

一种用于海洋要素反演的机载SAR多普勒中心偏移计算方法

赵现斌* 严卫 艾未华 陆文 马烁

(国防科技大学气象海洋学院 长沙 410073)

摘 要: 多普勒中心偏移是合成孔径雷达(SAR)反演海面风场、海表流场的重要参数。该文针对机载正侧视提出一种多普勒中心偏移计算方法,分别利用载机运动状态数据和海洋探测回波数据计算多普勒中心频率,再作差求解多普勒中心偏移,并在多普勒谱分析中加入小波分析去除噪声的影响来提高计算精度。以CDOP经验模型计算结果作为比对真值,机载SAR飞行探测试验结果表明,9组探测数据多普勒中心偏移计算误差的绝对值均小于2 Hz,均方根误差为1.4 Hz,满足海洋环境要素反演的精度要求。实验表明高精度的平台运动状态数据和探测回波数据是多普勒中心偏移海洋应用的关键。

关键词: 机载正侧视合成孔径雷达;多普勒中心偏移;计算方法;多普勒中心频率

中图分类号: TP751.1; P738

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2019)03-0391-09

DOI: 10.12000/JR19020

引用格式: 赵现斌,严卫,艾未华,等.一种用于海洋要素反演的机载SAR多普勒中心偏移计算方法[J].雷达学报,2019,8(3):391-399. doi: 10.12000/JR19020.

Reference format: ZHAO Xianbin, YAN Wei, AI Weihua, *et al.* Research on calculation method of Doppler centroid shift from airborne synthetic aperture radar for ocean feature retrieval[J]. *Journal of Radars*, 2019, 8(3): 391-399. doi: 10.12000/JR19020.

Research on Calculation Method of Doppler Centroid Shift from Airborne Synthetic Aperture Radar for Ocean Feature Retrieval

ZHAO Xianbin* YAN Wei AI Weihua LU Wen MA Shuo

(College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense
Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Doppler center shift is an important parameter for Synthetic Aperture Radar(SAR) to retrieve ocean surface wind field and ocean surface current field. We present a calculation method of Doppler centroid shift for airborne side-looking SAR. We compute Doppler centroid frequency by aircraft motion status data and ocean detection echo data respectively, and make difference to solve the Doppler centroid shift. In order to remove the influence of noise, we add wavelet analysis in Doppler spectrum analysis method to improve Doppler centroid frequency accuracy from ocean detection echo data. We carry out flight detection experiment by airborne SAR to obtain the Doppler centroid shift, while put buoy wind direction and wind speed in detection area into CDOP geophysical model function to simulate the Doppler centroid shift as compared to the validation true value. Flight detection results of 9 group data show that the calculation error absolute value of Doppler centroid shift are less than 2 Hz, and the RMS error is 1.4 Hz. It is meets the accuracy requirements of marine environmental factors retrieval, and proves the effective of Doppler centroid shift calculation method. In practical applications, the accuracy of Doppler centroid shift calculation is the key to the application of marine environment research, which requires high-precision platform motion data and sounding echo data to ensure application value.

收稿日期: 2019-02-13; 改回日期: 2019-05-27; 网络出版: 2019-06-17

*通信作者: 赵现斌 xian854591504@126.com *Corresponding Author: ZHAO Xianbin, xian854591504@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(41575028, 41705007, 41605016), 湖南省自然科学基金(2019JJ50719), 国防科技大学科研计划项目(ZK17-03-51)
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41575028, 41705007, 41605016), Hunan Natural Science Foundation (2019JJ50719), The National University of Defense Technology Research Project (ZK17-03-51)

责任编辑: 关键 Corresponding Editor: GUAN Jian

Key words: Airborne side-looking Synthetic Aperture Radar(SAR); Doppler centroid shift; Calculation method; Doppler centroid frequency

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种全天时、全天候的主动式微波侧视成像雷达,它通过合成孔径原理提高方位向分辨率,采用脉冲压缩技术提高距离向分辨率,获取高空间分辨率的探测图像。作为一种先进的微波遥感探测器,SAR已经广泛应用于军事侦察、地质测绘和海洋环境探测等领域^[1]。SAR探测数据中,雷达后向散射系数代表回波的强度信息,主要应用于海洋环境要素反演研究^[2-4];而多普勒中心频率代表探测回波的相位信息,直接影响图像信噪比、方位模糊信号比以及成像后的目标位置,主要应用于雷达成像领域^[5]。

近几年,随着搭载平台测量设备测量速度和精度的提高,人们在处理SAR探测回波数据时发现,平台运动状态数据计算的多普勒中心频率和海洋探测回波数据计算的多普勒中心频率始终存在特定差异,并开始认识到这种差异可能来自于海洋表层运动的影响。基于这一假设,学者们将SAR平台运动状态数据和海洋探测回波数据计算多普勒中心频率存在差异定义为多普勒中心偏移,并据此开展了海面风场^[6]、海表流场^[7,8]等海洋环境参数反演研究。

在多普勒中心频率计算研究方面,针对平台运动状态数据,Raney^[9]和Bezvesilniy等人^[10]分别提出了星载、机载SAR多普勒中心频率计算方法。针对探测回波数据,研究人员按照探测回波数据处理的不同阶段,提出了多种多普勒中心频率计算方法,包括距离向压缩前^[11,12]、距离向压缩后和方位向压缩前^[13]以及距离向和方位向压缩后^[14,15]等算法。

然而,目前针对多普勒中心偏移计算方法的研究尚比较少,只有Hansen等人^[16]利用Envisat ASAR探测数据计算了多普勒中心偏移,并对处理误差进行分析。本文针对机载正侧视SAR提出一种多普勒中心偏移计算方法,并开展机载SAR探测比对观测实验,结合C波段多普勒频移(C-band Doppler Shift, CDOP)地球物理模型函数验证反演方法的有效性。

2 多普勒中心偏移

2.1 平台运动状态与多普勒中心频率

正侧视SAR(天线指向与搭载平台航向垂直)探测目标时,平台运动状态受气象要素影响会发生变化,导致雷达天线指向产生偏离,此时平台航向和天线指向构成的探测几何关系如图1所示。其中,

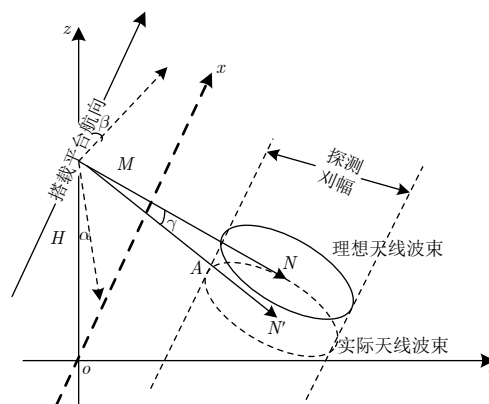


图 1 搭载平台航向和天线指向构成的探测几何关系

Fig. 1 Sounding geometric relationship between the platform and antenna pointing heading

实箭头方向为搭载平台飞行航向,两条虚直线间区域为SAR探测覆盖区域。当平台运动状态处于理想稳定状态时,天线指向用矢量 MN 表示,实线椭圆表示理想天线波束覆盖区域,而平台运动状态变化时,天线指向用矢量 MN' 表示,虚线椭圆表示实际天线波束覆盖区域。雷达天线实际指向与理想指向的夹角称为雷达斜视角 γ ,由俯仰角 α 和偏航角 β 等姿态参数决定。其中,俯仰角为搭载平台实际航向与设计航向沿垂直方向的夹角,偏航角为搭载平台实际航向与设计航向沿水平方向的夹角。

多普勒中心频率指探测目标通过SAR天线波束中心时刻(波束侧视角为0),回波的多普勒频率。平台运动状态变化时,多普勒中心频率与雷达斜视角的对应关系为

$$f_{dc} = \frac{2V}{\lambda} \cdot \sin(\gamma) \quad (1)$$

式中, V 表示搭载平台飞行速度, λ 表示雷达波长, γ 表示雷达斜视角。

多普勒中心频率表示SAR天线波束中心指向与探测目标之间相对径向运动。由式(1)可知,平台运动状态变化对应的多普勒中心频率,不包含探测目标运动的影响。SAR海洋环境探测时,多普勒中心频率的影响因素既包括平台运动状态变化,又包括海洋表层运动,而后者的影响包含在SAR探测回波之中。

2.2 海洋探测回波与多普勒中心频率

SAR探测回波数据是发射天线覆盖区域多个散射单元回波信号的矢量和,同时包含目标的幅度和相位信息。每个散射单元回波在方位向上都是一个

线性调频信号，中心频率被天线方向图调制。从文献[17]可知，SAR信号的方位向功率谱可表示为

$$S_a(f, r) = \xi_0^2 |W_a(f)|^2 \quad (2)$$

式中， f 表示回波多普勒频率， r 表示探测斜距， $W_a(f)$ 表示方位向天线方向图函数， ξ_0 表示后向散射系数。

由式(2)可知，目标场景均匀条件下SAR探测回波的多普勒功率谱与天线方向图具有相同的形状。由于天线方向图函数为实对称函数，且频谱中心在峰值处，所以多普勒中心频率等于多普勒功率谱能量中心对应的多普勒频率。

2.3 多普勒中心偏移计算

平台运动状态对应的多普勒中心频率仅包含搭载平台运动和地球自转(星载SAR)的影响，而海洋探测回波确定的多普勒中心频率同时包含搭载平台运动状态和海洋表层运动的贡献。因此，海洋表层运动是SAR平台运动状态数据和海洋探测回波数据计算多普勒中心频率存在差异的关键因素。

Chapron等人[7]定义多普勒中心偏移表示海洋表层运动引起的多普勒中心频率变化。多普勒中心偏移数值上等于SAR海洋探测回波数据计算的多普勒中心频率减去搭载平台运动状态数据计算的多普勒中心频率所得差值，可表示为

$$f_{\text{dcs}} = f_{\text{dc}}^{\text{ec}} - f_{\text{dc}}^{\text{mo}} \quad (3)$$

式中， f_{dcs} 表示多普勒中心偏移， $f_{\text{dc}}^{\text{ec}}$ 表示海洋探测回波获取的多普勒中心频率， $f_{\text{dc}}^{\text{mo}}$ 表示搭载平台运动状态计算的多普勒中心频率。

对于动态海面，多普勒中心偏移由表面散射元的距离向空间平均速度和局地雷达后向散射系数决定，可表示为[7,18]

$$f_{\text{dcs}} = -k_e U_D / \pi = -\frac{k_e}{\pi} \frac{\overline{v_r \sigma^0}}{\sigma^0} \quad (4)$$

式中， k_e 表示电磁波波数， U_D 表示距离向多普勒速度， v_r 表示表面散射元的运动速度，正值表示表面散射元远离雷达， σ^0 表示局地雷达后向散射系数，上横线表示空间平均。

3 机载SAR多普勒中心偏移计算方法设计

3.1 载机运动状态数据计算多普勒中心频率

为了进一步描述机载SAR姿态变化时构成的探测几何关系，本文将图1的水平坐标轴翻转，如图2所示。其中，载机沿着 x 轴以速度 V 在 H 高度平行于平面(xoy)开展探测飞行。雷达天线指向 MN' 用矢量 R 表示， $A'B'$ 为天线方向图与平面(xoy)的切线， α 为俯仰角， β 为偏航角， (x_R, y_R) 为天线波束中心到探测目标的指向点。

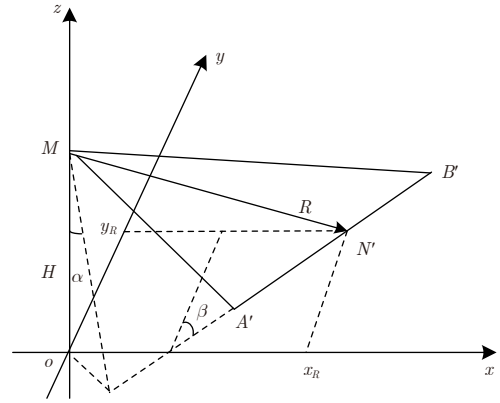


图2 机载SAR姿态变化时构成的探测几何关系

Fig. 2 Sounding geometric relationship in airborne SAR posture change

此时，天线波束中心到地面指向点的坐标为[10]

$$x_R = H \tan \alpha \cos \beta + \sin \beta \sqrt{R^2 - H^2 - (H \tan \alpha)^2} \quad (5)$$

$$y_R = -H \tan \alpha \sin \beta + \cos \beta \sqrt{R^2 - H^2 - (H \tan \alpha)^2} \quad (6)$$

从文献[10]可知，多普勒中心频率的表达式为

$$f_{\text{dc}} = \frac{2}{\lambda} V \frac{x_R}{R} \quad (7)$$

由式(5)和式(7)可知，决定多普勒中心频率的载机姿态参数包括俯仰角、偏航角、飞行速度和探测斜距。

俯仰角、偏航角、飞行速度和探测斜距等载机姿态信息，由惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)提供。惯性导航系统为光纤陀螺组合导航系统，输出参数包括俯仰角、偏航角、飞行高度和速度等。

利用载机运动状态数据计算多普勒中心频率的具体步骤为：首先，从惯性导航数据直接读取俯仰角和偏航角信息；然后，结合卫星定位信息获取飞行高度和速度，再利用飞行高度和雷达入射角计算探测斜距；最后，将俯仰角、偏航角、飞行速度和探测斜距输入式(5)和式(7)，计算多普勒中心频率 $f_{\text{dc}}^{\text{mo}}$ 。

3.2 海洋探测回波数据计算多普勒中心频率

通过分析探测回波的多普勒功率谱确定多普勒中心频率的方法，称为多普勒谱分析法[5,19]。当有些不完全孔径点的探测回波明显大于海面目标场景的其它部分时，会导致多普勒功率谱的形状产生畸变，影响多普勒中心频率的计算精度。特别是多普勒功率谱峰值附近比较平坦，使得噪声干扰更容易产生计算误差。因此，通过技术手段去除噪声对多

普勒功率谱的影响,是提高多普勒中心频率计算精度的重要途径。

本文利用小波分析去除噪声对多普勒功率谱的影响。在SAR数据处理中,本文发现Mexican-Hat母小波函数具有任意阶的正则性,同时具有较好的时域和频域局部化特性及信号能量集中特性,有利于去除噪声对多普勒功率谱的影响。

Mexican-Hat小波函数为高斯函数的2阶导数,可表示为^[20]

$$\psi(x) = (x^2 - 1)e^{-\frac{x^2}{2}}, x \in R \quad (8)$$

利用探测回波数据计算多普勒中心频率的具体步骤为:首先,从全极化回波数据中读取VV极化数据;然后,进行方位向FFT,并将FFT后的探测回波沿方位向叠加,得到多普勒功率谱;接着,利用Mexican-Hat小波函数去除噪声干扰;最后,确定多普勒功率谱能量中心对应的多普勒频率为多普勒中心频率 f_{dc}^{cc} 。

3.3 影响因素分析

多普勒中心偏移计算精度取决于载机运动状态数据精度和探测回波数据精度两个方面。在实际反演应用中,一方面需要从平台数据获取高精度的多普勒中心频率信息,这需要高稳定性的平台以及高精度的平台运动状态数据,包括俯仰角、偏航角、飞行速度和探测斜距等参数及其测量精度信息。

本文取俯仰角为 0° ,偏航角为 2.5° ,飞行速度为45 m/s,飞行高度为3 km,雷达入射角 40° ,采用敏感性分析的方法考察运动状态测量精度对于多普勒中心频率计算精度的影响。假设一个参数存在测量误差,其它参数测量准确的情况下,惯导参数测量误差对多普勒中心计算精度的影响如表1所示。

表1 惯导参数测量误差对多普勒中心频率计算精度的影响

Tab. 1 The influence of inertial parameter measurement error to Doppler center frequency calculation accuracy

惯导参数	测量误差	多普勒中心频率误差(Hz)
俯仰角	0.1°	2.0
偏航角	0.1°	1.8
飞行速度	1 m/s	1.0
飞行高度	/	/

由表1可知,偏航角和俯仰角的测量精度对多普勒中心频率计算影响显著, 0.1° 的测角误差会带来2 Hz的频率测量误差。飞行速度的测量精度对多普勒中心频率计算影响较小,1 m/s的测速误差会带来1 Hz左右的频率测量误差。而飞行高度误差对于多普勒中心频率测量精度没有影响。因此,要满

足海洋环境应用需求,惯导的角度测量精度是影响多普勒中心频率计算精度关键因素。

近些年我国机载、星载平台以及惯导技术的发展,能够提供高精度的平台运动状态参数,使得多普勒中心偏移的应用成为可能。另一方面,还需要从探测回波数据中获取高精度的多普勒中心频率信息,其精度受到信噪比和数据处理方法的影响。

仿真和试验结果均表明^[21]:提高信噪比有利于提高多普勒中心频率的计算精度,但信噪比大于10 dB后,通过信噪比改善多普勒中心频率精度的效果将会大大降低。在应用中可以根据这一特点选择合适的信噪比。

4 实验验证研究

4.1 实验数据

机载正侧视SAR的飞行探测时间为2012年7月26日14~21时,载机飞行高度为3 km,探测分辨率为1.5 m, 3 m,雷达中心入射角为 30° , 40° 。飞行探测试验获取的数据包括全极化SAR原始回波数据和搭载平台的惯性导航数据。机载SAR工作参数包括工作模式、极化方式和PRF等,指标如表2所示。

表2 机载SAR工作参数及指标

Tab. 2 Operating parameters and indicators of airborne SAR

工作参数	指标
工作模式	条带
极化方式	HH, HV, VH, VV
雷达频率	5.3 GHz
雷达波长	0.056 m
信号带宽	80 MHz, 150 MHz
脉冲宽度	15 μ s
PRF	500 Hz

机载SAR的探测回波为全极化数据,本文采用VV极化回波数据计算多普勒中心频率。

惯性导航系统输出俯仰角、横滚角、偏航角等角度信息,以及飞行速度和高度信息,角度测量精度优于 0.05° ,速度测量信息优于0.1 m/s。

比对观测数据由实验海域的国家气象局“58573号”浮标观测提供。浮标位于舟山海域 29.75° N, 122.75° E附近,提供海面10 m风向、风速,海浪的波向、有效波高和有效波周期等海洋环境要素,观测时间间隔为10 min。为了保证探测数据时空匹配的有效性,本文通过航向设计使得机载SAR在浮标周围 $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ 海域获取探测数据。

4.2 CDOP地球物理模型函数

Mouche等人^[6]统计发现无明显中尺度海洋现象

条件下(海面风场主导), 风向和风速两个地球物理参数是影响多普勒中心偏移主要因素。通过对 ENVISAT ASAR 获取的多普勒中心偏移与 ASCAT 散射计反演的风场数据进行系统分析, 提出了 CDOP 地球物理模型函数, 一般表达式为

$$f_{dcs} = \text{CDOP}(\varphi, u_{10}, \theta) \quad (9)$$

式中, φ 表示风向与天线波束中心指向的夹角, u_{10} 表示海面 10 m 的风速, θ 表示雷达入射角。CDOP 模型函数的表达式见文献[6]。

虽然 CDOP 模型函数仅包含风向和风速两个地球物理参数, 但其刻画的多普勒中心偏移与海洋表层运动的地球物理关系, 包含了倾斜调制、流体力学调制、自然散射机制和 Bragg 散射等海洋表层地球物理特性, 与理论模型相比具有更为显著的代表性。因此, 本文将浮标实测海面风场数据输入 CDOP 地球物理模型函数, 仿真计算多普勒中心偏移作为比对验证真值, 验证计算方法的有效性。

4.3 验证方案

机载正侧视 SAR 多普勒中心偏移计算方法的实验验证方案如图 3 所示。一方面, 本文利用机载正侧视 SAR 开展飞行探测试验, 获取多普勒中心偏移数据; 另一方面将实验海域的浮标风向、风速输入 CDOP 地球物理模型函数, 仿真计算多普勒中心偏移。最终, 将 CDOP 地球物理模型函数的计算结果作为比对验证真值, 验证计算方法的有效性, 具体步骤为

步骤 1 读取惯性导航数据, 结合导航定位和雷达入射角信息, 计算多普勒中心频率 f_{dc}^{mo} ;

步骤 2 读取 VV 极化探测回波数据, 进行方位向 FFT, 获取多普勒功率谱, 再通过小波分析滤波, 计算多普勒中心频率 f_{dc}^{ec} ;

步骤 3 采用 f_{dc}^{ec} 减去 f_{dc}^{mo} 计算探测数据的多普勒中心偏移 f_{dcs}^{de} ;

步骤 4 将浮标观测风向、风速输入 CDOP 地球物理模型函数, 计算多普勒中心偏移 f_{dcs}^{mod} ;

步骤 5 以 f_{dcs}^{mod} 作为比对验证真值, 考察探测数据多普勒中心偏移 f_{dcs}^{de} 的计算精度, 验证多普勒中心偏移计算方法的有效性。

4.4 实例计算

本文以机载 SAR 探测数据 20120726-011 为例, 研究多普勒中心偏移计算方法的精度, 步骤如下:

步骤 1 利用惯性导航数据计算多普勒中心频率。探测数据 20120726-011 采用的雷达入射角为 40° , 俯仰角、偏航角、飞行速度和高度等姿态信息, 如图 4 所示。

从图 4 可知, 由于高空风影响, 载机姿态会在一个固定状态附近产生微小变化。本文通过载机姿态信息的平均处理去除姿态微小变化的影响, 再将俯仰角、偏航角、飞行速度、高度以及雷达入射角输入式(8), 计算多普勒中心频率 f_{dc}^{mo} 为 46.2 Hz。

步骤 2 利用探测回波数据计算多普勒中心频

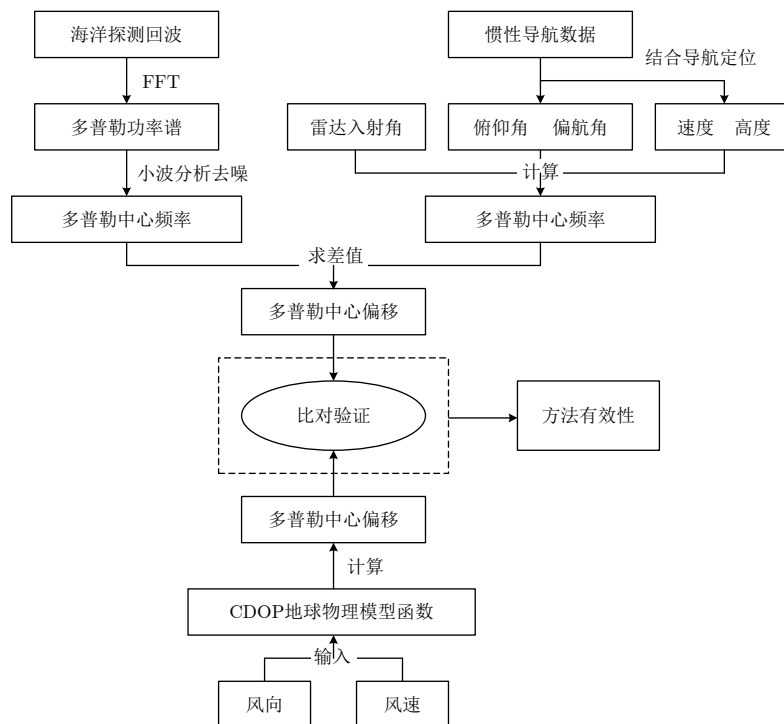
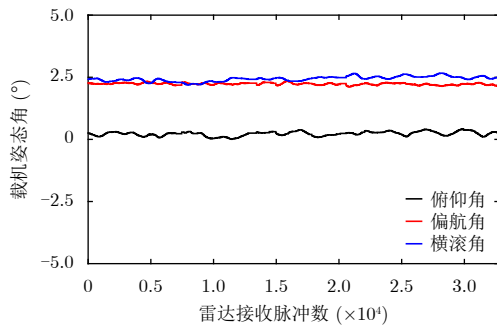
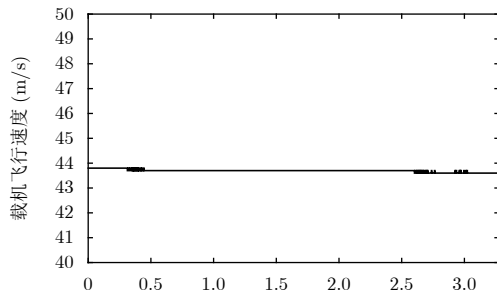


图 3 多普勒中心偏移计算方法验证方案

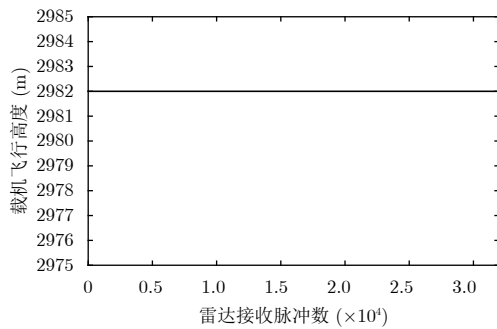
Fig. 3 Doppler centroid shift calculation method verification scheme



(a) 载机飞行探测的俯仰角、偏航角和横滚角
(a) The pitch angle, yaw angle and roll angle of flight detection



(b) 载机飞行速度
(b) Aircraft flight speed



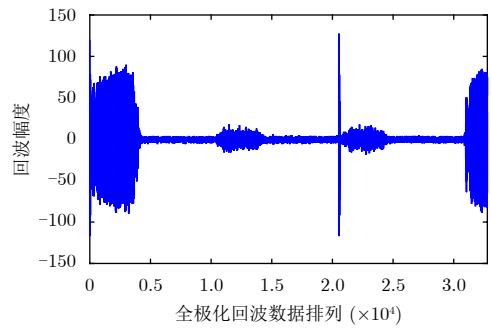
(c) 载机飞行高度
(c) Aircraft flight height

图4 探测数据20120726-011的姿态信息

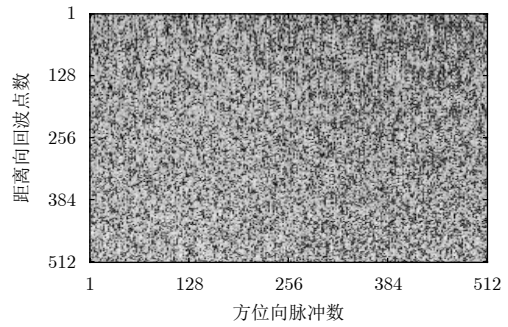
Fig. 4 Attitude information of the probe data 20120726-011

率。读取机载SAR探测回波数据，一个脉冲序列的全极化回波数据排列如图5(a)所示，图中幅度显著变化部分为回波信号，极化方式依次为HH, HV, VH和VV，其余部分为噪声。从中读取VV极化回波数据(图5(b), 512×512)，作方位向FFT，所得图像如图5(c)所示，图中明亮部分为天线方向图中心指向区域。将FFT后的探测回波沿方位向叠加，得到多普勒功率谱(图5(d)，蓝色曲线)。如果直接从图5(d)蓝色曲线确定多普勒中心频率，受噪声影响将会在59~64 Hz范围内出现局部最优解，产生±2.5 Hz的计算误差。

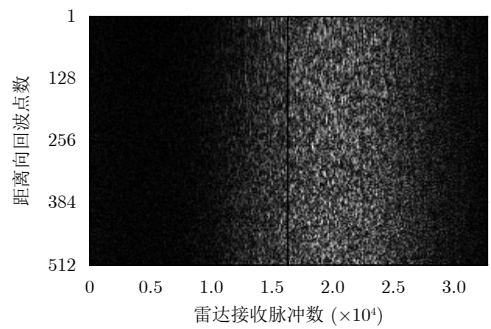
利用Mexican-Hat小波函数滤波，平滑多普勒功率谱(图5(d)，红色曲线)，最终依据多普勒功率谱能量中心位置确定多普勒中心频率 f_{dc}^{ec} 为61.5 Hz。



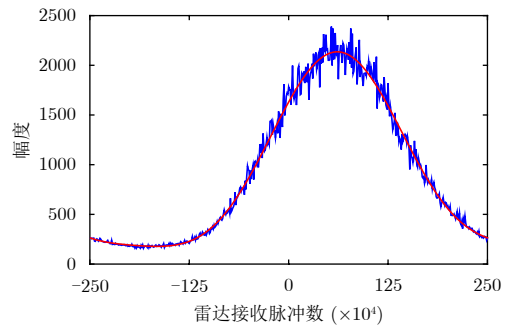
(a) 一个脉冲序列的全极化回波数据排列
(a) An array of fully polarized echo data for a pulse sequence



(b) 读取的VV极化探测回波
(b) The VV polarization probe echo



(c) FFT后的探测回波
(c) The detection of echo from FFT



(d) 多普勒功率谱
(d) Doppler power spectrum

图5 机载SAR探测回波数据计算多普勒中心频率

Fig. 5 The Doppler center frequency calculate from Airborne SAR detection echo data

步骤3 计算探测数据的多普勒中心偏移。采用 f_{dc}^{ec} 减去 f_{dc}^{mo} 计算多普勒中心偏移 f_{dcs}^{de} ，数值为15.3 Hz。

步骤4 采用CDOP地球物理模型函数计算多普勒中心偏移。探测数据20120726-011的雷达入射角为 40° ，天线波束中心指向为 180° 。与其匹配的浮标风速为 5.3 m/s ，风向为 136° ，则风向与天线波束中心指向的夹角为 -44° 。将雷达入射角、风速和风向与天线波束中心指向的夹角输入CDOP地球物理模型函数，计算多普勒中心偏移 $f_{\text{dcs}}^{\text{mod}}$ ，结果为 14.5 Hz 。

步骤5 确定探测数据多普勒中心偏移的计算误差。以 $f_{\text{dcs}}^{\text{mod}}$ 作为比对验证真值，探测数据多普勒中心偏移的计算误差为 0.8 Hz 。

4.5 可行性分析

按照4.3节计算过程，本文计算7月26日9组探测数据的多普勒中心偏移，并以CDOP地球物理模型函数计算结果作为比对验证真值，计算结果如表3所示。

由表3可知，9组探测数据多普勒中心偏移计算误差的绝对值均小于 2 Hz ，均方根误差为 1.4 Hz 。

基于CDOP经验模型，本文取风向 45° ，雷达入射角取 30° ，研究多普勒中心偏移计算误差与风速误差关系。在中、低风速条件下，多普勒中心偏移计算误差与风速误差的对应关系如图6所示。

表3 多普勒中心偏移计算结果比对验证(Hz)

Tab. 3 Comparison of Doppler centroid shift calculation verification (Hz)

条带名称	回波数据	惯导数据	探测数据	CDOP模型	计算误差
20120726-011	61.5	46.2	15.3	14.5	0.8
20120726-021	53.7	61.1	-7.4	-9.2	1.8
20120726-031	27.3	36.8	-9.5	-10.8	1.3
20120726-041	47.9	28.9	19.0	19.6	-0.6
20120726-051	10.7	18.6	-7.9	-6.7	-1.2
20120726-061	66.4	47.4	19.0	17.4	1.6
20120726-071	-13.7	-3.5	-10.2	-11.4	1.2
20120726-081	-15.6	-31.2	15.6	17.3	-1.7
20120726-091	31.3	10.1	21.2	19.6	1.6
RMS				1.4	

图6中，风速误差随着多普勒中心偏移计算误差的增加而增加， 1 Hz 的多普勒中心偏移计算误差会带来约 1 m/s 的风速误差。海洋环境应用中要求风速反演误差小于 2 m/s ，此时多普勒中心偏移计算误差应小于 2.2 Hz 。考虑设计冗余，论文中要求多普勒中心偏移计算误差应小于 2 Hz 。比对验证结果表明，本文提出的多普勒中心偏移计算方法有效，可满足海洋环境要素反演精度要求。

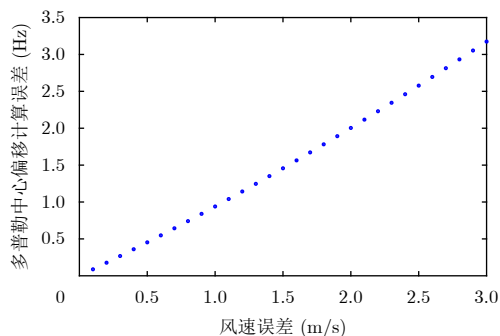


图6 多普勒中心偏移计算误差与风速误差对应关系

Fig. 6 Correspondence between Doppler centroid shift calculation error and wind speed error

实际应用中，可以基于不同平台(机载、星载)运动状态数据，针对性选用计算方法获取多普勒中心频率，同时基于探测回波数据，选用相应分析方法求解多普勒中心频率。

7月26日14时到21时的浮标观测结果表明，探测海域风向变化范围为 $130^\circ\sim 150^\circ$ ，风速为 $5.2\sim 6.5\text{ m/s}$ 。若仅考虑风向、风速变化，多普勒中心偏移的变化范围应小于 3 Hz 。而表3中机载SAR探测数据多普勒中心偏移计算结果为 $-10.2\sim 21.2\text{ Hz}$ ，变化范围为 31.4 Hz 。这是因为多普勒中心偏移取决于天线波束中心指向与风向的夹角，而非单纯风向。探测试验时，为了保证浮标比对数据时空匹配的有效性，本文设计载机作三角航线飞行。由于载机航向调整，使得天线波束中心指向与风向的夹角发生变化，影响了天线波束中心指向与探测目标之间相对径向运动，导致多普勒中心偏移变化范围变大。由此可见，载机飞行航向直接影响多普勒中心偏移计算结果。因此，机载SAR海洋环境探测时，设计载机作直线飞行，有利于开展海洋环境要素反演研究。

5 结束语

针对机载正侧视SAR, 本文提出了一种多普勒中心偏移计算方法, 分别利用载机运动状态数据和海洋探测回波数据计算多普勒中心频率, 再作差求解多普勒中心偏移。在多普勒谱分析法中加入小波分析去除噪声对多普勒功率谱的影响, 提高了海洋探测回波数据计算多普勒中心频率的精度。

利用机载SAR开展了飞行探测实验, 获取多普勒中心偏移, 同时将实验海域的浮标风向、风速输入CDOP地球物理模型函数仿真计算多普勒中心偏移作为比对验证真值。实验结果表明, 9组探测数据多普勒中心偏移计算误差的绝对值均小于2 Hz, 均方根误差为1.4 Hz, 多普勒中心偏移计算方法有效, 可满足海洋环境要素反演的精度要求。多普勒中心偏移变化范围较大的原因是载机航向调整, 使得天线波束中心指向与风向的夹角发生变化, 影响了天线波束中心指向与探测目标之间相对径向运动。因此, 机载SAR海洋环境探测时, 设计载机作直线飞行, 有利于开展海洋环境要素反演研究。

本文研究结果可为机载、星载SAR多普勒中心偏移的海洋环境应用提供技术支持。多普勒中心偏移的计算精度是其应用于海洋环境探测的一个关键因素, 取决于平台运动状态数据精度和探测回波数据精度两个方面。未来工作中, 将系统分析平台运动状态参数测量误差, 以及多普勒功率谱的噪声干扰误差, 构建误差传递函数, 再通过误差系统校正, 提高多普勒中心偏移计算精度。

参 考 文 献

- [1] MARTIN S. An Introduction to Ocean Remote Sensing[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 15–27.
- [2] HASSELMANN S, BRÜNING C, HASSELMANN K, *et al.* An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1996, 101(C7): 16615–16629. doi: [10.1029/96JC00798](https://doi.org/10.1029/96JC00798).
- [3] HERSBACH H, STOFFELEN A, and DE HAAN S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2007, 112(C3): C03006. doi: [10.1029/2006JC003743](https://doi.org/10.1029/2006JC003743).
- [4] 张杰, 张晰, 范陈清, 等. 极化SAR在海洋探测中的应用与探讨[J]. *雷达学报*, 2016, 5(6): 596–606. doi: [10.12000/JR16124](https://doi.org/10.12000/JR16124).
ZHANG Jie, ZHANG Xi, FAN Chenqing, *et al.* Discussion on application of polarimetric synthetic aperture radar in marine surveillance[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 596–606. doi: [10.12000/JR16124](https://doi.org/10.12000/JR16124).
- [5] 王绍清. 星载SAR多普勒中心实时估计技术研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院研究生院(电子学研究所), 2005: 12–17.
- [6] WANG Shaoqing. Research on the Doppler centroid real-time estimation technology of space-borne SAR[D]. [Master dissertation], Chinese Academy of Sciences Institute of Electronics, 2005: 12–17.
- [7] MOUCHE A A, COLLARD F, CHAPRON B, *et al.* On the use of Doppler shift for sea surface wind retrieval from SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2901–2909. doi: [10.1109/TGRS.2011.2174998](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2174998).
- [8] CHAPRON B, COLLARD F, and ARDHUIN F. Direct measurements of ocean surface velocity from space: Interpretation and validation[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2005, 110(C7): C07008. doi: [10.1029/2004JC002809](https://doi.org/10.1029/2004JC002809).
- [9] ROUAULT M J, MOUCHE A, COLLARD F, *et al.* Mapping the Agulhas Current from space: An assessment of ASAR surface current velocities[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C10): C10026. doi: [10.1029/2009JC006050](https://doi.org/10.1029/2009JC006050).
- [10] RANEY R K. Doppler properties of radars in circular orbits[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, 7(9): 1153–1162. doi: [10.1080/01431168608948916](https://doi.org/10.1080/01431168608948916).
- [11] BEZVESILNIY O O and VAVRIV D M. Synthetic Aperture Radar Systems for Small Aircrafts: Data Processing Approaches[M]. London: INTECH Open Access Publisher, 2012: 465–498.
- [12] HERLAND E A. Seasat SAR processing at the Norwegian defence research establishment[C]. Proceedings of an EALSel-ESA Symposium, Voss, Norway, 1981: 247–253.
- [13] MCDONOUGH R N, RAFF B E, and KERR J L. Image formation from spaceborne synthetic aperture radar signals[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1985, 6(4): 300–312.
- [14] BENNETT J R, CUMMING I G, and DEANE R A. The digital processing of seasat synthetic aperture radar data[C]. IEEE International Radar Conference, Washington, USA, 1980: 168–175.
- [15] LI F K, HELD D N, CURLANDER J C, *et al.* Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic-aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-2(1): 47–56. doi: [10.1109/TGRS.1985.289499](https://doi.org/10.1109/TGRS.1985.289499).
- [16] CURLANDER J C, WU C, and PANG A. Automated preprocessing of spaceborne SAR data[C]. Proceedings of 1982 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 1982: 6.
- [17] HANSEN M W, COLLARD F, DAGESTAD K F, *et al.* Retrieval of sea surface range velocities from Envisat ASAR Doppler centroid measurements[J]. *IEEE Transactions on*

- Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3582–3592. doi: [10.1109/TGRS.2011.2153864](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2153864).
- [17] 闫龙. 机载SAR多普勒参数估计及运动补偿技术研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2009: 10–20.
YAN Long. Research on Doppler parameters estimation and motion compensation of air-born SAR[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2009: 10–20.
- [18] ROMEISER R and THOMPSON D R. Numerical study on the along-track interferometric radar imaging mechanism of oceanic surface currents[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 446–458. doi: [10.1109/36.823940](https://doi.org/10.1109/36.823940).
- [19] 刘银中. 机载SAR实测数据多普勒参数估计与成像算法研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2006: 12–18.
LIU Yinzhong. Study on Doppler parameters estimation of airborne SAR raw data and imaging algorithms[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2006: 12–18.
- [20] LEITE G C, USHIZIMA D M, MEDEIROS F N S, *et al.* Wavelet analysis for wind fields estimation[J]. *Sensors*, 2010, 10(6): 5994–6016. doi: [10.3390/s100605994](https://doi.org/10.3390/s100605994).
- [21] 郝胜勇, 王小青, 盛新庆, 等. 一种提高海洋SAR定位精度的方法[J]. *电子与信息学报*, 2005, 27(8): 1213–1216.
HAO Shengyong, WANG Xiaoqing, SHENG Xinqing, *et al.* A means of improving accuracy of positioning for ocean SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(8): 1213–1216.

作者简介

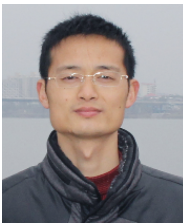


赵现斌(1986–), 男, 陕西合阳人, 博士, 讲师。2015年在解放军理工大学气象海洋学院获得博士学位, 主要从事海洋遥感等方面的研究。



陆文(1984–), 男, 2012年毕业于解放军理工大学气象海洋学院, 获得大气物理学与大气环境理学博士学位, 现为国防科技大学气象海洋学院副教授。主要研究方向为微波主被动大气海洋环境遥感。
E-mail: luwenft@hotmail.com

严卫(1961–), 男, 浙江宁波人, 1997年在南京航空航天大学获博士学位, 目前国防科技大学气象海洋学院教授, 博导。



艾未华(1979–), 男, 江西鹰潭人, 原解放军理工大学博士, 国防科技大学气象海洋学院副教授、硕士生导师, 主要研究方向为气象海洋环境感知雷达技术。

E-mail: awhzjax@126.com



马烁(1989–), 男, 安徽人, 博士, 助理研究员。2016年在解放军理工大学气象海洋学院获得博士学位, 主要研究方向为大气与海洋遥感及其资料同化等。
E-mail: mashuo0601@163.com