

高效 UWB-SAR 平面子孔径处理成像算法¹

刘光平 郭微光 黄晓涛 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 对各子孔径进行梯形 (keystone) 变换时的插值运算是平面子孔径处理 (PSAP) 算法对低频段 SAR 特别是超宽带 (UWB)SAR 成像时的主要瓶颈。该文提出用线性调频变换结合 Fold FFT 实现梯形变换, 提高了插值效率, 并改进了算法流程, 剔除了梯形变换结合 Fold FFT 中的冗余运算, 极大地提高了整个算法的计算效率。计算机仿真和对实际数据进行成像实验的结果表明, 经过改进后的 PSAP 算法能够用于对大场景高分辨率 UWB-SAR 的实时成像。

关键词: 合成孔径雷达, 超宽带, 平面子孔径处理, 成像算法

中图分类号: TN951, TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0746-06

A Efficient Planar Subarray Processing Algorithm for UWB-SAR Imaging

Liu Guang-ping Guo Wei-guang Huang Xiao-tao Liang Dian-nong

(School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China)

Abstract The needed interpolation of keystone transformation used for every subaperture is the bottleneck of imaging for lower frequency Synthetic Aperture Radar(SAR) especially for Ultra Wide Band(UWB) SAR with Planar SubAperture Processing(PSAP). A new interpolation method for keystone transformation is presented in this paper, and by mending the algorithm, the redundant computation of its realization is eliminated, the efficiency of the algorithm is improved notably. The computer simulation and the real data test results show that the modified PSAP can be applied to real-time UWB-SAR imaging of wide scene with fine resolution.

Key words Synthetic Aperture Radar(SAR), Ultra-WideBand(UWB), Planar SubArray Processing(PSAP), Imaging algorithm

1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 由于具有全天候、全天时的特点, 在军事和民用领域得到越来越多的重视和应用, 是获取地面信息的重要手段。超宽带合成孔径雷达 (UWB-SAR) 由于能穿透叶簇实现对隐蔽目标的高分辨成像更是受到人们的关注。人们现在对信息的时效性要求越来越高, 因此实时成像算法是合成孔径雷达研究领域的一个热点。经典的距离 - 多普勒算法由于计算量相对较小, 可以实现对窄带 SAR 的实时成像, 但对 UWB-SAR, 由于存在很大的距离迁徙, 很多成像算法如距离 - 多普勒算法, Chirp-Scaling 算法等都不再适用, 可用的成像算法主要是距离迁移 (ω - K) 算法和后向投影 (BP) 算法。但由于 BP 算法运算量太大, 而 ω - K 算法则运动补偿非常困难且需要非常大的存储空间, 这些因素限制了他们在实时成像中的应用。

分阶段子孔径处理算法由于具有局部化的特点以及算法本身具有的流水性和并行性, 在实时成像处中得到了很好的应用。但为了克服栅栏旁瓣效应, 子孔径处理时各子孔径之间需要较

¹ 2003-01-15 收到, 2003-07-29 改回
国家部级资助项目

大的重叠比（一般要 > 58%）。Perry 等人提出的平面子孔径处理成像算法^[1,2] 由于采用了 Fold-FFT 技术使得子孔径之间的交叠有很大的降低，同时由于方位向在时域进行处理，运动补偿也容易实现，非常适用于实时成像处理，Robert 等人对算法进行了进一步的研究，使得能对 UWB-SAR 进行成像处理^[3]，但算法中进行梯度变换时需要进行插值运算，使得采用 Fold-FFT 技术而得到的性能提高有极大的降低。本文对此进行了分析，提出了一种用线性调频变换加傅里叶变换实现梯形变换的方法，同时提出了改进算法的处理流程，获得高效处理速率的方法。最后通过计算机仿真验证了算法的有效性。

2 平面子孔径处理成像算法

雷达沿方位向作匀速直线运动，以固定的速率向目标区域连续地发射并接收信号。把整个孔径分为多个长度为 vT 的子孔径，其中 v 为载体沿方位向的速度， T 为慢时间长度。设第 m 个子孔径的中心到目标的距离为 R_m ，雷达位于子孔径位置 u 向目标区域发射并接收信号，如图 1 所示，其中 VT 为合成孔径的长度， M 为子孔径的个数。则雷达到目标的距离可以表示为

$$R = [R_m^2 + u^2 - 2uR_m]^{1/2} \tag{1}$$

因为 $R_m \gg u$ ，通过泰勒展开，得到

$$R \approx R_m - u \sin \theta_m + \frac{u^2}{2R_m} \cos^2 \theta_m \tag{2}$$

其中 θ_m 为第 m 个子孔径到目标的视角。

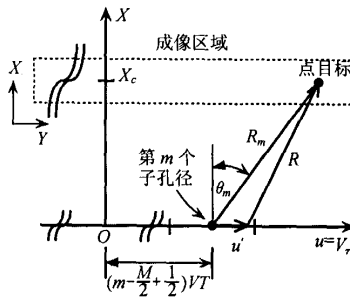


图 1 子孔径划分示意图

从目标区域反射回的信号经接收机接收解调变换到基带后信号的频谱为

$$S(f, \tau) = AP(f) \exp [(4\pi/c)(f + f_c)R(\tau)] \tag{3}$$

其中 A 为依赖于目标散射强度的常数， c 为光速， τ 为慢时间， f_c 为载频， $P(\cdot)$ 为发射信号的频谱。可见接收的信号在快时间频率和慢时间方位位置之间存在耦合，通过梯形变换 $u' = \alpha u$ ，其中

$$\alpha = (f + f_c)/f_h \tag{4}$$

可以消除这种耦合。将式 (2)，式 (4) 代入式 (3) 得到

$$S_m(f, u') = C \exp \left\{ j(4\pi/c) \left[(f + f_c)R_m - f_h u' \sin \theta_m + \frac{(f_h u' \cos \theta_m)^2}{2R_m(f + f_c)} \right] \right\} \tag{5}$$

通过一次乘法运算消除式 (5) 中的平方相位项后得到

$$S_m(f, u') = C \exp \{j(4\pi/c)[(f + f_c)R_m - f_h u' \sin \theta_m]\} \quad (6)$$

式 (6) 消除了距离向和方位向的耦合, 这样就可以对距离项和方位项分别进行处理。如图 2 所示。

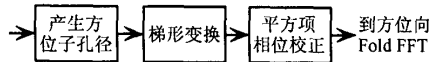


图 2 梯形变换示意图

在得到足够多的粗分辨率图像后, 通过相干叠加可以得到中分辨率图像, 同样的方法就可以得到最终的高分辨率图像。算法的具体推导参见文献 [3]。算法的流程为先得到粗分辨率的图像, 然后分别得到中分辨率和高分辨率的图像, 每一步的流程如图 3 所示。



图 3 PSAP 每阶段处理流程图

3 Fold FFT

平面子孔径处理算法的核心是 Fold-FFT, 其思想就是对一个长度为 $N = M \cdot P$ 的序列求 FFT, 然后对其进行 P 倍的抽取得到 M 点的输出, 可以通过先对长度为 $M \cdot P$ 的输入序列进行重叠相加, 得到长度为 M 的序列进行 FFT 就得到了原来的结果 [4]。用公式表示为

$$X(Pk) = \sum_{n=0}^{MP-1} x(n)w(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{m=0}^{M-1} s(m)e^{-j\frac{2\pi}{M}mk} \quad (7)$$

其中

$$s(m) = \sum_{p=0}^{P-1} x(m + Mp)w(m + Mp) \quad (8)$$

$w(\cdot)$ 为控制旁瓣的窗函数, 窗函数的选择准则为窗函数的频谱近似为理想低通的, 因此一般用 sinc 形状的窗来控制带外目标的影响。处理流程如图 4 所示。

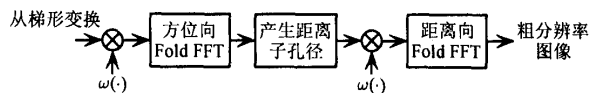


图 4 Fold FFT 处理示意图

4 梯形变换插值实现

进行梯形变换 $u' = \alpha u$ ($\alpha = (f + f_c)/f_h$) 时, 需要在数据域进行一维插值。由于插值前后都是均匀采样, 可以用线性调频变换 (CTA) 结合 IFFT 来实现, 具体的实现如图 5 所示。图中

$w(\cdot)$ 为权函数。文献 [1] 中的梯形变换因子 $\alpha = (f + f_c)/f_c$ ，对信号的高频部分 ($> f_c$)，由于插值后信号有一定的时间扩展，特别对 UWB-SAR 而言，用上面的快速算法会产生很大的误差。

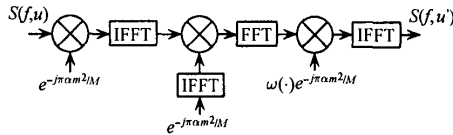


图 5 用 CZT 实现梯形变换插值框图

5 平面子孔径成像处理算法的分析与进一步改进

为了克服栅栏旁瓣效应，一般的子孔径处理算法子孔径的交叠率一般都要大于 58%。通过对 Fold-FFT 的深入理解，知道平面子孔径处理 (Planar SubArray Processing, PSAP) 算法各个子孔径之间的交叠比是非常大的 (一般大于 90%)，但通过先对输入序列重叠相加，然后对得到的序列进行处理，此时处理数据的交叠比有很大的降低，减小了处理的数据量和计算开销，对高于 X 波段的 SAR，由于梯形变换可以忽略 ($\alpha \approx 1$)，因而平面子孔径处理是一种非常有效 SAR 成像处理算法。对低频段 SAR 特别是 UWB-SAR，梯形变换不能省略，需要对得到的子孔径先进行梯形变换后再进行处理 Fold FFT 处理，这样由于引入 Fold-FFT 带来的优点完全丧失，反而由于子孔径之间交叠比很大使运算量变大。

若先对整个孔径进行梯形变换，然后进行处理，就可以发挥 Fold-FFT 的优点，但此时进行子孔径处理就没有意义。但我们可以先对一个长于方位向子孔径的数据进行梯形变换，对得到的数据进行 Fold-FFT 处理，既得到了引入 Fold-FFT 的优点，又保证了子孔径处理的优势，下面对选择多长的方位向长度进行分析。

考虑实际处理用 DSP 实现时为实数运算，对长度为 $M(M = 2^m)(m$ 为整数) 的序列，通过线性调频变换结合 IFFT 实现插值运算，运算量为，乘法运算： $28M + 14M \log_2 M$ ；加法运算： $26M + 21M \log_2 M$ 。

若整个孔径长度为 N ，每个子孔径的长度为 M ，子孔径之间的采样点数为 Δ ，则子孔径 S 的数目为

$$S = (N - M)/\Delta + 1 \tag{9}$$

子孔径的选择主要受两个条件的限制：首先去调频后相位误差要小于一定的值以保证成像质量，另一个则需要孔径足够小以减少目标进出子孔径的次数，一般选择子孔径的大小为合成孔径长度的十分之一左右。对长度为 $N = 2^n(n$ 为整数) 的孔径，UWB-SAR 一般 $n \geq 9$ ，选择子孔径的长度为 $N_1 = 2^{n_1}$ ，一般选择 $n_1 = n - 3$ 或 $n_1 = n - 4$ ，粗分辨率单元的数目选择为 $M = 2^m$ ，一般选 $m = 3, 4$ ，这样一个长度为 N 的孔径可以分成的子孔径的数目为

$$S = 2^{n-m} - 2^{n_1-m} + 1 \tag{10}$$

对于长度为 $N_1 = 2^{n_1}$ 的子孔径，进行梯形变换需要的运算量分别为，乘法运算： $28 \cdot 2^{n_1} + 14 \cdot n_1 \cdot 2^{n_1}$ 。加法运算： $26 \cdot 2^{n_1} + 21 \cdot n_1 \cdot 2^{n_1}$ 。

长度为 $N_2 = 2^{n_2}$ 点长的孔径数据包含的子孔径的数目为

$$S = 2^{n_2-m} - 2^{n_1-m} + 1 \tag{11}$$

用改进的算法,每一子孔径数据进行梯形变换的运算量包括:对长度为 $N_2 = 2^{n_2} (n_1 \leq n_2 \leq n)$ 的序列先进行线性调频变换的运算量平均到每一个子孔径,然后进行一次 N_2 点的复数乘法运算和一次傅里叶反变换,这样对每个子孔径总的复数运算量为

$$\text{乘法运算: } \quad \Pi = \frac{7 \cdot 2^{n_2} + 3 \cdot n_2 \cdot 2^{n_2}}{2^{n_2-m} - 2^{n_1-m} + 1} + 2^{n_2} + 0.5 \cdot n_2 \cdot 2^{n_2} \quad (12)$$

$$\text{加法运算: } \quad \Sigma = \frac{6 \cdot 2^{n_2} + 6 \cdot n_2 \cdot 2^{n_2}}{2^{n_2-m} - 2^{n_1-m} + 1} + n_2 \cdot 2^{n_2} \quad (13)$$

$$\text{对应的实数乘法运算量: } \quad 4\Pi \quad (14)$$

$$\text{加法运算量: } \quad 2\Pi + 2\Sigma \quad (15)$$

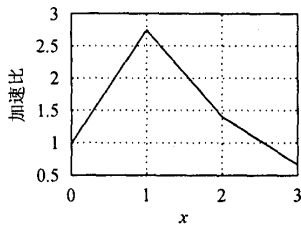


图 6 改进算法的梯形变换获得的加速比

举例如下:若子孔径长度为 256 点,粗分辨率单元为 8,若第一次处理的数据长度分别为 256, 512, 1024, 2048,则改进的算法获得的加速比如图 6 所示,其中 $n_2 = n_1 + x$. 对其它情况,可以得到相似的结果,可以看到,通过对算法的改进,若先对长度为两倍子孔径长度的序列进行梯形变换,然后进行 Fold-FFT 处理,运算量较原来的算法降低到原来的 $1/2.7$ 左右,从而使整个算法的性能得到明显提高。

6 计算机仿真结果

6.1 对理想点目标的仿真

6.1.1 仿真参数 信号带宽 200 MHz, 雷达相位中心到成像区域中心的距离为 400 m, 中心频率 300 MHz, 方位向的处理角为 30° , 成像区域有两组目标, 每组包括 9 个点目标, 目标在距离向和方位向之间距离 3 m. 雷达工作于正侧视模式。

6.1.2 成像处理结果 PSAP 算法是对大区域高分辨的合成孔径雷达实时成像提出的。为减小计算量,在计算机仿真时只能对较小的成像区域进行成像处理,由于数据区域小,仿真时只需两步来实现。实际的成像处理时,在粗分辨率单元处理后还有一步处理得到中分辨率的图像,然后处理得到最终的高分辨率的成像结果(见图 7 和图 8)。

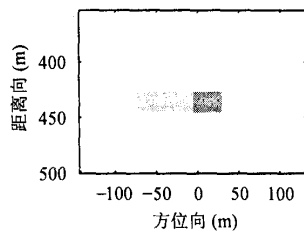


图 7 粗分辨率图像

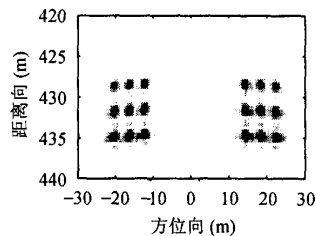


图 8 高分辨图像(局部)

可以看到, PSAP 处理得到的图像产生了一定的移位,移位量与子孔径的大小有关。从仿真结果可以看到,改进的 PSAP 能够较好的对大处理角的 UWB-SAR 进行成像。仿真时没有在距离向和方位向对图像进行加权处理。

6.2 对实际数据的仿真

对实际的 UWB-SAR 数据用 PSAP 算法进行成像, 雷达系统参数为: 载波频率为 350 MHz, 信号带宽为 300 MHz, 发射脉冲长度为 $20\mu\text{s}$, 采样频率为 2000 MHz, 方位向采样间隔为 0.09m. 成像区域中心有一辆卡车, 车身正对着合成孔径相位中心. 成像分两步完成, 成像的最终结果如图 9 所示, 可以看到, PSAP 算法可以很好地对 UWB-SAR 成像.

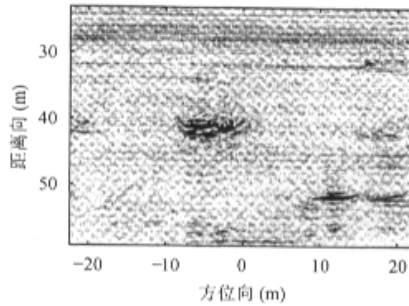


图 9 实际数据成像结果

7 结论

由于采用了 Fold-FFT 技术, 平面子孔径处理成像算法可以完成对高于 X 波段的 SAR 的高分辨实时成像, 但对低频 SAR 特别是 UWB-SAR 成像时, 要先对每个子孔径进行梯形变换, 此时需要进行插值运算, 同时子孔径之间的交叠比很大, 降低了算法的成像效率. 本文给出了一种有效的插值方法, 使插值需要的运算量有很大减小, 同时改进了处理的流程, 得到了一种高效的平面子孔径处理算法, 成像速度提高了两倍多. 使平面子孔径处理成像算法可以用于 UWB-SAR 大区域高分辨率的成像.

参 考 文 献

- [1] Perry R P, DiPietro R C, Kezma A, Vaccaro J J. SAR image formation processing using planar subarrays. *SPIE*, 1994, 2230: 160-170.
- [2] Perry R P, DiPietro R C, Johnson B L, Kozma A, Vaccaro J J. Planar subarray processing for SAR imaging. *IEEE International Radar Conference*, 1995: 473-478.
- [3] DiPietro R C, Fante R L, Perry R P, *et al.*. Multiresolution FOPEN SAR image formation. *SPIE Conference on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery*, 1999, 3721: 170-188.
- [4] 李肖冬, 黄晓涛, 梁甸农. SAR 实时成像中交叠 FFT 的有效实现. *信号处理*, 2001, 17(1): 5-7.

刘光平: 男, 1966 年生, 工程师, 博士生, 主要从事雷达信号与信息处理的研究.

郭微光: 男, 1975 年生, 博士生, 主要从事雷达信号与信息处理的研究.

黄晓涛: 男, 1972 年生, 副教授, 博士, 主要从事雷达信号与信息处理的研究.

梁甸农: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达系统计雷达信号与信息处理的研究.