

## 基于回波序列最小二乘拟合的高分辨率SAR运动目标速度估计

王超<sup>\*①②</sup> 王岩飞<sup>①</sup> 王琦<sup>①</sup> 詹学丽<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 运动目标速度估计是机载单天线高分辨率合成孔径雷达(SAR)实现运动目标成像和定位的关键环节。针对现有方法运算量大、易受距离徙动干扰等缺点, 该文提出一种基于回波序列最小二乘拟合的速度估计方法。利用该方法, 首先通过包络相关提取相邻回波序列的距离变化量, 然后对其做最小二乘线性拟合, 目标的距离向速度和方位向速度可由拟合系数计算得到。与传统方法相比, 该方法不仅计算量小, 而且无须先做距离徙动校正(RCMC)。该文给出了新方法的数学模型和参数选取原则, 分析了该方法的估计精度、计算量和适用条件, 并通过仿真和实际数据处理验证了该方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 运动目标成像; 速度估计; 回波序列; 最小二乘拟合

中图分类号: TN957.51

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)05-1055-08

DOI: 10.11999/JEIT180695

## Velocity Estimation of Moving Targets Based on Least Square Fitting of High-resolution SAR Echo Sequences

WANG Chao<sup>\*①②</sup> WANG Yanfei<sup>①</sup> WANG Qi<sup>①</sup> ZHAN Xueli<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

<sup>②</sup>(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Velocity estimation of moving targets is a key part of ground moving target imaging and positioning in airborne single-antenna high-resolution SAR system. In order to solve the defects of traditional algorithms, such as high computation brought by searching and interpolation and low reliability caused by range cell migration, a novel method based on least square fitting of echo sequence is proposed. Range changes between adjacent echo sequences are extracted using envelope correlation, and coefficients of range change equation are obtained by least square linear fitting, from which radial velocity and along-track velocity can be derived. Compared with the traditional algorithms, the new method has less computation and can work without RCMC. The mathematical model is presented and the principle of parameter selection is provided, and accuracy, computation and applicable conditions of the algorithm are analyzed. The effectiveness of the proposed algorithm is validated by simulation and real data.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground Moving Target Imaging (GMTIm); Velocity estimation; Echo sequence; Least square fitting

### 1 引言

运动目标成像是SAR近年来研究的热点问题。与静止目标不同, 运动目标在距离向和方位向均存在未知的速度, 造成回波多普勒中心频率迁移和多

普勒调频斜率变化, 进而引起目标图像的错位和散焦<sup>[1]</sup>。因此, 估计目标速度成为精确成像和定位的前提条件。

传统的距离向速度估计方法有Hough变换<sup>[2]</sup>、Radon变换<sup>[3]</sup>等, 方位向速度则通过Map-Drift (MD)<sup>[4]</sup>、Wigner-Ville分布法(WVD)<sup>[5,6]</sup>等算法估计调频率得到。Hough变换和Radon变换通过距离走动斜率计算距离向速度, 能够避免速度模糊的影响, 但估计精度与变换的角度步长相关, 需要较大的计算量; MD算法精度较高, 但需要多次迭代成像; WVD的计算量比MD更高, 且易受交叉项干扰。

收稿日期: 2018-07-13; 改回日期: 2019-01-17; 网络出版: 2019-01-31

\*通信作者: 王超 wangchao\_thu@163.com

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0503001), 国家自然科学基金(61471340)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (2017YFB0503001), The National Natural Science Foundation of China (61471340)

随着成像雷达技术的发展, SAR的分辨率已经达到亚米级甚至厘米级, 运动目标距离徙动的影响也越来越显著。在距离徙动未得到有效校正的情况下, Hough变换和MD等传统速度估计方法的精度难以保证, 而距离徙动的参数又与待估计的速度相关。为了解决速度估计与距离徙动校正之间的矛盾, 文献[7]使用Keystone变换实现距离走动的盲校正, 文献[8]使用2阶Keystone变换实现距离弯曲的盲校正, 然而这2种变换都需要插值, 计算量相当大, 并且对于距离向速度模糊的目标失效。也有研究者陆续提出速度联合估计方法, 文献[9]利用子图像之间的偏移量实现距离向和方位向速度联合估计, 但是模板匹配的方法计算量也非常大; 文献[10]提出了对距离历程作2次拟合的思想, 但尚处于理论研究阶段, 需要借助静止图像中的道路走向等信息才能完成估计; 此外还有2维速度搜索法[11]、速度相关函数法[12]、过采样平滑相位反演法[13]、相干合成3次相位法[14,15]、分数阶FFT法[16]、遗传算法[17]等方法, 这些算法实现上较为复杂, 需要进行参数搜索或多次迭代, 难以实时应用。

针对上述问题, 本文在现有研究的基础上提出一种基于回波序列最小二乘拟合的速度联合估计方法, 该方法在对雷达原始回波数据完成距离压缩和频域滤波检测后, 首先利用包络相关法提取运动目标回波序列之间的相对距离延迟, 得到1组时间-距离变化量, 然后对随时间变化的距离变化量作最小二乘线性拟合, 最后由拟合系数计算出距离向速度和方位向速度。高分辨率SAR的高距离采样率和算法引入的升采样操作保证了距离跟踪的精度, 使该方法的估计精度能够满足实用要求。与现有方法相比, 该方法实现简单, 计算量小, 并且不受距离徙动影响, 无须先做距离徙动校正。应用该方法对仿真数据和实际数据进行处理, 并对各种情况下算法的性能进行了评估。实验结果表明, 该方法能够稳健、高效地估计运动目标的参数, 具有很强的工程应用价值。

## 2 高分辨率SAR运动目标速度估计

### 2.1 运动目标回波分析

在斜距平面内, 运动目标和载机(雷达)的相对位置关系如图1所示。O为坐标原点, 飞机以水平速度 $V$ 匀速直线前进, 在最近斜距为 $R_0$ 处有一速度为 $V_m$ 的运动目标P, 忽略目标的加速度, 其距离向速度为 $V_r$ (远离飞机为正), 方位向速度为 $V_a$ (与飞机同向为正)。经过时间 $t$ , 飞机运动到A点, 此时

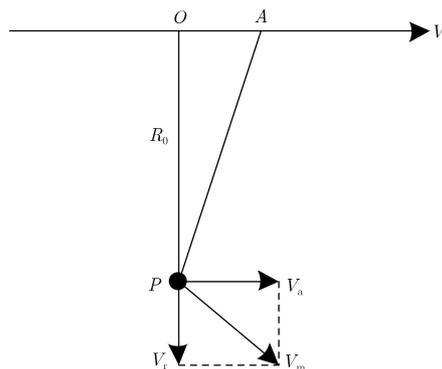


图1 运动目标和载机的几何关系

飞机与目标的距离变为 $R$ 。

根据图1的几何关系, 瞬时斜距 $R(t)$ 可以写为式(1), 并泰勒展开至2次项

$$R(t) = \sqrt{(R_0 + V_r t)^2 + (V - V_a)^2 t^2} \approx R_0 + V_r t + \alpha t^2 \quad (1)$$

其中,  $\alpha = (V - V_a)^2 / 2R_0$ 。运动目标的多普勒调频率为

$$K_a = \frac{4\alpha}{\lambda} \quad (2)$$

### 2.2 回波序列的最小二乘估计

如图2所示, 考虑1组方位时间间隔为 $\Delta t$ 的运动目标离散回波序列 $s_i(m, n)$ ,  $i = 1, 2, \dots, P$ ,  $m, n$ 分别代表距离向和方位向的采样点序号, 设序列距离向和方位向采样间隔分别为 $R_{\text{bin}}, A_{\text{bin}}$ , 距离向和方位向点数分别为 $M, N$ , 序列方位中心时刻为 $t_i$ 。当所取序列持续时间较短时, 可以认为序列内目标的距离不变。

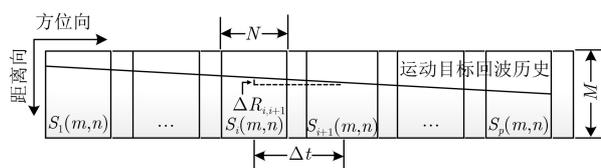


图2 回波序列示意图

相邻序列的距离差为

$$\Delta R_{i,i+1} = R(t_i + \Delta t) - R(t_i) \approx C_0 + C_1 t_i \quad (3)$$

其中,  $C_0 = V_r \Delta t + \alpha \Delta t^2$ ,  $C_1 = 2\alpha \Delta t$ 。

从式(3)可以看出, 回波序列之间的距离差与回波序列中心时刻构成线性关系。

相邻序列的距离差可以用包络相关法[18]求得, 为了减少误差, 可将 $N$ 个回波的互相关结果作平均, 找到相关函数的峰值位置。求得距离差后, 采用最小二乘线性拟合[19]可求得式(3)的系数

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{\sum_{i=1}^P \Delta R_{i,i+1} \sum_{i=1}^P t_i^2 - \sum_{i=1}^P \Delta R_{i,i+1} t_i \sum_{i=1}^P t_i}{P \sum_{i=1}^P t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^P t_i \right)^2} \\ C_1 &= \frac{P \sum_{i=1}^P \Delta R_{i,i+1} t_i - \sum_{i=1}^P \Delta R_{i,i+1} \sum_{i=1}^P t_i}{P \sum_{i=1}^P t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^P t_i \right)^2} \end{aligned} \right\} (4)$$

将  $C_0, C_1$  代入式(3), 解出距离向速度、方位向速度

$$\left. \begin{aligned} V_r &= \frac{C_0}{\Delta t} - \frac{C_1}{2} \\ V_a &= V - \sqrt{\frac{C_1}{\Delta t} R_0} \end{aligned} \right\} (5)$$

### 2.3 估计精度分析

最小二乘线性拟合得到的  $C_0, C_1$  的不确定度<sup>[19]</sup> 如下

$$\left. \begin{aligned} \sigma_0 &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^P t_i^2}{P \sum_{i=1}^P t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^P t_i \right)^2} \sigma_r} \\ \sigma_1 &= \sqrt{\frac{P}{P \sum_{i=1}^P t_i^2 - \left( \sum_{i=1}^P t_i \right)^2} \sigma_r} \end{aligned} \right\} (6)$$

式中,  $\sigma_0, \sigma_1, \sigma_r$  分别为  $C_0, C_1, \Delta R_{i,i+1}$  的估计标准差, 可以看出参与拟合的点数越多, 距离差估计标准差越小, 参数估计的不确定度就越小。

为使相关峰的位置容易分辨, 序列间隔的选取需保证相邻回波序列的距离延迟超过1个采样间隔, 因此当合成孔径时间一定时, 最大拟合点数与距离采样间隔成反比; 而距离差的测量误差可视为满足  $(-R_{\text{bin}}, R_{\text{bin}})$  均匀分布, 故距离差估计标准差与距离采样间隔成正比。为了进一步提高精度, 可以对距离向数据进行升采样。当升采样率为  $\gamma$  时, 距离采样间隔由  $R_{\text{bin}}$  变为  $R_{\text{bin}}/\gamma$ , 此时最大拟合点数  $P$  和距离差估计精度  $\sigma_r$  均改善  $\gamma$  倍。

### 2.4 计算量分析

本文提出的算法主要由包络相关和线性拟合两部分组成, 其中, 包络相关需要计算  $P-1$  组相邻回波序列的相关函数, 而线性拟合只需要根据  $P-1$  个

相关值计算1次式(4), 因此可以认为算法的计算量近似等于包络相关的计算量。包络相关可通过2组长长度为  $M$  的FFT, 1组长长度为  $M$  的复乘和1组长长度为  $\gamma M$  的IFFT完成, 计算量为

$$\begin{aligned} F &= (2 \cdot 5M \log_2 M + 6M + 5\gamma M \log_2 \gamma M) NP \\ &\approx [(2 + \gamma) \cdot 5M \log_2 M + 5\gamma M \log_2 \gamma] NP \end{aligned} (7)$$

$N$  一般取32或64即可,  $P$  可由合成孔径时间确定最大值, 故  $N, P$  可视为常数, 总计算量为  $O(M \log_2 M)$ 。

### 2.5 目标非理想运动的影响

本文的速度估计算法基于式(1)的距离方程, 基本假设是目标做理想的匀速直线运动。实际上目标在距离向和方位向均可能存在加速度, 运动轨迹也可能不是直线。

当目标存在距离向加速度  $A_r$  和方位向加速度  $A_a$  时, 距离方程变为

$$\begin{aligned} R(t) &= \left( \left( R_0 + \left( V_r t + \frac{1}{2} A_r t^2 \right) \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( V_t - \left( V_a t + \frac{1}{2} A_a t^2 \right) \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\approx R_0 + V_r t + \alpha t^2 \end{aligned} (8)$$

其中,  $\alpha = (V - V_a)^2 / 2R_0 + A_r / 2$ 。

对比式(1)和式(8)可以看出, 当考虑目标加速度时, 式(2)的调频率会发生改变, 但式(3)的线性关系不变。此时本文算法能够准确估计1次项系数  $V_r$  和2次项系数  $\alpha$ , 并不影响后续的目标定位和聚焦成像, 但是  $A_r$  的存在导致无法直接由2次项系数导出  $V_a$ , 这也是所有通过估计调频率解算方位向速度的算法共有的问题。

对于运动轨迹非直线的情况, 可以通过分段拟合来解决。考虑地面目标的运动存在惯性, 根据实际情况设置合理的时间阈值, 在一段时间里可将其近似为匀速直线运动, 然后使用本文算法估计该时间段内的速度。

### 2.6 地杂波和信噪比的影响

本文主要针对单天线SAR进行研究, 采用频域滤波法在杂波区外进行CFAR检测。当距离向速度过高或过低时, 动目标的部分带宽将被地杂波淹没, 导致轨迹提取不全。此时  $P$  将减小, 在其它参数不变的前提下, 距离向速度和方位向速度的估计误差都将增大。当目标速度一定时, 地杂波带宽越大, 方位采样率越小, 目标频谱就越有可能进入地杂波范围, 从而降低速度估计精度。因而本文算法的效果受到目标速度、地杂波带宽和系统方位采样率的影响。

信噪比对算法的影响主要体现在2个方面，一是影响CFAR检测的结果，进而影响目标轨迹提取效果；二是影响相邻回波序列距离差值的计算。由于相干积累将会大大提高信号的能量聚集性，而杂波区外的噪声能量不受时频变换影响，因此信噪比一般能够满足CFAR检测要求<sup>[20]</sup>。关于距离差值计算的影响，由于包络相关法本质上属于匹配滤波，能够保证输出信噪比在相关峰处达到最大。根据信号处理理论，匹配滤波器的增益等于信号的时间-带宽积，当系统时间-带宽积一定时，输入信噪比越低，理论上距离差的相关峰越不明显，因而速度估计精度越低。但高分辨率SAR中一般采用高带宽、长脉宽的线性调频信号，因而处理增益很大，从系统设计上能够满足低信噪比下相关峰检测的要求。综合分析，本文所提算法能够适应通常情况下的信噪比变化。

### 2.7 算法流程

综合以上分析，本文所提出的速度估计算法流程图如图3所示。

## 3 仿真结果

### 3.1 目标匀速运动仿真

仿真参数如表1所示，设置了两个动目标。为了突出距离弯曲的影响，动目标1的方位向速度设置的较大。距离向速度和方位向速度估计分别选用

Hough变换和MD做对照，为了保证精度和减少计算量，Hough变换之前把回波图像作方位向32倍降采样，距离步长取0.5，角度步长取0.02°；MD的迭代终止条件设置为子图偏移3个点以内。本文算法取序列长度 $N = 64$ ，序列间隔 $\Delta N = 512$ ，升采样率 $\gamma = 8$ ，两个目标的拟合结果如图4所示。

速度估计结果如表2、表3所示，可以看到对于距离弯曲相对明显的目标1，Hough变换受距离徙动影响而失效，距离向速度估计精度较差。对于距离弯曲相对不明显的目标2，Hough变换和MD都能够正常工作并取得较好的估计效果，但是MD必须在距离走动校正之后进行，否则迭代不收敛。本文所提算法对目标1和目标2都取得了稳健的估计效果，

表1 雷达仿真参数

参数名称	参数值
距离向点数	2048
方位向点数	32768
中心频率(GHz)	15.6
距离向采样率(GHz)	1
信号带宽(MHz)	700
信号脉宽( $\mu\text{s}$ )	2
飞机地速(m/s)	80
脉冲重复频率(Hz)	1440
中心斜距(km)	15
目标1距离向速度(m/s)	3
目标1方位向速度(m/s)	-20
目标2距离向速度(m/s)	-10
目标2方位向速度(m/s)	-10

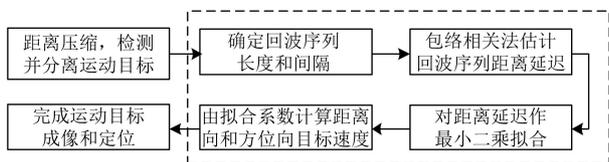


图3 本文算法流程图

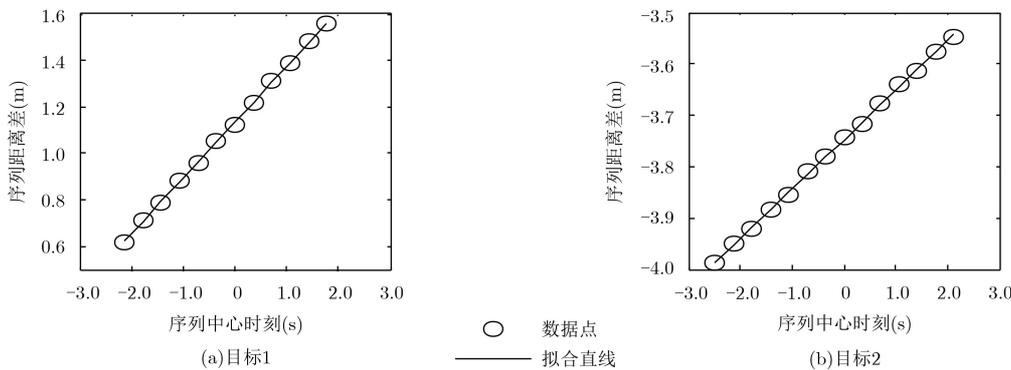


图4 最小二乘拟合结果

表2 匀速运动目标距离向速度估计结果

目标编号	Hough变换速度估计结果 (m/s)	Hough变换估计相对误差(%)	本文算法速度估计结果(m/s)	本文算法估计相对误差(%)
目标1	3.34	11.50	3.06	2.25
目标2	-10.17	1.75	-9.92	0.80

表3 匀速运动目标方位向速度估计结果

目标编号	MD速度估计结果(m/s)	MD估计相对误差(%)	本文算法速度估计结果(m/s)	本文算法估计相对误差(%)
目标1	-20.50	2.54	-20.71	3.58
目标2	-9.98	0.16	-10.06	0.60

估计精度与Hough变换和MD正常工作时的精度相当, 并且无须提前校正距离徙动。算法运算时间如表4所示, 可以看到本文算法的效率大大优于Hough变换和MD, 尤其在方位向速度估计上优势明显。

表4 算法运算时间(s)

目标编号	Hough变换执行时间	MD执行时间	本文算法执行时间
目标1	2.96	32.26	0.50
目标2	3.44	24.78	0.34

### 3.2 目标加速运动仿真

为考察存在加速度时的速度估计情况, 将3.1节中的目标2的距离向加速度和方位向加速度均设置为 $0.5 \text{ m/s}^2$ , 命名为目标3, 其他仿真参数同表1。根据式(2)和式(8), 可求得目标3的方位向调频率为 $107.59 \text{ Hz/s}$ 。重复3.1节仿真, 结果如下:

当目标存在加速度时, 目标3距离弯曲同样比较明显。由表5和表7可知, Hough变换和MD受距离徙动影响而失效, 距离向速度和方位向调频率估计精度都非常差, 而本文算法对距离向速度和方位向调频率都取得了稳健的估计效果。虽然从表6来看, 2种算法都无法准确得出方位向速度, 但对于后续的目标定位和聚焦成像来说, 得到距离向速度和方位向调频率已经足够了。

表5 加速运动目标距离向速度估计结果

目标编号	Hough变换速度估计结果 (m/s)	Hough变换估计相对误差(%)	本文算法速度估计结果(m/s)	本文算法估计相对误差(%)
目标3	-13.50	35.00	-9.93	0.70

表6 加速运动目标方位向速度估计结果

目标编号	MD速度估计结果(m/s)	MD估计相对误差(%)	本文算法速度估计结果(m/s)	本文算法估计相对误差(%)
目标3	-173.24	1632.40	-45.49	354.90

表7 加速运动目标方位调频率估计结果

目标编号	MD速度估计结果(Hz/s)	MD估计相对误差(%)	本文算法速度估计结果(Hz/s)	本文算法估计相对误差(%)
目标3	444.67	313.3	108.08	0.46

表8 清除地杂波频谱后的速度估计结果

波束角( $^{\circ}$ )	距离向速度估计结果(m/s)	距离向速度估计相对误差(%)	方位向速度估计结果(m/s)	方位向速度估计相对误差(%)
1	2.93	2.33	-21.83	9.15
3	3.27	9.00	-23.90	19.50
5	4.01	33.67	-24.93	24.65

### 3.3 目标轨迹提取仿真

为考察地杂波影响下目标轨迹提取不全时的速度估计情况, 将3.1节中的目标1处于地杂波带宽内的频谱清零, 其它仿真参数同表1。仿真了波束角为 $1^{\circ}$ ,  $3^{\circ}$ 和 $5^{\circ}$ 的情况, 对应的地杂波带宽分别为 $145.21 \text{ Hz}$ ,  $435.63 \text{ Hz}$ 和 $726.06 \text{ Hz}$ 。目标1的多普勒中心频率为 $312.00 \text{ Hz}$ , 多普勒带宽为 $907.57 \text{ Hz}$ , 显然目标1的部分带宽将会落入地杂波带宽范围内。重复3.1节仿真, 结果如表8。

对比表8和表2、表3, 可发现随着地杂波带宽的增加, 估计精度逐渐变差, 当波束角达到 $5^{\circ}$ 时, 慢速目标大部分带宽都被地杂波所淹没, 速度估计结果基本不可信。这与2.6节的分析是一致的。

### 3.4 不同信噪比下的算法仿真

为考察不同信噪比下的速度估计情况, 将3.1节中的目标2回波添加高斯白噪声, 其它仿真参数同表1。仿真了信噪比为 $0 \text{ dB}$ ,  $-20 \text{ dB}$ ,  $-30 \text{ dB}$ 的情况, 结果如表9。

对比表9和表2, 表3, 可发现当信噪比高于 $-30 \text{ dB}$ 时, 估计精度可以接受; 当信噪比低于 $-30 \text{ dB}$ 时, 噪声功率已是信号功率的1000倍以上, 速度估计结果基本不可信。这与2.6节的分析是一致的。

基于以上仿真分析, 本文所提的基于回波序列最小二乘拟合的算法能够实现运动目标速度的联合

表9 不同信噪比下的速度估计结果

信噪比(dB)	距离向速度估计结果(m/s)	距离向速度估计相对误差(%)	方位向速度估计结果(m/s)	方位向速度估计相对误差(%)
0	-9.92	0.80	-10.06	0.60
-20	-9.93	0.70	-9.68	3.20
-30	-9.74	2.60	-14.30	43.00

估计, 效果稳定, 计算量少, 更适合实际应用。

#### 4 实测数据处理结果

实测数据来自电子所某机载Ku波段高分辨率SAR雷达, 参数见表10。

对原始回波脉冲压缩后, 使用频域滤波法分离出一段运动目标的频谱如图5(a)所示, 为便于显示, 距离向和方位向分别做了2倍和32倍降采样。将方位向变换回时域, 得到时域回波轨迹如图5(b)所示, 为便于显示, 距离向和方位向分别做了2倍和72倍降采样。

取序列长度  $N = 64$ , 序列间隔  $\Delta N = 1024$ , 升采样率  $\gamma = 8$ , 使用包络相关法得到序列距离延迟与中心时刻的关系如图5(c)所示。线性拟合得到的系数  $C_0 = 3.5691$ ,  $C_1 = 0.1528$ , 代入式(5)和式(2)求得  $V_r = 4.8625$  m/s,  $V_a = -4.9147$  m/s,  $K_{x,a} = 22.0590$  Hz/s。

利用估计的速度可以对目标进行距离徙动校正和聚焦成像, 图5(d)是将重聚焦后的动目标定位于静止场景上的合成SAR图像, 横向为距离向, 纵向

为方位向, 距离采样间隔0.15 m, 方位采样间隔0.22 m。白圈中心处即为重新聚焦后的目标, 可以清楚的看到动目标位于公路上, 由目标速度计算图中道路与距离向夹角为 $45.3^\circ$ , 与实际夹角 $44.8^\circ$ 基本吻合, 说明估计的速度是准确的。

#### 5 结论

本文研究了地面运动目标的速度估计问题。针

表10 实测数据参数

参数名称	参数值
距离向点数	733
方位向点数	32768
中心频率(GHz)	15.6
距离向采样率(GHz)	1
信号带宽(MHz)	700
信号脉宽( $\mu$ s)	60
飞机地速(m/s)	78
脉冲重复频率(Hz)	1400
中心斜距(km)	33

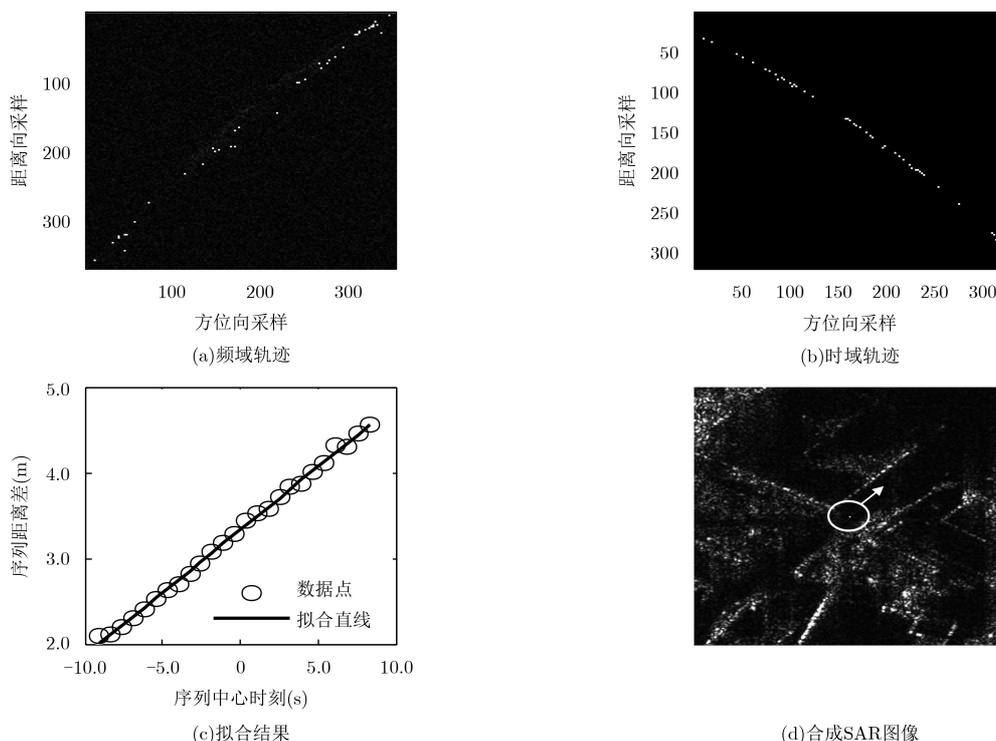


图5 运动目标与静止场景的合成SAR图像

对传统估计算法运算量大和易受距离徙动干扰的缺点, 本文提出了一种对回波序列的距离延迟作线性拟合的估计方法。该方法使用包络相关法求取回波序列的距离差值, 把速度估计问题转化为距离差的最小二乘拟合问题。该方法适用于高分辨率单天线SAR, 与成像流程彼此独立, 具有运算量小、性能稳健的优点。仿真和实际数据处理的结果验证了方法的有效性。在强调响应速度的实时运动目标指示等场合, 本文算法具有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] RANEY R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7(3): 499–505. doi: [10.1109/TAES.1971.310292](https://doi.org/10.1109/TAES.1971.310292).
- [2] LI Yake, WANG Yanfei, and LIU Chang. Detect and autofocus the moving target by its range walk in time domain[C]. Proceedings of 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, Nanjing, China, 2011: 1–5. doi: [10.1109/WCSP.2011.6096755](https://doi.org/10.1109/WCSP.2011.6096755).
- [3] 王智睿, 张旭东, 许稼. 基于Radon变换的SAR地面运动目标径向速度估计[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2015, 55(8): 860–865. doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.08.008](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.08.008).  
WANG Zhirui, ZHANG Xudong, and XU Jia. Radial velocity estimation based on Radon transforms for SAR images of moving ground targets[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2015, 55(8): 860–865. doi: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.08.008](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2015.08.008).
- [4] SAMCZYNSKI P and KULPA K S. Coherent MapDrift technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1505–1517. doi: [10.1109/TGRS.2009.2032241](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2032241).
- [5] 李亚超, 周峰, 邢孟道, 等. 一种直升机的舰船Dechirp实测数据SAR成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1794–1798. doi: [10.3724/SP.J.1146.2005.01535](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2005.01535).  
LI Yachao, ZHOU Feng, XING Mengdao, et al. An effective method for ship dechirp data imaging in helicopter SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(8): 1794–1798. doi: [10.3724/SP.J.1146.2005.01535](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2005.01535).
- [6] HUANG Penghui, LIAO Guisheng, YANG Zhiwei, 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. doi: [10.1109/TGRS.2015.2490582](https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2490582).
- [7] ZHOU F, WU R, XING M, et al. Approach for single channel SAR ground moving target imaging and motion parameter estimation[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(1): 59–66. doi: [10.1049/iet-rsn:20060040](https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20060040).
- [8] YANG Jiefang, ZHANG Yunhua, and KANG Xueyan. A Doppler ambiguity tolerated algorithm for airborne SAR ground moving target imaging and motion parameters estimation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(12): 2398–2402. doi: [10.1109/LGRS.2015.2478799](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2478799).
- [9] KIRSCHT M. Detection and velocity estimation of moving objects in a sequence of single-look SAR images[C]. Proceedings of 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, USA, 1996: 333–335. doi: [10.1109/IGARSS.1996.516331](https://doi.org/10.1109/IGARSS.1996.516331).
- [10] 盛蔚, 毛士艺. 一种合成孔径雷达对地面运动目标成像和精确定位的算法[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(4): 598–606. SHENG Wei and MAO Shiyi. An effective method for ground moving target imaging and location in SAR system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(4): 598–606.
- [11] WANG Zhirui, XIA Xianggen, XU Jia, et al. Ground moving target imaging based on 2-D velocity search in high resolution SAR[C]. Proceedings of 2017 IEEE Radar Conference, Seattle, USA, 2017: 68–72. doi: [10.1109/RADAR.2017.7944173](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944173).
- [12] GU Dandan, LIANG Zichang, WU Yajun, et al. Efficient motion compensation of moving targets in SAR imaging[C]. Proceedings of 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China, 2017: 1–2.
- [13] SHI Hongyin, YANG Xiaoyan, ZHOU Qiuxiao, et al. SAR slow moving target imaging based on over-sampling smooth algorithm[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 26(4): 876–882. doi: [10.1049/cje.2017.06.005](https://doi.org/10.1049/cje.2017.06.005).
- [14] SU Jia, TAO Haihong, WANG Ling, et al. Coherently integrated cubic function based Doppler parameters estimation for moving-target imaging[C]. Proceedings of 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, Suzhou, China, 2017: 1–2.
- [15] LI Dong, ZHAN Muyang, SU Jia, et al. Performances analysis of coherently integrated CPF for LFM signal under low SNR and its application to ground moving target imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(11): 6402–6419. doi: [10.1109/TGRS.2017.2727508](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2727508).
- [16] WANG Hanyun and JIANG Yicheng. Real-time parameter estimation for SAR moving target based on WVD slice and FrFT[J]. *Electronics Letters*, 2018, 54(1): 47–49. doi: [10.1049/el.2017.1740](https://doi.org/10.1049/el.2017.1740).
- [17] LI Zhongyu, WU Junjie, LIU Zhutian, et al. An optimal 2-D spectrum matching method for SAR ground moving target imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(10): 5961–5974. doi: [10.1109/TGRS.2018.2829166](https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2829166).
- [18] DELISLE G Y and WU Haiqing. Moving target imaging and trajectory computation using ISAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 887–899. doi: [10.1109/7.303757](https://doi.org/10.1109/7.303757).
- [19] STRUTZ T. Data Fitting and Uncertainty: A Practical Introduction to Weighted Least Squares and Beyond[M]. Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 2011: 89–91.

- [20] 王琦, 王岩飞. 利用短时FFT的距离-多普勒域SAR运动目标检测[J]. 电子与信息学报, 2006, 28(4): 628-631.  
WANG Qi and WANG Yanfei. Moving target detection with short time FFT for SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(4): 628-631.
- 王超: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为SAR信号处理等.  
王岩飞: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等.  
王琦: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为SAR信号处理等.  
詹学丽: 男, 1976年生, 副研究员, 研究方向为SAR信号处理等.

## 2019年 IEEE信号、信息及数据处理国际会议征文通知

2019年 IEEE信号、信息及数据处理国际会议 (IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing 2019) 是由IEEE北京分会和北京理工大学联合创办, 旨在介绍信号、信息及数据处理领域的最新技术进展、学术研究热点和前沿问题, 特别是民用技术的最新研究成果和应用等。

首届会议由IEEE主席福田敏男院士、北京理工大学校长张军院士、毛二可院士担任名誉主席, 北京理工大学副校长龙腾教授担任大会主席、杨小鹏教授担任程序委员会主席, 将于2019年11月6-8日在中国重庆召开, 涵盖学术交流、展览展示等内容, 欢迎国内外广大科技工作者及各界人士踊跃投稿并积极参会。

### 一、征文议题

- 1) Speech, Audio, Acoustic and Sonar Processing
- 2) Image, Video, and Multimedia Processing
- 3) Signal Processing for Communications and Networks
- 4) Remote Sensing and Signal Processing
- 5) Sensor Array and Multichannel Signal Processing
- 6) Artificial Intelligence for Signal Processing
- 7) Signal Processing for Big Data
- 8) Photon / Quantum Signal and Information Processing
- 9) Bio-imaging and Biomedical Signal Processing
- 10) Design and Implementation of Signal Processing Systems
- 11) Signal Processing Theory and Methods
- 12) Signal Processing for Cyberspace Security
- 13) The Internet of Things
- 14) GNSS Signal Processing and Positioning

### 二、征文要求

1. 英文撰稿, 具备真实性和原创性。论文请勿涉及保密内容。
2. 论文模板、提交方式详见会议网站, [www.icsidp.org](http://www.icsidp.org)。
3. 论文全文页数不少于4页, 不超过6页。
4. 论文提交截止时间: 2019年4月30日。

### 三、论文出版

本届会议论文将收录在会议论文集中, 会议结束后将送IEEE Xplore和EICompindex检索。

### 四、会议时间地点

时间: 2019年11月6-8日  
地点: 中国•重庆  
会场: 重庆融汇丽笙酒店

### 五、联系方式

联系人: 田琳琳  
电话/传真: +86 10 68911162 / 68918380  
会议网址: <http://www.icsidp.org>  
电子邮箱: [admin@icsidp.org](mailto:admin@icsidp.org)