

利用SPECAN算法的聚束SAR成像处理

范馨月, 皮亦鸣, 付毓生, 周非, 李振

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

【摘要】讨论了距离向去调频聚束模式SAR信号的回波模型及特点,通过对聚束SAR信号的时、频域关系的分析,给出了适合去调频后的聚束SAR数据的成像算法。该算法结合了SPECAN算法高效和标准条带成像算法精确的优点,首先采用SPECAN算法对原始数据距离向去斜,其次采用距离-多普勒算法实现方位精确聚焦,与传统的距离-多普勒算法相比,成倍地降低处理的数据量,从而可实现聚束SAR的实时成像处理。对Ku波段实际飞行数据采用该算法压缩得到高分辨率的图像,验证了理论分析的正确性和所用方法的可行性。

关键词 聚束SAR; SPECAN算法; 去调频; 条带SAR

中图分类号 TN957 文献标识码 A

Imaging of Spotlight Synthetic Aperture Radar by Applying SPECAN Approach

FAN Xin-yue, PI Yi-ming, FU Yu-sheng, ZHOU Fei, LI Zhen

(School of Electronic Engineering, UEST of China chengdu 610054)

Abstract This article discusses the character of range-dechirped spotlight SAR signal, analyzes the time and frequency domain character of dechirp SAR signal, presents imaging method of spotlight range-dechirped raw data. The new algorithm combines the advantages of two processing approaches: the efficiency of SPECAN algorithm and the precision of stripmap focusing technique, the first step of the proposed algorithm implements deramp technique representing a simplified version of the SPECAN approach, the second processing carries out the residual focusing via the use of a conventional stripmap processing procedure, in comparison with the range doppler method, this algorithm decreases the processed data with a little amount of calculation increased. The Ku band airborne spotlight SAR imaging experiment confirms its availability.

Key words spotlight SAR; SPECAN algorithm; dechirp; stripmap SAR

聚束(Spotlight)模式SAR是实现高分辨率成像的常用模式。在聚束SAR的成像算法中,常用极坐标格式算法(PFA)、Chirp Scaling算法及其改进算法、距离徙动算法(RMA)。PFA算法是最早应用于聚束SAR成像处理的算法^[1],只需两次FFT即可完成,但PFA算法从极坐标变换到矩形格时需要进行插值运算,严重降低成像处理的精度和速度。Chirp Scaling算法^[2]及其改进算法无需插值运算,仅需要复数乘法和FFT即可实现,然而,它适用于距离向线性调频信号,对于距离向已经去调频的聚束SAR信号,必须先对距离向通过复乘和插值处理,把信号恢复成线性调频信号,这不仅增大了运算量而且还将降低成像的质量。RMA算法可直接处理去调频后的回波数据^[1],它的主要缺点是需进行Stolt插值,增大了算法的复杂性并降低成像处理的精

收稿日期:2004-07-30

基金项目:高校博士点专项基金资助项目(20030614001)

作者简介:范馨月(1979-),女,硕士生,主要从事信号处理、雷达成像方面的研究;皮亦鸣(1968-),男,教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,主要从事雷达成像,雷达与导航系统方面的研究。

度。本文采用一种聚束SAR成像算法，讨论适用于机载聚束SAR的成像处理。

1 聚束SAR去调频处理的原理

聚束模式工作时，在合成孔径时间内控制雷达天线波束，使它一直照射地面的同一区域，增加了孔径

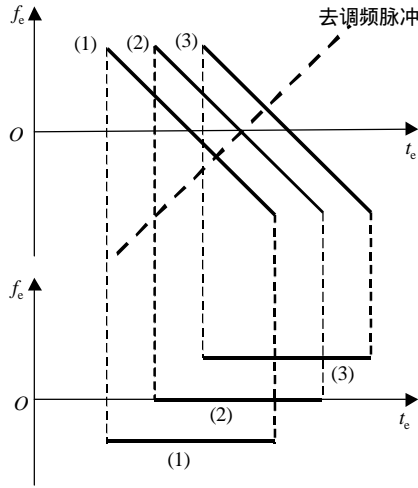


图1 去调频处理的时间-频率关系

时间，得到比一般条带SAR更宽的多普勒带宽，大大提高了方位向的分辨率^[1]。为使距离向分辨率与方位向高分辨率相匹配，须增加发射信号的带宽，而距离向采样频率 F_s 由带宽决定，通常不能低于带宽，否则会造成频谱混迭，影响最后的成像质量。随着采样频率的不断提高，增大了对A/D变换速度、数据存储容量的要求，所以在雷达接收机进行A/D采样之前会进行去调频(dechirp)处理，降低接收机输出信号的中频带宽。聚束SAR去调频技术是将接收信号与一个类似的调频信号相乘，把频率随时间线性变化的信号变成单一频率信号，该参考信号关于场景中心距离对称，且具有与发射脉冲相反的调频率。如图1所示，其中(1)、(2)、(3)分别表示近距点、中心点和远距点的回波信号，可见去调频之后线性调频信号变成了单频信号，信号的频率与目标的距离位置有关，即频域上的每个频率范围与距离向上一定位置的目标相对应。另外，去调频之后不同频率分量产生了距离时间的延迟，在时间上是不对齐的，故在距离频域引入了一个相位，称为残余视频相位(RVP)，如果不去除RVP，会产生距离相位误差，降低最后的成像质量^[3]。

斜距为 $R(t_a)$ 处的点目标的回波信号可表示为：

$$s_r(t_e, n) = \sqrt{s_t} \text{rect} \left[\frac{t_e - [2R(t_a)/c]}{t} \right] \exp \left\{ 2j\pi f_c \left(t_e - \frac{2R(t_a)}{c} \right) + j\pi k_r \left(t_e - \frac{2R(t_a)}{c} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

式中 s_t 为该点目标的反射系数； c 为光速； n 为脉冲序号； t_e 为距离向快时间； t_a 为方位向慢时间； t 为发射脉冲宽度； f_c 为发射信号中心频率； k_r 为发射信号的调频率。

选场景中心到天线中心的距离 R_0 为参考距离，则去调频的参考信号为：

$$s_{\text{ref}}(t_e, n) = \exp \left\{ 2j\pi f_c \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right) + j\pi k_r \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

回波信号经去调频之后可表示为：

$$s_{\text{IF}}(t_e, n) = s_r(t_e, n) s_{\text{ref}}^*(t_e, n) = \sqrt{s_t} \text{rect} \left[\frac{t_e - [2R(t_a)/c]}{t} \right] \exp \{ j\mathbf{j}_{\text{IF}}(t_e, n) \} \quad (3)$$

$$\mathbf{j}_{\text{IF}}(t_e, n) = -\frac{4\pi f_c}{c} [R(t_a) - R_0] - \frac{4\pi k_r}{c} \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right) [R(t_a) - R_0] + \frac{4\pi k_r}{c^2} [R(t_a) - R_0]^2 \quad (4)$$

式中 第一项使回波在方位向产生多普勒；第二项表明去调频后，距离上得到的回波为单一频率信号，其频率值与 $R(t_a) - R_0$ 有关；第三项就是RVP，在成像处理中必须去除。

2 利用SPECAN算法的聚束SAR成像处理

2.1 距离压缩

由上述分析可知，聚束SAR的去调频处理引入了RVP，不同频率分量的时延给处理带来了困难，如不加以去除，会造成匹配滤波失配。因RVP是随空间变化的，不便在时域处理，而时域中的时延等效于频域中乘以一个相位，所以，只要在频域将不同频率分量乘以一个和频率相关的相位，就可以补偿掉由时延带来的相位，再做逆FFT，使不同频率分量的回波信号在时域对齐。

设距离频率为 f_c ，将(3)变换到距离频域为：

$$s_{\text{ref}}(t_e, n) = \exp \left\{ 2j\pi f_c \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right) + j\pi k_r \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

$$\mathbf{j}'(f_e, n) = -\frac{4\pi f_c}{c} [R(t_a) - R_0] - \frac{4\pi k_r}{c^2} [R(t_a) - R_0]^2 - \frac{4\pi f_e}{c} [R(t_a) - R_0] \quad (6)$$

相位补偿项为：

$$S_{\text{RVPC}}(f_e) = \exp \frac{-j\pi f_e^2}{k_r} \quad (7)$$

将(5)式与(7)式相乘，再做逆FFT后的信号为：

$$s_{\text{rd}}(t_e, n) = \sqrt{S_t} \text{rect} \left[\frac{t_e - [2R(t_a)/c]}{t} \right] \exp \mathbf{j} \mathbf{j}_{\text{rd}}(t_e, n) \quad (8)$$

$$\mathbf{j}_{\text{rd}}(t_e, n) = -\frac{4\pi f_c}{c} [R(t_a) - R_0] - \frac{4\pi k_r}{c} \left(t_e - \frac{2R_0}{c} \right) [R(t_a) - R_0] \quad (9)$$

对比(9)式和(4)式，(4)式中第三个相位项(RVP)已消除，不同距离散射点的回波在时域已经对齐，频率直接反映各散射点的距离位置^[4]，如图2所示。

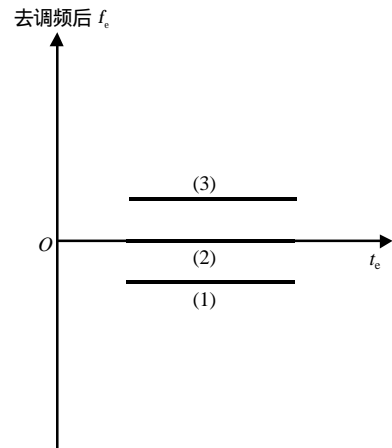


图2 去除RVP后的聚束SAR信号

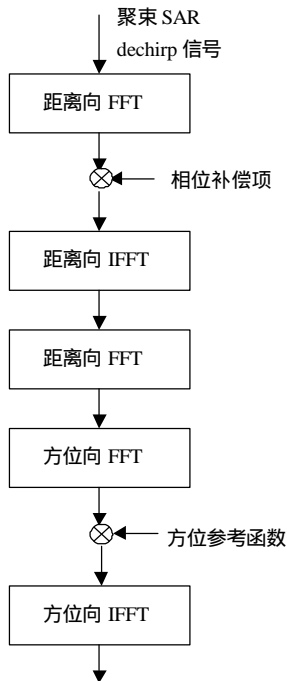


图3 算法流程图



图4 Ku 波段机载聚束SAR的成像

2.2 方位压缩

条带成像算法能精确地完成运动补偿，方位向的聚焦采用距离-多普勒算法的匹配滤波完成^[5]。整个算法的流程如图3所示。

3 实验结果

利用距离向去调频的机载聚束SAR原始数据，验证了算法对聚束数据成像的有效性。飞行试验以“运七”飞机为平台，多普勒中心频率和调频斜率分别用杂波锁定法和子孔径相关法估计^[6]，系统参数如下，载机飞行速度：118 m/s；作用距离：13 km；波长：0.019 5 m；波束角：3.5°；脉冲重复频率：2 000 Hz；采样频率：100 MHz；脉冲宽度：40 μs；带宽：80 MHz。图4示出利用SPECAN算法处理机载聚束SAR原始数据得到的高分辨率图像，图像的方位向分辨率为0.2 m，距离向分辨率为1.8 m。

(下转第209页)

出的抗噪型形态边缘检测算子 MD_7 , MD_8 , MD_9 , MD_{10} 不用任何滤波去噪也能较好的检测出图像的边缘。作为对比,传统的Sobel、Roberts、Prewitt以及LOG算子对噪声都特别敏感,在含有椒盐噪声的情况下,它们边缘检测的效果较差。

4 结束语

通过对建立形态学边缘检测可行性研究,提出在一次形态边缘检测中使用双结构元的思想并由此思想推导出了一系列一般性形态学边缘检测算子和抗噪型形态边缘检测算子。研究中提出的抗噪型边缘检测算子能很好的检测出图像的边缘明显比传统的微分型边缘检测算子更具有抗噪性能。

参 考 文 献

- [1] 龚 炜, 石青云, 程德民. 数字空间中的数学形态学 - 理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- [2] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [3] James S. L. Morphological edge detection[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA-3, (2): 142-156
- [4] Richard J F. Multidimension morphological edge detection[J]. SPIE Visual Communi- Cat Ions and Image Processing, 1987, 845: 285-292
- [5] 赵学军, 李 鹏, 宁书年, 等. 基于离散小波的数字水印在图像认证中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(5): 66-68

编辑 徐安玉

(上接第147页)

4 结束语

通过对距离向去调频机载聚束SAR信号的时、频域关系的分析,给出了适合去调频后的聚束SAR数据的成像算法。算法结合了SPECAN算法的高效和条带聚焦方法的精确,关键在于通过SPECAN算法的简化形式对聚束SAR数据的预处理,这样才能采用精确高效的条带聚焦方法完成剩余聚焦。利用SPECAN算法的聚束SAR成像处理,扩大了现有条带模式处理程序的应用范围,对实现聚束成像算法和条带成像算法的融合统一,简化多模式SAR系统非常有意义。

参 考 文 献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms [M]. Boston: Artech House, 1995
- [2] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans, on Geoscience Remote Sensing, 1994, 32(4): 786-799.
- [3] Mittermayer J, Moreira A, Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Trans on Geoscience Remote Sensing, 1999, 37(5): 2 198-2 214
- [4] Cenzo A D, Strip mode processing of spotlight synthetic aperture radar data[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1988, 24(3): 225-230
- [5] Lanari R, Tesauro M, Sansosti E, et al. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. IEEE Trans on Geoscience Remote Sensing, 2001, 39(9): 1 993-2 004
- [6] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999

编 辑 徐安玉