

斜视聚束模式合成孔径雷达的频率 Scaling 成像算法

孙进平,袁运能,柳重堪,毛士艺

(北京航空航天大学电子工程系 203 教研室,北京 100083)

摘 要: 作为一种新的聚束模式合成孔径雷达 (Spotlight SAR) 成像算法,频率 Scaling 算法 (FSA) 在不进行插值操作的情况下,可以对距离单元徙动 (RCM) 实现精确校正. 本文详细研究了频率 Scaling 算法在大斜视角情况下 Spotlight SAR 的成像算法. 在原有算法的基础上提出了斜视模型下的频率 Scaling 算法. 点目标仿真和对原始回波数据的成像结果都证实了该算法的可行性.

关键词: 合成孔径雷达; 聚束模式; 成像算法

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 12-1593-04

High Squint Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm

SUN Jin-ping, YUAN Yun-neng, LIU Zhong-kan, MAO Shi-yi

(Department of Electronic Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: As a new spotlight SAR image formation algorithm, Frequency Scaling approach precisely performs the range cell migration correction without interpolation by using a novel frequency scaling operation. A new Frequency scaling image formation algorithm suitable for high squint angle is proposed in this paper. Point target simulations up to 45 deg squint angle have been carried out to show the validity of the improved algorithm. Also presented is a spotlight image extracted from stripmap raw data of DLR's E-SAR system.

Key words: synthetic aperture radar; spotlight Mode; imaging algorithm

1 引言

FSA 算法是一种新提出的聚束 SAR 成像算法^[1]. 同距离徙动算法 (RMA) 一样, FSA 算法要求所处理的数据为距离向解线性调频 (Dechirp) 之后的数据. 该算法通过使用新的频率 Scaling 函数, 在不进行插值的情况下可以对距离徙动进行完全的校正. 同时利用子孔径方法可以缩短方位向 FFT 的长度以及降低对脉冲重复频率 (PRF) 的要求. 方位向的压缩通过频谱分析法 (SPECAN) 和方位 Scaling 方法来实现. 使用 SPECAN, 实现方位向的压缩可以不需要很长的参考函数, 也可以降低进行方位向处理的采样点数. 方位 Scaling 方法主要是为了克服 SPECAN 的缺点 (比如为完成几何重采样而进行的插值操作). 文[1]中主要讨论了正侧视情况下的 FSA 成像算法. 本文在此基础上, 研究了 FSA 在大斜视角的情况下的处理方法, 在原有算法的基础上, 提出了斜视模型下的频率 Scaling 算法. 由于所选择几何模型的不同, 对于文[1]中所定义的参考函数进行了相应的修正. 在方位向的处理中, 采用了新的方位 Scaling 函数, 解决了文[1]中进行方位 Scaling 时方位点数扩展随斜视角的增大而成倍增长的矛盾. 点目标仿真和对原始回波数据的成像结果都证实了该算法的可行性.

收稿日期: 2000-10-26; 修回日期: 2001-01-22

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 68931040)

2 斜视频率 Scaling 算法基础

斜视聚束 SAR 的数据采集平面照射几何可如图 1 定义, t 为方位向时间, 在 $t=0$ 时刻, 载机和照射区域中心 O 之间的距离为 R_0 , 雷达视线 (LOS) 与方位向 (载机飞行方向) 之间的夹角为 φ , 散射点目标 P 与区域中心 O 之间在方位向的距离为 x_0 , P 到方位向的最短距离为 r_0 , O 到方位向的最短距离为 r_c . t 时刻载机同散射点 P 之间的距离为 $R(t)$. 则 $R(t)$ 可表示为

$$R(t) = \sqrt{(R_0 \cos \varphi - vt + x_0)^2 + r_0^2} \quad (1)$$

为得到同方位向分辨率相当的距离向分辨率, 必须发送高带宽的 Chirp 信号. 由于一般聚束 SAR 的成像区域较小, 为降低接收信号的带宽, 在 A/D 转换之前, 通常进行 Dechirp 接收处理.

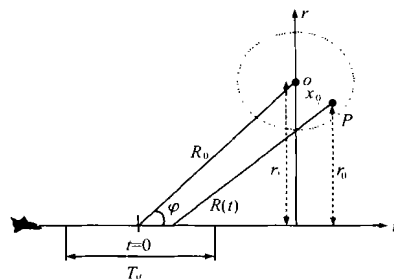


图 1 数据采集平面的照射几何

当采用固定距离 r_c 处的回波信号作为 Dechirp 解调信号 (可完成距离向的 Dechirp 解调) 时, 回波信号在距离向 Dechirp

之后的信号为^[1]

$$s(t, \tau) = a_r \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R(t)/c}{T_p}\right) \exp\left(j\left(-\frac{4}{c}R(t) - \frac{4}{c}k_r(R(t) - r_c) \cdot \left(\tau - \frac{2}{c}r_c\right) + \frac{4}{c^2}k_r(R(t) - r_c)^2\right)\right) \quad (2)$$

其中 t 为方位时间(慢时间), τ 为距离时间(快时间), T_p 为发射信号的脉冲宽度, T_a 为方位向采样时间, 为雷达信号波长, k_r 为雷达脉冲线性调频率, c 为光速。

利用驻定相位原理进行方位向傅立叶变换, 则回波信号的距离-Doppler 域表示式近似为

$$s(f_a, \tau; r_0) = C \text{rect}\left(\frac{\tau - 2r_c/2}{T_p}\right) \exp\left[-j\frac{4}{c}r_0(f_a) \right] \exp\left[-j\frac{4}{c}k_r\left(\frac{r_0}{f_a} - r_c\right)\left(\tau - \frac{2}{c}r_c\right)\right] \exp\left(-j\frac{2}{v}f_a x_0\right) \text{src}\left(f_a, \tau - \frac{2}{c}r_c; r_0\right) \exp\left[-j\frac{1}{2}k_r\tau^2\right] \quad (3)$$

f_a 的变化范围为 $-\frac{f_{PRF}}{2} + f_{DC} \leq f_a \leq \frac{f_{PRF}}{2} + f_{DC}$, f_{PRF} 为脉冲重复频率, 方位多普勒中心频率

$$f_{DC} = 2v \cos(\theta) / \lambda$$

Scaling 因子

$$(f_a) = \sqrt{1 - f_a^2 / 4v^2}$$

二次距离压缩项

$$\text{src}(f_a, \tau; r_0) = \exp\left[-j\frac{2}{c^2}r_0k_r^2 \cdot \left(\frac{\tau^2 - 1}{3}\right) \tau^2 + j\frac{2}{c^3}r_0k_r^3 \cdot \left(\frac{\tau^2 - 1}{5}\right) \tau^3\right]$$

3 斜视频率 Scaling 算法的实现

斜视情况下聚束模式 SAR 频率 Scaling 成像算法的流程如图 2 所示, 主要包括距离单元徙动校正和方位向压缩两方面的处理。

3.1 使用频率 Scaling 方法进行 RCM 校正

根据式(3)在距离向进行傅立叶变换之后的波数域表达式为

$$S(f_a, f_r; r_0) = C \text{rect}\left[-j\frac{4}{c}r_c f_r\right] \cdot \left(\exp\left[-j\frac{4}{c}r_0(f_a)\right] \cdot T_p\right) \cdot \text{si}\left[T_p\left(f_r + \frac{2k_r}{c}\left(\frac{r_0}{f_a} - r_c\right)\right)\right] \exp\left(-j\frac{2}{v}f_a x_0\right) \cdot \text{SRC}(f_a, f_r; r_0) \exp\left[j\frac{1}{k_r}f_r^2\right] \quad (4)$$

在频率 Scaling 算法中, 对 RCM 的校正分两步进行^[1]:

首先对距离频率用 $1/c$ 进行伸缩变换(Scaling), 使的式(4)中的 si 函数变换为

$$\text{si}\left[\frac{T_p}{c}\left(f_r + \frac{2k_r}{c}\left(r_0 - r_c\right)\right)\right] \quad (5)$$

在式(5)中, RCM 不再依赖于点目标距离 r_0 , 而只依赖于照射中心的距离 r_c , 即使得所有距离处的 RCM 同中心距离处的 RCM 相同。频率 Scaling 操作的各个 Chip 函数为^[1]

$$H_{FS}(f_a, \tau) = \exp\left[j\frac{1}{2}k_r\tau^2(1 - \frac{f_a}{f_c})\right]$$

$$H_{RVC}(f_a, f_r) = \exp\left[-j\frac{f_r^2}{k_r}\right]$$

$$H_{IS}(f_a, \tau) = \exp\left[j\frac{1}{2}k_r\tau^2\left(1 - \frac{f_a}{f_c}\right)\right]$$

RCM 校正的第二步是二次距离压缩和块移(Bulk Shift), 进行 FS 操作之后信号的 RD 域表示为

$$s(f_a, \tau; r_0) = C \text{rect}\left(\frac{\tau - 2r_c/c}{T_p}\right) \exp\left(-j\frac{2}{v}f_a x_0\right) \exp\left[-j\frac{4}{c}k_r\left(r_0 - r_c\right)\left(\tau - \frac{2}{c}r_c\right)\right] \text{src}\left(f_a, \tau - \frac{2}{c}r_c\right) \exp\left[-j\frac{4}{c}r_0\right]$$

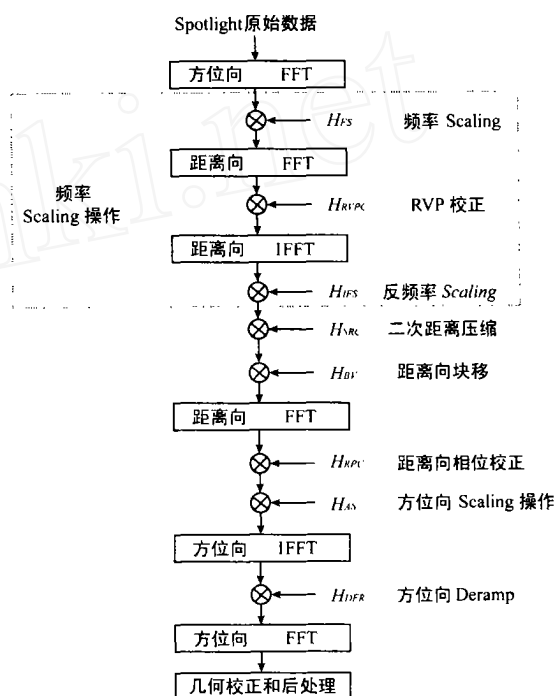


图 2 斜视聚束 SAR 频率 Scaling 成像算法流程
可利用近似 $r_0 - r_c$, 进行二次距离压缩的参考函数为^[1]

$$H_{SRC}(f_a, \tau; r_c) = \text{src}\left(f_a, \tau - \frac{2}{c}r_c; r_c\right) \cdot \exp\left[j\frac{2}{c^2}r_c k_r^2 \cdot \left(\frac{\tau^2 - 1}{3}\right) \tau^2 - j\frac{2}{c^3}r_c k_r^3 \cdot \left(\frac{\tau^2 - 1}{5}\right) \tau^3\right] \cdot \left(\tau - \frac{2}{c}r_c\right)^3$$

距离向块移的参考函数可选择为

$$H_{BV}(f_a, \tau) = \exp\left[j\frac{4}{c}k_r r_c \left(1 - \frac{f_a}{f_c}\right) \left(\tau - \frac{2}{c}r_0\right)\right]$$

块移之后, 在距离向进行傅立叶变换, 将信号变换到波数域。同时乘相位校正参考函数

$$H_{RPC}(f_a, f_r; r_c) = \exp\left[j\frac{4}{c}r_0\left(\frac{f_r}{f_c}\right)\right]$$

至此完成了 RCM 的校正, 同时也完成所有距离向处理, 之后信号的波数域表示为

$$S(f_a, \frac{f_r}{c}; r_0) = C \exp\left(-j\frac{2}{v}f_a x_0\right) \exp\left[-j\frac{4}{c}r_0\right] \exp\left[-j\frac{4}{c}k_r r_0 \left(\frac{2R_0}{c} - \frac{2r_c}{c}\right)\right]$$

$$\text{si} \left[\frac{T_p}{c} \left(f_r + \frac{2k_r}{c} (n_0 - r_c) \right) \right] \quad (6)$$

块移之后式(6)中的 si 函数代表点目标回波信号的距离向频率只是点目标和中心点之间相对距离的函数,这样 RCM 就得到了完全的校正,式(6)中其他指数项代表了未压缩的方位向信号。

3.2 频率 Scaling 算法的方位向处理

频率 Scaling 算法结合了 SPECAN 算法和方位 Scaling 算法来进行方位向的处理,对式(6)在方位向消除多普勒中心频率之后,信号波数域表示为

$$S(f_a, \frac{f_r}{v}; r_0) = C \exp \left(-j \frac{2 f_a x_0}{v} \right) \exp \left[-j \frac{4}{c} \frac{n_0 (f_a + f_{DC})}{c} \right] \exp \left[-j \frac{4}{c} \frac{k_r n_0}{c} \left(\frac{2R_0}{c} - \frac{2r_c}{c} \right) \right] \text{si} \left[\frac{T_p}{c} \left(f_r + \frac{2k_r}{c} (n_0 - r_c) \right) \right] \quad (7)$$

其中 $-f_{PRF}/2 \leq f_a \leq f_{PRF}/2$ 。

由于在不同的距离 r_0 处,方位 Chirp 信号的调频率不同。通过方位 Scaling 操作可使得不同 r_0 处的方位调频率近似相等^[2]。方位向的 Chirp 特性是通过 $(f_a + f_{DC})$ 体现的。根据式(7)方位 Scaling 参考函数可选为

$$H_{AS}(f_a, r_0; r_s) = \exp \left[j \frac{4}{c} \frac{r_0}{v} (f_a + f_{DC}) - (f_{DC}) \right] \exp \left[-j \frac{1}{k_s} f_a^2 \right] \exp \left[\frac{r_0 f_{DC} f_a}{v^2 (f_{DC})} \right] \exp \left[j \frac{4}{c} \frac{k_r r_0}{c} \left(\frac{2R_0}{c} - \frac{2r_c}{c} \right) \right] \quad (8)$$

其中 k_s 为照射中心回波信号方位向的调频率,将它作为参考线性调频率^[3]

$$k_s = - \frac{2v^2 \sin^2(\angle)}{R_0}$$

式(8)所表示的方位 Scaling 参考函数中,由于对斜视情况下的 Scaling 因子作了更为准确的近似,从而解决了文[1]中进行方位 Scaling 时方位点数扩展随斜视角的增大而成倍增长的矛盾。文[1]中由于采用正侧视模型,对应的 H_{AS} 没有式(8)中的第三个指数项。很明显,该项在方位 IFFT 之后将对应时域的位移。根据式(8),距离位置为 r_0 处的目标同中心目标之间位移之差为

$$t_c = \left| \frac{(r_0 - r_c) f_{DC}}{2v^2 (f_{DC})} \right| \quad (9)$$

为了计算方位 IFFT 时不产生缠绕现象,对应方位采样点数应增加

$$N_{est} = 2 \cdot t_c \cdot f_{PRF}$$

按照表 1 中的系统参数进行仿真,在 $r = r_0 - r_c$ 取不同值时,图 3 为 N_{est} 同斜视角之间的关系曲线,可见如果采用文[1]中的方法,在大斜视角情况下方位向所需扩展的点数是相当可观的,而采用式(8)

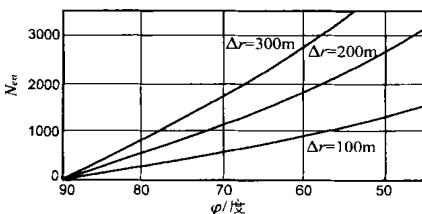


图 3 扩展点数同斜视角的关系

则可以避免进行这种扩展。

方位 Scaling 调整之后,进行方位向逆傅立叶变换,通过 Deramp 操作进行方位压缩,根据方位向的参考线性调频率,方位压缩的 Deramp 参考函数为

$$H_{DER}(t; r_s) = \exp[-j k_s t^2]$$

利用 SPECAN 算法,在方位向进行 FFT 即可完成方位向的压缩。方位向更高分辨率可结合子孔径方法得到^[1]。

4 仿真

利用表 1 所示的系统参数,我们给出来了斜视角分别为 $=60^\circ$ 和 $=45^\circ$ 时点目标的计算机仿真,设照射中心点目标的地坐标为 $(0,0)$,则用于仿真的九个点的坐标分别为

$$\begin{aligned} &(0,0), \quad (0,200), \quad (0,-200) \\ &(200,0), \quad (200,200), \quad (200,-200) \\ &(-200,0), \quad (-200,200), \quad (-200,-200) \end{aligned}$$

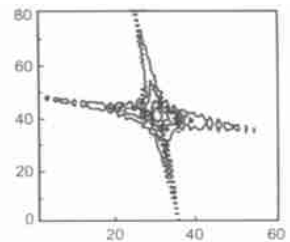
对点目标 (X,Y) , X 为方位向坐标, Y 为距离向坐标。选择坐标为 $(0,200)$ 的点为边界点 B 。

表 1 用于点目标仿真的系统参数

照射中心距离 r_c	5688m
载机方向速度 v	76m/s
波长	0.03m
脉冲重复频率 PRF	600Hz
脉冲宽度	5.0μs
距离向调频带宽	50MHz
距离向采样频率	60MHz



(a) 仿真成像结果

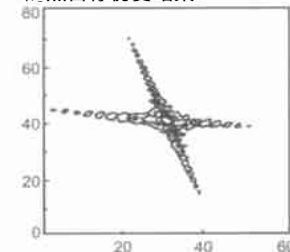


(b) 边界点 B 处脉冲响应

图 4 斜视角 $=60^\circ$ 的点目标仿真结果



(a) 仿真成像结果



(b) 边界点 B 处脉冲响应

图 5 斜视角 $=45^\circ$ 的点目标仿真结果

表 2 B 点目标在方位向和距离向分析数据

斜视角	方位分辨率(m)			距离分辨率(m)			方位 PSLR(dB)	距离 PSLR(dB)
	理论	实测	误差	理论	实测	误差		
$=60^\circ$	0.89	0.91	2.25%	3.00	2.96	1.33%	-19.54	-12.55
$=45^\circ$	1.32	1.38	4.55%	3.00	3.05	1.47%	-13.94	-10.56

图 4 和图 5 分别为斜视角 $\theta = 60^\circ$ 和 $\theta = 45^\circ$ 时的点目标仿真结果,表 2 为仿真结果中 B 点目标在方位向和距离向的分析数据.

利用文[5]中所述算法,我们将德国宇航院(DLR)ESAR 系统原始条带模式 SAR 回波数据,转换得到了模拟的真实聚束 SAR 数据(由于 ESAR 系统具有相对比较宽的波束,适合于作这种转换).图 6 为利用所得到的回波数据所成雷达图像.所用系统参数同表 1 一致,斜视角



图 6 ESAR 原始数据所成雷达图像

$\theta = 3^\circ$,方位分辨率为 0.7 米,距离分辨率为 3 米.

5 结论

FSA 算法作为一种新提出的聚束模式 SAR 成像算法,同其他已有的算法相比较,对于相同的经过 Dechirp 之后的回波数据,在不进行插值的情况下可以对距离徙动进行完全的校正.本文在原有 FSA 算法^[1]的基础之上,给出了适合于大斜视角情况下聚束 SAR 的 FSA 成像算法,通过点目标仿真和实际数据的成像,验证了该算法的可行性,因此该算法具有一定的实用性.在大斜视角情况下,对频率 Scaling 算法成像有影响的还有二次距离压缩项的近似,其原理同 Chip Scaling 算法是相同的.在本文的仿真参数下,当斜视角 $\theta < 40^\circ$ 时,距离向会产生混迭现象,这种近似也限制了频率 Scaling 算法的斜视角范围.

致谢:在本文的写作过程中,同文[1]作者 Josef. Mittermayer 博士进行了非常有益的讨论,特致诚挚的谢意.

参考文献:

- [1] J Mittermayer, A Moreira, O Loffeld. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. IEEE Trans Geosci. Remote Sensing, Sept 1999, 37(5): 2198 - 2213.
- [2] A Moreira, J Mittermayer, R Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scan SAR imaging modes [J]. IEEE Trans Geosci. Remote Sensing, Sept 1996, 34: 1123 - 1136.
- [3] Carrara W G, Godman R S, Majewski R M. Spotlight synthetic aperture radar signal processing algorithms [M]. Boston: Artech House, 1995.
- [4] Claudio Prati, Fabio Rocca. Focusing SAR data with time-varying doppler centroid [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, May 1992, 30(3): 550 - 558.
- [5] 孙进平, 洪文, 柳重堪, 毛士艺. 条带模式合成孔径雷达回波数据的聚束成像算法处理 [J]. 航空学报, 2000 年航空电子增刊.

作者简介:



孙进平 男, 1975 年生于甘肃省秦安县. 北京航空航天大学信号与信息处理专业博士研究生, 1998 年于北京航空航天大学获工学硕士学位. 现主要从事机载 SAR 成像方面的研究工作.



袁运能 男, 1962 年生于江西余干县. 在北京航空航天大学从事博士后研究, 主要研究领域为: 小波分析及其应用, 高分辨率雷达成像.

毛士艺 男, 1935 年生于江苏南京. 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士. 主要研究领域为: 高分辨率雷达成像、弱信号检测、非高斯信号建模、信号分类、多传感器融合、数据互联和多目标跟踪.