

Chirp Scaling SAR 成象算法及其实现

吴一戎 胡东辉 彭海良

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要 本文完善了 Chirp Scaling (CS) SAR 成象算法的数学模型,获得了雷达点目标二维频域的精确解析式,并进一步得到该算法存在的残余相差. 通过分析 CS 算法的特点,提出实现该算法的一种硬件结构.

关键词 CS 算法,残余相差,硬件实现

1 引言

在合成孔径雷达信号处理领域内,传统的距离/多普勒(R/D)算法认为信号方位谱在距离-多普勒域沿频域迁移曲线规律弥散在不同的距离门中,方位压缩可分为两步:(1)迁移曲线校正和(2)匹配滤波.

上述做法只在小斜视角条件下能较精确地补偿信号方位谱. 因为在距离-多普勒域内,完整的信号方位谱信息分布于 $l \times r$ 二维空间中 (l 为方位谱宽, r 为距离迁移曲线跨越距离门数),沿距离迁移曲线获得方位谱势必丢失相位信息. 斜视角越大, r 越大,相位信息损失越多,由此引起 SAR 成象质量的恶化. 因此 R/D 算法不适合大斜视角下的成象处理.

二次距离压缩算法 (SRC) 通过调整距离参考函数调频率,一定程度上改善了相位补偿提高了进行斜视 SAR 成象的能力. 但由于相位补偿模型的简化,当雷达斜视角超出一定范围时,二次距离压缩算法同样不能满足相位精补偿的要求.

同上述两种算法相区别,波数域算法直接在二维频域完成方位压缩. 由于方位处理本质上是二维相关运算,因此波数域算法能完整地补偿信号方位谱,而且它通过插值完成坐标变换,避免了参数刷新,成为实用的高效算法. 但是,插值的引入会带来两个缺陷:(1) 图像出现干扰点;(2) 处理复杂化,降低成象效率.

新近出现的 CS 算法在成象过程中避免了插值,信号方位谱信息损失很小,适合大斜视角、宽测绘带条件下的成象处理,具有广阔的应用前景. 但是现有的 CS 算法数学模型存在局限性,不能得到点目标二维频域解析式,只能定性分析残余相差对图像质量的影响. 为此,我们改进了 CS 算法的数学模型,得到了残余相差的解析式,为图像质量指标的定量

1994-06-07 收到, 1994-11-10 定稿

吴一戎 男, 1963 年生, 副研究员, 现从事微波遥感和计算机应用等方面的研究工作.

胡东辉 男, 1970 年生, 研究实习员, 现从事合成孔径雷达信号处理的研究工作.

彭海良 男, 1939 年生, 研究员, 现从事合成孔径雷达处理和微波遥感技术方面的研究工作.

分析提供了理论基础,并且通过分析 CS 算法的特点,提出实现该算法的一种硬件结构。

2 CS 算法

首先,考虑地面一点目标的回波信号

$$S(x, t) = \exp[-j2\omega_0(r + \Delta r)/c] \exp\{jb[t - 2(r + \Delta r)/c]^2\}, \quad (1)$$

$$\Delta r(x) = x^2/2r \quad (2)$$

式中 ω_0 为雷达发射信号载频, b 为线性调频率, c 为光速。

为了得到点目标回波信号的二维频域表达式,分以下两步进行推导:

(1) 方位向 FFT, 即从 (x, t) 域变换到 (k_x, t) 域。

现有文章中 (k_x, t) 域点目标回波模型建立在 R/D 算法基础上,因此是不完善的,在此给出一种新的表达方法,即

$$S(x, t) = \exp\{jb(t - 2(r + \Delta r(k'_x))/c)^2\} \\ \times \exp[jcrk_x k'_x / (2\omega_0)] \exp[-jcrk_x'^2 / (4\omega_0)], \quad (3)$$

$$\Delta r(k'_x) = c^2 r k_x'^2 / (8\omega_0^2), \quad (4)$$

CS 算法的独特之处是在 (k_x, t) 域乘上相位扰动因子,使迁移曲线不随距离变化改变,该项为

$$H(k_x, t) = \exp[jA(t - 2r_{ref}/c)^2], \quad (5)$$

$$A = bc^2 k_x^2 / (8\omega_0^2), \quad (6)$$

式中 r_{ref} 为参考距离。

将(3)式与(5)式相乘,得到

$$S'(k_x, t) = \exp\{jb(t - 2(r + \Delta r(k'_x))/c)^2\} \exp[jcrk_x k'_x / (2\omega_0)], \\ \times \exp[-jcrk_x'^2 / (4\omega_0)] \exp[jA(t - 2r_{ref}/c)^2]. \quad (7)$$

(2) 距离向 FFT, 即从 (k_x, t) 域变换到 (k_x, ω) 域, 即

$$S(k_x, \omega) = \iint S'(k_x, t) \exp(-j\omega t) dt dk'_x \quad (8)$$

运用固定相位原理得到

$$S(k_x, \omega) = \exp[-j\omega^2 / (4(A + b))] \exp\{jcrk_x^2 / [4(\omega_0 + \omega) + c(r - r_{ref})k_x^2 \omega / (4\omega_0^2)]\} \\ \exp\{jAb[2(r + \Delta r - r_{ref})/c]^2 / (A + b)\} \exp(-j2r\omega/c). \quad (9)$$

(9) 式中第二项可分解为

$$\Phi = crk_x^2 / (4\omega_0) - cr_{ref} k_x^2 \omega / (4\omega_0^2). \quad (10)$$

(10)式中第一项为信号方位谱,第二项为迁移曲线的频域式。可见经过相位扰动后测绘带内不同距离上的迁移曲线只与参考距离上的迁移曲线规律相同。在 (k_x, ω) 域作距离压缩和参变量选在参考距离 r_{ref} 上的方位压缩

$$H(k_x, \omega, r_{ref}) = \exp\{j\omega^2 / [4(A + b)]\} \exp\{-jck_x^2 / [4(\omega_0 + \omega)]\}. \quad (11)$$

(10)式与(11)式相乘,再变换回 (k_x, t) 域

$$S(k_x, t) = \delta(t - 2r/c) \exp[j(r - r_{ref})k_x^2 / (4\omega_0)] \\ \times \exp\{jAb[2(r + \Delta r - r_{ref})/c]^2 / (A + b)\}. \quad (12)$$

此时测绘带内已不存在残余迁移曲线，进一步的处理只需随距离变化改变参量 r 补偿(12)式的残余相位，再变换回 (x, t) 域作幅度检测，就得到最终的图像。

表 1 比较了几种算法存在的二次残余相位。数例计算选择最大二次残余相位，系统参数以 SEASAT SAR 为准，多普勒中心频率 2000Hz，方位处理带宽1200Hz。表 1 结果说明，与 R/D 算法、SRC 算法相比，CS 算法能完善地补偿相位，更适合于斜视 SAR 的成象处理。

表 1

算法	二次残余相位	数 例
RD	$crk_x^2\omega^2/(4\omega_0^3)$	0.78π
SRC	$cr(k_x^2 - k_{x0}^2)\omega^2/(4\omega_0^3)$	0.32π
CS	$c(r - r_{ref})k_x^2\omega^2/(4\omega_0^3)$	0.017π

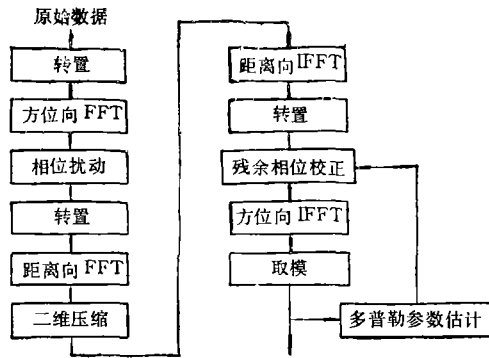


图 1 CS 算法流程图

CS 算法框图见图 1



图 2 SEASAT SAR 图象

运用 CS 算法,我们得到了 SEASAT SAR 的图像(图 2), 图像经过 4 视处理, 象空间 1024×1024 , 覆盖地区是英国伦敦。

3 硬件实现

SAR 专用处理机通过硬件实现 SAR 数据的处理, 其结构简单, 具有实时成像的能力, 能满足 SAR 图像批量生产的要求。在此我们初步分析了 CS 算法实时处理机通过率设计要求和实现可行性。

由图 1 的算法处理框图, 可得到图 3 所示的 CS 算法实时处理机的流水结构。

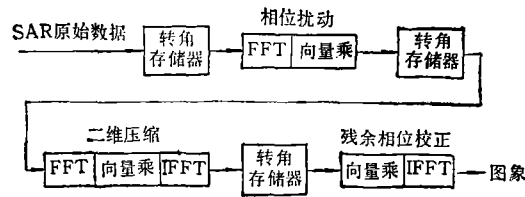


图 3 CS 算法处理机的结构

CS 算法处理机在硬件结构上划分为相位扰动、二维压缩、残余相位校正三个功能模块, 相位扰动是使测绘带内具有一致的迁移曲线变化规律, 二维压缩在 (k_x, ω) 域完成距离压缩和参考距离上的方位压缩, 残余相位校正补偿沿 k_x 变化的二次慢变相位和未完全校正的方位频谱。以下讨论这三部分的单位样本计算复杂度 C 和计算速率 R :

(1) 相位扰动

$$c_{ci}^1 = (5 \log_2 N_{ax} + 6) / g_a (\text{Flops}), \quad (13)$$

$$R_{ci}^1 = c_{ci}^1 N_r f_p, \quad (14)$$

式中 N_{ax} 为方位向 FFT 长, N_r 为距离向采样点数, f_p 为 PRF, g_a 为方位向有效因子。

(2) 二维压缩

$$c_{ci}^2 = (10 \log_2 N_r' + 6) / (g_a g_r) (\text{Flops}), \quad (15)$$

$$R_{ci}^2 = c_{ci}^2 N_r f_p, \quad (16)$$

式中 N_r' 为距离向 FFT 长, g_r 为距离向有效因子。

(3) 残余相位校正

$$c_{ci}^3 = (5 \log_2 N_{ax} + 6) / g_a (\text{Flops}), \quad (17)$$

$$R_{ci}^3 = c_{ci}^3 N_r f_p. \quad (18)$$

我们根据 SEASAT SAR 系统参数计算出 CS 算法实时处理机各功能模块的计算复杂度和计算速率, 其中 $N_{ax} = 8192$, $N_r = 6840$, $N_r' = 2048$, $f_p = 1646.75\text{Hz}$, $g_a = 0.5$, $g_r = 0.67$ 。为实现实时处理, 取 $C_{ci}^1 = 142\text{Flops}$, $C_{ci}^2 = 346\text{Flops}$, $C_{ci}^3 = 142\text{Flops}$, $R_{ci}^1 = 1.6\text{GFlops}$, $R_{ci}^2 = 3.9\text{GFlops}$, $R_{ci}^3 = 1.6\text{GFlops}$ 。

计算速率为 7.1GFlops , R/D 算法处理机在相同条件下总计算速率为 5.11GFlops , CS 算法总计算量超出 R/D 算法 39%。这是 CS 算法的不足之处, 但是考虑其具有以

下优势: (1) 适合于大斜视角下的成象处理, 避免了 R/D 算法的局限性; (2) 无需插值, 全部处理过程只需 FFT 和向量乘两种类型运算, 简化了硬件设计; (3) 改善了 SAR 图像质量。我们认为 CS 算法实时处理机的实现是合理和可行的。

4 结 论

综上所述, 得出两点结论:

(1) 在现有的 SAR 成象处理算法中, CS 算法既能保证信号方位谱信息的完整补偿, 又在处理中避免了插值运算, 是一种 SAR 精确处理算法。

(2) 同 R/D 专用处理机比较, CS 算法的硬件实现需较高的计算速率, 但在提高算法适用范围, 简化硬件设计, 改善图像质量等方面具有优势, 系统综合性能指标高于前者。

参 考 文 献

- [1] Jin Y, Wu Chialin. IEEE Trans. on GRS, 1984, GRS-22(6):592—597.
- [2] Cafforio C, Prati C, Rocca F. IEEE Trans. on AES, 1991, AES-27(2):194—206.
- [3] Raney R K. Int. J. Remote Sensing, 1992,13:991—998.
- [4] Runge H, Bamler R. A Novel High Precision SAR focusing Algorithm Based on Chirp Scaling. Proc. IGARSS'92, Houston: 1992,372—375.

CHIRP SCALING SAR IMAGING ALGORITHM AND ITS IMPLEMENTATION

Wu Yirong Hu Donghui Peng Hailiang

(*Institute of Electronics, Academia Sinica, Beijing 100080*)

Abstract This paper improves the model of Chirp Scaling (CS) SAR imaging algorithm. Based on the theoretical analysis, the exact formulation of point target in two-dimensional frequency domain and the phase error are obtained. According to the characteristics of the CS algorithm, a hardware architecture to realize its realtime imaging processing is provided.

Key words CS algorithm, Phase aberration, Hardware implementation