

一种匹配滤波结合 Chirp Scaling SAR 数字成像处理方法

肖永新 李传荣

(中国科学院遥感卫星地面站 北京 100086)

摘 要 合成孔径雷达(SAR)是一种重要的微波遥感工具。其关键技术是成像处理,即把接收到的雷达信号转换成雷达图像。事实上,合成孔径就是通过成像处理来实现的。该文在总结目前星载 SAR 各种成像处理算法的基础上,提出一种匹配滤波与 Chirp Scaling 相结合的处理方法。处理过程无需插值便可进行距离迁移校正,还可获得好的聚焦与相位保持性能。所得图像质量超过现有的其它 SAR 成像处理方法所得图像质量。

关键词 匹配滤波, Chirp Scaling 算法, 距离/多普勒算法, 距离迁移校正

1 引 言

SAR作为一种主动式的微波遥感工具正日益受到世界各国的高度重视。它所具有的主动、全天候、作用距离远、测绘带宽、高分辨率、空间分辨率与作用距离无关、能穿透植被等重要特点使之成为光学遥感的重要补充。

SAR利用自身发射的电磁波产生高分辨率的二维图像。它与其它形式雷达系统的最大不同点在于成像处理,通过成像处理可将 SAR 接收到的雷达信号转变为二维雷达图像。SAR 成像处理主要分为光学处理和数字处理两种,随着电子与计算机科学技术的高速发展,由于数字成像处理具有数据记录方式简单,处理方式灵活,可实时处理等优点,目前已成为 SAR 成像处理的主流。

自 1978 年 SEASAT-A 卫星成功发射以来,星载 SAR 成像处理技术一直是人们关注的焦点问题之一。在目前人们已提出的成像算法中,距离/多普勒(Range / Doppler (RD))算法是最经典的,并一直被认为是星载 SAR 处理的世界标准^[1,2]。这种方法由美国喷气推进实验室(JPL)的科学家首先提出,之后又经加拿大 MDA 公司和加拿大遥感中心(CCRS)的工程师和科学家不断改进与工程化,使之成为一个真正有效方便的处理方法。然而距离/多

普勒算法也有一些明显的缺点,例如在距离迁移校正时需要插值运算;其次当斜视角较大时,图像质量明显下降。

另外一种较有影响的 SAR 成像处理算法是由欧洲科学家提出的波数域(Wavenumber Domain (WD))方法,这种算法在二维谱域完成二维压缩,并从原理上讲可以处理斜视。但波数域方法也存在一些不足:如在二维频域运算时也需要插值运算;此外由于是二维运算,因此运算效率较低。至今波数域方法还远未能取代距离/多普勒算法的主导地位。

插值运算是影响图像质量的一个重要因素。插值的精度与实现插值的复杂程度及运算量是一对尖锐的矛盾。要想提高插值精度就必然带来计算量的增加,不利于工程实现。因此插值是成像处理中的一个难点,同时也是最大的误差源。

近年来由德国和加拿大科学家联合提出一种全新的 SAR 成像算法——Chirp Scaling (CS)算法^[1-3]。人们普遍认为这种方法在两个方面优于距离/多普勒算法:1)在距离迁移时不需要插值运算;2)在大合成孔径与大斜视的情况下,仍能保持较高的精度。因此目前被认为是最精确的 SAR 成像算法。但是,Chirp Scaling 算法也有一个明显的缺点:在整个算法的理论分析与数学推导过程中,频繁使用驻定相位原理(PSP)。由于驻定相位原理只能得到变换域的一个近似结果,因此该算法中的

该文得到了中国科学院遥感卫星地面站章文毅工程师的热情帮助和美国 Johns Hopkins 大学 Dr. R. Keith. Raney 的有益讨论。

收稿日期: 1997-03-07; 收到修改稿日期: 1997-05-23

3 个主要的参考函数都是近似的, 并且可能引入相位与聚焦误差。

目前 SAR 成像处理中还经常使用一种粗处理方法——频谱分析法 (SPECAN)^[4,5]。该方法的优点是成像速度快。缺点是易产生图像混叠, 不便进行距离迁移校正, 以及所得图像在方位向被压缩或展宽。因此多用于快速成像处理及 Scan SAR 成像处理中, 而不宜用于做全分辨率精确 SAR 成像处理。

本文提出一种匹配滤波与 Chirp Scaling 相结合的 SAR 成像算法。利用雷达信号的线性调频特性, 在距离向改变雷达数据位置尺度。即把不同距离上目标的能量分布轨迹同一化, 使之都等同于某一参考距离上的目标能量轨迹。然后在二维频域校正距离迁移, 可避免插值运算。与 Chirp Scaling 算法不同, 该算法应用匹配滤波来完成两个方向, 即距离向与方位向的聚焦。由于在时域生成的匹配滤波器可以是雷达信号的精确复制, 因此可达到更好的聚焦性能。这种方法在信号检测中可达到最佳信噪比。

2 Chirp Scaling 算法

Chirp Scaling 算法^[1]借助雷达信号的线性调频特性, 将原来不同距离所对应的不同轨迹的目标能量分布调整到同一轨迹分布, 称为 Chirp Scaling, 然后在二维频域无需插值, 便可精确地进行距离迁移校正。Chirp Scaling 在距离信号时域——方位频域 (多普勒域) 进行, 距离压缩与距离迁移校正是在二维频域完成, 最后在距离图像时域——方位多普勒域进行方位聚焦, 生成二维图像。该算法的流程如图 1。

假定雷达发射信号是一个调频率为 K 的线性调频信号:

$$\exp\{j\pi K\tau^2\} \quad (1)$$

则接收的基带信号为:

$$h(\tau, t, r) = \exp\{j\pi K[\tau - (2/c)R(t, r)]^2 - j(4\pi/\lambda)R(t, r)\} \quad (2)$$

则第 1 相位函数用以完成 Chirp Scaling, 即距离迁移标尺化和同一化, 为:

$$S_1(\tau, f_a; r_{ref}) = \exp\{j\pi K_s(f_a, r_{ref})C_s(f_a)[\tau - \tau_{ref}(f_a)]^2\} \quad (3)$$

$$\text{其中: } C_s(f_a) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r)}\right)^2}} - 1 \quad (4)$$

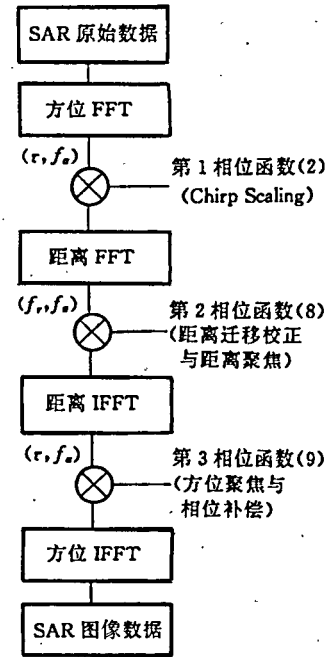


图 1 Chirp Scaling 算法

Fig.1 Chirp Scaling algorithm

$$\alpha(f_a, r) = \frac{2\lambda}{c^2} \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r)} \right) / \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r)} \right)^2 \right]^{3/2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{K_s(f_a, r)} = \frac{1}{K} + r\alpha(f_a, r) \quad (6)$$

$$\tau_{ref}(f_a) = \frac{2}{c} r_{ref} [1 + C_s(f_a)] \quad (7)$$

这里 f_a 是方位频率, t 是方位时间, τ 是距离时间, λ 是雷达波长, c 为光速, r 是传感器与目标最近距离, r_{ref} 是参考距离, $\tau_{ref}(f_a)$ 是参考距离对应的时间, $K_s(f_a, r)$ 是有效线性调频率, $C_s(f_a)$ 是弯曲因素。

第 2 相位函数完成距离迁移校正与距离压缩, 包括 2 次距离压缩, 其形式为:

$$S_2(f_r, f_a; r) = \exp\left\{j\pi \frac{f_r^2}{K_s(f_a, r_{ref})[1 + C_s(f_a)]} - j\frac{4\pi}{c} f_r r_{ref} C_s(f_a)\right\}, \quad (8)$$

这里 f_r 是距离频率。式 (8) 中第 1 项完成距离聚焦及 2 次距离压缩, 第 2 项完成距离迁移校正。

第 3 相位函数用于方位聚焦与相位补偿, 为:

$$S_3(\tau, f_a) = \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} c\tau \left[1 - \left[1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V(r = \tau c / 2)} \right)^2 \right]^{1/2} \right]\right\}$$

$$-j \frac{4\pi}{c^2} K_s(f_a, r_{ref}) [1 + C_s(f_a)] \cdot C_s(f_a) (c\tau / 2 - r_{ref})^2 \quad (9)$$

式(9)中的第 1 项完成方位聚焦,第 2 项补偿式(3)中 Chirp Scaling 相位乘所产生的冗余相位项。

很显然 Chirp Scaling 算法无需使用插值运算,仅有 FFT 和乘积运算,便于软硬件实现。

然而,由于该算法的整个推导过程均使用驻定相位原理进行近似分析,因此 3 个关键的相位函数与实际信号不一定完全匹配,可能引起误差。

3 匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法

该算法采纳 Chirp Scaling 基本思想,利用雷达信号的线性调频特性,对回波目标分布轨迹进行调整,同一化。然后无需插值进行距离迁移校正。不同于 Chirp Scaling 算法,该算法采用 2 个一维匹配滤波器分别在距离和方位两个方向上聚焦 SAR 数据。匹配滤波器在时域构成,以便是雷达信号的一个精确复制,然后通过 FFT 在频域完成相关运算。这种聚焦方法是最优的或近最优的^[6]。

为了工程实现的方便,所有函数均用两个关键多普勒参数来表示,即多普勒中心频率和多普勒调频率。

根据星载传感器与目标间的运动几何关系,目标—传感器间的相对运动历程可表示为:

$$R(t) = r - (\lambda / 2) \left(f_{dc} t + f_{dr} t^2 / 2 \right) \quad (10)$$

$$R(t) = \sqrt{r^2 + V^2(r) t^2} \approx r + V^2(r) t^2 / 2r \quad (11)$$

其中, f_{dc} 是多普勒中心频率, f_{dr} 是多普勒调频率。

如果方位信号被处理为零多普勒产品,该过程可通过移动方位频谱(根据多普勒中心频率)来实现。则等式(10)和(11)可推导出:

$$r - \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2} f_{dr} t^2 \approx r + \frac{V^2(r) t^2}{2r} \quad (12)$$

$$V(r) = \sqrt{-f_{dr} \lambda r / 2} \quad (13)$$

在具体工程实现中,每一个聚焦深度应更新一次多普勒参数。匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法的流程图如图 2。

该算法中的第 1 相位参考函数可以与 Chirp Scaling 算法中的第 1 相位函数相同(见式(2))。该

相位乘完成目标距离迁移的调整与同一化。

第 2 相位函数为:

$$\Phi_2(f_r, f_a; r) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} f_r r_{ref} C_s(f_a) \right\} \quad (14)$$

该相位乘完成距离迁移校正。

由于多数星载 SAR 工作在零距离偏置状态下,如 ERS-1 / 2, JERS-1 和 RADARSAT, 因此距离参考函数可采用下列形式:

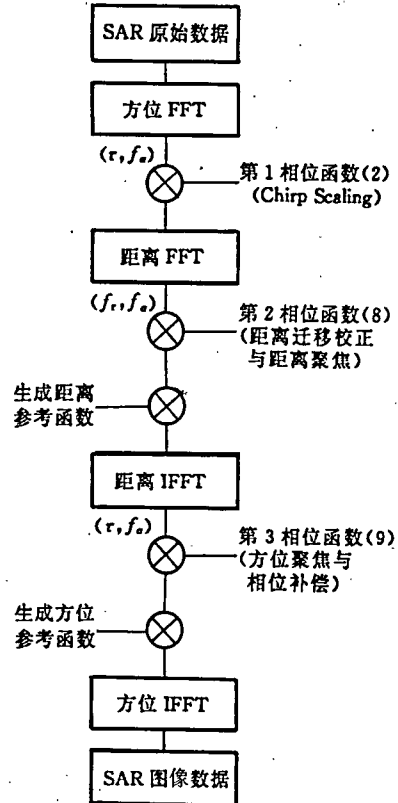


图2 匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法

Fig.2 Matched filtering with Chirp Scaling algorithm

$$R_s(\tau) = \exp\{j\pi K\tau^2\} \quad (15)$$

在没有斜视的情况下, K 就是雷达信号的原线性调频率。对于小斜视情况, K 可做适当的调整以便完成 2 次距离压缩^[7]。

$$K = K_0 \left(\frac{1}{1 + K_0 / K_1} \right) \quad (16)$$

$$K_1 = f_{dr}(c / \lambda f_{dc}) \quad (17)$$

其中, K_0 为雷达信号的原线性调频率。对于大斜视情况,则需要二维频域内加一个相位乘:

$$\varphi(f_r, f_a) = \frac{\pi}{f_{dr}} \left(\frac{\lambda f_a^2}{c} \right) f_r^2 \quad (18)$$

由于事先做了 Chirp Scaling 相位乘积运算,因此残余的距离迁移相对较小,式(16), (17), (18)所

进行的进一步校正可能是不需要的。

距离向的匹配滤波运算可通过 FFT 在频域实现。在距离 / 多普勒算法中, 距离匹配滤波在距离频域 / 方位时域完成, 而在该算法中距离匹配滤波却是在距离频域 / 方位频域完成。实际上, 由于距离匹配滤波仅仅是距离频率的函数, 因此方位向是频域还是时域无关紧要。

第 3 相位函数完成相位补偿。为:

$$\Phi_3(\tau, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c^2} K_s(f_a, r_{ref}) [1 + C_s(f_a)] \cdot C_s(f_a) \left(\frac{c\tau}{2} - r_{ref} \right)^2 \right\} \quad (19)$$

由于第 1 相位乘积运算将产生一个冗余的相位项, 该项需通过式 (19) 相位乘来补偿。

最后如果 SAR 处理器生成零多普勒图像产品, 则方位参考函数为:

$$R_a(t) = \exp\{j\pi f_a t^2\}. \quad (20)$$

同样方位匹配滤波通过 FFT 在频域进行。

4 实验研究

3 种 SAR 成像处理算法, 即一种高精度的距离 / 多普勒算法 (RD), Chirp Scaling 算法 (CS) 以及匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法 (MFCS) 已用于处理实际的 ERS-1 SAR 数据, 生成一景图像为中国山东省地区, 区域由 8500 (方位) \times 4900 (距离) 像素组成。图 3 显示其中的一个子区域, 由 1024 (方位) \times 1200 (距离) 像素组成。处理采用 3 视, 距离 / 多普勒算法采用 4 点 cubic spline 插值进入距离迁移校正。

比较 3 种算法的优劣, 我们主要从图像质量、运行速度、系统开销几个方面来考虑。衡量 SAR 图像质量的指标很多, 常用的有: 1) 辐射分辨率, 2) 空间分辨率, 3) 信号杂波比, 4) 峰值旁辨率, 5) 积分旁辨率, 6) 几何精度, 7) 等效视数等等。其中最重要的是

表 1 图像质量参数比较 (ERS-1)

Table 1 Image quality parameter comparison (ERS-1)

算 法	距离分辨率 (分辨单元)	方位分辨率 (分辨单元)	辐射分辨率 (dB)
RD	1.380	1.342	2.564
CS	1.377	1.426	2.542
MFCS	1.377	1.339	2.522

辐射分辨率和空间分辨率, 事实上雷达图像的可解译性及其从雷达图像上提取点目标的能力主要取决于这 2 个量¹⁾。其中空间分辨率主要通过图像上寻找点目标来测量。辐射分辨率的测量主要通过图像上寻找均匀地域, 求取功率的均值和方差来计算。本文采用定义式:

$$R_r = 1 + \sigma / \mu \quad (21)$$



图 3 采用 MFCS 算法生成的 SAR 图像

Fig.3 SAR imagery generated by the MFCS algorithm
这里 μ 为回波功率的期望, σ^2 为功率方差。

为了增加测量的可靠性, 减少随机噪声和人为因素的影响, 我们对不同点目标和均匀区域作多次测量后取统计平均。所得图像参数见表 1。从表中可见, MFCS 算法提高了图像的空间分辨率和辐射分辨率。实际测量结果与理化分析结果吻合。

接下来比较 3 种算法的速度。为了节省时间我们仅处理图 3 所示的子区域 (1024 \times 1200 像素)。匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法 (MFCS) 比 Chirp Scaling 算法 (CS) 需要稍多一点的数学运算。与 CS 算法相比较, 处理一景数据需要增加一个距离 FFT, 每一个聚焦深度需增加一个方位 FFT。尽管 MFCS 算法与 CS 算法无需插值运算, 但却比 RD 算法需要更多的数学运算, 运算速度比较见表 2。处理平台为

1) 肖永新. 应用信息论研究合成孔径雷达. 中国科学院电子学研究所. 博士论文, 1995.

SGI Indigo 工作站,具有 200MHz CPU 和 64MB 内存。处理过程无需转角储存。

结果表明, RD 算法具有较好的处理效率,这也

表 2 3种算法运行速度比较

Table 2 Performance characteristics of three algorithms

处理(盘到盘) 图像(1024×1200像素)	RD算法	CS算法	MFCS算法
处理时间(min)	6.77	10.45	10.84

就是为什么目前用于生产运行的 SAR 处理器多采用 RD 算法。这种算法既能保证一定的成像精度,同时又能满足对产品产量的要求。只有在特别要求高精度成像处理(如干涉 SAR 预处理)时,才考虑使用 CS 或 MFCS 算法。

5 结论与讨论

从运行速度、效率及工程实现等诸多方面综合考虑,对于侧视 SAR 成像处理(没有明显的斜视),距离/多普勒(RD)算法是十分有效的。

Chirp Scaling 算法运行速度较慢,且系统开销较大。此外在处理时,不易进行多普勒参数更新。因此对侧视 SAR 数据的一般性工程运行处理并无明显优点。但对大孔径,大斜视 SAR 处理可能有其特殊优势。由于国内缺乏此类实际数据,因此无法做实际测量。

分析与实测结果都表明匹配滤波结合 Chirp Scaling 算法具有良好的性能,该算法结合 Chirp Scaling 及传统匹配滤波的优点。处理过程不仅无需

插值便可进行距离迁移校正,而且同时还能获得好的聚焦与相位保持。该算法的应用仅需 FFT 和乘积运算,因此便于软硬件实现。

此外还有许多方面有待进一步完善,如更详细的理论分析及各种数据的测试和比较,包括实际与模拟数据。

参 考 文 献

- [1] R. K. Raney, *et al.* Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 30(4): 786—799.
- [2] I. Cumming, *et al.* A SAR processing algorithm with no interpolation. *IGARSS'92*, Clear Lake, TX, 1992, 376—379.
- [3] H. Runge, *et al.* A novel high precision SAR focusing algorithm based on chirp scaling. *ibid*, 372—375.
- [4] 李传荣等. SPECAN 算法在未来星载 SAR 处理中的应用. 信息与科技, 1995.2.
- [5] 肖永新等. 星载合成孔径雷达成像处理距离/多普勒算法与频谱分析算法比较. 电路与系统学会第十三届年会论文集. 1996.10, 重庆, 503—506.
- [6] R. Bamler. A comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms. *IEEE Tran. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(4): 706—713.
- [7] C. Y. Chang, *et al.* Squint mode SART processing algorithm. *IGARSS'89*, Vancouver, Canada, 1989, 1702—1705.

作 者 简 介

肖永新,男,工程师,1964年5月1日出生,1986年获清华大学自动化系工学学士学位,1995年获中国科学院电子学研究所通信与电子系统工程博士学位,主要从事微波遥感、通信、信号与图像处理方面的研究工作,已发表论文 20 余篇。

A Matched Filtering with Chirp Scaling SAR Processing Algorithm

Xiao Yongxin Li Chuanrong

(China Remote Sensing Satellite Ground Station, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086)

Abstract Synthetic aperture radar (SAR) is an important tool in microwave remote sensing. Among SAR techniques, SAR processing, which processes the received signal into SAR images, is the key point. In fact, synthetic aperture is realized by SAR processing. Different algorithms for SAR processing are described and a matched filtering with Chirp Scaling algorithm is presented. It removes the interpolation step for range cell migration correction (RCMC) and accomplishes better phase preserving and focusing. The images processed are superior to those obtained by other SAR algorithms.

Key words Matched filtering, Chirp scaling algorithm, Range / Doppler algorithm, Range cell migration correction