星载 SAR 滑动聚束模式三步扩展算法

杨 威 李春升 陈 杰 王鹏波

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对星载 SAR(Synthetic Aperture Radar)滑动聚束成像模式,结合空间几何模型沿距离向对混合度因子进行了分析及修正. 在此基础上研究了单点目标及全场景的多普勒带宽,并通过数学推导验证了两步成像处理算法克服频域混叠的有效性. 通过进一步深入研究指出了两步成像算法的局限性,即对脉冲重复频率的选择具有较高的要求,否则在方位向图像域造成混叠. 针对两步成像算法的缺陷提出三步扩展成像处理算法,在方位向聚焦后通过选择合适的 deramp 因子完成方位向的重采样,克服了方位向图像域的混叠,并研究了第三步 deramp 操作对方位向时域展宽的影响. 最后通过仿真验证了三步成像处理算法的优越性.

关 键 词: 合成孔径雷达; 滑动聚束; 两步算法; 去斜处理

中图分类号: TN 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)03-0297-06

Extended three-step focusing algorithm for spaceborne sliding spotlight SAR image formation

Yang Wei Li Chunsheng Chen Jie Wang Pengbo

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Aimed at spaceborne sliding spotlight synthetic aperture radar(SAR) imaging mode, the hybrid factor was analyzed and amended along the range direction combined the geometry model firstly. Based on the analysis, the Doppler bandwidth of both single target and whole scene were researched, and the validity of the two-step approach to overcome azimuth spectrum aliasing was proved by mathematic derivation. Moreover, the limitation of two-step approach was illuminated by thorough research. Namely, the azimuth overlapping will appear in image domain without high pulse repetition frequency. A extended three-step focusing algorithm was presented to resolve the disadvantage of two-step approach. After azimuth data focusing, a deramp operation was adopted to finish the resample in azimuth with a selected deramp factor, by which the azimuth overlapping in image domain was overcome. And, the azimuth time extension caused by deramp operation was also researched. Finally, the simulation results justify the superiority of the extended three-step algorithm.

Key words: synthetic aperture radar; sliding spotlight; two-step approach; derotation

星载合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)不受天气影响,可全天时工作,是一种新型的对地遥感观测成像雷达. 滑动聚束模式(Sliding Spotlight SAR)是星载 SAR 一种高分辨率对地遥感观测模式,同传统条带模式相比具有更高的空间分辨率,同聚束模式相比,具有更大的方位向测绘带宽度,因此滑动聚束模式近些年成为星载 SAR 领域的研究"热点"之一,尤其滑动聚束模式在 TerraSAR-X 上的成功实现使得各国科技人员更加重视该模式的应用.

星载滑动聚束模式分辨率高、方位向测绘带较聚束模式更大,因此传统的条带和聚束模式成

收稿日期: 2010-12-03; **网络出版时间**: 2012-03-09 10:37

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120309.1037.018.html

基金项目: 教育部"新世纪优秀人才"支持计划资助项目(NCET-06-0166);领航创新基金资助项目(YWF-10-01-A24)

作者简介: 杨 威(1983 -),男,湖北宜昌人,博士生,yangweigigi@ee.buaa.edu.cn.

像处理算法都难以直接适用于滑动聚束模式数据的处理. 目前,滑动聚束模式数据的处理方法从思路上主要分为以下 2 种:①两步成像处理算法. 该算法最早用于处理聚束模式的数据,第一步通过方位向 derotation 处理进行去斜操作,避免方位向频谱的混叠. 第二步利用传统的聚焦成像算法进行聚焦处理[1-3]. ②子孔径处理算法. 为缓解方位向信号的欠采样,子孔径的处理思想是首先进行方位向数据分块,缓解方位向频谱的混叠,在进行聚焦处理后,完成子孔径拼接[4-5]. 上述 2 种算法中,两步处理算法最初是针对聚束模式处理算法提出的,因此在处理滑动聚束模式数据时具有一定的限制性;子孔径处理算法需要对原始数据进行分块,适用于并行高速运算系统,但难以满足一次成像的需求.

针对两步成像算法和子孔径算法的局限性,本文提出星载滑动聚束三步扩展成像算法. 首先结合空间几何关系对混合度因子沿距离向进行修正,并通过数学推导单点目标和方位向全场景的多普勒带宽. 进而,详细推导证明两步成像算法在缓解方位向频域混叠的有效性以及在克服图像域混叠上的局限性. 针对两步处理算法的局限性引出三步扩展处理算法,增加方位向 deramp 操作,并证明其在星载 SAR 滑动聚束处理流程中的必要性. 最后通过计算机仿真试验对比分析两种处理算法性能,并给出相应的结论.

1 滑动聚束模式数据特性分析

1.1 滑动聚束模式的空间几何关系

图 1 给出了星载 SAR 滑动聚束模式工作示意图,滑动聚束工作模式下,雷达方位向波束中心指向不断调整,指向等效旋转点(rotation center point),且其旋转角速率为 ω. 为方便后续的推导,引入混合度因子 Y[1]

$$Y=\frac{r_1}{r_0+r_1} \tag{1}$$

其中,r_1 为场景中心到等效旋转点的最近距离;r_0 为仿真中心时刻雷达载荷到场景中心的距离.

1.2 方位向信号时频特性分析

由于方位向波束的扫描,因此和条带模式不同,方位向上每一个点带宽不仅取决于方位向的天线尺寸,还取决于混合度因子的大小. 图 2 给出了滑动聚束模式下信号的时频关系,并利用时频关系图推导了方位向信号的带宽.

如图 2 所示,虚线为条带模式下 3 dB 波束宽度所对应的波束线,此时方位向波束指向不随时间发生变化,因此平行于时间轴. 而在滑动聚束模式下,方位向波束指向随时间发生变化,因此其 3 dB波束宽度对应的波束线发生倾斜,如实线所示. 根据空间几何关系,不难得到如下关系:

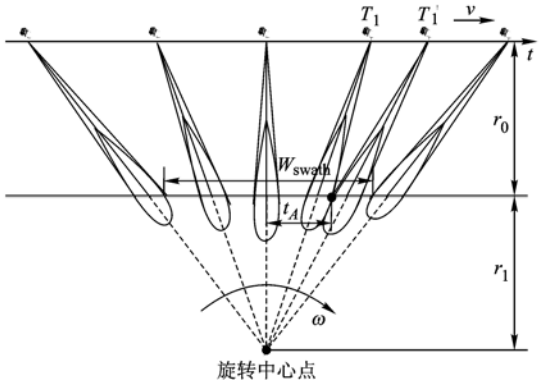


图 1 星载滑动聚束模式空间几何关系

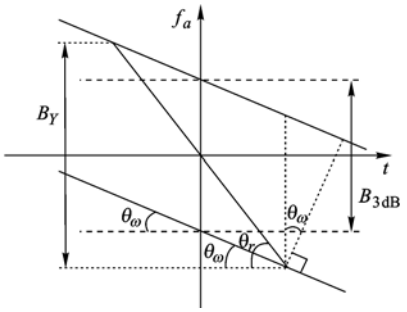


图 2 滑动聚束模式方位向时频关系图

$$k_\omega t=\Delta f=-\frac{2v}{\lambda}\Delta\theta=-\frac{2v}{\lambda}\cdot\frac{vt}{r_1+r_0} \tag{2}$$

其中,$\Delta\theta$ 为瞬时旋转角;Δf 为波束中心指向对应的瞬时多普勒频率;λ 为波长;v 为星速.

令 $\tan\theta_r=2v^2/(\lambda r_0)$ 为测绘带中心处目标的多普勒调频率,$k_\omega=-\tan\theta_\omega=-2v^2/[\lambda(r_1+r_0)]$ 为波束旋转所引起的多普勒变化率. 则由图 2 所示,每一点多普勒带宽 B_Y 为

$$B_Y=\frac{B_{3dB}\cdot\sin\theta_r\cdot\cos\theta_\omega}{\sin(\theta_r-\theta_\omega)}=\frac{B_{3dB}}{Y} \tag{3}$$

从式(3)可知,滑动聚束模式下方位向分辨率由方位向天线尺寸和混合度因子共同决定,其中定义 $B_{3dB}=2v/L$,L 为天线长度.

上述分析是针对距离向测绘带中心目标进行的,但究其本质,混合度因子是随距离向不同位置变化的,因此目标方位向带宽沿距离向空变. 目前有关滑动聚束的研究对此都采用了近似的处理方法,忽略测绘带内方位向带宽随距离向变化. 本文将从两个角度对这种现象进行说明,并在后续算法推导中考虑混合度因子的空变性.

对于滑动聚束模式,在不同距离处方位向波束扫描速度 ω 是不变的,因此方位向归一化天线

方向图为

$$W_a(t)=\mathrm{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda}\cdot\left(\frac{vt}{r}-k_\varphi t\right)\right) \tag{4}$$

其中,k_φ 为天线波束角速度:

$$k_\varphi=\frac{v}{r_0+r_1} \tag{5}$$

因此,式(4)可改写为

$$W_a(t)=\mathrm{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda}\cdot\frac{vt}{r}\cdot\left(\frac{r_1+r_0-r}{r_0+r_1}\right)\right)=$$
$$\mathrm{sinc}^2\left(\frac{L}{\lambda}\cdot\frac{vt}{r}\cdot Y\cdot\left(1+\frac{\Delta r}{r_1}\right)\right) \tag{6}$$

其中,$\Delta r=r_0-r$. 因此混合度因子可以修正为

$$Y(r)=Y\cdot\left(1+\frac{\Delta r}{r_1}\right) \tag{7}$$

由式(6)可知,等效天线长度为 $LY(1+\Delta r/r_1)$,故在滑动聚束模式下,远距处方位向分辨率高,近距处方位向分辨率低. 这一现象通过时频关系图也可明显看出,如图 3 所示,图中 r_n 和 r_f 分别代表测绘带内近端斜距和远端斜距.

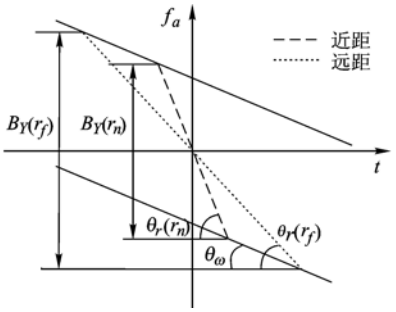


图 3　近距和远距处方位向时频关系

2　成像处理算法

2.1　两步成像处理算法

文献[1]中提出了利用两步成像算法对滑动聚束模式的数据进行处理,其核心在于第一步操作中利用 derotation 操作补偿了方位向天线波束旋转所引入的额外的带宽. 目前有关滑动聚束模式的推导中,均忽略了混合度因子随距离向测绘带位置的变化,本文将考虑混合度因子距离向的空变特性,对两步成像算法进行推导,并给出相应的结论.

分析中采用等效斜距模型,则距离变化可以写作:

$$R(t)=\sqrt{r^2+v^2(t-t_A)^2}\approx r+\frac{\lambda}{4}k_r(t-t_A)^2 \tag{8}$$

其中,t_A 表示目标在方位向上的时间;r 表示斜距;$k_r=2v^2/\lambda r$ 表示方位向调频率,忽略距离徙动、幅度因子及复常数项,方位向信号表示为

$$S(t-t_A;t_A,r)=\mathrm{rect}\left[\frac{Y(r)vt-vt_A}{X_{\Delta\theta}}\right]\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{t}{T}\right]\cdot$$
$$\mathrm{rect}\left[\frac{vt_A}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\cdot\exp\{-\mathrm{j}\pi k_r(t-t_A)^2\} \tag{9}$$

其中,$X_{\Delta\theta}=\lambda r/L$ 为波束脚印长度,上式中第一项由方位向每一点的照射时间决定,第二项由卫星工作时间决定,第三项由方位向测绘带宽度决定,对方位向信号做傅里叶变换:

$$S_f(f;t_A,r)=\mathrm{FFT}(S(t-t_A;t_A,r))=$$
$$\mathrm{rect}\left[\frac{f-k_r\dfrac{Y(r)-1}{Y(r)}t_A}{B_{3\mathrm{dB}}\dfrac{1}{Y(r)}}\right]\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{f-k_rt_A}{k_rT}\right]\cdot$$
$$\mathrm{rect}\left[\frac{vt_A}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\cdot\exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{f^2}{k_r}-2\pi ft_A\right\} \tag{10}$$

根据图 1 所示的空间几何关系,不难得到如下关系:

$$\frac{\lambda}{L}r<Y(r)vT \tag{11}$$

对式(11)进行化简可得

$$B_{3\mathrm{dB}}\frac{1}{Y(r)}<k_rT \tag{12}$$

因此,目标点 A 的多普勒带宽为 $B_{3\mathrm{dB}}/Y(r)$,而其多普勒历程 f_A 为

$$f_A\in\left[k_r\frac{Y(r)-1}{Y(r)}t_A-\frac{B_{3\mathrm{dB}}}{2Y(r)},\right.$$
$$\left.k_r\frac{Y(r)-1}{Y(r)}t_A+\frac{B_{3\mathrm{dB}}}{2Y(r)}\right] \tag{13}$$

考虑方位向积累不完全的点,则全场景内的方位向带宽 ΔF 如式(14)所示,注意 k_ω 为负:

$$\Delta F=\frac{B_{3\mathrm{dB}}}{Y(r)}-k_r\frac{Y(r)-1}{Y(r)}\frac{(vTY(r)+\lambda r/L)}{v}=$$
$$B_{3\mathrm{dB}}+k_rT(1-Y(r))=B_{3\mathrm{dB}}-k_\omega T \tag{14}$$

由式(14)可得到一个重要的结论,即距离向不同测绘带上每一点的方位向多普勒带宽不同,但方位向全场景的多普勒带宽不随距离向发生变化,从时频关系图中可对这一现象做出直观的解释,如图 4 所示,分别以点线和虚线表示测绘带远距和近距处点目标的方位向带宽,对于每一个点而言,近距处多普勒带宽小于远距处多普勒带宽. 但近距处积累不完全区域小于远距处积累不完全区域,如图中细密线区域所示. 因此不同测绘带处方位向总多普勒带宽保持一致,按式(14)计算.

对于滑动聚束模式,方位向场景多普勒带宽大于脉冲重复频率,直接进行方位向 FFT 会导致频谱混叠,为克服这一缺陷,第一步采用 derotation 操作[1,6]:

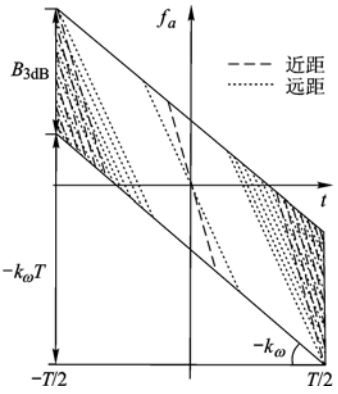


图 4 不同测绘带处方位向全场景多普勒带宽

$$S_1 = S(t-t_A;t_A,r)\otimes_t \exp\{-\mathrm{j}\pi k_\omega t^2\}\approx \mathrm{rect}\left[\frac{t}{\frac{\lambda(r_0+r_1)}{Lv}}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-\frac{r_0+r_1}{r}t_A}{T\left(\frac{r_0+r_1-r}{r}\right)}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[\frac{vt_A}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{2v^2}{\lambda(r_0+r_1-r)}(t-t_A)^2\right\} \tag{15}$$

又由式(12)可知,在滑动聚束模式下,式(15)第一项起决定作用,因此方位向信号经过第一步 derotation 操作后,其信号时域范围 T_1 为

$$T_1 = \frac{\lambda(r_0+r_1)}{Lv} \tag{16}$$

式(15)是对文献[1]推导结果的重要修正,是考虑了混合度因子随距离向变化后得到的结果.

经过第一步操作后,方位向等效脉冲重复频率 f'_{prf} 为

$$f'_{\mathrm{prf}} = -\frac{Nk_\omega}{f_{\mathrm{prf}}} \tag{17}$$

其中,N 为方位向 FFT 点数;f_{prf} 为脉冲重复频率. 为保证方位向频率不混叠,要求 $f'_{\mathrm{prf}} > \Delta F$,即 N 满足

$$N > \left[\frac{\lambda(r_0+r_1)}{Lv}f_{\mathrm{prf}}+1\right]+f_{\mathrm{prf}}T = N_0+N_a \tag{18}$$

其中,$N_a = f_{\mathrm{prf}}T$ 为方位向信号点数;N_0 表示额外所需补 0 点数;[·]表示取整. 同时,经过第一步操作后,方位向时域输出范围 T' 为:

$$T' = -\frac{f_{\mathrm{prf}}}{k_\omega} > -\frac{B_{3dB}}{k_\omega} = \frac{\lambda(r_0+r_1)}{Lv} = T_1 \tag{19}$$

由式(15)、式(16)和式(19)可知,在进行完第一步操作后,不同方位向位置的目标在时域完全重合,且不会发生混叠现象.

通过第一步 deramp 操所后,克服了方位向频谱混叠的现象,可进行第二步的聚焦成像处理,第二步聚焦处理可采用多种处理内核,如 $\omega-k$[1],FS(Frequency Scaling)[6],CS(Chirp Scaling)[7-8]等,其中 CS 算法具有计算精度高、无需插值的优点,因此本文在第二步中采用基于 CS 算法的内核处理方法对数据进行聚焦处理.

目前已有的文献大多讨论到式(19),即经过 derotation 操作后,方位向时域不会发生混叠,但尚未有人深入考虑图像域内方位向是否会发生混叠. 如图 1 所示,为保证方位向完全积累的场景不混叠,在图像域内方位向最终输出大小至少为 $TY(r)$,即要求:

$$T' = -\frac{f_{\mathrm{prf}}}{k_\omega} > TY(r) \tag{20}$$

化简得

$$f_{\mathrm{prf}} > -k_\omega TY(r) \tag{21}$$

为了保证图像域内不混叠,则要求 f_{prf} 满足式(21),即要求较大的脉冲重复频率,这极大地限制了波位设计时的自由度,不利于 SAR 载荷总体性能指标的实现.

2.2 三步成像处理算法

本文提出一种三步成像处理算法,在两部成像处理算法的基础上增加第三步操作,即在方位向聚焦完成后增加 deramp 操作,实现方位向的重采样操作. 在方位向聚焦后将其转换到距离多普勒域,得

$$H_3(f) = \exp\left\{-\mathrm{j}\pi\frac{f^2}{k_\omega}\right\}\cdot\exp\left\{-\mathrm{j}\pi\frac{f^2}{k_x}\right\} \tag{22}$$

上式中第一项补偿 derotation 后残留的相位,第二项完成方位向信号的调制. 在完成方位向 FFT 后,利用式(23)补偿二次相位并进行方位向逆 FFT 完成最终的处理:

$$H_3(t') = \exp\{-\mathrm{j}\pi k_x t'^2\} \tag{23}$$

经过第三步方位向 deramp 操作后,方位向等效的脉冲采样频率为

$$f''_{\mathrm{prf}} = \frac{Nk_x}{f'_{\mathrm{prf}}} = \frac{f_{\mathrm{prf}}k_x}{k_w} \tag{24}$$

则图像方位向输出时间为

$$T'' = \frac{Nk_w}{f_{\mathrm{prf}}k_x} = \frac{N}{N_a}\cdot\frac{N_a}{f_{\mathrm{prf}}}\cdot\frac{k_w}{k_x} = \frac{N}{N_a}\cdot T\cdot\frac{k_w}{k_x} > T\cdot\frac{k_w}{k_x} \tag{25}$$

考虑到场景照射区域时间为 TY,故要保证最终图像不混叠,满足 $k_w/k_x = Y$ 即可,故

$$k_x = \frac{2v^2}{\lambda r_1} \tag{26}$$

同时为保证不同距离门具有相同的采样间隔,k_x 不随斜距 r 变化.

但需要注意的是,在进行第三步 deramp 操作时,会发生时域展宽的现象. 进行完式(22)的补偿后,方位向信号的表达式为

$$S_f'(f;t_A,r)=\mathrm{rect}\left[-\frac{f+k_x(r)t_A}{B_{3\mathrm{dB}}\dfrac{1}{Y(r)}}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[-\frac{f-k_rt_A}{k_rT}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[\frac{vt_A}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{f^2}{-k_x}-2\pi ft_A\right\} \tag{27}$$

其中

$$k_x(r)=\frac{2v^2}{\lambda(r_0+r_1-r)} \tag{28}$$

对式(27)做方位向傅里叶变换可得时域表达式:

$$S'(t-t_A;t_A,r)=\mathrm{rect}\left[\frac{vt_A}{X_{\mathrm{swath}}}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[-\frac{t-\dfrac{r_0-r}{r_0+r_1-r}t_A}{\dfrac{\lambda(r_0+r_1)}{Lv}}\right]\cdot \mathrm{rect}\left[-\frac{t-\dfrac{r_1+r}{r}t_A}{T\left(\dfrac{r_1}{r}\right)}\right]\cdot \exp\{\mathrm{j}\pi k_x(t-t_A)^2\} \tag{29}$$

上式中第二项起决定作用,因此时域展宽为

$$\Delta T=\frac{X_{\mathrm{swath}}}{v}\cdot\left|\frac{r_0-r}{r_0+r_1-r}\right| \tag{30}$$

由式(30)可知,考虑到滑动聚束模式测绘带较小,因此第三步 deramp 操作所引入的时域展宽很小,处理中可忽略.

通过第三步成像处理后,可得到如下结论:

1) 方位向采样频率 $f''_{\mathrm{prf}}=f_{\mathrm{prf}}/Y$,因此保证最终输出图像在不同距离门具有相同采样间隔;

2) 由于全场景内 $Y(r)$的变化范围较小,因此最终图像方位向的输出时间大于有效观测场景的区域,图像最终不会发生混叠.

通过上述分析可知,进行第三步操作后,只要脉冲重复频率满足条带模式下的设计要求 $f_{\mathrm{prf}}>B_{3\mathrm{dB}}$,最终图像域方位向就不会发生混叠现象,克服了两步成像算法的缺陷,缓解了系统波位设计时对脉冲重复频率选择的限制,更适合于星载滑动聚束模式数据的处理.

3　计算机仿真

为验证算法的正确性,做如下仿真试验,在 8 km×8 km 区域摆放 3×3 的点阵,点与点方位向和距离向间隔均为 4 km,同时为更准地测试方位向指标,仿真中用矩形窗代替方位向天线方向图进行方位向信号调制,仿真参数如表 1 所示.

表 2、表 3 分别给出了利用两步成像算法和三步成像算法的处理结果,由于两种算法处理区别主要体现在方位向的操作上,因此本文只统计方位向的处理评估结果.

表 1　仿真参数

参数项	参数值	参数项	参数值
轨道高度/km	600	信号带宽/MHz	620.0
轨道倾角/(°)	98.0	采样率/MHz	720.0
偏心率	0.011	混合度因子	2.5
天线视角/(°)	30.0	方位向点数	32 768
天线长度/m	3.8	距离向点数	32 768

表 2　两步成像算法处理结果

目标	分辨率	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	目标方位向位置
1	0.485	-13.296	-10.289	-352
2	0.482	-13.350	-10.274	-352
3	0.476	-13.190	-10.299	-352
4	0.487	-13.203	-10.259	16 384
5	0.482	-13.210	-10.265	16 384
6	0.479	-13.204	-10.259	16 384
7	0.487	-13.197	-10.204	33 120
8	0.483	-13.317	-10.217	33 120
9	0.477	-13.202	-10.201	33 120

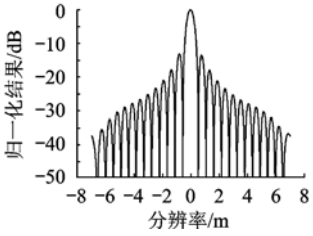
表 3　三步成像算法处理结果

目标	分辨率	峰值旁瓣比/dB	积分旁瓣比/dB	目标方位向位置
1	0.486	-13.200	-10.265	7195
2	0.481	-13.218	-10.219	7195
3	0.478	-13.235	-10.295	7195
4	0.486	-13.212	-10.214	16 384
5	0.483	-13.216	-10.220	16 384
6	0.479	-13.208	-10.212	16 384
7	0.487	-13.179	-10.224	25 575
8	0.483	-13.315	-10.227	25 575
9	0.477	-13.212	-10.205	25 575

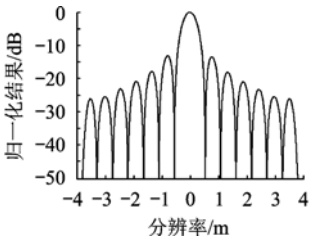
图 5a 和图 5b 分别给出了利用两步成像算法和三步成像算法对仿真场景中心点(目标 5)的方位向插值处理结果,实验中沿方位向取 32 个点进行 4096 倍的插值. 从图 5 可知,采用两步成像算法方位向过采样倍数较大,相同的采样点数所对应的图像范围较小,将导致图像域方位向混叠,如图 6 所示.

通过表 2、表 3 成像评估结果以及图 5 可知,测绘带近端目标(如点 1,4,7)的分辨率略差于远端目标(如点 3,6,9)的分辨率,验证了前面理论分析结果的正确性. 如图 6b 所示,两步成像处理算法所得到的图像采样间隔约为 0.24 m,因此方位向边缘处目标本应出现在图中白色小十字所示位置,但由于图像范围有限,因此目标发生反折,

造成方位向场景混叠. 如目标 1,2,3,其方位向位置为负,将反折到图像下端,目标 7,8,9 位置大于 32 768,因此会反折到图像上端. 如图 6c 所示,经三步成像处理后的图像采样间隔约为 0. 43 m,SAR 图像在方位向的输出大于有效观测场景,因此不会发生混叠现象,证明了三步成像处理算法在处理星载 SAR 滑动聚束模式数据上的优越性.

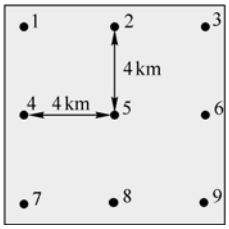


a 三步成像处理结果

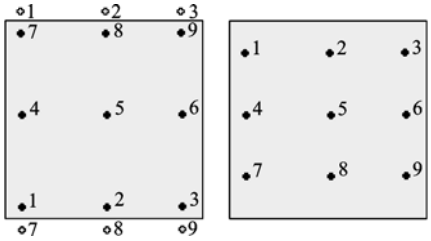


b 两步成像处理结果

图 5 目标压缩结果三维图



a 场景设置示意图



b 两步成像算法处理结果 c 三步成像算法处理结果

图 6 成像处理结果示意图

4 结 论

本文针对星载 SAR 滑动聚束模式数据的处理方法开展研究,首先对混合度因子进行了修正,进而针对目前常用的两步成像处理算法进行分析,指出两步成像处理算法的局限性,在此基础上提出三步成像处理算法. 通过本文研究,最终得到以下结论:

1) 滑动聚束模式下,方位向分辨率随距离向发生变化,远距处分辨率优于近距处分辨率,但当距离向测绘带较小时,这种差别可忽略.

2) 两步成像算法成功地解决了方位向频域上的混叠现象,但却忽视了图像域内方位向可能存在潜在的混叠现象,为克服这种混叠需提高脉冲重复频率,这不仅增加了载荷的负担,同时脉冲重复频率的提高还意味着数据量的增加及处理中方位向补零数的增加,给成像处理也带来更大压力,因此,两步成像处理算法在星载 SAR 滑动聚束模式数据处理上具有局限性.

3) 三步成像算法是在两步成像算法基础上的重要改进,通过聚焦处理后的 deramp 操作实现方位向重采样,克服了成像算法对脉冲重复频率的依赖,因此具有更强的生命力,更适用于星载 SAR 滑动聚束模式数据的处理.

参考文献 (References)

[1] Lanari R, Zoffoli S, Sansosti E, et al. New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing [J]. IEEE Proc-Radar, Sonar Navig, 2001, 148(6): 363 - 372

[2] Fornaro G, Lanari R, Sansosti E, et al. A twok-step spotlight SAR data focusing approach [C]//Proceeding of Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP'00. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000: 84 - 86

[3] Belcher D P, Baker C J. High resolution processing of hybrid strip-map/spotlight mode SAR [J]. IEEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1996, 143(6): 366 - 374

[4] Josef Mittermayer, Richird Lord, Elke Borner. Sliding spotlight SAR processing for terraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm [C]//Proceeding of IGRASS 2003. Toulouse, France: IEEE, 2003: 1462 - 1464

[5] Pau Prats, Rolf Scheiber, Josef Mittermayer, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling [J]. IEEE Transations on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 770 - 780

[6] Wang Pengbo, Yinqing Zhou, Jie Chen, et al. A deramp frequency scaling algorithm for processing space-borne spotlight SAR data [C]//Proceeding of IGRASS 2006. Denver, USA: IEEE, 2006: 3131 - 3134

[7] 王国栋,周荫清,李春升. 高分辨率星载聚束式 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1784 - 1789
Wang Guodong, Zhou Yinqing, Li Chunsheng. A deramp chirp scaling algorithm for high-resolution spaceborne spotlight SAR imaging [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1784 - 1789 (in Chinese)

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

(编 辑:娄 嘉)