

# 斜视 SAR 成像处理中多普勒频率的新应用

刘光炎, 黄顺吉

(电子科技大学电子工程系, 四川成都 610054)

**摘 要:** 多普勒频率在斜视 SAR 成像处理中的新应用被发现. 由于斜视 SAR 方位向采样不同、脉冲重复频率不同, 而且不同的斜距目标具有不同的多普勒频率, 该文从雷达信号的回波模型入手, 详细分析了回波信号的瞬时方位频率和瞬时多普勒频率及距离 Chirp 斜率对方位频率的影响, 说明在 CS 算法中, 选择适当的多普勒频率才能进行正确的成像, 点目标仿真结果表明, 该方法是合理的, 能有效的进行距离压缩和方位聚焦, 改善成像质量.

**关键词:** 脉冲重复频率; 多普勒频率; CS 算法; 距离 chirp 斜率; 合成孔径雷达

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 06-0829-04

## New Applications of Doppler Frequency in Squint SAR Imaging Processing

LIU Guangyan, HUANG Shunji

(Dept. of Electronic Eng, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract:** New applications of Doppler frequency have been found with Chirp Scaling algorithm(CSA) in squint SAR imaging. Considering the change of azimuth sample, the pulse repeat frequency difference in squint SAR data processing, and the Doppler frequency varying with different slant range targets, we carefully analyse the instantaneous azimuth frequency, the instantaneous Doppler frequency component of the azimuth frequency and the impact of range chirp on azimuth frequency, from the mathematical model of SAR echo signal. It explains that we should properly select Doppler frequency in Chirp Scaling algorithm for correct SAR imaging. The results of point target simulation experiments show that our method is reasonable for squint SAR. It can effectively complete range compression and azimuth focusing, and can improve images quality.

**Key words:** PRF; Doppler frequency; CS algorithm; range chirp rate; SAR

## 1 引言

Chirp Scaling(CS)算法<sup>[1]</sup>能使所有目标的轨迹弯曲相同, 从而较好地 完成不同距离单元的徙动校正, 它已发展出各种改进的算法并运用到各种 SAR 的成像模式中<sup>[2, 4]</sup>. 在斜视模式下, 考虑回波信号二维频率域三次项及线性调频频率的影响<sup>[2, 3]</sup>, 已能达到较好的成像精度, 不失为好的斜视成像方法.

在 SAR 成像处理中, 多普勒频率是一个十分重要的参数, 多普勒频率使用不正确, 必然带来成像质量的下降和图像定位的误差. 在斜视工作模式下, 多普勒质心不为零, 使用经典的多普勒质心与脉冲重复频率(方位向采样率)来进行 SAR 成像处理就存在误差, 其次, 斜视时方位向采样方向与距离向采样方向不垂直, 二者之间必定存在耦合, 若方位向多普勒频率不作相应变化, 就必然存在误差, 导致线性调频斜率失真和 CS 算法中距离弯曲因子的偏差, 斜视角增大, 就严重影响成像的质量, 尤其是图像的聚焦和分辨率.

本文针对上述, 通过对斜视 SAR 目标回波信号的瞬时方位频率和瞬时多普勒频率及距离 Chirp 斜率对方位频率的影响的仔细分析, 以经典的 CS 算法为基础, 找到了一种简单、有效、可行的方位多普勒频率计算方法, 利用该方法, 使用 Chirp Scaling 算法进行的点目标仿真实验证明, 该方法是合理的, 其成像质量有明显的改善.

## 2 斜视回波模型

### 2.1 斜视距离方程

图 1 为 SAR 斜视时的几何模型, 图中 A 为 SAR 的投影角, H 为侧视角, U 为等效斜视角, 即锥角, 由其几何关系可知:  $\cos U = \sin A \sin H$ , 由图可知斜视的等效距离方程为:

$$\begin{aligned} R(t, R_0) &= \sqrt{R_0^2 + (Mt)^2 - 2R_0Mt \cos U} \\ &= \sqrt{R_0^2 + (Mt)^2 - 2R_0Mt \sin A \sin H} \end{aligned} \quad (1)$$

其中 t 表示慢时域的时间, M 表示平台飞行速度, 近似为平台与目标的径向速度,  $R_0$  表示  $t=0$  时雷达至照射区中心目标



$$f_{DC} = \frac{PRF}{2} [ f_{ad}(t) [ f_{DC} + \frac{PRF}{2} ] ] \quad (21)$$

就必然存在误差,因为斜视情况下方向向采样与距离向采样的方向并不垂直,即距离向与方向向必然存在耦合,此时还使用正侧视时的多普勒频率取值方法,当然就存在误差,斜视角越大误差就越大.其次,斜视情况下的一个孔径与正侧视下的一个孔径不相同,即斜视情况下 SAR 的信号特性已有所变化<sup>[6]</sup>,使用脉冲重复频率采样,并不能完整无误的对照射区方向向一个孔径内的目标进行采样,任用  $PRF/N_a$  ( $N_a$  表示方向向采样点数)表示相邻采样点间的频率间隔,也有误差.因此应使用式(20)来计算瞬时多普勒频率,计算 CS 算法中各个因子,完成成像.

3 斜视 SAR 的 CS 算法分析

Chirp Scaling 算法是一种基于正侧式的高精度成像算法,它利用 Chirp Scaling 原理,即线性调频信号与一个具有相关调频斜率的调频信号(即 Chirp Scaling 因子)相乘,结果仍是一个调频信号,只是相位中心和调频斜率发生了变化,人们将其称为经典 CSA (Chirp Scaling Algorithm)<sup>[1]</sup>.该方法首先将原始 SAR 回波数据进行方向向傅里叶变换到距离信号-多普勒域,与 Chirp Scaling 相位因子相乘,使所有距离门的距离徙动曲线补偿到相同的形状;然后通过距离向傅里叶变换将信号变换到二维频率域,进行距离补偿,完成距离徙动校正、二次距离压缩和距离压缩;再利用逆傅里叶变换将信号变换到距离图像-多普勒域,完成方位补偿处理;最后利用逆傅里叶变换将信号变回时域,得到 SAR 图像.图 2 是 CS 成像算法的流程图<sup>[1]</sup>.

如上所述,斜视 SAR 成像的 CS 算法中应使用式(20)计算瞬时多普勒频率,于是距离弯曲因子表示为:

$$C_s(f_{ad}) = \frac{1}{\sqrt{1 - [K_{ad}(t)/(2M)]^2}} - 1 \quad (22)$$

有效的线性调频斜率表示为:

$$K_r(f_{ad}; R_{ref}) = \left\{ 1 + \frac{2K_{r,ref}}{c^2} \left[ \frac{K_{ad}(t)/(2M)]^2}{1 - [K_{ad}(t)/(2M)]^2} \right]^{3/2} \right\} \quad (23)$$

其他各相位补偿因子相应的使用修正的弯曲因子和线性调频斜率,其算法步骤与经典 CS 算法步骤相同,如图 2,在此不予赘述.为了下述方便,相应的把此种方法称之为 DFCS 算法 (Doppler Frequency Chirp Scaling Algorithm).

4 仿真试验

根据前面所述,使用本文所述的计算多普勒频率方法(式(20))和经典的 CS 算法计算多普勒频率方法(式(21)),分别对星载 SAR 系统(实际应用中已考虑地球自转的影响)进行点目标仿真试验,其仿真参数见表 1 为:

表 1 点目标成像试验参数

雷达至目标的距离(km)	850	
卫星速度(km/s)	7.45	
波长(m)	0.24	0.03
侧视角(度)	10b	30b
波束投射角(度)	43b	
带宽(MHz)	60	80
发射脉宽(Ls)	33	22
采样率(MHz)	70	100
脉冲重复频率(Hz)	2000	3500

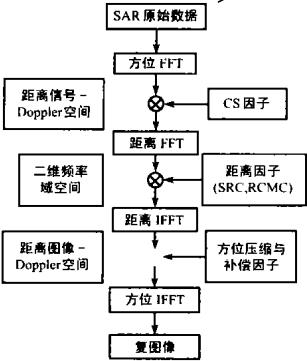
方向向取 8192 点、距离向取 4096 点,分别用经典的 CS 算法和 DFCS 方法进行仿真试验.图 3 是采用经典 CS 算法与 DFCS 算法进行距离压缩的对比图,图 3(a)是经典 CS 算法的距离压缩图,图 3(b)是使用 DFCS 算法同一点的距离压缩图,从图可以看到,使用 DFCS 算法其距离压缩较经典 CS 算法的距离压缩有明显的改善:经典 CS 算法的距离压缩存在散焦问题,其峰值旁瓣比比 DFCS 算法距离压缩后的峰值旁瓣比要低(表 2),且在距离向上偏移了约 40 个采样点;图 4 是采用经典 CS 算法与 DFCS 算法进行点目标成像的等位线对比图(为便于对比,图的显示使用的是等位线方式并放大),从图可以看到,使用 DFCS 算法,其点目标成像质量较经典 CS 算法的点目标成像质量有明显的改善,经典 CS 算法的点目标成像在距离向有分立的两个点,即在距离向存在散焦,与理论所述相吻合,说明 DFCS 方法更具合理性;图 5 是采用经典 CS 算法与 DFCS 算法对 X 波段侧视角为 30b 的点目标进行成像的对比图,由图可见,经典 CS 成像比 DFCS 成像在距离向上偏移了约 80 个采样点,且 DFCS 成像精度优于经典 CS 成像精度;表 2 是成像试验性能参数的对比情况(在成像处理时未用任何加窗处理),同样支持理论分析.因此,在 CS 算法中应该仔细分析各因子中参数的具体含义,针对不同的成像模式使用不同的相位因子,使成像效果达到最佳.

需说明的是,以上实验是在仅改变 CS 算法的多普勒频率下得到的,所用的距离方程也是经典 CS 算法中的二阶展开式,对于 L 波段侧视角小于 15b, X 波段侧视角小于 30b 的情况效果较好,对于更大侧视角的成像需要考虑距离方程展开式三次以上项及参考距离调频率近似的影响<sup>[2,3]</sup>,才能达到精确成像的目的.

表 2 CS 算法与 DFCS 算法的点目标成像性能参数对比

	波段	侧视角(度)	斜距向		方位向	
			PSLR (dB)	ISLR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
CS 算法	L	10	- 12.34	- 9.28	- 13.24	- 9.73
	X	30	- 12.31	- 9.26	- 13.22	- 9.71
DFCS 算法	L	10	- 13.26	- 9.77	- 13.28	- 9.80
	X	30	- 13.27	- 9.78	- 13.29	- 9.82

图 2 CS 算法处理流程图



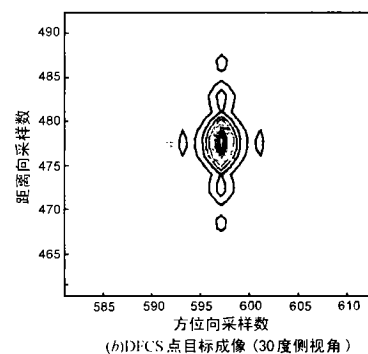
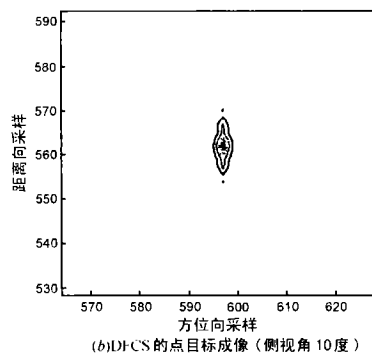
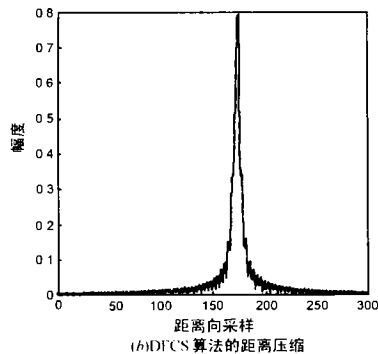
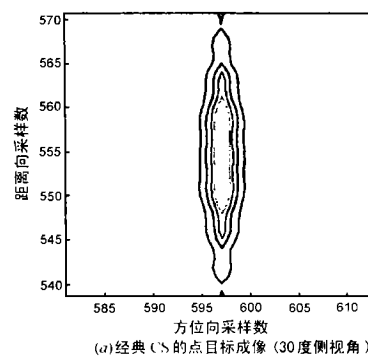
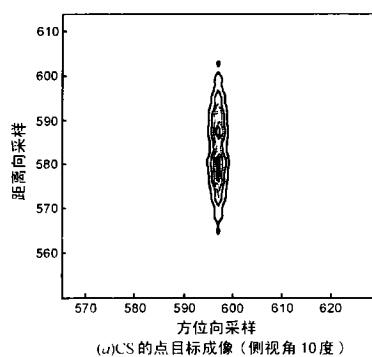
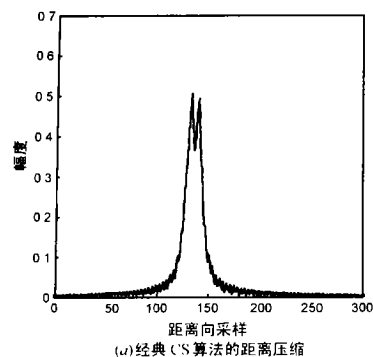


图 3 经典 CS 与 DFCS 距离压缩的对比图 (L 波段, 10 度侧视角): (a) 经典 CS 算法; (b) DFCS 算法

图 4 经典 CS 与 DFCS 的点目标成像等位图 (L 波段, 10 度侧视角): (a) 经典 CS 算法; (b) DFCS 算法

图 5 经典 CS 与 DFCS 的点目标成像等位图 (X 波段, 30 度侧视角): (a) 经典 CS 算法; (b) DFCS 算法

## 5 结论

在 SAR 成像处理中, 多普勒频率是一个十分重要的参数, 多普勒频率使用不正确, 必然带来成像质量的下降和图像定位的误差。在斜视工作模式下, 方位采样方向与距离采样方向不垂直, 二者之间必定存在耦合, 若方位向多普勒频率不作相应变化, 就必然存在误差; 其次, 多普勒质心不为零, 使用经典的多普勒质心与脉冲重复频率(方位向采样率)来进行 SAR 成像处理就存在误差。若方位向多普勒频率存在误差, 必然导致线性调频斜率失真和 CS 算法中距离弯曲因子的偏差, 严重影响成像的质量, 尤其是图像的定位和分辨率。

本文通过对斜视 SAR 目标回波信号的瞬时方位频率和瞬时多普勒频率及距离 Chirp 斜率对方位频率的影响的仔细分析, 发现了多普勒频率在斜视 SAR 成像处理中的新应用, 点目标仿真试验证明了该方法的合理性, 其成像质量有明显的改善。

## 参考文献:

- [1] R Keith Raney, H Runge, et al. Precision SAR processing using chirp scaling [J]. IEEE Trans GRS, 1994, 32(4): 786-799.
- [2] Alberto Moreira, Yonghong Huang, et al. Airborne SAR processing of highly squinted data using a chirp scaling approach with integrated motion compensation [J]. IEEE Trans GRS, 1994, 32(5): 1029-1040.
- [3] G W Davidson, I G Cumming, M R Ito, et al. A chirp scaling approach for processing squint mode SAR data [J]. IEEE Trans AES, 1996, 32(1): 121-133.

- [4] J Mittermayer, A Moreira, O Löffel, et al. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Trans GRS, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [5] Sun, Xiaobing, Yeo Tat Son, et al. The impact of range chirp scaling algorithm [A]. Proc IEEE GRS Symp, IGARSS 99 [C]. Hanburg, Germany, 1999. 556-558.
- [6] Gordon W Davidson, Ian Cumming, et al. Signal properties of spaceborne Squint Mode SAR [J]. IEEE Trans GRS, 1997, 35(3): 611-617.

## 作者简介:



刘光炎 男, 1968 年生于重庆, 博士生, 主要研究方向为信号处理、SAR 系统及成像等。



黄顺吉 男, 1932 年生于浙江金华, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 在国内外著名刊物上已发表论文百余篇, 研究方向为 SAR 系统、SAR 成像和信号处理、目标检测与识别、GPS 及数据压缩与数据融合等。