

聚束 SAR 的快速卷积反投影成像算法

袁运能, 孙进平, 王 俊, 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: 本文对应用于聚束 SAR 成像的卷积反投影 (CBP) 算法进行了详细研究, 采用子孔径处理的方法, 使得这种算法的计算量得到明显的降低。同时, 对计算过程的分析表明 CBP 算法中所涉及的数量巨大的乘法运算可以用加法运算代替, 加法操作又可以简单地利用可编程逻辑器件进行并行处理。通过上述改进, CBP 算法成像处理在计算量降低的同时, 硬件结构也得到了很大的简化。论文同时给出了大前斜视角情况下的处理方法、点目标仿真和利用快速 CBP 算法对 E-SAR 原始数据的成像结果。

关键词: 合成孔径雷达; 成像算法; 卷积反投影算法

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0864-04

Fast Convolution Backprojection Algorithm for Spotlight Synthetic Aperture Radar

YUAN Yun-neng, SUN Jin-ping, WANG Jun, MAO Shi-yi

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

Abstract: In this paper, one of spotlight SAR image formation algorithms, the convolution backprojection (CBP) algorithm, is studied in detail. The subaperture method is proposed to reduce computation load. At the same time, the multiplication, the number of which is very large when using CBP, is mainly substituted by addition which can be parallelly processed using commonly used FPGA or CPLD. The method for processing high squinted angle is also presented and results got from processing raw data of DLR's E-SAR system have validated the improvements described above.

Key words: synthetic aperture radar; imaging algorithm; convolution backprojection algorithm

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 在聚束模式下可得到很高的分辨率 (目前可达 0.1 米)^[1], 因此在目标识别、特征提取、自动目标探测 (ATD)、自动目标识别和武器投放等许多军事应用方面得到广泛的应用。目前在聚束模式 SAR 中使用的成像算法可分为基于 FFT 的和反投影 (时域) 的两大类, 基于 FFT 的算法主要有极坐标格式算法 (PFA)、距离徙动算法 (RMA)、Chirp-Scaling 算法以及最近所提出的频率 Scaling 算法 (FSA) 等。时域反投类算法包括卷积反投影 (CBP) 算法和反投 (BP) 算法。两类成像算法都有各自的优点, 也有各自的缺点, 在实际 SAR 系统中也都得到了应用。在文 [2] 中对这两类算法进行了很好的比较。概括起来, FFT 类算法的优点是计算效率较高, 但在高分辨率、大前斜视角、低频以及大孔径积分角的情况下, 由于无法进行很好的并行处理, 会对成像处理器的计算能力和存储容量提出很高的要求, 此外对运动误差的补偿实现起来也比较困难。这些困难在时域算法中都可以避免, 但时域反投类算法的缺点是运算量很大^[1, 2]。CBP 算法和 BP 算法相比较, 由于 CBP 所处理的是去调频 (Dechirp) 之后的数据^[3, 4], 因此所处理的数据量要比 BP 算法少很多。但由于存在平面波前的假设, 因此 CBP 同 PFA 的应用场合基本相同 (波前弯曲在一定范围内可通过后处理进行校正^[5]), BP 算法则和 RMA

算法一样, 不需要平面波前的假设, 因此目前应用在超宽带 SAR 和冲击 SAR 中。CBP 算法同其他聚束 SAR 成像算法相比, 具有其特殊的优点。首先可以在载机飞行的同时 (方位向进行采样), 连续地输出成像结果。随着合成孔径积分角的逐渐增大, 输出图像的分辨率会逐渐变高, 这种特点非常适合于自动目标检测 (ATD) 的应用。此外在内存中只需存储每个方位采样位置的回波数据, 这在大斜视角应用情况下非常有利。同时可以实现对图像中感兴趣部分的局部放大成像。而且 CBP 算法本身非常适合于作并行处理, 可方便地实现结构完全相同的并行处理模块, 通过处理模块的配置, 实现大范围成像处理^[1, 3]。本文对应用于聚束 SAR 成像的 CBP 算法进行了详细研究, 提出了一种 CBP 算法的快速算法。采用子孔径处理的方法, 使得这种算法的计算量得到明显的降低。同时, 对计算过程的分析表明 CBP 算法中所涉及的数量巨大的乘法运算可以用加法运算代替, 加法操作又可以简单地利用可编程逻辑器件进行并行处理。通过上述改进, CBP 算法成像处理在计算量降低的同时, 硬件结构也得到了很大的简化。文中同时给出了对大前斜视情况的处理方法和点目标仿真结果, 以及利用快速 CBP 算法对 E-SAR 原始数据的成像结果。

2 聚束 SAR 的 CBP 成像算法基础

同极坐标格式成像算法相同, CBP 算法处理的是以成像

区域中心点处的回波为参考,对雷达回波信号进行 *Dechirp* 解调之后的数据^[3],可以定义如图 1(a) 所示数据采集平面的照射几何。 xy 定义了照射区域的坐标系, O 为区域中心,在雷达照射线(LOS)同 x 轴夹角为 θ 时(在数据采集过程中的变化范围为 $[\theta_1, \theta_2]$),载机同照射中心的距离为 r_0 ,沿 LOS 定义径向 u 轴。设照射区域内点 (x, y) 的反射密度函数为 $f(x, y)$,成像的目的就是计算 $f(x, y)$ 。雷达发射脉冲长度为 T_p 的线性调频信号

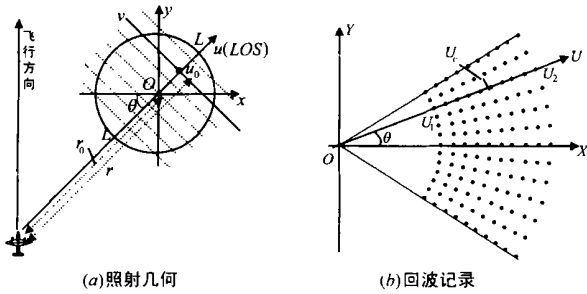


图 1 聚束 SAR 数据采集平面的照射几何和回波记录

$$s(t) = \exp\{j(2f_c + k_r t^2)t\} \quad |t| \leq T_p/2 \quad (1)$$

f_c 为载波频率, k_r 为线性调频率。在平面波前的假设条件下,可推导出 *Dechirp* 后回波的信号表示^[3,4]

$$r(x, U) = G\left[\frac{4}{c}(f_c + k_r(-2r_0/c))\right] = G(U), \quad (2)$$

$$U(x) = \frac{4}{c}[f_c + k_r(-2r_0/c)]$$

其中 $G(U)$ 为积分投影 $g(u)$ 的傅立叶变换式,积分投影定义为

$$g(u) = \int f(x, y) dv \quad (3)$$

由于 $-T_p/2 + 2(r_0 - L)/c \leq U \leq T_p/2 + 2(r_0 + L)/c$, 有 $U_1 \leq U \leq U_2$ 。其中

$$U_1 = \frac{4}{c} - \frac{2k_r}{c}(T_p + \frac{2L}{c}), U_2 = \frac{4}{c} + \frac{2k_r}{c}(T_p + \frac{2L}{c}) \quad (4)$$

$[U_1, U_2]$ 的中心为 $U_c = 4/c$ 。假设 $f(x, y)$ 的二维傅立叶变换为 $F(X, Y)$, 根据投影切片定理,则 $r(x, U)$ 可视为如图 1(b) 所示的 $F(X, Y)$ 的扇形区域内的部分数据。成像的目的就是通过线积分投影的傅立叶变换 $r(x, U) = G(U)$ 的部分数据来重建反射密度 $f(x, y)$ 。其过程同 CAT 图像重建的原理是相同的。CBP 成像算法的图像重建公式为^[3,4]

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_{U_1}^{U_2} G(U) |U| \exp(jUr \cos(\phi - \theta)) dU \quad (5)$$

(r, ϕ) 是点目标在照射区域中的极坐标位置。上式里边的积分可以当作一逆傅立叶变换,另外 U 是空间频率,其中心频率为 U_c ,进行逆傅立叶变换时考虑中心频率移位。

$$Q(r \cos(\phi - \theta)) = F^{-1}\{G(U + U_c) |U + U_c|\} \quad (6)$$

这样式(5)可以写为

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_{U_1}^{U_2} Q(r \cos(\phi - \theta)) \exp(-jU_c r \cos(\phi - \theta)) dU \quad (7)$$

式(6)和(7)就是聚束 SAR 卷积反投影成像算法的基本公式。

利用 CBP 算法进行聚束 SAR 成像时,首先取好要成像区域和目标点的位置。对每个像素点计算出极坐标位置 (r, ϕ) 。

在数据采集的过程中,在每一离散的角度 $\theta_k (k = 1, \dots, M)$ 处记录回波信号。其采样为 $G_k(U_i), i = 1, \dots, N_s$,可计算得到卷积项 $Q(t)$ 的离散采样

$$\{Q(m)\} = F^{-1}\{G_k(U_i - U_c) |U_i - U_c|\}$$

在离散情况下,式(7)的积分可以用求和来近似,因此反投之后得到的图像为

$$f(r, \phi) = \sum_{k=1}^M Q(r \cos(\phi - \theta_k)) \exp(-jU_c r \cos(\phi - \theta_k)) \quad (8)$$

其中 $Q(r \cos(\phi - \theta_k))$ 的计算需要对 $Q(m)$ 进行插值来得到,一般可采用升采样多相位低通滤波器来实现^[11]。

3 快速卷积反投影成像算法的实现

3.1 子孔径处理

长的孔径或大的积分角情况下,会得到方位向较大的带宽,因而可在方位向得到高的分辨率。如果将整个孔径划分为多个较小的子孔径,则短的子孔径对应窄的方位带宽。从空间频域考虑,窄的方位带宽说明在方位向可以采用较低的空间采样频率(即空间点之间的像素间隔可以较大)。因此对每个子孔径进行处理时,对固定尺寸的成像区域可产生出方位向像素间隔较大而采样点数较少的图像。然后将其在方位向插值以得到高采样的图像,最后将所有子孔径处理的输出进行叠加就可以得到最后的高分辨率输出图像。

以图 1(b) 所代表的正侧视为例。整个孔径对应方位向空间频域的带宽为

$$B = U_2(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

因此进行成像时的方位向空间采样频率(对应方位向像素间隔 Δ) 必须满足 $f_s = 1/\Delta \geq B$ 。将整个孔径划分为 M 个子孔径,第 i 个子孔径对应的角范围为 $[\theta_{i1}, \theta_{i2}]$,如图 2 所示

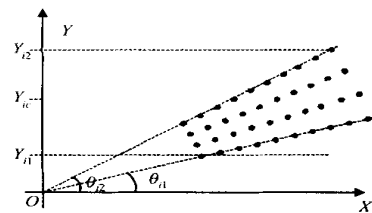


图 2 第 i 个子孔径内的回波记录数据

该子孔径对应带宽为 $B_i = Y_{i2} - Y_{i1}$, 其中

$$Y_{i1} = \begin{cases} U_1 \sin \theta_{i1}, & \theta_{i1} \geq 0 \\ U_2 \sin \theta_{i1}, & \theta_{i1} < 0 \end{cases}$$

$$Y_{i2} = \begin{cases} U_2 \sin \theta_{i2}, & \theta_{i2} \geq 0 \\ U_1 \sin \theta_{i2}, & \theta_{i2} < 0 \end{cases}$$

在子孔径内进行成像时的空间采样必须满足 $f_{si} = 1/\Delta_i \geq B_i$, 设第 m 个子孔径带宽最大即

$$B_m = \max_{1 \leq i < M} (B_i)$$

令 $k = \lceil B/B_m \rceil$ ($\lceil x \rceil$ 为取小于 x 的整数)。显然可以有 $\Delta_i = k \Delta$, 即在每个子孔径内,所需处理的像素点数目可以为原来的 $1/k$, 这样计算量也将近似为原来的 $1/k$ 。如果原像素点的位置取为 $(x = m, y = n)$, 则可以只选取 $1/k$ 个点 $(x = m, y = n \cdot k)$, 根据式(8), 第 i 个子孔径的输出图像为

$$f_i(r, \phi) = \sum_{k=1}^{L_i} Q_k(r \cos(\phi - \theta_k(i)) \exp(-jU_c r \cos(\phi - \theta_k(i)))) \quad i = 1, \dots, M \quad (9)$$

L_i 为子孔径的长度, (r, ϕ) 是点 (x, y) 的极坐标位置. 将所有子孔径处理得到的方位采样间隔为 Δr 的图像数据各自在方位向进行 k 倍的升采样(即插值), 然后图像域相加求和就得到了采样间隔为 $\Delta r/k$ 的高分辨率的输出图像. 进行方位向升采样滤波时, 考虑子孔径内的回波信号是以

$$Y_{ic} = (Y_{i1} + Y_{i2})/2$$

为中心的带通信号, 因此必须采用带通信号的插值方法. 最终的图像域输出可表示为

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M f_i(x, y) \exp[-jY_{ic}y] \quad (10)$$

$f_i(x, y)$ 是 $f(x, y)$ 方位向低通 k 倍升采样滤波后的结果.

采用子孔径方法在

$$|U_2 - U_1| \ll U_c \quad (11)$$

的情况下效果最好, 因为此时每个子孔径所对应方位带宽近似相当. 应用子孔径方法, 孔径划分不能太小, 否则进行每次插值运算的时间间隔就会减小, 必须对子孔径的长度进行折衷考虑. 一般地, 在满足式(11)的情况下, 点数为 N 的孔径长度(所处理回波数据的方位点数), 可将孔径划分为 \sqrt{N} 个等长的子孔径, 近似减少 \sqrt{N} 倍计算量.

3.2 计算结构的简化

对 $r \cos(\phi - \theta_k)$ 的计算没有必要要求每个余弦值, 因为

$$r \cos(\phi - \theta_k) = x \cos \theta_k + y \sin \theta_k \quad (12)$$

而 θ_k 对每一方位采样都是固定值. 实际应用中, 每个像素点的坐标是已知的, 并且 x 和 y 方向取相同的像素间隔. 设每个像素点的坐标为

$$(x_i, y_j) = (i \Delta x, j \Delta y), \quad -N \leq i \leq N, \quad -N \leq j \leq N \quad (13)$$

其中 $\Delta x, \Delta y$ 为定义的像素间隔. 则需要对每个像素点 (i, j) 计算

$$\tilde{r}_{i,j} = \tilde{x}_i + \tilde{y}_j = x_i \cos \theta_k + y_j \sin \theta_k \quad (14)$$

求得 \tilde{x}_i, \tilde{y}_j 的值之后, 根据式(13)、(14), 只需加减运算就可得到四个像素点 $(i, j), (-i, j), (-i, -j), (i, -j)$ 处的 \tilde{r} 值. 因此, 只需考虑 $\tilde{r}_{i,j} (0 \leq i \leq N, 0 \leq j \leq N)$ 的计算. 根据式(13)、(14), 有以下的迭代计算公式

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{i+1} &= \tilde{x}_i + \Delta x \cos \theta_k, \quad \tilde{x}_0 = 0, \quad 0 \leq i \leq N-1 \\ \tilde{y}_{j+1} &= \tilde{y}_j + \Delta y \sin \theta_k, \quad \tilde{y}_0 = 0, \quad 0 \leq j \leq N-1 \end{aligned} \quad (15)$$

因此, 计算出 $\Delta x \cos \theta_k, \Delta y \sin \theta_k$ (两次乘法)后, 只需通过加减运算即可求得所有像素点处的 \tilde{r} 值. 这样, 运算量巨大的乘法均被变为加减法进行运算. 而进行加减运算的硬件成本和复杂度都远远低于乘法运算. 比如以常用的 Altera 公司 FLEX10K 系列 FPGA 为例, 在小规模的 EPF10K10 (1 万门) 中, 可实现 10 个并行 16 位定点加减运算单元. 而无法实现 1 个 16 位定点乘法单元. 实现 16 位定点乘法单元所占资源一般是 16 位定点加减运算单元的 20 倍左右. 所以采用上述计算方法可以大大地简化硬件的设计和实现.

4 大斜视角情况下的处理方法

由于 CBP 算法只需存储每个方位采样位置的回波数据, 而不象 FFT 类成像算法那样需要存储所有方位位置的回波采样信号. 这个优点在大斜视角的情况下尤其重要, 因为在大斜视角情况下, 载机需要飞行较长的距离才能得到高的方位分辨率. 方位采样的数目相应增多, 如果使用 FFT 类算法, 则需要很大的存储器, 得到成像结果的时间也会变长. 但 CBP 算法在大斜视角的情况下, 计算量和处理时间同正侧视情况下基本相同, 而且由于使用 CBP 算法可以连续出图, 使得整个飞行过程中都可以监视成像结果. 利用傅立叶变换的旋转不变性, 可将快速 CBP 算法应用于斜视情况下.

设对 xy 坐标系上的函数 $f(x, y)$, 对应的傅立叶变换为 $F(X, Y)$. 若坐标系 $x'y'$ 为 xy 顺时针旋转 θ 角度所得, 则 $f(x, y)$ 的傅立叶变换为 $F(X, Y)$, 存在以下关系

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} \quad (16)$$

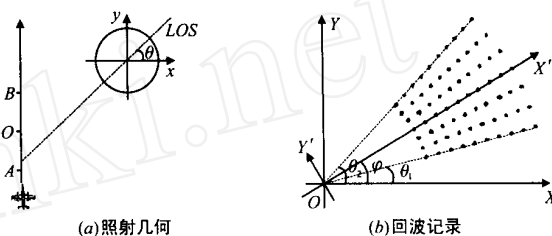


图 3 斜视聚束 SAR 照射几何和回波记录

式(16)表明了傅立叶变换的旋转不变性, 即傅立叶变换 $F(X, Y)$ 也是 $F(X, Y)$ 在 XY 顺时针旋转 θ 角度后的坐标系 $X'Y'$ 上的表达式. 在斜视情况下, 聚束 SAR 回波记录数据如图 3(b) 所示, (a) 是对应的采集平面示意. 载机由 A 飞行到 B , 在数据采集过程中的变化范围为 $[r_1, r_2]$, 斜视角 θ 可以定义为 θ 在孔径中心 O 处的取值. 则回波记录数据在如图由 XY 旋转 θ 之后的坐标系 $X'Y'$ 内, 可以认为是由正侧视采集的结果. 因而前一部分关于子孔径的处理方法可以直接在 $X'Y'$ 坐标系上应用于采集数据. 角度的范围将对应为 $[\theta_1, \theta_2]$. 根据傅立叶变换的旋转不变性, 这样处理可以直接得到的是反射密度 $f(x, y)$ 在 xy 坐标系旋转 θ 角度之后的 $f(x', y')$, 因此对式(8)和式(12)的计算都将在坐标系 $x'y'$ 中进行. 上节子孔径划分的方法和对计算结构的简化仍然适用.

5 仿真及成像结果

为了显示 CBP 算法在大斜视角情况下的突出优点, 在大斜视角 $\theta = 75^\circ$ (参考图 3 的定义) 情况下进行点目标仿真, 系统参数按表 1 所示.

设成像区域中心点的坐标为 $(0, 0)$ 设置以下 9 个点目标

$$\begin{aligned} &(0, 0), \quad (0, 100), \quad (0, -100) \\ &(100, 0), \quad (100, 100), \quad (100, -100) \\ &(-100, 0), \quad (-100, 100), \quad (-100, -100) \end{aligned}$$

对点 (x, y) , x 表示方位坐标, y 表示距离坐标, 单位为 m , 将长为 4096 点的整个孔径划分为长度为 128 点的 32 个子

孔径进行处理.

表 1 系统仿真参数

照射中心距离 r_c	5600m
距离分辨率	3.0m
方位分辨率	3.6m
载机方向速度 v	100m/s
波长	0.03m
脉冲重复频率 PRF	300Hz
脉冲宽度	5.0 μ s
距离向调频带宽	50MHz
距离向采样频率	48MHz

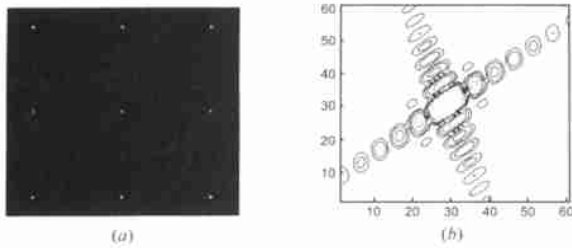


图 4 斜视快速 CBP 算法点目标仿真结果

图 4 是采用快速 CBP 算法成像的结果,其中图 4(b) 是中心点处脉冲响应的等高线图,表 2 是该点的分析结果.

表 2 中心点目标分析数据

	理论分辨率(m)	实测分辨率(m)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
距离向	3.0	3.0	- 13.98	- 8.66
方位向	3.7	3.6	- 13.98	- 8.75



图 5 E-SAR 原始数据的快速 CBP 算法成像结果

利用文献[6]中所述算法,我们将德国宇航院(DLR) E-SAR 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 5 为利用快速 CBP 算法处理 E-SAR 数据的成像结果(方位分辨率为 0.7 米),图 6 示意了 CBP 算法特有的局部放大和连续出图的成像过程,随着载机的飞行,图像的分辨率逐渐得到提高(从左到右).



图 6 CBP 算法局部放大显示的成像过程

6 结论

本文在对应用于聚束 SAR 成像的 CBP 算法进行详细研究的基础上,提出了一种快速计算方法.主要通过采用子孔径处理的方法,使得这种算法的计算量得到明显的降低,同时,对计算过程的分析表明 CBP 算法中所涉及的数量巨大的乘法运算可以用加法运算代替,加法操作又可以简单有效地利用可编程逻辑器件进行大规模并行处理,这样使得该算法的硬件实现结构得到很大的简化.同时给出了对大前斜视的处理方法、点目标仿真和利用快速 CBP 算法对 E-SAR 原始数据的成像结果.本文的结果对实时 SAR 处理机的设计具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] G Carrara, R S Goodman, R M Majewski. Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithms [M]. Norwood MA USA: Artech House, 1995.
- [2] Ali F Yegulalp. Fast backprojection algorithm for SAR [A]. Radar Conference [C]. MA USA: The Record of the 1999 IEEE, 1999. 60 - 65.
- [3] D C Munson, J D O'Brien, W K Jenkins. A tomographic formulation of spotlight-mode synthetic aperture radar [J]. Processing of the IEEE, 1983, 72(8): 917 - 925.
- [4] M D Desai, W K Jenkins. Convolutional backprojection image reconstruction for spotlight mode synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1992, 1(4): 505 - 517.
- [5] Dauck J L, W K Jenkins. Tomographic processing of spotlight mode synthetic aperture radar signals with compensation for wavefront curvature [A]. IEEE 1988 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing [C]. New York: NY, 1988.
- [6] 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:



袁运能 男, 1962 年生于江西省余干县, 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.



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.