



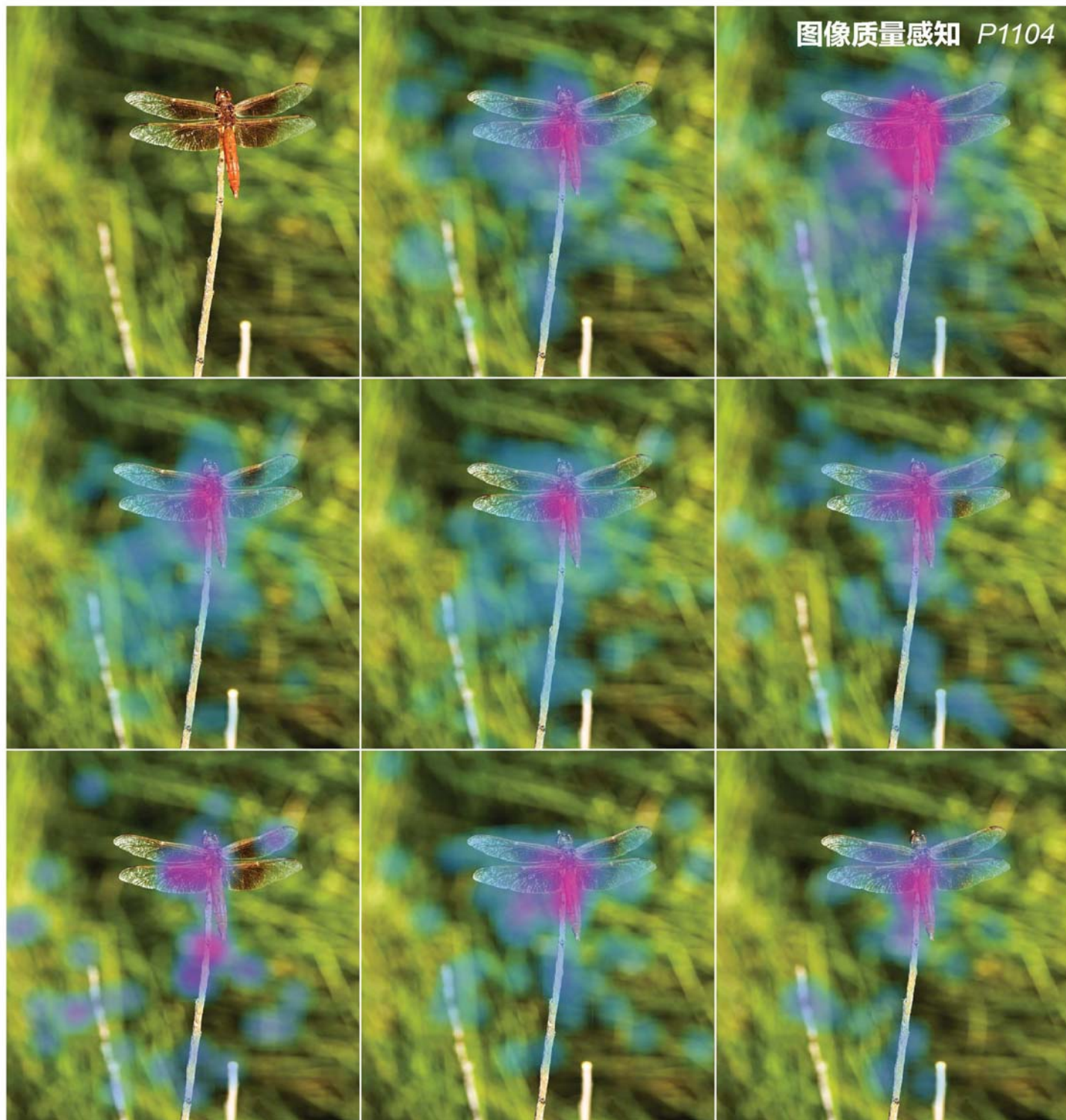
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

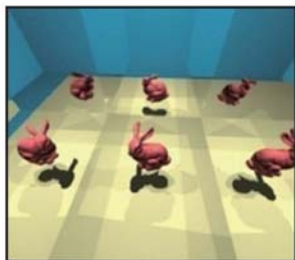
2014
07
VOL.19

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散
绘制(第1062页)

综述

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 0985

图像处理和编码

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 1021

图像分析和识别

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 1054

计算机图形学

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 1068

虚拟现实与增强现实

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 1074

遥感图像处理

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣赜, 符鹏 1095

第2届全国图像图形联合学术会议专栏

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 1112

CONTENTS

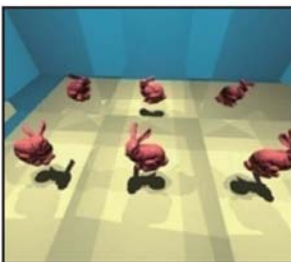
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

Review

Review of spectral printer characterization

Wan Xiaoxia, Liu Qiang 0985

Image Processing and Coding

Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field

Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing 0998

Light field image rectification and refocus method for Lytro camera

Zhou Wenhui, Lin Lili 1006

Multi-feature fusion-based image morphing

Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu 1012

The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion

Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin 1021

Image Analysis and Recognition

Robustness to noise of central projection transformation

Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei 1031

Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature

Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen 1038

Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot

Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing 1046

Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding

Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang 1054

Computer Graphics

Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations

Li Ruirui, Qin Kaihuai 1062

Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views

Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai 1068

Virtual Reality and Augmented Reality

Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing

Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong 1074

Remote Sensing Image Processing

PFA imaging with range migration correction by compressive sensing

Duan Huajun, Zhu Daiyin 1085

Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image

Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng 1095

Column of UCIG'2013

Eye tracking based image quality assessment database and visualization method

Zhang Yun, Mou Xuanqin 1104

Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment

Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye 1112

中图法分类号: TN956.9 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-1085-10

论文引用格式: Duan H J, Zhu D Y. PFA imaging with range migration correction by compressive sensing[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 1085-1094. [段化军, 朱岱寅. 带距离徙动校正的压缩感知 PFA 成像方法[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 1085-1094.] [DOI:10.11834/jig.20140713]

带距离徙动校正的压缩感知 PFA 成像方法

段化军, 朱岱寅

南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京 210016

摘要: 目的 极坐标格式算法(PFA)是合成孔径雷达(SAR)聚束模式下的一种高分辨率成像算法, 方位向增加孔径长度带来了数据存储和传输的负担, 利用压缩感知进行合成孔径雷达成像可以减小采样率, 以前的研究往往认为图像是2维可分离的而忽略距离徙动的影响, 造成了图像质量的下降。提出一种在方位向利用压缩感知处理的PFA成像算法, 可以校正距离徙动, 保证压缩感知成像的图像分辨率。**方法** 在方位向进行压缩感知处理的过程中, 采用了随距离空间频率变化的傅里叶基。**结果** 该方法可以有效代替PFA处理过程中的方位向插值, 消除距离徙动的影响, 保证距离向和方位向的分辨率。**结论** 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: 极坐标格式算法(PFA); 压缩感知; 距离向插值; 方位向插值; 距离徙动校正

PFA imaging with range migration correction by compressive sensing

Duan Huajun, Zhu Daiyin

College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: **Objective** Polar format algorithm is an imaging approach for spotlight mode synthetic aperture radar (SAR). It increases the load of data transmission and storage severely because of the greater synthetic aperture length. Synthetic aperture radar imaging by compressive sensing can reduce the sampling rate. Previous studies result in a decrease in image quality because they assume that the two dimensions of images are separable and ignore the range migration. An imaging approach based on range-cross compressive sensing is presented. It can correct the range migration and ensure the range and range-cross resolution of the image. **Method** The method introduces the Fourier basis varying with the range spatial frequency, reconstructing the image based on compressive sensing. **Result** It ensures the range and range-cross resolution because it may be an efficient substitute for Polar format algorithm range-cross interpolation and eliminates the range migration. **Conclusion** The simulations and live data processing results show the validity of the proposed approach.

Key words: polar format algorithm (PFA); compressive sensing; range interpolation; range-cross interpolation; range migration correction

0 引言

极坐标格式算法(PFA)是合成孔径雷达聚束模

式下的一种高精度成像算法。载机在飞行过程中, 雷达天线始终照射目标区域, 通过增加孔径时间, 提高方位向分辨率。相比条带模式, 对于同一场景, 聚束模式必然增加雷达脉冲回波的数据量, 增加了数

收稿日期: 2013-10-16; 修回日期: 2014-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61071165); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0069); 航空科学基金项目(20102052024)

第一作者简介: 段化军(1976—), 男, 现为南京航空航天大学通信与信息系统专业博士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达成像技术。E-mail: dhj5816@sina.com

据采样和存储的负担。压缩感知(CS)方法^[1-2]可以有效解决信号采样和存储带来的问题,以往的研究结果表明,如果信号在某个域里可以稀疏和压缩,那么就可以以远远低于 Nyquist 采样率的速率对信号进行采样,然后通过求解最优化问题,就可以对信号进行精确或者近似恢复重构^[3-4]。

当压缩感知理论提出后,很多学者对压缩感知在雷达成像方面的应用提出了不同的方法。Baraniuk 等人^[5]对压缩感知用于合成孔径雷达(SAR)成像进行了理论分析和研究;Tello 等人^[6]提出了压缩感知下基的构建方法,并给出了仿真和实际数据结果;Shi 等人^[7]提出了1维距离向超宽带信号的压缩感知处理方法;Jouny^[8]提出了超宽带信号的稀疏重构方法。以上方法只是建立在1维距离向信号的稀疏和重建以及对线性调频信号的脉冲压缩基础上,并没有对后续的方位向成像提出分析和研究。另外,还有基于某一维压缩感知处理的2维SAR成像算法,谢小春和肖鹏等人^[9-10]提出了在1维距离向进行压缩感知处理实现距离压缩,然后对处理后的信号进行方位向成像;Potter^[11]和 Alonso^[12]对SAR信号的稀疏性和随机测量策略进行了分析和研究,并提出了进行压缩感知处理的方法;Rilling^[13]主要研究了极坐标格式下的压缩感知处理,并对SAR信号的稀疏性特点以及利用压缩感知进行雷达成像的可行性进行了分析,通过压缩感知实现了逆快速傅里叶变换(IFFT)成像的过程;Patel^[14]对聚束模式SAR的方位向压缩感知处理方法进行了分析和处理,并给了SAR和ISAR(inverse synthetic aperture radar)的成像结果。以上算法都是在距离向或者方位向进行压缩感知处理,在处理时都没有考虑距离徙动的影响。利用压缩感知进行2维联合成像目前由于受信号恢复算法的限制,文献比较少,陈超^[15]利用梯度投影算法实现了2维联合成像,刘纪红等人^[16]提出了改进的正交匹配追踪(MOMP)算法进行2维的联合成像。但以上算法最大的问题就是构建2维联合基矩阵过大而难以操作或者没有考虑距离徙动的影响,在建立基矩阵时认为2维是可分离的。但是通过以往的成像经验知道,飞机在飞行过程中,由于和目标之间的距离不断变化,最短距离和最大距离之间的差一般都超过了几个距离单元,如果不考虑距离徙动的影响,通过以上压缩感知方法处理的数据降低了图像本身的分辨率,造成了图像的散焦。本文采用聚束模

式SAR回波数据,对回波数据在方位向进行随机抽取,并对降采样后的回波数据首先进行匹配滤波和运动补偿以及距离向插值,然后在方位向采用压缩感知恢复。在恢复的过程中,由于采用了随距离空间频率变化的傅里叶基,将PFA的方位向插值在压缩感知恢复过程中实现,保证了距离向的分辨率和方位向的分辨率,避免了以上所述雷达成像压缩感知处理方法不能保证分辨率的问题。

1 PFA 的基本原理

SAR 聚束模式下 PFA 算法,其原理简单叙述如下:以正侧视情况为例,聚束模式 SAR 数据采集几何模型如图1所示。

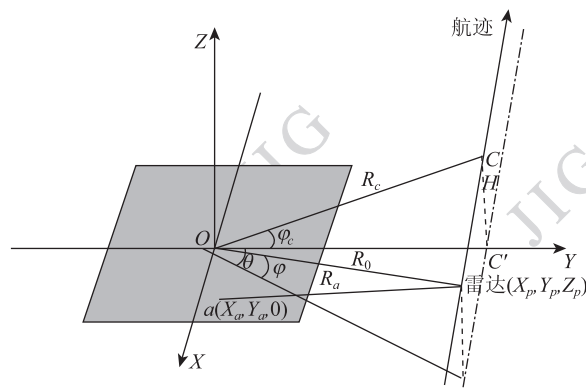


图1 聚束模式 SAR 数据采集几何模型

Fig. 1 Geometry of spotlight SAR data collection

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 $(X_a, Y_a, 0)$,其复反射系数为 σ 。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_0 ,其值分别为

$$R_0 = \sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2} \quad (1)$$

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

雷达发射线性调频信号(LFM),经目标反射后的2维回波信号为

$$S(t, \tau) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - \frac{2R_a}{c}}{T_r}\right) \times \exp\left(j\pi k\left(\tau - \frac{2R_a}{c}\right)^2\right) \exp\left(-j\frac{4\pi f_c R_a}{c}\right) \quad (3)$$

式中, $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗函数, t 为方位慢时间, 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。

利用驻留相位原理, 对式(3)进行距离向傅里叶变换并对回波信号经过匹配滤波和运动补偿, 使场景中心点的回波相位为零, 得到 PFA 处理前的信号为^[17-18]

$$S_B(t, f_\tau) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{f_\tau}{kT_r}\right) \times \sigma \cdot \exp\left(j \frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c} (R_0 - R_a)\right) \quad (4)$$

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 $R_0 - R_a$ 可表示为

$$R_0 - R_a \approx x_a \cos \varphi \sin \theta + y_a \cos \varphi \cos \theta \quad (5)$$

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

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

用空间波数域表示为

$$S_B(K_x, K_y) = \sigma \cdot \exp(j[x_a K_x + y_a K_y]) \quad (7)$$

式中, $K_x = \frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c} \cos(\varphi) \sin(\theta)$, $K_y = \frac{4\pi(f_c + f_\tau)}{c} \cos(\varphi) \cos(\theta)$ 分别表示方位和距离空间频率。

对式(6)距离向插值后, 可以得到

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

距离向插值之后进行方位向插值, 对回波信号进行 keystone 变换, 也就是对式(8)作变换

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

经过变换之后的回波信号变为

$$S_{KT}(t, f_\tau) = \sigma \cdot \exp\left[j x_a \frac{4\pi}{c} f_c \cos(\varphi_0) \frac{vt'}{R_c}\right] \times \exp\left[j y_a \frac{4\pi}{c} (f_c + f_\tau) \cos(\varphi_0)\right] \quad (10)$$

回波信号由梯形信号变换为矩形信号。再通过 2 维的逆傅里叶变换就可以得到场景的图像。

2 基于压缩感知的合成孔径雷达 PFA 成像方法原理

2.1 压缩感知的基本原理

压缩感知理论是近年发展起来的一种信号处理方法, 只要信号在某一个域满足可稀疏和可压缩的要求, 就可以以低于奈奎斯特采样率的方式对信号进行采样并可以对信号精确恢复。其原理在文献[1-4]中有详细介绍, 在这里只简单介绍如下:

假设复信号 $s \in \mathbb{C}^N$, 可以用正交稀疏基矩阵 $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_N\}$ 稀疏表示 $s = \Phi\theta$, θ 为稀疏向量。通过观测矩阵 $A \in \mathbb{C}^{M \times N}$ ($M < N$), 可以得到测量信号 $r = As$ 。若字典 (Dictionary) $\Psi = A\Phi$ 满足 RIP (restricted isometry property) 准则, 则可以通过求最优解的方法精确或者近似精确地恢复原始信号^[19], 即

$$\min \|\theta'\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \|r - \Psi\theta'\|_2 < \varepsilon \quad (11)$$

式中, ε 为噪声容限, θ' 为稀疏向量估值。

2.2 基于压缩感知的合成孔径雷达 PFA 成像方法原理

当采用压缩感知恢复处理的方法时, 最重要的是稀疏矩阵的构建和观测矩阵的设计以及信号恢复。

首先介绍一下本文所述方法稀疏矩阵的构建。对于 SAR 信号的稀疏性问题已经有人做过研究^[5,11]。如果场景中某些区域的雷达回波反射强度明显强于场景中其他区域, 则可认为场景稀疏。实际的场景的稀疏度往往是不知, 第一可以通过先验知识确定图像的稀疏度; 第二就是在系数回复时, 采用自适应的方式。文献[20]提出了一种改进的 SP 算法 (MSP) 对信号的稀疏度进行自适应的估计, 实现稀疏信号的重构。

假设整个场景方位向长度为 R , 雷达方位向的分辨率为 ρ_a 。在第 j 个距离波门上, 各个方位向分辨单元上的反射系数可以组成一个 1 维向量, 即

$$\sigma_j = [\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_i, \dots, \sigma_{l-1}, \sigma_l] \quad (12)$$

式中, $l = R/\rho_a$, 向量 σ 是稀疏的, 也就是向量 σ 中某些点上的反射系数为零或者相对于其他点上的反

射系数可以忽略。

根据图 1, 场景中心点目标的方位坐标为 0, 可以构造基矩阵

$$\Phi = \begin{bmatrix} \exp\left[j(-x_L) \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0) \frac{vt}{R_c}\right] \\ \vdots \\ \exp\left[j(-x_l) \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0) \frac{vt}{R_c}\right] \\ \vdots \\ \exp\left[j(0) \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0) \frac{vt}{R_c}\right] \\ \vdots \\ \exp\left[j(x_l) \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0) \frac{vt}{R_c}\right] \\ \vdots \\ \exp\left[j(x_L) \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0) \frac{vt}{R_c}\right] \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中, $L = R/2\rho_a$, $x_L = R/2$, $x_l = l\rho_a$ ($l = 0, \dots, L$), f_j 为距离向空间频率 ($-f_s/2 \leq f_j \leq f_s/2$, f_s 为采样频率)。将式(13)代入式(8), 取第 j 个距离波门可以得到

$$S_R(t, f_j) = \sigma_j \Phi \exp\left[jy_t \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0)\right] \quad (14)$$

观测矩阵 $\mathbf{A}$ 选择为高斯随机矩阵, 也就是方位慢时间 t 不是按照 PRF (脉冲重复频率) 等间隔采样, 而是在随机的脉冲时刻接收回波脉冲, 就可以得到每个距离波门上的压缩感知采样的回波数据 $S_{RCS}(t_{cs}, f_j)$ 。由压缩感知的理论可知, 只要 $M \geq cK \log(N/K)$, 则字典 $\Psi = \mathbf{A}\Phi$ 在很大概率下具有 RIP 性质 (其中 c 是一个很小的常数, K 是稀疏度), 如式(11)所示, 则可以从 M 个观测值 $S_{RCS}(t_{cs}, f_j)$ 中以很高的概率恢复长度为 N 的 K -项稀疏信号 $\sigma_j \exp\left[jy_t \frac{4\pi}{c}(f_c + f_j) \cos(\varphi_0)\right]$ 。对每一个距离波门上的数据都恢复后, 再对距离向作逆 Fourier 变换, 就可以成像。

在 PFA 方法中通过 2 维插值实现了 2 维解耦合。本文方法基矩阵的构建如式(13)所示, 由于基矩阵 Φ 中的 f_j 随距离向空间频率而变化, 所以保证了同一目标点的回波通过压缩感知方法恢复后, 在不同距离向空间频率上处于同一方位位置, 起到了方位向插值的作用, 故本文方法, 可以代替方位向插值的过程。

3 基于压缩感知的合成孔径雷达 PFA 成像方法的处理过程

本文方法的具体处理过程如图 2 所示。

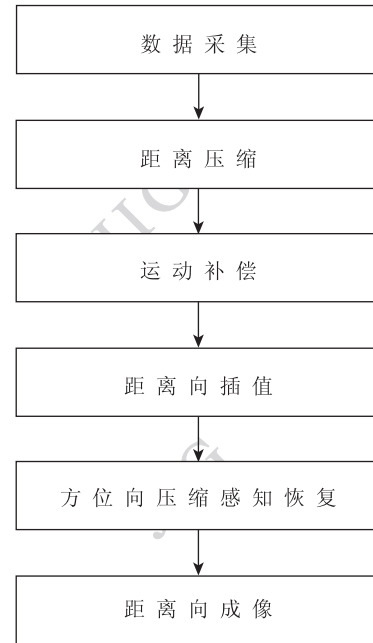


图 2 方位向压缩感知图像处理过程

Fig. 2 Processing diagram of cross-range compressive sensing

1) 数据采集。载机在飞行过程中, 雷达发射机按照原来的脉冲重复频率发射功率。雷达接收的脉冲数为压缩感知后所要求的脉冲个数, 并且接收脉冲的时刻随机分布, 如图 3 所示。

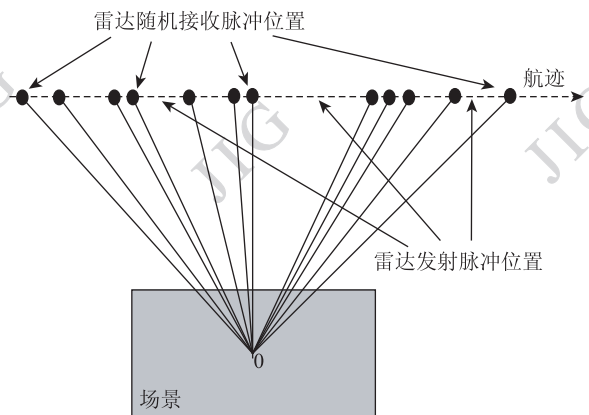


图 3 压缩感知工作情况下雷达发射接收脉冲位置图

Fig. 3 Transmitted and received pulse location in compressive sensing

雷达按照压缩感知的低采样要求随机地接收脉冲。根据前面的分析,通过随机接收雷达回波,也就是信号的观测矩阵是随机观测矩阵,保证了信号恢复的 RIP 要求。

在进行仿真数据处理时,采用上述数据采集过程。在进行实测数据处理时,对连续脉冲回波信号,采用随机抽取的方式取得的稀疏信号。

2) 匹配滤波和运动补偿。每一个被接收的雷达回波数据存贮之后,对每个接收的脉冲数据进行匹配滤波和运动补偿,这个处理过程和 PFA 处理过程一样,这里不再重复。

3) 距离向插值。根据 PFA 的原理,在完成回波的匹配滤波和运动补偿之后,进行距离向插值。本文方法的距离向插值与 PFA 算法的距离向插值最大的不同是距离向插值是基于慢时间随机抽取情况下的插值。对每个接收脉冲回波信号的插值原理和过程同 PFA 的插值过程和原理相同。插值过程如图 4 所示。

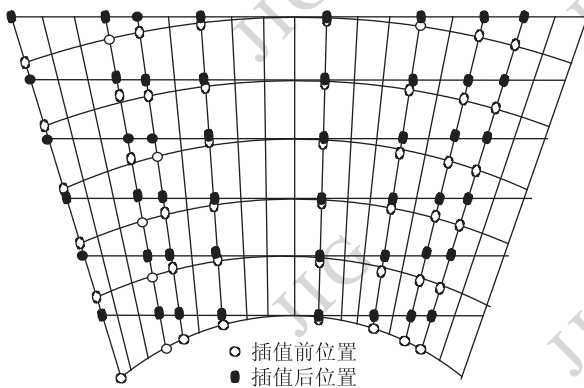


图 4 方位稀疏信号下的距离向插值示意图

Fig. 4 Range interpolation diagram in cross-range sparse signal

距离向插值对回波信号逐脉冲的完成 1 维插值。每一个脉冲的接收时刻 t 已知,因此对每一个脉冲可以利用 PFA 中距离向插值的方法进行插值,如图 4 所示。为了显示与 PFA 方法插值的关系,图 4 绘出了 PFA 方式下的脉冲回波,如图 4 中每一个交叉点的位置。在完成距离向插值之后,回波信号由扇形信号变换为梯形信号。

4) 方位向压缩感知恢复。在完成距离向插值之后,按照 2.2 节所述的方法进行方位向的稀疏恢复成像。前面已经讨论过,方位向稀疏恢复可以完全代替 PFA 方法中的方位向插值,可以通过下面的仿真结果说明压缩感知恢复的结果和 PFA 方位向

插值后结果的一致性(仿真参数同第 4.1 节中的仿真参数)。

图 5 中为 3 个点的仿真结果,中间一条曲线为场景中心点的曲线,其他两条为位于场景中心两侧点目标的仿真曲线。从图 5(a)可以看出,两侧的曲线不是一条垂直直线,分别往两侧倾斜;从图 5(b)和图 5(c)可以看出两侧的曲线为垂直直线,本文方法和 PFA 方法中处理的效果相同。

5) 距离向 Fourier 变换成像。由于在方位向恢复的过程中很好地保留了距离向的相位信息 $\exp\left[jy_i \frac{4\pi}{c}(f_c + f_r)\cos(\varphi_0)\right]$,所以再对距离向作 Fourier 变换就可以成像,此步骤与 PFA 算法相同。



(a) PFA 未作方位插值直接方位压缩的曲线



(b) PFA 方位向插值后方位压缩后的曲线



(c) 压缩感知方法方位向恢复后的曲线

图 5 方位向插值和本文方法对方位曲线的影响对比

Fig. 5 Cross-range curve comparison of cross-range interpolation and the method in this paper

4 仿真及实测数据处理结果

为了便于比较,对相同的仿真参数和相同的实测数据采用 PFA 算法和本文方法以及未进行距离徙动校正的处理结果进行了对比。

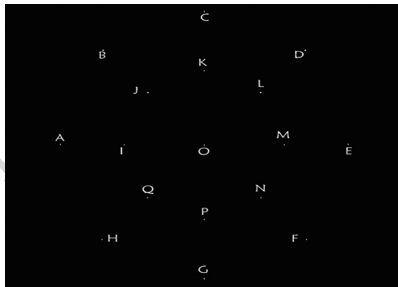
4.1 仿真处理结果

仿真主要参数如下:雷达波长 $\lambda = 3.0$ cm,发射线性调频信号带宽 $B = 300$ 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、方位分辨率均为 $\rho = 0.5$ m。地面放置 17 个点,除场景原点外,其他点分别呈同心圆状分布,内圆半

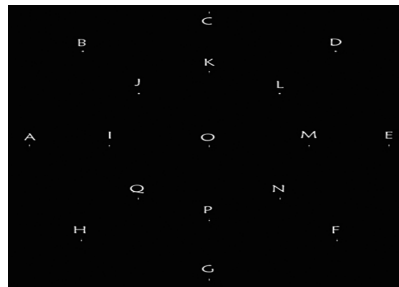
径为 50 m,外圆半径为 90 m,每个圆上共有 8 个点。压缩感知处理方位向脉冲抽取 1/4,其仿真结果图 6 所示。

通过比较图 6(a)~(c)可以看出前两种方法的成像结果相同,而未进行距离徙动的处理结果明显有点目标聚焦不充分的现象(如图 6(c)中 A、B、C、D 等点)。

图 7 为图 6 中点 A、I、O、M、E 所在的距离波门上不同点目标回波的幅度图。通过图 7 可以看出,本文压缩感知方法和 PFA 算法的结果完全相同,而优于未进行距离徙动校正的压缩感知方法,而图 7(c)中除中心点外的其他 4 个点明显散焦。



(a) PFA算法成像结果



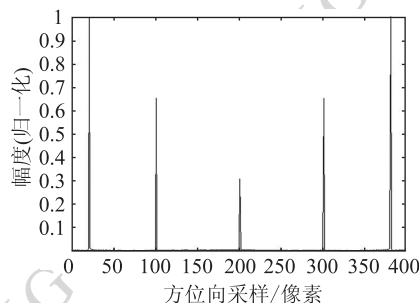
(b) 压缩感知成像结果



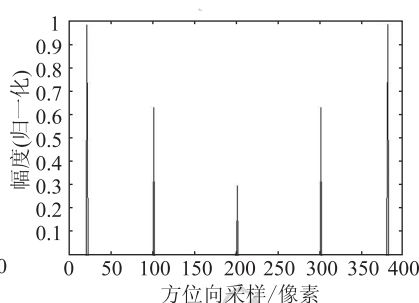
(c) 未进行距离徙动校正的压缩感知成像结果

图 6 17 个点目标的仿真成像结果仿真图

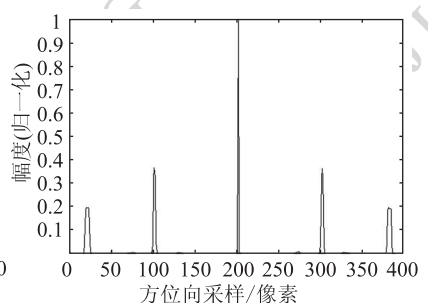
Fig. 6 Simulation data processing results of 17 targets



(a) PFA算法处理结果



(b) 本文所述方法处理结果



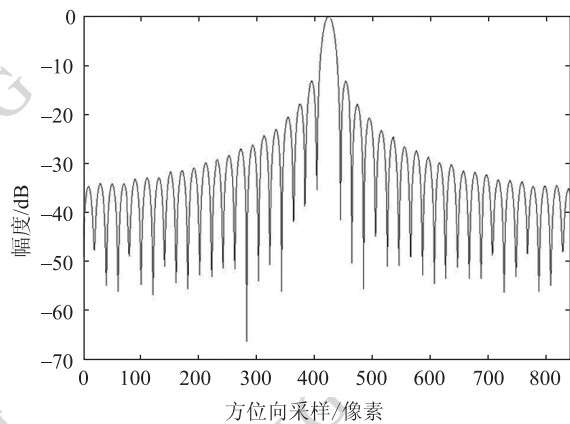
(c) 未进行距离徙动校正的压缩感知处理结果

图 7 同一距离波门上各点目标回波强度仿真结果

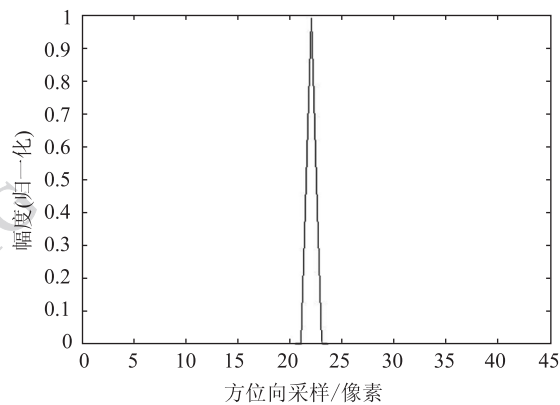
Fig. 7 Echo signal amplitude on the same range gate

图 8 为图 6 中 A 点点目标方位向剖面图。可以看出,本文方法的结果优于 PFA 和未进行距离徙动校正的压缩感知处理方法。传统的脉压结果是基于谱分析的结果,其脉压结果是 sinc 函数,分辨率取决于 sinc 函数的宽度。采用压缩感知的方法完全可以实现脉冲压缩的效果,其结果是单位冲击脉冲,

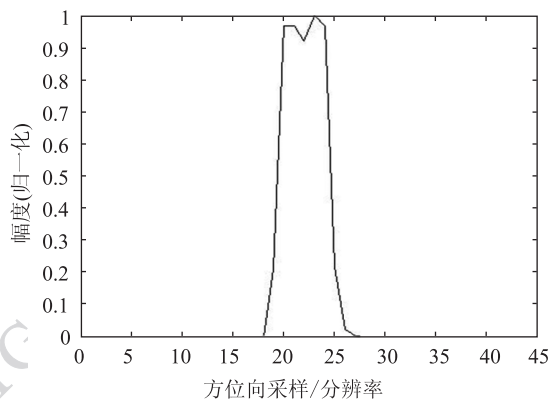
没有副瓣^[10]。其图像分辨率取决于方位向离散化情况,当地面方位向离散化的分辨率 ρ_a 小于传统雷达的分辨率时,能得到比传统方法更好的分辨率效果,这就是利用压缩感知可以实现超分辨率的原因^[21]。图 8(c)的点目标明显展宽,造成了分辨率的下降。



(a) PFA算法点目标方位向剖面图



(b) 本文方法点目标方位向剖面图



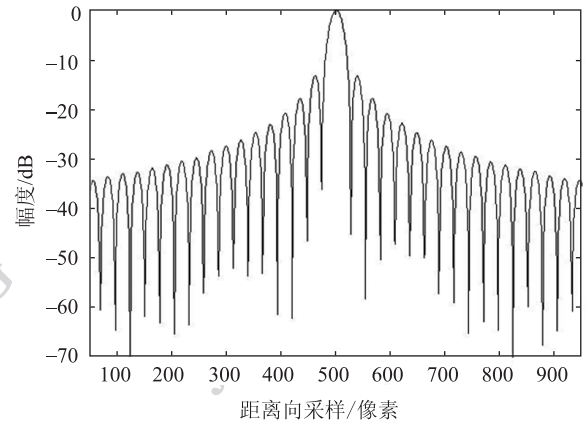
(c) 未进行距离徙动校正的点目标方位向剖面图

图8 点目标成像结果方位向剖面图

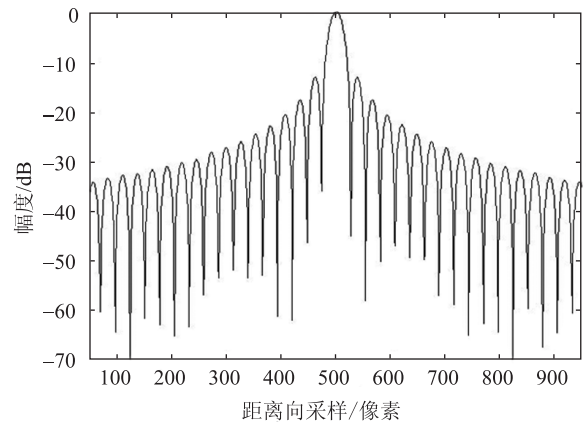
Fig. 8 Cross-range section drawing of a target imaging result

图9为图6中A点点目标距离向剖面图。可以看出,压缩感知的方法和PFA方法成像结果在距离向的剖面图几乎完全相同。通过压缩感知恢复的信号可以很好地保留距离向的相位信息,再进行距离向Fourier变换与PFA方法得到几乎完全相同的距离向脉冲压缩效果。而优于未进行距离徙动算法的

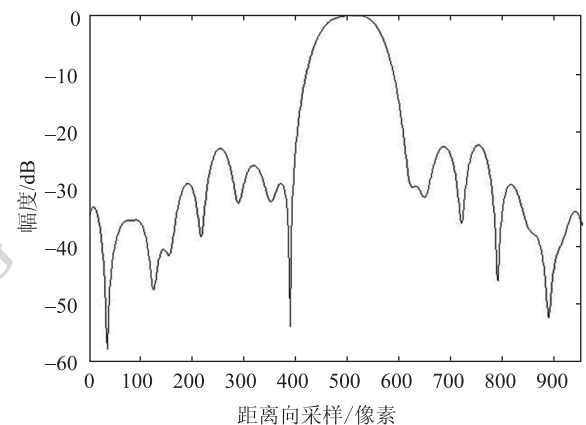
压缩感知方法的处理结果,图9(c)的点目标明显散焦。



(a) PFA算法点目标距离向剖面图



(b) 本文所述方法点目标距离向剖面图



(c) 未进行距离徙动校正的点目标距离向剖面图

图9 点目标成像结果距离向剖面图

Fig. 9 Range section drawing of a target imaging result

为了说明本文方法和PFA算法结果的一致性,对图6(a)(b)之间的均方误差(MSE)和峰值信噪比(PSNR)进行计算,即

$$\text{MSE} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (|X(i,j)| - |Y(i,j)|)^2}}{M \times N} \quad (15)$$

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{255^2}{\text{MSE}} \quad (16)$$

式中, M 和 N 分别代表两幅图像的方位点数和距离点数, X 和 Y 分别代表 PFA 算法所得的图像和本文方法所得的图像。

PSNR 的值随采样率的变化曲线如图 10 所示。

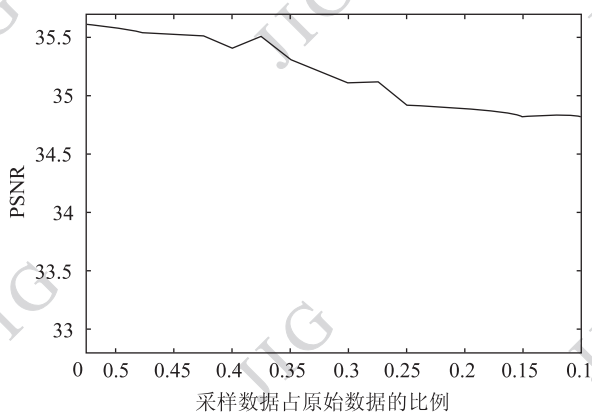


图 10 PSNR 随采样率的变化曲线

Fig. 10 PSNR varying curve with the sampling rate

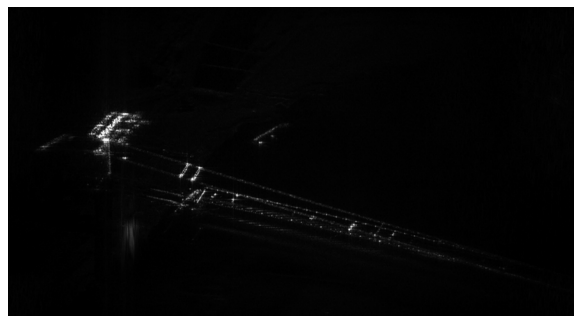
4.2 实测数据处理结果

通过实测数据验证本文压缩感知方法的有效性。主要参数如下: 雷达载频 $f_c = 15$ GHz, 发射线性调频信号带宽 $B = 180$ MHz, 距离向采样率 $f_s = 210$ MHz, 脉冲宽度 $\tau = 7.5$ μ s, 载机速度 $V_p = 75$ m/s, 脉冲重复频率 $PRF = 1000$ Hz。图 10 为雷达对某铁索大桥 PFA 算法和本文方法的成像结果。

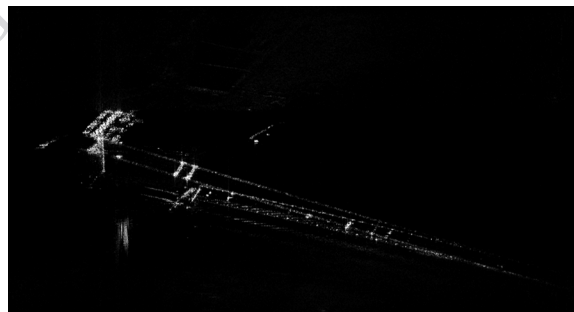
通过对比图 11(a) 和图 11(b)(c) 两幅图像的结果, 虽然数据量变成了原来的 1/2、1/4, 但是恢复出来的图像仍然保证了图像的质量。

图 12 为图 11 中间距离波门上方位向剖面图, 通过比较可以看出, 通过本文压缩感知方法达到和 PFA 算法一样的成像效果。并且在恢复的过程中减少了噪声的影响, 提高了图像的对比度, 并且方位向的分辨率同 PFA 算法一致, 由于没有副瓣的影响, 也可以说优于 PFA 算法。

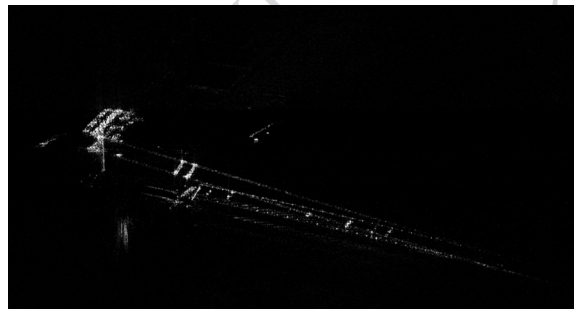
为进一步对本文方法成像质量的评估, 将本文方法的实测数据成像结果和 PFA 算法的成像结果进行幅度相关性的比较。幅度相关性为



(a) PFA算法实测数据成像结果



(b) 方位向抽取1/2压缩感知恢复的成像结果



(c) 方位向抽取1/4压缩感知恢复的成像结果

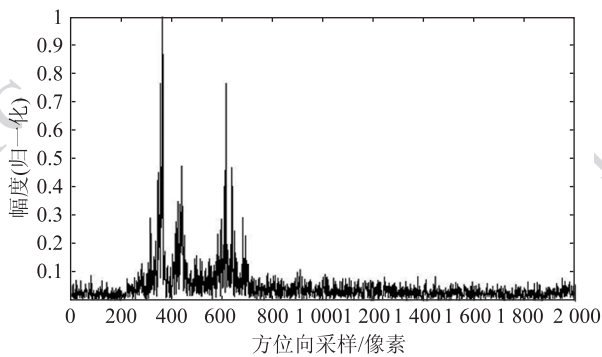
图 11 PFA 算法和压缩感知实测数据成像结果图

Fig. 11 Live data processing results of the PFA and the compressive sensing method

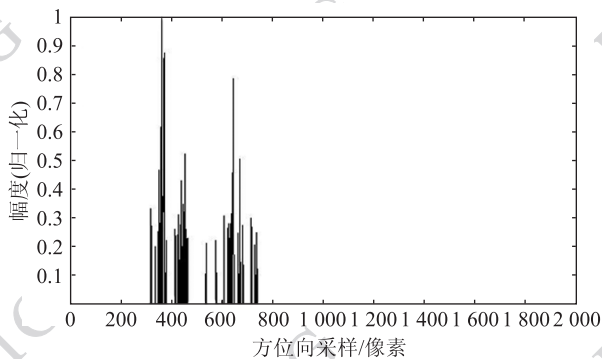
$$\rho = \frac{E[|M_1| |M_2|]}{\sqrt{E[|M_1|^2] E[|M_2|^2]}} \quad (17)$$

M_1 和 M_2 分别代表 PFA 算法和本文方法所得到的两幅图像各个点的复散射系数, 对两幅图像的幅度求相关所得的相关系数为 0.74。由于 PFA 所得的结果中有噪声, 而本文方法中没有噪声, 这在一定程度上影响了相关系数。如果只取图像的有效部分, 这将在很大程度上提高相关系数。通过相关性的比较, 可以得到本文方法结果和 PFA 算法结果具有良好的幅度一致性。

通过实测数据验证了本文方法的有效性, 并且保证了图像方位向和距离向的分辨率, 不会影响图像的质量。



(a) PFA算法实测数据方位向剖面图



(b) 本文方法实测数据方位向剖面图

图 12 实测数据同一距离波上方位向剖面图

Fig. 12 Cross-range section drawing on the same range gate the live data processing result

5 结 论

现代 SAR 对图像的分辨率越来越高,这造成了数据存储和传输的压力。压缩感知可以在保证数据精确恢复的基础上有效降低数据的采样率。针对聚束模式 SAR,提出一种基于方位向压缩感知处理的合成孔径雷达 PFA 成像方法,该方法采用了随距离空间频率变化的傅里叶基,在恢复重构图像的过程中可以完全代替方位向插值过程,消除了距离徙动对 2 维分辨率的影响,满足了 PFA 算法的分辨率要求,避免了以前压缩感知算法中不考虑距离徙动而影响分辨率的问题。

利用该方法对仿真和实测数据进行了处理,通过仿真数据点目标方位向和距离向剖面图的对比,可以看出,该方法距离向处理结果和 PFA 算法完全相同,而优于未进行距离徙动校正的压缩感知方法。其方位向的处理结果优于 PFA 算法和未进行距离徙动校正的处理结果,消除了副瓣的影响。通过对实测数据的处理,证明了该方法和

PFA 算法具有良好的幅度一致性,证明了该方法的有效性。

该方法只是在方位向进行压缩感知处理,并没有对 2 维数据进行压缩感知处理的研究。在两位数据都进行压缩感知处理的情况下可以进一步减轻数据存储和传输的负担,这也是下一步需要研究的内容。

参考文献 (References)

- [1] Baraniuk R G. Compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007; 118-124.
- [2] Tsaig Y, Donoho D L. Extensions of compressed sensing [J]. Signal Processing, 2006, 86(3): 549-571.
- [3] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: Exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.
- [4] Donoho D L, Elad M, Temlyakov V. Stable recovery of sparse overcomplete representations in the presence of noise[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(1): 6-18.
- [5] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging [C]//IEEE Radar Conference. Boston, MA, USA: IEEE, 2007:128-133.
- [6] Tello M, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4285-4295.
- [7] Shi G M, Lin J, Chen X Y, et al. UWB echo signal detection with ultra-low rate sampling based on compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II-Express Briefs, 2008, 55(4): 379-383.
- [8] Jouny I. Compressed sensing for UWB radar target signature reconstruction [C]//Proceedings of Digital Signal Processing Workshop and the 5th IEEE Signal Processing Education Workshop. Marco Island, FL, USA: IEEE, 2009: 714-719.
- [9] Xie X C, Zhang Y H. 2D Radar imaging scheme based on compressive sensing technique[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1234-1238. [谢晓春, 张云华. 基于压缩感知的 2 维雷达成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1234-1238.]
- [10] Xiao P, Li C S, Yu Z. On compressing sensing applied to SAR imaging[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 37(11): 1333-1337. [肖鹏, 李春生, 于泽. 合成孔径雷达压缩感知成像方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 37(11): 1333-1337.]
- [11] Potter L C, Ertin E, Parker J T, et al. Sparsity and compressed sensing in radar imaging[J]. Proceedings of the IEEE, 2010,

- 98(6): 1006-1020.
- [12] Alonso M T, Lopez-Dekker P, Mallorqui J J. A novel strategy for radar imaging based on compressive sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4285-4295.
- [13] Rilling G, Davies M, Mulgrew B. Compressed sensing based compression of SAR raw data[J]. Signal Processing with Adaptive Sparse Structured Representations Version. 2009:1-6.
- [14] Patel V M, Easley G R, Healy D M, et al. Compressed synthetic aperture radar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 244-254.
- [15] Chen C. Research of two-dimensional compressing sensing based high-resolution SAR imaging[D]. Xi'an: Xidian University, 2013. [陈超. 基于2维压缩感知的高分辨SAR成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.]
- [16] Liu J H, Li X, Xu S K, et al. Compressed sensing radar imaging methods based on modified orthogonal matching pursuit algorithms[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(6): 1344-1350. [刘记红, 黎湘, 徐少坤, 等. 基于改进正交匹配追踪算法压缩感知雷达成像方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1344-1350.]
- [17] Garrana W G, Goodman R E, Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms[M]. Boston: Artech House, 1995.
- [18] Mao X H. Study on the application of PFA in SAR ultra-high resolution imaging and SAR/GMTI[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. [毛新华. PFA在SAR超高分辨率成像和SAR/GMTI中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.]
- [19] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [20] Wu Y H, Yan D. Compressive sensing image reconstruction based on MSP[J]. Computer Applications and Software, 2013, 30(7): 200-216. [吴延海, 闫迪. 基于改进SP算法压缩感知图像重构[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(7): 200-216.]
- [21] Xu J P, Pi Y M. Compressive sensing in radar high resolution range imaging[J]. Journal of Computational Information Systems, 2011, 7(3): 778-785.