基于二维 deramp 处理的高分辨率聚束 SAR 成像算法

王鹏波 周荫清 陈 杰 李春升

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 有效解决回波信号的数据率是高分辨率聚束式星载 SAR 的难点之一. 基于两步成像算法和 CS(Chirp Scaling)成像算法,提出了一种适用于高分辨率聚束式星载 SAR 的成像算法——TDDCS(Two Dimension Deramp Chirp Scaling)成像算法. 该算法从距离 dechirp 处理后回波信号出发,首先利用二维 deramp 处理来消除频谱混叠现象,这不仅能实现以对应条带模式的脉冲重复频率来设计聚束 SAR 系统,也保证满足观测带宽度所需的回波窗长度,接着利用 CS 处理和相位补偿实现精确的距离徙动校正,最后利用方位相匹配滤波处理实现方位向压缩,得到最终的成像结果. 基于等效斜视模型,给出了整个算法的详细推导过程和实现流程,通过计算机仿真验证了本算法的有效性.

关 键 词: 合成孔径雷达; deramp 处理; 雷达成像

中图分类号: TP 957

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2007)01-0072-04

Imaging algorithm for high-resolution space-borne spotlight SAR data based on two dimension deramp processing

Wang Pengbo Zhou Yinqing Chen Jie Li Chunsheng

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Reduced the data rate is one of the difficulties in high-resolution space-borne spotlight synthetic aperture radar (SAR). Based on two-step focusing algorithm and chirp scaling(CS) algorithm, two dimension deramp chirp scaling(TDDCS) algorithm for processing high-resolution space-borne spotlight SAR data was presented. The algorithm starts with raw data dechirped in range. First, the azimuth spectral folding phenomenon is overcome by using azimuth deramp processing, and the chirp signal is recovered by using range deramp processing. Second, the precise range cell migration correction is achieved by chirp scaling processing and phase compensation. Lastly, the azimuth compression is performed by match filter, and the image is received. Based on the squinted equivalent range model, the complete derivation of the algorithm was presented and the realizing approach was given. The computer simulation shows the validity of the algorithm.

Key words: synthetic aperture radar; deramp processing; radar imaging

聚束 SAR 作为实现高分辨率的一种工作模式,能够实现条带式 SAR 难以达到的高分辨率[1]. 在合成孔径时间内,聚束式 SAR 通过控制天线波束指向,使得天线波束长时间照射成像区域,进而获得比条带 SAR 更大的多普勒带宽,实现方位分辨率的提高,为了获得相应的距离向分辨率,需提高其发射线性调频信号的带宽. 为了避免频谱混叠,脉冲重复频率和采样率的选取需要分别大于方位多普勒带宽和发射信号带宽,然而过高的脉冲重复频率和采样率不仅会使距离模糊

收稿日期: 2006-01-13

作者简介: 王鹏波(1979—),男,江西波阳人,博士生, wangpb7966@eyou.com.

度变差,而且会造成数据率急剧增加[2]. 因此,如何减小信号带宽、降低脉冲重复频率则成为高分辨率聚束式星载 SAR 需要解决的一个难点.

目前常用的聚束 SAR 成像算法有 DCS(Deramp Chirp Scaling)算法和 FS(Frequency Scaling)算法. FS 算法[3]利用 frequency scaling 处理及相位补偿来实现距离徙动校正,利用 specan 处理来实现方位向处理. 该算法的优点在于距离 dechirp 处理能够有效地降低系统的采样率,实现回波信号数据率的降低. 其缺点在于方位向处理时需要引入复杂的频谱拼接处理,且拼接的次数随脉冲重复频率的降低而增加. 两步成像算法[4]利用方位 deramp 处理来消除聚束星载 SAR 特有的方位频谱混叠现象,接着利用条带模式成像算法实现精确聚焦,在此基础上提出的 DCS 算法[2]则具体地将 deramp 处理与 chirp scaling 算法相结合来处理实现高分辨率聚束 SAR 成像. 由于 DCS 算法是在距离向为 chirp 信号的基础上推导的,无法实现采样率的降低,所以当采用该算法处理高分辨率聚束星载 SAR 回波数据时,回波信号的数据率将会很高. 本文将方位 deramp 处理进行扩展,将其同时用于距离和方位,进而提出一种适用于高分辨率聚束式星载 SAR 的成像算法:TDDCS(Two Dimension Deramp Chirp Scaling)算法. 该算法直接从距离 dechirp 处理后的数据入手,利用二维 deramp 处理来消除聚束星载 SAR 回波信号频谱混叠现象,并恢复距离向调频信号,最后利用 chirp scaling 算法来实现回波数据的精确聚焦.

1　聚束 SAR 回波信号的数学模型

经过 dechirp 接收后,聚束 SAR 回波信号的数学模型可以表示为[3]

$$S_{ss}(\tau,t,r)=\sigma\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{\tau-\frac{2R(t;r)}{c}}{T_{\mathrm{p}}}\right]\cdot\exp\left[\mathrm{j}\frac{4\pi b}{c^2}\cdot(R(t;r)-r_c)^2\right]\cdot\exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}R(t;r)\right]\cdot\exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi b}{c}\cdot(R(t;r)-r_c)\left(\tau-\frac{2r_c}{c}\right)\right]\quad(1)$$

其中,$S_{ss}(\cdot)$为接收回波信号;c 为光速;λ 为波长;b 为调频率;σ 为后向散射系数;T_{p} 为脉冲宽度;τ 和 t 分别为距离向和方位向时间;$\mathrm{rect}[\cdot]$为矩形函数;r 为中心时刻点目标与天线相位中心间的间距;r_c 为参考斜距;$R(\cdot)$为随时间变化的斜距,可以表示为

$$R(t;r)=\sqrt{r^2+V^2t^2-2rVt\cos\varphi}\quad(2)$$

式中 V 和 φ 分别为等效速度和等效斜视角.

2　deramp 处理

deramp 处理[4]最初由 Lanari 提出,用于解决方位频谱混叠,通过将接收信号与具有相反多普勒调频率的参考线性信号进行卷积处理来实现,本质上讲可以推广到任意调频信号. 假设接收线性调频信号为

$$s(t)=\exp[-\mathrm{j}\pi b(t-t_0)^2]\quad(3)$$

相应的参考函数 $s_{\mathrm{ref}}(t)$为

$$s_{\mathrm{ref}}(t)=\exp(\mathrm{j}\pi b_{\mathrm{ref}}t^2)\quad(4)$$

其中 b_{ref}为参考调频率.

卷积运算后回波信号可以表示为

$$s'(t)=s(t)*s_{\mathrm{ref}}(t)=\exp(\mathrm{j}\pi b_{\mathrm{ref}}t^2)\cdot\int s(\tau)\cdot\exp(\mathrm{j}\pi b_{\mathrm{ref}}\tau^2-\mathrm{j}2\pi b_{\mathrm{ref}}\tau t)\mathrm{d}\tau\quad(5)$$

引入变量替换 $t_1=b_{\mathrm{ref}}t$,式(5)可改写为

$$s'(t_1)=\exp\left(\mathrm{j}\pi\frac{t_1^2}{b_{\mathrm{ref}}}\right)\cdot F(s(\tau)\cdot\exp(\mathrm{j}\pi b_{\mathrm{ref}}\tau^2))\quad(6)$$

其中 $F(\cdot)$为傅里叶变换.

这样卷积运算就能通过两次复乘和一次 FFT 实现,如图 1 所示.

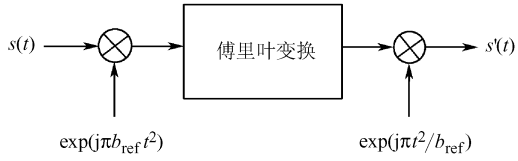


图 1　deramp 处理过程示意图

考虑到数字信号处理中采样频率需要满足 Nyquist 采样定律. 当采用 deramp 处理时,采样频率只要对 $s(i\Delta t')\cdot\exp(\mathrm{j}\pi f_{r,\mathrm{ref}}(i\Delta t')^2)$满足 Nyquist 采样定律即可,考虑到在聚束工作模式为小区域高精度成像模式,如果将聚束 SAR 回波信号的距离向和方位向分别与具有相反调频斜率的回波信号相乘,能够有效的降低信号带宽,进而减小系统所需要的脉冲重复频率和采样率,实现回波信号的数据率降低,简化系统设计.

3　TDDCS 成像算法

本文提出的 TDDCS 成像算法正是将 deramp 处理推广到距离维,通过在方位和距离 2 个方向上运用 deramp 处理来实现脉冲重复频率和

采样率的降低,进而实现数据率的减小.整个算法流程包括2个部分:二维deramp处理和chirp scaling聚焦处理,具体处理流程如图2所示.

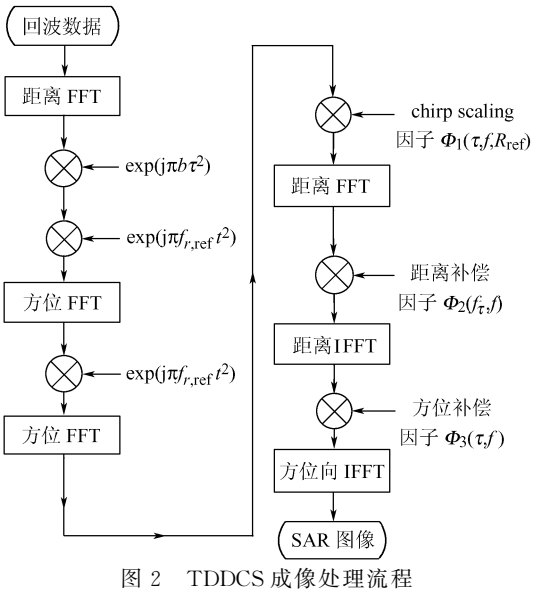


图2 TDDCS成像处理流程

3.1 二维deramp处理

式(1)给出了dechirp处理后聚束模式回波信号模型,该式可改写为

$$S_{ss}(\tau,t;r)=\sigma\cdot\mathrm{rect}\left[\frac{\tau-\frac{2R(t;r)}{c}}{T_p}\right]\cdot \exp\left[-\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}R(t;r)\right]\cdot \exp\left[-\mathrm{j}\pi b\cdot\left(\tau-\frac{2R(t;r)}{c}\right)^2\right]\cdot \exp\left[\mathrm{j}\pi b\cdot\left(\tau-\frac{2r_c}{c}\right)^2\right] \tag{7}$$

首先对该式进行距离向deramp处理,考虑到dechirp接收时已经将回波信号与二次参考函数相乘,因此可省略该步,直接将上式进行距离向傅里叶变换,并乘以距离参考函数 $S_{r,\mathrm{ref}}(\tau)$.

$$S_{r,\mathrm{ref}}(\tau)=\exp\left(\mathrm{j}\pi\frac{\tau^2}{b}\right) \tag{8}$$

由deramp处理的原理可知,经过上述处理后回波信号可表示为

$$S'_{ss}(\tau,t;r)=S_{ss}(\tau,t;r)\otimes_\tau\exp(\mathrm{j}\pi b\tau^2) \tag{9}$$

其中,$S'_{ss}(\cdot)$为距离deramp处理后的回波信号;$\otimes_\tau$为关于时间τ的卷积.

在距离deramp处理后,将回波信号与方位参考函数 $S_{a,\mathrm{ref0}}(t)$相乘.

$$S_{a,\mathrm{ref0}}(t)=\exp(\mathrm{j}\pi f_{r,\mathrm{ref}}t^2) \tag{10}$$

$$S_{a,\mathrm{ref1}}(t)=\exp\left(\mathrm{j}\pi\frac{t^2}{f_{r,\mathrm{ref}}}\right) \tag{11}$$

接着对回波信号进行方位向傅里叶变换,并乘以方位参考函数 $S_{a,\mathrm{ref1}}(t)$.这样回波信号可表示为

$$S''_{ss}(\tau,t;r)=S_{ss}(\tau,t;r)\otimes_r\exp(\mathrm{j}\pi b\tau^2)\otimes\exp(\mathrm{j}\pi f_{r,\mathrm{ref}}t^2) \tag{12}$$

其中,$S''_{ss}(\cdot)$为二维deramp处理后的回波信号,$\otimes$为关于时间t的卷积.

3.2 chirp scaling聚焦处理

经过二维deramp处理,回波信号可变为接收回波信号与两个二次函数的卷积,接着可采用chirp scaling原理实现精确的聚焦处理.具体步骤与文献[5]中所介绍的步骤相似,只是补偿因子有所改变.相应的各补偿因子如下:

chirp scaling因子 $\Phi_1(\tau,f;R_{\mathrm{ref}})$为

$$\Phi_1(\tau,f;R_{\mathrm{ref}})=\exp\{-\mathrm{j}\pi C_s(f)b_r(f;R_{\mathrm{ref}})[\tau-\tau_{\mathrm{ref}}(f)]^2\} \tag{13}$$

式中

$$C_s(f)=\frac{\sin\varphi_{\mathrm{ref}}}{\sqrt{1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}}-1$$

$$b_r(f;R_{\mathrm{ref}})=\frac{b}{1+bR_{\mathrm{ref}}\sin\varphi_{\mathrm{ref}}\frac{2\lambda}{c^2}\cdot\frac{\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}{\left[1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}}}$$

$$\tau_{\mathrm{ref}}(f)=\frac{2}{c}R_{\mathrm{ref}}[1+C_s(f)]$$

其中,R_{ref}为参考斜距;φ_{ref}为参考斜距处的等效斜视角.

距离补偿因子 $\Phi_2(f_\tau,f)$为

$$\Phi_2(f_\tau,f)=\exp\left\{\mathrm{j}\frac{4\pi}{c}f_\tau R_{\mathrm{ref}}C_s(f)+\pi\frac{f_\tau^2}{b}\right\}\cdot \exp\left\{-\mathrm{j}\frac{\pi f_\tau^2}{b_r(f;R_{\mathrm{ref}})[1+C_s(f)]}\right\} \tag{14}$$

方位向补偿因子 $\Phi_3(\tau,f)$为

$$\Phi_3(\tau,f)=\exp\left\{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{\lambda}c\tau\left[1-\sin\varphi_{\mathrm{ref}}\cdot\sqrt{1-\left(\frac{\lambda f}{2V}\right)^2}\right]\right\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\frac{4\pi}{c^2}b_r(f;R_{\mathrm{ref}})\cdot[1+C_s(f)]C_s(f)\left(\frac{c\tau}{2}-R_{\mathrm{ref}}\right)^2\right\}\cdot \exp\left\{\mathrm{j}\pi\frac{c\tau}{V}f\cos\varphi_{\mathrm{ref}}+\mathrm{j}\frac{\pi}{f_{r,\mathrm{ref}}}f^2\right\}$$

式中 f_τ 和 f 分别为距离向和方位向频率.

4　计算机仿真

4.1　仿真参数

仿真参数见表 1.

表 1　仿真参数

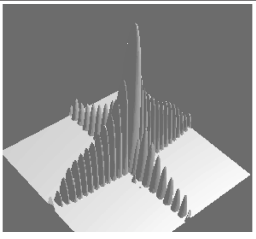
参数项	波长 λ/m	信号带宽 B_w/MHz	入射角 θ_L/(°)	脉冲宽度 T_P/μs	脉冲重复频率 f_{PRF}/Hz
数值	0.03	900	20	60	4 500

4.2　仿真结果

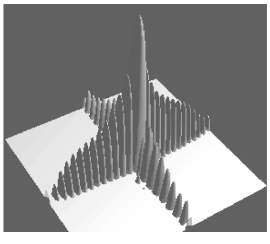
为了验证算法的有效性,进行点目标成像仿真,根据表 1 所示参数仿真回波数据,然后利用本文提出的算法进行成像处理,成像结果如图 3 所示,质量评估结果如表 2 所示,表中下标 a 表示方位向,下标 r 表示距离向.

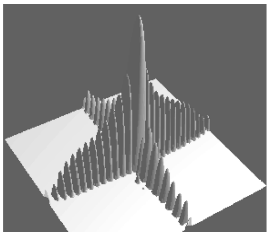
表 2　点阵目标图像质量评估结果

参数	位置		
	近距点阵(−2.5 km)	中心点阵(0 km)	远距点阵(2.5 km)
分辨率 ρ_a/m	0.390	0.390	0.390
峰值旁瓣比 P_{SLRa}/dB	−13.450	−13.342	−13.445
积分旁瓣比 I_{SLRa}/dB	−10.495	−10.442	−10.560
分辨率 ρ_r/m	0.430	0.430	0.430
峰值旁瓣比 P_{SLRr}/dB	−13.203	−13.250	−13.196
积分旁瓣比 I_{SLRr}/dB	−10.253	−10.183	−10.257



a　中心点





b　近距点　　c　远距点

图 3　点目标成像处理结果

成像结果表明 TDDCS 算法能够实现高分辨率聚束模式星载 SAR 精确成像,且脉冲重复频率与传统条带 SAR 同样选取.

5　结 束 语

本文提出了一种适用于高分辨率星载聚束 SAR 的成像算法:TDDCS 算法.该算法综合了两步成像处理算法和 chirp scaling 算法,直接从 dechirp 处理后的回波数据出发,利用二维 deramp 处理来避免方位频谱混叠现象的出现,实现以较低的脉冲重复频率完成高分辨率聚束星载 SAR 的成像处理,同时实现距离向 chirp 信号的复原.利用 chirp scaling 处理和相位补偿实现精确的距离徙动校正实现图像的精确聚焦,得到最终的成像结果.通过计算机仿真结果表明,dechirp 处理可以有效地降低回波信号的数据率,减轻高分辨率聚束星载 SAR 的数传压力,降低星载聚束 SAR 的设计和实现难度.点目标的成像仿真及性能分析也验证了该算法能够在场景内实现一致成像.该算法的提出有助于推动高分辨率聚束 SAR 的进一步发展.

参考文献(References)

[1] Carrara W G, Goodman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar[M]. Boston: Artech House, 1995

[2] 王国栋,周荫清,李春升. 高分辨率星载聚束 SAR 的 Deramp Chirp Scaling 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 Electronic Sinica, 2003, 31(12):1784−1789(in Chinese)

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

[4] Lanari R, Fornaro G, Sansosti E. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. IEEE Trans on Geosci Remote Sensing, 2001,39(9):1993−2004

[5] Moreira A, Huang Y. 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

[6] 黄岩,李春升,陈杰,等. 高分辨率聚束 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35−38
Huang Yan, Li Chunsheng, Chen Jie, et al. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. Acta Electronic Sinica,2000,28(3):35−38(in Chinese)

(责任编辑:娄　嘉)