

一种基于最小二乘直线拟合的高分辨率 DBS 成像算法

刘 凡^{*①②} 赵凤军^① 邓云凯^① 禹卫东^① 艾加秋^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文分析了应用于扫描模式下的传统多普勒波束锐化成像算法(DBS)及其改进算法的特点和不足, 提出一种新的高分辨率多普勒锐化算法。该算法给出了相干累积点数的选取原则, 考虑了距离徙动校正, 并利用最小二乘直线拟合方法将模仿 SAR 的方位聚焦处理技术推广到一般大范围扫描情况, 较大幅度地提高了 DBS 算法的成像质量。机载雷达实测数据的处理结果证明了方法的有效性。

关键词: 扫描雷达; 最小二乘直线拟合; 多普勒波束锐化(DBS); 距离徙动校正; 去方位调频斜率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)-04-0787-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00681

A New High Resolution DBS Imaging Algorithm Based on Least Squares Linear Fitting

Liu Fan^{①②} Zhao Feng-jun^① Deng Yun-kai^① Yu Wei-dong^① Ai Jia-qiu^{①②}

^①(Department of Space Microwave Remote Sensing System, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the traditional DBS (Doppler Beam Sharpening) method and the least squares linear fitting algorithm, a new high resolution DBS imaging algorithm is delivered in this paper. The coherent processing number is discussed at first, and the range migration is corrected later. Eventually, as the focus processing of SAR, the azimuth dechirping technique is presented to improve the azimuth resolution. The processing results of real airborne radar data prove the effectiveness of the algorithm.

Key words: Scanning radar; Least squares linear fitting; Doppler Beam Sharpening (DBS); Range migration correction; Azimuth dechirping

1 引言

合成孔径雷达(SAR)成像可以不受气候、昼夜因素等影响, 能够全天候的工作, 即使在能见度差的气象条件下也能够得到高分辨率雷达图像, 是一种对地域和海域观测都很有效的手段。扫描模式是合成孔径雷达的重要工作模式之一^[1]。在对应的成像算法中, 最为常见的是多普勒波束锐化(DBS)算法, 广泛应用于扫描模式中用以改善图像的方位分辨率。合成孔径雷达在扫描工作模式下, 可以应用 DBS 成像算法在很短时间内提供天线扫描区域内的大面积图像。虽然它的方位分辨率相比条带和聚束两种模式较低, 但它具有成像面积大、运算负荷低的优势, 在战场侦查等很多领域都有着广泛应用。在不同工作模式之间, 在分辨率和计算量的要求之

间权衡, 可以得到若干工作模式。例如先用 DBS 成像算法得到较大范围的中等分辨率图像, 再对感兴趣区域用条带或聚束模式进行精细成像。

目前应用 DBS 算法的领域主要局限于合成孔径雷达/地面运动目标检测(SAR/GMTI)模式^[2-10]。文献[4]利用了 SAR 和 GMTI 雷达之间的协同关系对战场内的运动目标进行连续跟踪监视, 文献[5]指出美国著名的 Lynx 雷达具备 SAR 模式和扫描的 GMTI 模式; 文献[6]给出了扫描模式下相干累积点数的选取原则, 文献[7]得到了在 SAR/GMTI 模式下通过聚焦处理技术可以有效提高 DBS 成像质量的结论, 等等。可以看出, 对于一般大范围扫描模式下的 DBS 成像算法的研究在国内外都比较少见。由于 SAR/GMTI 模式下方位角的扫描范围一般集中在 90° 附近, 很难对更大范围进行成像, 所以对大范围扫描模式下 DBS 成像的研究是极为必要的。

2010-07-02 收到, 2010-11-25 改回

*通信作者: 刘凡 ftsinghua@gmail.com

针对以上因素, 本文利用最小二乘直线拟合方法, 推导出适用于大范围扫描模式下的高分辨率 DBS 成像算法, 通过实测数据的验证, 该算法能够大幅提高大范围扫描模式下 DBS 成像的分辨率。

2 DBS 成像算法基本原理

DBS 是合成孔径雷达重要成像算法之一, 其本质是将天线的真实波束分裂成若干个窄的子波束, 各个子波束的中心相对于雷达的径向速度不同, 从而造成了各个子波束间回波频差, 此时在频域设置一组窄带滤波器, 且该滤波器的中心和带宽都对应各个子波束的中心方位线和宽度, 可以实现多普勒频率分割, 从而有效改善方位分辨率^[6]。

图 1 为扫描工作模式时雷达与目标的几何位置关系。设机载雷达 A 沿 y 轴方向匀速直线飞行, 速度为 v , 高度为 H , 雷达天线主波束指向方位角为 θ , 俯仰角为 ϕ , 主波束中心线与地面的交点为 P , 雷达与地面 P 点的斜距为 R , 天线主波束 3 dB 宽度为 β , 雷达发射信号波长为 λ 。假设飞机运速直线向前飞行, 经过时间 t 到达新的位置 A_t , 此时到目标 P 的斜距为 R_t , 则有

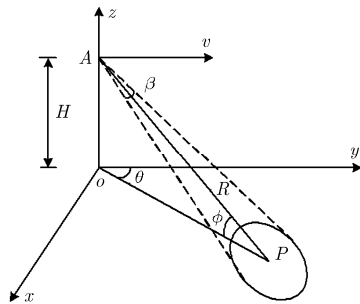


图 1 机载雷达与目标的几何关系

$$R_t \approx R - v \cos \theta \cos \phi t + \frac{v^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi)}{2R} t^2 \quad (1)$$

由式(1)可知, 地面 P 点处目标回波信号多普勒中心频率为

$$f_{d0} = -\frac{2}{\lambda} \cdot \frac{dR_t}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{2v}{\lambda} \cos \theta \cos \phi \quad (2)$$

对位于同一斜距 R 的距离环内的散射体而言, 其俯仰角 ϕ 是相同的, 但由于方位角 θ 不同, 引入的多普勒频率也不同。考虑到 β 很小, 天线主波束 3 dB 宽度对应的多普勒带宽 Δf_d 可近似为

$$\Delta f_d \approx \frac{2v}{\lambda} \beta \sin \theta \cos \phi \quad (3)$$

要对天线主波束 3 dB 宽度进行锐化, 就要用窄带滤波器对多普勒带宽 Δf_d 进行分割, 如图 2 所示。

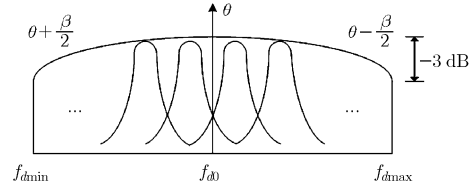


图 2 方位多普勒分辨示意图

3 DBS 成像算法的改进方法

传统的 DBS 成像算法在经过距离向的脉冲压缩和运动补偿后, 直接对回波数据作方位向 FFT, 构造出 DBS 单视图图像。这样的情况下 DBS 图像方位分辨率较低, 我们尝试用以下方法和步骤提高 DBS 图像的方位分辨率。

3.1 相干积累脉冲数的选取原则

文献[6]基于非聚焦 SAR 处理理论, 给出了相干积累脉冲个数选取原则如下:

点目标回波信号可表示为

$$s(t) \approx \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[R - v \cos \theta \cos \phi t + \frac{v^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi)}{2R} t^2 \right] \right\}, t \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2} \right] \quad (4)$$

其中 T 为处理周期, 也就是相干积累时间。要进行相干积累必须保证 $s(t)$ 中的二次相位项不超过 $\pi/2$, 即要保证式(5)成立

$$\frac{4\pi}{\lambda} \frac{v^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi)}{2R} \left(\frac{T}{2} \right)^2 \leq \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

若相干积累脉冲个数为 N , 脉冲重复频率为 f_{pr} , 则有

$$N \leq \frac{f_{pr}}{v} \left(\frac{\lambda R}{1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi} \right)^{1/2} \quad (6)$$

引入文献[7]中对方位向的聚焦处理, 可以增加相干累积数 N 以提高方位分辨率, 但为了保证 DBS 图像锐化比恒定, N 不能无限制增大, 考虑到锐化比

$$\Omega = N \cdot (\Delta f_d / f_{pr}) \quad (7)$$

则相干累积数为

$$N = \Omega \cdot \frac{f_{pr}}{\Delta f_d} = \Omega \cdot \frac{\lambda \cdot f_{pr}}{2v\beta \sin \theta \cos \phi} \quad (8)$$

若天线方位角 θ 变化范围较小时, 可按一次完整扫描为周期进行方位压缩; 若方位角 θ 变化范围增大, 则需根据式(8)调整相干累积脉冲数 N 。

3.2 距离走动补偿

若在一个处理周期中, 目标的斜距变化超过一个距离分辨单元, 即出现越距离单元走动。在相干

时间 T 内的距离走动量 ΔR 为

$$\Delta R = \frac{\lambda f_{a0} T}{2} = v \cos \theta \cos \phi \frac{N}{f_{pr}} \quad (9)$$

则由式(1)可得基本上不发生距离走动的条件为

$$\Delta R < \delta R \Rightarrow v \cos \theta \cos \phi \frac{N}{f_{pr}} < \frac{c}{2B} \quad (10)$$

其中 δR 为距离分辨单元, c 是光速, B 是发射信号带宽, 当上述条件不满足时应该加以矫正。设距离向压缩后每个点目标回波信号为 $G(m, n)$ (m, n 分别是距离向, 方位向的采样点位置), 由文献[7]得到, 此时只需对 $G(m, n)$ 乘以一个距离走动校正因子 H , 就可以去掉走动效应。

$$H = \exp \left[j2\pi \frac{mn\Delta R}{N_r N_a \delta R} \right] \quad (11)$$

其中 N_r 为距离向采样点数, N_a 方位向采样点数。

3.3 方位向去调频压缩原理

文献[7]中提出一种当天线方位角扫描范围在 90° 附近时, 将方位向多普勒中心频率近似为随方位角线性变化, 即认为点目标回波在方位向是线性调频信号, 从而进行去方位向调频斜率, 进行方位向压缩的方法。本文将上述思想进行推广和扩展, 在误差允许的范围内, 利用最小二乘和线性回归的理论, 找到最优的线性拟合解, 使得在任意的天线方位角扫描范围内, 都能够将方位多普勒中心频率最大程度地近似为随方位角线性变化, 从而对方位向进行去调频和压缩, 提高 DBS 成像的方位分辨率。

设天线方位角扫描范围为 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ ($0 < \theta_1 < \theta_2 < \pi$), 由式(2)可知方位多普勒中心频率正比于方位角的余弦值 $\cos \theta$, 用直线 $y = a\theta + b$ 对 $\cos \theta$ 进行拟合, 由最小二乘原理得到

$$F(a, b) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (a\theta + b - \cos \theta)^2 d\theta \quad (12)$$

$F(a, b)$ 是直线参数 a 和 b 的函数, 求解 $F(a, b)$ 的最小值的过程也就确定了 a 和 b 的值。对 $F(a, b)$ 展开得

$$\begin{aligned} F(a, b) &= \int_{\theta_1}^{\theta_2} (a^2 \theta^2 + b^2 + \cos^2 \theta + 2ab\theta - 2a\theta \cos \theta \\ &\quad - 2b \cos \theta) d\theta \\ &= C_1 a^2 + C_2 b^2 + C_3 ab + C_4 a + C_5 b + C_6 \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{\theta_2^3 - \theta_1^3}{3}, C_2 = \theta_2 - \theta_1, C_3 = \theta_2^2 - \theta_1^2 \\ C_4 &= -2(\cos \theta_2 + \theta_2 \sin \theta_2 - \cos \theta_1 - \theta_1 \sin \theta_1) \\ C_5 &= -2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \\ C_6 &= \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} + \frac{1}{4}(\sin 2\theta_2 - \sin 2\theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

考虑 $F(a, b)$ 在实数域可导, 且只有唯一驻点, 则该驻点必为最小值点。求解 $F(a, b)$ 驻点如下:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F(a, b)}{\partial a} &= 0 \\ \frac{\partial F(a, b)}{\partial b} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} 2C_1 a + C_3 b + C_4 &= 0 \\ 2C_2 b + C_3 a + C_5 &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} a &= \frac{C_3 C_5 - 2C_2 C_4}{4C_1 C_2 - C_3^2} \\ b &= \frac{C_3 C_4 - 2C_1 C_5}{4C_1 C_2 - C_3^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

这样就通过最小二乘和线性回归理论得到了最优解, 将 DBS 成像方位去调频方法推广到了一般情况。利用文献[7]中给出的方位线性调频信号为

$$S_a(t) = \exp \left[j\pi (2f_{a0} t + f_k t^2) \right] \quad (16)$$

其中多普勒调频斜率为

$$f_k = \frac{2v^2 (1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi)}{\lambda R} \quad (17)$$

补偿 f_{a0} 后, 构建参考函数为

$$\text{Re } f_a(t) = \exp \left(-j\pi f_k t^2 \right) \quad (18)$$

则可和原信号匹配, 实现方位去调频。

图 3 是模拟两个点目标去方位向调频斜率前、后的仿真结果图。通过对比可以看出, 在去方位向调频处理前, 两个点目标不可分辨, 而在方位向调频处理后, 两个点目标可以清晰分辨开来。由此可以看出去方位向调频斜率能够提高 DBS 图像的方位分辨率。

考虑到当扫描角扫描范围继续增大时, 采用直线拟合后的多普勒中心表达式距离真实值误差增大, 此时可采用推广的最小二乘抛物线拟合, 将多普勒中心变化表达式拟合成抛物线形式, 从而减小近似所带来的误差, 并且同样能够应用上述方法对信号的方位向进行压缩。用抛物线 $y = a\theta^2 + b\theta + c$ 对 $\cos \theta$ 进行拟合, 由最小二乘原理得到

$$F(a, b, c) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} (a\theta^2 + b\theta + c - \cos \theta)^2 d\theta \quad (19)$$

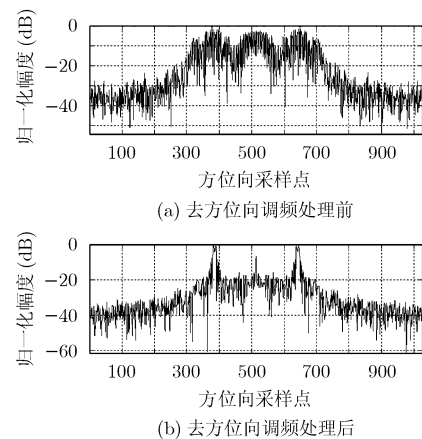


图 3 两个点目标去方位向调频斜率仿真结果图

$F(a,b,c)$ 是抛物线参数 a , b 和 c 的函数, 应用同样的方法对 $F(a,b,c)$ 求最小值, 得到 a , b , c 的值, 代入式(16)即可求得线性调频信号的表达式。此时多普勒调频率为

$$f_k' = a + \frac{2v^2(1 - \cos^2 \theta \cos^2 \phi)}{\lambda R} \quad (20)$$

4 实验结果对比分析

实验中选用海洋机载扫描的实测数据, 对舰船目标、尾迹和海浪纹进行有针对性的成像。文中采用两种 DBS 成像算法, 分别为传统 DBS 成像算法(即: 经过距离向的脉冲压缩和运动补偿后, 直接对回波数据作方位向 FFT, 构造出 DBS 单视图像)和本文提出的改进的 DBS 成像算法。图 3 所示传统 DBS 算法图像中, 采用非聚焦原理进行相干累积。为了体现改进的 DBS 算法对方位向分辨率的改进作用, 选择沿机载雷达方位向运动的舰船进行成像。

对于图 4, 图 5 两幅图像, 我们分别从运动的舰船目标、尾迹和海浪纹 3 个方面进行比较。对于传统的 DBS 成像算法, 由于相干累积点数受非聚焦 SAR 原理的限制, 成像过程中没有包含舰船目

标的全部信息, 尾迹和海浪纹也相对模糊。而改进的 DBS 算法成像结果, 舰船轮廓、尾迹和海浪纹都要清楚得多, 可以看出改进的 DBS 算法可以很大程度上提高图像的方位分辨率。

下面对海岸线和静止船只进行成像, 比较两种方法成像效果的不同。

对于图 6, 图 7 两幅图像, 我们可以更加清楚地看到, 改进的 DBS 算法对扫描模式下的方位分辨率有着大幅度的提高。

5 结论

本文研究了扫描模式下的传统多普勒波束锐化成像算法的特点和局限性, 总结了现有的改进多普勒波束锐化算法, 在其基础上进行了改进, 给出了机载扫描模式中相干累积点数的选取原则, 考虑了距离徙动校正, 采用模仿 SAR 的聚焦处理技术, 并且在误差允许的范围内, 利用最小二乘和线性回归的理论, 找到最优的线性拟合解, 使得在任意的天线方位角扫描范围内, 都能够将方位多普勒中心频率最大程度地近似为随方位角线性变化, 再对方位向进行去调频和压缩, 从而推导出了适用于大范围扫描模式下的高分辨率 DBS 成像算法, 有很好的使用价值。

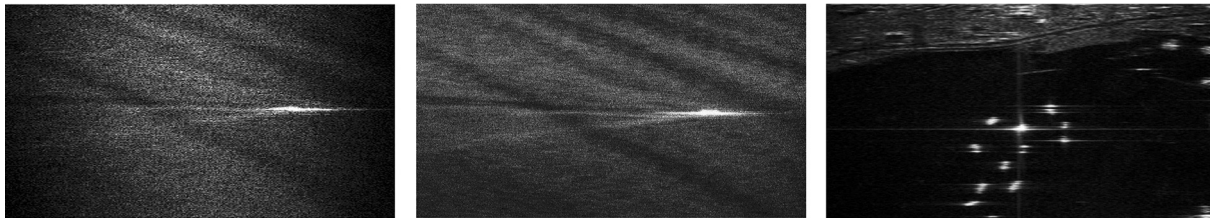


图 4 传统 DBS 算法对舰船和海浪纹成像 图 5 改进的 DBS 算法对舰船和海浪纹成像 图 6 传统 DBS 算法对海岸线和静止船只成像

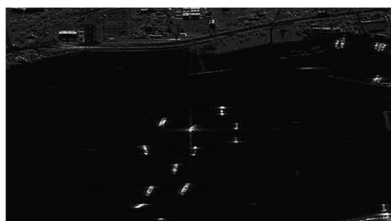


图 7 改进的 DBS 算法对海岸线和静止船只成像

参考文献

- [1] Carrar G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms. Norwood, MA: Artech House, 1995: 106-132.
- [2] Zhu Sheng-qi, Liao Gui-sheng, Qu Yi, and Zhou Zheng-guang. Space-time-range three dimensional adaptive processing. Iccasp, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, China, 2009, 4: 2037-2040.
- [3] Maori D C, Gierull C H, and Joachim Ender H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2066-2075.
- [4] Entzminger J N, Fowler C A Jr, and Kenneally W J. Joint STARS and GMTI: past, present and future[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(2): 748-761.
- [5] Tsunoda S I, Pace F, and Stence J, et al. Lynix: a High-resolution Synthetic Aperture Radar [A]. 1999, SPIE, Vol.3704: 1-8.
- [6] 李燕平, 邢孟道, 保铮. 宽带机载扫描雷达的 DBS 成像和动目标检测. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 116-120, 128.

- Li Yan-ping, Xing Meng-dao, and Bao Zheng. DBS imaging and GMTI in a wideband airborne mechanic scanning radar[J]. *Journal of Xidian University*, 2006, 33(1): 116-120, 128.
- [7] 王宏远, 危嵩, 孙文. DBS 高分辨率成像及动目标轨迹处理. 电波科学学报, 2005, 20(5): 637-641.
Wang Hong-yuan, Wei Song, and Sun Wen. High resolution DBS imaging and moving target trajectory processing. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(5): 637-641.
- [8] 杨波. 机载雷达多普勒波束锐化算法改进. 现代雷达, 2008, 30(11): 53-55.
Yang Bo. Improvement on Doppler beam sharpening algorithm for airborne radar. *Modern Radar*, 2008, 30(11): 53-55.
- [9] 于有生, 张碧雄. 一种 DBS 多普勒中心的估计算法. 测绘科学技术学报, 2008, 25(3): 176-178, 182.
Yu You-sheng and Zhang Bi-xiong. Arithmetic estimation of DBS Doppler center[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2008, 25(3): 176-178, 182.
- [10] 魏红亮, 李明. 机载扫描雷达 DBS 模式下的锐化比恒定技术研究. 火控雷达技术, 2009, 38(2): 14-18.
Wei Hong-liang and Li Ming. Study on keeping sharpening ratio constant technique in DBS mode of mechanical scanning radar[J]. *Fire Control Radar Technology*, 2009, 38(2): 14-18.
- 刘凡: 男, 1984年生, 博士生, 从事成像技术和信号处理方面的研究.
- 赵凤军: 男, 1963年生, 研究员, 长期从事雷达系统和射频微波技术的研究.
- 邓云凯: 男, 1962年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事微波遥感、通信和天线技术的研究.