

基于等效斜视距离模型的高分辨率星载 SAR 波数域成像算法

刘利国, 周荫清

(北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了解决 CS 算法在距离压缩时无法使用带有误差的原始信号的问题, 作者提出一种等效斜视的波数域算法. 本文基于星载 SAR 等效斜视距离模型, 利用 Bamler 提出的波数域算法推导方法^[1], 从原始回波信号模型入手, 详细推导出基于等效斜视距离模型的高分辨率星载 SAR 波数域成像算法, 并给出了该算法的实现步骤. 该算法适用于大距离徙动高分辨率星载 SAR 的精确成像. 文中利用点目标回波仿真数据验证了算法的有效性并给出了该算法成像的质量评估指标.

关键词: 波数域算法; 等效斜视距离模型; 星载 SAR

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-1998-04

Equivalent-Squint-Range-Model Based Wavenumber Domain Focusing Algorithm for High Resolution Spaceborne SAR

LIU Li-guo, ZHOU Yin-qing

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

Abstract: For resolving the problem that the CS algorithms couldn't compress SAR data in range direction using the original signal with errors, the author introduced an Equivalent-Squint Wavenumber Domain algorithm. In this paper, the Squint-Range-Model based wavenumber domain focusing algorithm for high resolution spaceborne SAR is derived from original response signal using Bamler's method in accordance with the equivalent squint range model. This algorithm is suitable for precise imaging of high resolution spaceborne SAR with large range cell migration. Simulated data of point scatterer response is used to demonstrate the effectiveness of this algorithm and the evaluated result is given.

Key words: wavenumber domain algorithm; equivalent-squint-range-model; spaceborne SAR

1 引言

目前, 在条带式高分辨率星载合成孔径雷达 (SAR) 成像中, 使用较多并且在工程应用上比较适用的成像算法主要是 CS (Chirp Scaling) 算法. 由于 CS 算法在计算效率和成像精度上能够很好地满足工程技术要求, 因此, 经过不断的改进完善, CS 算法在工程应用中已经比较成熟. 但是, CS 算法在距离向压缩时, 没有使用距离向参考函数. 在实际中, 当雷达发射的 Chirp 信号存在误差时, 可以将卫星传回的带有误差的实际发射 Chirp 信号的复制信号作为距离向压缩的参考信号, 这样可以大大改善距离压缩效果. CS 算法则无法使用这个方法, 因此, 也就无法避免发射信号误差对距离向成像效果的影响. 而波数域算法在距离向压缩时所用方法与 RD 算法相同, 可以利用上述复制信号来消除发射信号误差对距离压缩的影响, 并且波数域算法同样是一种 SAR 的精确成像算法. 因此, 本

文将研究波数域算法在高分辨率星载 SAR 成像中的应用.

Bamler 推导出的波数域算法^[1,3]所使用的距离模型是机载正侧视距离模型. 在这种模型中, 多普勒中心频率为零, 而当星载 SAR 回波数据的多普勒中心频率较大时, 由于距离模型的误差较大, 因此正侧视的波数域算法已不再适用. 目前, 常用的距离模型有正侧视模型、二次逼近距离模型和等效斜视距离模型三种^[2], 其中误差最小的是等效斜视距离模型. 将波数域算法用于星载 SAR 时, 可以在正侧视距离模型中改变波束中心在方位向的位置来实现^[5], 而使用等效斜视模型可使算法更加清晰直观, 所以本文将利用斜视模型来推导波数域算法. 本文利用 Bamler 提出的方法, 基于误差最小的等效斜视距离模型, 重新推导了波数域算法, 得到基于等效斜视距离模型的高分辨率星载 SAR 波数域成像算法. 并且利用仿真数据对上述算法的有效性进行了验证, 给出了该算法成像的质量评估结果.

代入式(16)则可以求出式(14)在距离频域方位波数域内的表达式

$$h^{t,x}(\cdot, k_x) = A \exp \left\{ -jr \left[\sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \right] \right\} \quad (19)$$

对上式两端做关于 r 的傅氏变换,则可以得到式(14)在二维波数域的表达式

$$H(k_r, k_x) = A \cdot \left[k_r + \left(\sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \right) \right] \quad (20)$$

4.2 变换到二维波数域完成方位压缩

利用方位向参考函数式(12)进行方位处理,可以推得^[1]

$$p^x(r, k_x) = \frac{1}{2} g^{t,x}(\cdot, k_x) h^{*t,x}(\cdot, k_x) \exp \left[\frac{j2r}{c} \right] d \quad (21)$$

对式(21)两端做关于 r 的傅氏变换,得

$$P(k_r, k_x) = \frac{1}{2} g^{t,x}(\cdot, k_x) \left\{ h^{*t,x}(\cdot, k_x) \exp \left[\frac{j2r}{c} \right] e^{-jk_r \cdot r} dr \right\} d \quad (22)$$

由傅氏变换的性质可以得到

$$P(k_r, k_x) = \frac{1}{2} g^{t,x}(\cdot, k_x) H^* \left(\frac{2}{c} r - k_r, k_x \right) d \quad (23)$$

利用式(20)及 δ -函数的性质可将上式展开为

$$P(k_r, k_x) = A_1 g^{t,x}(\cdot, k_x) \left(k_r - \left(\sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \right) \right) d \quad (24)$$

其中 A_1 近似为复常数,解上式可以得到二维波数域内的复图像 $P(k_r, k_x)$.

$$P(k_r, k_x) = A_2 g^{t,x} \left(\frac{c}{2} \sqrt{\left(k_r + \frac{2+0}{c} - k_x \text{ctg} \right)^2 + k_x^2} - 0, k_x \right) \quad (25)$$

其中 A_2 近似为复常数,解式(24)的同时还可以得到.

$$k_r = \sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \quad (26)$$

5 等效斜视波数域算法的实现

5.1 计算移零因子

通常,作距离向傅氏变换时是将每条距离线数据的起始点作为时间零点,即斜距等于 r_{\min} 的时刻,但真实的时间零点却是在斜距 r 等于零的时刻.因此,在做 Stolt 插值之前要将时间零点移回 r 等于零的时刻,这可以通过在距离频域乘上频域移零因子来实现,

$$(\cdot) = \exp \left\{ - \frac{j2r_{\min}}{c} \right\} \quad (27)$$

在对 $P(k_x, k_r)$ 进行反傅氏变换之前,还要将零点移回到数据起始点,也就是斜距等于 r_{\min} 的位置,这可以通过在距离波数域乘上波数域移零因子来实现,

$$k(k_r) = \exp \left\{ jk_r r_{\min} \right\} \quad (28)$$

为了程序实现上的方便,利用式(26)将波数域移零因子移到 Stolt 变换之前,将两个移零因子合并成一个移零因子,即

$$(\cdot) = \exp \left\{ jr_{\min} \left[\sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \right] \right\} \quad (29)$$

5.2 插值中的变量代换

在进行 Stolt 插值的过程中需要用到距离波数 k 与距离频率 ω 之间的互换关系,由于回波数据是按图 1 中 r 轴来排列的,所以 Stolt 插值变换时,是由 ω 域向 k_r 域而不是向 k_r 域变换.由于 $r = r_{\min} \sin$,根据傅氏变换的性质可以得到 $k_r = k_r \sin$,代入式(26)可以得到距离波数 k_r 与距离频率 ω 之间的变换对,即

$$\begin{cases} k_r = \sin \left[\sqrt{\left(\frac{+0}{c/2} \right)^2 - k_x^2} - \frac{+0}{c/2} + k_x \text{ctg} \right] \\ = \frac{c}{2} \sqrt{\left(k_r / \sin + \frac{2+0}{c} - k_x \text{ctg} \right)^2 + k_x^2} - 0 \end{cases} \quad (30)$$

5.3 等效斜视波数域算法的实现步骤

综上所述,等效斜视波数域算法的实现步骤为:

- (1) 与距离向参考函数作相关处理并进行距离向 FFT;
- (2) 进行方位向 FFT 并乘以移零因子 (\cdot) ;
- (3) 利用式(30)进行 Stolt 插值变换到二维波数域;
- (4) 进行二维反 FFT 得到空域复图像.

6 仿真结果

为了验证上述算法的有效性,本文利用点目标回波仿真数据进行了成像处理.仿真参数如下:波长 0.24 米;卫星高度 625646.98 米;卫星视角 30 度;多普勒中心频率 - 2012.643Hz;多普勒调频率 - 599.778Hz/s;测绘带宽度 50 公里.

利用等效斜视波数域算法对根据上述参数产生的点目标阵回波信号进行成像,从测绘带中心、近距、远距三个位置取出三个点目标进行成像结果分析.成像结果如图 2 至图 4 所示.性能指标见表 1,其中设计值一栏中的数值是未加权的指标值.从三个图中可以看出测绘带中心处点目标的成像结果要比边缘上的点规则,这是因为多普勒参数在距离向随着距离门的不同而发生变化,成像时使用的是测绘带中心的多普勒参数,其它两点处多普勒参数存在误差,所以出现了上述现

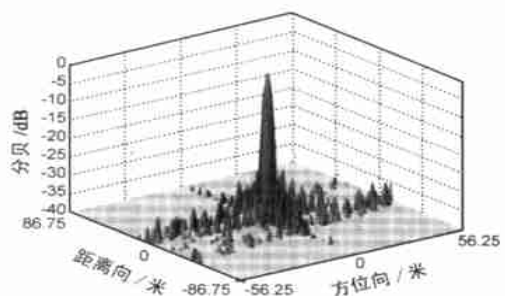


图2 测绘带近距处点目标成像结果

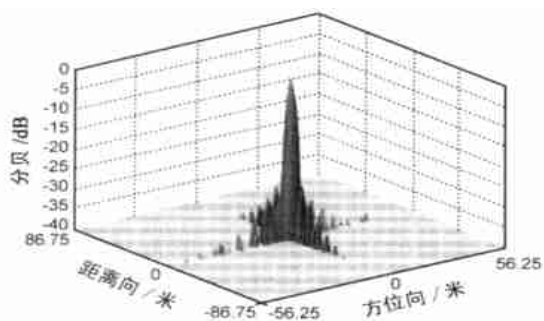


图3 测绘带中心处点目标成像结果

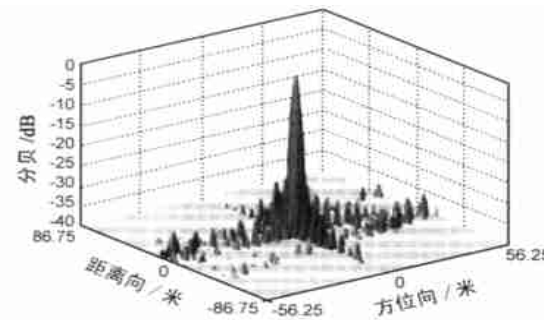


图4 测绘带远距处点目标成像结果

象. 不过,从表1中可以看出,与设计指标相比,三个位置的点目标成像指标均达到了设计指标要求,说明本算法是有效的.

指 标	距 离 向			方 位 向		
	r	$TSLR_r$	$PSLR_r$	a	$TSLR_r$	$PSLR_r$
	(米)	(dB)	(dB)	(米)	(dB)	(dB)
设计值	3.00	- 25.00	- 15.00	4.50	- 25.00	- 15.00
中心点 *	2.75	- 28.07	- 19.22	3.95	- 29.76	- 18.70
远距点 *	2.79	- 29.54	- 19.00	3.98	- 28.43	- 18.12
近距点 *	2.77	- 27.69	- 19.10	4.01	- 29.21	- 18.02

*代表各被测点在测绘带中的位置

7 结 论

本文根据等效斜视距离模型,推导了等效斜视波数域算法,给出了实现步骤.并利用点目标回波仿真数据对成像算法进行了验证.质量评估结果证明,该算法的成像指标均满足设

计要求.本算法在推导过程中使用了误差最小的距离模型,并且推导过程中几乎没有进行近似,所以本算法的成像精度比较高.另外,当雷达发射信号存在一定误差时,本算法距离向压缩可以使用卫星下传 Chip 信号来提高距离压缩质量,略有不足的是,下传 Chip 信号会增加卫星数传的下传数据量.综上所述,本算法适合于多普勒中心频率较高的高分辨率星载 SAR 的高精度成像.

参考文献:

[1] Richard Bamler. A comparison of range-doppler and wavenumber domain SAR focusing algorithms[J]. IEEE Trans on GRS,1992,30(4): 706 - 713.

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

[3] 魏忠铨,等. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京:科学出版社,2001. 153 - 168.

[4] C Cafforio,et al. SAR data focusing sing seismic migration techniques [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems ,1991 ,27 (2):194 - 207.

[5] Giorgio Franceschetti ,Riccardo Lanari. Synthetic Aperture Radar Processing[M]. New York :CRC Press ,1999. 125 - 130.

作者简介:



刘利国 男,1974 年生于黑龙江七台河,现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士研究生,主要从事信息获取与处理、高分辨率雷达成像、SAR 图像的辐射校正及几何校正方面的研究工作.



周荫清 男,1936 年生于湖南湘潭,教授、博士生导师、中国电子学会会士、中国航空学会电子专业委员会副主任,主要从事自适应信号处理、高分辨率雷达成像、时变谱估计、阵列处理等方面的研究工作.