一种基于局域中心频率的SAR图像舰船方位向速度估计方法

魏翔飞[①②③] 王小青[④] 种劲松*[①②]

[①](中国科学院电子学研究所 北京 100190)

[②](微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

[③](中国科学院大学 北京 100049)

[④](中国科学院微电子研究所 北京 100029)

摘 要：针对现有船速估计算法大多数只能估计出舰船距离向速度的问题，该文提出一种基于合成孔径雷达(SAR)图像局域中心频率的舰船方位向速度估计方法。首先分析了动目标在SAR图像局域多普勒中心频率的变化规律，并推导了利用中心频率变化率估计目标方位向速度的理论公式。然后给出了根据SAR图像局域方位向功率谱的概率密度函数，利用最大似然估计算法估计中心频率变化率的方法。同时，对所提方法的精度与适用性应用性进行分析。最后，通过仿真和实测数据，将该方法的估计结果与直接计算调频率获得的结果进行对比分析。结果表明，相对于调频率法，该方法具有更高的估计精度，验证了所提方法的有效性。

关键词：SAR图像；舰船速度估计；局部区域；中心频率

中图分类号：TN957.52 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-5896(2018)09-2242-08

DOI: 10.11999/JEIT170991

Ship Azimuthal Speed Estimation Method Based on Local Region Doppler Centroid in SAR Images

WEI Xiangfei[①②③] WANG Xiaoqing[④] CHONG Jinsong[①②]

[①](*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

[②](*National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing* 100190, *China*)

[③](*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

[④](*Institute of Microelectronics of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*)

Abstract: To deal with the problem that most of the existing ship speed estimation algorithms can only estimate the slant range speeds of ships, a ship azimuthal speed estimation method based on local region Doppler centroid for Synthetic Aperture Radar (SAR) images is proposed. Firstly, the variation of Doppler centroid of moving target in local region of SAR image is analyzed and the theoretical formula for estimating the azimuthal speed using the slope of Doppler centroid variation is derived. Then, based on the probability density function of azimuthal power spectrum, an estimation method for the slope of Doppler centroid variation using the maximum likelihood estimation algorithm is presented. Moreover, the estimation accuracy and the applicability of the proposed method are also analyzed. Finally, the proposed method is implemented on simulated and filed data and the estimation results are compared with those obtained by directly calculating the frequency modulation rate. The results show that the proposed method has high estimation accuracy, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: SAR image; Ship speed estimation; Local region; Doppler centroid

1 引言

一直以来，舰船检测及其速度估计都是合成孔径雷达(SAR)领域的热点研究问题，在渔业管理、海上交通管控、海洋资源开采、海洋环境监控等方面都具有重要应用[1,2]。

目前已有几种不同的舰船速度估计算法[3−5]。其中，利用舰船相对于其尾迹顶点的方位向偏移估计舰船速度是最常用的算法[6,7]。然而，受海况和雷达系统参数等的影响，舰船尾迹很多时候并不能在SAR图像上体现出来[8]。2008年，Dragosevic等人[4]提出了一种基于自适应处理的舰船距离向速度

收稿日期：2017-10-23；改回日期：2018-06-08；网络出版：2018-07-12
*通信作者： 种劲松 iecas_chong@163.com

估计算法，该算法实现起来较为复杂[9]。2012年，孙海青等人[10]利用SAR子孔径序列图像获取了舰船的速度，但是该算法需要SAR系统具有较长的合成孔径时间。2016年，Renga等人[11]提出了一种基于多普勒中心频率的舰船距离向速度估计算法，但是该算法不适用于速度较快且尺寸较小的目标。同时，现有算法一般只能估计出舰船的距离向速度，为了获得舰船完整的速度信息，需要同时估计出其方位向速度。一般来说，舰船的方位向速度会造成其回波信号方位向调频率的变化[12]，因此通过估计舰船回波信号的方位向调频率可以计算其方位向速度。然而受海杂波的影响，当舰船信杂比较低时，通过估计调频率获得的方位向速度的精度较低。

针对上述问题，本文提出了一种基于局域中心频率的SAR图像舰船方位向速度估计方法。由于运动，舰船在合成孔径时间内会跨越多个方位分辨单元，导致在某一局部小区域内，舰船的多普勒历程只占其整个多普勒谱的一部分[13]。因此，舰船在不同方位局部小区域内具有不同的多普勒中心频率，且中心频率是近似线性变化的，变化的斜率与舰船的方位向速度有关。本文方法根据方位向功率谱的概率密度函数，采用最大似然估计算法，从SAR图像局域方位向功率谱中估计出多普勒中心频率的变化斜率，进而计算出舰船的方位向速度。实验结果表明，本文方法的估计结果较为准确，且当舰船的信杂比较低时，本文方法仍具有较高的估计精度。

2　基于局域中心频率的SAR图像舰船方位向速度估计方法

本节首先分析动目标在SAR图像局域多普勒中心频率的变化特性，然后推导利用该变化估计目标方位向速度的理论公式。由于舰船也是动目标，上述推导也适用于舰船目标。接下来给出利用最大似然估计算法计算局域中心频率增量的方法。

2.1　动目标局域多普勒中心频率分析

若只考虑方位向速度，经过成像处理后，动目标的方位向信号可以表示为[14]

$$S(t)=G\left(\frac{(V_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{a}})K_{\mathrm{a}}t}{(K_{\mathrm{a}}-K_{\mathrm{t}})R}\right)\exp\left(\mathrm{j}\pi\left(\frac{K_{\mathrm{t}}K_{\mathrm{a}}}{K_{\mathrm{a}}-K_{\mathrm{t}}}\right)t^2\right),\quad t\in\left[-\frac{T}{2}\frac{(K_{\mathrm{a}}-K_{\mathrm{t}})}{K_{\mathrm{a}}},\frac{T}{2}\frac{(K_{\mathrm{a}}-K_{\mathrm{t}})}{K_{\mathrm{a}}}\right]\tag{1}$$

其中，$G(\alpha)$为雷达双程天线方向图，α为方位向视角，λ为雷达波长，R为目标斜距，V_{s}和V_{a}分别为平台速度和目标方位向速度，$K_{\mathrm{t}}=-2(V_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{a}})^2/\lambda R$为动目标方位向调频率，$K_{\mathrm{a}}=-2V_{\mathrm{s}}^2/\lambda R$为静止目标的方位向调频率，$T=\lambda R/D(V_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{a}})$为合成孔径时间，$D$为天线的物理尺寸。取一个局部时间窗$t'\in[t_0-\Delta t/2,t_0+\Delta t/2]$，对该时间窗内的动目标来说，其多普勒中心频率为

$$f_{\mathrm{d}}(t_0)\approx\frac{K_{\mathrm{t}}K_{\mathrm{a}}}{K_{\mathrm{a}}-K_{\mathrm{t}}}t_0\approx\frac{2(V_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{a}})^2V_{\mathrm{s}}^2}{\lambda RV_{\mathrm{a}}(2V_{\mathrm{s}}+V_{\mathrm{a}})}t_0\tag{2}$$

从式(2)中可以看出，沿方位向运动的目标在SAR图像上局部位置的多普勒中心频率会随着局部窗口中心时刻(即SAR图像局部位置)的变化而近似线性变化，且变化的斜率与目标的方位向速度有关。图1为动目标局域多普勒谱随方位时间窗变化的示意图，其中实线图表示目标在当前时刻的位置，虚线图表示在前一时刻和后一时刻的位置。可以看到，在不同的方位时刻，相应的局部区域只包含动目标多普勒谱的一部分，导致其具有不同的中心频率。

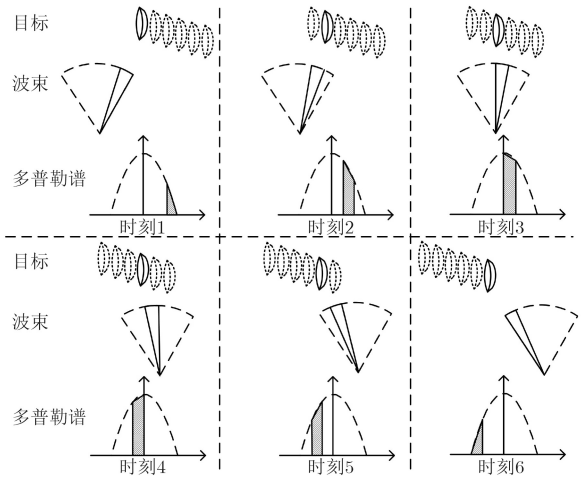


图 1 动目标局部位置多普勒谱随方位窗口中心时刻变化的示意图

根据式(2)，若相邻局域中心时刻的间隔为Δt_0，多普勒中心频率的增量为Δf_{d}，则目标的方位向速度可以表示为

$$V_{\mathrm{a}}=-V_{\mathrm{s}}\pm\frac{\sqrt{kV_{\mathrm{s}}^2(k-V_{\mathrm{s}}^2)}}{V_{\mathrm{s}}^2-k}\tag{3}$$

其中，$k=\lambda R\Delta f_{\mathrm{d}}/2\Delta t_0$。当目标与平台运动方向相同时，$V_{\mathrm{a}}$为负值，从式(2)可以看出，$\Delta f_{\mathrm{d}}$为负值，此时$k$为负，则目标方位向速度为$V_{\mathrm{a}}=-V_{\mathrm{s}}+\sqrt{kV_{\mathrm{s}}^2(k-V_{\mathrm{s}}^2)}/(V_{\mathrm{s}}^2-k)$。而当目标与平台运动方向相反时，其方位向速度为$V_{\mathrm{a}}=-V_{\mathrm{s}}-\sqrt{kV_{\mathrm{s}}^2(k-V_{\mathrm{s}}^2)}/(V_{\mathrm{s}}^2-k)$。在实际处理中，首先需要根据$\Delta f_{\mathrm{d}}$的符号，判断出目标的运动方向，再计算目标的方位向速度。

一般来说，动目标的距离向加速度也会造成目标方位向多普勒特性的变化，进而影响对其方位向速度的估计。然而舰船通常以近似恒定的速度航行[4]，因此舰船的距离向加速度对其方位向速度估计的影响一般可以忽略。

2.2 相邻局域多普勒中心频率增量Δf_{d}的最优化估计

2.1节的分析表明，在估计出相邻局域中心频率的增量Δf_{d}后就可以计算舰船的方位向速度，下面推导利用SAR图像局域功率谱估计Δf_{d}的方法。

假设舰船目标在SAR单视复图像上占据$N_{\mathrm{a}} \times N_{\mathrm{r}}$个分辨单元，将其沿方位向分块，分块大小为$N'_{\mathrm{a}} \times N_{\mathrm{r}}$，则分块数量为$N = \lfloor N_{\mathrm{a}}/N'_{\mathrm{a}} \rfloor$，分块示意图如图2所示。对任一分块数据，其方位向功率谱可以表示为

$$P(f) = P_{\mathrm{p}}(f) + P_{\mathrm{c}}(f) + I_{\mathrm{n}} \tag{4}$$

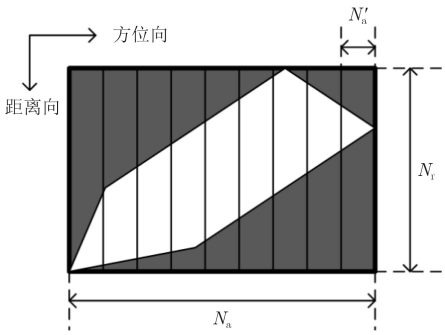


图 2 舰船目标分块示意图

其中，$P_{\mathrm{p}}(f)$为舰船目标的部分功率谱，I_{n}为噪声功率谱，可以表示为一常数，$P_{\mathrm{c}}(f)$为海杂波功率谱，与SAR系统双程天线功率谱具有相同的形状[13]，可以表示为$P_{\mathrm{c}}(f) = I_{\mathrm{c}} P_{\mathrm{a}}(f)$，$P_{\mathrm{a}}(f)$为SAR系统双程天线功率谱。由于运动，舰船在每一分块中具有不同的多普勒中心频率。对第m个分块来说，其中心频率为

$$f_{\mathrm{d}}^{m} = (m - \lceil N/2 \rceil) \cdot \Delta f_{\mathrm{d}},\ m = 1, 2, \cdots, N \tag{5}$$

在该分块数据中，舰船目标的带宽为Δf_{d}，这里用高斯函数近似舰船目标在第m个分块中的功率谱。则对于第m个分块，其方位向功率谱可以表示为

$$P_m(f) = I_{\mathrm{s}}^{m} \exp\left(-\frac{(f - f_{\mathrm{d}}^{m})^2}{\Delta f_{\mathrm{d}}^2}\right) + I_{\mathrm{c}} P_{\mathrm{a}}(f) + I_{\mathrm{n}} \tag{6}$$

其中，$I_{\mathrm{s}}^{m} = I_{\mathrm{s}} \cdot I_m$，$I_m = P_{\mathrm{a}}(f_{\mathrm{d}}^{m}) / P_{\mathrm{a}}(0)$表示方位向天线图的加权效应。由于同时受加性噪声和乘性噪声的干扰[15]，方位向功率谱$P_m(f)$每一个频率点f_i上的值$y_m(i)$服从Gamma分布[16]，其概率密度函数为[17,18]：

$$p(y_m(i); \Delta f_{\mathrm{d}}) = \frac{1}{\Gamma(L)} \left(\frac{L}{P_m(f_i)}\right)^{L} y_m^{L-1}(i) \cdot \exp\left(-\frac{L y_m(i)}{P_m(f_i)}\right),\ i = 1, 2, \cdots, N'_{\mathrm{a}} \tag{7}$$

其中，$L = N_{\mathrm{r}}$为多视处理的视数，$\Gamma(\cdot)$表示Gamma函数。假设功率谱各个频率点之间是相互独立的，则第m个子块功率谱序列的联合概率密度函数可以表示为

$$p_m(;\Delta f_{\mathrm{d}}) = \prod_{i=1}^{N'_{\mathrm{a}}} p(y_{m,i}; \Delta f_{\mathrm{d}}) = \left(\frac{1}{\Gamma(L)}\right)^{N'_{\mathrm{a}}} \cdot \prod_{i=1}^{N'_{\mathrm{a}}} \left(\frac{L}{P_{m,i}}\right)^{L} y_{m,i}^{L-1} \cdot \exp\left(-\frac{L y_{m,i}}{P_{m,i}}\right) \tag{8}$$

其中，$y_{m,i} = y_m(i)$，$P_{m,i} = P_m(f_i)$。同时假设各个子块之间相互独立，则这N个子块功率谱序列联合概率密度函数的对数似然函数可以表示为

$$\ln p(;\Delta f_{\mathrm{d}}) = \ln\left(\prod_{m=1}^{N} p_m(;\Delta f_{\mathrm{d}})\right) = \sum_{m=1}^{N}\left[-L\sum_{i=1}^{N'_{\mathrm{a}}}\left(\ln P_{m,i} + \frac{y_{m,i}}{P_{m,i}}\right) + S(y_m)\right] \tag{9}$$

其中，

$$S(y_m) = (L-1)\sum_{i=1}^{N'_{\mathrm{a}}} \ln y_{m,i} + N'_{\mathrm{a}}(L\ln L - \ln\Gamma(L)) \tag{10}$$

由最大似然估计理论可知，若$\Delta\tilde{f}_{\mathrm{d}}$满足

$$\Delta\tilde{f}_{\mathrm{d}} = \arg\max_{\Delta f_{\mathrm{d}}} \ln p(;\Delta f_{\mathrm{d}}) \tag{11}$$

则$\Delta\tilde{f}_{\mathrm{d}}$是$\Delta f_{\mathrm{d}}$的最大似然估计值，其估计精度能达到克拉美-罗界(Cramer-Rao Bound, CRB)[19]。定义$F(\Delta f_{\mathrm{d}}) = -\ln p(;\Delta f_{\mathrm{d}})$，由于对数函数为单调函数，式(11)等价于

$$\Delta\tilde{f}_{\mathrm{d}} = \arg\min_{\Delta f_{\mathrm{d}}} F(\Delta f_{\mathrm{d}}) \tag{12}$$

由式(12)可知，对Δf_{d}的最优化估计转化为求$F(\Delta f_{\mathrm{d}})$最小值，可以采用牛顿迭代法求解[20]。在求出Δf_{d}的最大似然估计值后，将其代入式(3)中即可估计出舰船的方位向速度。

3 算法精度与适用性分析

3.1 算法精度分析

从式(3)可以看出，本文算法的估计精度主要受Δf_{d}估计精度的影响。因此，本节研究不同参数条件下Δf_{d}的估计精度，并将其与CRB进行比较。对于非随机变量Δf_{d}，其估计的CRB为

$$\mathrm{var}(\Delta f_{\mathrm{d}}) \geq -1/E\left[\partial^2 \ln p(;\Delta f_{\mathrm{d}})/\partial \Delta f_{\mathrm{d}}^2\right] \tag{13}$$

将式(5)、式(6)、式(9)代入式(13)得

$$\mathrm{var}\left(\Delta f_{\mathrm{d}}\right) \geq 1/L \sum_{m=1}^{N} \sum_{i=1}^{N'_{\mathrm{a}}} \left(\frac{\exp\left(\dfrac{-\left(f_i - f_{\mathrm{d}}^{m}\right)^2}{\Delta f_{\mathrm{d}}^2} \right) \left(\dfrac{2 f_i \left(f_i - f_{\mathrm{d}}^{m}\right)}{\Delta f_{\mathrm{d}}^3} \right)}{\exp\left(\dfrac{-\left(f_i - f_{\mathrm{d}}^{m}\right)^2}{\Delta f_{\mathrm{d}}^2} \right) + \dfrac{I_m}{\mathrm{SCR}} P_{\mathrm{a}}\left(f_i\right) + \dfrac{I_m}{\mathrm{SNR}}} \right)^2 \tag{14}$$

其中，$\mathrm{SCR} = I_{\mathrm{s}}/I_{\mathrm{c}}$表示信杂比，$\mathrm{SNR} = I_{\mathrm{s}}/I_{\mathrm{n}}$表示信噪比。可以看到，$\Delta f_{\mathrm{d}}$估计的精度主要受多视数$L$，分块长度$N'_{\mathrm{a}}$，分块数量$N$，信杂比SCR，信噪比SNR及$\Delta f_{\mathrm{d}}$本身的影响。因此，这里主要仿真研究$L$, N'_{a}, N, SCR, SNR及Δf_{d}对估计精度的影响，仿真参数如表1所示。

表 1　仿真参数

参数	仿真1	仿真2	仿真3	仿真4	仿真5	仿真6
PRF	500	500	500	500	500	500
I_{s}	100	100	100	100	100	100
Δf_{d}	10	10	10	10	10	1～20
N	13	13	13	13	5～50	13
N'_{a}	128	128	128	50～500	128	128
L	10	10	5～100	10	10	10
SCR	2	0～15	2	2	2	2
SNR	0～15	6	6	6	6	6

为了研究本文算法的估计精度，对每一组仿真都进行500次重复实验，计算估计结果的方差。不同参数条件下，本文算法的估计方差与CRB的对比如图3所示。从图3中可以看出，随着L, N'_{a}, N, SCR以及SNR的增大，Δf_{d}的估计精度会逐渐提高；而随着Δf_{d}的增大，其估计精度会逐渐降低。估计结果的方差与CRB的对比表明，在不同的参数条件下，本文算法的估计精度都接近于CRB，证明了本文算法的有效性。

3.2　算法适用性分析

3.1节的结果表明，本文算法的估计精度同时受分块长度N'_{a}和分块数量N的影响，N'_{a}和N的值越大，估计精度越高，反之则估计精度越低。然而，对特定的舰船来说，其在SAR图像上沿方位向占据的分辨单元的数量$(N'_{\mathrm{a}} \times N)$是一定的，该数量与舰船的尺寸、运动速度及SAR系统的积分时间有关。当雷达波段较低(对应SAR系统的积分时间较长)、舰船尺寸较大或其方位向速度较快时，$N'_{\mathrm{a}} \times N$的值较大，此时本文方法的估计精度较高。然而当雷达波段较高、舰船尺寸有限或其方位向速度较小时，舰船在方位向的散焦不明显，导致分块长度N'_{a}和分块数量N较小。此时，本文方法的

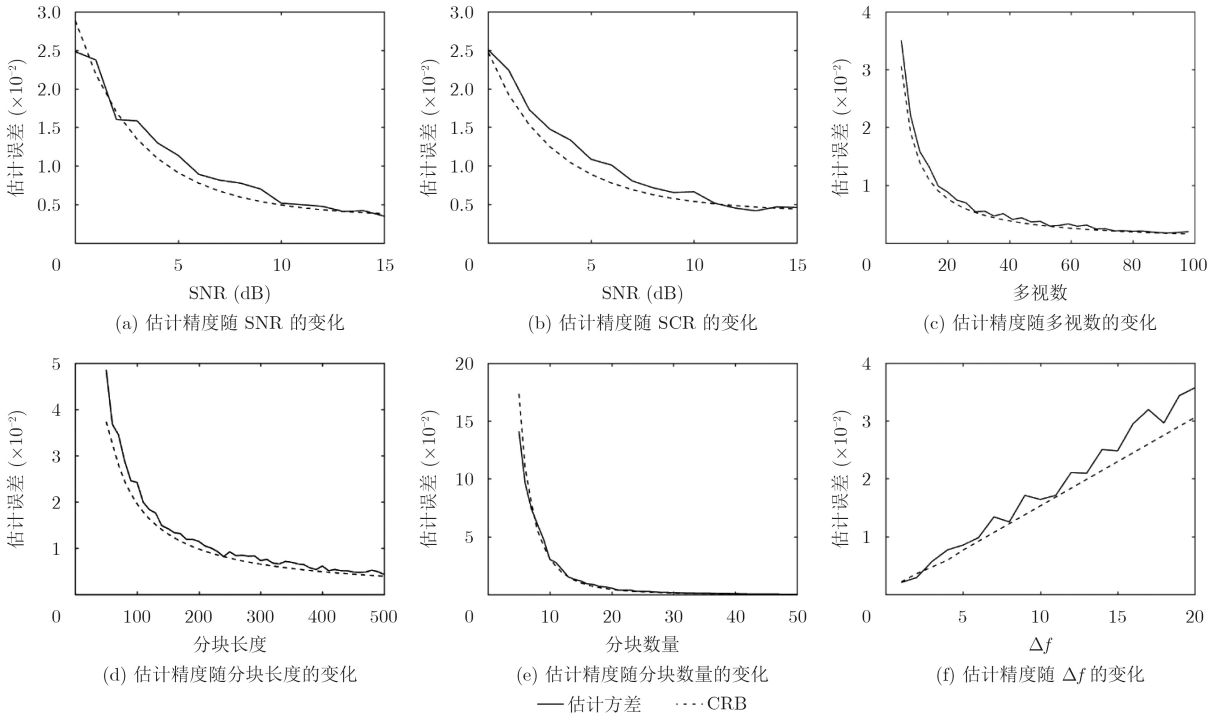


图 3 本文算法估计精度随各种参数的变化及其与CRB的比较

估计精度较差。因此，本文方法不适用于对高波段下慢速运动舰船的速度估计。对星载SAR系统来说，雷达速度远高于舰船速度，导致舰船沿方位向散焦不明显，此时本文方法估计精度较差。同时由式(2)可知，当雷达速度远高于舰船速度时，Δf的值较大。而根据3.1节的结果，这又会导致本文方法的估计精度进一步降低。因此，本文方法不适用于星载SAR系统。

4 仿真与实际数据验证

为了验证本文方法的可行性，分别将本文方法应用于仿真和实际数据，并将本文方法估计的速度与直接计算调频率获得的速度进行对比。

4.1 点目标仿真验证

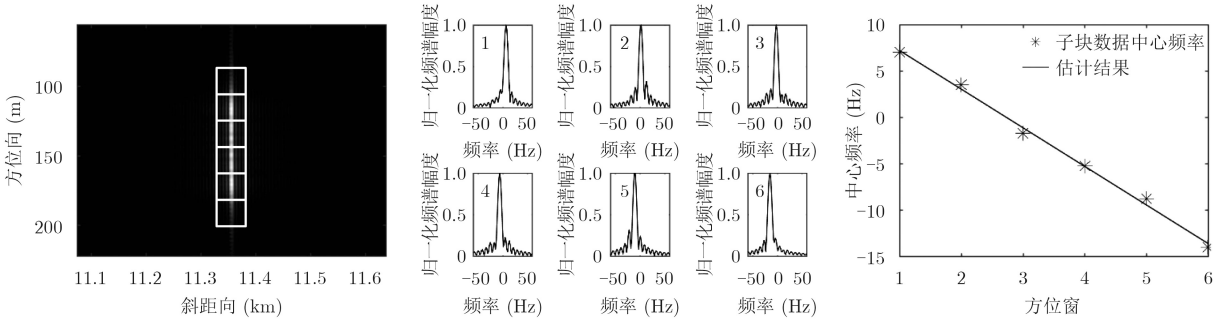
在这一小节中，将本文方法应用于点目标仿真数据，仿真参数如表2所示。其中，点目标的距离向速度都为0。

表 2 点目标仿真参数

雷达波长(m)	调频率(Hz/s)	距离带宽(MHz)	天线长度(m)	PRF(Hz)	平台速度(m/s)	平台高度(m)	近端斜距(m)	信噪比(dB)	信杂比(dB)	目标1方位向速度(m/s)	目标2方位向速度(m/s)	目标3方位向速度(m/s)
0.2308	2.8e13	25	4	900	100	8100	10000	2	6	–10	–5	5

以目标1为例，分析其在SAR图像局域的方位向功率谱。如图4(a)所示，将该目标沿方位向分为6个相邻的子图像，子图像中心时刻的间隔为Δt_0=0.1256 s，其归一化方位向功率谱如图4(b)所示。利用2.2节的方法，估计出相邻子图像间多普勒中心频率的增量为Δf_{d}=–4.17 Hz，由此可以计算出目标1的方位向速度为–9.84 m/s，估计结果的相对误差为1.6%。以同样的方法，可以估计出目标2和目标3的速度分别为–5.06 m/s和5.15 m/s，相对误差分别为1.2%和3%。可以看到，本文方法能较准确地估计出目标的方位向速度。

下面以目标1为例，对比分析不同信杂比下本文方法的估计结果与直接估计调频率所得的结果。为了研究估计结果精度，对每一组仿真都进行200次重复实验，并计算估计结果的均值和方差，估计结果如表3所示。可以看到，相对于调频率法，本文方法具有更高的精度。同时可以看到，当信杂比较低时，调频率法的估计误差较大，而本文方法仍然具有较高的精度。



(a) 目标 1 放大图　(b) 目标 1 局域功率谱　(c) 目标 1 中心频率的变化

图 4 点目标多普勒谱分析

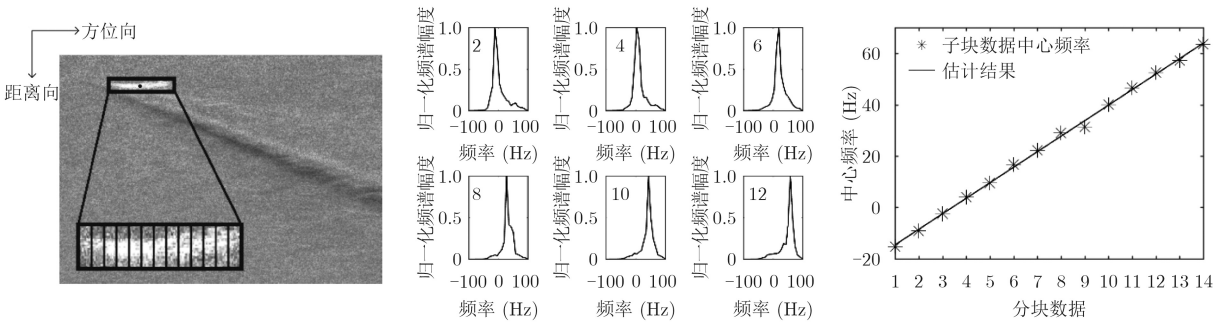
表 3 不同信杂比下本文方法与调频率法估计结果的对比

SCR(dB)	均值(m/s)		方差(m^2/s^2)	
	本文方法	调频率法	本文方法	调频率法
20	–10.05	–11.01	0.0001×10^{-2}	0.005×10^{-2}
10	–10.03	–11.43	0.12×10^{-2}	0.32×10^{-2}
0	–9.92	–11.50	0.28×10^{-2}	0.12
–10	–9.87	–12.27	1.28×10^{-2}	1.65
–20	–9.82	–15.13	2.43×10^{-2}	7.16

4.2 实际数据验证

为了验证本文方法的实用性，将其应用于实际的机载SAR数据，该数据(P和L波段)来源于中国科学院电子学研究所于2014年在南海进行的海试实验。为了证明估计结果的准确性，将本文方法与尾迹法的估计结果进行对比。由于尾迹法得到的是舰船的距离向速度，因此需要利用舰船的航向及成像几何关系，根据估计的距离向速度计算舰船的方位向速度。

图5(a)所示的SAR图像获取于2014年11月5日，雷达波段为P波段，平台飞行速度为136 m/s，PRF为1000 Hz。如图5(a)左下角所示，将舰船目标沿方位向分为14个子块，每个子块的方位向长度



(a) 舰船目标成像结果　(b) 舰船局域功率谱　(c) 局域多普勒中心频率的变化

图 5 舰船目标方位向速度与SAR运动方向相反时舰船速度估计结果

为128个分辨单元。图5(b)为其中部分子块的归一化功率谱，图5(c)为相邻子块间多普勒中心的变化图，可以看出多普勒中心频率的变化近似为线性。利用2.2节的方法估计出相邻子块数据多普勒中心频率的增量为Δf_{d}=5.9056 Hz，相邻子块之间的成像时间差为Δt_0=0.128 s。由于舰船方位向速度与平台运动方向相反，可以计算出其方位向速度为9.45 m/s。

下面利用尾迹法估计其运动速度。由于该方法需要确定舰船相对其尾迹顶点在方位向的偏移量，因此需要确定舰船重心的位置，具体做法如下：

(1) 确定舰船所在的区域，并将该区域从SAR图像中分离出来；

(2) 计算该区域的1阶矩(m_{01}和m_{10})和零阶矩(m_{00})。对于离散图像$f(i,j)$，$p+q$阶矩定义为

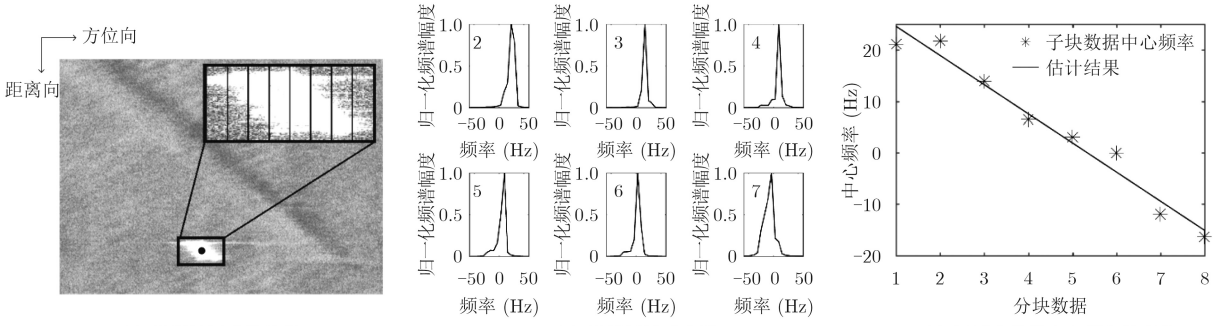
$$m_{pq}=\sum_i\sum_j i^p j^q f(i,j) \tag{15}$$

(3) 计算舰船的重心位置。舰船重心位置的坐标可以表示为：$\bar{i}=m_{10}/m_{00}, \bar{j}=m_{01}/m_{00}$ 。

采用上述方法确定的舰船重心位置如图5(a)中黑色圆点所示。根据舰船的重心位置，估计出舰船相对其尾迹顶点的方位向偏移量约为190 m，由此可以计算出舰船的距离向速度约为V_{r}=4.2 m/s。根据舰船的成像几何关系以及舰船的运动方向，计算出舰船方位向速度约为10.05 m/s。可以看出，本文方法估计出的舰船速度与尾迹法估计出的速度十分接近。

图6为舰船方位向速度与平台运动方向相同时舰船速度估计结果的示例，该图像获取于2014年9月14日，雷达波段为L波段，平台飞行速度为114 m/s, PRF为900 Hz。如图6(a)右上角所示，将舰船目标沿方位向分为8个子块，相邻子块间的成像时间差为Δt_0=0.1422 s。利用本文方法，估计出其方位向速度为–6.63 m/s。采用上述方法确定的舰船重心位置如图6(a)中的黑色圆点所示，由此可以计算出舰船相对其尾迹顶点的偏移量约为750 m。利用尾迹法及舰船成像的几何关系，可以计算出其方位向速度为–6.44 m/s。可以看到，本文方法与尾迹法计算出的船速同样十分接近。

除上述两个示例之外，本文选取了19个具有明显尾迹特征的舰船目标，分别利用本文方法和尾迹法估计其方位向速度，估计结果的对比如图7所示。可以看到，本文方法与尾迹法获得的舰船速度十分接近。同样，将本文方法估计的速度相对尾迹法的偏差与直接计算调频率获得的速度相对尾迹法的偏差进行了对比，结果如表4所示。可以看出，本文方法的估计结果要优于直接估计调频率获得的结果。



(a) 舰船目标成像结果　(b) 舰船局域功率谱　(c) 局域多普勒中心频率的变化

图 6 舰船目标方位向速度与SAR运动方向相同时舰船速度估计结果

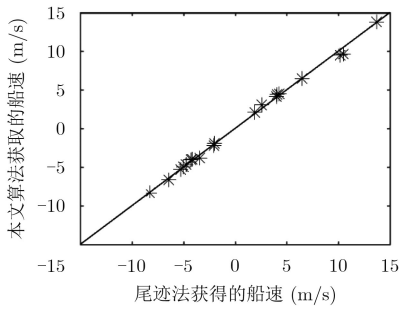


图 7 本文方法与尾迹法获取的舰船速度的对比

表 4 本文方法及调频率法相对尾迹法的估计偏差

	最大偏差(m/s)	最大相对偏差(%)	相关系数
本文方法	0.87	12	0.9986
调频率法	2.30	20	0.86

5 结束语

针对现有舰船速度估计算法一般只能估计舰船距离向速度的问题，本文提出了一种基于SAR图像局域中心频率的舰船方位向速度估计方法。通过对舰船目标在SAR图像局域多普勒中心频率的变化规律以及SAR图像局域方位向功率谱的分析，并采用最大似然估计方法，本文方法能较精确地估计出舰船的方位向速度。仿真结果表明，在不同参数条件下，本文方法的估计误差接近于CRB。同时，对仿真与实测数据的处理结果表明，与直接计算调频率得到的速度相比，本文方法估计的船速具有更高的精度。

分析表明，对于低波段下速度较快的舰船目标，本文方法能较精确地估计出其方位向速度。然而当雷达波段较高、舰船速度较低时，该方法的估计精度不高，且该方法不适用于星载SAR系统。如何提高本文方法对高波段下慢速运动舰船目标速度估计的精度将是下一步的重点研究内容。

参 考 文 献

[1] OUCHI K, TAMAKI S, YAGUCHI H, *et al*. Ship detection based on coherence images derived from cross correlation of multilook SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(3): 184–187. doi: 10.1109/LGRS.2004.827462.

[2] IERVOLINO P and GUIDA R. A novel ship detector based on the generalized-likelihood ratio test for SAR imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3616–3630. doi: 10.1109/JSTARS.2017.2692820.

[3] OUCHI K, IEHARA M, MORIMURA K, *et al*. Nonuniform azimuth image shift observed in the Radarsat images of ships in motion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2188–2195. doi: 10.1109/TGRS.2002.802478.

[4] DRAGOSEVIC M V and VACHON P W. Estimation of ship radial speed by adaptive processing of RADARSAT-1 fine mode data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 678–682. doi: 10.1109/LGRS.2008.2002433.

[5] ZILMAN G, ZAPOLSKI A, and MAROM M. The speed and beam of a ship from its wake's SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2335–2343. doi: 10.1109/TGRS.2004.833390.

[6] ELDHUSET K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 34(4): 1010–1019. doi: 10.1109/36.508418.

[7] 种劲松, 欧阳越, 朱敏慧. 合成孔径雷达图像海洋目标检测[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 96–105.
CHONG Jinsong, OUYANG Yue, and ZHU Minhui. Detection of Ocean Target in Synthetic Aperture Radar Imagery[M]. Beijing: Ocean Press, 2006: 96–105.

[8] KERBAOL V and COLLARD F. SAR-derived coastal and marine applications: From research to operational products[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2006, 30(3): 472–486. doi: 10.1109/JOE.2005.857505.

[9] RENGA A and MOCCIA A. Ship velocity estimation by doppler centroid analysis of focused SAR data[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014: 1809–1812. doi: 10.1109/IGARSS.2014.6946805.

[10] 孙海青, 王小青, 种劲松. 基于SAR子孔径序列图像配准的海洋动态信息获取[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(1): 179–186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00478.
SUN Haiqing, WANG Xiaoqing, and CHONG Jinsong. Ocean dynamic information acquisition based on matching SAR ocean sub-aperture sequence images[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(1): 179–186. doi: 10.3724/SP.J.1146.2011.00478.

[11] RENGA A and MOCCIA A. Use of doppler parameters for ship velocity computation in SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 1–17. doi: 10.1109/TGRS.2016.2533023.

[12] 云亚娇, 齐向阳, 李宁. 基于参数估计的海面运动舰船SAR成像方法[J]. 雷达学报, 2016, 5(3): 326–332. doi: 10.12000/JR15104.
YUN Yajiao, QI Xiangyang, and LI Ning. Moving ship SAR imaging based on parameter estimation[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(3): 326–332. doi: 10.12000/JR15104.

[13] LI Ning, WANG Robert, DENG Yunkai, *et al*. Fast ship detection for ScanSAR mode in wide sea areas[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 1251–1253. doi: 10.1109/IGARSS.2016.7729317.

[14] CUMMING I G and WONG F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, USA: Artech House Inc., 2005: 75–114.

[15] OLIVER C and QUEGAN S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Raleigh, USA: SciTech Publishing, 2004: 49–100.

[16] MENG Hui, WANG Xiaoqing, CHONG Jinsong, *et al*. Doppler spectrum-based NRCS estimation method for low-scattering areas in ocean SAR images[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 219–240. doi: 10.3390/rs9030219.

[17] CHITROUB S, HOUACINE A, and SANSAL B. Statistical characterisation and modelling of SAR images[J]. *Signal Processing*, 2002, 82(1): 69–92. doi: 10.1016/S0165-1684.

[18] 魏翔飞, 种劲松, 王小青, 等. 一种面向水面纹理的毫米波LFMCW雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(5): 1030–1035. doi: 10.11999/JEIT160684.
WEI Xiangfei, CHONG Jinsong, WANG Xiaoqing, *et al*. Imaging algorithm of millimeter-wave LFMCW radar for water surface texture detection[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1030–1035. doi: 10.11999/JEIT160684.

[19] HADDAD A. Estimation theory with applications to communications and control[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1972, 17(4): 585–585. doi: 10.1109/TAC.1972.1100024.

[20] WANG Peng, WANG Xiaoqing, CHONG Jinsong, *et al*. Optimal parameter estimation method of internal solitary waves in SAR images and the Cramer-Rao bound[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(6): 3143–3150. doi: 10.1109/TGRS.2015.2512264.

魏翔飞：男，1991年生，博士生，研究方向为SAR海洋成像.

王小青：男，1978年生，副研究员，研究方向为SAR海洋遥感应用与机理.

种劲松：女，1969年生，研究员，博士生导师，研究方向为海洋微波遥感.