

星载聚束式 SAR 改进的 Frequency Scaling 成像算法

王国栋,周荫清,李春升
(北京航空航天大学电子工程系,北京 100083)

摘要: 本文提出一种适用于星载聚束式合成孔径雷达(SAR)的改进 Frequency Scaling 算法.基于斜视距离等效模型,推导出改进的 FS 算法,给出改进的 FS 因子和相关因子以及算法的实现步骤.在斜视情况下改进的 FS 因子可避免距离向频谱混迭,并可进行更精确的二次距离压缩,改进的方位因子可以减小算法所需要的方位时间展宽,提高方位处理效率.为解决高分辨率星载聚束式 SAR 脉冲重复频率(PRF)过高等问题,在算法中结合了子孔径处理,并分析了采用子孔径处理的必要性及其实现方法.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; Frequency Scaling 算法; 子孔径处理

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 03-0381-05

Refined Frequency Scaling Algorithm for Spaceborne Spotlight SAR Imaging

WANG Guo-dong, ZHOU Yin-qing, LI Chun-sheng

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

Abstract: A refined frequency scaling algorithm for spaceborne spotlight synthetic aperture radar (SAR) imaging is presented. The algorithm can process dechirped raw data directly. Based on the squinted range equivalent model that is fitter for spaceborne geometrical relation than the broadside range model, the complete derivation of the algorithm is presented and the refined frequency scaling factors of each signal domain are given. The refined factors can process the secondary range compression more accurately and avoid that range bandwidth is aliased or shifted outside the processed bandwidth for squinted mode. The refined azimuth scaling factor can decrease azimuth time expansion and improve efficiency of azimuth processing. Besides, in order to decrease very high pulse repetition frequency (PRF) and data rate of spaceborne spotlight SAR and alleviate the design difficulties of spaceborne system, a subaperture approach is introduced. The necessity and implementation of the subaperture approach are analyzed. Finally, the computer simulation shows the validity of the refined algorithm.

Key words: SAR; radar imaging; frequency scaling algorithm; subaperture processing.

1 引言

对于 SAR 成像处理,适用于聚束式 SAR 的算法主要有极坐标格式算法、距离徙动算法和 Chirp Scaling 算法^[1],文献[1]对这几种算法进行了详尽的分析.与极坐标格式算法、距离徙动算法比较,CS 算法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. CS 算法要求回波在距离上是线性调频信号,采样率较高,但聚束式 SAR 通常在接收时进行解线性调频(dechirp)处理,以降低采样率要求.

J Mittermayer 等人提出一种 Frequency Scaling 算法^[2],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.文献[2]的 FS 算法是根据机载正侧视模型推出的,适用于机载正侧视或小斜视角的成像处理;而星载聚束式 SAR 的空间几何关系则近似为斜视模型,且距离徙动量较大,限制了 FS 算法的应用.本文基于斜视距离等效模型直接推导出一种改进的 FS 算法,并提出修正的 FS 因子和

相关因子,避免了斜视模式的距离频谱的混迭,并可进行更精确的二次距离压缩.该算法适用于星载聚束式 SAR 的高精度成像.此外,为降低高分辨率星载聚束式 SAR 的脉冲重复频率(PRF),减小数据率,避免严重的距离模糊,算法中结合了子孔径处理.

2 改进的 FS 算法

2.1 斜视距离等效模型

如图 1 所示,斜视等效距离模型为^[3]

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

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.由于聚束式

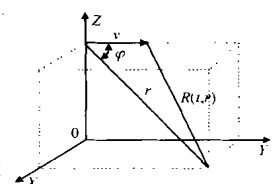


图 1 斜视等效距离模型

SAR 合成孔径期间波束指向的持续变化,即使经过偏航控制,合成孔径时间分为子孔径后,各子孔径距离变化规律仍近似为斜视模型,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, θ 为等效斜视角.在实际的成像处理中,可通过精确估计多普勒中心频率 f_d 和多普勒调频率 f_r 计算等效速度和等效斜视角.

$$v = \sqrt{(f_d/2)^2 + f_r^2/2} \quad (2)$$

$$\theta = \arccos(-f_d/2v) \quad (3)$$

2.2 回波模型

经过 dechirp 处理后,点目标的回波信号可表示为^[2]

$$ss(t, r) = W_a(t) \cdot a\left(-\frac{2R(t; r)}{c}\right) \exp\left\{-j\frac{4}{c}R(t; r)\right\} \exp\left\{-j\frac{4b}{c}\left(-\frac{2r_c}{c}\right) \cdot (R(t; r) - r_c)\right\} \exp\left\{j\frac{4b}{c^2}(R(t; r) - r_c)^2\right\} \quad (4)$$

式中 c 为光速, λ 为发射脉冲波长, b 为调频率, r_c 为点目标后向散射特性, t 分别为距离向和方位向时间, r_c 是 dechirp 处理的参考距离,为整个合成孔径中点处天线与场景中心的斜距, $R(t; r)$ 是点目标到雷达的斜距变化.式(4)中指数项的第一项是方位多普勒项,第二项是距离信号,第三项是残余视频相位,它是 dechirp 处理引起的距离时延,需在算法中消除.

在满足大时间带宽积的条件下,式(4)又可表示为^[2]

$$ss(t, r) = W_a(t) \cdot a\left(-\frac{2r_c}{c}\right) \exp\left\{-j\frac{4}{c}R(t; r)\right\} \exp\left\{-j\frac{4b}{c} \cdot (R(t; r) - r_c)\right\} \exp\left\{j\frac{8b}{c^2} \cdot r_c \cdot (R(t; r) - r_c)\right\} * \exp(-j \cdot b \cdot t^2) \quad (5)$$

式中 $*$ 表示卷积,式(5)将回波信号表示为不需要的残余视频相位与信号有用部分的卷积,即式(5) $\exp(-j \cdot b \cdot t^2)$ 中为残余视频相位项,其余各项为信号有用部分.

2.3 改进 FS 成像处理算法

如图 2 所示,改进 FS 算法的步骤与原 FS 算法相同,但采用相位补偿因子不同.推导中忽略复常数,不影响整个算法.

2.3.1 Frequency Scaling 处理

应用相位驻留原理,作方位向傅里叶变换,将信号转换到距离多普勒域,得到

$$sS(f, r) = W_a\left(-\frac{r \sin \theta}{2v^2 \sqrt{1 - (f/2v)^2}}\right) \cdot a\left(-\frac{2r_c}{c}\right) \exp\left\{-j\frac{2 \cos \theta}{v} f\right\}$$



图 2 FS 算法流程

$$\exp\left\{j\frac{4b}{c}r_c\left(-\frac{2r_c}{c}\right)\right\} \exp\left\{-j\frac{4}{c}r \sin \theta \sqrt{1 + \frac{b}{c}\left(-\frac{2r_c}{c}\right)^2 - \left(\frac{f}{2v}\right)^2}\right\} * \exp(-j \cdot b \cdot t^2) \quad (6)$$

将式(6)中的平方根项作泰勒展开,并忽略四次项及更高项,可得

$$sS_1(f, r) = W_a\left(-\frac{r \sin \theta}{2v^2} f\right) \cdot a\left(-\frac{2r_c}{c}\right) \exp\left\{-j\frac{2 \cos \theta}{v} f\right\} \exp\left\{-j\frac{4}{c}r \sin \theta f\right\} \exp\left\{-j\frac{4b}{c}\left(\frac{r \sin \theta}{f} - r_c\right)\left(-\frac{2r_c}{c}\right)\right\} \cdot \text{src}\left(-\frac{2r_c}{c}, f; r\right) * \exp(-j \cdot b \cdot t^2) \quad (7)$$

$$f = \sqrt{1 - (f/2v)^2} \quad (8)$$

式(7) src(二次距离压缩)项为

$$\text{src}(f, r) = \exp\left\{-j\frac{2}{c^2} r \sin \theta \cdot b^2 \cdot \frac{(f^2 - 1)}{(f)^3}\right\} \cdot 2 + j\frac{2}{c^3} r \sin \theta \cdot b^3 \cdot \frac{(f^2 - 1)}{(f)^5} \cdot 3 \quad (9)$$

在距离多普勒域乘以 FS 因子 H_{FS}

$$H_{FS}(f) = \exp(j \cdot b \cdot t^2 \cdot (1 - (f) \sin \theta_{ref})) \quad (10)$$

式中 θ_{ref} 为选定参考距离 r_{ref} 对应的等效斜视角.为实现子孔径合并时距离向的对准,各子孔径的 θ_{ref} 应相同,可采用 r_c 对应的等效斜视角. CS 原理通过 CS 因子相乘使距离调频信号的调频率和相位中心产生微小的变化,这样采用新的调频率进行距离压缩后,信号的位置产生位移,使得不同距离上的目标的频域距离徙动曲线具有相同的形状,因此可以完全校正距离徙动,实现精确成像.与之类似,FS 算法通过 FS 因子的相乘,根据方位频率的变化调整距离频率,将距离频率伸缩了 $1/(f)$ 倍,使得不同斜距上目标的距离徙动曲线一致^[2].但随斜视角的增大,距离频率的变化范围增大,这种距离信号的频率偏移就可能超出成像处理器带宽,造成信号带宽的混迭或移出处理器外,并降低了距离向脉冲响应(IRF)的性能.式(10)根据斜视等效距离模型,对 FS 因子进行了修正,避免了距离频谱的混迭.

乘以 FS 因子 H_{FS} 后,经过一定变换,得到

$$sS_2\left(\frac{f}{\sin \theta_{ref}}, r\right) = W_a\left(-\frac{r \sin \theta}{2v^2} \frac{f}{\sin \theta_{ref}}\right) \cdot a\left(-\frac{2r_c}{c}\right) \exp\left\{-j\frac{2 \cos \theta}{v} \frac{f}{\sin \theta_{ref}}\right\} \exp\left\{-j\frac{4}{c}r \sin \theta \frac{f}{\sin \theta_{ref}}\right\} \exp\left\{-j\frac{4b}{c}\left(\frac{r \sin \theta}{f \sin \theta_{ref}} - r_c\right)\left(-\frac{2r_c}{c}\right)\right\} \cdot \text{src}\left(\frac{f}{\sin \theta_{ref}} - \frac{2r_c}{c}, f; r\right) \exp\left\{-j b^2 \frac{(f)}{\sin \theta_{ref}} \left(\frac{(f)}{\sin \theta_{ref}} - 1\right)\right\} * \exp\left\{-j \cdot b \cdot t^2 \cdot \frac{(f)}{\sin \theta_{ref}}\right\} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,FS 处理中引入一项较小的线性频率调制,即指数项 $\exp\left\{-j \cdot b \cdot t^2 \cdot \frac{(f)}{\sin \theta_{ref}} \left(\frac{(f)}{\sin \theta_{ref}} - 1\right)\right\}$,需在

后面的逆 FS 处理时消除。

$$SS \left(\frac{f \sin_{\theta_{ref}}}{(f)}, f; r \right) = \left\{ \begin{aligned} & \cdot W_a \left(-\frac{r \sin_{\theta_{ref}}}{2v^2 (f)} \right) \exp \left[-j \frac{4 \cdot r_c}{c} \frac{f \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \exp \left[-j \frac{2 \cdot r \cos_{\theta_{ref}}}{v} f \right] \exp \left[-j \frac{4 \cdot r \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \\ & \left[T_p \cdot \sin c \left[\frac{T_p \sin_{\theta_{ref}}}{(t)} \left\{ f + \frac{2b}{c} \left(r \frac{\sin_{\theta_{ref}}}{\sin_{\theta_{ref}}} - r_c \frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} \right) \right\} \right] \right] * SRC \left(\frac{f \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right) * HIFS \left(\frac{f \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right) \right\} \exp \left[j \frac{f^2}{b} \frac{\sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \quad (12) \end{aligned} \right.$$

式中 HIFS 函数是式(11)的二次相位调制项在频域的表达。乘以残余视频相位校正因子 H_{RVPC} , 即可消除残余视频相位误差, H_{RVPC} 为

$$H_{RVPC}(f, f) = \exp \left[-j \frac{f^2}{b} \frac{\sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \quad (13)$$

消除残余视频相位后,对回波信号作距离向逆傅里叶变换,乘以逆 FS 因子 H_{IFS} ,消除 FS 因子引入的二次相位误差。据式(12), H_{IFS} 为

$$H_{IFS}(f, f) = \exp \left[j \cdot b \cdot \frac{f^2}{\sin_{\theta_{ref}}} \left\{ \frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} \right\} \right] \quad (14)$$

至此,完成了 FS 处理。据式(12)中的 sinc 函数可看出,不同距离上散射体回波的距离徙动曲线与参考距离处的一致。

2.3.2 距离徙动校正和二次距离压缩

FS 处理后,回波信号为

$$sS_3 \left(\frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}}, f; r \right) = \cdot W_a \left(-\frac{r \sin_{\theta_{ref}}}{2v^2 (f)} \right) \cdot d \left(\frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} - \frac{2r_c}{c} \right) \exp \left[-j \frac{2 \cdot r \cos_{\theta_{ref}}}{v} f \right] \exp \left[-j \frac{4 \cdot r \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \exp \left[-j \frac{4 \cdot b}{c} \left\{ \frac{r \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} - r_c \right\} \left\{ \frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} - \frac{2r_c}{c} \right\} \right] \quad (15)$$

由于 FS 处理后,残余视频相位项已经消除,逆 FS、距离徙动校正和二次距离压缩可同时进行。在满足 $r \approx r_{ref}$ 的近似条件下,距离徙动校正因子 H_{RMC} 为

$$H_{RMC}(f, f) = \exp \left[j \frac{4 \cdot b}{c} \left\{ \frac{r_{ref} \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} - r_c \right\} \left\{ \frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} - \frac{2r_c}{c} \right\} \right] \quad (16)$$

二次距离压缩因子 H_{SRC} 为

$$H_{SRC}(f, f; r_{ref}) = \exp \left\{ j \cdot \frac{2 \cdot b^2 \cdot r_{ref} \sin_{\theta_{ref}}}{c^2} \cdot \frac{(f) \cdot ((f)^2 - 1)}{(f)^3} \left[\frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} - \frac{2r_c}{c} \right]^2 - j \cdot \frac{2 \cdot b^3 \cdot r_{ref} \sin_{\theta_{ref}}}{c^3} \cdot \frac{(f) \cdot ((f)^2 - 1)}{(f)^5} \left[\frac{(f)}{\sin_{\theta_{ref}}} - \frac{2r_c}{c} \right]^3 \right\} \quad (17)$$

对于正侧视斜距模型, r 为天线波束中心照射点目标时最近的斜距。当聚束式 SAR 为正侧视或斜视角较小时,可以用参考距离 r_{ref} 来代替式(17)中的 r ;但当斜视角较大时,就不再满足 $r \approx r_{ref}$ 的近似条件,其引起的二次距离压缩误差就不可忽略了,会使图像产生严重失真。而对于斜视等效距离模型, r 为合成孔径中点处天线与点目标的斜距,可以充分满足 $r \approx r_{ref}$ 的近似条件,减小二次距离压缩误差。

完成距离徙动校正和二次距离压缩后,作距离向傅里叶变换,并乘以距离相位补偿因子 H_{RPC} ,补偿式(12)中的第一指数项。

$$H_{RPC}(f, f; r_{ref}) = \exp \left[\frac{j \cdot 4 \cdot r_c}{c} \frac{\sin_{\theta_{ref}}}{(f)} f \right] \quad (18)$$

完成距离处理后,信号在二维频域表示为

回波信号作距离向傅里叶变换,得

$$SS_1 \left(\frac{f \sin_{\theta_{ref}}}{(f)}, f; r \right) = \exp \left[-j \frac{2 \cdot r \cos_{\theta_{ref}}}{v} f \right] \exp \left[-j \frac{4 \cdot r \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \right] \sin c \left[\frac{T_p \sin_{\theta_{ref}}}{(f)} \left\{ f + \frac{2b}{c} \left(r \frac{\sin_{\theta_{ref}}}{\sin_{\theta_{ref}}} - r_c \right) \right\} \right] \quad (19)$$

2.3.3 方位压缩

由于匹配滤波需要较长的参考函数,方位压缩采用谱分析方法。方位 Scaling 因子 H_{AS} 为

$$H_{AS}(f; r, r_{sc}) = \exp \left[j \frac{2 \cdot r \cdot f}{v} \cos_{\theta_{dc}} \right] \exp \left[j \frac{4 \cdot r}{v} \left((f) \sin_{\theta_{ref}} - 1 \right) \right] \exp \left[-j \frac{f^2}{f_{r,sc}} \right] \exp \left[-j 2 \cdot t_v(r, r_{sc}) \cdot f \right] \quad (20)$$

$$t_v(r, r_{sc}) = \frac{r_{sc} \cdot f_{dc}}{2 \cdot v^2} - \frac{r \cdot f_{dc}}{2 \cdot v^2 \cdot (f_{dc})} \quad (21)$$

式中 θ_{dc} 为各子孔径合成孔径中点对应的等效斜视角。式中第一项补偿多普勒中心频率引起的相移,文献[2,4]采用正侧视模型,对应的 H_{AS} 没有该项,而该项在方位 FFT 后对应时域方位位移,可以补偿这种时间位移,减小了谱分析所需的额外方位时间展宽。第二项消除方位的双曲线变化的相位,随后第三项在所有距离引入相同的线性频率调制,避免了谱分析方法中插值操作,该项是精确谱分析处理的关键。 $f_{r,sc}$ 是选定的 Scaling 距离 r_{sc} 处的多普勒调频率。第四项为方位时间位移项。由于不同位置的点目标具有不同的多普勒中心,引入方位 Scaling 后,虽然各点目标的多普勒调频率相同,但方位 Scaling 造成距离非 r_{sc} 处的各点目标方位位置位移,且每个点目标的孔径长度有一定的伸缩变化。为了避免位移引起的方位混迭,必须额外扩展一定的方位孔径时间。为进一步减小这种方位时间展宽,通过线性相位乘法引入一定方位时间位移,即式(20)中的第四项,可使需要的方位时间展宽与方位位置中心对称。所需方位时间展宽 T_{ext} 为

$$T_{ext} = \text{MAX}(2 \cdot t_v(r, r_{sc})) \quad (22)$$

作方位逆傅里叶变换,将信号变换到方位时间域。由于双曲线相位已消除,对数据进行方位解线性调频(deramp)处理,消除方位 Scaling 引入的二次相位项。方位 deramp 因子 H_{DER} 为

$$H_{DER}(t; r_{sc}) = \exp \left[-j \cdot f_{r,sc} \cdot (t - t_v(r, r_{sc}))^2 \right] \quad (23)$$

$$- \frac{T_{sub}}{2} - \frac{T_{ext}}{2} \quad t \quad \frac{T_{sub}}{2} + \frac{T_{ext}}{2} \quad (24)$$

作方位傅里叶变换即完成了方位压缩。经过以上步骤,就完成了整个成像处理过程。基于斜视等效距离模型的改进 FS 算法是 FS 算法在斜视情况下的推广,采用斜视等效距离模型,更符合星载聚束式 SAR 空间几何关系。

3 子孔径处理

3.1 子孔径处理的必要性

由于聚束式 SAR 合成孔径时间远大于相对应的条带式 SAR,其多普勒带宽 B_d 急剧增大。为避免方位频谱的混叠,必

须满足 $PRF > B_d$ 的基本限制. 过高的 PRF 及数据率, 也是星载聚束式 SAR 设计及实现的一个基本限制. 过高的 PRF 还可能造成严重的距离模糊. 未采用子孔径处理时, 据本文的卫星及雷达参数, 方位分辨率达到 1m 精度时, 再考虑到不同方位位置点目标的频率偏移情况, $PRF > 10000\text{Hz}$ 方能满足成像要求.

此外, PRF 与测绘带宽、脉冲宽度之间存在一个基本的限制关系:

$$\frac{2W_r \sin \phi}{c} + 2T_p + T_{sp} < \frac{1}{PRF} \quad (25)$$

式中 W_r 是测绘带距离宽度, ϕ 是天线视角, T_p 是发射脉冲宽度, T_{sp} 是保护间隔时间, 通常允许随信号距离延迟时间的变化而调整.

由于式 (25) 的限制, PRF 很高时, 必然会限制测绘带的范围以及发射脉冲宽度. 而发射脉冲宽度的减小, 则必须增大雷达发射峰值功率, 减小有效观测带, 这将加大星载聚束式 SAR 的设计及实现难度.

3.2 子孔径处理的实现

子孔径处理的示意图见图 3. 方位信号 A 和 B 分别属于成像区域的方位起始点和结束点. 应用改进 FS 算法处理回波数据前, 原始回波信号按方位时间分为 N 个子孔径, 子孔径内信号的距离向保持不变, 方位向合成孔径时间相应缩短. 为了抑

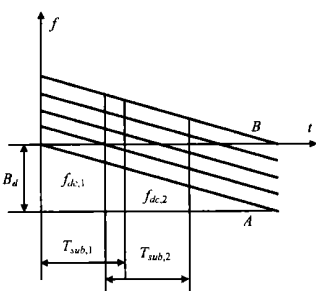


图 3 子孔径处理示意图

制旁瓣, 避免脉冲响应函数性能恶化, 子孔径之间应有一段重叠, 重叠率约 3% - 5%. 单个子孔径总的多普勒带宽可近似表示为

$$B_{d, sub} = \frac{1}{N(1 - \dots) + \dots} B_{d, max} + f_r \frac{W_a}{v} \quad (26)$$

式中第二项为不同方位位置点目标总的频率偏移量, $B_{d, max}$ 为点目标最大多普勒带宽, f_r 为多普勒调频率, W_a 为测绘带方位宽度. 这样即可以较低的 PRF ($PRF > B_{d, sub}$) 进行信号采样. 根据聚束式系统的 PRF 及式 (26) 计算出子孔径点目标的最大多普勒带宽 $B_{d, max}$, 再计算出子孔径对应的合成孔径锥角, 即可计算出子孔径的合成孔径时间长度为

$$T_{sub} = \frac{2\sin(\dots/2)r}{v \sin \dots} \quad (27)$$

各个子孔径的 T_{sub} 应保持一致, 即子孔径的方位分辨率相同. 据式 (27) 即可计算出各个子孔径的合成孔径时间起始时间、结束时间及长度. 各个子孔径的孔径时间基本相同, 考虑到子孔径的实现方法, 应将所有子孔径的孔径时间定为常数, 这个共同的子孔径时间长度应为各个子孔径时间中的最小值. 此外, 为了便于在算法中应用 FFT 处理数据, 子孔径的数据量应是 2 的指数关系.

对于每个子孔径处理, 多普勒参数采用子孔径中心的 f_d ,

f_r 完成距离处理及方位压缩后, 重新合并子孔径. 需对合并后的孔径补零, 恢复原有的方位分辨率. 最后再经方位 FFT 变换即可得到最终图像. 在整个子孔径处理中, 只需最终的方位 FFT 是完整的长 FFT 变换, 这样子孔径的处理易于并行计算, 计算效率较高.

4 计算机仿真结果

4.1 仿真参数

波长: 0.03m; 卫星平均高度: 600km; 雷达视角: 35°; 发射信号带宽: 280MHz; 脉冲宽度: 33μs; 信号采样率: 200MHz; PRF: 4500; 合成孔径时间: 1.75s; 测绘带宽: 3km × 3km; 方位分辨率: 1m; 斜距分辨率: 0.65m.

4.2 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 4~6, 成像的性能分析见表 1. 本文给出了近距点 p_n (-1500m)、中心点 p_c (0m) 及远距点 p_f (1500m) 的仿真结果.

表 1 中 r 是斜距向分辨率, a 是方位向分辨率, ISLR 是积分旁瓣比, PSLR 是峰值旁瓣比, 下标 r 和 a 分别表示斜距向和方位向. 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, 并通过子孔径处理, 降低了对 PRF 的要求.

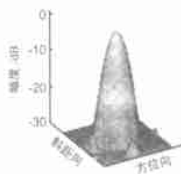


图 4 近距点的点目标响应

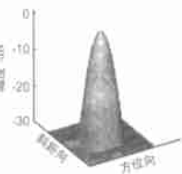


图 5 中心点的点目标响应

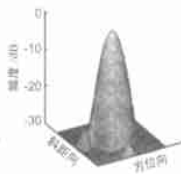


图 6 远距点的点目标响应

表 1 点目标成像性能分析

	距离向			方位向		
	r (m)	ISLR $_r$ (dB)	PSLR $_r$ (dB)	a (m)	ISLR $_a$ (dB)	PSLR $_a$ (dB)
P_n	0.64	-18.5	-26.2	0.96	-16.4	-24.7
P_c	0.63	-19.1	-29.3	0.95	-18.2	-27.1
P_f	0.64	-18.6	-26.8	0.97	-16.1	-23.4

5 结论

本文基于斜视距离等效模型, 推导出改进的 FS 算法, 该算法更符合星载聚束式 SAR 的空间几何关系; 提出了改进的 FS 因子和方位因子, 在斜视情况下改进的 FS 因子可避免距离向频谱混迭, 并可进行更精确的二次距离压缩, 改进的方位因子可以减小算法需要的方位时间展宽, 提高方位处理效率. 通过对点目标的成像结果及性能分析证实该算法的有效性. 对于窄距离测绘带, dechirp 处理可以降低对采样率的要求; 通过子孔径处理, 可以有效减小 PRF 及数据率, 提高算法的运算效率. 这样, 可降低星载聚束式 SAR 的设计和实现难度, 加快成像处理速度. 该改进算法可适用于高精度星载聚束式

SAR 的成像处理.

参考文献:

- [1] W G Carrara ,R S Goodman ,R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar [M]. Boston :Artech House ,1995.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] A Moreira J Mittermayer ,R Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for air-and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes [J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing ,1996 ,34(5) :1123 - 1136.

作者简介:



王国栋 男,1971 年生于山西太原,1998 年 4 月获北航通信与电子系统专业硕士,2002 年 11 月获通信与信息系统博士学位,主要从事高分辨率雷达成像方面的研究工作.



周荫清 男,1937 年出生于湖南湘潭,教授,博士生导师,中国电子学会会士,主要从事雷达、通信与信息系统等方面的教学和科研工作.