

基于 dechirp 弹载 SAR 的改进后向投影算法*

陈思 赵惠昌[†] 张淑宁 陈勇

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2013年6月30日收到; 2013年7月15日收到修改稿)

针对弹载合成孔径雷达 (SAR) 距离徙动补偿困难以及原始后向投影 (BP) 算法计算量大实时性差的问题, 本文提出了一种基于解线频调 (dechirp) 弹载 SAR 的改进 BP 成像算法. 首先建立导弹在末制导阶段的 dechirp 回波信号模型并完成距离向的聚焦, 然后对距离向进行条带划分, 结合子孔径合并和图像分裂技术将每个条带内的回波反向投影至成像区域进行相干累加, 从而得到成像区域的 SAR 图像, 最后分别采用原始 BP 算法与本文改进 BP 算法进行模拟和实测对比实验. 实验结果表明, 该算法能够对目标区域精确成像; 由于各条带间的成像是相互独立的, 易于算法的简化及并行处理, 极大地降低了算法的运算量、提高了运算速度, 增强了算法的工程可实现性. 该研究成果在遥感, 目标的探测与识别, 精确制导等领域中具有重要的应用价值.

关键词: 合成孔径雷达, 弹载, 解线频调, 后向投影算法

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.62.218405

1 引言

由于具有全天时全天候工作能力, 成像精度高, 抗隐身能力强等优点, 合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR)^[1-5] 近年来已成为遥感与制导领域的研究热点之一. 在制导阶段, 弹载 SAR 导引头实时获取包含特征地貌的高分辨率目标 SAR 图像, 并将其与预存的基准图像进行匹配, 解算出弹体的位置坐标, 从而达到修正弹体运动误差, 提高制导精度的目的.

然而在制导阶段, 特别是末制导阶段, 弹体的自身运动关系复杂, 回波信号的非线性距离走动及距离弯曲很大, 致使常规成像算法的成像精度降低甚至无法成像. 为解决该问题, 国内外学者做了大量工作. 文献 [6, 7] 将导弹飞行轨迹近似于直线, 从而转换成大斜视成像, 这对于处于中制导状态时的导弹是适用的, 但当导弹处于末制导阶段时, 该近似存在很大的误差, 严重影响导弹的成像精度. Zhou 等 [8], Yi 等 [9], Cimmino 等 [4] 根据弹载 SAR 回波信号的特点, 均提出了利用改进的距离

多普勒 (range Doppler, RD) 成像算法进行成像处理, 但在距离徙动校正时忽略了距离徙动的高阶耦合项, 距离弯曲和方位向调频斜率的空变性等问题. 当导弹飞行姿态变化较大时, 成像效果变差, 因此该方法具有一定的局限性. 为了解决上述问题, Clemente 等 [10], He 等 [11] 分别提出了线性频调变标 (chirp scaling, CS) 成像算法及方位向非线性频调变标 (nonlinear chirp scaling, NLCS) 算法, 算法虽然能够进行较好的成像处理, 但成像算法较为复杂, 且算法中的近似误差会随着导弹运动状态的变化而变化, 这将直接影响到成像的质量. Desai 等 [12], Chen 等 [13], Milman 等 [14] 分别提出了理论上无任何近似的后向投影 (back projection, BP) 算法及波数域成像算法, 但在成像过程中需要进行插值等计算量大的操作, 不利于算法的实时处理及工程应用. 研究如何降低 BP 算法的运算量是其工程应用的前提. 常见的改进 BP 算法主要有: 快速分级 BP 算法 [15]、快速因式分解 BP 算法 [16] 和四分树 BP 算法 [17]. 这类改进算法均能有效的降低算法的运算量, 提高算法的运算速度, 但它们都是利用类似于快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 蝶形

* 国家自然科学基金 (批准号: 61171168, 60702016, 61301216) 和江苏省普通高校研究生科研创新计划 (批准号: CXZZ12.0198) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhaohch353@163.com

分解方法进行改进的,不利于算法的并行实现.

为此,本文提出一种基于 dechirp 弹载 SAR 的改进 BP 成像算法. 该算法首先建立导弹在未制导阶段的 dechirp 回波信号模型并完成距离向的聚焦,然后对成像区域的距离向进行条带划分,最后借助于文献 [15—17] 的子孔径合并和图像分裂思想将每个条带内的回波反向投影后进行相干积累,从而得到成像区域的 SAR 图像. 仿真和实测实验结果表明该算法能够对目标区域精确成像;由于各条带间的成像是相互独立的,易于算法的简化及并行处理,极大地降低了算法的运算量、提高了运算速度,增强了算法的工程可实现性. 该研究成果在遥感,目标的探测与识别,精确制导等领域中具有重要的应用价值.

2 dechirp 弹载 SAR 回波信号模型

2.1 弹载 SAR 成像场景

导弹在未制导阶段的成像场景如图 1 所示. 图中,导弹沿 ABC 做匀加速曲线运动, t_a 为方位慢时间, t_r 为距离快时间. 设导弹在 $t_a = 0$ 时刻位于 A 点,其位置坐标为 $A(-b_0, h_0, 0)$,沿 x, y, z 轴的速度与加速度分量分别为 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$, $\mathbf{a} = (a_x, a_y, a_z)$. 导弹雷达波束在地面照射的区域为成像区域, O 为目标成像区域的中心点, P 为成像区域内任一点目标,其位置坐标为 $P(X_n, 0, Z_n)$. 在任意 t_a 时刻,导弹与目标之间的斜距为 $R(t_a)$,由图中的几何关系,可知

$$R(t_a) = \sqrt{\left(-b_0 + v_x t_a + \frac{1}{2} a_x t_a^2 - X_n\right)^2 + \left(h_0 + v_y t_a + \frac{1}{2} a_y t_a^2\right)^2 + \left(v_z t_a + \frac{1}{2} a_z t_a^2 - Z_n\right)^2}. \quad (1)$$

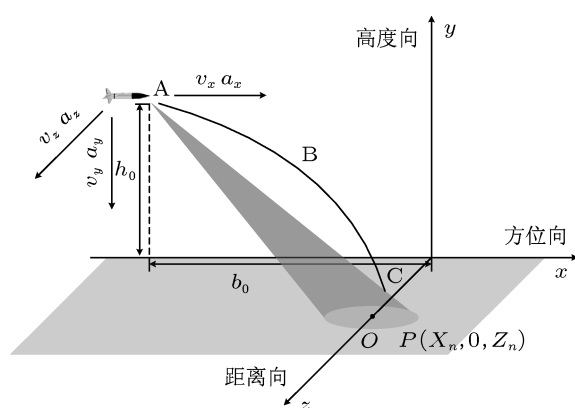


图 1 未制导阶段弹载 SAR 成像场景图

其中, T_p 为信号的脉宽, T_a 为合成孔径时间, λ 为发射信号的波长, K_r 为发射信号的调频斜率, R_{ref} 为导弹与场景中心之间的参考斜距, c 为光速, A_r, A_a 分别为回波信号距离向和方位向的包络, $\Delta R(t_a)$ 为弹目瞬时斜距 $R(t_a)$ 与参考斜距 R_{ref} 间的差值. 从 (3) 可以看出, 第一个指数项为一单频信号, 用于距离向聚焦; 第二个指数项为方位向调频信号, 用于方位向聚焦; 最后一项为剩余视频相位项 (RVP), 在成像过程中需要消除掉.

2.2 回波信号模型及预处理

设导弹的发射信号为线性调频脉冲信号

$$s(t_r) = A_r \left(\frac{t_r}{T_p} \right) \exp \left[j 2 \pi \left(f_0 + \frac{1}{2} K_r t_r \right) t_r \right], \quad (2)$$

则经过 dechirp 处理后的回波信号可表示为

$$\begin{aligned} s_r(t_r, t_a) = & A_r \left[\frac{t_r - 2R(t_a)/c}{T_p} \right] A_a \left(\frac{t_a}{T_a} \right) \\ & \times \exp \left[-j \frac{4\pi K_r}{c} \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \Delta R(t_a) \right] \\ & \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t_a) \right] \\ & \times \exp \left[j \frac{4\pi K_r}{c^2} \Delta R(t_a)^2 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

3 距离向聚焦

当信号的时宽带宽积 $B_r T_p \gg 1$ 时, (3) 式可以改写为 [18]

$$\begin{aligned} s_{r1}(t_r, t_a) = & A_r \left[\frac{t_r - 2R(t_a)/c}{T_p} \right] A_a \left(\frac{t_a}{T_a} \right) \\ & \times \exp \left[-j \frac{4\pi K_r}{c} \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \Delta R(t_a) \right] \\ & \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t_a) \right] \\ & \otimes_{t_r} \exp \left[-j \pi K_r t_r^2 \right], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, \otimes 为关于 t_r 的卷积.

对比 (3) 式与 (4) 式可知, RVP 项可以转化为一线性调频信号与前两个指数项关于 t_r 的卷积. 根据傅里叶变换的性质, 在距离频域可以轻易完成 RVP

项的消除. 另外, 观察 (4) 式的第一个指数项, 它为一个单频信号, 信号频率由瞬时斜距差 $\Delta R(t_a)$ 决定, 因此, 对 (4) 式进行距离向的傅里叶变换即可完成距离向的聚焦.

将 (4) 式进行距离向傅里叶变换, 可得

$$s_{r2}(f_r, t_a) = T_p \cdot A_a \left(\frac{t_a}{T_a} \right) \times \text{sinc} \left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2K_r}{c} \Delta R(t_a) \right) \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t_a) \right] \times \exp \left(j \frac{\pi}{K_r} f_r^2 \right). \quad (5)$$

由 (5) 式易知, RVP 校正因子为

$$H_{RVP} = \exp \left(-j \frac{\pi}{K_r} f_r^2 \right). \quad (6)$$

(5) 式乘以 (6) 式即可完成 RVP 项校正及距离向聚焦

$$s_{r3}(f_r, t_a) = T_p \cdot A_a \left(\frac{t_a}{T_a} \right) \times \text{sinc} \left[\pi T_p \left(f_r + \frac{2K_r}{c} \Delta R(t_a) \right) \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R(t_a) \right]. \quad (7)$$

4 方位向聚焦

BP 算法最初运用于医学计算机层析 (computed tomography, CT) 成像技术中, 由于 CT 成像与 SAR 成像有一定的共同之处, 因此可将 BP 成像算法移植到 SAR 成像中^[15-17].

4.1 原始 BP 算法

BP 算法的原理图如图 2 所示.

由于 BP 算法是通过实时获取导弹与目标间的瞬时斜距, 并根据此斜距信息将回波信号反向投影至成像区域进行相干累加, 从而实现对目标区域的精确成像, 因此其适用于任何轨迹的弹载 SAR 成像. 为了便于说明, 设导弹沿 AB 做直线运动, 录取的回波信号如粗实线 COD 所示, 合成孔径 AB 上每个数据录取点的回波信号经距离向聚焦后对应于曲线上 COD 的每个点. 由二维回波的录取原理可知, $AO=AC$, $BO=BD$. 将每个数据录取点的回波信号反向投影到成像区域, 即为图中的每条圆弧, 由于这些圆弧相交于 O 点, 因此, 将反向投影到成

像区域的回波信号进行相干叠加, 即可得到目标的 SAR 图像, 用公式可表示为

$$f(x_i, y_j) = \int_{t_a} s_{r3} \left[\frac{2R(t_a, x_i, y_i)}{c}, t_a \right] dt_a = \int_{t_a} s_{r3} [t_{ij}(t_a), t_a] dt_a, \quad (8)$$

其中 $R(t_a, x_i, y_i)$ 为 t_a 时刻导弹与成像区域像素点 (x_i, y_i) 之间的斜距.

由上述分析可知, 当合成孔径长度为 N , 成像区域由 $N \times N$ 个像素点组成时, 原始 BP 算法的运算复杂度达到 $O(N^3)$. 为降低其运算量, 提高算法的运算速度, 下节将提出一种适用于 dechirp 弹载 SAR 的改进 BP 成像算法.

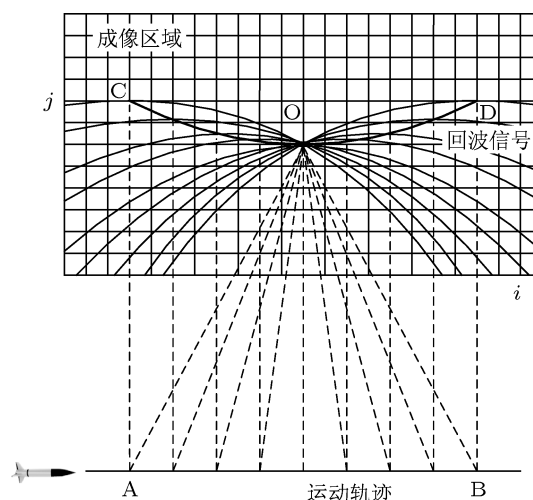


图2 原始 BP 算法原理图

4.2 弹载 SAR 改进 BP 算法

如图 3 所示, 导弹位于点 O 处, 假设距离向聚焦后的回波信号中任意一点后向投影至成像区域为曲线 AB, 该曲线是没有任何误差的. 当导弹位于 O 点相邻孔径 t 处时, 其真实投影数据与曲线 AB 相交于 C 点, 即为目标的位置. 若以其相邻孔径的数据近似投影, 得到目标的近似位置位于 D 点. 若 C 点与 D 点处于同一距离单元内, 则该近似有效. 由图中的几何关系可知, 距离误差可近似表示为

$$R_i = R(\varphi + \Delta\varphi) - R(\varphi) = \sqrt{r^2 + t^2 - 2rt \cos(\varphi + \Delta\varphi)} - \sqrt{r^2 + t^2 - 2rt \cos(\varphi)} \approx t \frac{\cos(\varphi) - \cos(\varphi + \Delta\varphi)}{\sqrt{1 - 2t \cos(\varphi)/r} + (t/r)^2}. \quad (9)$$

根据文献 [16] 可知, 当 $\Delta\varphi \ll 1$ 时,

$$R_i \leq \frac{D_L \Delta\varphi}{2} \approx \frac{D_L D_x}{4R_{\min}}, \quad (10)$$

其中 D_L 为孔径长度, D_x 为成像区域的方位向长度, R_{\min} 为孔径与成像区域的最近距离. 由 (10) 式可以看出, 只要保持 D_L 与 D_x 的乘积不变, 则距离误差即可限定在一个范围内.

本文的改进 BP 算法首先对成像区域距离向进行条带划分, 在保持距离误差不变的情况下, 将原始 BP 算法各条带的求和分成多级进行累加, 从而得到要求的图像分辨率. 图像区域距离向的条带划分如图 4 所示, 黑框表示其中的一个条带. 由于各条带间的成像是相互独立的, 因此十分易于算法的简化及并行处理.

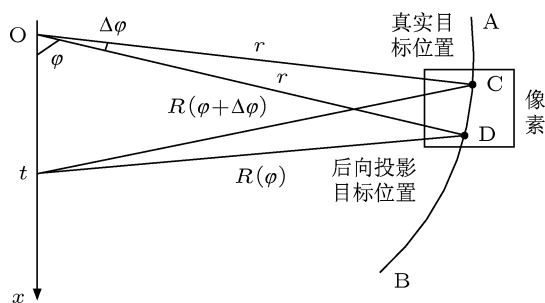


图 3 改进 BP 算法误差分析图

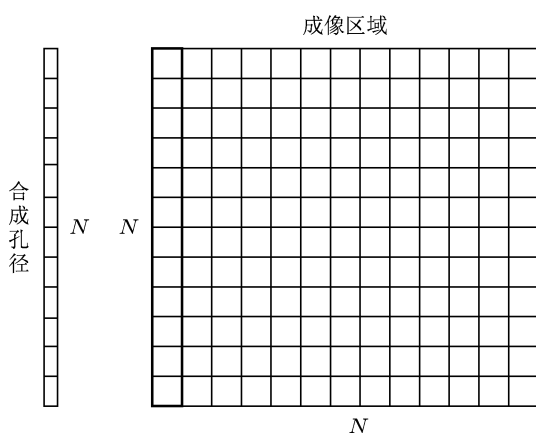


图 4 图像区域距离向条带划分示意图

为满足 (10) 式的条件, 保持距离误差恒定, 本文采用孔径合并和图像分裂技术对各条带进行分级累加成像. 以单个条带为例, 图 5 描述了一组以 2 为基的孔径合并和图像分裂示意图. 在算法迭代的过程中, 每个级别上孔径的个数分别为 8, 4, 2, 1, 伴随着孔径的合并, 波束逐渐变窄, 所能近似的成

像区域逐渐变小, 为保证有效的近似和恒定的误差, 条带同时进行分裂, 直到图像的大小满足要求的分辨率时, 迭代停止. 图中各级别的子图像个数分别为 1, 2, 4, 8.

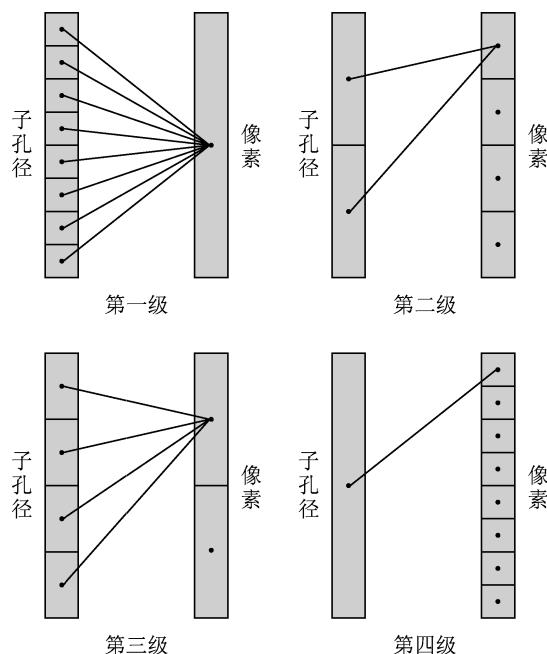


图 5 孔径合并和图像分裂示意图

由于每个条带内的成像算法一致, 因此可以选取单个条带为例进行算法描述. 图 6 为单个条带的改进 BP 算法流程框图, 其具体实现步骤如下.

步骤 1 计算初始孔径到初始图像中心间的距离 $d[n_i^{(0)}, p_k^{(0)}]$, 其中 $n_i^{(0)}$ 为 0 级别的第 i 个子孔径, $p_k^{(0)}$ 为 0 级别的第 k 个子图像中心, 并从距离向聚焦后的图像中寻找成像数据 $s_{r3}(d[n_i^{(0)}, p_k^{(0)}])$;

步骤 2 将相邻的孔径合并得到新的子孔径, 将图像分裂得到新的子图像;

步骤 3 计算每个父孔径到子图像间的距离 $d[n_i^{(s-1)}, p_k^{(s)}]$, 并利用前一级的成像数据产生该级别的成像数据 $s_{r3}(d[n_i^{(s)}, p_k^{(s)}])$, 其中

$$s_{r3}(d[n_i^{(s)}, p_k^{(s)}]) = \sum_{n_i \in n_j} s_{r3}(d[n_i^{(s-1)}, p_k^{(s)}]) \approx \sum_{n_i \in n_j} s_{r3}(d[n_i^{(s-1)}, p_{k/2}^{(s-1)}]);$$

步骤 4 重复步骤 2 和 3, 直到方位向分辨率达到预定要求时, 迭代停止;

步骤 5 将各级别的成像数据叠加, 即为该条带的 SAR 图像. 将所有条带的成像结果拼接即为整个成像区域的 SAR 图像.

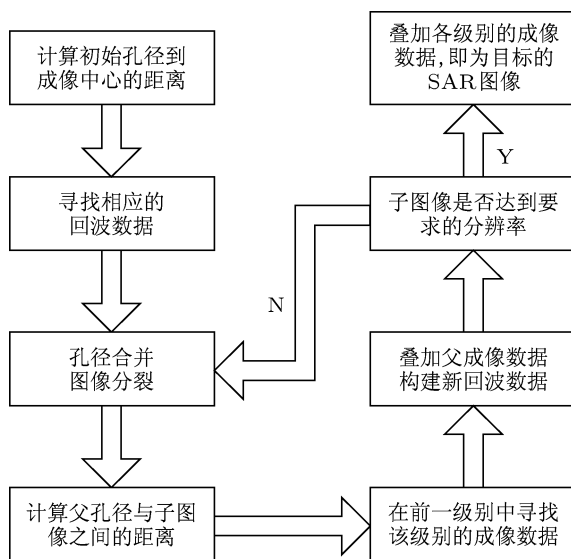


图6 改进BP算法流程图

以 N 点孔径对 $N \times N$ 点图像区域进行成像处理来分析该改进算法的运算量. 设初始时刻, 每个条带由 2^M 个子图像构成, 因此该算法共需迭代 $-M + \log_2 N$ 次. 由上述分析可知, 第 s 步的运算量为 O (孔径数 \times 图像数 \times 条带数), 即为 $O(N/2^M \cdot 2^M 2^s \cdot N) = O(2^M N^2)$, 可以看出迭代的每一步其运算量是相等的. 因此, 该算法总的计算量为 O (每一步运算是 \times 迭代步数), 即 $O(2^M N^2(-M + \log_2 N))$.

原始 BP 算法的运算量为 $O(N^3)$, 与其相比, 改进算法的加速比为 $N/2^M(-M + \log_2 N)$. 另外, 由于各条带间的成像是相互独立的, 因此并行处理可进一步加快算法的运算速度, 提高算法的运算效率.

5 实验验证及测量结果

为了进一步说明本文算法的性能, 在本节中将

选取仿真及实测数据对算法的有效性进行验证.

5.1 仿真实验结果

本文选取一飞机目标进行 dechirp 弹载 SAR 成像仿真, 仿真参数如表 1 所示.

表1 仿真参数

参数	值	参数	值
载频/GHz	1.5	方位向速度/(m/s)	300
信号带宽/MHz	180	方位向加速度/(m/s ²)	-5
脉冲宽度/ μ s	1.5	距离向速度/(m/s)	20
斜视角/($^\circ$)	50	距离向加速度/(m/s ²)	5
距离向采样点数	1024	高度向速度/(m/s)	-90
方位向采样点数	512	高度向加速度/(m/s ²)	-10

假设初始时刻导弹的位置坐标为 $[-3780, 1000, 0]$, 成像区域内有一飞机目标, 它由 15 个强散射中心组成, 具体分布如图 7 所示, 它们的位置矩阵为

$$(x_n, y_n, z_n) = \begin{bmatrix} (0, 0, 3090) & (0, 0, 3060) & (0, 0, 3030) \\ (0, 0, 3000) & (0, 0, 2970) & (0, 0, 2940) \\ (0, 0, 2925) & (-15, 0, 3000) & (15, 0, 3000) \\ (-45, 0, 2940) & (-30, 0, 2970) & (30, 0, 2970) \\ (45, 0, 2940) & (-15, 0, 2910) & (15, 0, 2910) \end{bmatrix} \text{ (m).}$$

根据原始 BP 算法及改进 BP 算法的成像原理, 对目标区域分别进行 dechirp 弹载 SAR 成像, 成像结果如图 8 所示, 其中图 8(a) 为原始 BP 算法的成

像结果, 图 8(b) 为改进 BP 算法的成像结果. 对比图 8(a) 与 (b) 可知, 两种方法均能够对目标区域精确成像, 成像结果与预设飞机目标强散射点的坐标

一致.

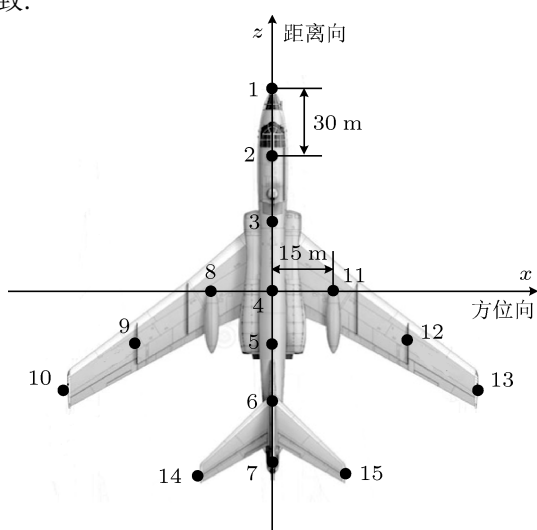


图7 飞机目标强散射点分布图

图 9(a) 与 (b) 分别对应于图 8(a) 与 (b) 中点目标 4 与 13 的 SAR 图像. 对比点目标 4 与 13 的成像结果可以发现, 两点目标的聚焦性能基本一致. 这是由于 BP 算法是理论上的最优成像算法, 处理过程中不需要距离徙动校正, 因此不存在其他成像算法中的聚焦深度等问题, 整个场景内的目标聚焦性能基本一致. 为进一步说明该改进算法的性能, 本文从运算速度和方位向成像质量 (峰值旁瓣比

(PSLR)、积分旁瓣比 (ISLR) 及分辨率) 角度对本文改进 BP 算法、原始 BP 算法及其他各类改进 BP 算法进行了对比分析, 结果如表 2 所示.

从表 2 可以看出, 虽然本文改进 BP 成像算法及其他改进 BP 算法的成像质量略差于原始 BP 算法, 但这并不影响导弹获取正确的制导信息. 然而, 本仿真中, 原始 BP 算法所耗费的运算时间为 19.6 s, 而本文改进 BP 算法所耗费的时间为 2.2 s, 运算速度比原始 BP 算法快 10 倍左右. 另外, 由于本文改进 BP 算法各条带间的成像互不影响, 当它们并行处理时可进一步提高运算速度, 十分利于算法的实时处理, 这对于对实时性要求较高的弹载平台具有重要的意义.

5.2 实测实验结果

本文也利用了一部分实测数据对改进 BP 算法及原始 BP 算法的性能做进一步评估, 成像结果如图 10 所示. 对比图 10(a) 与 (b) 可知, 两种算法获得的 SAR 图像清晰度基本一致, 但改进 BP 算法较原始 BP 算法的运算速度快了将近 10 倍, 这与表 2 中的对比分析基本一致, 因此, 改进 BP 算法十分适用于对实时性要求高的弹载 SAR 平台.

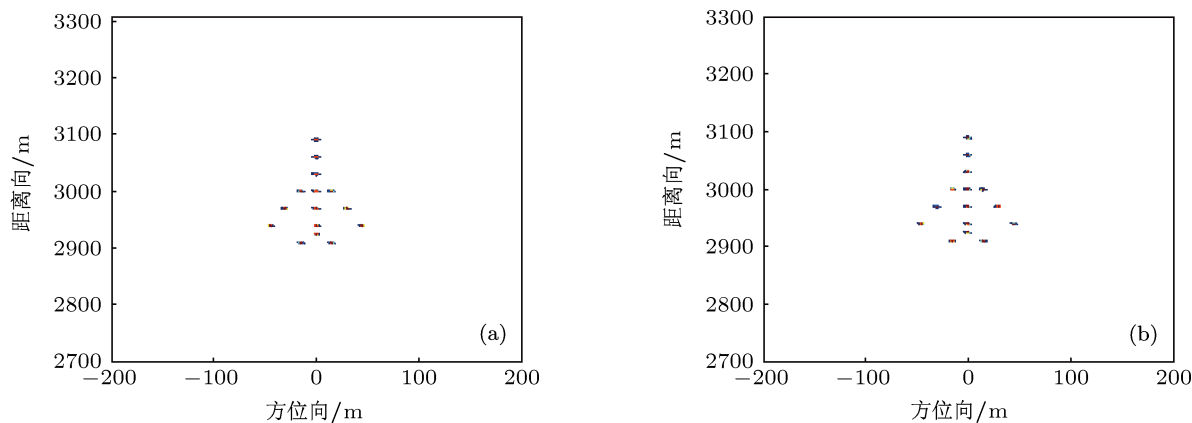


图8 仿真目标 SAR 图像 (a) 原始 BP 算法; (b) 改进 BP 算法

表 2 成像质量对比分析

成像算法	分辨率/m		运算速度/s		PSLR/dB		ISLR/dB	
	目标 4	目标 13	目标 4	目标 13	目标 4	目标 13	目标 4	目标 13
原始 BP 算法	1.00	1.00	19.6		13.25	13.24	10	9.99
快速分级 BP 算法	1.09	1.11	2.2		13.10	13.09	9.95	9.94
快速因式分解 BP 算法	1.07	1.09	2.1		13.14	13.12	9.98	9.97
四分树 BP 算法	1.08	1.09	2.1		13.13	13.12	9.96	9.96
本文改进 BP 算法	1.07	1.08	2.2		13.16	13.15	9.98	9.97

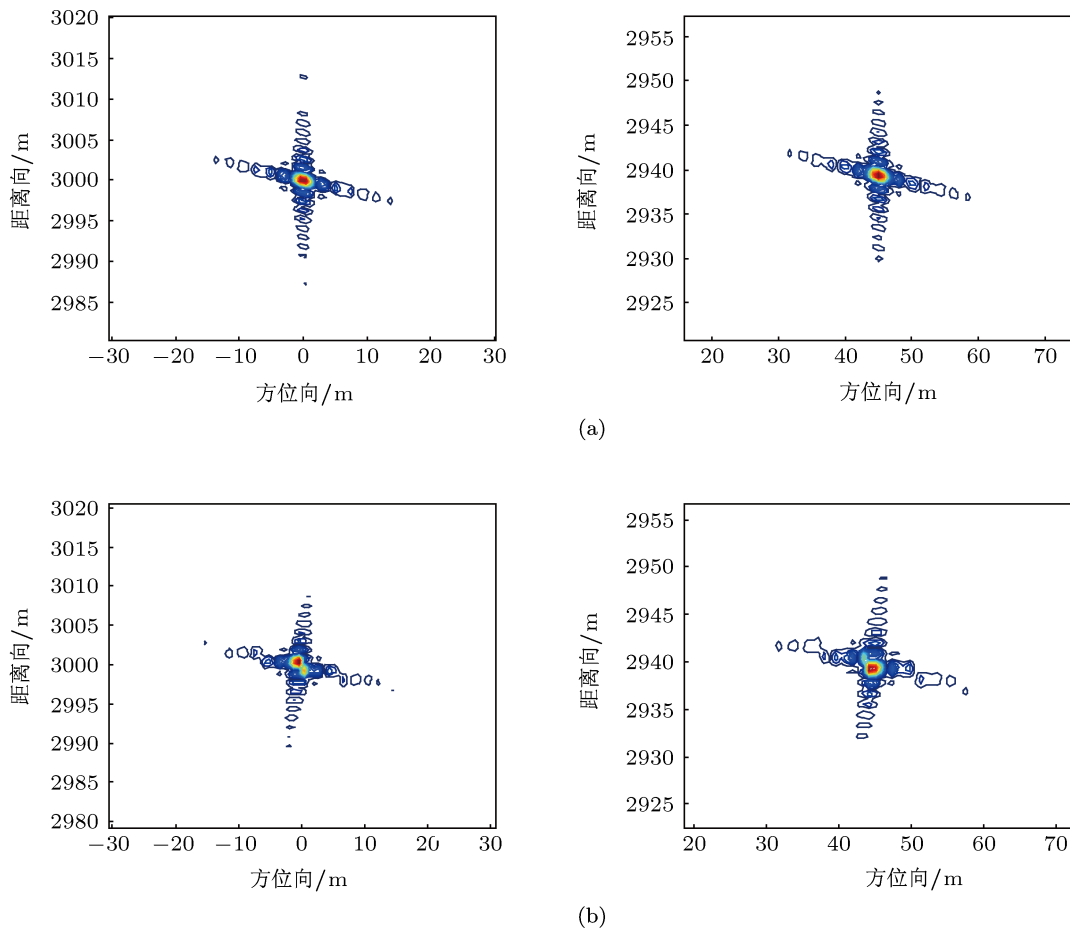


图9 点目标4与13的成像结果 (a)原始BP成像算法; (b)改进BP成像算法

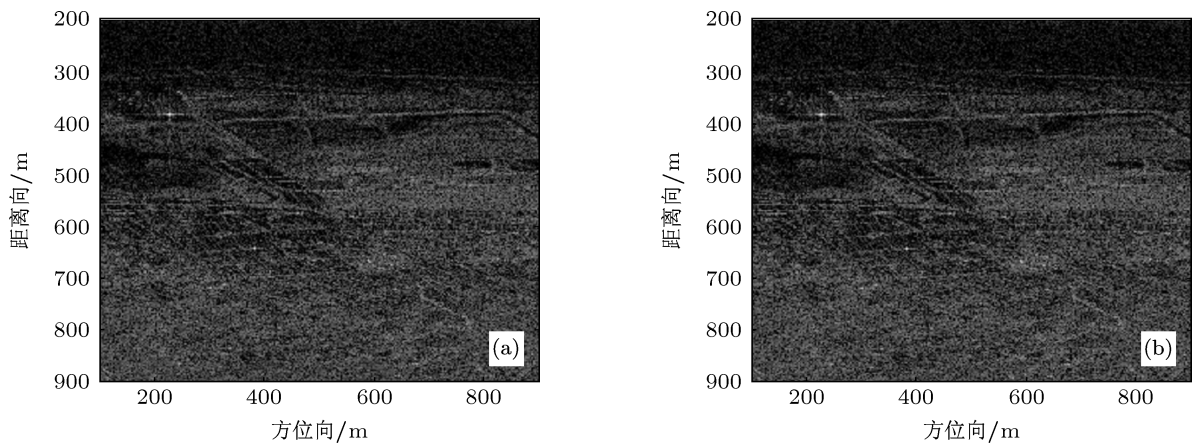


图10 实测数据成像结果 (a)原始BP成像算法; (b)改进BP成像算法

6 结论

系统地研究了 dechirp 弹载 SAR 回波信号的建模以及 SAR 成像技术. 结合孔径合并以及图像分裂技术, 提出了一种适用于 dechirp 弹载 SAR 的

改进 BP 成像算法, 通过仿真与实测数据对该算法进行了验证, 并与原始 BP 算法进行了对比. 结果表明在不影响导弹获取正确制导信息的前提下, 改进 BP 算法大大降低了原始 BP 算法的运算复杂度, 使其由 $O(N^3)$ 降低至 $O(2^M N^2 (-M + \log_2 N))$, 仿真成

像时间也缩短了将近 10 倍. 另外, 在实际应用过程中, 由于各条带间的成像是相互独立的, 因此其更有利于算法的并行实现, 具有较大的工程应用价值.

该研究成果在遥感, 目标的探测与识别, 精确制导等领域中具有重要的应用价值.

-
- [1] Ai W H, Yan W, Zhao X B, Liu W J, Ma S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 068401 (in Chinese) [艾未华, 严卫, 赵现斌, 刘文俊, 马烁 2013 物理学报 **62** 068401]
- [2] Ji W J, Tong C M 2013 *Chin. Phys. B* **22** 020301
- [3] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q, Zhang W, Wang B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108402 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 石汉青, 张伟, 王彪 2011 物理学报 **60** 108402]
- [4] Cimmino S, Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, Ruello G 2003 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **41** 2329
- [5] Li J C, Huang B, Peng Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 189501 (in Chinese) [李金才, 黄斌, 彭宇行 2012 物理学报 **61** 189501]
- [6] Yew L N, Wong F H, Cumming I G 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 14
- [7] Yeo T S, Tan N L, Zhang C B, Yi H L 2001 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **39** 954
- [8] Zhou P, Xiong T, Zhou S, Li Y C, Xing M D 2011 *J. Electron. Inf. Tech.* **33** 622 (in Chinese) [周鹏, 熊涛, 周松, 李亚超, 邢孟道 2011 电子与信息学报 **33** 662]
- [9] Yi Y S, Zhang L R, Liu L, Liu X, Shen D 2009 *J. Syst. Eng. Electron.* **31** 2864 (in Chinese) [易予生, 张林让, 刘楠, 刘昕, 申东 2009 系统工程与电子技术 **31** 2864]
- [10] Clemente C, Soraghan J J 2012 *IET Signal Process.* **6** 503
- [11] He C, Liu L Z, Xu L Y, Liu M 2012 *IEEE J. STARS* **5** 1272
- [12] Desai M D, Jenkins W K 1992 *IEEE Trans. Image Process.* **1** 505
- [13] Chen S, Zhao H C, Zhang S N, Chen Y 2013 *Int. J. Digital Content Tech. Appl.* **7** 323
- [14] Milman A S 1993 *Int. J. Remote Sens.* **14** 1965
- [15] Basu S, Bresler Y 2000 *IEEE Trans. Image Process.* **9** 1760
- [16] Ulander L M H, Hellsten H, Stenstrom G 2003 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **39** 760
- [17] Kaplan L M, McClellan J H, Seung M O 2002 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **38** 74
- [18] Zhu D, Shen M, Zhu Z 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 1579

An improved back projection imaging algorithm for dechirped missile-borne SAR*

Chen Si Zhao Hui-Chang[†] Zhang Shu-Ning Chen Yong

(School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 30 June 2013; revised manuscript received 15 July 2013)

Abstract

The range migration of missile borne synthetic aperture radar (SAR) is very difficult to correct using all the conventional imaging algorithms but the back projection algorithm; however, the large computation burden and the low efficiency are the key problems existing in its practical application. To solve the problems, an extended back projection imaging algorithm for the dechirped missile borne SAR is proposed. Firstly, a new signal model is built for the dechirped missile borne SAR, and the range compression is implemented in the range frequency domain. Secondly, the imaging region is divided into several stripes in range direction, and the raw echo data is back projected to each stripe for coherent integration by using the sub-aperture merging and image splitting technique. Finally, the entire SAR image can be obtained by combining the subimages of all the stripes. The validity of the proposed algorithm is demonstrated by the simulated and real SAR datasets. Testing results indicate that the extended algorithm is appropriate for achieving accurate dechirped missile borne SAR image. Moreover, it can be easily parallelized because the stripe imaging is independent of each other, so that can greatly decrease the computation burden, and improve the computation speed. The method introduced in this paper has important theoretical significance in realistic remote sensing, detection and recognition of military targets and precision guide.

Keywords: synthetic aperture radar, missile borne, dechirp, back projection

PACS: 84.40.Xb, 84.40.Ua, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.62.218405

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61171168, 60702016, 61301216), and the Research and Innovation Plan for Graduate Students of Jiangsu Higher Education Institutions, China (Grant No. CXZZ12-0198).

[†] Corresponding author. E-mail: zhaohch353@163.com