

高分辨率星载聚束式 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 成像算法

王国栋¹, 周荫清², 李春升²

(1. 北京交通大学抗电磁干扰中心, 北京 100044; 2. 北京航空航天大学电子工程系, 北京 100083)

摘 要: 基于两步处理算法和 Chirp Scaling 算法, 提出一种适用于高分辨星载聚束式合成孔径雷达 (SAR) 的 Deramp Chirp Scaling (DCS) 算法. 该算法结合了谱分析 (SPECAN) 算法和 Chirp Scaling 算法的优点, 算法先采用具有固定多普勒调频率的 deramp 处理实现方位的粗聚焦, 消除了星载聚束式 SAR 特有的方位频谱混迭现象, 然后应用 Chirp Scaling 原理实现距离的精确聚焦, 并补偿 deramp 处理引起的方位相位误差, 实现方位精聚焦. 基于斜视等效距离模型, 该模型更好地拟合了星载聚束式 SAR 的空间几何关系, 推导了 DCS 算法, 给出了实现步骤, 整个算法无需任何插值操作, 只需复乘和 FFT 即可完成. 该算法适用于宽测绘带高分辨率星载聚束式 SAR 的精确成像处理. 最后, 通过计算机仿真, 验证了算法的有效性.

关键词: 合成孔径雷达; 雷达成像; 算法

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 12 1784-06

A Deramp Chirp Scaling Algorithm for High Resolution Spaceborne Spotlight SAR Imaging

WANG Guodong¹, ZHOU Yinqing², LI Chunsheng²

(1. EMC Research Section, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Dept. of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on Two Step processing approach and Chirp Scaling algorithm, a Deramp Chirp Scaling (DCS) algorithm for high resolution spaceborne spotlight synthetic aperture radar (SAR) imaging was presented. The algorithm combined the advantages of SPECAN algorithm and Chirp Scaling algorithm. Firstly, the azimuthal coarse focusing was achieved via a deramp processing with constant Doppler rate, and the azimuthal spectral folding phenomenon, which was typical for spaceborne spotlight SAR, was overcome. Secondly, the precise range focusing was achieved by Chirp Scaling principle, and the residual azimuth phase error was compensated, so the refined azimuthal focusing was acquired. Based on the squinted equivalent range model that was fitter for spaceborne geometrical relation than the broadside range model, the complete derivation of the algorithm was presented and the realizing approach was given. The whole algorithm could be implemented by complex multiplication and fast Fourier transform (FFT) without any interpolation of the data. The algorithm was suitable for wide range swath high resolution spaceborne spotlight SAR imaging. Finally, the computer simulation showed the validity of the algorithm.

Key words: synthetic aperture radar; radar imaging; algorithm

1 引言

在使用同一天线的情况下, 聚束式 SAR 可以获得比条带式 SAR 更高的方位分辨率^[1]. 在合成孔径期间, 通过操纵 SAR 天线指向, 使得 SAR 天线波束中心视角沿雷达载体飞行方向不断转动变化, 达到较长时间聚集照射于成像区域的中心, 这种波束视角转动变化提供了比条带式 SAR 更长的合成孔径时间, 从而得到比一般条带式 SAR 更宽的多普勒带宽信号,

达到提高方位向空间分辨率的目的. 为避免方位频谱混迭, 通常要求脉冲重复频率 (PRF) 大于多普勒带宽. 机载 SAR 的 PRF 较高, 一般可以满足此要求, 而对于星载 SAR, 过高的 PRF 将引起严重的距离模糊、极高的数据率, 甚至导致系统无法实现. 因此星载聚束式 SAR 系统通常采用对应星载条带式的 PRF^[2,3], 即 PRF 往往远小于回波信号总的多普勒带宽, 然后通过成像算法消除这种星载聚束式 SAR 特有的方位频谱混迭, 这也是星载聚束式 SAR 成像算法的主要难点之一.

极坐标格式算法是较早应用于聚束式 SAR 成像处理的算法^[1,4], 只需两次 FFT 即可成像, 是一种成熟有效的聚束式成像处理算法。但是, 极坐标格式算法需在方位向和距离向进行插值运算, 将降低成像处理的精度和速度。此外, 极坐标格式算法忽略了距离弯曲的影响, 限制了最大可成像区域范围, 并造成成像区域像素分辨率的不一致。

随着 SAR 成像算法的发展, 条带式 SAR 成像算法引入到聚束式 SAR 的成像处理。波数域算法^[5]是基于一种近似 SAR 工作模式的散射模式来进行公式推导的, 其主要思路是基于波动方程分析距离处理后信号的二维频谱。该算法可以完全校正距离徙动, 成像处理较为精确。距离徙动算法^[1]是波数域算法的改进算法, 可直接处理 dechirp 后的回波数据。波数域算法及其改进算法的主要缺点是需进行 Stolt 插值, 这将增大算法的复杂性并降低成像处理精度。Chirp Scaling (CS) 算法^[6]及其改进算法^[7-9]的优点在于无需插值运算, 并且只需复数乘法和 FFT 即可实现该算法。A. Moreira 等人提出一种 Extended Chirp Scaling 算法^[8]将 CS 算法推广到聚束式 SAR 成像处理, J. Mitemayer 等人提出一种 Frequency Scaling 算法^[9], 是 CS 算法的变形算法, 可以直接处理 dechirp 后的回波, 实现聚束式 SAR 的成像处理。

对于上述条带式 SAR 成像算法, 要求回波方位信号是线性调频信号, 应用于聚束式 SAR 时如何避免 PRF 小于多普勒带宽引起的方位频谱混迭是算法的主要困难。一种方法是采用子孔径处理^[10], 将回波数据按方位时间平均分为多个子孔径, 每个子孔径的多普勒带宽均满足 PRF 的要求, 从而可以应用条带式成像算法^[8,9]。但对于高分辨率的星载聚束式 SAR, 卫星轨道弯曲的影响不可忽略^[11], 将引起子孔径合并时距离向位置失配, 如何精确补偿是子孔径应用的主要困难。

R. Lanari 等人提出一种两步处理算法^[12], 较好的解决了方位频谱混迭的问题和成像的聚焦处理。算法第一步采用 SPECAN 算法^[13]的 deramp 处理, 完成方位粗聚焦, 并消除了方位频谱混迭; 第二步采用条带式聚焦算法, 完成剩余的聚焦处理, 该算法采用了一种基于 Chirp Z 变换的聚焦算法^[14]。随即, 该算法被推广到条带/聚束混合模式的成像处理^[15]。但是两步处理算法是基于机载正侧视模型推出的, 而星载聚束式 SAR 的空间几何关系则近似为斜视模型, 且高分辨率的情况下距离徙动量较大, 限制了该算法的应用, 且该算法在距离聚焦时采用了二次逼近距离模型, 忽略了三次以上的高次项, 会引入一定误差。

基于两步处理算法的思想和 Chirp Scaling 算法, 本文采用斜视等效距离模型直接推导出一种 Deramp Chirp Scaling 算法。该算法仍采用 deramp 处理完成方位的粗聚焦, 然后依据 chirp scaling 原理实现距离的精确聚焦, 与两步处理算法的距离聚焦方法相比, 具有更大的聚焦深度, 此外补偿了 deramp 处理后的残余方位相位误差, 实现方位精聚焦。根据斜视等效距离模型, 对相应的 Chirp Scaling 因子进行了修正, 避免了斜视模式下距离频谱的混迭。该算法适用于星载聚束式 SAR 的高精度成像, 并可推广到机载聚束式 SAR 的大斜视角成像处理。

2 Deramp Chirp Scaling 算法

2.1 斜视等效距离模型

如图 1 所示, 斜视等效距离模型为^[18]

$$R(t; r) = \sqrt{r^2 + v^2 t^2 - 2rvt \cos U} \quad (1)$$

对于星载聚束式 SAR, 目标与卫星之间的距离变化规律十分复杂, 没有显式解。式(1)是一种比较精确的星载聚束式 SAR 距离模型。

式(1)中 r 为合成孔径中点处($t=0$)的斜距, v 为雷达平台运动的等效速度, U 为等效斜视角。在实际的

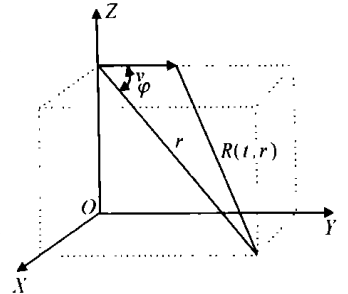


图 1 斜视等效距离模型

成像处理中, 可通过精确估计多普勒中心频率 f_d 和多普勒调频率计算等效速度和等效斜视角。

$$v = \sqrt{(Kf_d/2)^2 + Kf_r/2} \quad (2)$$

$$U = \arccos(-Kf_d/2v) \quad (3)$$

2.2 回波模型

点目标的回波信号可表示为

$$\begin{aligned} ss(S, t; r) &= R \# \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{spat}}}\right) \# \text{rect}\left(\frac{S - 2R(t; r)/c}{T_p}\right) \\ &\quad \# \exp\left\{-j \frac{4P}{K} R(t; r)\right\} \# \exp\left\{-j P b \left[S - \frac{2}{c} R(t; r)\right]^2\right\} \\ &= R \# \text{rect}\left(\frac{S - 2R(t; r)/c}{T_p}\right) \# \exp\left\{-j P b \left[S - \frac{2}{c} (r + S r)\right]^2\right\} \\ &\quad \# \exp\left\{-j \frac{4P}{K} r\right\} \# \exp\left\{-j \frac{4P}{K} S r\right\} R \# \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{spat}}}\right) \\ &= R \# \text{rect}\left(\frac{S - 2R(t; r)/c}{T_p}\right) \# \exp\left\{-j P b \left[S - \frac{2}{c} (r + S r)\right]^2\right\} \\ &\quad \# \exp\left\{-j \frac{4P}{K} r\right\} \# s_a(t; r) \end{aligned}$$

式中 c 为光速, K 为发射脉冲波长, b 为调频率, R 为点目标后向散射特性, T_p 为脉冲宽度, T_{spat} 为聚束式 SAR 合成孔径时间。 S, t 分别为距离向和方位向时间, $R(t; r)$ 是点目标到雷达的斜距。 $\text{rect}(t)$ 为矩形窗函数, 当且仅当 $|t| \leq 1/2$ 时不为零。 $s_a(t; r)$ 是方位多普勒项。为便于 deramp 处理分析, 式(4)中的 $R(t; r)$ 做了近似展开, 对式(1)做泰勒展开, 并忽略三次以上的高次项, 为

$$R(t; r) \approx r + \frac{K}{2} f_d t + \frac{K}{4} f_r t^2 = r + S r \quad (5)$$

$$\text{式中 } f_d = -\frac{2v}{K} \cos U \quad (6)$$

$$f_r = \frac{2v^2}{K^2} \sin^2 U \quad (7)$$

2.1.3 Deramp Chirp Scaling 算法分析

DCS 算法的主要流程与两步聚焦算法相同, 分为方位 deramp 处理和距离聚焦两部分, 如图 2 所示。但由于采用的距离模型不同, DCS 算法修正了方位 deramp 处理方法, 此外应用 chirp scaling 原理实现距离聚焦。

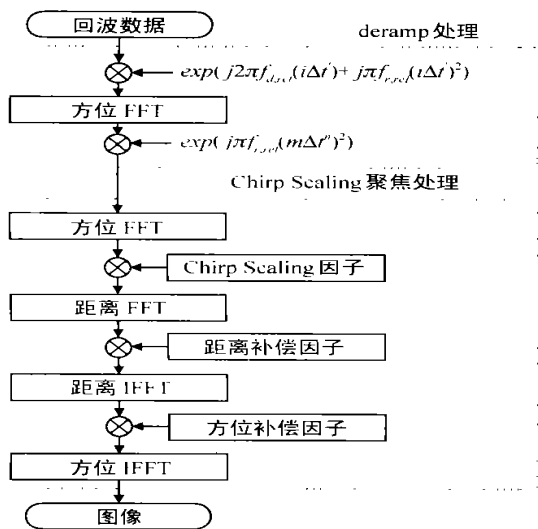


图2 Deramp Chirp Scaling 算法流程图

2131.1 方位 deramp 处理 方位 deramp 处理是将回波的方位多普勒项与具有相同多普勒调频率的参考函数进行卷积, 从而去掉线性调频信号的二次相位项, 并使输出的信号能量只集中到某一单一频率上。

如图3所示, deramp 处理前点目标的多普勒带宽为 B_d , 不同方位位置点目标总的多普勒频率偏移量为 B_a , 则回波信号总的多普勒带宽为 $B_d + B_a$, deramp 处理后信号的多普勒带宽则降为 B_a , 而 B_a 的最大值即对应的条带式 SAR 的多普勒带宽^[1], 则在星载聚束式 SAR 系统采用与星载条带式 SAR 相同 PRF 的情况下, deramp 处理可避免方位频谱的混迭。

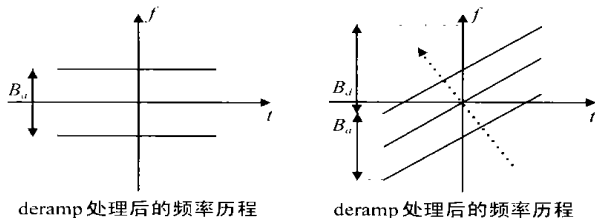


图3 Deramp 处理示意图

方位 deramp 处理参考函数为

$$S_{rd} = \exp(jP f_{r,rd} t^2) \quad (8)$$

式中 $f_{r,rd}$ 是合成孔径中点时参考距离 r_{rd} 的多普勒调频率。参考距离没有特殊限定, 通常选择合成孔径中点处雷达与场景中心点的斜距。与 SPECAN 算法不同, 参考函数的调频率是常数, 不随距离门变化, 这样可以保留剩余系统传输函数的空变特性, 这是方位 deramp 处理的关键^[13]。

对于斜视成像, 为避免 deramp 的卷积操作引起方位混迭, 需根据合成孔径中点时参考距离 f_{rd} 的多普勒中心频率 $f_{d,rd}$ 对回波引入一个线性相位项, 修正后回波的方位多普勒项为

$$s_a(t; r) = s_a(t; r) \# \exp(j2P f_{d,rd} t) = \exp(-j2P(f_d - f_{d,rd})t) \# \exp(-jP f_{r,rd} t^2) \quad (9)$$

方位多普勒项式(9)与参考信号式(8)的卷积为

$$s_a(t; r) = s_a(t; r) * S_{rd}(t; r_{rd}) = \exp(jP f_{r,rd} t^2) \# \text{rect}\left(\frac{S}{T_{\text{spot}}}\right) \# \exp(-j2P(f_d - f_{d,rd})S - jP(f_r - f_{r,rd})S^2) \# \exp(-j2P f_{r,rd} t S) \quad (10)$$

对于 $r = r_{rd}$ 处的点目标, 忽略复常数, 式(10)可简化为

$$s_a(t; r) = \exp(jP f_{r,rd} t^2) \# \text{sinc}\left[\frac{2P}{L} \frac{T_{\text{spot}}}{T_{\text{strip}}} \sqrt{\sin U_{d,t}}\right] \quad (11)$$

式中 L 为方位向天线长度, T_{strip} 为对应条带式 SAR 的合成孔径时间, $U_{d,t}$ 为参考距离处的等效斜视角。由式(11)可见 $r = r_{rd}$ 处的点目标方位完全聚焦。对于 $r \neq r_{rd}$ 处的点目标, 应用相位驻留原理, 式(10)可简化为

$$s_a(t; r) = \text{rect}\left\{ \frac{t - \frac{r_{rd}}{v \sin^2 U_{d,t}} (\cos U_{d,t} - \cos U)}{T_{\text{spot}} \# \left| r - r_{rd} \frac{\sin^2 U}{\sin^2 U_{d,t}} \right|} \right\} \# \exp\left\{ -j2P \frac{(f_d - f_{d,rd})}{r - r_{rd} \frac{\sin^2 U}{\sin^2 U_{d,t}}} t \right\} \# \exp\left\{ -jP \frac{f_r}{r - r_{rd} \frac{\sin^2 U}{\sin^2 U_{d,t}}} t^2 \right\} \quad (12)$$

由式(12)可见, $r \neq r_{rd}$ 处的点目标方位压缩后的信号有所展宽, 只完成了方位的粗聚焦, 方位信号的最大孔径时间 T_{ext} 为

$$T_{\text{ext}} \text{Umax} \left\{ \frac{K_{rd}}{L v \sin U_{d,t}} + T_{\text{spot}} \# \left| r - r_{rd} \frac{\sin^2 U}{\sin^2 U_{d,t}} \right| \right\} \left[\frac{K_M}{L v \sin U_M} + T_{\text{spot}} \# \left| r_m - r_M \frac{\sin^2 U_m}{\sin^2 U_M} \right| \right] \quad (13)$$

式中 r_M, r_m 分别为最大和最小斜距, U_M, U_m 为相应的等效斜视角。对于星载聚束式 SAR 系统, 通常可以满足式(13)中的不等式, 则卷积操作可视为方位压缩, 方位压缩后方位孔径时间由 T_{spot} 减小到 T_{ext} , 相应的多普勒带宽由 $f_r T_{\text{spot}}$ 减小到 $f_r T_{\text{ext}}$, 也就消除了方位频谱的混迭。

式(10)的离散实现方式为

$$s_a(m \Delta t; r) = \sum_{i=-A/2}^{A/2-1} s_a(i \Delta t; r) S_{rd}(m \Delta t - i \Delta t; r_{rd}) = \exp(jP f_{r,rd} (m \Delta t)^2) \sum_{i=-A/2}^{A/2-1} s_a(i \Delta t; r) \# \exp(j2P f_{d,rd} (i \Delta t) + jP f_{r,rd} (i \Delta t)^2) \# \exp(-j2P f_{r,rd} t c \Delta t i m) \quad (14)$$

式中 $A = T_{\text{spot}} / \Delta t$ 为回波方位采样数, Δt 为脉冲重复时间, $B = T_{\text{ext}} / \Delta t$ 为方位压缩后输出采样数, Δt 为输出采样时间间隔。式中的最后指数项可视为 FFT 的变换核。为应用 FFT 变换, 对回波信号方位补零, 使输入输出采样数 A, B 为 M , M 满足

$$\frac{1}{f_{r,rd} \Delta t} = M \Delta t \setminus T_{\text{ext}} \quad (15)$$

基于式(15), 式(14)可写为

$$s_a(m; t_d; r) = \exp(jP_{f_r, r_d}(m; t_d)^2) \sum_{i=-M/2}^{M/2} s_a(i; t_c; r) \cdot \exp(j2P_{f_d, r_d}(i; t_c) + jP_{f_r, r_d}(i; t_c)^2) \cdot \exp(j2P_{im}/M) = \exp(jP_{f_r, r_d}(m; t_d)^2) \cdot \text{DFT}[s_a(i; t_c; r) \cdot \exp(j2P_{f_d, r_d}(i; t_c) + jP_{f_r, r_d}(i; t_c)^2)]$$

$$m = -M/2, \dots, M/2-1 \quad (16)$$

式中 DFT[] 指离散傅里叶变换。为应用 FFT 变换, M 应选为 2 的指数项。由式(14)可见, 只需两次复乘和一次 FFT 即可实现 deramp 处理, 完成方位的粗聚焦。图 2 给出了实现步骤。

2.1.3.2 Chirp Scaling 聚焦处理 经过方位 deramp 处理, 参考距离处的点目标方位完全聚焦, 其它距离处的点目标则有一定展宽, 只完成了粗聚焦, 采用 chirp scaling 原理完成剩余的距离聚焦和方位精聚焦, 如图 2 所示。基于斜视等效距离模型推导算法, 推导中忽略复常数, 不影响整个算法。

对 deramp 处理后的数据做方位傅里叶变换, 得

$$\begin{aligned} \overline{ss}(S, f; r) &= \text{FT}[ss(S, t; r) \cdot \exp(j2P_{f_d, r_d})] \cdot S_{r_d}(t; r_{r_d}) \\ &= sS(S, f; r) \cdot \exp[-jP(f^2/f_{r_d})] \end{aligned} \quad (17)$$

式中 FT[] 指傅里叶变换, f 为方位频率。

点目标的回波信号为

$$\begin{aligned} ss(S, t; r) &= R \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_{\text{pdt}}}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{S - 2R(t; r)/c}{T_p}\right) \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4P}{K} R(t; r)\right] \cdot \exp\left[-jPb\left[S - \frac{2}{c}R(t; r)\right]^2\right] \end{aligned} \quad (18)$$

根据相位驻留原理, 对回波信号做方位傅里叶变换, sS(S, f; r) 为

$$\begin{aligned} sS(S, f; r) &= R \cdot \text{rect}\left(\frac{1}{T_{\text{pdt}}} \frac{-rK \sin U}{2v^2 \sqrt{1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2}}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{S - \frac{2}{c}r_f(f; r)}{T_p}\right) \\ &\cdot \exp\left[-jPb_r(f; r) \cdot \left[S - \frac{2}{c}r_f(f; r)\right]^2\right] \\ &\cdot \exp\left[-j \frac{4Pr \sin U}{K} \sqrt{1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2}\right] \cdot \exp\left[-j \frac{2Prf}{v} \cos U\right] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{式中 } r_f(f; r) = \frac{r \sin U}{\sqrt{1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2}} \quad (20)$$

$$b_r(f; r) = \frac{b}{1 + \frac{r \sin U}{c^2} \frac{2K}{\left[1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2\right]^{3/2}}} \quad (21)$$

在距离 2 多普勒域乘以 Chirp Scaling 因子 $s_1(S, f; r_{r_d})$

$$s_1(S, f; r_{r_d}) = \exp\left[-jPb_r(f; r_{r_d})C_s(f)\left[S - S_{r_d}(f)\right]^2\right] \quad (22)$$

$$\text{式中 } C_s(f) = \frac{\sin U_{r_d}}{\sqrt{1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2}} - 1 \quad (23)$$

$$S_{r_d}(f) = \frac{2}{c}r_{r_d}\left[1 + C_s(f)\right] \quad (24)$$

$$b_r(f; r_{r_d}) = \frac{b}{1 + \frac{b_{r_d} \sin U_{r_d}}{c^2} \frac{2K}{\left[1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2\right]^{3/2}}} \quad (25)$$

通过 CS 因子相乘, 使不同距离线的距离徙动曲线与参考距离 r_{r_d} 的距离徙动曲线有相同的形式, 多普勒参数随斜距的变化对距离聚焦的影响很小, 则聚焦深度较大, 可使用同一参考距离对整个测绘带聚焦。如式(23)所示, 根据斜视等效距离模型, 对 CS 因子进行了修正, 避免了距离频谱的混迭。

经过 CS 因子相乘后, 进行距离向傅里叶变换, 变换到波数域, 再乘以距离补偿因子 $s_2(f_s, f)$ 完成距离徙动校正和距离聚焦处理。

$$\begin{aligned} s_2(f_s, f; r_{r_d}) &= \exp\left\{-j \frac{P f_s^2}{b_r(f; r_{r_d})[1 + C_s(f)]}\right\} \\ &\cdot \exp\left\{j \frac{4P}{c} f_{s, r_d} C_s(f)\right\} \end{aligned} \quad (26)$$

式中 f_s 为距离频率。第一项完成二次距离压缩和距离向聚焦, 第二项完成距离徙动校正。

进行距离向逆傅里叶变换, 在距离多普勒域乘以方位补偿因子 $s_3(S, f)$

$$\begin{aligned} s_3(S, f) &= \exp\left\{-j \frac{2P}{K} S \left[1 - \sin U_{r_d} \sqrt{1 - \left(\frac{K}{2v}\right)^2}\right] + j \frac{P}{f_{r_d}} f^2\right\} \\ &\cdot \exp\{j[(1(f)) + (2(f; r_{r_d}))]\} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\text{式中 } (1(f)) = \frac{4P}{c^2} b_r(f; r_{r_d})[1 + C_s(f)]C_s(f) \left(r \frac{\sin U}{\sin U_{r_d}} - r_{r_d}\right)^2 \quad (28)$$

$$(2(f; r)) = \frac{2Prf}{v} \cos U \quad (29)$$

因为距离徙动已完全校正, 所以有关系式

$$r = \frac{cS}{2} \frac{\sin U_{r_d}}{\sin U} \quad (30)$$

式(27)中的第一指数项补偿方位 deramp 后的残余方位误差, 完成方位的精聚焦, 第二指数项补偿 CS 相位相乘中未能补偿的残留相位。

做方位傅里叶变换即完成了方位压缩, 得到 SAR 图像。

3 计算机仿真结果

3.1 仿真参数

波长: 0.103m; 方位向天线长度: 516m; 距离向天线长度: 211m; 卫星平均高度: 600km; 雷达视角: 3.5°; 发射信号带宽: 280MHz; 脉冲宽度: 33μs; 信号采样率: 300MHz; PRF: 329.8Hz; 合成孔径时间: 11.77s; 成像区域(方位@距离): 3km@9km; 方位分辨率: 1m; 斜距分辨率: 0.165m。

3.2 成像处理结果

为了验证本文算法的有效性, 进行了点目标成像仿真。根据仿真参数, 产生点目标的回波信号, 然后应用本文算法进行成像处理, 成像结果见图 4、图 5, 成像的性能分析见表 1。本文给出了近距点 $p_n(-4500\text{m})$ 、中心点 $p_c(0\text{m})$ 及远距点 $p_r(4500\text{m})$ 的仿真结果。

表 1 中 Q 是斜距向分辨率, Q 是方位向分辨率, ISLR 是积分旁瓣比, PSIR 是峰值旁瓣比, 下标 r 和 a 分别表示斜距向和方位向。考虑到天线特性类似对信号进行频域加权, 因此成像处理中方位向、距离向加权函数分别为 $F = 0.10$, $F = 0$ 。

25 的简化泰勒加权. 表 1 的成像结果分析表明, 本算法适用于高分辨率星载聚束式 SAR 成像处理, 并通过方位 deramp 处

理, 降低了对 PRF 的要求.

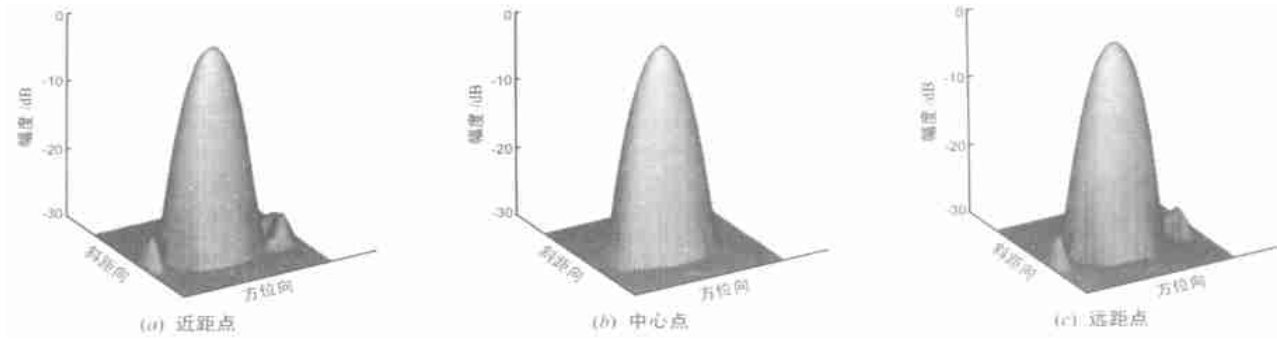


图 4 点目标响应

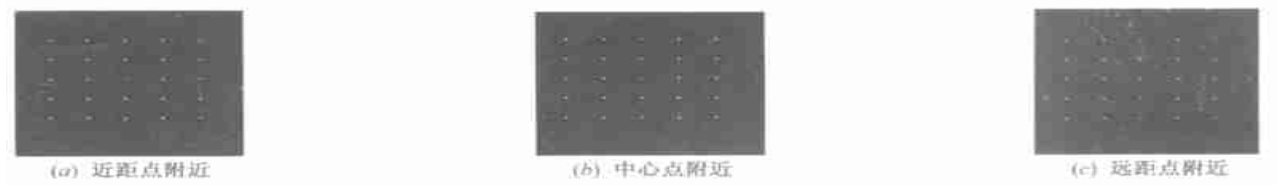


图 5 多目标成像结果

表 1 点目标成像性能分析

	距 离 向			方 位 向		
	Q (m)	$ISLR_r$ (dB)	$PSLR_r$ (dB)	Q_a (m)	$ISLR_a$ (dB)	$PSLR_a$ (dB)
P_n	0.62	- 18.1	- 30.1	0.97	- 17.6	- 25.8
P_c	0.63	- 18.5	- 28.9	0.97	- 18.3	- 27.2
P_f	0.63	- 18.2	- 29.8	0.98	- 17.1	- 25.7

4 结 论

基于两步处理算法的原理, 提出一种适用于高分辨星载聚束式 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 算法. 算法先采用具有固定多普勒调频率的 deramp 处理实现方位的粗聚焦, deramp 处理近似消除了方位调频信号相位的二次项, 从而克服了星载聚束式 SAR 特有的方位频谱混迭现象, 然后应用 Chirp Scaling 原理实现距离的精确聚焦, 并补偿 deramp 处理引起的方位相位误差, 实现方位精聚焦. 算法的推导基于斜视等效距离模型, 该模型更好地拟合了星载聚束式 SAR 的空间几何关系. 仿真结果表明, 该算法适用于高分辨率星载聚束式 SAR 成像处理.

对于高信号带宽的聚束式 SAR 系统, 通常先对回波信号进行距离 dechirp 处理, 以降低信号采样率. 对于这种信号, 仍可先采用方位 deramp 处理完成方位粗聚焦, 再借鉴文献[9]的 Frequency Scaling 原理完成距离压缩及方位精聚焦. 我们将在以后的研究工作中给出研究结果.

增加运动补偿及距离频率三次项修正后^[16, 17], 本文算法可适用于机载大斜视角聚束式 SAR 成像处理.

参考文献:

[1] W G Camara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar[M]. Boston: Artech House, 1995.

[2] F Caltagirone, P Spera, R Vigliotti, G Manoni. SkyMed/ COSMO mission overview[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings[C]. Seattle WA USA: IEEE, 1998. 683- 685.

[3] G D Duchak. Discoverer 0 : A space architecture for information dominance[A]. IEEE International Radar Conference[C]. Alexandria VA USA: IEEE, 2000. 9- 17.

[4] C V Jakowalz, Jr D E Wahl, P H Eichel, D C Ghiglia, P A Thompson. Spotlight Mode Synthetic Aperture Radar: a Signal Processing Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.

[5] C Cafforio, C Prati, F Rocca. SAR data focusing using seismic migration techniques[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1991, 27(2): 194- 207.

[6] R K Raney, H Runge, R Banler, I G Cumming, F H Wong. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 1994, 32(4): 786- 799.

[7] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35- 38.

[8] A Moreira, J Mittermayer, R Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for air2and spaceborne SAR data processing in stripmap and scan SAR imaging modes[J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 1996, 34(5): 1123- 1136.

[9] J Mittermayer, A Moreira, O Loffeld. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 1999, 37(5): 2198- 2214.

[10] A Moreira. Real2time synthetic aperture radar processing with a new subaperture approach[J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 1992, 30(4): 714- 722.

[11] J J Mohr, S N Madsen. The impact of curved satellite tracks on SAR focusing[A]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings[C]. Honolulu Hawaii USA: IEEE, 2000. 87- 89.

- [12] R Lanari, M Tesaro, E Sansosti, G Fornaro. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach [J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing 2001, 39(9): 1993- 2004.
- [13] M Sack, M R Ito, I G Cumming. Application of efficient linear FM matched filtering algorithms to SAR processing [J]. Proc Inst Elect Eng 1985, 132(1): 45- 57.
- [14] R Lanari. A new method for compensation of the SAR Range Cell Migration Based on the Chirp Z-transform [J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing, 1995, 33(5): 1296- 1299.
- [15] R Lanari, S Zofoli, E Sansosti, G Fornaro, F Serafino. New approach for hybrid stripmap/spotlight SAR data focusing [J]. IEEE Proc Radar, Sonar Navig, 2001, 148(6): 363- 372.
- [16] A Moreira, Y Huang. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans, on Geosci. Remote Sensing 1994, 32(5): 1029- 1040.
- [17] 黄岩. 高分辨率星载合成孔径雷达成像处理技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1999.

作者简介:



王国栋 男, 1971 年生于山西太原市, 博士, 讲师, 1998 年于北京航空航天大学获工学硕士学位, 期间主要从事组合导航系统、卫星导航系统的研究; 2002 年于北京航空航天大学获工学博士学位, 期间主要从事信号与信息处理、高分辨率雷达成像方面的研究, 目前的研究兴趣主要为信号与信息处理、电磁计算及电磁兼容。



周荫清 男, 1936 年生于湖南湘潭, 1959 年毕业于北京航空学院, 现为北京航空航天大学教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 中国宇航学会/宇航学报编委, 目前主要从事高分辨率星载合成孔径雷达成像处理、分布式小卫星合成孔径雷达、阵列信号处理与空间谱估计、信息对抗等方面的研究工作。