一种适合于斜视 TOPS SAR 的改进 PFA 成像方法

吴玉峰，张红波，叶少华
（中国航空工业集团公司雷华电子技术研究所，江苏 无锡 214063）

摘　要：针对斜视循序扫描地形观测（TOPS）合成孔径雷达（SAR）成像模式，对广义极坐标格式算法（PFA）进行改进，提出了一种先线性走动校正（LRWC）后 PFA 插值的成像方法。利用 LRWC 显著降低了距离向与方位向的耦合，简化了距离单元徙动校正过程。走动校正后方位向采样依然是均匀的，因此方位向插值可采用 Chirp-Z 变换快速实现。对于波束扫描及走动校正引起的多普勒调频率的方位空变问题，采用方位非线性变标（ANCS）的方法进行统一校正，大幅提高了方位向的聚焦深度，扩大了可良好聚焦的场景范围。仿真和实测数据处理结果验证了所提方法的有效性。

关键词：合成孔径雷达；循序扫描地形观测；斜视模式；极坐标格式算法；线性距离走动校正；方位非线性变标
中图分类号：TN 958　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.06.004

An Improved PFA Imaging Method for Squinted TOPS SAR

WU Yufeng, ZHANG Hongbo, YE Shaohua
(AVIC Leihua Electronic Technology Research Institute, Wuxi 214063, Jiangsu, China)

Abstract: For squinted terrain observation by progressive scans (TOPS) synthetic aperture radar (SAR) imaging mode, the generalized polar formation algorithm (PFA) is improved and an imaging algorithm, which firstly carries out the linear range walk correction (LRWC) and then applies the PFA interpolation, is proposed in this paper. The LRWC can effectively mitigate the range-azimuth coupling effect and simplify range cell migration (RCM) correction. In addition, after performing LRWC, the azimuth sampling interval is still uniform, thus the azimuth interpolation can be realized by Chirp-Z transform. For the azimuth-variation of Doppler rate induced by the antenna beam steering and LRWC, the azimuth nonlinear chirp scaling (ANCS) is implemented. Therefore, the azimuth focus depth is improved greatly and the scene size which can be well-focused is expanded. Both simulation and real data results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR); terrain observation by progressive scans (TOPS); squinted mode; polar formation algorithm (PFA); linear range walk correction (LRWC); azimuth nonlinear chirp scaling (ANCS)

0　引言

作为扫描式合成孔径雷达（ScanSAR）的改进工作模式，循序扫描地形观测（TOPS）模式通过天线波束沿方位向的主动扫描有效克服了 ScanSAR 模式下成像结果的扇贝效应，解决了方位模糊比和输出信噪比不一致的问题，同时保持了 ScanSAR 的宽测绘带能力[1]。2007 年，德国 TerraSAR-X 卫星首次进行了星载 TOPS SAR 模式实验，并成功获得了聚焦良好的成像结果[2]。欧洲新一代 SAR 卫星 Sentinel-1 也利用 TOPS SAR 模式来代替传统的 ScanSAR 模式，用于宽测绘带及超宽测绘带成像[3-4]。

由于天线波束存在沿方位向的转动，TOPS SAR 回波信号的方位多普勒频谱通常会超过系统的脉冲重复频率（PRF），即回波信号在方位频域是模糊的。根据对模糊频谱处理的不同方式，TOPS

收稿日期：2018-09-13；**修回日期**：2018-10-15
基金项目：装备预研共用技术和领域基金（61404130311）
作者简介：吴玉峰（1985—），男，博士，工程师，主要研究方向为 SAR 系统设计、SAR 成像算法。

SAR 的成像方法可分为子孔径成像算法[5-6]、全孔径成像算法[7-8]两类。其中：子孔径成像算法中的方位信号被分为多个子孔径，保证每个子孔径信号的带宽都小于系统的脉冲重复频率（PRF），并进行距离徙动校正（RCMC）和距离压缩，然而子孔径算法不可避免会存在孔径划分、拼接、重叠部分的选择等问题，增加了信号处理的复杂性。全孔径成像算法采用 two-step 方法[9]，先进行方位向预处理获得无模糊的信号频谱，再采用传统 SAR 成像方法进行 RCMC和距离压缩。与子孔径成像算法相比，该算法无需进行孔径划分、拼接等操作，成像效率较高，已成为行业研究热点。

极坐标格式算法（PFA）[10-11]是一种典型的全孔径成像算法。该算法处理过程简单，二维插值可采用 Chirp-Z 变换实现[11]，运算效率高，被广泛应用于聚束 SAR 的数据处理中。文献[12]对传统 PFA 算法进行改进，提出了一种广义 PFA 算法，其兼具了传统 PFA 算法的高效性和 two-step 方法对避免方位模糊的有效性，仅需要 PRF 略大于方位瞬时带宽，以及少量的补零操作，就能实现对滑动聚束 SAR 和 TOPS SAR 数据的聚焦。然而，该算法针对的是正侧视模式，当 TOPS SAR 工作于斜视时，回波信号距离向与方位向的耦合将变得异常严重，且方位扫描会带来多普勒调频斜率的方位空变问题，导致文献[12]中的算法无法使用。对于斜视聚束下的 PFA 算法，一般采用坐标旋转，这会导致方位采样的非均匀性[10]，使方位插值变复杂。

针对上述问题，本文对广义 PFA 算法进行了改进，提出了一种适用于斜视 TOPS SAR 数据处理的 PFA 成像方法。该方法采用先线性走动校正，后 PFA 插值的步骤。线性走动校正可以大幅降低距离向与方位向的耦合性，简化 RCMC，并且走动校正后，方位向采样依然均匀，因此方位向插值可采用 Chirp-Z 变换快速实现。针对波束扫描、走动校正引起的多普勒调频斜率的方位空变问题，利用 TOPS SAR 方位聚焦时的变标过程，采用方位非线性变标（ANCS）方法[13]进行统一校正，极大提高了方位向的聚焦深度，使其适用于大场景成像。

1　信号模型

二维平面内斜视 TOPS SAR 工作几何示意如图 1 所示。图中，雷达平台以速度 v 沿 X 轴匀速直线飞行，天线相位中心到场景中心的距离为 R_s。数据录取过程中，雷达平台从点 M 运动到点 N，天线波束近似绕旋转中心 O_{rot} 以角速度 ω 匀速转动，旋转半径长度为 R_{rot}。波束指向从 θ_s 变化到 θ_e，中心斜视角为 θ_0。

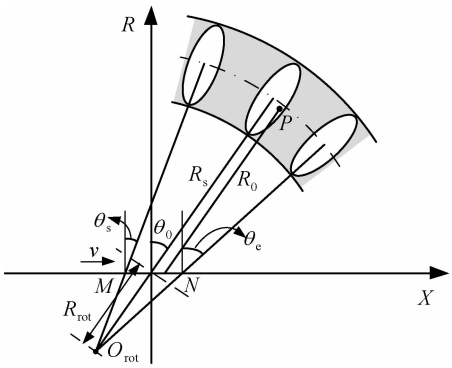

图 1　斜视 TOPS SAR 工作几何示意

Fig. 1　Geometry of squinted TOPS SAR

假设雷达发射信号为线性调频（LFM）信号，则对于场景中某一点目标 $P(X_n, R_B)$，其距离脉压后的回波信号在距离波数域可表示为

$$S_0(K_r, t_a) = W_r K_r w_a\left(\frac{t_a - t_c}{T_a}\right)\cdot \exp(-\mathrm{j}K_r R(t_a)) \tag{1}$$

式中：$K_r = \frac{4\pi}{c}(f_c + f_r)$ 为距离波数；c 为电磁波传播速度；f_c 为雷达中心载频；f_r 为距离频率；t_a 为方位慢时间；t_c 为波束中心穿越点 P 的时刻；T_a 为点 P 对应的合成孔径时间；$W_r(\cdot)$，$w_a(\cdot)$ 分别为发射信号的波数域窗函数和方位窗函数；$R(t_a)$ 为点目标 P 到雷达天线相位中心的瞬时斜距，即

$$R(t_a) = \sqrt{R_0^2 + (vt_a - X_n)^2 - 2R_0(vt_a - X_n)\sin\theta_0} \approx R_0 - \sin\theta_0(v\,t_a - X_n) + \frac{\cos^2\theta_0}{2R_0}(vt_a - X_n)^2 + \cdots \tag{2}$$

式中：$R_0 = R_B/\cos\theta_0$，R_B 为点目标 P 到雷达航线的最近距离。由式（2）可知，距离单元徙动包括线性走动项（t_a 的一次项）、距离弯曲项（t_a 的二次项）、高次项。由于存在线性走动项，距离向与方位向的耦合变得非常明显，这无疑增加了距离单元徙动校正的难度。此外，由式（2）可知，方位多普勒调频率为

$$k_a = -\frac{2}{\lambda}\left.\frac{\mathrm{d}R^2(t_a)}{\mathrm{d}t_a^2}\right|_{t_a=0} = -\frac{2v^2\cos^2\theta_0}{\lambda R_0} \tag{3}$$

在 TOPS SAR 数据采集过程中，由于天线波束转动，不同方位点具有不同的中心斜视角，因此多普

勒调频率沿方位向是变化的。对于正侧视模式，$\cos^2\theta_0$ 变化较小，k_a 的空变性可忽略；对于斜视模式，$\cos^2\theta_0$ 变化较大，k_a 的空变性无法忽略，否则将导致场景边沿点严重散焦。

针对上述难题，根据 TOPS SAR 的成像特点，对广义 PFA 算法进行改进，使其适用于斜视 TOPS SAR 的数据处理。

2 信号处理与成像方法

2.1 走动校正与 PFA 插值

斜视 SAR 存在线性走动，导致距离向与方位向之间具有较强的耦合，线性走动校正可以降低这种耦合性。因此，首先进行走动校正。由式(2)可得，线性走动校正函数为

$$H_{\mathrm{LRWC}}(K_r,t_a)=\exp(-\mathrm{j}K_r v\sin\theta_0 t_a) \tag{4}$$

将式(4)与式(1)相乘，可得

$$S_1(K_r,t_a)\approx\exp\Big(-\mathrm{j}K_r\Big(R_0+X_n\sin\theta_0+\frac{\cos^2\theta_0}{2R_0}(v\,t_a-X_n)\Big)\Big)^2 \tag{5}$$

式(5)中忽略了对成像算法设计没有影响的信号幅度。走动校正后，点目标的距离向聚焦位置将发生偏移，即

$$R_n=R_0+X_n\sin\theta_0 \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)可得

$$S_2(K_r,t_a)=\exp\Big(-\mathrm{j}K_r\Big(R_n+\frac{\cos^2\theta_0}{2(R_n-X_n\sin\theta_0)}(v\,t_a-X_n)^2\Big)\Big)\approx\exp(-\mathrm{j}K_r\sqrt{R_n^2+(v\cos\theta_0 t_a-X_n\cos\theta_0)^2})\cdot\exp\Big(-\mathrm{j}K_r\frac{\cos^2\theta_0\sin\theta_0}{2R_n^2}X_n(v\,t_a-X_n)^2\Big) \tag{7}$$

式(7)中第 3 个指数项体现了线性距离走动校正引起的方位调频率的空变性，其校正方法将在下一节讨论。完成上述距离走动校正之后，就可进行方位 Deramp 和二维 PFA 插值操作，其具体过程参考文献[13]，这里不再赘述。值得注意的是，斜视 TOPS SAR 模式的有效速度应为 $v\cos\theta_0$，而不是 v。

将传统斜视聚束 SAR 中采用的基于坐标旋转思想的 PFA 插值和本文线性走动校正后 PFA 插值进行对比。方位采样示意如图 2 所示。传统 PFA 方位向插值采用坐标旋转，即将坐标轴绕合成孔径中心点旋转中心斜视角 θ_0，如图 2(a)所示。原本均匀的采样点 A,B,C,D,E 变成了非均匀的采样点 A',B',C,D',E'，导致方位插值无法采用Chirp-Z变换快速完成。先进行线性走动校正，相当于对回波数据沿距离向进行了人为延迟，将方位向的采样点变为 A''、B''、C、D''、E''，如图 2(b)所示。由图可见，方位采样点依然均匀，这大大简化了方位向的处理过程。对于线性走动校正引入的方位调频率空变性，可与斜视扫描产生的调频率空变一起校正，不会增加运算量。

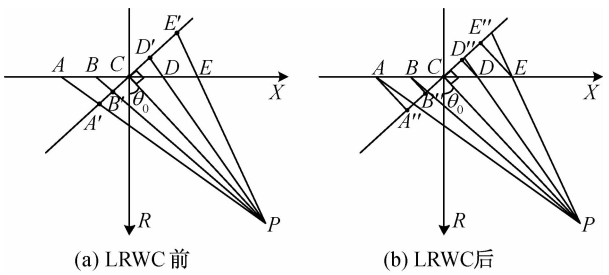

图 2 LRWC 前后方位向采样间隔

Fig. 2 Azimuth sampling interval before and after LRWC

2.2 ANCS 与方位聚焦

参照文献[12]的方法，在二维插值和函数 H_{QPT} 补偿后，进行距离向逆傅里叶变换完成距离向的处理，此时信号可表示为

$$S_3(Y,K_x)=\mathrm{sinc}(Y-Y_n\sin\theta_0)\exp(-\mathrm{j}K_xX_n\cos\theta_0)\cdot\exp\Big(-\mathrm{j}\sqrt{K_x^2+K_{y0}^2}\Big(\delta\Big(R_s,-R_s\frac{K_x}{K_{y0}},X_n\cos\theta_0,Y_n\sin\theta_0\Big)\Big)\Big)\cdot\exp\Big(-\mathrm{j}\sqrt{K_x^2+K_{y0}^2}\Big(\frac{\sin\theta_0}{2(R_s+Y_n\sin\theta_0)^2}X_n\cdot\Big(R_s\frac{K_x}{K_{y0}}+X_n\cos\theta_0\Big)^2\Big)\Big) \tag{8}$$

式中：K_x 为方位波数；K_{y0} 为插值后距离波数 K_y 的中间值；X_n,Y_n 为成像场景点的坐标；δ 为展开量和真实斜距间的误差。式(8)最后的相位项是由LRWC处理导致的剩余多普勒调频率，与目标的方位位置有关。对于 TOPS SAR，若直接对插值后的数据进行方位傅里叶变换成像，则所得图像将发生方位混叠[6,13]。为了避开方位混叠，方位变标函数被引入到方位聚焦中，其表达式为

$$H_{\mathrm{scl}}(K_x)=\exp\Big(-\mathrm{j}\frac{K_x^2}{2K_{y0}}\frac{R_s(R_{\mathrm{rot}}-R_s)}{R_{\mathrm{rot}}}\Big) \tag{9}$$

式(9)为方位波数 K_x 的二次项，即变标过程中在方位向引入了 1 个新的调频率，这为 ANCS 的实现提

供了必要的前提。

走动校正后，处于同一距离单元内点目标的方位多普勒调频率为

$$k_a(\theta,X,R_B)=-\frac{2v^2\cos^3\theta}{\lambda(R_B\cos\theta_0-X_n\sin\theta_0)} \tag{10}$$

式中：θ 为 TOPS SAR 天线波束方位向扫描引起的多普勒调频率变化值，$\theta=\theta_s+\omega t_a$；$X_n$ 为线性走动校正引入的方位调频率空变，其表达式为

$$X_n=\frac{R_B\cos\theta_0\tan\theta-R_B\sin\theta_0+(\theta-\theta_0)v/\omega}{\sin\theta_0\tan\theta+\cos\theta_0} \tag{11}$$

因此，点目标 P 与场景中心点处的调频率差为

$$\Delta k_a(\theta,X_n,R_B)=k_a(\theta,X_n,R_B)-k_a(\theta_0,0,R_B) \tag{12}$$

通过多项式拟合，Δk_a 表示为

$$\Delta k_a=\sum_{n=1}^{N}A_n(t_a)^n \tag{13}$$

式中：N 为采用多次项拟合的次数；A_n 为拟合得到的第 n 次项的系数。根据式(13)，并借鉴文献[13]的方法，通过二次积分就可得到 ANCS 扰动函数的相位，即

$$\varphi=2\pi\sum_{n=1}^{N}\frac{A_n}{(n+1)(n+2)}(t_a)^{n+2} \tag{14}$$

因此，扰动函数

$$H_{ANCS}=\exp(-j\varphi) \tag{15}$$

将式(15)、式(9)乘到式(8)中，此时，信号的多普勒调频率已不再随目标的方位位置变化，即空变性得以消除。将所得信号转换到方位空域，即

$$S_4(Y,X)=\mathrm{sinc}(Y-Y_n\sin\theta_0)\cdot\exp\left(j\frac{R_{rot}K_{y0}}{2R_s(R_{rot}-R_s)}(X-X_n\cos\theta_0)^2\right) \tag{16}$$

在方位空域构造相位补偿函数对式(16)进行聚焦，相位补偿函数为

$$H_{com}(X)=\exp\left(-j\frac{R_{rot}K_{y0}}{2R_s(R_{rot}-R_s)}X^2\right) \tag{17}$$

式(17)补偿后，对所得结果进行方位向傅里叶变换，实现目标聚焦。需要注意的是，本文方法采用了 LRWC 和 PFA 算法，忽略了波前弯曲，所得成像结果存在几何形变，最后还需进行形变校正处理。算法流程如图 3 所示。图中函数 H_{de}，H_{QPT}，H_p 的形式为[12]

$$H_{de}(t_a)=\exp(jK_rR_{rot}\sqrt{1+(v\cos\theta_0t_a/R_{rot})^2}+jK_r(R_s-R_{rot})) \tag{18}$$

$$H_{QPT}(K_y,K_x)=\exp\left(jK_y\left(R_s\left(1+\left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2\right)-R_{rot}\sqrt{1+\left(\frac{K_x}{K_y}\right)^2}\sqrt{1+\left(\frac{R_sK_x}{R_{rot}K_y}\right)^2}\right)\right)\cdot\exp(-j\sqrt{K_x^2+K_y^2}(R_s-R_{rot})) \tag{19}$$

$$H_p(Y,K_x)=\exp\left(j\frac{R_s(R_{rot}-R_s)}{2K_{y0}R_{rot}}K_x^2\right) \tag{20}$$

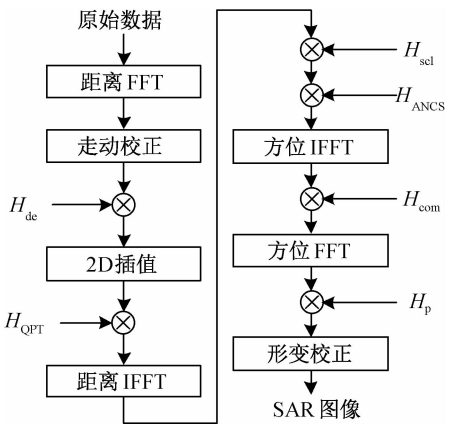

图 3　所提算法流程

Fig. 3　Flowchart of proposed algorithm

3　仿真和实测数据处理

3.1　仿真数据处理

仿真实验中，系统工作在斜视 TOPS SAR 模式，仿真参数见表 1，仿真场景为 5×5 的矩形点阵，均匀分布在 6 km×6.8 km(距离向×方位向)的范围内，如图 4 所示。

表 1　仿真参数

Tab. 1　Simulation parameters

类型	值	类型	值
中心载频/GHz	9.65	脉冲重复频率/Hz	500
脉冲时宽/μs	2	速度/(m·s^{-1})	120
信号带宽/MHz	50	场景中心/km	20
采样频率/MHz	70	中心斜视角/(°)	45
天线孔径/m	0.8	扫描范围/(°)	32.71～57.28

采用本文方法所得的成像结果如图 5 所示。图中：水平方向为方位向，垂直方向为距离向，上端表示场景近端。图 5(a)为几何形变校正前的成像结果，图 5(b)为几何形变校正结果。由图可见，成像结果未模糊，场景中所有点目标均聚焦良好。

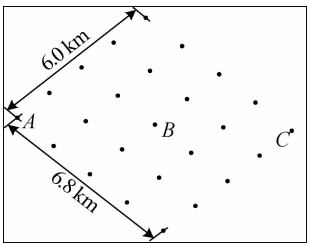

图 4 仿真点目标几何示意图

Fig. 4 Geometry of simulated point targets

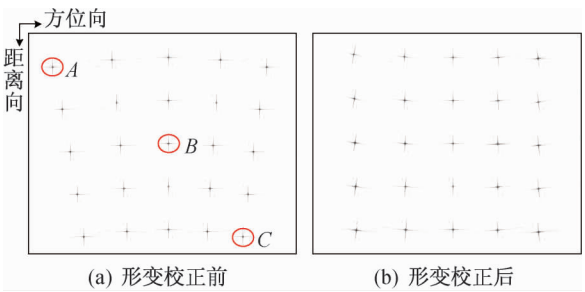

图 5 仿真结果

Fig. 5 Simulation results

为了进一步验证成像性能，图 6 给出了图 5(a)中 A，B，C 三点的等高线图。表 2 对该三点的成像性能参数进行了统计，其中：PSLR 为峰值旁瓣比，ISLR 为积分旁瓣比。由此可见，无论是场景中心点还是边沿点，成像性能均与理论值接近，这进一步表明成像效果良好。

表 2 点目标成像性能参数

Tab. 2 Imaging parameters of focused targets dB

点目标	距离向		方位向	
	PSLR	ISLR	PSLR	ISLR
A	−13.34	−9.87	−12.72	−9.68
B	−13.33	−9.79	−12.85	−9.84
C	−13.33	−9.82	−12.74	−9.70

为说明 ANCS 操作的必要性，图 7 给出了未进行 ANCS 处理的斜视 TOPS SAR 成像结果。对比图 6 可以看出，虽然场景中心点聚焦较好，但由于方位调频率的空变问题未解决，场景边沿点目标出现了严重散焦。结果表明：ANCS 处理可有效消除调频率的方位空变性，提高方位向的聚焦深度，扩大可良好聚焦的场景范围。

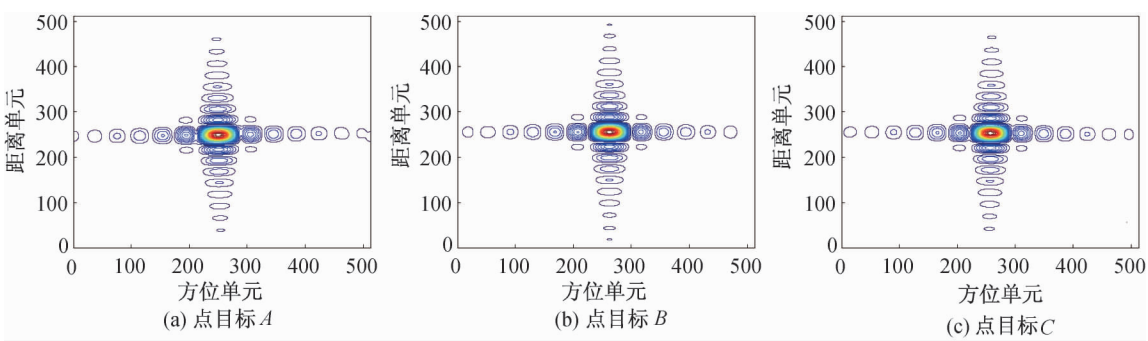

图 6 点目标 *A*-*C* 等高线图

Fig. 6 Contour plots of targets *A*-*C*

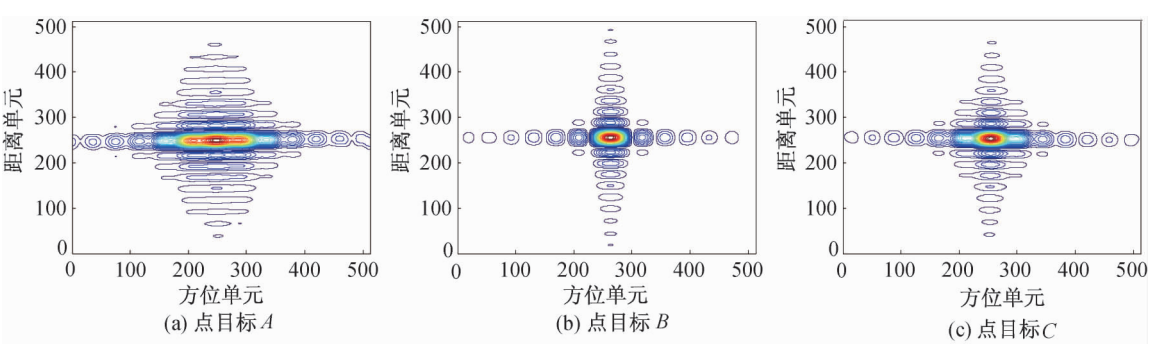

图 7 未进行 ANCS 处理的成像结果

Fig. 7 Imaging results without ANCS

3.2　实测数据处理

斜视 TOPS SAR 原始数据为某研究所 2010 年采集的数据，其主要参数如下：雷达工作在 Ku 波段，载机速度为 70 m/s，发射信号带宽为 100 MHz，场景中心距离为 8 km，旋转中心距离为－306 m，PRF 为 1 kHz，中心斜视角为 46.15°，扫描范围为 34.45°～57.64°。图 8 为采用本文改进 PFA 算法成像并形变校正后的结果，图像分辨率约为 7.2 m×8.3 m（距离向×方位向）。图中未出现模糊现象，主要目标显示清晰，聚焦效果良好。

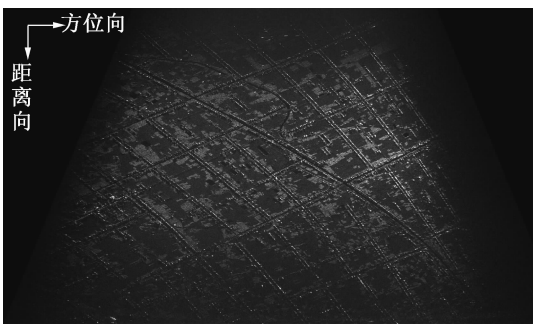

图 8　机载斜视 TOPS SAR 实测数据成像结果

Fig. 8　Imaging result from airborne squinted TOPS SAR real data

4　结论

斜视 TOPS SAR 由于回波信号的距离向与方位向具有较强的耦合，波束方位扫描导致多普勒调频率空变，成像过程复杂。为此，对广义 PFA 算法进行了改进，利用 TOPS SAR 数据方位聚焦的特点，提出先线性走动校正、后 PFA 插值的步骤。区别于传统聚束 SAR 采取坐标旋转思想进行的插值，斜视 TOPS SAR 回波信号经过线性走动校正后，方位采样依然均匀，因此，方位向插值过程可采用 Chirp-Z 变换快速实现。对于波束扫描及走动校正引起的方位调频率空变问题，结合 TOPS SAR 聚焦流程，采用 ANCS 方法进行统一校正，大幅提高了方位向聚焦深度，扩大了可良好聚焦的场景范围。仿真和实测数据验证了本文方法的可行性。与常规 PFA 算法类似，本文方法也忽略了波前弯曲，因此今后将对波前弯曲有效补偿的方法进行重点研究。

参考文献

[1] FRANCESCO D Z, ANDREA M G. TOPS: terrain observation by progressive scan[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2006, 44(9): 2352-2360.

[2] META A, MITTERMAYER J, PRATS P, et al. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2010, 48(2): 759-769.

[3] DIRK G, PIERRE P, RAMON T, et al. Overview of the GMES Sentinel-1 mission[C]//EUSAR 2012, Nuremberg, Germany. 2012:159-161.

[4] 陈筠力，李威. 国外 SAR 卫星最新进展与趋势展望[J]. 上海航天，2016，33(6):1-19.

[5] PRATS P, SCHEIBER R, MITTERMAYER J, et al. Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2010, 48(2): 770-780.

[6] 杨军，孙光才，吴玉峰，等. 基于方位谱分析的斜视 TOPS SAR 子孔径成像方法[J]. 电子与信息学报，2014，36(4)：924-930.

[7] ENGEN G, LARSEN Y. Efficient full aperture processing of TOPS mode data using the moving band Chirp Z-transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(10): 3688-3693.

[8] 陈祺，黄海风，何峰，等. 基于频域扩展和 SPECAN 的全孔径 TOP SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报，2012，34(10)：2445-2450.

[9] LANARI R, TESAURO M, SANSOSTI E, et al. Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2001, 39(9): 1993-2004.

[10] WALTER G C, RON S G, RONALD M M. Spotlight synthetic aperture radar-signal processing and algorithms[M]. Boston, MA: Artech House, 1995.

[11] YAN W, LI J W, CHEN J, et al. A parameter-adjusting polar format algorithm for extremely high squint SAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2014, 52(1): 640-650.

[12] TANG Y, XING M D, BAO Z. The polar format imaging algorithm based on double Chirp-Z transforms[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(4):610-614.

[13] SUN G C, XING M, XIA X G, et al. Beam steering SAR data processing by a generalized PFA[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(8):4366-4377.

[14] QIU X, HU D, DING C. An improved NLCS algorithm with capability analysis for one-stationary BiSAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(10):3179-3186.

（本文编辑：应振华）