

聚束模式 SAR 连续缺失数据的高分辨成像方法

段化军* 朱岱寅 毛新华 吴迪
(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

摘要: 目前基于缺失数据的幅度相位估计算法(GAPES)的 SAR 成像算法都没有考虑距离徙动和相位误差问题而导致图像质量下降。该文提出一种基于 GAPES 的聚束模式 SAR 方位向连续缺失数据的高分辨成像方法。在处理过程中,通过对连续缺失数据 2 维插值实现距离徙动校正,然后利用稀疏数据投影近似子空间跟踪算法实现相位误差补偿,保证了图像的分辨率。仿真和实测数据的处理结果证明了该方法的有效性。

关键词: 缺失数据的幅度和相位估计; 距离向插值; 方位向插值; 距离徙动校正; 投影近似子空间跟踪

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)03-0607-06

DOI: 10.11999/JEIT150575

High-resolution Imaging for Spotlight Mode SAR from Gapped-data

DUAN HuaJun ZHU Daiyin MAO Xinhua WU Di

(College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The existing approaches with missing data for SAR by Gapped-data Amplitude and Phase Estimation (GAPES) ignore the range migration and phase error, which lead to the decrease of the imaging quality. An imaging method of gapped-data for spotlight mode SAR based on GAPES is presented. It can correct the range migration using two-dimensional interpolation, realize autofocus from sparse data by sparse project approximation subspace tracking algorithm, and ensure the resolution of the image. The simulations and real data processing results show the validity of the proposed approach.

Key words: Gapped-data Amplitude and Phase Estimation (GAPES); Range interpolation; Azimuth interpolation; Range migration correction; Projection Approximation Subspace Tracking (PAST)

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)在分集工作模式或者受到干扰时,雷达回波脉冲数据会在时域或频域稀疏缺失。通过对缺失数据补零,采用常规的雷达成像方法成像,会造成图像的伪像以及图像质量的严重下降^[1-4]。

Sinc插值^[5]可以恢复缺失数据,但是当数据频谱混叠或连续缺失较多时,该方法恢复效果不理想。谱估计或者线性预测和递推的方法^[6-8]也可以恢复缺失数据,但此类算法对预测模型和信噪比较敏感,当数据缺失较多时,其对缺失数据的恢复会成指数

级衰减。压缩感知可以有效处理稀疏信号^[9-12],但连续缺失数据不符合压缩感知 RIP (Restricted Isometry Property)规则,所以压缩感知方法不适用。文献[1-4]是基于 GAPES (Gapped-data Amplitude and Phase Estimation)算法^[13-15]对雷达连续缺失数据成像方法的研究,但以上方法都没有涉及实测数据中距离徙动校正和相位误差补偿问题。为了校正连续缺失数据的距离徙动和补偿相位误差,本文提出了一种在聚束工作模式下,实现连续缺失数据高分辨成像方法。首先对连续缺失回波数据进行预处理,然后通过连续缺失数据的2维插值实现距离徙动校正,利用稀疏数据PAST (Project Approximation Subspace Tracking)自聚焦算法对连续缺失数据进行相位误差补偿,再利用GAPES算法实现连续缺失数据的高分辨成像。该方法实现了实测数据中的距离徙动校正和相位误差补偿问题,消除了连续缺失数据成像中的伪像和旁瓣抬高,保证了距离向和方位向的分辨率。仿真和实测数据的对比证明了该方法的有效性和实用性。

收稿日期: 2015-05-15; 改回日期: 2015-12-02; 网络出版: 2016-01-14

*通信作者: 段化军 dhj5816@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(61301210, 61301212), 航空科学基金(20132007001, 20142052020, 20142052021), 江苏省研究生培养创新工程(SJLX_0131)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61301210, 61301212), Aeronautical Science Foundation of China (20132007001, 20142052020, 20142052021), Innovation Project of Jiangsu Province (SJLX_0131)

2 距离徙动校正

聚束模式是一种对某一场景进行高分辨成像的 SAR 工作模式。载机在飞行过程中, 雷达天线始终照射该区域, 通过增加孔径时间, 提高方位向分辨率。相比较条带模式, 对于同一场景, 聚束模式具有更高的方位向分辨率。

2.1 几何模型

以正侧视情况为例, 聚束模式 SAR 稀疏测量几何模型如图 1 所示, 图中航迹上实粗线为可获得有效回波数据的位置, 虚线为未获得有效数据的位置。

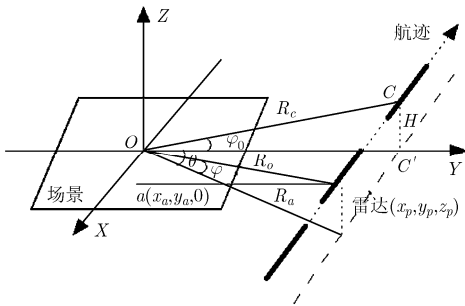


图1 聚束模式 SAR 系数测量几何模型

场景中心 O 作为坐标原点, 与飞机飞行路线平行方向作为 X 轴, 与飞机飞行路线垂直方向作为 Y 轴, 垂直地面方向作为 Z 轴。场景中任意一点 a 的位置坐标为 $(X_a, Y_a, 0)$ 。假设雷达沿航迹以速度 v 匀速直线运动, 雷达某一时刻的位置坐标为 (X_p, Y_p, Z_p) 。雷达天线相位中心到场景中点 a 和场景中心的距离记为 R_a 和 R_o , 其值分别为

$$R_o = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2} \quad (1)$$

$$R_a = \sqrt{(X_p - X_a)^2 + (Y_p - Y_a)^2 + Z_p^2} \quad (2)$$

雷达发射线性调频信号(LFM), 目标反射后的 2 维回波信号为

$$\begin{aligned} S_R(t, \tau) = & \sigma \cdot \text{rect}(t/T_a) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_a/c}{T_r}\right) \\ & \cdot \exp\left(j\pi k(\tau - 2R_a/c)^2\right) \\ & \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_c}{c} R_a\right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中, σ 为 a 点复反射率, σ 已考虑发射功率、天线增益、电波传播衰减因素在内, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗函数, t 为方位慢时间(t 为非连续的), T_a 为方位孔径时间, τ 为距离快时间, c 为电波传播速度, T_r 为脉冲持续时间, k 为调频斜率, f_c 为载频。

2.2 回波数据预处理

对于方位向连续缺失的稀疏 SAR 数据, 首先对回波数据进行预处理, 将无效的脉冲数据置零。然

后对有效的脉冲数据做距离向傅里叶变换并匹配滤波和运动补偿, 使场景中心点的回波相位为零, 得到

$$\begin{aligned} S_F(t, f_\tau) = & \text{rect}(t/T_a) \cdot \text{rect}(f_\tau/kT_r) \cdot \sigma \\ & \cdot \exp\left[j\frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c}(R_o - R_a)\right] \end{aligned} \quad (4)$$

式中, f_τ 为距离向频率。

在满足平面波前假设的条件下, 差分距离 $R_o - R_a$ 可表示为

$$R_o - R_a \approx x_a \cos \varphi \sin \theta + y_a \cos \varphi \cos \theta \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 由于 $\text{rect}(\cdot) = 1$, 所以可以忽略。于是得到

$$\begin{aligned} S_F(t, f_\tau) = & \sigma \cdot \exp\left[j\left[x_a \frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c} \cos \varphi \sin \theta \right. \right. \\ & \left. \left. + y_a \frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c} \cos \varphi \cos \theta\right]\right] \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 距离徙动校正

从式(6)可以看到, 回波相位信息包含的距离信息部分和方位信息部分存在着耦合, 即距离徙动, 将对成像的分辨率造成影响。消除距离徙动的方法就是进行 2 维插值^[16]。

(1) 稀疏信号的距离向插值: 距离向插值的目的是消除距离信息部分随方位时间 t 的变化, 也就是做式(7)的变换

$$f_\tau = f_c(\delta_r - 1) + \delta_r f'_\tau \quad (7)$$

式中 $\delta_r = \cos \varphi_0 / (\cos \varphi \cos \theta)$, f'_τ 为变换后的距离频率, 下面仍将其写为 f_τ , 则信号变为

$$\begin{aligned} S_{RC}(t, f_\tau) = & \sigma \cdot \exp\left\{j\left[x_a \frac{4\pi}{c}(f_c + f_\tau) \cos \varphi_0 \frac{vt}{R_c} \right. \right. \\ & \left. \left. + y_a \frac{4\pi}{c}(f_c + f_\tau) \cos \varphi_0\right]\right\} \\ = & \sigma \cdot \exp\left[jx_a \frac{4\pi}{c}(f_c + f_\tau) \cos \varphi_0 \frac{vt}{R_c}\right] \\ & \cdot \exp\left[jy_a \frac{4\pi}{c}(f_c + f_\tau) \cos \varphi_0\right] \end{aligned} \quad (8)$$

稀疏信号的距离向插值是对有效脉冲数据进行的, 插值过程如图 2 所示。图 2 中空点表示插值前的位置, 实心点表示插值后的位置, 未标记圆点的线段交叉点的位置为无效脉冲数据位置。回波信号由扇形信号变换为梯形信号, 二次及二次以上的距离弯曲得到校正, 只剩余由目标方位位置引起的线性距离走动^[16]。

(2) 方位向插值: 方位向插值是对回波信号做 Keystone 变换, 也就是对式(8)做式(9)的变换:

$$t = \frac{f_c}{f_c + f_r} t' \quad (9)$$

变换之后的回波信号变为

$$S_{AC}(t, f_r) = \sigma \cdot \exp \left[jx_t \frac{4\pi}{c} f_c \cos \varphi_0 \frac{vt'}{R_c} \right] \cdot \exp \left[jy_t \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \cos \varphi_0 \right] \quad (10)$$

方位向插值后，残留的线性距离走动得到校正，信号 2 维解耦合完成，实现了距离徙动的完全校正^[16]。方位向插值过程如图 3 所示。图中空心点表示插值前的位置，实心点表示插值后的位置，未标记圆点的线段交叉点的位置为无效脉冲数据位置。方位向插值后，回波信号由扇形信号变换为梯形信号。

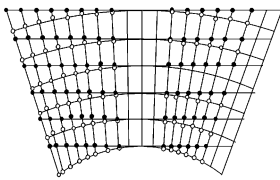


图 2 距离向插值示意图

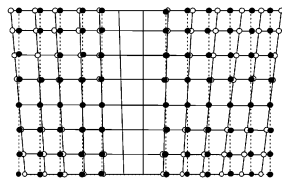
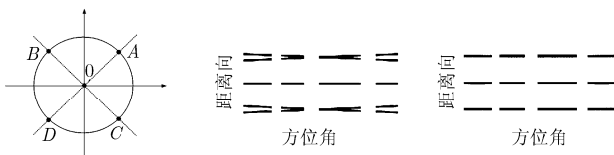


图 3 方位向插值示意图

图 4 为正侧视条件下点目标仿真连续缺失数据的距离徙动校正结果。图 4(a)为仿真点数目标几何分布图，仿真参数与下文中图 8 中的仿真参数相同。图 4(b)为未进行距离徙动校正的稀疏信号距离压缩图像，图 4(c)为距离徙动校正的稀疏信号距离压缩图像。通过对比图 4(b)和图 4(c)可以看出，在数据方位向连续缺失条件下，2 维插值仍然具有良好的距离徙动校正效果。



(a) 仿真点数目标几何分布 (b) 未进行距离徙动校正结果 (c) 距离徙动校正结果

图 4 点目标仿真稀疏信号的距离徙动校正结果

3 稀疏数据投影近似子空间跟踪(PAST)自聚焦算法

对于 SAR 而言，载机的微小运动误差，都会造成较大的相位误差。对于方位连续 SAR 数据而言，由于信号缺失，造成了信号频谱的展宽和副瓣信号的抬高，会影响通过加窗提高信噪比的 PGA^[17]和 ROPE^[18]自聚焦算法的自聚焦性能。基于特征向量法^[19]的自聚焦算法不需要加窗就可以保证相位估计

的无偏性和估计精度，但其运算量大，工程实现困难。本文采用投影近似子空间跟踪法(PAST)^[20]，利用递归最小二乘方法，对信号子空间进行估计，避免了估计协方差矩阵以及特征分解的过程。

PAST 算法的原理和过程在文献[20]作了详细介绍。为了能够对方位稀疏数据实现自聚焦，需要对原算法做如下调整，算法流程图如图 5 所示。

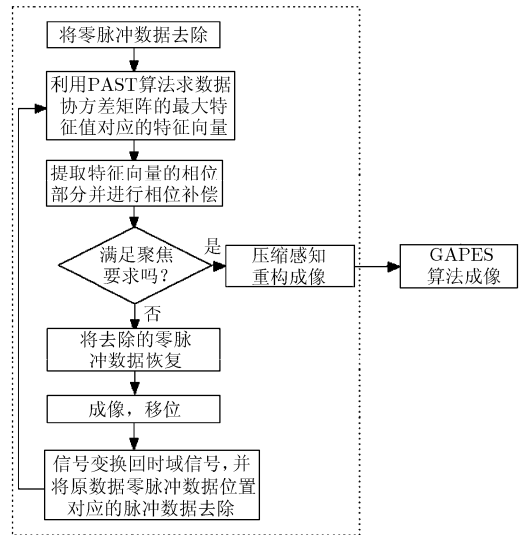


图 5 稀疏数据 PAST 自聚焦算法流程图

(1)将缺失数据中零脉冲数据去除，对剩下的数据利用 PAST 算法得到最大特征值对应的特征向量，提取特征向量的相位部分，也就是相位误差，将数据中的相位误差补偿掉。

(2)将补偿掉相位误差的数据通过补零补充完整，进行傅里叶变换，成一个初像。将每一距离单元最强散射点移位至图像中心，信号变换回时域，将补零脉冲去除，然后利用 PSAT 算法计算相位误差，并对数据进行相位补偿。

(3)重复步骤(1)和步骤(2)直至算法收敛。

4 方位向稀疏数据 GAPES 成像

在距离徙动校正和自聚焦之后，方位向就可以在频域实现数据压缩成像，符合 GAPES 算法的理论基础，所以用 GAPES 算法对方位连续缺失数据恢复成像。

文献[13-15]提出的 GAPES (Gapped-data Amplitude and Phase ESTimation)算法是 APES (Amplitude and Phase ESTimation)算法在缺失数据条件下的扩展。该算法由于采用非参数化的谱估计方法，所以相比参数法方法具有更高的鲁棒性，并且具有更好的频谱恢复估计性能，受到了广泛的

重视,其详细处理过程见文献[13-15]。

本文利用GAPES算法对连续缺失数据每一距离单元分别进行恢复,其流程如图6所示。

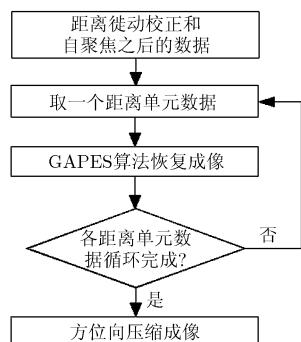


图6 稀疏数据GAPES算法成像流程图

5 算法处理流程及性能分析

5.1 算法流程

聚束模式SAR方位连续缺失数据的整个处理流程如图7所示。

5.2 处理结果及性能分析

(1) 仿真数据处理结果及性能分析: 仿真主要参数如下: 雷达波长 $\lambda = 3.0$ cm, 发射线性调频信

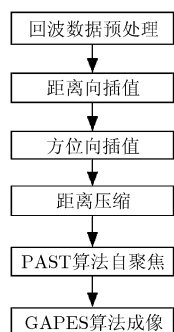


图7 聚束模式SAR稀疏数据处理流程图

号带宽 $B = 300$ MHz, 距离向采样频率 $f_s = 400$ MHz, 脉冲宽度 $\tau = 10$ μ s, 载机速度 $V_p = 120$ m/s, 脉冲重复频率 PRF = 400 Hz。SAR 图像距离和方位分辨率均为 $\rho = 0.5$ m。地面放置 17 个点, 除场景原点外, 其他点均成同心圆状分布, 内圆半径为 50 m, 外圆半径为 90 m, 每个圆上共有 8 个点。其仿真成像结果如图 8 所示。

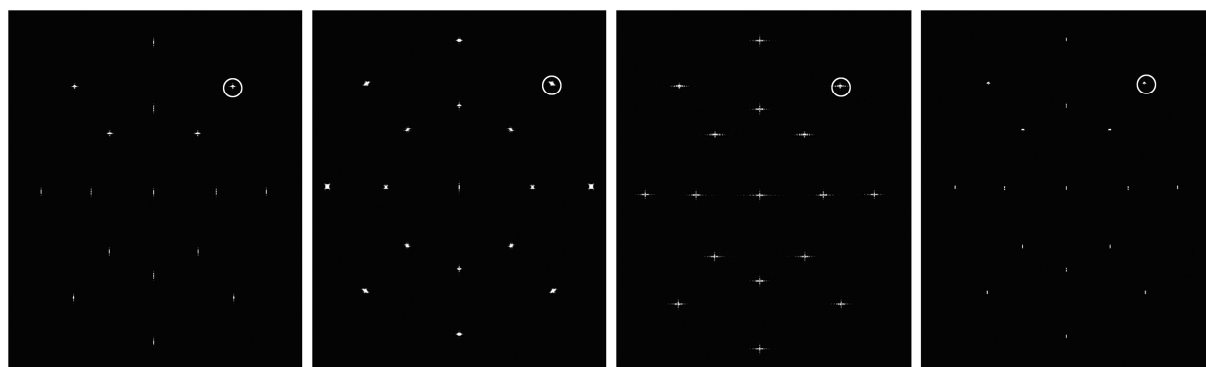
通过对比图 8 的 4 个子图可以得到, 本文方法与完整数据聚束模式成像结果相同, 而未进行距离徙动校正的结果除了中心点之外, 其他点目标 2 维散焦严重, 连续缺失数据利用传统算法成像方位向点目标明显展宽, 出现了伪像。为了更明显地对点目标成像情况进行比较, 下面画出图 8 中标记点的方位向剖面图, 结果如图 9 所示。

通过对比图 9 中的 4 个子图可以看出, 对于连续缺失数据的聚束模式 SAR 来说, 本文方法和完整数据的处理结果几乎相同, 而其他两种的处理结果, 其图像的质量明显低于本文方法的结果。

为进一步说明本文成像算法的性能, 本文从图像方位向分辨率、峰值旁边比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)的角度对点目标成像质量进行了分析比较, 结果如表 1 所示。通过表 1 可以看出, 未进行距离徙动校正的点目标的分辨率下降严重, 传统的聚束模式成像结果旁瓣影响比较严重, 而本文算法和完整数据的成像结果非常相近。

(2) 实测数据处理结果及性能分析: 下面通过实测数据分析本文方法的性能。主要工作参数如下: 雷达载频 $f_c = 10$ GHz, 信号带宽 $B = 1$ GHz, 距离向采样率 $f_s = 1.2$ GHz, 脉冲宽度 $\tau = 15$ μ s, 载机速度 $V_p = 150$ m/s, 脉冲重复频率 PRF = 2000 Hz。图 10 为接收回波数据的缺失形式和成像结果。

通过对比图 10(b)、图 10(c)、图 10(d)3 幅图可以得到, 本文算法克服了连续缺失数据在成像时旁



(a)完整数据成像结果

(b)连续缺失数据未进行距离徙动校正GAPES成像结果

(c)连续缺失数据传统聚束模式算法成像结果

(d)本文方法的成像结果

图8 点目标仿真图

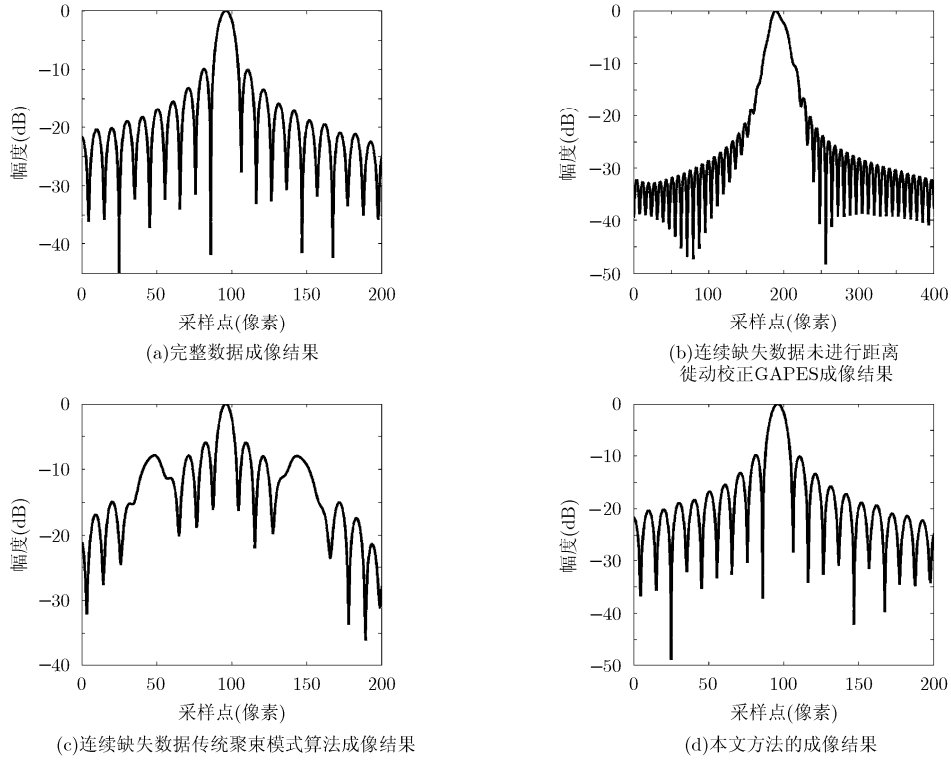


图 9 点目标剖面图

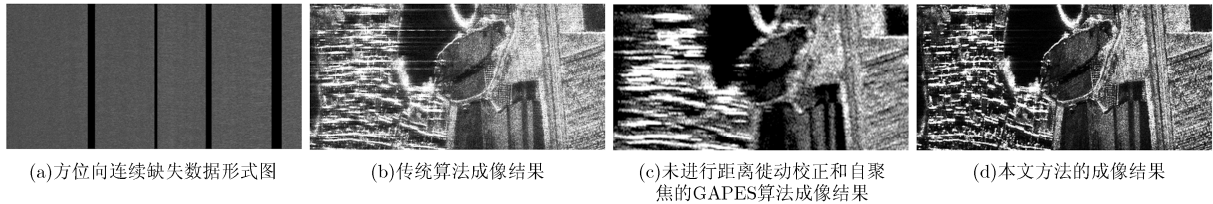


图 10 原始缺失数据及成像结果图

表1 仿真点目标成像质量比较

成像方法	方位分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
完整数据的成像结果	0.5052	-10.2612	-8.4734
连续缺失数据未进行距离徙动校正的GAPES成像结果	0.9369	-8.3633	-6.9348
连续缺失数据传统聚束模式算法成像结果	0.5121	-9.8619	-7.7437
本文方法的成像结果	0.5048	-10.2634	-8.4719

瓣抬高的问题，并且实现了稀疏数据的距离徙动校正和自聚焦，提高了稀疏数据的图像质量。

下面通过图像熵值定量地评估3幅图像的图像质量，以便更好地比较各算法的性能。

2维SAR图像的熵为

$$E(P) = - \sum_{i=0}^{N_a-1} \sum_{j=0}^{N_r-1} P(i, j) \cdot \ln(P(i, j)) \quad (11)$$

式中， N_a 为图像方位点数， N_r 为图像距离点数， $P(i, j)$ 为图像的散射强度密度，其定义为

$$P(i, j) = \frac{|S(i, j)|^2}{Q(S)} \quad (12)$$

式中， $Q(S)$ 为图像的总能量，其定义为

$$Q(S) = \sum_{i=0}^{N_a-1} \sum_{j=0}^{N_r-1} |S(i, j)|^2 \quad (13)$$

式中， $S(i, j)$ 为图像中每一点反射强度。对于同样数据的成像结果，图像清晰，其对应的熵值较小，图像模糊，对应的熵值也相应较大。分别计算图10(b)、图10(c)、图10(d)3幅图像的熵值，结果如表2所示。通过比较3幅图像的熵值，可以看出本文所提算法处理得到的SAR图像的熵值明显比其他两幅图像的熵值小，证明本文算法能有效提高图像质量。

6 结论

连续缺失雷达回波数据利用传统成像算法成

表2 图像熵值对比

图像	熵值
连续缺失数据的传统算法成像结果	5.0529434
未进行距离徙动校正的 GAPES 成像结果	5.3882669
本文算法的成像结果	4.8621924

像, 图像会出现重影或伪像, 造成图像质量的下降。目前基于GAPES方法的连续缺失数据的成像, 都没有考虑实测数据中距离徙动和相位误差的影响, 严重影响实测数据的成像结果。本文提出的一种基于GAPES算法的连续缺失数据高分辨成像方法, 针对聚束模式SAR数据, 实现了连续缺失数据的距离徙动校正和自聚焦, 提高了图像质量, 解决了未做距离徙动校正和自聚焦严重影响图像分辨率以及传统算法中旁瓣抬高和伪像的问题。通过对仿真和实测数据成像结果的性能分析以及同其他方法的对比, 证明了本文方法可以得到连续缺失数据的高分辨成像, 验证了该方法的有效性和实用性。

参考文献

- [1] LARSSON E G, LIU G Q, STOICA P, et al. High-resolution SAR imaging with angular diversity[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(4): 1359-1372.
- [2] GLENTIS G O, ZHAO Kexin, JAKOBSSON A, et al. Non-parametric high-resolution SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(7): 1614-1624.
- [3] 范海燕, 周汉飞, 李禹. 利用缺失数据幅度相位估计提取多角度SAR特征[J]. *电子与信息学报*, 2012, 34(12): 2920-2926. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00496.
FAN Haiyan, ZHOU Hanfei, and LI Yu. Multi-aspect SAR feature extraction via gapped-data amplitude and phase estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(12): 2920-2926. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.00496.
- [4] BAI Xueru, ZHOU Feng, and XING Mengdao, et al. High-resolution radar imaging of air targets from sparse azimuth data[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 1643-1655
- [5] ALAN V O. Signals and System (Second Edition)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 263-274.
- [6] GUPTA I J. High resolution radar imaging using 2D linear prediction[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 1994, 42(1): 31-37.
- [7] GUPTA I J, BEALS M J, and MOGHADDAR A. Data extrapolation for high-resolution radar imaging[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1994, 42(11): 1540-1545.
- [8] ERER I. A new data extrapolation algorithm for high resolution ISAR imaging[J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 2006, 60(4): 316-319.
- [9] DONG Xiao and ZHANG Yunhua. A novel compressive sensing algorithm for SAR imaging[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(2): 708-720
- [10] FANG Jian, XU Zongben, ZHANG Bingchen, et al. Fast compressed sensing SAR imaging based on approximated observation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(1): 352-363.
- [11] UGUR S, ARIKAN O, and CAFER GÜRBÜZ A. SAR image reconstruction by expectation maximization based matching pursuit[J]. *Digital Signal Processing*, 2015, 37: 75-84.
- [12] YANG Jungang, THOMPSON J, HUANG Xiaotao, et al. Segmented reconstruction for compressed sensing SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4214-4225.
- [13] STOICA P, LARSSON E G, and LI J. Adaptive filterbank approach to restoration and spectral analysis of gapped data [J]. *The Astronomical Journal*, 2000, 120(4): 2163-2173.
- [14] LARSSON E G, STOICA P, and LI J. Amplitude spectrum estimation for two-dimensional gapped data[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(6): 1343-1354.
- [15] BAI Xueru, ZHOU Feng, WANG Qi, et al. Sparse subband imaging of space targets in high-speed motion[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(7): 4144-4154.
- [16] 毛新华. PFA 在 SAR 超高分辨率成像和 SAR/GMTI 中的应用研究[D]. [博士论文], 南京航空航天大学, 2009.
MAO Xinhua. Study on the application of PFA in SAR ultra-high resolution imaging and SAR/GMTI[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [17] WAHL D E, EICHEL P H, et al. Phase gradient autofocus-a robust tool for high resolution SAR phase correction[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1994, 30(3): 827-835.
- [18] SNARSKI C A. Rank one phase error estimation for range-Doppler imaging[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(2): 676-688.
- [19] 俞翔. ISAR 运动补偿和成像新方法的研究[D]. [博士论文], 南京航空航天大学, 2013.
YU Xiang. Research on new methods for ISAR motion compensation and imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [20] 蒋锐, 朱岱寅, 沈明威, 等. 基于投影近似子空间跟踪技术的自聚焦算法[J]. *电子学报*, 2012, 40(6): 1251-1256.
JIANG Rui, ZHU Daiyin, SHEN Mingwei, et al. An autofocus algorithm for spotlight SAR imagery using a projection approximation subspace tracking approach[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(6): 1251-1256.

段化军: 男, 1976年生, 博士生, 工程师, 研究方向为雷达信号处理。
朱岱寅: 男, 1974年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和信号处理。
毛新华: 男, 1979年生, 副教授, 研究方向为雷达成像和空时自适应处理。
吴迪: 男, 1982年生, 副教授, 研究方向为机载雷达地面动目标检测。