

SAR 原始回波信号生成算法的性能比较研究

韦立登 李绍恩 吴一戎 向茂生

(中国科学院电子学研究所 微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

摘要: 该文介绍了距离时域脉冲相干法、距离频域脉冲相干法和二维频域快速傅氏变换法 3 种 SAR 原始回波信号生成算法的基本原理和计算步骤, 重点从误差分析、时间估计以及空间估计等 3 个方面对这 3 种算法进行了深入量化的比较研究, 并利用 X 波段 SAR 系统参数实现了 3 种算法的仿真实验。理论分析及实验结果均表明, 第 3 种算法不仅算法描述简明高效, 可实现性强, 而且所得的结果数据精度也较高, 是一种较为实用的 SAR 原始回波信号生成算法。

关键字: 合成孔径雷达, 原始回波信号生成, 多普勒相位函数, 脉冲相干, 快速傅氏变换

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)02-0262-04

Performance Comparison of Algorithms for SAR Raw Signal Generation

Wei Li-deng Li Shao-en Wu Yi-rong Xiang Mao-sheng

(National Key Lab of Microwave Imaging Technology,

The Institute of Electronic, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The fundamentals and computation procedures of three algorithms for SAR raw signal generation—RTPC, RFPC and 2DFFT are introduced. A quantitative comparison of these algorithms is emphatically studied on the aspects of error analysis, time and space evaluation. The simulation tests of these algorithms have been implemented using the system parameters of an X-band SAR. Both the theoretical analyses and the emulational results indicate that the third one is more practicable basing on its concise and efficient description and realizability, as well as high accuracy of its result.

Key words SAR, Raw signal generation, Doppler phase function, Pulse coherence, FFT

1 引言

SAR 原始回波信号生成中有两点非常重要, 一是方位回波信号要保持一定的相位关系, 产生多普勒相位函数, 二是由于距离徙动的存在, 方位向回波信号沿距离向出现偏移。要快速、准确地生成这样的 SAR 原始回波信号, 需要进行大量的数值计算。到目前为止, 国内外很多 SAR 实验室在进行 SAR 系统研究过程中提出了很多有效的回波信号生成算法, 其中最具有代表性的是距离时域脉冲相干(RTPC)法^[1, 2]、距离频域脉冲相干(RFPC)法^[3]和二维频域快速傅氏变换(2DFFT)法^[4, 5]等 3 种算法。但是, 针对这 3 种算法在性能、速度及计算机资源消耗等方面还缺乏深入、全面的量化比较。针对这一问题, 本文重点从误差分析、时间估计以及空间估计等 3 方面对这 3 种算法进行了深入量化的比较研究, 并利用 X 波段 SAR 系统参数实现了 3 种算法的仿真实验。

2 误差分析

SAR 原始回波信号生成中的误差来源主要产生于运算

的简化过程以及参数的量化过程。由于 3 种算法所采用的数学模型不同, 因此它们所带来的误差也不一样。

2.1 距离时域脉冲相干法

距离时域脉冲相干法是一种传统的回波信号生成方法, 其基本原理是在发射连续脉冲的基础上, 随着雷达平台的运动, 在距离时域中按照脉冲顺序, 生成每个脉冲的回波信号。经典的距离时域脉冲相干法通过在雷达运动的每个位置上, 计算波束照射范围内目标散射单元的距离延迟函数, 来确定它们由于距离徙动造成的方位回波信号偏移^[1, 2]。

距离时域脉冲相干法在实现过程中进行了偏移距离的距离门取整近似, 因此势必会在最终的信号中带来误差, 这一误差主要体现在相位的误差上。设距离门取整近似时采用的是最近原则, 则最大的距离误差为 $\Delta r_{\max} = c/(4f_s)$, 其中 c 为光速, f_s 为信号采样频率。因此, 点目标 (i, j) 在回波图像点 (x_n, r) 上产生的最大相位误差为(忽略二次项)

$$\Delta\varphi_{\max} = (4\pi k/c^2) [2(r - R_{n,ij}) \cdot \Delta r_{\max}] \quad (1)$$

最大相位误差不仅与距离门取整时产生的最大距离误差 Δr_{\max} 有关, 而且还与回波图像点和目标点的距离差

$r - R_{n,ij}$ 有关。因此,

$$\Delta\varphi_{\max} = \begin{cases} \frac{\pi}{2} \frac{B}{f_s}, & r - R_{n,ij} = \frac{c\tau}{4}, \text{回波脉冲两端} \\ \frac{\pi}{2} \frac{B}{\tau f_s^2}, & r - R_{n,ij} = \Delta r_{\max}, \text{回波脉冲中心} \end{cases} \quad (2)$$

其中 B 和 τ 分别为发射线性调频脉冲信号的带宽和脉宽。可见,即使在回波脉冲的两端,最大相位误差也不会超过 $\pi/2$,而在回波脉冲中心处,最大相位误差已经小于 $\pi/(2B\tau)$ (因为 $B < f_s$)。

2.2 距离频域脉冲相干法

典型的距离时域脉冲相干法生成回波信号不但计算量较大,而且在引入距离徙动和计算距离延迟函数时存在一定的近似。距离频域脉冲相干法在经典的距离时域脉冲相干法基础上,通过在距离频域完成目标散射单元回波信号的相干叠加,由频域的相位因子精确仿真得到在距离时域中由于距离徙动造成的回波延迟偏移。因此,这种算法在方位处理上要比在时域中沿距离徙动曲线生成方位数据更为真实^[3]。

频域脉冲相干法生成 SAR 原始回波数据的过程完全从理论公式出发,需要进行近似处理的地方很少。如果计算目标点到雷达的距离 $R_{n,ij}$ 时不采用近似公式,则该方法的主要误差即为参数量化所带来的误差。如果 $R_{n,ij}$ 的计算过程中采用了近似公式,即

$$R_{n,ij} = \sqrt{(x_n - x_i)^2 + r_j^2} \approx r_j + (x_n - x_i)^2 / (2r_j) \quad (3)$$

其中 x_n 为雷达方位位置, (x_i, r_j) 为目标点 (i, j) 的方位和距离,则可求得 $R_{n,ij}$ 的最大误差为

$$\Delta R_{n,ij/\max} = (1/8)(x_n - x_i)_{\max}^4 / r_j^3 = (1/2^7)(\lambda/D)^4 \cdot r_j \quad (4)$$

其中 λ 和 D 分别为雷达的载波波长和实际孔径长度。从而求得最大的相位误差为

$$\Delta\varphi_{\max} = (4\pi/\lambda)\Delta R_{n,ij/\max} = (\pi/2^5)(\lambda^3/D^4) \cdot r_j \quad (5)$$

可见,最大相位误差不仅与 SAR 的载波波长和实际孔径长度有关,而且还与目标点所在的距离门有关。例如,针对本文仿真试验中的系统参数(表 1),对于最近和最远的目标点,其最大相位误差分别为 $\pi/59$ 和 $\pi/34$ 。由此可见,频域脉冲相干法的仿真精度是很高的。

2.3 二维频域快速傅氏变换法

距离时域脉冲相干法和距离频域脉冲相干法都是从雷达所发射的每个脉冲的回波出发生成 SAR 原始回波信号的,而二维频域快速傅氏变换法则是从场景中每个散射单元对

所有回波的贡献出发生成 SAR 原始回波信号的。根据分布目标回波信号是各个分辨单元冲激响应与目标散射特性的卷积这一原理,利用二维快速傅氏变换法,在二维频域内完成信号的时域卷积,并通过最后的反傅氏变换将频域结果转换成最终所需的时域信号^[4,5]。

与前两种方法相比,二维频域快速傅氏变换法的主要优点有两方面:其一,由于采用了二维快速傅氏变换来实现时域信号的卷积,因此可以大大减少数值计算量,从而提高程序的运行速度;其二,由于可以在二维频域中对距离弯曲进行精确的仿真,因此可以提高仿真精度。不过由于二维频域的乘积需要用到较大的存储空间,因此需要保证机器具有足够大的内存。

二维频域快速傅氏变换法生成 SAR 回波原始数据的过程中,由于需要对已有的场景频谱 $\Gamma(\xi, \eta)$ 进行插值或近似以求得变换后的频谱 $\Gamma'(\xi', \eta')$ ^[6],因此,最终的回波数据中势必会存在由于插值或近似所引入的误差,这一误差主要也是体现在相位误差上。就最近原则近似而言,最大的相位误差为

$$\Delta\varphi_{\max} = (1/2)(f_s\tau/N) \quad (6)$$

其中 f_s 为信号采率, τ 为脉冲宽度, N 为距离频率上的总采样点数。对于一般的 SAR 仿真而言,这一最大相位误差是很小的。例如,针对本文仿真试验中的系统参数(参见表 1),对于距离维 $N=1024$ 的情况,有 $\Delta\varphi_{\max} = 0.117 \approx \pi/26$ 。因此,从原始回波数据的误差上看,二维频域快速傅氏变换法完全满足精确仿真的要求。

3 计算量估计

根据 3 种算法的计算步骤,可以大致估计出各种算法实现所需要的计算量,从而评估算法的运行速度。在此,计算量采用实乘次数 N_{real} 和复乘次数 N_{cpl} 分别计算的方法进行统计。

对于距离时域脉冲相干法,有

$$N_{\text{real}_1} = 2f_s\tau + N_{a_raw}N_{a_map}(1 + N_{r_map}) \quad (7)$$

$$N_{\text{cpl}_1} = \frac{1}{2}N_{r_m} \log_2 N_{r_m} (1 + 2N_{a_raw}) + N_{a_raw}(N_{r_m} + N_{r_map}N_{a_map}) \quad (8)$$

对于距离频域脉冲相干法,有

$$N_{\text{real}_2} = 2f_s\tau + N_{a_raw}N_{a_map}(1 + N_{r_map}) + 2N_{r_m}N_{r_map}N_{a_map}N_{a_raw} \quad (9)$$

表 1 仿真实验系统参数

工作频率	极化方式	脉冲宽度	信号带宽	采样频率	PRF	雷达视角	天线长度	飞机高度	飞机速度
9.6GHz	HH	2 μ s	100MHz	120MHz	1kHz	30° - 60°	0.6m	2km	150m/s

$$N_{\text{cpl}_2} = \frac{1}{2}N_{r_m} \log_2 N_{r_m} (1 + N_{a_raw}) + N_{a_raw} N_{r_m} (1 + N_{r_map} N_{a_map}) \quad (10)$$

对于二维频域快速傅氏变换法, 有

$$N_{\text{real}_3} = N_{a_map} N_{r_map} + N_{a_m} + 5N_{r_m} N_{a_m} \quad (11)$$

$$N_{\text{cpl}_3} = 2N_{a_m} N_{r_m} + N_{r_m} N_{a_m} (\log_2 N_{r_m} + \log_2 N_{a_m}) \quad (12)$$

在以上公式中, N_{a_map} 和 N_{r_map} 为地图的方位和距离点数, N_{a_m} 和 N_{r_m} 为计算过程中所需的方位和距离 FFT 点数, N_{a_raw} 和 N_{r_raw} 则为输出原始回波信号的方位和距离点数。

由以上公式可知, 各种算法的运算次数与目标场景的规模大小有关, 且基本正比于 $N_{a_m} \times N_{r_m}$ (在地图大小与 FFT 点数相当的情况下)。以距离时域脉冲相干法的计算量为参考, 距离频域法由于在每个分辨单元都计算每个距离频率处的相位, 因此其计算量要比距离时域法大将近 N_{r_m} 倍; 而二维频域法由于采用了二维快速傅氏变换的方法, 其计算量则得以减少许多, 特别是对于大场景的仿真, 其计算效率更为明显。

4 空间估计

3 种算法的计算机资源消耗用计算过程中各变量所需的存储空间来衡量, 其中主要由各中间矩阵变量的规模大小来决定。根据算法的需要, 3 种算法实现中需要消耗的计算机内存资源分别为

$$C_{\text{RTPC}} = 2N_{r_m} + N_{a_raw} + N_{r_m} N_{a_m} \quad (13)$$

$$C_{\text{RFPC}} = 2N_{r_m} + N_{a_m} + N_{r_m} N_{a_m} \quad (14)$$

$$C_{\text{2DFFT}} = 2N_{r_m} + N_{a_m} + 2N_{r_m} N_{a_m} \quad (15)$$

由此可见, 时域脉冲相干法和频域脉冲相干法所需的内存空间相同, 而且都取决于信号空间的大小。如果在计算过程中采用每生成一个脉冲回波就写一次文件的方法, 还可以大大降低计算所需的内存, 不过这样会增加一定的文件读写

时间。二维频率快速傅氏变换法所需的内存空间约为前二者的两倍, 而且不能采用边生成回波信号边写盘的方法, 因此要求计算机具备足够的内存空间。

综上所述, 我们可以得到表 2 所示的 3 种 SAR 回波生成算法所需的计算量和存储空间对比表。

5 仿真实例

为了验证上述 3 种 SAR 回波生成算法的有效性和正确性, 我们采用表 1 所列的 X 波段机载 SAR 系统参数对 3 种算法分别进行了仿真实验。

仿真实验程序的基本流程如图 1 所示。图中仿真场景的每个分辨单元分别用一个复散射系数表示, 其幅度值取自仿真地图的图像灰度值, 而相位值则假设为平均分布于 $[0, 2\pi]$ 上的随机数。仿真程序在接收到输入的仿真地图后, 首先通过添加随机相位信息将地图的实图像转换为场景的复图像, 再利用各种回波生成算法生成 SAR 原始回波信号, 最后采用 CS 算法^[7]对所生成的回波信号进行成像处理以便对仿真结果进行评估。各仿真场景和结果分别如图 2—图 4 所示。

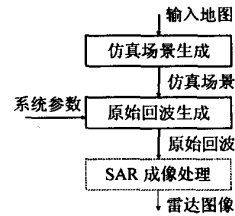


图 1 仿真实验框图

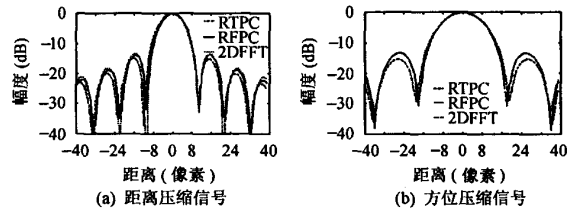


图 2 点目标仿真实例(8 倍差值)

表 2 计算量(归一化到 $N_{a_m} \times N_{r_m}$) 和存储空间对比表

算法	实乘次数	复乘次数	存储空间(双浮点数)
RTPC	N_{a_m}	$\log_2 N_{r_m} + N_{a_m}$	$2N_{r_m} + N_{a_raw} + N_{r_m} N_{a_m}$
RFPC	$2N_{r_m} N_{a_m}$	$N_{r_m} N_{a_m}$	$2N_{r_m} + N_{a_m} + N_{r_m} N_{a_m}$
2DFFT	6	$2 + \log_2 N_{r_m} + \log_2 N_{a_m}$	$2N_{r_m} + N_{a_m} + 2N_{r_m} N_{a_m}$

表 3 仿真实例程序运行时间(s)

地图大小(FFT 点数)	RTPC	RFPC	2DFFT
1×1 (1024×256)	1.234	1.828	6.593
100×100 (1024×512)	300	6860	22
760×500 (2048×1024)	14268	-	89

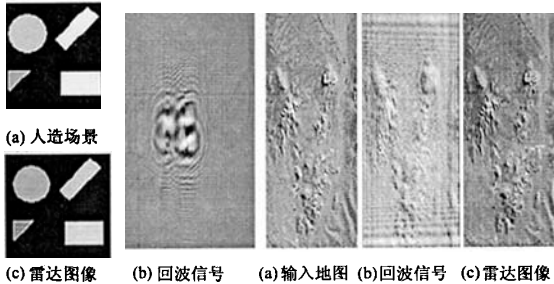


图 3 人造面目标仿真实例

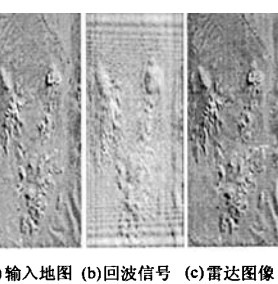


图 4 自然面目标仿真实例

实例 1 点目标仿真。点目标位于场景中心,其视角为 45° 。3 种算法仿真得到的 SAR 回波信号经成像算法压缩处理后的图像信号幅度如图 2 所示。

实例 2 人造面目标仿真。仿真地图大小(方位 \times 距离)为 100×100 像素,输入的人造场景、仿真得到的回波信号实部图以及回波信号处理后得到的雷达图像分别如图 3 中的(a), (b), (c)所示。

实例 3 自然面目标仿真。仿真地图大小(方位 \times 距离)为 760×500 像素,输入的仿真地图、仿真得到的回波信号幅度图以及回波信号处理后得到的雷达图像分别如图 4 中的(a), (b), (c)所示。

以上所给出的仿真实例的图像除图 2 外均为二维频域快速傅氏变换法的仿真结果,成像算法采用的是 CS 算法。所有算法实现均采用 Matlab 编程,并在 PC(基本配置为 1700MHz 的 CPU 及 256MB 的 RAM)Windows 环境中运行,程序运行的时间如表 3 所示。

图 2 表明,距离频域法的仿真精度最高,其图像信号最接近于理想的 sinc 函数。二维频域快速傅氏变换法的精度也较好,与距离频域法相比差别不大。距离时域法由于涉及距离门取整操作,因此存在一定的误差。尤其是在距离压缩信号中,可以明显看到由于距离取整带来的图像距离偏移。图 3 和图 4 表明,无论是对于理想的还是实际的场景目标,二维频域快速傅氏变换法均能获得较好的仿真效果。

由表 3 可以看出,随着仿真场景规模的扩大,距离时域算法和距离频域法的运算时间急剧增加,而二维频域快速傅氏变换法的运算时间却变化不大。这是因为二维频域法的运算速度只与输出数据量的大小有关,而距离时域法和距离频域法则直接与输入数据量成正比。

6 结论

本文对距离时域脉冲相干法、距离频域脉冲相干法和二

维频域快速傅氏变换法 3 种 SAR 原始回波生成算法的性能进行了比较研究。综合前面的理论分析和仿真实例,可以得到这样的结论:距离时域法虽然进行了一定的简化处理,但其仿真结果是可以接受的,而且时间消耗上也可以接受;距离频域法虽然理论上可以获得很精确的仿真结果,但仿真场景较大时需要花费大量的运算时间,因此需要在大型服务器上运行方能体现其优越性;二维频域法的时间效率是明显的,生成的数据精度也较高,可以满足高精度成像的仿真需要,是一种实用的 SAR 回波信号生成算法。

参考文献

- [1] Camporeale C, Galati G. Digital computer simulation of synthetic aperture systems and images. *European Trans. on Telecommunication and Related Technologies*, 1991, 2(3): 343 - 352.
- [2] Alberti G, Esposito S, Moccia A, Vetrellaet S. An airborne interferometric SAR simulator. Proc. of PIERS'94, Noordwijk, the Netherlands, 1994, CD-ROM: 1 - 5.
- [3] 刘永坦. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999: 248 - 256.
- [4] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, Schirinzi G. SARAS: A synthetic aperture radar (SAR) raw signal simulator. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(1): 110 - 123.
- [5] Franceschetti G, et al.. On ocean SAR signal simulation. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 36(1): 84 - 100.
- [6] Franceschetti G, et al.. WASAR: A Wide-Angle SAR Processor. *IEE Proc. - F*, 1992, 139(2): 107 - 114.
- [7] Raney R K, Runge H, Bamler R, et al.. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786 - 799.

韦立登: 男, 1973 年生, 博士生, 目前主要从事信号与信息处理方面的研究。

李绍恩: 男, 1976 年生, 博士生, 目前主要从事信号与信息处理方面的研究。

吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事现代信息技术与应用方面的研究。

向茂生: 男, 1964 年生, 研究员, 长期从事干涉合成孔径雷达技术及方法方面的研究。