

基于GPS-R的双基地SAR移动目标成像方法研究

何振宇^{1,2,3}, 杨扬^{1,2}, 陈武^{1,2}, 翁多杰^{1,2}

1. 香港理工大学 土地测量及地理资讯学系, 香港 999077;

2. 香港理工大学 深圳研究院, 深圳 518057;

3. 河海大学 计算机与信息学院, 南京 211100

摘要: 全球导航卫星系统反射GNSS-R (Global Navigation Satellite System Reflectometry) 用做双基地合成孔径雷达 (简称GNSS-SAR) 是近年来新兴的研究方向。当前GNSS-SAR成像的主要对象是地表静态目标, 关于动目标成像的研究非常少。本文以全球定位系统GPS (Global Positioning System) 卫星作为照射源, 提出一种动目标成像方法。该方法首先构建了成像场景的双基地几何模型, 推导了一种近似的双基地距离历程, 用于描述目标回波的方位向相位变化, 然后, 采用Keystone变换校正由目标运动引起的未知距离单元徙动; 组合短时傅里叶变换和随机抽样一致性算法估计未知的目标移动速度, 最后, 推导了方位向匹配滤波器用于方位向压缩从而完成动目标成像。采集了两组现场实验数据验证本文方法, 实验结果表明: 提出的算法能够有效地成像移动目标并且准确地估计目标运动速度、船长度、离岸垂直距离以及移动方向。

关键词: GNSS-R, GNSS-SAR, 动目标成像, Keystone变换, 短时傅里叶变换, 随机抽样一致性算法

中图分类号: P2

引用格式: 何振宇, 杨扬, 陈武, 翁多杰. 2022. 基于GPS-R的双基地SAR移动目标成像方法研究. 遥感学报, 26(12): 2555-2567

He Z Y, Yang Y, Chen W and Weng D J. 2022. Bistatic SAR moving target imaging algorithm study based on GPS-R signal. National Remote Sensing Bulletin, 26(12): 2555-2567 [DOI: 10.11834/jrs.20210378]

1 引言

遥感技术和导航定位技术是当前最具应用价值和潜力的时空信息采集技术。两种技术的相互融合是遥感和导航综合应用的必然发展趋势 (万玮等, 2016; 陈锐志等, 2019)。全球导航卫星系统反射GNSS-R (Global Navigation Satellite System Reflectometry) 就是一种典型的融合应用。国内外的学者已经开展了一系列关于GNSS-R技术的理论与应用研究, 例如DDM仿真 (夏俊明等, 2019; Beltramonte等, 2020)、海面测高 (Xie等, 2018)、风速反演 (王笑蕾等, 2021)、雪深反演 (王泽民等, 2018; Yu等, 2019)、土壤水分反演 (彭学峰等, 2017)、土壤盐度反演 (Wu等, 2019) 以及目标探测 (Ma等, 2018; Pastina等, 2018) 等。

在目标探测领域, GNSS-R可看作是一种无源雷达系统。由于没有专门的发射机设备, GNSS-R用于目标探测具有低成本、低功耗、隐蔽性强等诸多优点 (He等, 2020)。近年来, 利用GNSS-R做双基地合成孔径雷达GNSS-SAR (GNSS-based Bistatic Synthetic Aperture Radar) 引起了学者们的广泛关注 (Antonioni等, 2007; Liu等, 2013; Ma等, 2015; Zeng等, 2016; Liu等, 2019)。当前GNSS-SAR成像的主要对象是地表静止目标, 而关于动目标成像的研究非常之少。为了扩大GNSS-SAR的应用范围, 本文致力于动目标成像方法研究。王博等 (2019) 对GNSS-SAR动目标成像做了技术探讨并提出了一种可行的成像方法, 其考虑的是运动目标具有径向速度的情况; 此时, 目标回波的多普勒频率恒定, 可直接通过频域滤波分离

收稿日期: 2020-09-07; 预印本: 2021-03-31

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2016YFB0502101); 深圳市科技创新委基础研究 (编号: JCYJ20170818104822282); 香港研究资助局研究用途补助金 (编号: PolyU 152151/17E)

第一作者简介: 何振宇, 研究方向为GNSS反射信号探测移动目标以及SAR成像。E-mail: zhenyu.he@connect.polyu.hk

通信作者简介: 陈武, 研究方向为大地测量学和地球动力学、无缝定位技术、室内定位、智能交通、GNSS定位和应用。E-mail: wu.chen@polyu.edu.hk

动、静目标并根据多普勒频率的频移量估计目标速度，方便之后的成像。但是，如果目标具有切向速度，则目标回波的多普勒频率不再恒定而是随时间变化；此时，频域滤波法不再适用。此外，该方法成像使用的时域后向投影算法适用于各种双基地几何构型并且没有近似运算使得成像精度高，但是，需要对成像场景中每个点进行计算，导致运算量极大不利于 GNSS-SAR 系统的实时性应用 (Zeng 等, 2016)。

本文以全球定位系统 GPS (Global Positioning System) 卫星作为机会照射源，针对具有切向速度的目标，采用频域 GNSS-SAR 算法成像动目标。频域算法虽然有一定的近似运算，但其最大的优点在于高效的信号处理效率，适用于实时处理 (Antoniou 和 Cherniakov, 2013)。前期工作 (何振宇 等, 2020) 已经初步探讨了成像海面移动船只的可行性；本文将继续扩展之。频域 GNSS-SAR 成像算法主要包含两个步骤：距离单元徙动校正和方位向压缩。然而，对于未知运动速度的目标，传统的 GNSS-SAR 算法难以完成上述两个步骤，SAR 图像上的动目标将会发生散焦、位置偏移等问题。因此，动目标成像需要解决：未知的距离单元徙动校正、目标运动速度估计以及方位向压缩。为了解决以上问题，本文首先构建了成像场景的双基地几何模型如图 1 所示。其中，接收机固定于海岸，同时接收 GPS 卫星信号以及目标回波信号；在观测时间内 GPS 卫星处于准静态状态；移动目标的运动轨迹垂直于接收机天线视线方向以便形成合成孔径。基于该双基地几何模型，推导了一种近似的双基地距离历程，方便描述目标回波的方位向相位变化。然后，采用 Keystone 变换 (Perry 等, 1999；王娟和赵永波, 2011) 补偿未知的距离单元徙动以及组合短时傅里叶变换 STFT (Short Time Fourier Transform) (Auger 等, 2012) 和随机抽样一致性 RANSAC (Random Sample Consensus) (Fischler 和 Bolles, 1981) 算法估计目标运动速度。最后，推导了方位向匹配滤波器完成方位向压缩从而实现动目标成像。现场实验将用于验证本文提出的动目标成像方法。

2 GPS-R 双基地 SAR 系统模型

本节首先介绍动目标 SAR 成像的双基地几何从而推导近似的双基地距离历程；然后，给出 GPS

直达波和目标回波的雷达信号模型。

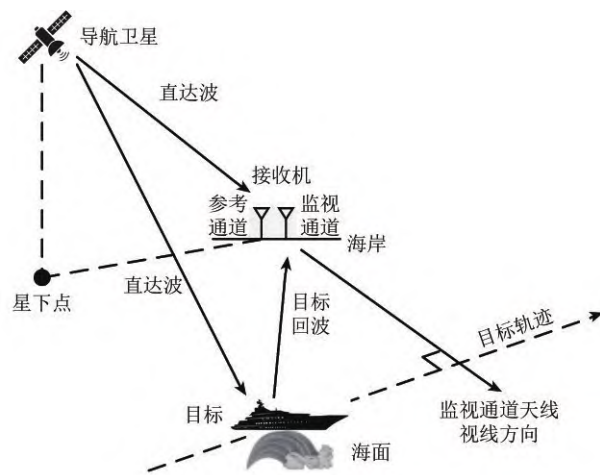


图1 动目标成像的双基地几何示意图

Fig. 1 Bistatic acquisition geometry for moving target imaging

2.1 双基地几何模型

如图 1 所示，GPS 接收机被固定在海岸边。它包含两个通道分别命名为参考通道和监视通道；参考通道天线负责接收 GPS 卫星发射的直达波作为参考信号；监视通道天线则接收移动目标反射的回波。为了方便描述，图 2 对图 1 的双基地几何做了抽象简化。在图 2 (a) 中，移动目标 T_g 和接收机 R_x 处在相同的高度（即地表）并且假设在整个观测时间内卫星 T_x 处于准静态状态（例如，观测时长小于 120 s）以及移动目标 T_g 始终处在监视通道天线 3 dB 波束角照射范围内。卫星 T_x 到目标 T_g 距离表示为 R_t ，卫星 T_x 到接收机 R_x 距离表示为 R_b ，目标 T_g 到接收机 R_x 距离表示为 R_r 。定义双基地距离 R_{bi} 为直达波与目标回波的传播距离之差，表示为

$$R_{bi}(u) = R_t(u) + R_r(u) - R_b(u) \quad (1)$$

式中， $u \in [1, T]$ 称为方位时间或者慢时间； T 表示整个观测时长。式 (1) 可以精确地描述观测时间内双基地距离历程；但是，它不便于下一节的动目标成像处理。因此，本节推导一种近似的双基地距离历程。

考虑到 GPS 卫星到地表距离有 20000—24000 km (刘立东 等, 2004)，远远大于目标到接收机距离 (例如小于 10 km)。所以，图 2 (a) 中卫星到目标距离以及卫星到接收机距离近似于平行关系。根据三角函数关系可知，式 (1) 可近似为

$$R_{bi}(u) \approx R_t(u) + R_r(u) \times \cos(\theta(u)) \quad (2)$$

式中， θ 表示双基地角。杨振起等 (1998) 指出双

基地角 θ 具有如下角度关系:

$$\cos \theta = \cos \alpha \times \cos \beta \tag{3}$$

式中, α 表示卫星高度角; β 是图 2 (a) 中由接收机、目标和星下点构成的角度。从图 2 (b) 可以看出, β 角有如下角度关系:

$$\beta = \varphi + az - \varepsilon \tag{4}$$

式中, $\varphi = \cos^{-1}(R_s/R_r)$ 表示监视通道天线相位中心对目标的斜视角; R_s 为目标到接收机垂直距离; az 定义为本地卫星方位角 (将在 4.1 节结合具体实验场景进行讨论); ε 是图 2 (b) 中由接收机、星下点和目标构成的角度。然而, ε 几乎可以忽略不计, 因为星下点到接收机距离和星下点到目标距离依然远远大于目标到接收机距离。由此, 结合式 (3) 和 (4), 式 (2) 可表示为

$$R_{bi}(u) \approx \sqrt{R_s^2 + (L - v \times u)^2} - (L - v \times u) \cos \alpha \sin az + R_s \cos \alpha \cos az \tag{5}$$

式中, $u \in [1, 2L/v]$; L 表示合成孔径长度的一半; v 表示目标移动速度。然而, 如果图 2 (b) 中的目标自左向右移动, 则双基地距离历程变为

$$R_{bi}(u) \approx \sqrt{R_s^2 + (L - v \times u)^2} + (L - v \times u) \cos \alpha \sin az + R_s \cos \alpha \cos az \tag{6}$$

式 (5) 和 (6) 表明, 当目标的运动方向不同时, 对应的双基地距离历程表示式也不相同。需要注意的是, 图 2 (b) 仅显示了星下点在雷达视线方向右侧的例子, 如果星下点位于左侧并且目标依然自右向左运动, 则双基地距离历程表示式变为式 (6)。综上可知, 在目标穿过雷达视线方向之前, 如果目标和星下点位于视线方向的同侧, 则双基地距离历程表示式为式 (5), 反之, 则为式 (6)。该特点可用于判断目标移动方向, 将在 4.2 节进行讨论。

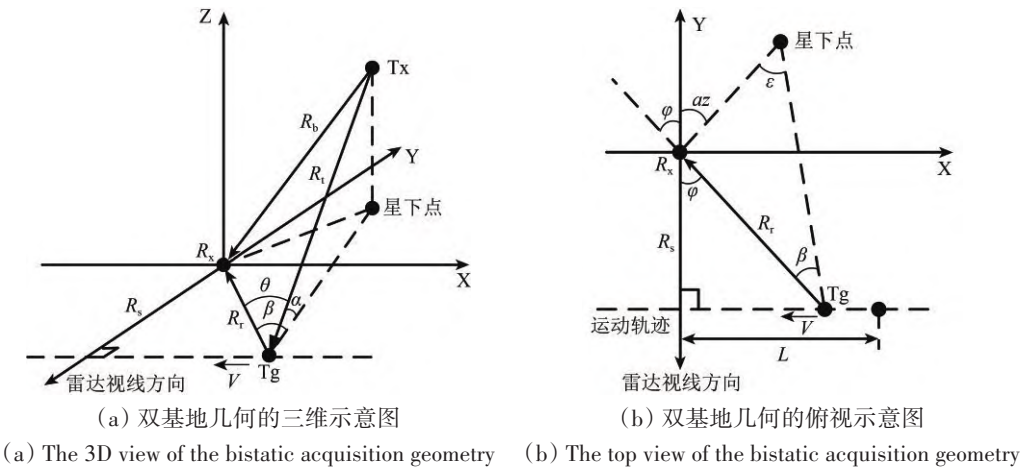


图2 不同视角的双基地几何示意图

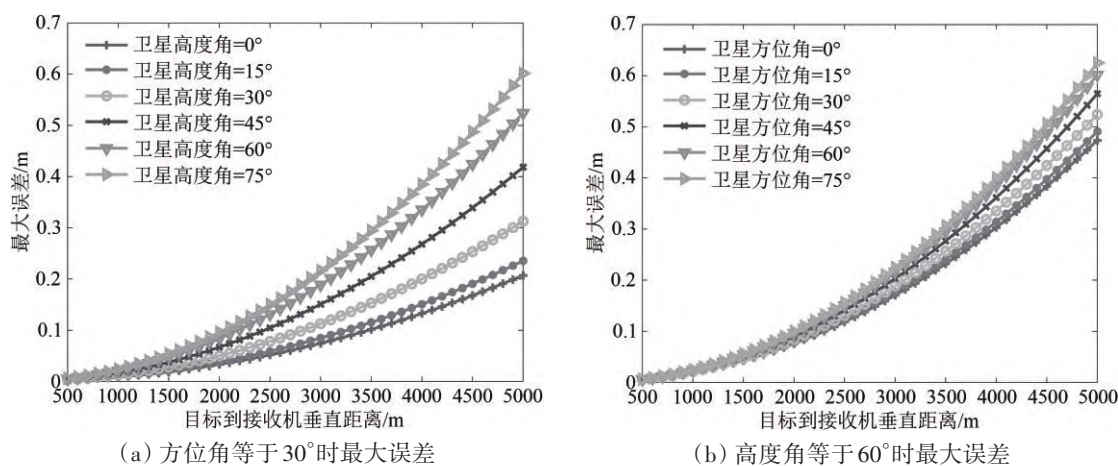
Fig. 2 Different views of bistatic acquisition geometry

利用仿真实验来评估本节推导的近似双基地距离适用范围, 即, 计算式 (1) 定义的双基地距离与式 (5) 或式 (6) 之间的最大误差。表 1 列出了仿真所需参数; 图 3 给出了在不同的卫星高度角、本地卫星方位角条件下, 两种双基地距离的最大误差与目标到接收机垂直距离之间的关系。从中可以看出, 最大误差随着高度角、方位角以及垂直距离的增大而增大。然而, 以图 3 (b) 为例, 最大误差在大约 3000 m 范围内没有超过 GPS L1 信号载波波长 (约 0.19 m)。因此, 在 3000 m 范围以内, 推导的近似双基地距离历程可安全地用

于接下来的动目标成像处理。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters		
参数	单位	数值[范围]
接收机坐标	(m,m,m)	(0,0,0)
卫星到接收机距离	km	20,000
卫星高度角	(°)	0—75
本地卫星方位角	(°)	0—75
监视通道天线 3 dB 波束角	(°)	10
目标到接收机垂直距离	m	500—5000



(a) The maximum errors when the azimuth angle is 30° (b) The maximum errors when the elevation angle is 60°

图3 不同卫星高度角、本地卫星方位角和目标到接收机垂直距离下两种双基地距离之间的最大差值

Fig. 3 Maximum errors between two bistatic ranges versus the target-to-receiver vertical ranges in the case of different satellite elevation angles and local satellite azimuth angles

2.2 信号模型

本文选用的GPS L1信号 S_{L1} 表示为

$$S_{L1}(t) = A \times C(t) \times D(t) \times \cos(2\pi f_c t + \varphi_0) \quad (7)$$

式中, t 表示观测时刻; A 表示信号幅度; C 表示测距码; D 表示导航电文; f_c 为载波中心频率; φ_0 为信号初相。GPS-R做目标探测需要直达波作为参考信号,然而,参考通道接收的直达波能量很低,小于 -30 dB (Antoniou 和 Cherniakov, 2013)。这样的直达波不能直接用于回波信号处理,需要做信号同步。信号同步通过捕获和跟踪直达波来提取信号中的码相位、载波相位、多普勒频率、导航电文等观测量,再利用这些观测量生成接近于无噪声的直达波作为参考信号 (Antoniou 等, 2015)。将提纯后的直达波 S_{di} 表示为雷达信号格式且忽略信号的幅值和初相:

$$S_{di}(t, u) = C(t - \tau_{di}(u)) \times D(t - \tau_{di}(u)) \times \exp(j(2\pi f_{di}(u)t + \varphi_{di}(u))) \quad (8)$$

式中, $t \in [1, PRI]$ 称为快时间; PRI 表示脉冲重复间隔 (即测距码持续时间为1 ms)。 τ_{di} 、 f_{di} 和 φ_{di} 分别表示码延迟、载波频率和载波相位。他们的取值依赖于卫星与接收机之间的相对位置和运动。此外,除了传播距离产生的码延迟和载波相位延迟, τ_{di} 和 φ_{di} 还包含了由大气延迟和接收机钟差所引起的码延迟误差和载波相位误差。同理,考虑单个点目标,监视通道内的目标回波 S_{re} 表示为

$$S_{re}(t, u) = C(t - \tau_{re}(u)) \times D(t - \tau_{re}(u)) \times \exp(j(2\pi f_{re}(u)t + \varphi_{re}(u))) \quad (9)$$

式中, τ_{re} 、 f_{re} 和 φ_{re} 分别表示回波信号的码延迟、载波频率和载波相位。

3 动目标SAR成像处理

图4为本文提出的GPS-R双基地SAR动目标成像方法流程图。整个过程可划分为3个部分,分别为预处理、速度估计和方位向压缩。下面将分别描述这3个部分。

3.1 预处理

2.2节已经给出了GPS直达波和目标回波的信号模型。可以看出, GPS信号是连续波,不能反映SAR成像所需要的目标回波在二维(距离,方位时间)域上的情况。此外,导航电文会引起信号相位跳变,破坏载波多普勒频率的连续性以及GPS信号内的各种误差项有待消除 (王博 等, 2019)。为了解决上述问题,需要做距离向压缩处理。距离向压缩即为式(8)的参考信号和式(9)的目标回波在快时间域上做互相关运算,得到二维距离压缩信号 rc ,表示为

$$rc(\tau, u) = \int S_{di}^*(t - \tau, u) \times S_{re}(t, u) dt = \int C(t - \tau_{di}(u) - \tau) \times C(t - \tau_{re}(u)) \times D(t - \tau_{di}(u)) \times D(t - \tau_{re}(u)) \times \exp(j(2\pi \Delta f t + \Delta \varphi(u))) dt \quad (10)$$

式中, $\tau \in [0, PRI - 1]$ 表示测距码偏移量, * 表示取共轭操作, Δf 表示快时间域两路信号的载波频率差, $\Delta\varphi$ 表示慢时间域两路信号的相位差。需要指出的是: (1) $D(t - \tau_{di}(u)) \times D(t - \tau_{re}(u))$ 乘积为 1, 即导航电文被消除, 因为在 6000 km 范围内参考信号和目标回波的导航电文相同 (Zeng, 2013); (2) $\Delta f \rightarrow 0$, 因为相比于卫星速度, 目标速度在快时间域内引起的载波多普勒频率变化几乎忽略不计 (Pastina 等, 2018); (3) $\Delta\varphi$ 消除了大

气延迟和接收机钟差所产生的误差相位, 仅剩由双基地距离产生的传播延迟相位 (He 等, 2020), 因为接收机和目标上方的大气延迟误差几乎相同 (Ma 等, 2018) 以及接收机双通道共用时钟使得钟差相同。综上, 积分后, 式 (10) 表示为

$$rc(\tau, u) = CF\left(\tau - \frac{R_{bi}(u)}{c}\right) \times \exp\left(-j2\pi \frac{R_{bi}(u)}{\lambda}\right) \quad (11)$$

式中, CF 表示互相关函数包络; c 为光速; λ 为载波波长。

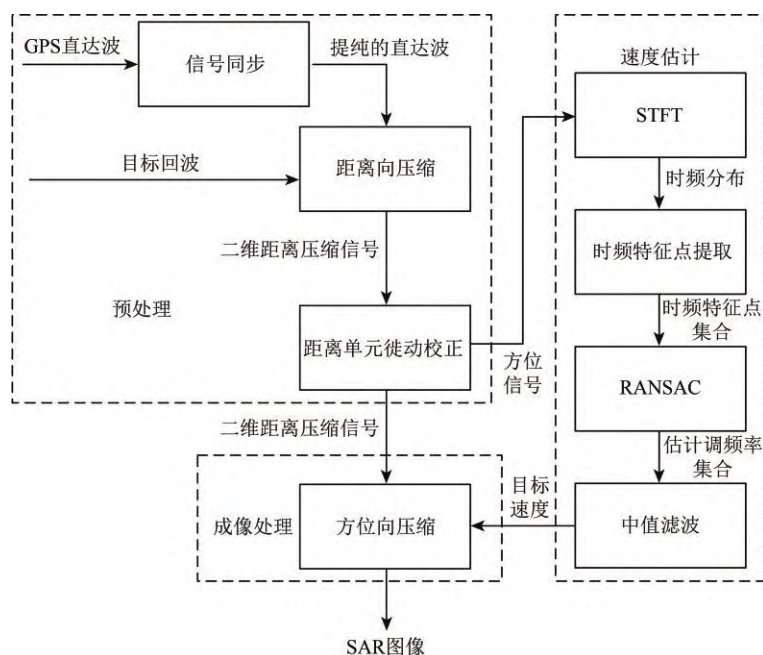


图4 提出的动目标成像方法流程图

Fig. 4 Flowchart of the proposed moving target image formation algorithm

从式 (11) 可以看出, 在方位时间域上双基地距离历程会造成互相关函数包络平移即距离单元徙动以及复载波相位变化即多普勒频率徙动。多普勒频率徙动与目标的运动速度有关, 将在 3.2 节用于速度估计。执行距离单元徙动校正需要已知目标的运动速度。但是, 对于非合作的运动目标其速度信息是未知的。Keystone 变换可以在目标速度未知的情况下消除距离单元徙动。将 2.1 节推导的近似双基地距离历程式 (5) 或 (6) 代入式 (11), 结合王娟和赵永波 (2011) 给出的 Keystone 变换快速实现算法即可完成距离单元徙动校正。因此, 这里不再赘述具体的实施步骤。图 5 展示了距离单元徙动校正前和校正后的二维距离压缩信号。从中可以看到, 图 5 (a) 中的互相关函数包络发生了明显的包络偏移, 这将不利于之后的方位向信

号处理; 而经过 Keystone 变换校正后, 图 5 (b) 中的互相关函数包络已经对齐在相同的距离单元。以目标在合成孔径中心位置作为参考位置, 距离单元徙动校正后, 式 (11) 可重写为

$$rc(\tau, u) = CF\left(\tau - \frac{R_c}{c}\right) \times \exp\left(-j2\pi \frac{R_{bi}(u)}{\lambda}\right) \quad (12)$$

式中, $R_c = R_s(1 + \cos \alpha \cos az)$ 表示目标在合成孔径中心位置时的双基地距离。由此, 目标到接收机垂直距离 R_s 可表示为

$$R_s = \frac{c \times \tau_{R_c}}{1 + \cos \alpha \cos az} \quad (13)$$

垂直距离 R_s 将会用于接下来的速度估计和方位向匹配滤波器生成。

3.2 速度估计

目标运动在方位向上给回波信号带来相位调

制。在设计方位向匹配滤波器前,需要已知目标的运动速度 (Kulpa 等, 2013)。本文假设目标以

恒定的速度移动,例如以巡航速度航行的船只。因此,本节处理目标速度估计问题。

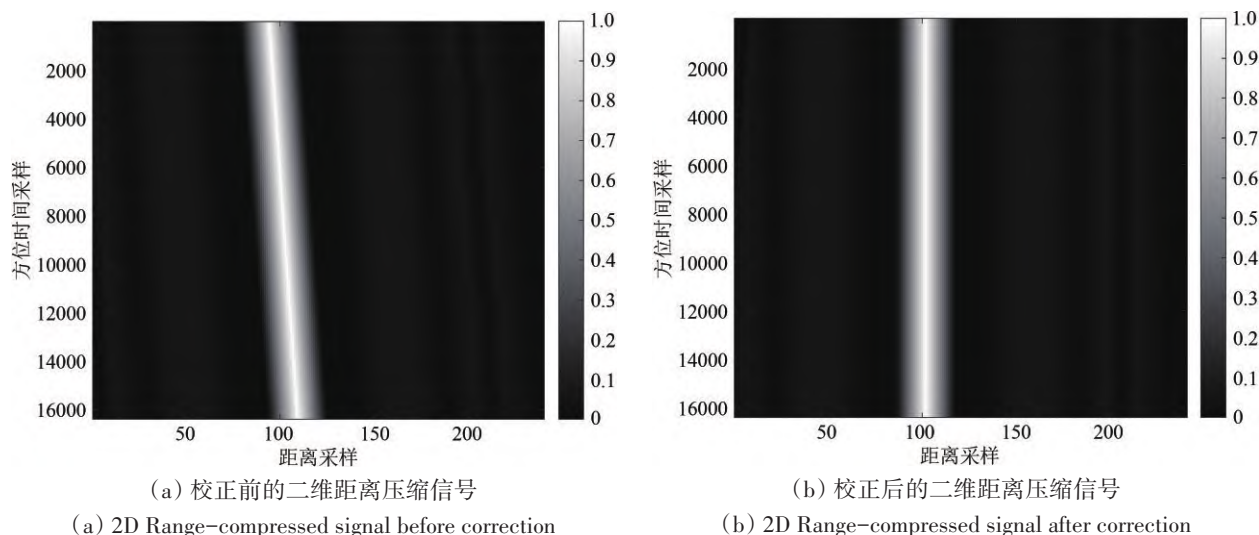


图5 Keystone变换校正前后的二维距离压缩信号

Fig. 5 2D Range-compressed signal before and after the Keystone transform correction

将式 (5) 或 (6) 代入式 (12) 并取二阶泰勒级数展开, 目标回波的方位向相位 Φ 表示为

$$\Phi(u) = \frac{-2\pi}{\lambda} \left((L - v \times u)^2 / 2R_s \pm (L - v \times u) \cos \alpha \sin az + R_s (1 + \cos \alpha \cos az) \right) \quad (14)$$

目标回波的多普勒频率 f_d 可由式 (14) 取一阶导数得到:

$$f_d(u) = \frac{1}{2\pi} \times \frac{d\Phi(u)}{du} = \gamma \times u + f_0, \quad \gamma = -\frac{v^2}{\lambda R_s}, f_0 = -\frac{v}{\lambda} \left(\frac{L}{R_s} \pm \cos \alpha \sin az \right) \quad (15)$$

式中, γ 表示调频率; f_0 表示多普勒质心。式 (15) 表明目标回波在方位向上表现为线性调频信号并且目标速度的平方正比于调频率绝对值。因此, 可以把速度估计问题转换为对调频率的估计。时频分析技术是一种有效的估计线性调频信号参数的方法, 例如, Radon-Wigner 变换 (Wood 和 Barry, 1994)、chirp-Fourier 变换 (Xia, 2000)、分数阶 Fourier 变换 (Ozaktas 等, 1996) 等。这些时频分析方法的计算复杂度阶数为 $O(N^2 \log N)$ 。在 GNSS-SAR 中, 由于目标回波能量较低, 长孔径时间非常有必要 (Antoniu 等, 2015)。一方面可以提升方位向分辨率, 另一方面可以增强目标回波的信噪比。然而, 长孔径时间意味着大时

间带宽积, 导致上述时频分析方法非常耗时 (保铮等, 2005)。因此, 这里提出一种组合 STFT 和 RANSAC 的调频率估计方法, 其计算复杂度阶数为 $O(N \log N + M)$, 原因在于 STFT 采用快速傅里叶变换实现, 其计算复杂度阶数为 $O(N \log N)$, 而 RANSAC 需要若干次的迭代运算, 其计算复杂度为 $O(M)$ 。

利用 STFT 将式 (12) 沿方位时间投影到二维 (时间, 频率) 域。目标回波的 STFT 表示为

$$\text{STFT}(u, \omega) = \int \left(rc(\tau, \eta) \times \text{win}_h(\eta - u) \right) \times \exp(-j2\pi\omega\eta) d\eta \quad (16)$$

式中, $\omega \in [-\text{PRF}/2, \text{PRF}/2]$ 表示多普勒频率; PRF 表示脉冲重复频率 (即 2.2 节 PRI 的倒数); $\eta \in [-h/2, h/2]$; win_h 表示长度为 h 的短时窗函数。假设有 5 个散射点依次分布在船只长度方向上, 图 6 (a) 给出了散射点回波经 STFT 投影到时频域的仿真结果。从中可以看出, 由多个散射点回波组成的线性调频信号在时频域上表现为一条有斜率的宽直线, 其斜率即为调频率, 可以通过拟合直线的方法来估计斜率。因此, 首先需要将直线上的时频点提取出来。这里通过设定阈值 Γ 做二值化, 用阈值 Γ 将时频点分为大于 Γ 的集合和小于 Γ 的集合, 而图 6 (b) 则为二值化后的结果。

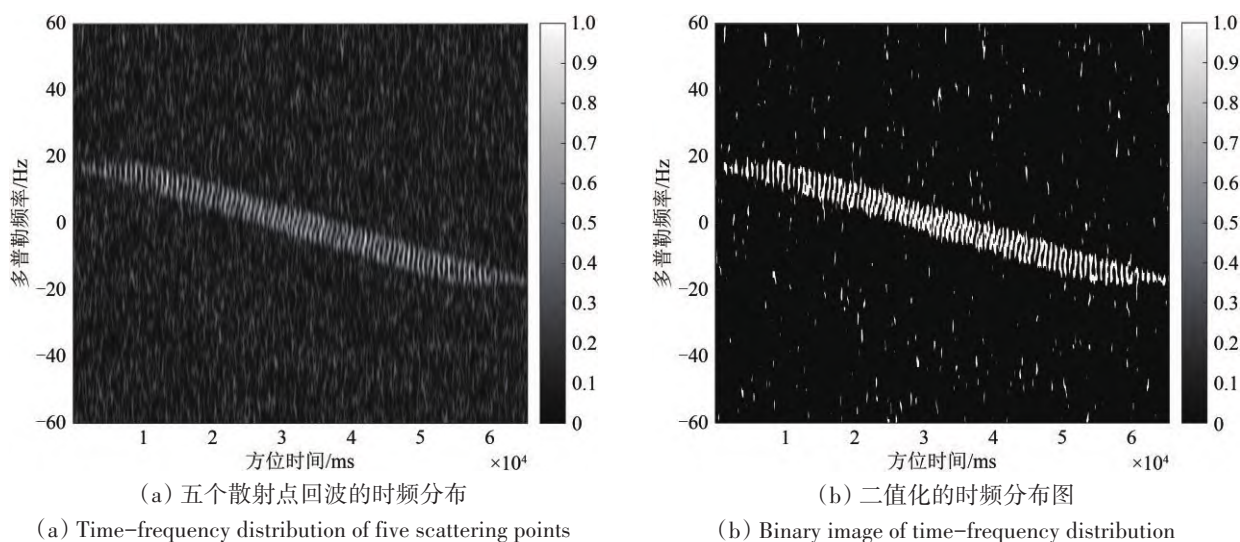


图6 5个散射点回波的时频分布和对应的二值图像

Fig. 6 Time-frequency distribution of five scattering points and the corresponding binary image

由于散射点回波的信噪比有限,除了直线上的时频点(称为内点),图6(b)中还包含大量的噪声点(称为离群点)。大量的离群点使得传统的最小二乘法LSM(Least Squares Method)不再有效,这是由于LSM将所有的时频点参与拟合问题。这里采用计算机视觉常用的RANSAC算法实现在大量离群点中拟合直线。对传统的RANSAC算法做了修改,具体步骤如下:

步骤1: 将大于阈值 Γ 的时频点集合命名为 S 并定义 N_s 为 S 内元素总数;令 K 为最大迭代次数。

步骤2: 从 S 中随机选择两个时频点,利用式(15)构建拟合直线。由于船只速度有限,设置斜率范围来约束随机选点过程从而增强算法的鲁棒性。

步骤3: 对于任意的时频点 (u_i, ω_i) ,计算该点到步骤2拟合直线距离 d_i ,表示为

$$d_i = |\omega_0^k + \gamma^k \times u_i^k - \omega_i^k| \quad (17)$$

式中, $|\cdot|$ 表示取绝对值;上标 k 表示第 k 次迭代。定义 th_{tol} 为时频点到拟合直线的最大距离(简称为容许阈值),如果 $d_i \leq th_{tol}$,则时频点 (u_i, ω_i) 被认为是内点。

步骤4: 统计内点的数目并记为 N_k 。定义 th_{scale} 为 N_k/N_s 的最小值(简称最小比例),如果 $N_k/N_s \geq th_{scale}$,则把该拟合直线的斜率放入候选解集合 C 中。

步骤5: 让 $k = k + 1$ 。如果 $k \leq K$,则返回步骤2。否则进入步骤6。

步骤6: 使用中值滤波器从候选解集合 C 中确定估计的调频率,这是由于图6(b)中的直线有一定的宽度,会有若干组符合拟合条件的调频率。中值滤波解可以提高估计的准确性和鲁棒性。最后,利用式(15)的调频率公式和式(13)的垂直距离公式计算目标速度。

3.3 方位向压缩

方位向压缩即为在方位频率域中利用匹配滤波器来消除目标回波的调制相位项从而实现脉冲压缩。因此,本节需要推导方位向匹配滤波器。

将式(5)或(6)代入式(12)并在方位时间域做傅里叶变换:

$$rc(\tau, f) = \int rc(\tau, u) \times \exp(-j2\pi fu) du \quad (18)$$

式中, $f \in [-PRF/2, (PRF/2)^{-1}]$ 表示方位频率。然而,很难直接求取式(18)的方位频谱解析表达式,可利用驻定相位原理(Cumming和Wong, 2005)来近似求解得到:

$$rc(\tau, f) = \sigma(\tau) \times \exp(\psi(\tau, f)) \quad (19)$$

式中, σ 表示频谱的幅值; ψ 是复指数相位,表示为:

$$\psi(\tau, f) = -j2\pi \left(\sqrt{\left(\frac{v}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{v}{\lambda} \cos \alpha \sin az \pm f\right)^2} \times \left(\frac{R_s(\tau)}{v} + \frac{L}{v} \times f + \frac{R_s(\tau) \cos \alpha \cos az}{\lambda} \right) \right) \quad (20)$$

式中,第一项为调制相位项,后两项分别为线性

项和常数项。因此，方位向匹配滤波器 H_0 即为调制相位项的共轭形式：

$$H_0(\tau, f) = \exp\left(j2\pi \frac{R_s(\tau)}{v} \times \sqrt{\left(\frac{v}{\lambda}\right)^2 - \left(\frac{v}{\lambda} \cos \alpha \sin az \pm f\right)^2}\right) \quad (21)$$

式(21)根号内的“ \pm ”号表明当目标的运动方向不同时，对应的方位向匹配滤波器也不相同；换句话说，利用两种方位向匹配滤波器以及卫星与接收机之间的方位关系可以判断目标的移动方向，下节实验将进行讨论。由式(21)的组成可知，生成方位向匹配滤波器需要卫星高度角、卫星方位角、监视通道天线视线方位角、目标到接收机垂直距离以及目标速度，其中前三个参数可直接获取，后两个参数分别在3.1节和3.2节得到；最后，将式(19)乘以式(21)，再利用逆傅里叶变换将乘积结果转换回方位时间域即可完成方位向压缩。最后，成像结果 I 表示为：

$$I(x, y) = \int rc(\tau, f) \times H_0(\tau, f) \times \exp(j2\pi fu) df = CF(x - x_{Tg}) \times \sin c(y - y_{Tg}) \quad (22)$$

式中， $x = (c \times \tau) / (1 + \cos \alpha \cos az)$ 表示距离单元； $y = v \times u$ 表示横向距离单元； x_{Tg} 和 y_{Tg} 表示目标在（距离，横向距离）域的坐标。

4 实验验证

4.1 实验场景

2019年5月16日，在香港数码港海滨公园进行了海面船只探测实验。图7(a)为双通道GPS接收机前端。关于接收机前端的详细信息可参考Yang等(2019)。图7(b)中的圆天线和方天线分别连接接收机前端的参考通道和监视通道，其中，圆天线为商用现成的右旋圆极化天线用于接收GPS直达波，而方天线为定制的左旋圆极化天线，用于接收海面船只反射的目标回波。图8为现场实验的俯视图示意，以正东方向作为横轴和正北方向作为竖轴建立坐标系，接收机Rx位于坐标系原点。从图8标记的方位角关系可知，式(4)定义的本地卫星方位角 az 在该现场实验场景下为：

$$az = |az_{sat} - az_{ant}| \quad (23)$$

式中， az_{sat} 代表GPS卫星方位角（以正北顺时针方向开始）； az_{ant} 等于方天线视线方位角减去 180° 。

表2列出了现场实验和信号处理的相关参数；选取了两艘货船作为感兴趣的目标；图9为两艘船只的现场照片；现场实验以船舶自动识别系统AIS(Automatic Identification System)提供的船只信息（包括船名称、长度、航速、轨迹）作为真值参考；表3给出了两艘船只的AIS信息以及作为照射源的GPS卫星信息。

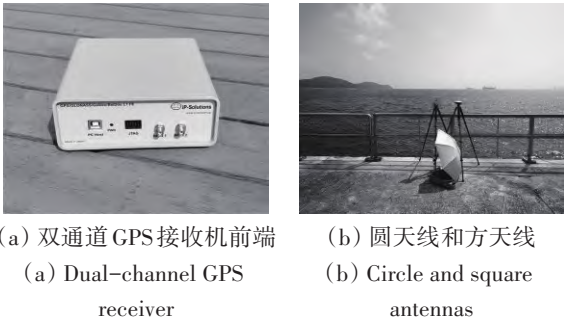


图7 现场实验硬件设备
Fig. 7 Hardware devices at the field test

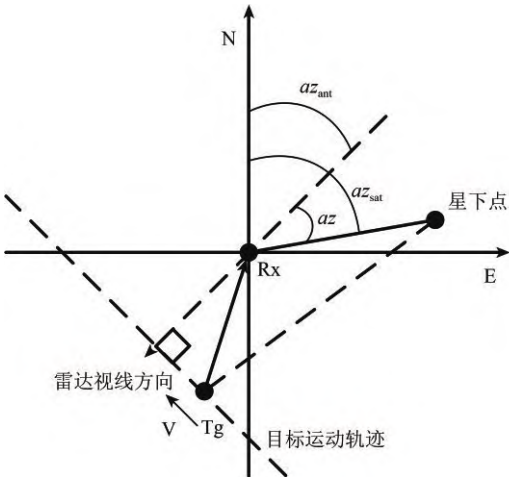


图8 现场实验俯视图示意
Fig. 8 Top view of the field test

表2 现场实验和信号处理参数

Table 2 Field test and signal processing parameters		
参数	单位	数值[范围]
载波频率	MHz	1575.42
测距码码率	MHz	1.023
脉冲重复频率	Hz	1000
接收机采样率	MHz	16.368
方天线视线方位角	°	239.7
观测时长	s	120
短时窗函数长度	ms	2048
时频点二值化阈值(Γ)	—	0.1
RANSAC迭代次数	—	200
容许阈值(th_{tol})	—	1.46
最小比例(th_{scale})	%	7.5

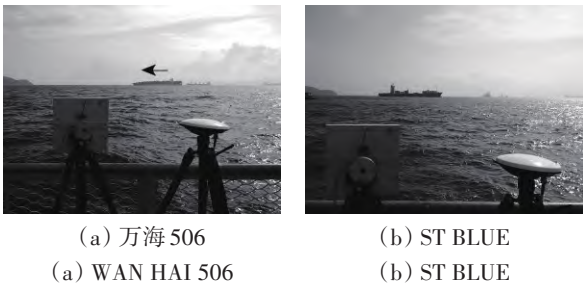


图9 海面船只照片
Fig. 9 Photographs of two ships on the sea surface

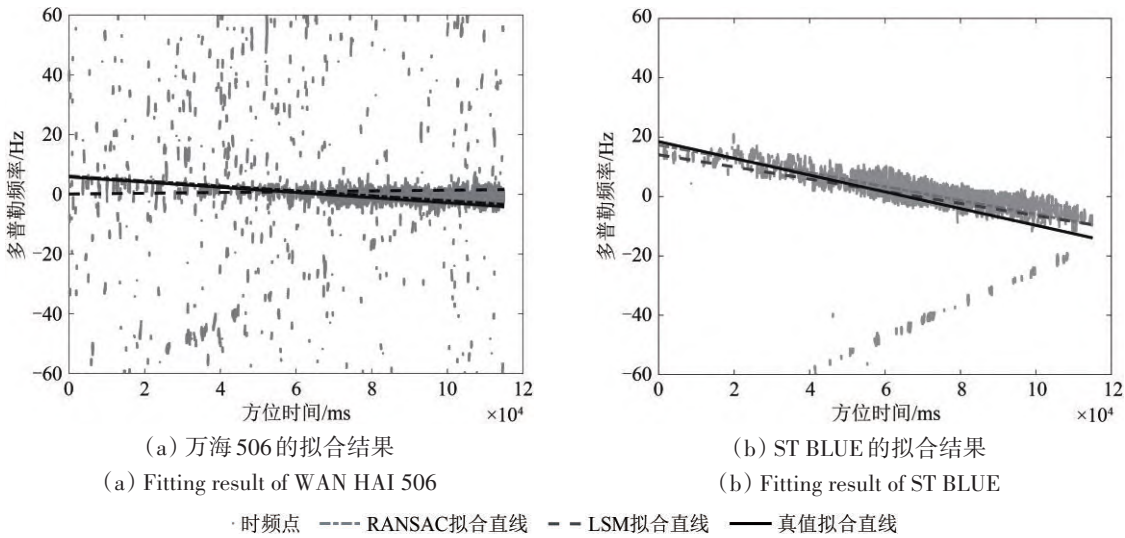
4.2 实验结果与分析

图10为两艘船只的时频分布图，其中分别绘制了RANSAC、LSM以及真值拟合直线。从图10 (a)可以看出，在大量的离群点下，LSM已经失效；其拟合线（虚线）的斜率为正数与式 (15) 的调频率公式相悖；然而，RANSAC方法的拟合线（点虚线）则非常贴近真值拟合线（实线），这意味着估计的目标速度将非常接近于真实速度。在图10 (b)中，由于该目标表面的散射率起伏较大，特别是在零多普勒附近时频点较多而远离零多普勒的两端时频点较少，造成RANSAC拟合线与真值拟合线间存在一个小的夹角；而对于LSM

方法，虽然该组实验的离群点很少，但是由于离群点恰好集中在图10 (b) 的下半部分，导致LSM的拟合结果偏离了真值。表4列出了RANSAC方法估计的两艘船只的调频率及目标速度，从中可以看到，两组实验的最大速度估计误差不超过0.6 m/s。考虑到目标表面的散射状态起伏，估计值与真值之间的误差是可以接受的。

表3 船舶的AIS信息和选取的GPS卫星

Table 3 AIS information for two cargo ships and the selected GPS satellites			
	参数	单位	数值
万海 506	长度	m	269
	航速	m/s	4.94
	离岸垂直距离	m	1660
GPS	PRN	—	3
	高度角	°	40
	方位角	°	68
ST BLUE	长度	m	199
	航速	m/s	6.54
	离岸垂直距离	m	840
GPS	PRN	—	22
	高度角	°	32
	方位角	°	68



(a) 万海 506 的拟合结果
(a) Fitting result of WAN HAI 506
(b) ST BLUE 的拟合结果
(b) Fitting result of ST BLUE
· 时频点 - - - RANSAC拟合直线 - - - LSM拟合直线 — 真值拟合直线

图10 两艘船只的拟合结果
Fig. 10 Fitting results for two ships

图11 (a) 和 11 (b) 是用表4的估计速度生成的SAR图像。图像中的亮斑即为两艘船只表面散射的回波能量。由于GPS L1 信号的距离向分辨率很差，图像中的亮斑在距离轴方向上表现为宽主瓣。两个亮斑的最大峰值对应在距离轴上分别位于1609.0 m和766.8 m，非常接近于表3列出的

船只离岸垂直距离并且误差远小于GPS L1 信号的最佳距离向分辨率（约150 m），表明了本文方法估计垂直距离的有效性和准确性。长孔径时间使得GNSS-SAR在方位向上有很高的分辨率。因此，通过测量横向距离轴方向上的船长度来进一步验证本文方法。图11 (a) 和 11 (b) 已经标注了测量结

果分别为 254 m 和 185 m。对比表 3 列出的真实船长度可知，估计的船长度误差不超过真实船长的 10%。这意味着可以利用估计的船长度来初步识别雷达观测区域内过往船只类型。此外，作为对比，

图 11 (c) 和 11 (d) 给出了使用估计错误的速度（如 3 m/s）生成的 SAR 图。可以看出，图像上的船目标已经发生了严重的散焦以及位置偏移。

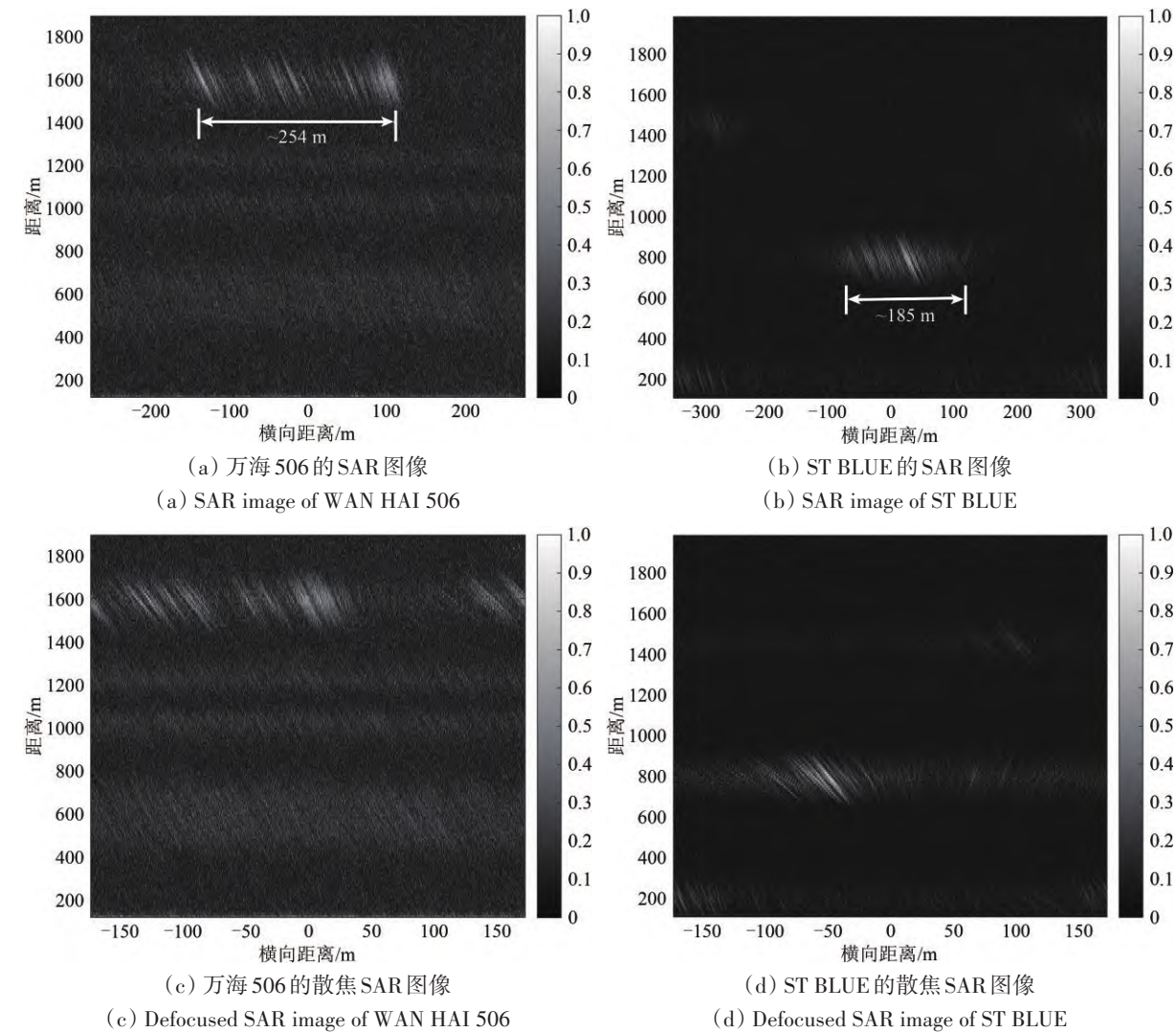


图 11 两艘船的 SAR 图像以及散焦的 SAR 图像
Fig. 11 SAR images and defocused SAR images of two ships

表 4 估计结果与 AIS 真值			
Table 4 Estimated results and AIS ground truth			
	参数	单位	数值
万海 506	估计调频率	Hz/s	-0.082
	估计速度	m/s	4.81
	真值调频率	Hz/s	-0.087
	真值速度	m/s	4.94
ST BLUE	估计调频率	Hz/s	-0.236
	估计速度	m/s	5.98
	真值调频率	Hz/s	-0.259
	真值速度	m/s	6.54

本文 3.3 节的方位向匹配滤波器推导表明：利用两种方位向匹配滤波器以及卫星与接收机之间的方位关系可以判断目标的移动方向。这里以万海 506 为例来说明。首先，标记式 (21) 根号中第二个圆括号内取 “+” 号时为 “AMF+”，取 “-” 号时为 “AMF-”；分别用两个匹配滤波器生成对应的 SAR 图像，其中，“AMF-” 对应图 11 (a) 而 “AMF+” 对应图 12。然而，图 12 中的亮斑 “断裂” 成了两块，所以，“AMF-” 是正确的方位向匹配滤波器，其由式 (6) 得到。根据 2.1 节可知，在目标穿过雷达视线方向之前，式 (6) 对应目标

和星下点位于雷达视线方向的不同侧。紧接着, 从表2和表3给出的方天线视线方位角和PRN3卫星方位角可知, 星下点在方天线视线方向的下半侧, 即图8星下点位置所示。综上可知, 目标的移动方向为自西北向东南移动; 从接收机视角来看, 目标正自右向左移动, 符合图9(a)箭头标记的运动方向。需要说明的是: 如果式(21)根号中 az 等于 0° , 即准单站几何配置, 此时, 两个方位向匹配滤波器表示式相同, 则无法判断目标移动方向。

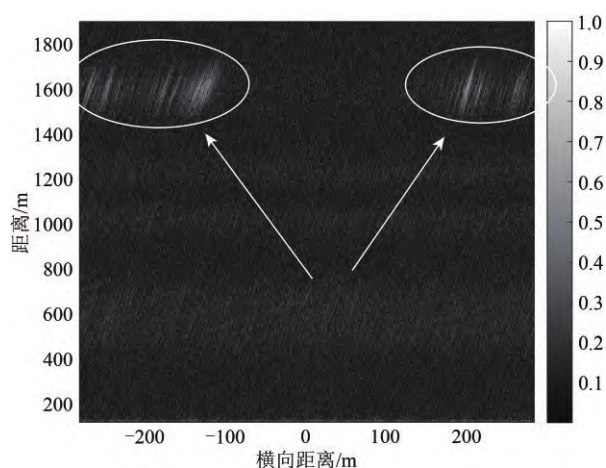


图12 使用错误的方位向匹配滤波输出的SAR图像

Fig. 12 SAR image with wrong azimuth matched filter

5 结 论

本文以GPS信号作为机会照射源, 提出了一种动目标成像方法。该方法利用Keystone变换校正未知的距离单元徙动; 组合STFT和RANSAC算法估计未知的目标运动速度以及推导了方位向匹配滤波器实现移动目标成像。最后, 采集了两组现场实验数据来验证本文提出的方法。实验结果显示, 在大量离群点下, 组合STFT和RANSAC算法依然能够估计出船只速度, 表明了该估计算法的有效性和鲁棒性; SAR图像上的目标特征能够反映船只到接收机垂直距离以及船只长度, 表明了该成像算法的有效性。此外, 通过对比两种方位向匹配滤波器的成像图, 还可以判断船只移动方向。本文方法要求目标运动轨迹垂直于雷达天线视线方向, 该要求在河道场景下易于实现。考虑到GNSS-SAR使用的L波段可在雨雪、大风、雾霾等恶劣环境中工作并且接收机成本较低, 因此, 本文提出的成像方法可发展应用于河道监测, 估计

过往船只的速度、长度、离岸垂直距离以及移动方向。

本文没有考虑GPS卫星星座的多卫星优势, 即多基地雷达系统。融合多颗卫星信号生成的SAR图像不但可以提高距离向分辨率还可以提高SAR图像质量有助于目标特征的分类与识别。因此, 下一步工作将考虑多基地图像融合问题。

参考文献(References)

- Antoniou M and Cherniakov M. 2013. GNSS-based bistatic SAR: a signal processing view. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013(1): 98-113 [DOI: 10.1186/1687-6180-2013-98]
- Antoniou M, Cherniakov M and Ma H. 2015. Space-surface bistatic synthetic aperture radar with navigation satellite transmissions: a review. *Science China Information Sciences*, 58(6): 1-20 [DOI: 10.1007/s11432-015-5334-6]
- Antoniou M, Saini R and Cherniakov M. 2007. Results of a space-surface bistatic SAR image formation algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3359-3371 [DOI: 10.1109/TGRS.2007.902124]
- Auger F, Chassande-Mottin É and Flandrin P. 2012. On phase-magnitude relationships in the short-time Fourier transform. *IEEE Signal Processing Letters*, 19(5): 267-270 [DOI: 10.1109/LSP.2012.2190279]
- Bao Z, Xing M D and Wang T. 2005. *Radar Imaging Techniques*. Beijing: Electronics Industry Press (保铮, 刑孟道, 王彤. 2005. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社)
- Beltramonte T, Braca P, Bisceglie M D, Simone A D, Galdi C, Iodice A, Millefiori L M, Riccio D and Willett P. 2020. Simulation-based feasibility analysis of ship detection using GNSS-R delay-Doppler maps. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13: 1385 - 1399 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2970221]
- Chen R Z, Wang L, Li D R, Chen L and Fu W J. 2019. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 48(12): 1507-1522 (陈锐志, 王磊, 李德仁, 陈亮, 付文举. 2019. 导航与遥感技术融合综述. 测绘学报, 48(12): 1507-1522) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019. 20190446]
- Cumming I G and Wong F H. 2005. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*. Norwood, MA: Artech House Press
- Fischler M A and Bolles R C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6): 381-395 [DOI: 10.1145/358669.358692]
- He Z Y, Chen W and Yang Y. 2020. A hybrid integration method for moving target detection with GNSS-based passive radar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and*

- Remote Sensing, 14: 1184-1193 [DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3037200]
- He Z Y, Chen W and Yang Y. 2020. GPS-based space-surface passive bistatic radar technique for maritime moving target detection. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 49(12): 1523-1534 (何振宇, 陈武, 杨扬. 2020. GPS 天一地无源双基地雷达探测海面移动目标. 测绘学报, 49(12): 1523-1534) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190487]
- Kulpa J S, Malanowski M, Gromek D, Samczyński P, Kulpa K, and Gromek A. 2013. Experimental results of high-resolution ISAR imaging of ground-moving vehicles with a stationary FMCW radar. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 59(3): 293-299 [DOI: 10.2478/eletel-2013-0035]
- Liu F, Antoniou M, Zeng Z and Cherniakov M. 2013. Point spread function analysis for BSAR with GNSS transmitters and long dwell times: theory and experimental confirmation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 781-785 [DOI: 10.1109/LGRS.2012.2223655]
- Liu F F, Fan X Z, Zhang L Z, Zhang T and Liu Q H. 2019. GNSS-based SAR for urban area imaging: topology optimization and experimental confirmation. *International Journal of Remote Sensing*, 40(12): 4668-4682 [DOI: 10.1080/01431161.2019.1569790]
- Liu L D, Yuan W M, Wu S J and Sun X W. 2004. Bistatic radar system based on GPS illumination. *Chinese Journal of Radio Science*, 19(1): 109-113 (刘立东, 袁伟明, 吴顺君, 孙晓闻. 2004. 基于 GPS 照射源的天地双基地雷达探测系统. 电波科学学报, 19(1): 109-113) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0388.2004.01.024]
- Ma H, Antoniou M and Cherniakov M. 2015. Passive GNSS-based SAR resolution improvement using joint Galileo E5 signals. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(8): 1640-1644 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2417594]
- Ma H, Antoniou M, Pastina D, Santi F, Pieralice F, Bucciarelli M and Cherniakov M. 2018. Maritime moving target indication using passive GNSS-based bistatic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(1): 115-130 [DOI: 10.1109/TAES.2017.2739900]
- Ozaktas H M, Arikan O, Kutay M A and Bozdagt G. 1996. Digital computation of the fractional Fourier transform. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 44(9): 2141-2150 [DOI: 10.1109/78.536672]
- Pastina D, Santi F, Pieralice F, Bucciarelli M, Ma H, Tzagkas D, Antoniou M and Cherniakov M. 2018. Maritime moving target long time integration for GNSS-based passive bistatic radar. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 54(6): 3060-3083 [DOI: 10.1109/TAES.2018.2840298]
- Peng X F, Wan W, Li F and Chen X W. 2017. The suitability analysis of soil moisture retrieval using GNSS-R technology. *Journal of Remote Sensing*, 21(3): 341-350 (彭学峰, 万玮, 李飞, 陈秀万. 2017. GNSS-R 土壤水分遥感的适宜性分析. 遥感学报, 21(3): 341-350) [DOI: 10.11834/jrs.20176198]
- Perry R P, Dipietro R C and Fante R L. 1999. SAR imaging of moving targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 35(1): 188-200 [DOI: 10.1109/7.745691]
- Wan W, Chen X W, Peng X F, Bai W H, Xia J M, Liang H, Zhang X M, Xiong P, Yang T, Cao Y C, Yin C, Zhao L M and Hong Y. 2016. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 858-874 (万玮, 陈秀万, 彭学峰, 白伟华, 夏俊明, 梁宏, 张学民, 熊攀, 杨婷, 曹云昌, 尹聪, 赵利民, 洪阳. 2016. GNSS 遥感研究与应用进展和展望. 遥感学报, 20(5): 858-874) [DOI: 10.11834/jrs.20166228]
- Wang B, Zhu Y L, Gao C Q and Wu S Y. 2019. Discussion on imaging technology of GNSS-R bistatic SAR moving target. *Journal of Navigation and Positioning*, 7(1): 59-64 (王博, 朱云龙, 高超群, 吴世玉. 2019. GNSS-R 双基 SAR 运动目标成像技术探讨. 导航定位学报, 7(1): 59-64) [DOI: 10.16547/j.cnki.10-1096.20190111]
- Wang J and Zhao Y B. 2011. Research on implementation of Keystone transform. *Fire Control Radar Technology*, 40(1): 45-51 (王娟, 赵永波. 2011. Keystone 变换实现方法研究. 火控雷达技术, 40(1): 45-51) [DOI: 10.3969/j.issn.1008-8652.2011.01.010]
- Wang X L, He X F, Chen S, Zhang Q and Song M F. 2021. Preliminary study on theory and method of ground-based GNSS-IR wind speed. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 50(10): 1298-1307 (王笑蕾, 何秀凤, 陈殊, 张勤, 宋敏峰. 2021. 地基 GNSS-IR 风速反演原理及方法初探. 测绘学报, 50(10): 1298-1307) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2021.20200586]
- Wang Z M, Liu Z K, An J C and Lin G B. 2018. Snow depth detection and error analysis derived from SNR of GPS and BDS. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 47(1): 8-16 (王泽民, 刘智康, 安家春, 林国标. 2018. 基于 GPS 和北斗信噪比观测值的雪深反演及其误差分析. 测绘学报, 47(1): 8-16) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20160644]
- Wood J C and Barry D T. 1994. Radon transformation of time-frequency distributions for analysis of multicomponent signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 42(11): 3166-3177 [DOI: 10.1109/78.330375]
- Wu X, Xia J, Jin S, Bai W and Dong Z. 2019. Is soil salinity detectable by GNSS-R/IR?//Proceedings of 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Yokohama: IEEE: 6227-6230 [DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8898902]
- Xia J M, Wu X R, Bai W H, Sun Y Q, Luo L M, Du Q F, Wang X Y, Liu C L, Meng X G, Zhao D Y and Wang Y Q. 2019. Research on the effects of delay and Doppler intervals on GNSS-R DDM simulation. *Journal of Remote Sensing*, 23(3): 456 - 463 (夏俊明, 吴学睿, 白伟华, 孙越强, 骆黎明, 杜起飞, 王先毅, 柳聪亮, 孟祥广, 赵丹阳, 王迎强. 2019. GNSS-R DDM 波形仿真的时延与多普勒间隔研究. 遥感学报, 23(3): 456-463) [DOI: 10.11834/jrs.20198018]
- Xia X G. 2000. Discrete chirp-Fourier transform and its application to chirp rate estimation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 48(11): 3122-3133 [DOI: 10.1109/78.875469]
- Xie J P, Bertino L, Cardellach E, Semmling M, Wickert J. 2018. An OSSE evaluation of the GNSS-R altimetry data for the GEROS-ISS mission as a complement to the existing observational networks. *Remote Sensing of Environment*, 209: 152-165 [DOI: 10.

- 1016/j.rse.2018.02.053]
- Yang Y, Zheng Y, Yu W K, Chen W and Weng D J. 2019. Deformation monitoring using GNSS-R technology. *Advances in Space Research*, 63(10): 3303-3314 [DOI: 10.1016/j.asr.2019.01.033]
- Yang Z Q, Zhang Y S and Luo Y J. 1998. *Bastatic(Multistatic) Radar Systems*. Beijing: National Defense Industry Press (杨振起, 张永顺, 骆永军. 1998. 双(多)基地雷达系统. 北京: 国防工业出版社)
- Yu K G, Wang S Y, Li Y W, Chang X and Li J C. 2019. Snow depth estimation with GNSS-R dual receiver observation. *Remote Sensing*, 11(17): 2056-2072 [DOI: 10.3390/rs11172056]
- Zeng H C, Wang P B, Chen J, Liu W, Ge L L and Yang W. 2016. A novel general imaging formation algorithm for GNSS-based bistatic SAR. *Sensors*, 16(3): 294 [DOI: 10.3390/s16030294]
- Zeng Z F. 2013. *Passive Bistatic SAR with GNSS Transmitter and a Stationary Receiver*. Birmingham: University of Birmingham: 90-91

Bistatic SAR moving target imaging algorithm study based on GPS-R signal

HE Zhenyu^{1,2,3}, YANG Yang^{1,2}, CHEN Wu^{1,2}, WENG Duojie^{1,2}

1. Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China;

2. Shenzhen Research Institute, Hong Kong Polytechnic University, Shenzhen 518057, China;

3. School of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: Global navigation satellite system reflectometry (GNSS-R) is a typical fusion application of the remote sensing and navigation technology and has become a potential research direction. The use of GNSS-R for constructing a passive bistatic synthetic aperture radar (called as GNSS-SAR) has drawn great attention from the research community in recent years. Current investigations on GNSS-SAR focus on the static objects on land. However, few contributions to the moving target imaging can be found in this novel field. Imaging moving target is a long-standing subject for modern SAR systems. However, traditional GNSS-SAR image formation algorithms cannot be directly applied to the moving target due to the unknown motion. Accordingly, the moving target will be smeared and shifted in the static SAR image. To extend the application of GNSS-SAR, this work selects the global positioning system satellite as the illuminator of opportunity and proposes a frequency domain-based moving target image formation algorithm that has a higher processing efficiency than the traditional time domain-based GNSS-SAR algorithm.

To image a moving target, frequency domain-based algorithm should solve three main problems: (1) The unknown range cell migration induced by the moving target should be corrected. (2) The velocity of the moving target should be estimated. (3) The azimuth compression derivation should be performed due to the bistatic acquisition geometry. To deal with the main problems, this work selects maritime moving ships as the targets of interest and constructs a bistatic acquisition geometry where the receiver and the satellite are stationary during the observation time. Meanwhile, the trajectory of the moving target perpendicular to the line of sight of the receiver antenna is used as a synthetic aperture. An approximate bistatic range history is first deduced to describe the azimuthal phase variation of the target signal based on the bistatic acquisition geometry. A keystone transform is then employed to address the unknown range cell migration, and a method based on short time Fourier transform and random sample consensus is proposed to estimate the velocity. Finally, a derivation of azimuth compression is conducted to accomplish the moving target imaging.

Field experiments were carried out to validate the proposed moving target image formation algorithm. Experimental results show that: (1) The proposed velocity estimation method can obtain the velocity in a low signal-to-noise ratio scene where the least square method cannot work. The fluctuations of the target complex reflectivity will affect the velocity estimation results due to the long observation time, causing errors. However, the errors between the estimated velocities from two groups of the experimental data and the ground truth do not exceed 0.6 m/s. (2) Two targets shown in the SAR image have good accordance with the ground truth in terms of the target-to-receiver vertical distances along the range axis and the ships' length along the cross-range axis. (3) The designed azimuth matched filter can help in judging the target's moving direction. Nonetheless, this capability will disappear with the quasi-monostatic configuration. Therefore, the feasibility of the proposed moving image formation algorithm has been confirmed.

The proposed algorithm can be used for monitoring the moving ship target and obtain the target's velocity, length, vertical distance, and moving direction in the future.

Key words: GNSS-R, GNSS-SAR, moving target imaging, Keystone transform, short time Fourier transform, random sample consensus

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0502101); Shenzhen Science and Technology Innovation Commission (No. JCYJ20170818104822282); Hong Kong Research Grants Council (RGC) Competitive Earmarked Research Grant (No. PolyU 152151/17E)