

引用格式: Pan Fangbo, Chen Kunshan. Simulation Analysis and Application of SAR Target Motion Parameters based on EMD-RSPWVD Algorithm[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(3): 645-655. [潘方博, 陈昆山. 基于EMD-RSPWVD算法的SAR目标运动参数仿真分析与应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(3): 645-655.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.3.0645

基于EMD-RSPWVD算法的SAR目标运动参数 仿真分析与应用研究

潘方博^{1,2}, 陈昆山¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对传统时频分析方法处理多分量SAR运动目标回波数据时出现的交叉项影响严重和时频聚集性差等问题,提出一种融合改进的经验模式分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)算法和重排平滑伪维格纳维尔分布(Reassigned Smoothing Pseudo-Wigner-Ville Distribution, RSPWVD)算法的新时频分析算法——EMD-RSPWVD算法。利用改进的EMD算法将多分量SAR动目标回波信号分解为彼此独立信号分量,然后对独立分量分别做基于RSPWVD算法的时频分析,以消除交叉项和获得高的时间—频率分辨率。分别利用模拟回波信号数据和真实回波信号数据,探究该算法对于多分量SAR运动回波数据的分析性能。结果表明,该算法具有良好的抗噪性和运动目标检测能力,以及高精度的运动参数估计性能。

关键词: EMD算法; RSPWVD算法; 运动目标; 运动参数

中图分类号: TP75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)03-0645-11

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是地表遥感观测体系中的重要手段,利用雷达与目标间相对位置关系变化的相位信息来生成高分辨率影像,不受天气和时间的限制,使其在军事和民用领域得到广泛的应用^[1]。对于地面本身具有的移动目标,其运动同样会造成相位信息的变化,这部分变化直接导致成像结果的散焦和移位^[2-4]。因此,高精度的目标运动参数估计,对于动目标SAR成像结果的运动补偿以及地面动目标的监测显得尤为重要。

对于SAR场景下运动目标运动参数估计主要从两个角度进行,即图像域和原始回波域^[5-8]。基于

图像域的算法为子视图法,但是子视图中动目标是散焦的,所以其结果的精度有待商榷。基于原始回波域的算法为时频分析法和距离历程拟合,后者由于载具运动非理想性,实际中难以进行拟合。SAR回波信号属于线性调频信号,使用时频分析方法可以快速准确的进行分析,故本研究采取时频分析的方法对回波信号进行分析,通过估计回波信号的多普勒中心频率偏移和多普勒调频率来高精度的估计目标地运动参数^[9-12]。

时频分析作为一种有效的线性调频信号分析工具,根据其特性可分为4类:线性时频分析算法,这类算法简单有效,但时频分辨率低^[13];自适应时频分析算法,以希尔伯特—黄变换(Hilbert Huang

收稿日期: 2019-04-21; 修订日期: 2020-05-09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“同轨集合SAR—Scatterometer的新型微波多维探测理论与模式研究”(41531175)。

作者简介: 潘方博(1992—),男,河南开封人,主要从事SAR信号分析与应用研究。E-mail: panfb@radi.ac.cn

通讯作者: 陈昆山(1959—),男,台湾台中人,研究员,博士生导师,主要从事微波遥测与通讯、电磁波传播散射以及雷达信号系统方面的研究。E-mail: chenks@radi.ac.cn

Transform, HHT)算法为代表的这类的数据驱动的瞬时频率估计方法,受噪声影响严重^[14];能量重排时频算法,以RSPWVD算法为代表的这类算法时频聚集性好,时频分辨率高,但是分析具有相近分量的多分量信号时容易出现散焦^[15];双线性时频分析算法,以维格纳—维尔分布(Wigner-Ville Distribution, WVD)算法为代表的这类算法具有良好的时频聚集性和高的时频分辨率,使其在SAR回波信号分析这种对时频分辨率要求较高的领域比其他时频分析算法更具有优势,很多学者也开展了一系列基于WVD算法进行SAR回波信号的分析的研究^[16-19]。但是由于WVD算法核函数的双线性,使其对于多分量信号的分析会出现严重的交叉项,影响了其对于信号分量的检测结果。为了抑制交叉项,Wang等^[20]联合霍夫(Hough)变换,将时频分析结果由图像空间转换到参数空间进行信号分量的提取。但是,此方法运算量大,而且当噪声较高时,误检率会大幅提升;Wang等^[21]利用EMD算法和WVD改进算法进行融合,来消除交叉的影响,但些融合算法都由于EMD算法的影响,受噪声影响程度大,交叉项去除不干净,不利于实际信号的处理;李秀坤等^[22]将WVD算法得到的结果进行坐标转换并滤波,再进行坐标反变换,以消除交叉项。但是,对于特别相近的信号分量之间的交叉项抑制效果不明显。

为了克服上述时频分析算法的缺陷,本文利用HHT算法体系中的EMD算法(并针对抗噪性进行改进)和RSPWVD算法进行融合形成一种新时频分析算法-EMD-RSPWVD算法。多分量SAR回波信号经过改进的EMD算法进行分解,将得到彼此独立的信号分量,对这些独立信号分量分别进行基于RSPWVD算法的时频分析,将能在时频分析结果中有效地区分信号分量,并获得信号分量的相应多普勒信息。本文利用EMD-RSPWVD算法分别对模拟和真实的动目标SAR回波信号进行分析,探究算法的有效性。

2 运动目标回波信号分析

2.1 运动目标SAR回波信号模型

采用机载平台开展运动目标SAR回波信号分析,SAR观测模式为条带式,其正侧视的几何结构如图1所示。

雷达沿着正 x 方向以速度 v_s 前进,目标初始位

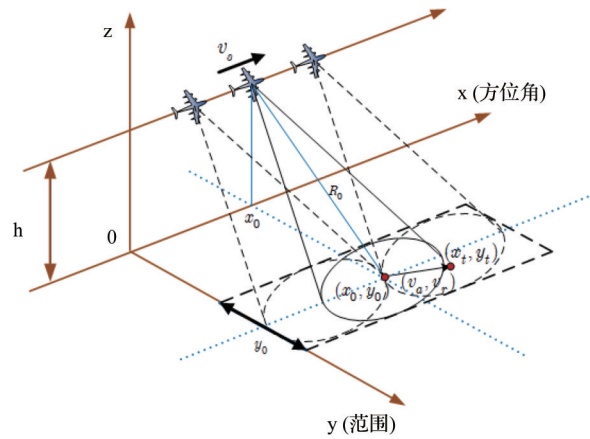


图1 SAR场景示意图

Fig.1 Schematic diagram of SAR scene

置 (x_0, y_0) ,移动速度则分成方位向速度 v_a 和距离向速度 v_r ;当雷达运动一段时间 η 后,目标物将会移动到 (x_t, y_t) ,即 $(x_0 + v_a\eta, y_0 + v_r\eta, 0)$,而雷达运动到位置 $(v_s\eta, 0, h)$ 。雷达和地面运动目标之间的瞬时斜距 $R(\eta)$ 经过泰勒展开保留二次项后可表示为下式:

$$R(\eta) = \sqrt{[v_s\eta - (x_0 + v_a\eta)]^2 - [0 - (y_0 + v_r\eta)]^2 + [h - 0]^2} \\ \approx R_0 + \frac{x_0 v_a + y_0 v_r - x_0 v_s}{R_0} \eta + \frac{v_s^2 + v_a^2 + v_r^2 - 2v_s v_a}{2R_0} \eta^2 \quad (1)$$

其中: $R_0 = \sqrt{y_0^2 + h^2}$,瞬时斜距的变化反映在回波信号上表现为相位信息的变化,借助发射信号表达式和瞬时斜距表达式可以推导出回波信号的表达式,通过对回波信号的载频进行解调,可以获得单个移动目标物去载频后的SAR回波信号模型表达式为:

$$S_{echo}(t, \eta) = \sigma_0 \omega_a(\eta) \exp(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0) \\ \cdot \exp(j 2\pi [\frac{1}{2} K_r (t - \tau)^2]) \\ \cdot \exp\{-j \frac{4\pi (x_0 v_a + y_0 v_r - x_0 v_s)}{\lambda R_0} \eta\} \\ \cdot \exp\{-j \frac{2\pi [(v_s - v_a)^2 + v_r^2]}{\lambda R_0} \eta^2\} \quad (2)$$

其中: σ_0 、 $\omega_a(\eta)$ 分别为关于目标的背向散射系数和与天线有关的常数; K_r 为发射信号调频率, t 为距离向时间, τ 为时间延迟。公式(2)中和由目标物运动引起的相位信息变化项的为最后两项。其中,第一项包含距离徙动和多普勒中心偏移有关的信息;第二项包含距离弯曲项和多普勒调频率有关的信息。将获取的经过去载频后的动目标回波信号进行时频分析,从时频分析结果图上获得多普勒中心频率

的偏移量和多普勒调频率,进而利用上述后两项反算出移动目标物的方位向速度和距离向速度。由于 R_0 远大于 t 时间内雷达和地面动目标物的运动距离,在进行相关近似后,多普勒中心频率偏移量 f_{dc} 和多普勒调频率 f_{dr} 的公式分别为式(3)和(4):

$$f_{dc} = \frac{2x_0 v_a}{\lambda R_0} \quad (3)$$

$$f_{dr} = -\frac{2(v_s - v_r)^2}{\lambda R_0} \quad (4)$$

2.2 地面运动目标运动参数估计框架

采用正侧视距离多普勒算法对回波数据进行处理,其流程图如图2,具体实现步骤为:①对已经去载频的回波信号进行距离方向的压缩;②对经过距离压缩的信号进行方位向的相位补偿,消除雷达运动所造成的多普勒调频率的变化;③选取合适的方位线进行时频分析;④提取时频分析结果图中信号分量,并获取目标运动引起的多普勒中心频率偏移量和多普勒调频率;⑤计算运动目标方位向速度和距离向速度。

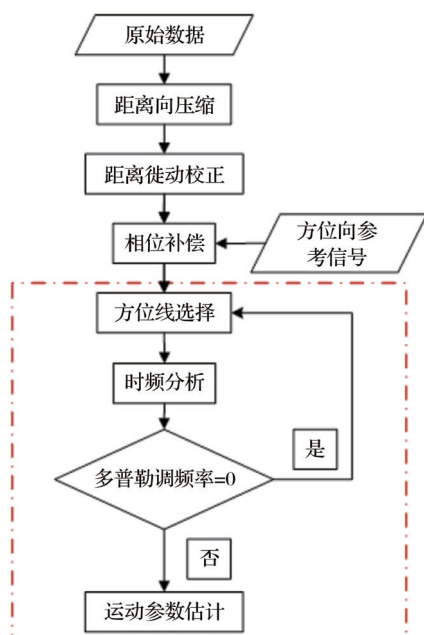


图2 动目标检测及运动参数估计流程图

Fig.2 Flow chart of moving target detection and motion parameter estimation

3 EMD-RSPWVD算法及对比分析

3.1 EMD-RSPWVD算法原理

HHT算法是由数据驱动的一种真正基于瞬态频率的信号自适应分析方法,该算法核心为EMD算法^[14]。EMD算法依据数据自身的时间尺度特征

将信号分解为若干个从高频到低频排列的固有模式函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个剩余分量 $\text{Res}(t)$,这些IMF分量彼此独立。EMD算法无需预先设定任何基函数使其和傅立叶分解与小波分解有着本质区别。信号经过EMD分解的结果为公式(5):

$$x(t) = \sum_{i=1}^n \text{IMF}_i(t) + \text{Res}(t) \quad (5)$$

其中: n 表示IMF分量的数量。HHT算法由于在EMD算法分解过程中进行插值操作,如果信号噪声太强会导致插值结果不准确,进而导致HHT算法时频分析结果出现散焦情况。

PWVD算法和SPWVD算法都是对WVD算法分别进行时域或频域平滑的改进算法^[21],其中SPWVD算法是在PWVD算法基础上进行的改进,交叉项抑制效果更好,SPWVD算法的表达式为式(6),该算法对交叉项抑制效果好,但是由于平滑次数多,造成时频分辨率严重下降。RSPWVD算法是由Auger和Flandrin^[15]提出,其将重排技术引入到SPWVD算法中,将SPWVD算法时频分析结果局部能量中心由其几何中心重排到其质量中心,这样不仅可以保持时频聚集性,还进一步地压制了交叉项,其时间和瞬时频率的重排表达式为公式(7)和(8):

$$\text{SPWVD}(t, f) = \int h(t) \int \omega(t-u) \cdot s\left(t + \frac{\tau}{2}\right) s^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) du e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

$$\hat{t}(x; t, \omega) = t - \frac{\iint u \cdot \Phi_{TF}(u, \Omega) \text{SPWV}(x; t-u, \omega-\Omega) du \frac{d\Omega}{2\pi}}{\iint \Phi_{TF}(u, \Omega) \text{SPWV}(x; t-u, \omega-\Omega) du \frac{d\Omega}{2\pi}} \quad (7)$$

$$\hat{\omega}(x; t, \omega) = \omega - \frac{\iint \Omega \cdot \Phi_{TF}(u, \Omega) \text{SPWV}(x; t-u, \omega-\Omega) du \frac{d\Omega}{2\pi}}{\iint \Phi_{TF}(u, \Omega) \text{SPWV}(x; t-u, \omega-\Omega) du \frac{d\Omega}{2\pi}} \quad (8)$$

重排是将局部区域内能量进行重新分布,式(7)和(8)为重排算子,任意一点经重排后其值 (t', ω') 可由下式得到。

$$\text{RSPWVD}(x, t', \omega') = \iint \text{SPWVD}(x, t, \omega) \delta(t' - \hat{t}(x, t, \omega)) \cdot \delta(\omega' - \hat{\omega}(x, t, \omega)) dt \frac{d\omega}{2\pi} \quad (9)$$

其中: $\delta(t)$ 为狄拉克函数,此算法对于单分量信号

时频分析结果较好,但是对于信号分量较为接近的多分量信号的分析,此算法会出现散焦和信号分量关联严重的问题。

将 EMD 算法不受交叉项影响的优势和 RSPWVD 算法高时频聚集性和高时频分辨率的特性结合起来,同时对 EMD 算法的插值算法进行改进,获得一种既能抑制交叉项又能保持良好时频分辨率和抗噪性的新时频分析算法-EMD-RSPWVD 算法。EMD-RSPWVD 算法流程图为图 3,具体处理流程为:①利用改进的 EMD 算法将所需处理的信号进行分解,得到一系列具有单分量特性的 IMF 分量和一个剩余分量;②选取有效的 IMF 分量分别做基于 RSPWVD 的时频分析;③将得到的时频分析结果无权线性累加,得到 EMD-RSPWVD 算法的时频分析结果。

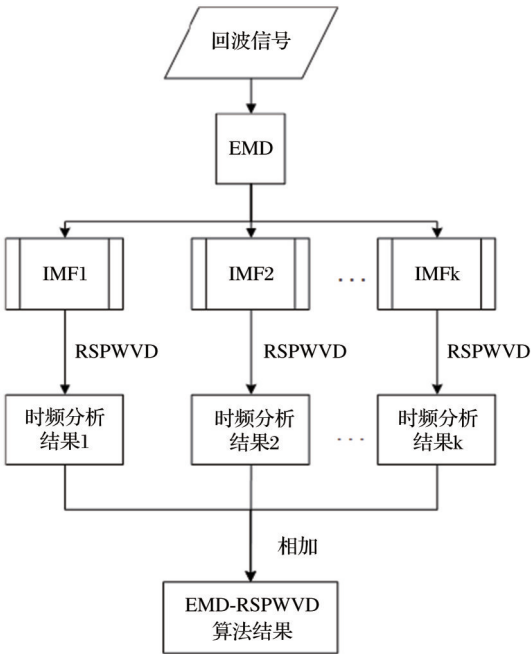


图 3 EMD-RSPWVD 算法流程图

Fig.3 Flow chart of EMD-RSPWVD algorithm

3.2 与已有时频分析算法对比

为了验证 EMD-RSPWVD 算法对于多分量 SAR 回波信号分析的有效性,实验设置了一个具有 3 个运动目标的 SAR 观测场景——场景 1,场景 1 如图 4 所示 3 个运动目标只有距离向的速度,而且距离向速度分别为 3 m/s、6 m/s 和 9 m/s。实验模拟的是在机载平台下进行,雷达工作波段为 C 波段,地面目标初始位置设在成像中心,SAR 系统的仿真参数如表 1 所示。

如图 4 所示,实验中目标初始位置都设在一个

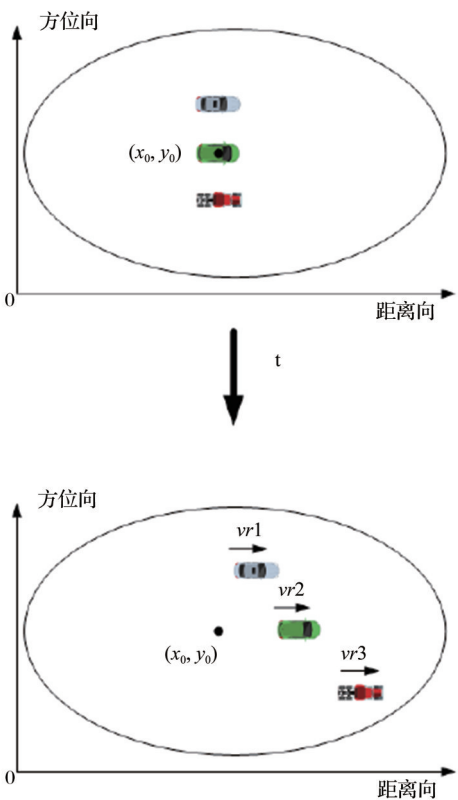


图 4 3 个运动目标在场景 1 中不同时刻位置示意图

Fig.4 Schematic diagram of three moving targets at different moments in scene 1

表 1 SAR 参数表

Table 1 SAR parameter table

参数名称	值
雷达速度/(m/s)	150
脉冲持续时间/ μ s	2
调频斜率/(Hz/s)	$2e13$
距离向采样率/MHz	60
PRF/Hz	160
多普勒带宽/Hz	80
雷达中心频率/GHz	5.3
雷达与目标最短距离/m	20 000

像元内,这种情景回波数据时频分析较为复杂, EMD-RSPWVD 算法如能适用即可进一步推广到其他 SAR 场景中,进行动目标的检测以及运动目标运动参数估计。将在场景 1 获得的 SAR 回波数据进行 RDA 算法成像处理,选取成像过程中距离压缩后的方位线进行时频分析,分别利用 HHT 算法、WVD 算法、PWVD 算法、SPWVD 算法、RSPWVD 算法、EMD-RSPWVD 算法进行对比分析,在数值仿真过程中保持无噪环境,得到的时频分析结果如图 5。

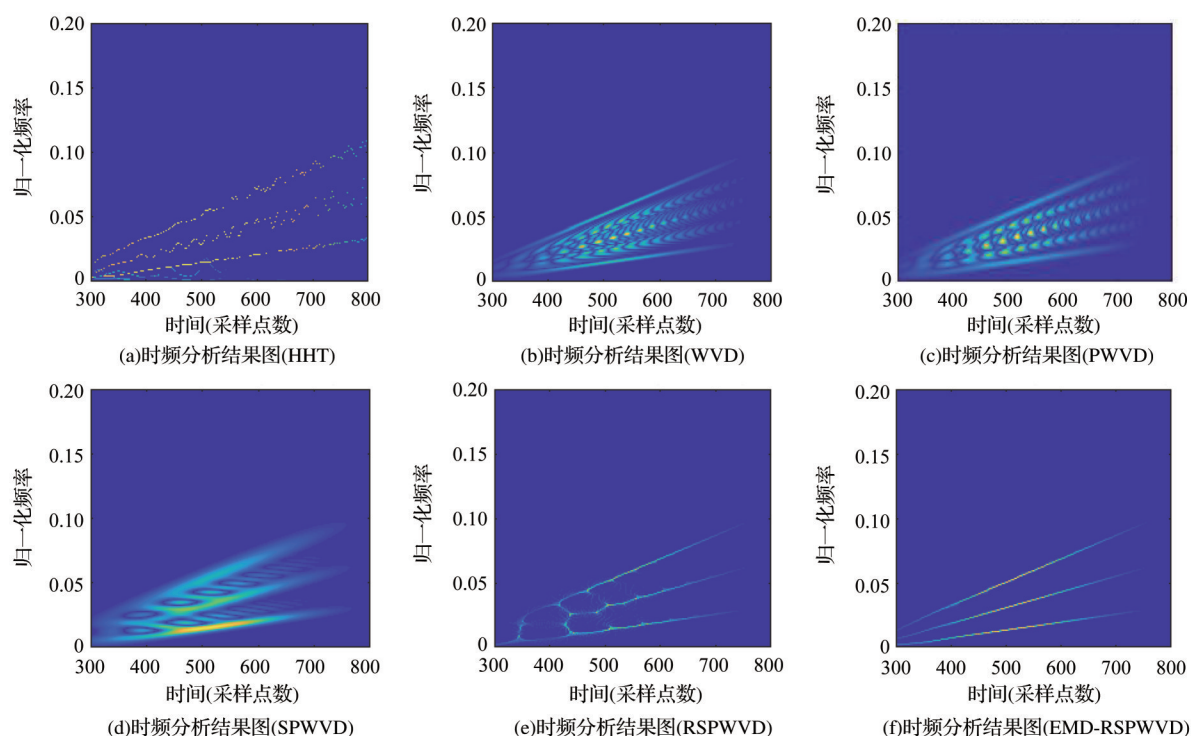


图5 不同时频分析方法处理结果

Fig.5 Different time-frequency analysis method processing results

图5为在场景1下六种时频分析算法的处理结果,其中,HHT算法对于低频分量能够很好地进行刻画,而对于具有较高频率的分量的刻画出现散焦现象。WVD算法、PWVD算法和SPWVD算法均能够完整的刻画两个位于边缘的分量,但随着平滑次数的增加,其时频分辨率下降严重,同时交叉项没有完全去除,印证了之前理论分析的正确性。RSPWVD算法能够较好地刻画出信号分量,结果保持良好的时频聚集性和时频分辨率,但信号分量频率较为接近的区域会出现混叠现象,不利用后续的多普勒分析。EMD-RSPWVD算法相较于其他5种时频分析方法表现优异,不仅对信号分量刻画完整,而且没有出现交叉项,时频聚集性和时频分辨率都较高,从其时频分析结果图中可以高精度的提取信号分量的多普勒信息,便于后续运动参数的估计分析。

4 实验验证及分析

4.1 动目标检测能力实验与分析

为了验证EMD-RSPWVD算法对于地面移动目标的检测能力,本研究设计一系列场景来进行试验,试验按目标数量分为两目标、三目标、四目标场景。

通过设置4个地面有两个运动目标物的场景,

进行数值仿真,分析EMD-RSPWVD算法对于存在2个运动目标物场景的检测能力。图6(a)为运动方向相同且速度相差0.1 m/s的两地面运动目标的SAR回波数据时频分析结果图,图中已可以区分这两个分量,通过计算这两个分量的多普勒参数就可获得两个运动目标的运动参数;图6(b)为两运动目标运动方向相同且速度相差0.5 m/s的场景,时频分析结果图上可以将二分量很好地区分,并获得两分量精确的多普勒参数;图6(c)两运动目标运动方向相同且速度相差1 m/s的场景,在时频分析结果图可以将二者完整区分,并可以将两个运动目标的运动参数进行精确估计。图6(d)为两运动目标运动方向反向的场景,时频分析结果图中频率接近的区域没有出现散焦和混叠现象,同时还能高精度的估计二分量的参数。目标速度达到40 m/s时,时频结果图上的没有出现多普勒混叠,可以证明该算法能够检测的速度范围不小于40 m/s(即144 km/h),足以满足绝大部分地面动目标物检测场景。

图7(a)为地面3个运动目标运动方向相同且速度间隔都为1 m/s的场景的时频分析结果,图上3个分量可以得以区分;当3个运动目标速度间隔达到1.5 m/s时,图7(b)的时频结果图上可以区分3个分量并得到3个目标高精度的运动参数估计;图7(d)

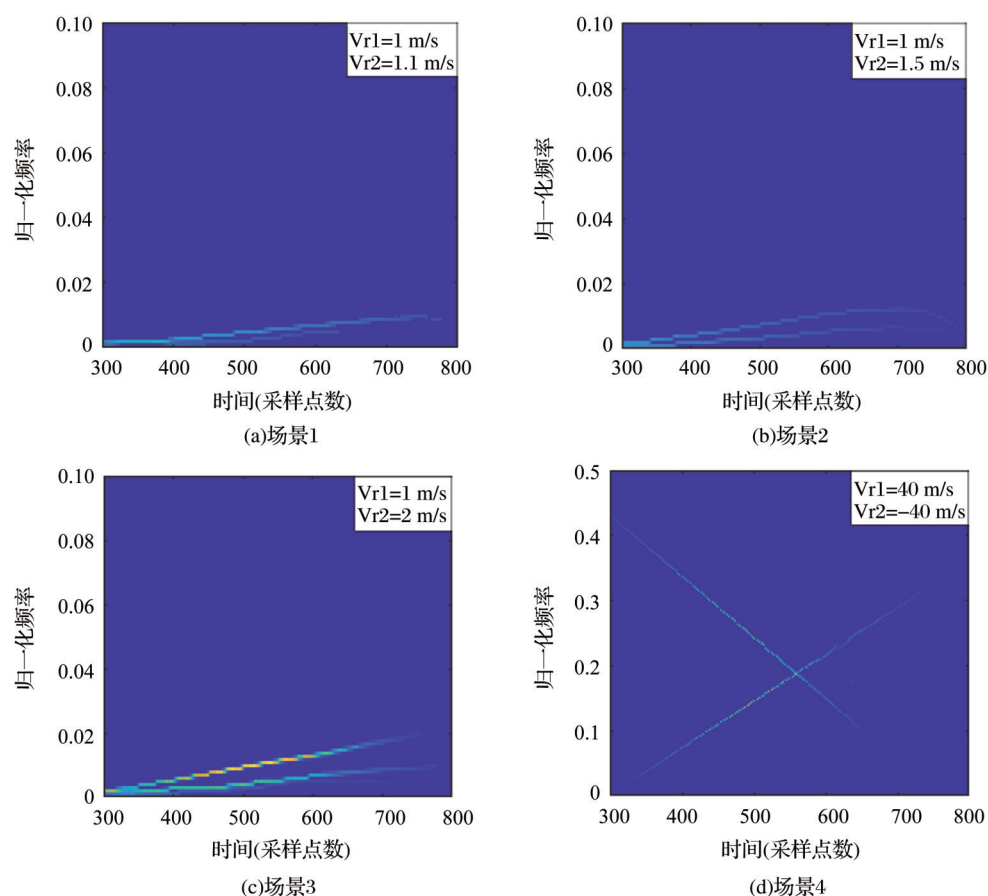


图 6 地面运动目标物数量为 2 的 4 个场景的 SAR 回波数据时频分析结果图

Fig.6 Time-frequency analysis results of SAR echo data in four scenes with a moving target number of 2

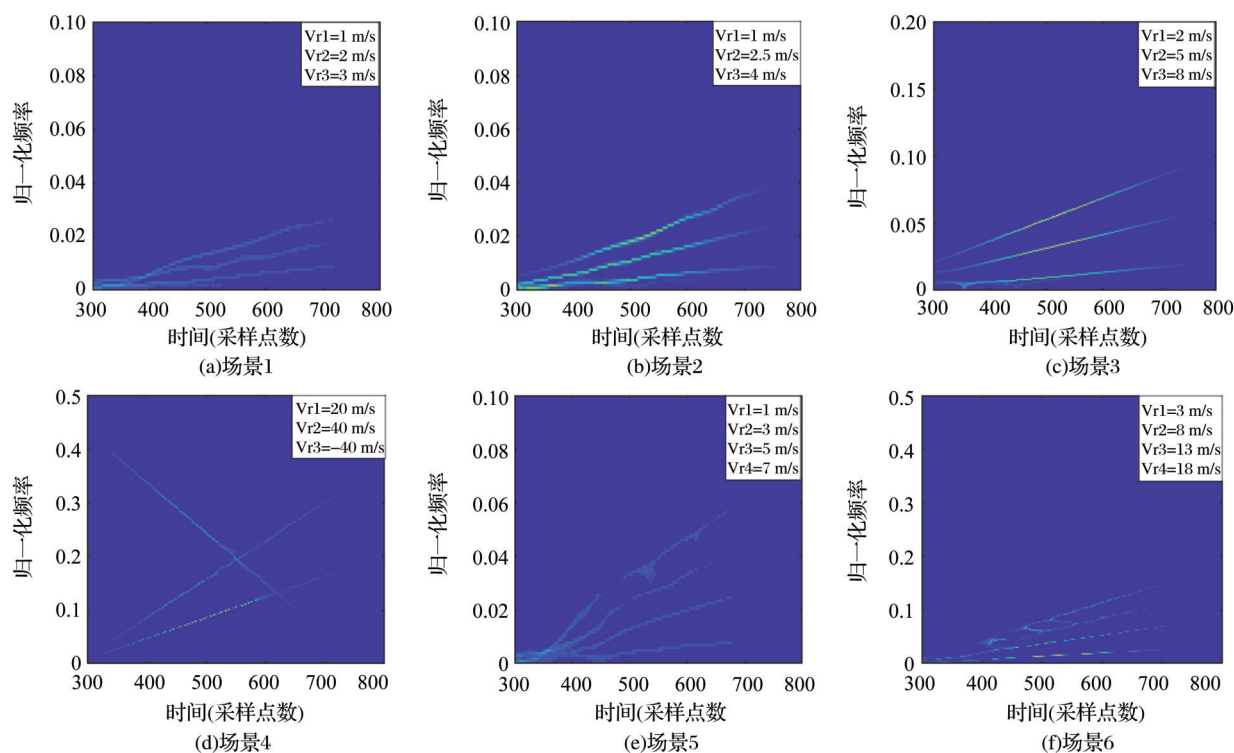


图 7 地面移动目标物数量为 3 和 4 的 6 个场景的时频分析结果图

Fig.7 Time-frequency analysis results of 6 scenes with 3 and 4 moving objects on the ground

为3个运动目标物中一目标物与另外两目标物运动方向反向的场景,其时频分析结果显示三分量会出现交叉现象,从结果图中可以看出三分量可以得到有效区分,不会出现散焦和混叠现象。图7(e)和(f)地面运动目标数量为4个的场景,随着目标数量的增加从时频分析结果图上区分各分量的速度间隔逐渐增加。同理对于同方向运动目标不超过4个的场景,EMD-RSPWVD算法均能表现出良好的性能。从实验中也可以得到,当地面运动目标物数量较多且速度间隔有限的情况下,在实际应用过程中应取各信号经过EMD分量后的前几个IMF分量进行分析,进而获取各信号分量高精度的多普勒参数估计。

4.2 仿真数据的运动参数估计实验

由公式(3)和(4)可知,如果已知多普勒中心频

率偏移和多普勒调频率的情况下,便可以求出运动目标物的方位向速度和距离向速度,同时也可得出运动目标物的运动方向。多普勒参数可以从时频分析结果图中获得,具体为对时频分析结果图中各分量独立的进行线性拟合,得到各信号分量拟合得到的直线结果及表达式,直线的斜率即为多普勒调频率,进而利用公式(4)推算出地面运动目标物沿距离方向的速度;同时直线的截距推算出多普勒中心频率偏移量,进而就可以利用公式(3)计算出目标沿方位方向移动的速度。在研究中,设计运动速度和方向均不相同的两个运动目标场景——场景2进行仿真分析,场景2中量运动目标的位置示意图如下图8所示。场景2中目标1只具有距离向速度,速度为5 m/s,目标2同时具有方位向和距离向速度,其速度分别为1 m/s和10 m/s。

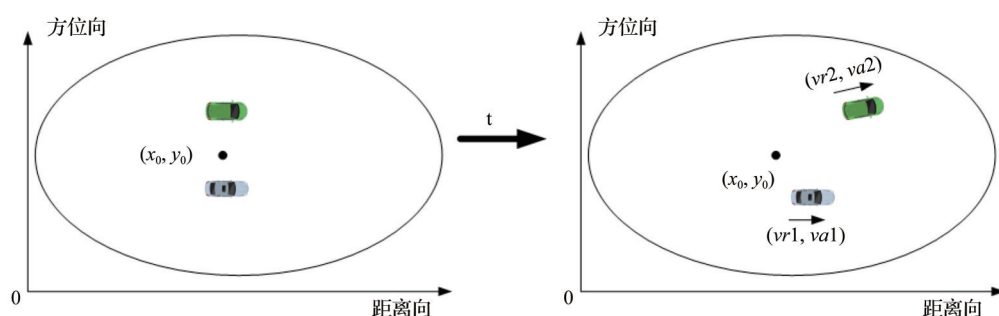


图8 SAR场景下两动目标位置示意图

Fig.8 Schematic diagram of two-moving target location in SAR scene

利用EMD-RSPWVD算法对场景2中获取的SAR回波数据进行时频分析,该回波数据是在无噪声环境下获得,得到EMD-RSPWVD算法的数值仿真结果如图9所示。图9(a)和(b)分别为方位线编号为512和514的两条方位线进行基于EMD-RSPWVD算法,得到的时频分析结果,从结果中可以得

知,如果选取中心方位线左侧的方位线进行时频分析,结果会突显频率较高的组分;而选取中心方位线右侧的方位线进行时频分析,其结果会突显频率较低的组分。在实际应用过程中要以多角度去获取信号整体的多普勒特性,进而获得地面运动目标完整的运动参数估计。

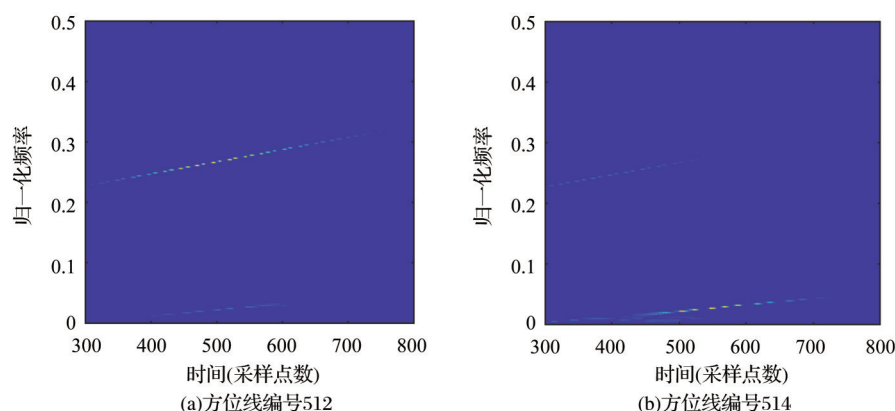


图9 两个运动目标EMD-RSPWVD时频分析结果图(方位线编号512、514)

Fig.9 Time-frequency analysis results of EMD-RSPWVD for two moving targets (azimuth line number 512, 514)

通过对图 8 的 EMD-RSPWVD 算法的时频分析结果的定量分析,得到场景 2 中两动目标的运动参数信息,如表 2 所示,对于方位向速度的估计误差为 0.446 6%,对于距离向的速度估计误差分别达到 1.427 1% 和 3.575 6%。运动目标 1 为单一在距离方向运动,运动目标 2 则在距离向和方位向都具有一定速度,可以证实该算法不只可以高精度的估计单一沿距离向或方位向运动的目标的运动参数,还可以高精度的估计任意方向运动的目标的运动参数。

表 2 运动参数估计结果						
Table 2 Motion parameter estimation results						
目标	理论值		估计值		估计误差/%	
	f_{dc}	f_{dr}	\hat{f}_{dc}	\hat{f}_{dr}	$\left \frac{f_{dc}-\hat{f}_{dc}}{f_{dc}} \right $	$\left \frac{f_{dr}-\hat{f}_{dr}}{f_{dr}} \right $
1	0	1.280 9	0	1.235 1	0	3.575 6
2	17.669	2.473 5	17.585 6	2.508 8	0.446 6	1.427 1

4.3 真实数据的运动参数估计实验

上述实验均在理想环境下进行,但是真实 SAR 观测过程中,无噪环境是不会存在的,因此需要探

究 EMD-RSPWVD 算法对于噪声的敏感程度,来为下一步真实场景中的应用打基础。设置具有两个运动目标的场景——场景 3,场景 3 中两目标均只具有距离向速度,速度分别为 5 和 10 m/s。通过在场景 3 中加入不同强度的加性高斯白噪声,分析 EMD-RSPWVD 算法对于噪声的影响情况。

图 10 为信噪比为 25、15、5 和 -5 dB 的场景 3 获得的回波数据经过 EMD-RSPWVD 算法时频分析所获得的结果,从图中可以得知,随着环境噪声的加强,EMD-RSPWVD 算法的时频分析结果图中信号分量的低频且相近部分逐渐散焦,而在高频部分依旧保持良好的时频聚集性和时频分辨率。即使在环境噪声达到 -5 dB 的情形下,两信号分量依旧可以完整区分,并从中通过线性拟合得到信号分量在时频结果图中所应形成的直线,进而获取信号分量的多普勒信息。

选取 2002 年温哥华地区的一组 Radarsart-1 回波数据,来进行真实数据实验与分析。Radarsart-1 卫星的系统参数如表 3 所示,实验区采用距离多普勒算法进行 SAR 成像,成像结果如图 11(a)所示。

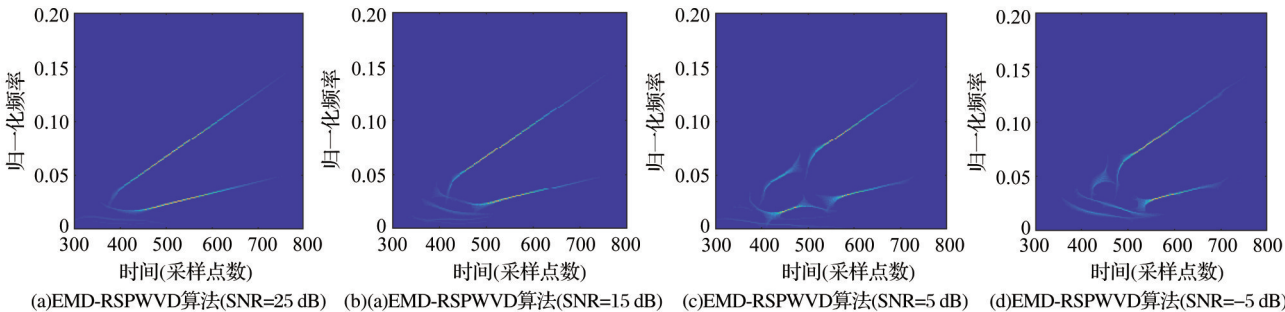


图 10 EMD-RSPWVD 算法抗噪性分析

Fig.10 Analysis of noise resistance of EMD-RSPWVD algorithm

图 11(b) 为 Radarsat-1 真实回波数据经过二次距离压缩结果,图中红框所框选区域为动目标所在位置。考虑到雷达速度远远大于地面移动目标物的速度,故在时频分析流程中没有进行方位向相位的补偿,即时频分析结果中多普勒参数的变化是由雷达运动和地面目标运动引起。图 11(c) 是基于 WVD 算法的时频分析结果,可以从图中提取有效的信号分量,但是目标分量旁伴随一条假的分量,可能会造成多普勒参数错误估计。图 11(d) 是基于 EMD-RSPWVD 算法的时频分析结果,图中目标分量的时频聚集性可以达到和 WVD 算法一样的效果,而且没有虚假分量的存在,同时也表现出 EMD-RSPWVD 算法良好的抗噪性。Tian 等利用同一数

表 3 Radarsat-1 数据系统参数	
Table 3 System parameters for Radarsat-1 data	
系统参数	值
雷达速度/(m/s)	7 062
载频/GHz	5.3
距离向带宽/MHz	30.12
PRF/Hz	1 256.98
距离向采样频率/MHz	32.32
脉冲持续时间/ μ s	41.74
多普勒中心频率/Hz	-6 900
方位向调频率/(Hz/s)	1 733

据进行地面动目标运动参数估计开展研究,并验证了结果的可靠性,故本实验以其得到的多普勒数据作为参考数据。表 4 为实验中 EMD-RSPWVD 算

法所得的多普勒参数与参考数据的对比结果,从表中可以得到基于 EMD-RSPWVD 算法得到的多普

勒参数与参考数据较为接近,验证了 EMD-RSPWVD 算法对于真实回波数据分析的有效性。

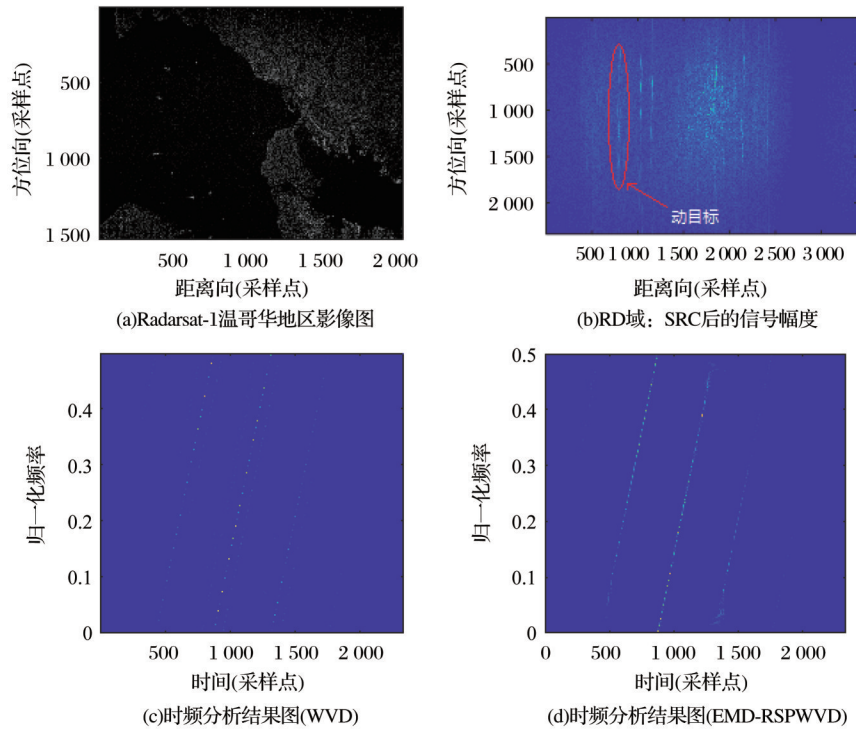


图 11 Radarsat-1 真实数据 RDA 成像结果及时频分析相关结果图

Fig. 11 Radarsat-1 real data RDA imaging results and time-frequency analysis correlation results

表 4 Radarsat-1 真实数据运动参数估计结果
Table 4 Radarsat-1 real data motion parameter estimation results

参考值		本文结果		误差 / %	
f_{dc}	f_{dr}	\hat{f}_{dc}	\hat{f}_{dr}	$\left \frac{f_{dc}-\hat{f}_{dc}}{f_{dc}} \right $	$\left \frac{f_{dr}-\hat{f}_{dr}}{f_{dr}} \right $
347.013 2	1773.020 5	334.739 1	1778.201 5	3.537 1	0.292 2

5 结 论

本研究针对 SAR 场景中现有时频分析算法难以同时准确估计多个运动目标参数的问题,利用改进的 EMD 算法可以将多分量信号分解为一系列独立信号分量的特性,结合 RSPWVD 算法良好的时频聚集性以及高时频分辨率的优势,形成一种新的时频分析算法-EMD-RSPWVD 算法。与已有时频分析方法相比,EMD-RSPWVD 算法具有不受交叉项影响、抗噪性好、时间-频率分辨率高等特性。实验选用模拟 SAR 回波数据和真实的 Radarsat-1 回波数据,检验 EMD-RSPWVD 算法的有效性。实验结果表明新的算法不仅可以有效地区分回波数据中各运动分量,还可以高精度地估计运动目标

的运动参数,能为后续动目标 SAR 成像和属性判别提供关键的速度矢量信息。

对于 SAR 回波信号这类线性调频脉冲信号体制,EMD-RSPWVD 算法表现出良好的性能,未来还将利用 EMD-RSPWVD 算法对于调频连续波体制、非线性调频信号体制和其他探测信号体制进行进一步的探究。

参考文献 (References):

[1] Chen K S. Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging: A System Simulation Approach[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[2] Wang Min, Yang Fengfeng, Liang Diannong, *et al.* Distributed Spaceborne SAR-GMTI System Simulation[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(5): 648-652. [王敏, 杨凤凤, 梁甸农, 等. 分布式星载 SAR-GMTI 系统仿真[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(5): 648-652.]

[3] Li G, Xu J, Peng Y N, *et al.* Detection, Velocity Estimation and Imaging of Fast Moving Targets Using Single Antenna SAR[C] // CIE International Conference on Radar, Shanghai, China: IEEE, 2006: 1-4.

[4] Huang P, Liao G, Yang Z, *et al.* A Fast SAR Imaging Meth-

- od for Ground Moving Target Using a Second-order WVD Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(4):1940-1956.
- [5] Li G, Xia X G, Xu J, *et al.* A Velocity Estimation Algorithm of Moving Targets Using Single Antenna SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(3): 1052-1062.
- [6] Yang Meng, Zhu Yutao, Zhao Yichao, *et al.* A Method based on Wigner-hough Distribution for SAR Ground Moving Target Imaging[J]. Modern Electronic Technology, 2015, 38(17):1-5.[杨猛, 朱宇涛, 赵逸超, 等. 一种基于 Wigner-Hough 分布的 SAR 地面运动目标成像方法[J]. 现代电子技术, 2015, 38(17):1-5].]
- [7] Xiong Wei, Xu Yongli, Yao Libo, *et al.* A New Ship Target Detection Algorithm based on SVM in High Resolution SAR Images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 119-127.[熊伟, 徐永力, 姚力波, 等. 基于 SVM 的高分辨率 SAR 图像舰船目标检测算法[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1):119-127.]
- [8] Wang Na, Li Qiangzi, Zhao Longcai, *et al.* Optimization Analysis in Ship Detection with High-resolution SAR Images based on Variation Coefficient Method [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(2):305-314.[王娜, 李强子, 赵龙才, 等. 基于变异系数法的 SAR 船舶检测优化研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2):305-314.]
- [9] Ding Yu, Xue N, Munson D C. An Analysis of Time-frequency Methods in SAR Imaging of Moving targets [C] // Proceedings of the 2000 IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop. Cambridge, MA, USA, 2000: 221 - 225.
- [10] Cexus J C, Boudraa A O. Nonstationary Signals Analysis by Teager-huang Transform (THT) [C]// IEEE: 2006 14th European Signal Processing Conference, Florence, Italy, 2006: 1-5.
- [11] Sun H B, Liu G S, Gu H, *et al.* Application of the Fractional Fourier Transform to Moving Target Detection in Airborne SAR [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4):1416-1424.
- [12] Yeh C, Yang J, Shan X M, *et al.* Simultaneous Range and Radial Velocity Estimation with a Single Narrowband LFM Pulse [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(3):372-377.
- [13] Zhang Jun, Zhang Zhiyong, Chen Xueguang. A Speckle Suppressed and Reduction Technology for SAR Images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1998, 13(3): 44-47.[张俊, 张志勇, 陈学广. SAR 图像斑点噪声抑制与滤除技术[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(3): 44-47.]
- [14] Chen V C, Miceli W J. Time-varying Spectral Analysis for Radar Imaging of Maneuvering Targets[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1998, 145(15): 262-268.
- [15] Auger F, Flandrin P. Improving the Readability of Time-frequency and Time-scale Representations by the Reassignment Method[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1995, 43(5):1068-1089.
- [16] Barbarossa S, Farina A. Detection and Imaging of Moving Objects with Synthetic Aperture Radar. Part 1: Joint Time-frequency Analysis by Wigner-ville Distribution[J]. IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 1992, 139(1): 79-88.
- [17] Barbarossa S, Farina A. Detection and Imaging of Moving Objects with Synthetic Aperture Radar. Part 2: Joint Time-frequency Analysis by Wigner-ville Distribution[J]. IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 1992, 39(1): 89-97.
- [18] Wang H, Jiang Y. Real-time Parameter Estimation for SAR Moving Target based on WVD Slice and FrFT [J]. Electronics Letters, 2017, 54(1): 47-49.
- [19] Huang P, Liao G, Yang Z, *et al.* A Fast SAR Imaging Method for Ground Moving Target Using a Second-order WVD Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(4): 1940-1956.
- [20] Wang H, Fan X, Chen Y, *et al.* Wigner-hough Transform based on Slice'S Entropy and Its Application to Multi-LFM Signal Detection[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(4): 634-642.
- [21] Wang Y, Wu X, Li W, *et al.* Analysis of Micro-Doppler Signatures of Vibration Targets Using EMD and SPWVD [J]. Neurocomputing, 2015, 171(C):48-56.
- [22] Li Xiukun, Wu Yushuang. Removal of Cross-terms of Wigner-ville Distribution for Multi-component Chirp Signals [J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 45(2): 316-320.[李秀坤, 吴玉双. 多分量线性调频信号的 Wigner-Ville 分布交叉项去除[J]. 电子学报, 2017, 45(2): 316-320.]
- [23] Tian J, Cui W, Xia X G, *et al.* Parameter Estimation of Ground Moving Targets based on SKT-DLVT Processing [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2016, 2(1):13-26.

Simulation Analysis and Application of SAR Target Motion Parameters based on EMD-RSPWVD Algorithm

Pan Fangbo^{1,2}, Chen Kunshan¹

(1.State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When processing multi-component SAR moving target echo data by traditional time-frequency analysis method, there is serious cross-term influence and poor time-frequency clustering. A new time-frequency analysis algorithm named EMD-RSPWVD is proposed. It combines the improved Empirical Mode Decomposition (EMD) algorithm and Reassigned Smoothing Pseudo-Wigner-Ville Distribution (RSPWVD) algorithm. The improved EMD algorithm is used to decompose the multi-component SAR moving target echo signal into independent signal components. Then the time-frequency analysis of independent components which based on RSPWVD algorithm is performed to eliminate cross-terms and obtain high time-frequency resolution. Finally, simulated echo data and real echo data are used to analyze the performance of this algorithm for multi-component SAR motion echo data. The results show that the algorithm has good anti-noise ability, moving target detection ability and high-precision motion parameter estimation performance.

Key words: EMD algorithm; RSPWVD algorithm; Moving target; Motion parameter