

基于距离向 Scaling 原理的聚束 SAR 极坐标格式成像算法

李超^{*①②} 刘畅^① 高鑫^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 极坐标格式成像算法(PFA)的实现存在两个问题:去调频后存在残余视频相位(RVP);极坐标格式转化成直角坐标格式的插值处理运算量大,且插值精度会影响聚焦效果。针对这两个问题,该文提出了一种基于 Scaling 原理的距离向重采样方法,而方位向则采用 Chirp-Z 变换,在完成去 RVP 的同时完全避免了插值。该算法与传统 PFA 相比,仅仅使用 FFT 及信号复乘,更利于在硬件上实现,极大节省了计算成本,而且所得图像质量也有一定提高。另外与已存在的距离向 CZT 方法相比该文流程更为简单,包含更少的 FFT 及信号复乘。仿真实验验证了该文算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;极坐标格式算法;残余视频相位;Chirp-Z 变换;Scaling

中图分类号:TN957.52

文献标识码:A

文章编号:1009-5896(2011)06-1434-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01068

Polar Format Imaging Algorithm Based on Range Scaling for Spotlight SAR

Li Chao^{①②} Liu Chang^① Gao Xin^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: There are two main problems through the implementation of Polar Format Algorithm (PFA). First, the error of Residual Video Phase (RVP) arises after the dechirp operation. Second, the interpolation has influence on the computation efficiency and imaging precision. This paper proposes a novel algorithm where range resampling is based on the principle of Scaling and Chirp-Z transform is adopted on azimuth dimension. The presented approach only consists in FFTs and multiplications, which effectively helps to decrease the computational burden and improve the imaging quality. Besides, the presented algorithm is much simpler than the existing range CZT approach. Point target simulation validates effectiveness of the presented algorithm.

Key words: SAR; Polar Format Algorithm (PFA); Residual Video Phase (RVP); Chirp-Z transform; Scaling

1 引言

目前聚束 SAR 常用的成像算法主要有极坐标格式算法(PFA)^[1,2], Chirp Scaling 算法(CSA)^[3,4], 距离徙动算法(RMA)^[5]以及 Frequency Scaling 算法(FSA)^[6]等。

PFA 最早是作为一种有效的旋转目标成像方法提出的,并很快被应用到聚束 SAR 成像中。相对于其它算法, PFA 以场景中心点的回波为参考信号进行运动补偿,以极坐标格式存取数据可以有效减少系统所需的存储空间,与自聚焦兼容性好。

但同时 PFA 也存在一些问题。首先,去调频过

程会带来残余视频相位(RVP),不经处理会引起几何失真及方位向散焦。其次,将极坐标格式转化成直角坐标格式的插值处理运算量很大,且插值精度会影响聚焦效果。对于第 1 个问题, Carrara 等人^[1]提出一种滤波方式以消除 RVP。现在更多的注意力集中第 2 个问题,即如何避免插值。文献[7]首先提出采用 Chirp-Z 变换(CZT)实现方位向重采样以代替方位向插值。朱岱寅等人^[8]和唐禹等人^[9]提出了一种新的解决办法,距离向、方位向均采用 CZT 达到完全避免插值的效果,运算效率大大提高。

本文在此基础上提出了一种基于 Papoulis^[10]提出的 Scaling 原理的距离向重采样方法来替代距离向插值,在完成距离向重采样的同时去除 RVP,而方位向依然采用 CZT,这样 PFA 只需要相对文献

2010-10-08 收到, 2011-01-25 改回

国家 863 计划项目(2008AA121805-1)资助课题

*通信作者: 李超 aeroknife@yahoo.cn

[8,9]更少的 FFT 和信号复乘来实现极坐标格式转换, 实现步骤也更为简单, 利于在硬件上的实现, 因此具有明显的计算优势。

文章的安排如下: 第2节介绍聚束 SAR 回波模型; 第3节将 Scaling 原理应用到 PFA 距离向重采样; 第4节结合方位向 CZT 给出算法的全部流程, 并分析了该算法的运算量; 第5节为仿真结果, 并与传统插值 PFA 比较; 文章最后为结束语。

2 聚束 SAR 回波模型

图1给出了聚束 SAR 数据采集几何模型。载机沿着 OX 轴飞行, 场景中心位于坐标系原点。飞行高度为 H , 设天线相位中心与场景中心间的瞬时矢量为 \mathbf{R}_a , 与点目标间的瞬时矢量为 \mathbf{R}_t , 瞬时入射余角 ψ 定义为 \mathbf{R}_a 与其在 XOY 平面投影的夹角, 斜视角 θ 定义为 \mathbf{R}_a 在 XOY 平面的投影与 OX 轴的夹角。参考点到场景中心的斜距为 r_c , 对应的入射余角为 ψ_{ref} , 斜视角为 θ_{ref} 。

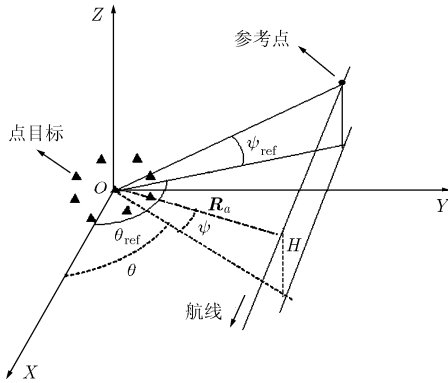


图1 聚束 SAR 数据采集几何模型

发射信号为线性调频信号, 经 Dechirp 接收后回波信号表示为^[1]

$$S(\tau, t) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2\mathbf{R}_t/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi k_r}{c} \left(\frac{f_c}{k_r} + \tau - \frac{2\mathbf{R}_a}{c}\right) (\mathbf{R}_t - \mathbf{R}_a)\right] \cdot \exp\left[j \cdot \frac{4\pi k_r}{c^2} (\mathbf{R}_t - \mathbf{R}_a)^2\right] \quad (1)$$

式中 τ 表示快时间, t 是慢时间, T_a 为合成孔径时间, T_p 为脉冲持续时间, k_r 是距离向调频率, f_c 是载频, c 是光速, σ 是点目标的散系数。

假设参考点脉冲第1个距离采样单元斜距为 r_0 , 距离向采样点总数为 N_r , 则离散快时间可以表示为

$$\tau = 2r_0/c + nT_s, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_r - 1 \quad (2)$$

T_s 为距离向采样周期, 采样频率 $f_s = 1/T_s$ 。相应的离散频率变量表示为

$$f_r = -f_s/2 + nf_s/N_r, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N_r - 1 \quad (3)$$

式(1)中第2个指数项即为 RVP, 不经处理会引起几何失真及方位向散焦, 去除 RVP 最常用的方法是文献[1]提出的滤波方法, 具体实现过程如图2所示。经过去 RVP 后信号变为

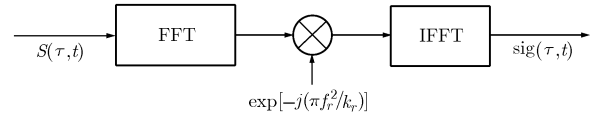


图2 滤波方法去除 RVP

$$\text{sig}(\tau, t) = \sigma \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2\mathbf{R}_a/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left[-j \cdot \frac{4\pi k_r}{c} \left(\frac{f_c}{k_r} + \tau - \frac{2\mathbf{R}_a}{c}\right) (\mathbf{R}_t - \mathbf{R}_a)\right] \quad (4)$$

3 基于 Chirp Scaling 原理的 PFA 距离向重采样

3.1 PFA 距离向重采样

PFA 的距离向重采样是均匀输入到均匀输出的过程, 图3给出了距离向重采样在波数域的图示。假设径向波数矢量为 \mathbf{K}_R , 则 \mathbf{K}_R 是距离向频率的函数^[1], 即 $\mathbf{K}_R = 4\pi f/c$, 投影到地平面表示为 \mathbf{K}_P :

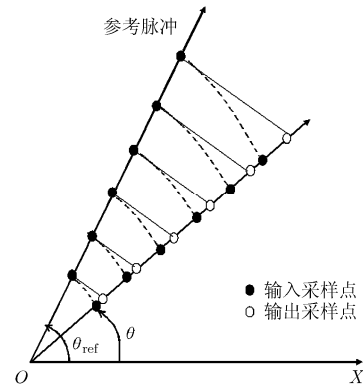


图3 距离向重采样

$$\mathbf{K}_P = \mathbf{K}_R \cos \psi = 4\pi f \cos \psi / c \quad (5)$$

其中 $f = f_c + (n - N_r/2)\Delta f$, $\Delta f = k_r/f_s$, 则由式(5)可得^[8]

$$\mathbf{K}_P(n; \psi) = \frac{4\pi}{c} \left[f_c + \left(n - \frac{N_r}{2} \right) \Delta f \right] \cos \psi \quad (6)$$

经距离向重采样后径向波数矢量变为 \mathbf{K}'_P , 由图3知:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}'_P(n; \theta) &= \mathbf{K}_P(n; \psi_{\text{ref}}) / \cos(\theta_{\text{ref}} - \theta) \\ &= \frac{4\pi}{c} \left[f_c + \left(n - \frac{N_r}{2} \right) \Delta f \right] \cos \psi_{\text{ref}} \sec(\theta_{\text{ref}} - \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

令重采样前后之间的变换因子为 δ ，则

$$\delta = \mathbf{K}'_P(n; \theta) / \mathbf{K}_P(n; \psi) = \cos \psi_{\text{ref}} \sec \psi \sec(\theta_{\text{ref}} - \theta) \quad (8)$$

同样由式(5)知重采样后的距离向离散频率可以表示为

$$f'_r(n; \psi, \theta) = \frac{c}{4\pi} \mathbf{K}'_P(n; \theta) \sec \psi - fc \quad (9)$$

从而距离向重采样后时间变为^[8]

$$t'_r(n; \psi, \theta) = \frac{2\mathbf{R}_a}{c} + \frac{f'_r}{k_r} = \frac{2\mathbf{R}_a}{c} + \frac{f_c(\delta - 1)}{k_r} + \delta \left(n - \frac{N_r}{2} \right) T_s \quad (10)$$

将式(2)代入式(10)得

$$t'_r(\tau) = \frac{2\mathbf{R}_a}{c} + \frac{f_c(\delta - 1)}{k_r} + \delta \left[\tau - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2} \right) \right] \quad (11)$$

其中 $2r_0/c + N_r T_s/2$ 表示中心距离时间。至此已经可以得到距离向重采样后信号为

$$\begin{aligned} \text{sig}_{\text{out}}(\tau, t) \\ = \text{sig} \left(\frac{2\mathbf{R}_a}{c} + \frac{f_c(\delta - 1)}{k_r} + \delta \left[\tau - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2} \right) \right], t \right) \end{aligned} \quad (12)$$

3.2 基于 Chirp Scaling 的距离向变标流程

Scaling 原理由 Papoulis^[10]提出, Scaling 原理起初应用在时间域, CSA 最早用其来解决 Chirp 信号 RCM 的空变问题^[3]。后来 FSA 又将其应用到频域来处理 Dechirp 信号^[6]。PFA 距离向重样是由等间隔输入到等间隔输出的过程, 其本质是采样间隔的变化, 因此可以采用 Scaling 原理使自变量变标达到重采样的目的。

文献[6]中 FSA 所采用的频域变标流程如图 4 所示。本文将以此为基础, 进而推导出 PFA 的距离向变标流程。

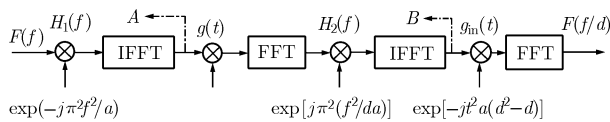


图 4 FSA 中频域变标流程图

图 4 中输入为信号的频域形式 $F(f)$, 经过滤波器 $H_1(f)$, Scaling 函数 $g(t)$, $H_2(f)$ 及逆 Scaling 函数 $g_m(t)$, 输出形式为 $F(f/d)$, 达到频域变标的目的。

分别用 f_r , τ 代替图 4 中的 f , t , 将其与第 2 节中讨论的 PFA 距离向变量相对应。输入信号为去

除 RVP 后的回波信号的频域表示, 即

$$F(f_r) = F_r(\text{sig}(\tau, t)) \quad (13)$$

$F_r(\cdot)$ 表示距离向傅里叶变换。流程图各式中包含两个变量: a 和 d 。其中 a 由回波信号的 RVP 决定, 即将 $H_1(f)$ 定义为回波信号的 RVP 项。

$$\exp(-j\pi^2 f_r^2 / a) = \exp(j\pi f_r^2 / k_r) \quad (14)$$

由式(14)可以得到

$$a = -\pi k_r \quad (15)$$

而另一变量 d 则表示变标因子, 即

$$d = \delta = \cos \psi_{\text{ref}} \sec \psi \sec(\theta - \theta_{\text{ref}}) \quad (16)$$

将所得变量重新代入各式可以得到

$$g(\tau) = \exp[j\pi k_r (1 - \delta) \tau^2] \quad (17)$$

$$g_{\text{in}}(\tau) = \exp[j\pi k_r (\delta^2 - \delta) \tau^2] \quad (18)$$

$$H_1(f_r) = \exp(j\pi f_r^2 / k_r) \quad (19)$$

$$H_2(f_r) = \exp(-j\pi f_r^2 / \delta k_r) \quad (20)$$

图 4 中 A 点信号形式为

$$F_r^{-1} \{ F_r[\text{sig}(\tau, t)] \cdot \exp(j\pi f_r^2 / k_r) \} = S(\tau, t) \quad (21)$$

可见经过滤波器 $H_1(f)$ 及 IFFT 处理, 信号由 $\text{sig}(\tau, t)$ 又回到了去 RVP 前的 Dechirp 接收信号 $S(\tau, t)$, 所以这部分处理可以忽略, 转而直接在 A 点输入 $S(\tau, t)$ 。

由于算法实现是在离散域, 所以会出现信号频谱移出频带而造成混叠的现象, 为了避免这一情况, 要求运算过程中信号频谱一直在信号带宽范围内, 朱岱寅等人^[11]针对此种情况对 FSA 做了一定改进, 具体表现为 Scaling 函数及逆 Scaling 函数的时间偏移。

$$u(\tau) = g(\tau - 2\mathbf{R}_a / c) = \exp[j\pi k_r (1 - \delta) (\tau - 2\mathbf{R}_a / c)^2] \quad (22)$$

$$\begin{aligned} u_{\text{in}}(\tau) &= g_{\text{in}}(\tau - 2\mathbf{R}_a / c) \\ &= \exp[j\pi k_r (\delta^2 - \delta) (\tau - 2\mathbf{R}_a / c)^2] \end{aligned} \quad (23)$$

A 点信号 $S(\tau, t)$ 经处理到 B 点输出为

$$\begin{aligned} S_d(\tau, t) &= \exp \left[j\pi k_r (\delta - \delta^2) \left(\tau - \frac{2\mathbf{R}_a}{c} \right)^2 \right] \\ &\quad \cdot \text{sig} \left(\delta \left[\tau + \frac{1 - \delta}{\delta} \cdot \frac{2\mathbf{R}_a}{c} \right], t \right) \end{aligned} \quad (24)$$

接下来的任务便是如何将 $S_d(\tau, t)$ 转变为式(12)中的 $\text{sig}_{\text{out}}(\tau, t)$ 。定义滤波器 $H_3(f_r)$:

$$H_3(f_r) = \exp \left\{ j2\pi \left[\frac{f_c(\delta - 1)}{\delta k_r} + \frac{2(\mathbf{R}_a - r_0)}{c} - \frac{N T_s}{2} \right] \cdot f_r \right\} \quad (25)$$

则

$$\begin{aligned}
S'_d(\tau, t) &= F_r^{-1}\{F_r[S_d(\tau, t)] \cdot H_3(f_r)\} \\
&= \text{sig}\left[\frac{2\mathbf{R}_a}{c} + \frac{f_c(\delta-1)}{k_r} + \delta\left[\tau - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2}\right)\right], t\right) \\
&\quad \cdot \exp\left\{j\pi k_r(\delta - \delta^2)\left[\tau + \frac{f_c(\delta-1)}{k_r \delta} - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2}\right)\right]^2\right\} \\
&= \text{sig}_{\text{out}}(\tau, t) \exp\left\{j\pi k_r(\delta - \delta^2)\left[\tau + \frac{f_c(\delta-1)}{k_r \delta} - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2}\right)\right]^2\right\} \quad (26)
\end{aligned}$$

比较 $S'_d(\tau, t)$ 与 $\text{sig}_{\text{out}}(\tau, t)$, 二者只相差一个指数项, 因此只要通过后面的逆 Scaling 函数将其除去即可, 所以逆 Scaling 函数重写为

$$\begin{aligned}
u_{\text{in}}(\tau) &= \\
&\exp\left\{j\pi k_r(\delta^2 - \delta)\left[\tau + \frac{f_c(\delta-1)}{k_r \delta} - \left(\frac{2r_0}{c} + \frac{N_r T_s}{2}\right)\right]^2\right\} \quad (27)
\end{aligned}$$

至此已经得到 PFA 距离向重采样后的信号 $\text{sig}_{\text{out}}(\tau, t)$:

$$\text{sig}_{\text{out}}(\tau, t) = S'_d(\tau, t) \cdot u_{\text{in}}(\tau) \quad (28)$$

重新定义:

$$\begin{aligned}
H(f_r) &= H_2(f_r) \cdot H_3(f_r) = \exp\left[-j\frac{\pi f_r^2}{\delta k_r}\right] \\
&\quad \cdot \exp\left\{j2\pi\left[\frac{f_c(\delta-1)}{\delta k_r} + \frac{2(\mathbf{R}_a - r_0)}{c} - \frac{N T_s}{2}\right] \cdot f_r\right\} \quad (29)
\end{aligned}$$

结合上面推导, 得到 PFA 的距离向变标流程如图 5 所示:

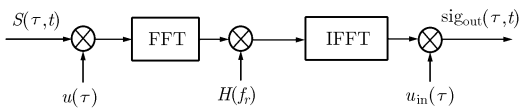


图 5 PFA 距离向变标流程图

比较图 2 与图 5, 可以看到, PFA 距离向变标处理在实现距离向重采样的同时, 去掉了 RVP, 而且相比文献[1]中去 RVP 步骤仅增加了两步复乘。与文献[8,9]中距离向 CZT 相比, 本文流程更为简短, 包含更少的 FFT 及复乘, 因此执行效率也更高。

4 基于距离向 Scaling 和方位向 CZT 原理的极坐标格式成像算法最终流程

4.1 方位向 CZT

CZT 可以实现部分单位圆的均匀采样^[12], 文献

[8,9,13]已经成功实现了 PFA 方位向 CZT, 这里不再赘述, 假设载机工作在正侧视情况下, 且载机速度恒定, 直接给出以下 CZT 参数:

$$\begin{aligned}
A &= \exp\left[-j\pi \frac{\mathbf{K}_P(n; \psi)}{\mathbf{K}_P(N_r/2; \psi)}\right] \\
W &= \exp\left[-j\frac{2\pi}{N_a} \cdot \frac{\mathbf{K}_P(n; \psi)}{\mathbf{K}_P(N_r/2; \psi)}\right] \quad (30)
\end{aligned}$$

其中 N_a 为方位向脉冲总数, 令 $m = 1, 2, \dots, N_a$ 表示方位向采样序列。

CZT 的使用可以极大提高效率, 经方位向 CZT 变换后即可实现极坐标向直角坐标的最终转换, 最后在距离向进行 IFFT 便可得到最终图像。

4.2 本文算法最终流程及运算量分析

下面结合 3.2 节和 4.1 节给出本文算法的最终流程图。

假设场景尺寸为 $N \times N$, 其中 $N = 2^k$ 。传统 PFA 需要两次 1 维插值以及两次 IFFT, 总共所需计算量(只考虑复数乘法)为 $C1 = (3 + 2RL)N^2 + 2N^2 \log_2 N$, 其中 R 为计算每个插值输出数据时所需要参加运算的原信号的采样点个数, L 为升采样因子, 对于满足一般要求的滤波器, 可取 $R=8$, $L=5$ 。对于本文算法, 根据图 6 很容易得到运算量为 $C2 = 7N^2 + (1.5 \log_2 N + 3 \log_2 2N)N^2$ 。

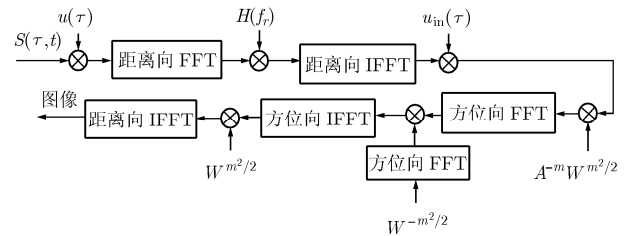


图 6 基于距离向 Scaling 和方位向 CZT 的极坐标格式成像算法流程图

图 7 为 $C1/C2$ 随图像尺寸 N 变化的曲线, 可见 $C1/C2$ 的取值随 N 的增大而减小, 但由于存储器大小和处理速度的限制, 高于 2048 点的 FFT 计算在实时处理中不太现实, 对 2048 点以下长度的处理, 从图中可以看到本文算法相比传统 PFA 可以节省约一半的计算量。如果传统 PFA 为了减小插值误差, 使用更长的滤波器, 则计算量会更大。

5 仿真结果与分析

为了验证本算法的正确性, 进行点目标仿真, 具体参数如表 1 所示。

假设场景中有 9 个点目标, 其中 1 个位于场景中心, 另外 8 个点对称地分布在半径为 50 m 的圆周

表 1 仿真参数

载机高度	3000 m	脉冲持续时间	3 μ s
照射中心距离	5000 m	距离向采样频率	120 MHz
载机速度	100 m/s	场景距离	200 m
载频	500 MHz	方位向分辨率	0.5 m
发射信号带宽	300 MHz	距离向分辨率	0.5 m

上。应用本文的算法流程图，得到这 9 个点目标的最终图像如图 8 所示。

由图 8 可以看出不仅中心点，而且圆周上 8 个点聚焦效果都很好，为了验证距离向 Scaling 的效果，特别地给出坐标为(0,0), (-50,0)及(50,0)这三个点在距离向变标前后距离压缩的效果图，如图 9 所示。从图中可以看出由于 Dechirp 接收采用场景

中心点的回波作为参考信号，所以(0,0)点 MTRC 被完全补偿，距离向变标前场景中其它点则存在明显的距离徙动。距离向变标后(-50,0)及(50,0)同中心点一样距离徙动得到校正。图 10 为点 A(50/ $\sqrt{2}$, 50/ $\sqrt{2}$)成像结果的 2 维剖面图(未加窗)，其中实线为采用本文 PFA 算法的结果，虚线为采用传统插值的 PFA 算法。从图中可以看到两种算法所得到的距离向及方位向图像分辨率(即 IRW)相等。由表 2 的定量分析可以看到，采用本文算法无论在距离向，还是方位向，峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)都得到了-一定的改善。

6 结束语

本文分析了 PFA 距离向重采样问题，以 Frequency Scaling 算法中的频域变标流程为基础，

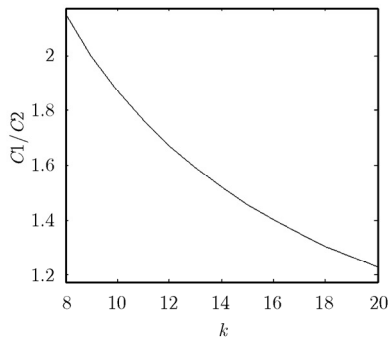


图 7 C1/C2 随图像尺寸 k 变化曲线图

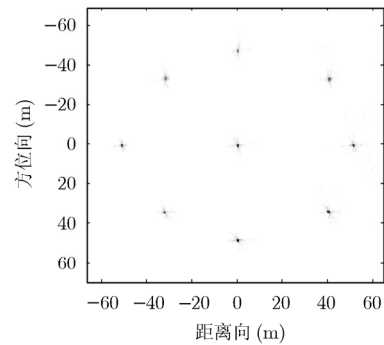
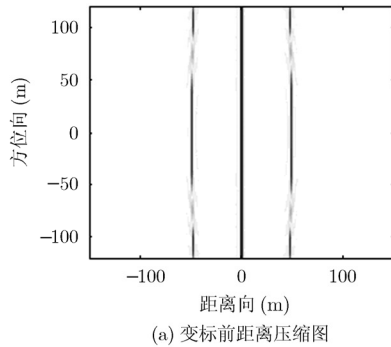
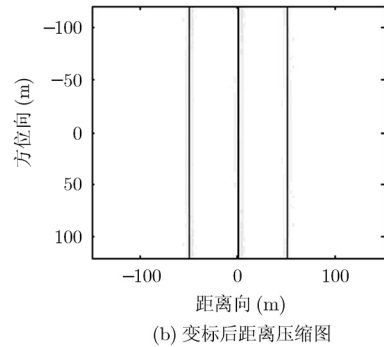


图 8 点目标仿真图像

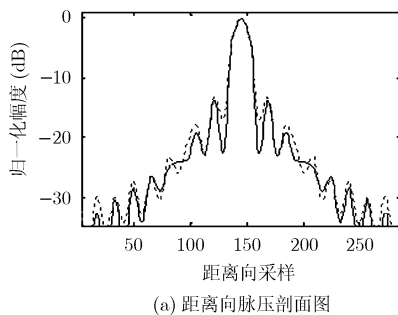


(a) 变标前距离压缩图

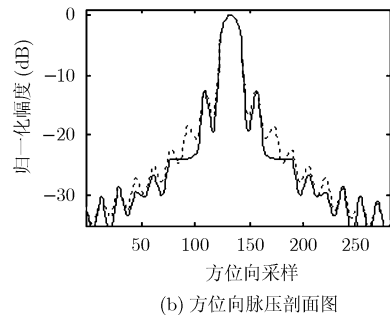


(b) 变标后距离压缩图

图 9 (0,0), (-50,0), (50,0) Scaling 前后距离压缩效果图



(a) 距离向脉压剖面图



(b) 方位向脉压剖面图

— 本文算法
 --- 传统 PFA

图 10 A 点距离向及方位向脉压剖面图

表 2 A 点图像质量比较

方法		PSLR(dB)	ISLR(dB)
距离向	插值法	-13.0184	-9.7133
	本文算法	-13.5209	-10.4550
方位向	插值法	-12.5652	-9.9281
	本文算法	-12.7625	-10.3881

提出一种适用于 PFA 距离向重采样的新方法，并将其与方位向 CZT 结合起来，形成一种新的极坐标格式成像算法。经分析论证，相比传统 PFA，该算法用 FFT 及信号复乘完全取代了插值的使用，从而有效节省了时间成本，所得图像质量也有一定提高。需要注意的是，由于距离向 Scaling 原理利用信号线性调频的特性，因此只适用于 LFM 信号，但实际大多数 SAR 系统都采用 LFM 信号，所以其应用范围并未受到太大限制。

参 考 文 献

- [1] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms [M]. Norwood, MA: Artech House, 1995, Chapter 1-4, Chapter 10.
- [2] 麻丽香, 程黎, 唐禹. 一种高分辨率聚束 SAR 运动补偿算法研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 599-603.
Ma Li-xiang, Cheng Li, and Tang Yu. Research on motion compensation algorithm for high resolution spotlight SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 599-603.
- [3] Raney R K, Runge H, Bamler R, Cumming I G, and Wong F H. Precision SAR processing using chirp scaling [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-798.
- [4] Qi Chun-dong, Zeng Tao, and Li Feng. An improved chirp scaling algorithm with capability motion compensation for SAR [C]. *Signal Processing Systems*, Dalian, 2010: 234-236.
- [5] An D X, Huang X T, and Jin T. A modified range migration algorithm for airborne squint-mode spotlight SAR imaging [C]. *Radar Conference*, Washington, DC, 2010: 1183-1186.
- [6] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [7] Lawton W. A new polar fourier transform for computer-aided tomography and spotlight synthetic aperture radar [J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988, 36(6): 931-933.
- [8] Zhu Dai-yin and Zhu Zhao-da. Range resampling in the polar format algorithm for spotlight SAR image formation using the chirp z-transform [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(3): 1011-1023.
- [9] Tang Yu, Xing Meng-Dao, and Bao Zheng. The polar format imaging algorithm based on double chirp-z transforms [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 610-614.
- [10] Papoulis A. *Systems and Transforms with Application in Optics* [M]. New York: McGraw-Hill, 1968: 203-204.
- [11] Zhu Dai-yin, Shen Ming-wei, and Zhu Zhao-da. Some aspects of improving the frequency scaling algorithm for dechirped SAR data processing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1579-1588.
- [12] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 第2版, 北京: 清华大学出版社, 1995: 241-246.
- [13] 王放, 黎湘. 基于 CZT 的双基地 SAR 极坐标格式成像算法[J]. *信号处理*, 2010, 26(3): 400-404.
Wang Fang and Li Xiang. Polar format algorithm based on chirp-Z transform for bistatic SAR system [J]. *Signal Processing*, 2010, 26(3): 400-404.

李超：男，1985年生，硕士生，研究方向为机载 SAR 信号处理。

刘畅：男，1978年生，副研究员，研究方向为 SAR 信号处理及实时成像。

高鑫：男，1966年生，研究员，研究方向为微波遥感、图像处理、应用数学。