第 58 卷 第 22 期/2021 年 11 月/激光与光电子学进展 研究论文

激光与光电子学进展 先进成像

基于最佳抽样序列长度的高分辨率 SAR 成像算法的研究

王振力[1*]，王群[1]，马如坡[1]，陈先意[2]

[1]江苏警官学院计算机信息与网络安全系，江苏 南京 210031；

[2]南京信息工程大学计算机学院、软件学院、网络空间安全学院，江苏 南京 210044

摘要 虽然距离多普勒算法在合成孔径雷达(SAR)成像中有着广泛的应用，但是其产生的图像质量较差，不能满足实际应用的需求。为解决制约传统方法成像质量的关键技术难题，提出了一种基于最佳抽样序列长度的高分辨 SAR 成像算法。该算法根据 SAR 距离向和方位向的成像参数，设计了初始抽样序列长度的计算公式。利用获得的初始抽样序列长度以及 SAR 图像质量性能评估标准，结合曲线极值确定了合理区间变化范围内的最佳距离向和方位向抽样序列长度。机载 SAR 点目标成像和星载 SAR 实测数据的实验结果表明了所提算法的有效性。

关键词 图像处理；最佳抽样序列长度；分数阶傅里叶变换；合成孔径雷达；距离多普勒算法；傅里叶变换

中图分类号 P407.2 **文献标志码** A **doi**：10.3788/LOP202158.2210019

Research on High Resolution SAR Imaging Algorithm Based on Optimal Sampling Length

Wang Zhenli[1*], Wang Qun[1], Ma Rupo[1], Chen Xianyi[2]

[1] *Computer Information and Network Security Department, Jiangsu Police Institute, Nanjing, Jiangsu* 210031, *China*;

[2] *School of Computer Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu* 210044, *China*

Abstract Although range Doppler (RD) algorithm is widely used in synthetic aperture radar (SAR) imaging, the poor images produced by this algorithm fail to satisfy the needs of practical applications. In order to solve the key technical problems that restrict the imaging quality of traditional methods, a high resolution SAR imaging algorithm based on optimal sampling length is proposed. The proposed algorithm designs the calculation formula of the initial sampling length according to the imaging parameters of the range direction and azimuth direction of SAR. Combining the obtained initial sampling length and the evaluation criteria of SAR image quality performance with the curve extremum, the optimal sampling lengths of range direction and azimuth direction within a reasonable scope of changes are determined. The experimental results of point target imaging of airborne SAR and the measured data of space-borne SAR show the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words image processing; optimal sampling length; fractional Fourier transform; synthetic aperture radar; range Doppler algorithm; Fourier transform

OCIS codes 100.2000; 280.0280; 280.5600

收稿日期：2020-11-18；**修回日期**：2020-12-21；**录用日期**：2021-01-02

基金项目：国家科技攻关计划(2018YFB1003205)、国家自然科学基金(61502242)、江苏省教育科学“十三五”规划课题(D/2020/01/22)、江苏警官学院高层次引进人才科研项目(JSPI19GKZL405)

通信作者：*dongwen3619@sina.com

1 引 言

合成孔径雷达(SAR)被广泛应用于军事和民用领域[1-3]。虽然距离多普勒(RD)算法[4-6]在许多模式的 SAR 尤其是正侧视 SAR 成像处理中仍然广为使用,但是其较低精度的 SAR 图像质量越来越不能满足当前实际应用的需求[7-8]。分数阶傅里叶变换[9-10](FrFT)是一种广义的傅里叶变换,它是一种统一的时频变换,随着变换阶数从 0 连续增长到 1 而展示出信号从时域逐步变换到频域的所有特征。近年来,将 FrFT 应用于 SAR 成像处理是研究的热点之一[11-21]。文献[11]通过定义旋转中心距离的方式,利用 FrFT 得到了基于参数的聚焦算法,该算法适用于条带 SAR、聚束 SAR 和扫描 SAR 成像。这三种模式的 SAR 数据都可以通过选择合适的参数以及 FrFT 旋转角来进行处理。文献[12]利用 FrFT 在旋转的时频平面内获得了单视复图像(SLC)的特征描述符,并将该方法与传统多尺度方法如 Gabor 滤波、二阶统计量和谱分析法进行了对比,测试结果表明该方法更适用于地面目标的 SAR 图像分类。文献[13]将 FrFT 应用于传统的 RD 算法,虽然提高了 SAR 的成像性能,但是增加了计算的复杂度。文献[14]通过局部最优处理来测量 SAR 回波信号的调频率并以此计算 FrFT 的最优阶数,所研究算法可提高弹载 SAR 成像性能但不具有普适性。为解决弹载 SAR 大距离徙动及空间时变性的问题,文献[15]提出了一种新的基于 FrFT 的 CS 算法,该算法通过近似选择距离向和方位向 FrFT 的旋转角,获得了比传统 CS 算法更优的 SAR 图像。文献[16]将 FrFT 应用于星载 SAR 的数据处理,利用 FrFT 表征在旋转时频平面上的 SAR 信号,得到了动目标在方位向上最优的残余线性调频脉冲信号。为获得地面动目标的清晰 SAR 图像,文献[17]提出了将 FrFT 与自适应迭代模糊数算法相结合的多普勒参数估计方法。文献[18]提出了联合利用 Wigner-Ville 分布(WVD)和 FrFT 实时估计多普勒参数的方法,并且指出观测信号的 WVD 处理决定了 FrFT 的旋转角。文献[19]针对地面合成孔径雷达(GB-SAR)或其他由合成线性孔径构成的雷达系统,提出了基于 FrFT 进行方位压缩的成像算法。文献[20]利用距离-频率变量的等间隔采样方法,提出了基于距离-频率反变换 FrFT(RFRT-FrFT)的合成孔径雷达地面运动目标成像新算法。在满足 SAR 成像基本要求的抽样序列长度条件下,文献[21]提出了适用于方位向的 SAR 局部最优成像算法。

虽然众多学者在 FrFT 聚焦特性方面做了大量研究工作,并对 FrFT 的 SAR 成像算法也进行了较为深入的研究,但是关于将 FrFT 应用于 RD 算法以获得全局最优效果的 SAR 成像处理方法的研究甚少。为了获得距离向和方位向全局最优效果的 SAR 成像处理方法,本文首先对距离向和方位向信号进行最优阶数分析。然后,提出距离向和方位向最佳抽样长度的约束条件。接着,构建高分辨率 SAR 成像算法。最后,进行仿真实验并对实验结果进行分析。

2 基于 FrFT 的 SAR 回波信号阶数分析

假定 SAR 在任意位置发射的线性调频(LFM)信号为

$$s_{\mathrm{r}}(\tau)=\mathrm{rect}\left(\frac{\tau}{T_{\mathrm{r}}}\right)\exp(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{c}}\tau+\mathrm{j}\pi\kappa_{\mathrm{r}}\tau^{2}),\quad(1)$$

式中:τ 为快时间变量;T_{r} 为脉冲宽度;f_{c} 为载波频率;κ_{r} 为 SAR 回波信号的调频率;rect(•)为矩形窗函数。

连续信号 $f(x)$ 的 FrFT 定义式为

$$F_{\alpha}[f(u)]=\int_{-\infty}^{\infty}K_{\alpha}(u,x)f(x)\mathrm{d}x,\quad(2)$$

式中:$K_{\alpha}(u,x)$ 为 FrFT 的核函数;α 为旋转角度且 $\alpha=\pi\mu/2$;μ 为 FrFT 的阶数。

SAR 方位向回波信号近似为 LFM 信号,表达式为

$$s_{\mathrm{a}}(t)=W_{\mathrm{a}}(t)\exp(\mathrm{j}2\pi f_{\mathrm{dc}}t+\mathrm{j}\pi\kappa_{\mathrm{a}}t^{2}),\quad(3)$$

式中:t 为方位向时间;f_{dc} 为多普勒中心频率;κ_{a} 为方位向调频率;$W_{\mathrm{a}}(t)=\mathrm{rect}(t/T_{\mathrm{a}})$,$T_{\mathrm{a}}$ 为合成孔径时间。根据(2)、(3)式进行变换分析,可得利用 FrFT 后,SAR 方位向回波信号的最优阶数[21]为

$$\nu_{\mathrm{opt}}=\frac{2}{\pi}\arctan\left(-\frac{F_{\mathrm{a}}^{2}}{\kappa_{\mathrm{a}}N_{\mathrm{a}}}\right),\quad(4)$$

式中:N_{a} 为方位向抽样序列长度;F_{a} 为方位向抽样频率。

考虑到回波信号的延迟,根据(1)、(2)式进行类似变换分析,可得利用 FrFT 后,SAR 距离向回波信号的最优阶数为

$$\mu_{\mathrm{opt}}=\frac{2}{\pi}\arctan\left(-\frac{F_{\mathrm{r}}^{2}}{\kappa_{\mathrm{r}}N_{\mathrm{r}}}\right),\quad(5)$$

式中:N_{r} 为距离向抽样序列长度;F_{r} 为距离向抽样频率。

3 抽样序列长度的约束条件

从理论上来说，只要满足 SAR 成像基本要求的距离向和方位向抽样序列长度均可获得相应的 FrFT 最优阶数，并且利用已有算法[21]处理后成像质量能够达到局部最优性能，但此时并不一定是 SAR 成像质量的最佳状态。因此，应从 SAR 成像质量角度来确定最佳抽样序列长度。通常在 SAR 成像中距离向上的抽样率远大于方位向抽样率（脉冲重复频率），因此方位向抽样序列长度对 SAR 成像质量的影响更大，同时其精度要求也更高。为降低计算复杂性，依据距离向和方位向上的已知成像参数[22]，研究设计了距离向和方位向初始抽样序列长度，其中在设计方位向初始抽样序列长度时要充分考虑抽样率的影响。根据 SAR 图像质量的性能评估标准，研究建立了已知成像参数相互之间的加权关系。运用初始抽样序列长度和图像评估的相应准则，研究确定了距离向和方位向抽样序列长度的表达式，分析了曲线变化趋势，得到了距离向和方位向上的最佳抽样序列长度，使得 SAR 成像质量达到了最优。

设 f_{PRF} 为脉冲重复频率，则距离向初始序列长度 N_{r_0}、方位向初始序列长度 N_{a_0} 的表达式为

$$N_{\mathrm{r}_0}=\mathrm{INT}(\gamma\cdot T_{\mathrm{r}}\cdot F_{\mathrm{r}}),\tag{6}$$

$$N_{\mathrm{a}_0}=\mathrm{INT}(\delta\cdot T_{\mathrm{a}}\cdot f_{\mathrm{PRF}}),\tag{7}$$

式中：INT(·)表示取整函数；γ、δ 表示变常数，在机载 SAR 成像时，可取 $\gamma=1.2$、$\delta=1.2$。对于星载 SAR，由于卫星平台运行速度很快，在 SAR 成像时合成孔径时间 T_{a} 很小，因此根据实际情况，δ 需取较大的值。

分别以初始序列 N_{r_0}、N_{a_0} 为中心，在一定范围内改变（增大或减小）抽样序列长度。将 SAR 图像分辨率和图像的性能评估标准相结合，以确定最佳的抽样序列长度，相应的表达式为

$$N_{\mathrm{r}_{\mathrm{opt}}}=\underset{|P(N_{\mathrm{r}})|\to\max,\ |I(N_{\mathrm{r}})|\to\max}{\mathrm{argmin}}\left[\rho_{\mathrm{r}}(N_{\mathrm{r}})\right],\tag{8}$$

$$N_{\mathrm{a}_{\mathrm{opt}}}=\underset{|P(N_{\mathrm{a}})|\to\max,\ |I(N_{\mathrm{a}})|\to\max}{\mathrm{argmin}}\left[\rho_{\mathrm{a}}(N_{\mathrm{a}})\right],\tag{9}$$

式中：argmin(·)表示使目标函数取最小值时的变量值；$N_{\mathrm{r}_{\mathrm{opt}}}$、$N_{\mathrm{a}_{\mathrm{opt}}}$ 分别表示距离向和方位向的最佳抽样序列长度，此时距离向分辨率 ρ_{r}、方位向分辨率 ρ_{a} 最小；N_{r}、N_{a} 分别表示可变的距离向、方位向抽样序列长度；$P(N_{\mathrm{r}})$、$I(N_{\mathrm{r}})$ 分别表示 N_{r} 变化时的距离向峰值旁瓣比（PSLR）和积分旁瓣比（ISLR）；$P(N_{\mathrm{a}})$、$I(N_{\mathrm{a}})$ 分别表示 N_{a} 变化时的方位向 PSLR 和 ISLR。(8)、(9)式表示的是在寻求分辨率最小值的情况下，尽可能获得 PSLR 和 ISLR 的最大值。

4 高分辨率 SAR 成像算法的构建

所提的高分辨率 SAR 成像算法的构建流程如图 1 所示，主要包括距离向及方位向信号处理部分，

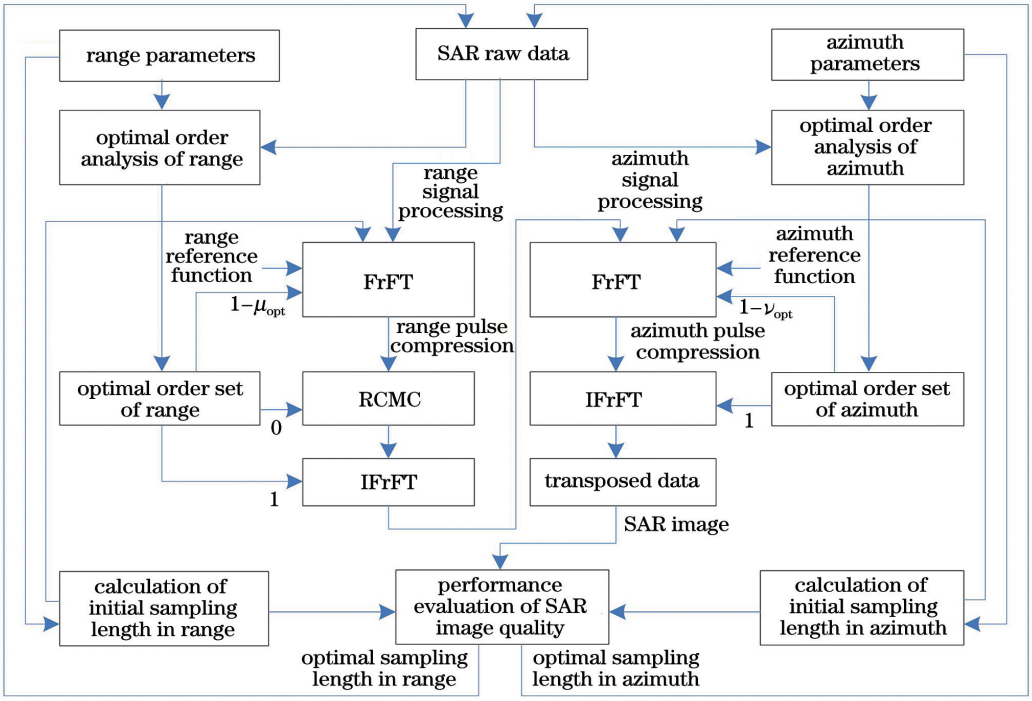

图 1 高分辨率 SAR 成像算法构建流程图

Fig. 1 Construction flow chart of high resolution SAR imaging algorithm

其中 IFrFT 表示逆 FrFT。首先，根据距离向成像参数进行最优阶数分析，利用(5)式可计算得到距离向最优阶数 μ_{opt}，以此阶数为基础构建距离向最优阶数集$\{1-\mu_{opt},0,1\}$。对距离向信号进行 FrFT 时，其正变换、逆变换分别采用阶数 $1-\mu_{opt}$ 和 1，满足距离向时频信号变换的正交属性。由于在距离徙动校正中无需进行 FrFT 处理，故此时阶数为 0。根据(6)式可计算得到距离向初始序列长度 N_{r_0}，结合(8)式最终可确定距离向最佳抽样序列长度。然后，根据方位向成像参数进行最优阶数分析，利用(4)式可计算得到方位向最优阶数 ν_{opt}，以此阶数为基础构建方位向最优阶数集$\{1-\nu_{opt},1\}$。对方位向信号进行 FrFT 时，其正变换、逆变换分别采用阶数 $1-\nu_{opt}$ 和 1，满足方位向时频信号变换的正交属性。根据(7)式可计算得到方位向初始序列长度 N_{a_0}，结合(9)式最终可确定方位向最佳抽样序列长度。

当距离向和方位向抽样序列长度取值任意时，所提算法退化为文献[21]中的方法，此时可达到距离向和方位向 SAR 成像的局部最优性能。在实际成像运算处理过程中，可以利用快速傅里叶变换(FFT)快速计算出距离向和方位向的最优阶数并完成一次成像。从理论上来说，所提算法的每次成像与 RD 算法具有相同的计算量，但实际成像速度要稍慢一些。

5 数据实验与分析

以正侧视点目标成像为例，设定机载 SAR 的仿真参数：LFM 信号带宽为 120 MHz，方位向天线尺寸为 3 m，光速为 2.998×10^8 m/s，中心点斜距为 5600 m，载波频率为 4 GHz，载机平台速度为 154 m/s，脉冲重复频率为 140 Hz。距离向抽样率的过抽样系数为 1.6，而脉冲重复频率的方位向过抽样率系数为 1.4。根据设置的参数，利用(6)式可计算得到距离向抽样序列长度初始值为 $N_{r_0}=1152$。以 $N_{r_0}=1152$ 抽样点为中心，窗函数采用 Kaiser 窗，将距离向抽样序列长度区间变化范围扩展为 800～1800，步进为 2。距离向抽样序列长度对 SAR 成像性能的影响如图 2 所示，其中距离向分辨率、距离向 PSLR 和距离向 ISLR 的拟合曲线均利用最小二乘拟合法获得(多项式系数取值为 6)。由图 2(a)、(b)可知，当距离向抽样序列长度从 800 增加到 1800 时，距离向分辨率、距离向 PSLR 和距离向 ISLR 均存在最佳值，且后两者曲线变化趋势一致。在 800～1800 内的其他非最佳抽样序列长度，均可使得文献[21]中的算法达到 SAR 成像的局部最优性能，但其性能均低于最佳抽样序列长度对应的所提算法的成像性能，对于实测数据也可得到相同结论。以距离向分辨率为衡量标准，此时距离向最佳抽样序列长度为 1176，对距离向信号进行处理可得到距离向分辨率、距离向 PSLR 和距离向 ISLR 分别为 0.87 m、−22.74 dB 和 −20.69 dB。相应的传统 RD 算法距离向分辨率、距离向 PSLR 和距离向 ISLR 分别为 1.11 m、−13.28 dB 和 −10.21 dB。由此可见，对点目标进行成像时，与传统 RD 算法相比，所提算法在距离向具有优异的成像性能。

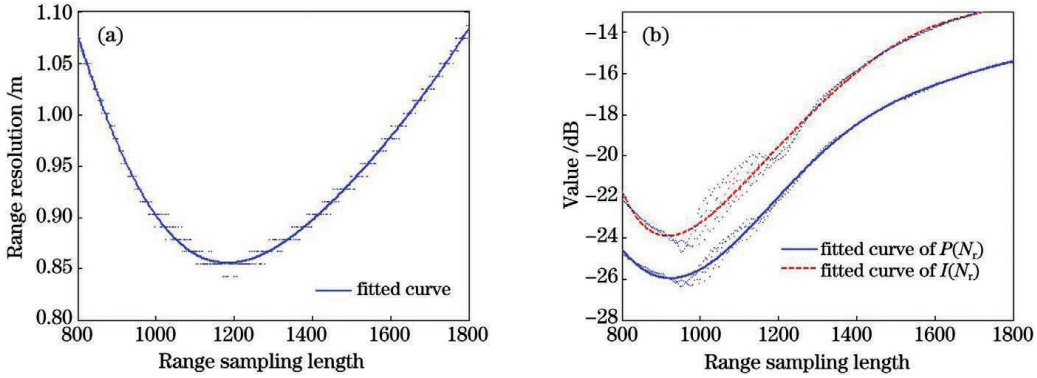

图 2 距离向抽样序列长度对 SAR 成像性能的影响。(a)距离向分辨率；(b)$P(N_r)$和 $I(N_r)$

Fig. 2 Effect of range sampling length on SAR imaging performance. (a) Range resolution; (b) $P(N_r)$ and $I(N_r)$

根据设置的参数，利用(7)式可计算得到方位向抽样序列长度初始值为 $N_{a_0}=152$。以 $N_{a_0}=152$ 抽样点为中心，分别将方位向抽样序列长度区间变化范围扩展为 60～700，步进为 2。方位向抽样序列长度对 SAR 成像性能的影响如图 3 所示，其中方位向分辨率、方位向 PSLR 和方位向 ISLR 的拟合曲线均利用最小二乘拟合法获得(多项式系数取值为 10)。从图 3(a)、(b)中可得到与距离向信号分析相

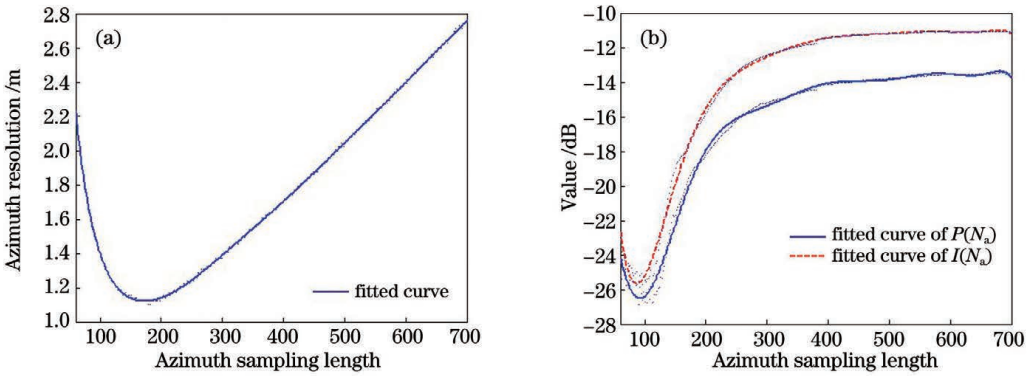

图 3 方位向抽样序列长度对 SAR 成像性能的影响。(a)方位向分辨率;(b)$P(N_a)$和 $I(N_a)$

Fig. 3 Effect of azimuth sampling length on SAR imaging performance. (a) Azimuth resolution; (b) $P(N_a)$ and $I(N_a)$

同的结论,此时方位向最佳抽样序列长度为 178。

在实际 SAR 成像处理系统中,距离向和方位向最佳抽样序列长度在一定程度上会受到 SAR 目标场景能量反射的波动程度以及抽样序列长度变化区间中步进长度的影响。理论上步进长度越小,选取的最佳抽样序列长度精度越高。对于加拿大 RADARSAT-1 卫星采集的相同场景(能量反射的波动程度相当)的原始回波数据,其相关参数为:距离向抽样率 $F_r=32.317$ MHz;脉冲宽度 $T_r=41.74$ μs;距离向调频率 $K_r=0.72135$ MHz/μs;载波频率 $f_c=5.3$ GHz;雷达波长 $\lambda=0.05657$ m;脉冲重复频率为 1256.98 Hz;方位向调频率 $K_a=1733$ Hz/s;多普勒中心频率为 −6900 Hz。利用距离向和方位向抽样长度约束条件可得 $N_{r_{opt}}=2464$,$N_{a_{opt}}=2912$。在此条件下,图 4 给出了所提算法和传统 RD 算法的 SAR 实测数据成像图的局部放大图。

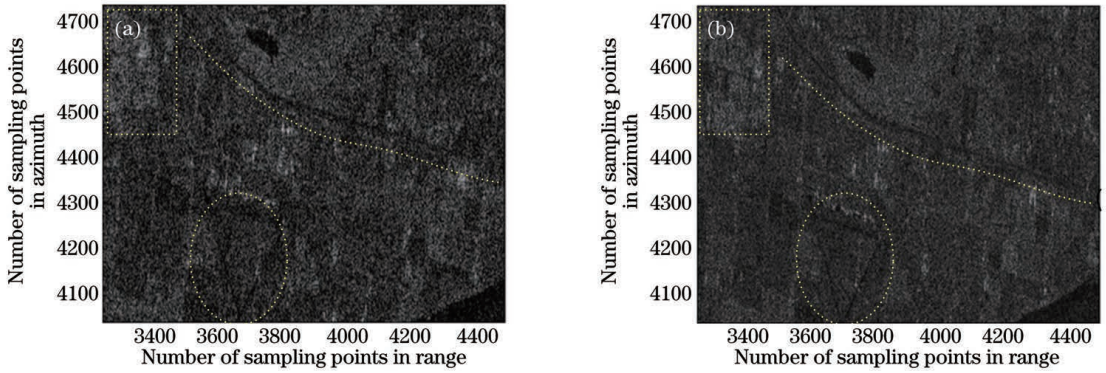

图 4 实测数据 SAR 成像图的局部放大。(a) 传统的 RD 算法;(b) 所提算法

Fig. 4 Local magnfication of SAR images of measured data. (a) Traditional RD algorithm; (b) proposed algorithm

从图 4(a)、(b)中可以看出,利用传统 RD 算法计算得到的 SAR 图像模糊不清,较低的分辨率严重影响了对目标的判读和解译。在利用所提算法计算得到的 SAR 图像中,机场(椭圆圈中区域)设施轮廓明显,跑道清晰可见。高速公路(虚线段上方)边缘分界线易辨认。城市建筑(矩形框中区域)反射信号强、目标聚焦性好,“丁”字形马路可见。其他不同地物目标可区分度高,纹理清晰,相干斑噪声颗粒小,可显著提高对目标的解译和识别性能。故在实测数据成像中,所提算法通过在距离向和方位向应用最佳抽样序列长度,在局部最优成像性能基础上进一步提升了 SAR 成像质量,获得了全局最优成像。与传统的 RD 算法相比,其成像性能得到显著提高,但实际运算速度慢了约 19 s。

6 结 论

为了提升 FrFT 域中的 SAR 成像算法性能,基于初始抽样序列长度和 SAR 图像质量评估标准,提出了最佳抽样序列长度的概念和计算问题,并以此构建了基于距离向和方位向抽样序列长度约束的优化 SAR 成像算法模型。研究结果表明,距离向/方位向的分辨率、PSLR 和 ISLR 随着抽样序列长度的变化均存在最佳值,且后两者曲线变化趋势是一致的。利用计算得到的最佳抽样序列长度可在 SAR 图像局部最优性能的基础上,从全局的角度进一步提高 SAR 成像质量。与传统 RD 算法相比,利用所

提算法计算得到的 SAR 图像分辨率高、地物目标可区分度高、纹理清晰且相干斑噪声颗粒小，显著提高了对目标的判读、检测和识别性能，在信息通信领域中具有良好的应用前景。

参 考 文 献

[1] Xie Z H, Liu J H, Sun H, et al. Fast registration of visible light and synthetic aperture radar images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 062803.
谢志华, 刘晶红, 孙辉, 等. 可见光图像与合成孔径雷达图像的快速配准[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 062803.

[2] Yang H X, Guo H, Gao Y, et al. SAR flow ice separation algorithm combined with saliency detection [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201010.
杨红霞, 郭浩, 高岩, 等. 结合显著性检测的 SAR 流冰分离算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201010.

[3] Yang L, Su J, Huang H, et al. SAR ship detection based on convolutional neural network with deep multiscale feature fusion[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0215002.
杨龙, 苏娟, 黄华, 等. 一种基于深层次多尺度特征融合 CNN 的 SAR 图像舰船目标检测算法[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0215002.

[4] Cumming I G, Wong F H. Digital processing of synthetic aperture radar data algorithms and implementation[M]. Hong W, Hu D H, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004: 154-320.
Ian G Cumming, Frank H Wong. 合成孔径雷达成像: 算法与实现[M]. 洪文, 胡东辉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004: 154-320.

[5] Smith A M. A new approach to range-Doppler SAR processing[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(2): 235-251.

[6] de Wit J J M, Meta A, Hoogeboom P. Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006, 3(1): 83-87.

[7] Pi Y M, Yang J Y, Fu Y S, et al. Imaging principle of synthetic aperture radar[M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 2007.
皮亦鸣, 杨建宇, 付毓生等. 合成孔径雷达成像原理[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2007.

[8] Gu X C, Fu K, Qiu X L. Fundamentals of SAR image interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2017.
谷秀昌, 付琨, 仇晓兰. SAR 图像判读解译基础[M]. 北京: 科学出版社, 2017.

[9] Santhanam B, McClellan J H. The discrete rotational Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(4): 994-998.

[10] Tao R, Li Y L, Wang Y. Short-time fractional Fourier transform and its applications[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5): 2568-2580.

[11] Sun G C, Xing M D, Xia X G, et al. A unified focusing algorithm for several modes of SAR based on FrFT [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(5): 3139-3155.

[12] Singh J, Datcu M. SAR image categorization with log cumulants of the fractional Fourier transform coefficients[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(12): 5273-5282.

[13] El-Mashed M G, Zahran O, Dessouky M I, et al. Synthetic aperture radar imaging with fractional Fourier transform and channel equalization[J]. Digital Signal Processing, 2013, 23(1): 151-175.

[14] Chen Y, Zhao H C, Chen S, et al. An improved focusing algorithm for missile-borne SAR with high squint[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 608/609: 761-765.

[15] Chen S, Zhang S N, Zhao H C, et al. A new chirp scaling algorithm for highly squinted missile-borne SAR based on FrFT [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3977-3987.

[16] Pelich R, Longépé N, Mercier G, et al. Vessel refocusing and velocity estimation on SAR imagery using the fractional Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(3): 1670-1684.

[17] Tan K, Li W H. Imaging and parameter estimating for fast moving targets in airborne SAR [J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2017, 3(1): 126-140.

[18] Wang H Y, Jiang Y C. Real-time parameter estimation for SAR moving target based on WVD slice and FrFT [J]. Electronics Letters, 2018, 54(1): 47-49.

[19] Zou L L, Sato M. An efficient and accurate GB-SAR imaging algorithm based on the fractional Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 9081-9089.

[20] Huang P H, Xia X G, Gao Y S, et al. Ground moving target refocusing in SAR imagery based on RFRT-FrFT[J]. IEEE Transactions on

Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(8): 5476-5492.

[21] Wang Z L, Wang Q. Application of optimal FrFT order for improving the azimuth resolution of range Doppler imaging algorithm[J]. IET Image Processing, 2020, 14(4): 789-793.

[22] Wang Z L, Wang Q, Li F J, et al. High resolution SAR image algorithm with sample length constraints for the range direction [J]. Computers, Materials & Continua, 2020, 63(3): 1533-1543.