

文章编号: 1001-2486 (2000) 05-0041-05

一种适用于 UWB-SAR 的实时成像算法*

李肖冬, 梁甸农

(国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘要: UWB-SAR 系统较之常规 SAR 系统, 成像所需计算量更为庞大, 实时处理的实现更难。通过将子孔径思想应用于 BP 算法, 给出了一种实用的实时成像算法 (Local BP 算法), 该算法同 BP 算法相比, 成 $N \times N$ 点的图像, 运算量可减少, 同时该算法具有良好的并行及流水实现结构。

关键词: UWB-SAR; BP 成像算法; 实时成像

中图分类号: TN958 **文献标识码:** B

A Real-time Imaging Algorithm for UWB-SAR

LI Xiaodong, LIANG Dianong

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Compared with usual SAR, the computational load of UWB-SAR system for imaging is larger, and the realization of real-time processing is more difficult. According to applying sub-aperture process to the BP algorithm, a practical real-time imaging algorithm (Local BP algorithm) is presented. For a SAR image area with N pixels each side, LBP algorithm can reduce the required operations, and it has a good parallel and pipelined architecture.

Key words: UWB-SAR; Local BP algorithm; real-time imaging

SAR 成像过程可以视为后向散射回波信号与空变参考函数二维相关的过程^[1, 2]。由于大数据量的特点, 为实现实时成像, 可行途径包括寻找减少运算量的方法或小运算量的成像算法, 现在常用的成像算法大多在频域上处理, 充分利用 FFT 算法以减少运算量, 或是提取现有算法的并行性, SAR 处理过程本身就具有较好的并行结构; 此外, 为实现成像过程的流水处理, 一种被称为子孔径处理的思想被采用, 以充分利用计算资源。以 OSA^[3], RTS^[4], PSAP^[5] 为代表的实时成像算法, 无一不是从这几个方面入手来实现实时成像的。

UWB-SAR 所特有的超宽带及大积累角特性, 使得回波信号出现严重的距离方位二维耦合, 由此引入的距离迁移的大空变性, 导致传统成像算法不再适用。目前可用的 UWB-SAR 成像算法大致可分为以 $\omega-k$ 算法为代表的频域算法和以 BP 算法为代表的时域算法^[6, 7]。以成 $N \times N$ 点 SAR 图像为例, 频域算法所需浮点运算量大致为 $O(N^2 \log N)$, 而时域算法所需浮点运算量为 $O(N^3)$ 。针对一个典型的机载 UWB-SAR 系统来说, 为实现实时成像, 频域算法和时域算法应达到的运算速度分别在百 megaflops 和十 Gigaflops 量级上, 若考虑到必要的运动补偿, 抗 RFI, 自聚焦等处理过程, 则要求运算速度分别达到 Gigaflops 和百 Gigaflops 的量级。可见, 为实现 UWB-SAR 的实时成像, 难度极大。若采用频域算法以求较小运算量, 在并行实现时, 由于所依赖的二维 FFT 不适用于基于多处理器的超级计算机上的实现, 从而面临转角存储带来的处理器之间的通信瓶颈问题。若为克服此问题而采用子孔径的方法进行处理, 则由于所成子孔径图像位于近场, 为对准各幅子图像, 必须重新进行二维插值, 且这种插值是不均匀插值, 反而导致运算量加大。

实现 UWB-SAR 实时成像, 时域算法成为首选; 但其巨大的运算量成为最大阻碍。为此, John McCorkle 和 Hans Hellsten 分别提出了采用四分树结构^[8]和局部 BP 处理思想^[7], 来减少时域算法的运

* 收稿日期: 2000-04-30
基金项目: 国家重点预研项目资助
作者简介: 李肖冬 (1972-), 男, 博士生。

算量。其中,四分树算法只适用于聚束式 SAR 工作模式,不在我们的考虑范围内;后者则只是在相关文献中简单提及,具体处理过程并没有给出。本文在对 BP 成像原理和子孔径局部处理分析理解的基础上,结合局部 BP 成像的思想,得到了子孔径运用于时域算法的一种具体实现,其良好的并行及流水实现结构,可极大降低成像处理所需运算量,且对于条带式 SAR 工作模式有着独到的优点,减轻实时处理的负担。

本文首先对 BP 算法及子孔径思想进行了简单介绍;然后给出了对应的算法结构,并对涉及的相关问题进行具体分析;其次详细分析了该算法的运算量。利用该算法对实测数据进行成像处理,取得了良好的成像结果。最后对全文进行了总结。

1 BP 算法及子孔径思想

BP 算法源于计算机层析成像技术 (CT),又称后向投影算法,由 McCorkle^[9]首先引用到 SAR 成像处理中来。有关原理可参看相关文献。概括地说, BP 是根据各孔径点到成像区域中某一像素点的相对位置,取出对应回波信号中的相应时延值,沿孔径方向叠加起来,使来自该像素点的回波信号为同相,从而得到加强,而来自其它点的回波信号则由于相位不同相,叠加结果趋于零,因此可认为最终叠加结果即为该像素点的值。对整个成像区域,按照上述过程需逐个象素点地进行相干叠加处理,即可获得最终图像。

合成孔径过程是通过天线元的移动,以时间换取空间,来等效为一个线性阵列天线^[4-8]。我们将这种思想进一步发展,即局部移动结果亦可等效为小的阵列天线,如果将其再次视为一个天线元,则这一组等效天线元的移动,显然仍可视合成孔径过程,从而可再次进行处理,这就是子孔径处理的思想。由于降低了批处理的规模,同时便于流水处理,充分利用已进行的计算资源,因此在常规 SAR 的实时成像过程中得到了广泛应用。

以下内容将把两者结合起来,给出具体的实时成像算法结构,遵循 Hellsten 的提法,我们仍将该算法称为 Local BP 成像算法。

2 Local BP 成像算法

本节首先对成像原理做一简要分析,接着给出 Local BP 成像算法结构,最后确定子孔径长度的选取原则。

2.1 成像原理

由于处理过程的实际限制,不可能获得无限精细的像,而只能根据实际分辨率的需求,将成像区域网格化,对网格上的点进行处理。也就是说,得到的每个网格点的成像结果,其实代表的是该点及一个邻近区域的散射结果的贡献的叠加效果。这一邻近区域的大小由照射波束宽度所决定。当采用子孔径进行处理时,根据等效线阵观念,相应波束宽度随参与等效的孔径长度成反比关系。如果把子孔径等效为一个天线相位中心 (APC),把相应形成的波束视为该 APC 的发射波束,则孔径长度越短,相应的等效 APC 波束宽度越宽。此时每一个点的成像结果都对应了该等效 APC 波束所照射范围内所有散射结果之和。

BP 成像过程是各孔径点相干叠加的过程,可以将叠加顺序进行重新组合,即先在子孔径内分别进行叠加,再将各子孔径结果合并起来。这种分阶段处理不会丢失有关散射点的信息,依然可以完成高分辨成像;同时,使得对每一象素点的成像不必利用全部原始数据再次重新处理,从而降低了运算量。由此我们受到启发,将子孔径思想运用于 BP 算法,便得到了 Local BP (以下简称 LBP) 算法。

2.2 LBP 算法结构

LBP 成像过程可分为两个阶段: (1) 沿方位向对孔径分段,构成一组子孔径,各个子孔径分别对成像地域的方位向采用 BP 算法进行粗分辨成像; (2) 对于得到的每个方位向粗分辨单元,利用各子孔径的处理结果再次相干叠加,以获得高分辨的图像结果。相应的结构示意图如图 1 所示。

和传统的频域子孔径算法一样, LBP 亦沿孔径方向在空间上划分子孔径。不同的是,频域算法为

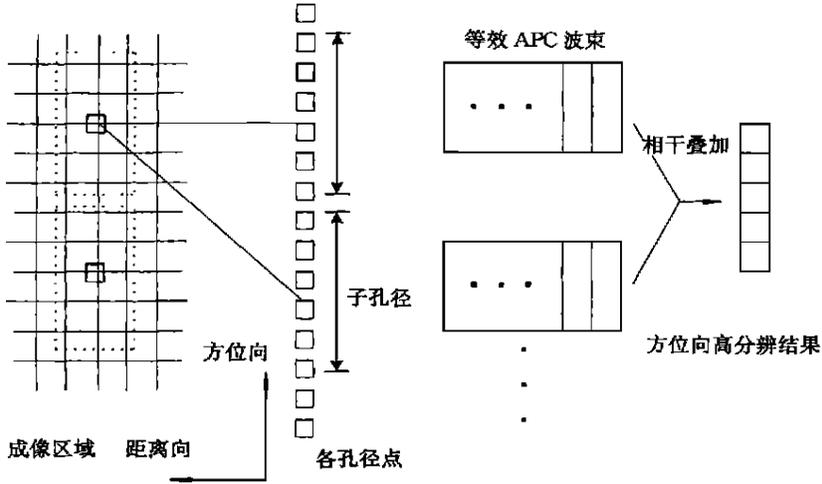


图 1 LBP 算法结构

Fig 1 Framework of LBP algorithm

避免栅栏旁瓣, 在子孔径划分时必须使子孔径交叠; 而 LBP 处理过程只在时域上进行, 因此子孔径的划分不再需要进行交叠。对应地, 我们同样将成像区域沿方位向进行分块, 获得一系列待处理的子图像, 然后分别对其进行成像。首先由各个子孔径分别对分块后的子图像中心进行相干叠加处理, 对获得的针对该子图像的一系列等效 APC 波束, 将其视为一个新的聚束式合成孔径过程的结果。此时, 粗方位分辨单元中各点则根据与各等效 APC 之间的相应位置关系, 通过计算其回波延时, 从第一阶段的处理结果, 即等效 APC 波束中取出自己的贡献, 再次相干叠加成像。对子图像中各点逐点处理, 最终得到成像区域的精分辨图像。

2.3 子孔径长度选取原则

第一阶段采用子孔径成像时, 对各粗方位分辨单元中心利用 BP 成像, 其结果可以认为是粗方位分辨单元内各点的后向散射贡献和。如果要将这种贡献和视为该子孔径对应该粗分辨点的等效 APC 波束, 则必须满足这样一个条件, 即子孔径长度的选取应保证待处理的各粗分辨点均位于该等效线阵的远场区。根据波束形成思想^[11], 该子孔径对来自某粗分辨点的后向散射回波进行相参叠加的过程, 可以视为该粗分辨点在相应方向上散射波束形成的过程。远场区的假设使得可以将粗分辨点产生的后向散射回波视为平面波, 从而其邻近各点在子孔径处理阶段对应的波束形成遵循的是与中心点处相同的孔径叠加原则, 以保证等效 APC 波束有意义。

由以上分析, 根据远场区定义^[12], 对于成像区域近端 R_n (以斜距计), 所选子孔径长度, 或等效线阵尺寸 L 应满足:

$$L/R_n \cdot \lambda_{\min}, \text{ 其中 } \lambda_{\min} \text{ 对应最小波长。}$$

此时该等效线阵对应的等效 APC 波束宽度 β 为 λ_{\min}/L , 所覆盖的方位向宽度为 $\beta \cdot R_n = L$ 。这就是我们所求的粗分辨点之间的间隔。由前面远场区假设, 我们近似认为此间隔不随距离而改变。

与 BP 算法利用全部有关的孔径点进行相干积累成像相比, LBP 在第一阶段处理过程中只采用了部分孔径点进行成像; 另一方面, 由子孔径处理所得到的子图像均只代表了该区域的局部信息。因此, 我们将这种采用子孔径方法进行处理的 BP 算法称为局部 BP (Local BP) 算法, 做为对应, 以后将传统 BP 算法则称为全局 BP (Global BP) 算法。

3 运算量分析

为便于分析起见, 同时又不失一般性, 我们以 N 点长度的孔径, 对 $N \times N$ 点的区域进行成像处

理,来计算LBP的总运算量。由于LBP处理过程可分为两个阶段,子孔径成像和子图像相干叠加,因此有

$$\text{总运算量} = O(\text{第一阶段运算量} + \text{第二阶段运算量})$$

第一阶段是逐个子孔径进行处理,故第一阶段运算量为 $O(\text{子孔径运算量} \times \text{子孔径数目})$

按前述内容将孔径上的雷达回波数据划分进不同子孔径中,假定子孔径长度为 \sqrt{N} ,可将待成像的SAR图像区域沿方位向划分为 \sqrt{N} 个子图像,也就是每个子孔径将对 \sqrt{N} 个子图像的中心进行粗分辨率成像。按照波束形成的思想,即对 \sqrt{N} 个不同方向上的波束进行合成。而每个待处理的波束内有 N 个距离分辨单元,则一个子孔径内处理完后的数据总共要对应 $N^{3/2}$ 个地域分辨单元。这些数据的获得,是通过沿子孔径对 \sqrt{N} 个方位上的数据采样,或孔径接收到的原始回波数据进行相参叠加后得到。从而针对一个子孔径的数据处理,所需运算量为 N^2 数量级。现在合成孔径长度为 N 点,故子孔径的数目为 \sqrt{N} 个。

第二阶段是利用处理完子孔径数据所获得粗分辨率的子图像,通过相干叠加处理,以获得精分辨率的子图像。故第二阶段运算量为 $O(\text{子图像处理所需运算量} \times \text{子图像数目})$

由前面的划分过程已经知道,每个子图像所包含的待分辨出来的精地域分辨单元数为 $\sqrt{N} \times N = N^{3/2}$ 个,其中每一点均从对应的这一组子孔径中获取相应的特性贡献。子孔径数目为 \sqrt{N} ,故为获得一个子图像的精分辨率结果,所需运算量为 N^2 。而子图像的总数为 \sqrt{N} 个。从而LBP的总运算量 = $O(N^2 \times \sqrt{N} + N^2 \times \sqrt{N}) = O(N^{5/2})$

与传统BP算法的 $O(N^3)$ 运算量相比,LBP的运算量减少了 \sqrt{N} 倍,而且LBP具有良好的流水结构,适合于条带式SAR的成像处理。

4 仿真结果

对一组实测数据分别采用BP算法和LBP算法进行成像处理。成像区域尺寸取 $22.5\text{ m} \times 30\text{ m}$ (距离向 \times 方位向),在成像地域中放置人工目标大三面角和小三面角各一,位置分别在 $(42.5\text{ m}, 6.6\text{ m})$ 和 $(38\text{ m}, -1.5\text{ m})$ 处。成像时距离向像素间隔取 0.075 m ,方位向像素间隔取 0.183 m 。图2为采用Local BP算法成像的结果;做为对比图像,我们同时给出BP算法处理的结果,如图3所示。图中坐标系由上到下分别对应成像区域的近端和远端,天线运动方向由左至右。

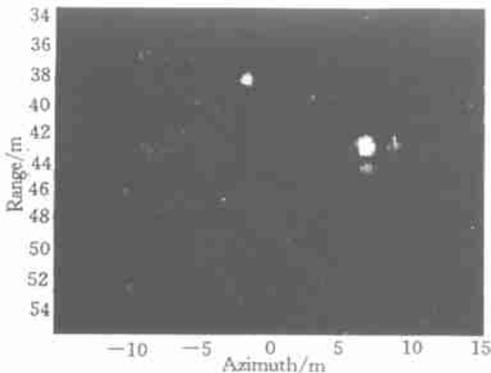


图2 LBP成像结果

Fig. 2 Result of LBP algorithm

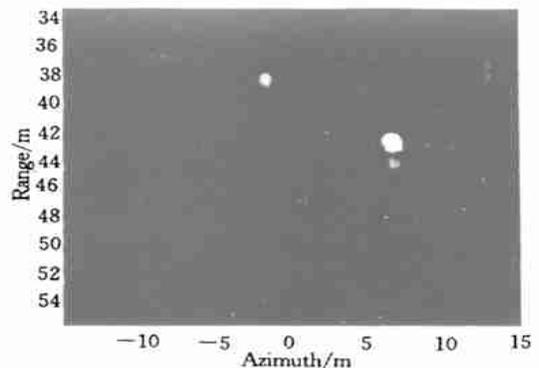


图3 BP成像结果

Fig. 3 Result of BP algorithm

从图2和图3可以看出,LBP基本上真实地反映了成像地域的情况,距离分辨率和方位分辨率均没有降低,成像结果是令人满意的。当然,从图中可以看出,LBP算法对回波相干叠加的积累能力略微降低(约 0.52 dB);此外,与BP成像结果相比,强反射体大三面角附近方位向旁瓣略有增强(约 2 dB)。这是由于子图像中各点均以该子图像的中心点为参考进行成像处理的结果。实际运用该算法进行成像处理时,可以在降低运算量与成像质量之间进行折衷,根据需要进行取舍。

5 结束语

LBP 算法结合了时域处理和子孔径处理两方面的优点, 成为适合于 UWB-SAR 进行实时成像处理的算法。其良好的并行性和流水结构, 从而可以充分利用计算资源, 使得该算法在实时实现时具有极大优势。后续工作将针对该算法涉及子孔径选取与成像质量的关系进行进一步的研究, 并完成算法的并行结构实现。

参考文献:

- [1] 张直中, 微波成像术 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 张澄波, 综合孔径雷达原理、系统分析与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [3] Bums B L, Cordaro J T. A SAR Image Formation Algorithm that Compensate for the Spatially-Variant Effects of Antenna Motion [C]. SPIE vol. 2230 Conference Proceedings, 1994: 14~ 24.
- [4] Moreira A. Real-Time Synthetic Aperture Radar (SAR) Processing with a New Subaperture Approach [J]. IEEE Trans. On GRS, July 1992: 714~ 722.
- [5] Perry R P, DiPietro R C, Johnson B L, Kozma A, Vaccaro J J. Planar Subarray Processing for SAR Imaging [C]. IEEE 1995 International Radar Conference, 1995: 473~ 477.
- [6] DiPietro R C et al. Multi-Resolution FOPEN SAR Image Formation [J]. SPIE vol. 3721, Orlando, Florida, April 1999: 170~ 188.
- [7] Hellsten H, et al, Development of VHF CARABAS II SAR [J]. Proc. Radar Sensor Technology, April 1996: 48~ 60.
- [8] McCorkle J, Rofheart M. An Order $N^2 \log N$ Backprojector Algorithm for Focusing Wide-Angle Wide Bandwidth Arbitrary-Motion SAR [J]. SPIE 1996: 25~ 36.
- [9] McCorkle J W. Focusing of Synthetic Aperture Ultra Wideband Data [C]. Proc. IGARSS' 89 Proceedings Vancouver, 1989: 1~ 5.
- [10] Vickers R S et al, Results from a VHF Impulse Synthetic Aperture Radar [J]. SPIE, 1992: 219~ 232.
- [11] Hellsten H et al, Some Results from New CARABAS II VHF SAR System [C]. the Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Denmark, 1997: 25~ 32.
- [12] 斯科尔尼克 M I. 雷达手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.