空时二维自适应处理的目标污染样本挑选方法	王彤	邓小铁
一种智能天线通道失配的校正技术	吴莉莉	保铮
一种自适应全局最小平均范数算法	冯大政	廖桂生
基于均衡信度分配准则的冲突证据组合方法	王壮 胡卫东	常冬霞
基于突锥分析的低概率检测方法研究	李智勇	郁文贤
星载 SCANSAR 模式的实现方法及计算机仿真	徐华平	匡纲要
多参考运动补偿预测中的误码传播和编码效率	刘静	周荫清
免疫进化聚类算法	钟伟才	郁杨
量子进化策略	杨淑媛	刘芳
免疫进化子波网络及其学习算法	王磊	刘芳
近场光学扫描显微镜中的信号处理	党李成	刘芳
基于 AR 模型的调制盲识别方法	戴威	吕善伟
一种新的基于相关序列的 CDMA 系统盲波束形成方法	田孝华	王有政
基于混沌序列的 DS-SS CDMA 相关解调系统	王玫	王京
频率选择性衰落信道下 DS-SS CDMA 系统发射分集技术	黄晖	廖桂生
一种新的 MG-CDMA 系统同步算法	孙雪俊 焦影	曾虹虹
粗神经网络的禁止搜索训练算法研究	梅晓东	周祖成
矩形波导斜切口面辐射特性的 FDTD 分析	高文军	孙圣和
一种基于自适应预测的医学图像高效无损压缩方法	张晓玲	吕善伟
人脸图像检测及分类系统的研究	陈茂林	沈兰荪
麻醉监测脑电分析的研究	莫玮	戚飞虎
图像的情感特征分析及其和谐感评价	毛峡 丁玉宽 牟田一弥	丁宣浩
矢量处理器在 SAR 实时成像中的应用及性能分析	王俊 孙进平	毛士艺
机载相控阵雷达波束多普勒域部分自适应处理方法研究	陈建文	王月忠
双基地机载预警雷达空时自适应处理方法	魏进武	王永良
双基地机载预警雷达空时二维杂波建模及杂波特性分析	王永良	陈建文
混合进制广义沃尔什函数的复制生成	张其善	魏进武
频域反卷积滤波器的因果性的研究	刘明亮	张凤元
一种基于 BP 神经网络群的自适应分类方法及其应用	宋锐 张静	陈龙
		高剑
		夏胜平
		郁文贤