

基于局部直角坐标和子区域处理的弹载 SAR 频域成像算法

别博文^{*①②} 孙路^③ 邢孟道^{①②} 梁毅^{①②} 孙光才^{①②}

^①(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

^②(西安电子科技大学信息感知技术协同创新中心 西安 710071)

^③(空军装备部 北京 100843)

摘要: 针对弹载 SAR 平台非直线轨迹运动和大斜视成像的特点, 该文提出一种基于局部直角坐标和子区域处理的频域成像算法。对大斜视成像模式, 采用局部直角坐标系建模的方法, 使距离走动校正后的方位信号具有更高的近似精度; 为精确补偿包络和相位的方位空变, 采用子区域成像的方式, 可显著提高场景边缘处的聚焦质量; 将各子区域图像校正至统一的地面坐标系下, 即可得到最终的 SAR 图像。点目标仿真和实测数据验证了所提算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达; 局部直角坐标; 子区域处理; 非直线轨迹; 大斜视

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)08-1779-08

DOI: 10.11999/JEIT171107

A Frequency-domain Algorithm Based on Local Cartesian Coordinate and Subregion Processing for Missile-borne SAR Imaging

BIE Bowen^{①②} SUN Lu^③ XING Mengdao^{①②} LIANG Yi^{①②} SUN Guangcai^{①②}

^①(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^②(Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understand, Xidian University, Xi'an 710071, China)

^③(China Air Force Equipment Headquarter, Beijing 100843, China)

Abstract: The missile-borne SAR platform has the characteristics of nonlinear trajectory and high-squint mode. A frequency-domain imaging algorithm based on local Cartesian coordinate and subregion processing is proposed. For high-squint mode, the range model is built in local Cartesian coordinate to match accurately the azimuth signal after range walk correction. To compensate the azimuth-dependent range cell migration and Doppler parameters accurately, the imaging area is divided into several subregions. The final focused image can be obtained when all the subregion images are interpolated uniformly into the ground coordinate. Finally, the point targets simulation and real SAR data verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: SAR; Local Cartesian coordinate; Subregion processing; Nonlinear trajectory; High-squint

1 引言

为提升导弹命中精度, 要求弹载雷达具有成像功能, 以用于景相匹配制导, 进而修正弹载导航系统(INS/GPS)的定位误差。与常规机载平台不同, 弹载平台速度高, 具有一定机动性, 使其运动轨迹曲线化。同时要求雷达具有大斜视成像能力, 且对成像的实时性有很高要求。针对上述弹载平台的运动特点和应用需求, 弹载合成孔径雷达(Synthetic

Aperture Radar, SAR)成像算法^[1,2]的研究是一项具有应用前景和富有挑战的任务。

在当前平台的硬件资源下, 同时考虑与实际参考图分辨率相匹配, 一般采用短孔径频域成像, 以实时得到合理分辨率的 SAR 图像。在斜距建模方面, 早期的直线轨迹模型只是方位时间的 2 次函数, 其方位频谱可以无近似得到^[3-7]。由于在直线轨迹假设下, 方位信号具有平移不变性, 斜距历程的 Taylor 级数展开点可以取天线相位中心(Antenna Phase Center, APC)扫过场景中心点的时刻^[3]。在考虑平台机动性的情况下, 短合成孔径时间内, 导弹可近似做恒加速运动^[8-12]。在恒加速模型中, 回波信号的方位平移不变性不再满足, 若依旧沿用直线模型中的方位展开点^[6], 模型中的各项系数将无法求得。在处理大斜视模式造成的距离与方位的耦合时,

收稿日期: 2017-11-24; 改回日期: 2018-04-16; 网络出版:

*通信作者: 别博文 bieb Bowen@gmail.com

基金项目: 国家自然科学基金(61621005), 高分辨率对地观测系统重大专项(41-Y20A13-9001-15116)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61621005), The High Resolution Earth Observation System major Project (41-Y20A13-9001-15116)

文献 [3,8] 均采用距离走动校正 (Range Walk Correction, RWC) 来去除耦合的线性分量。同时为了弥补该操作引入的方位信号与原斜距模型的失配, 均采用了变量代换的方式, 对原斜距模型进行了修正。文献 [8,9] 均考虑了包络的方位空变, 前者采用时域变标的方式, 但该方法对短孔径信号效果有限; 后者采用方位分块处理的方法, 其分块准则要求子块信号的包络都不能越距离单元, 这会导致分块数量过多, 处理过程复杂, 且各块数据在方位聚焦时还需进行拼接, 信号连续性无法保证。

本文采用局部直角坐标系建模, 可使斜距模型直接适配距离走动校正后的方位向信号, 无需进行斜距修正, 具有更高的精度。采用子区域成像的方式, 可同时对方位空变的包络和多普勒参数进行精确补偿, 可显著提高边缘点聚焦效果。基于短孔径数据处理的特点, 各子区域数据处理的过程可完全并行。在对各子区域的畸变进行校正并统一插值到地平面坐标系后, 即可得到最终的 SAR 图像。

2 信号模型

2.1 基于局部直角坐标的斜距模型

弹载 SAR 恒加速成像几何模型如图 1 所示。在合成孔径时间 T_a 内, 平台由 D 点运动至 F 点, 在合成孔径的中心时刻平台位于 B 点, 该时刻平台的速度矢量为 V , 加速度矢量为 A 。以 B 点在地平面的投影为坐标原点 O , 速度矢量在地平面的投影为坐标轴 N 建立直角坐标系 $O-ENU$ 。 P 为场景中心点, 以 P 为坐标原点 O' , OO' 为 Y' 轴, 建立局部直角坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$ 。 T 为场景中任意一点, Q 位于 Y_i 上且 QT 垂直于 Y_i 。在合成孔径中心时刻经过时间 t_a 后, 平台运动至 C 点。 R_i 表示点 T 的参考斜距, $R_{T,i}$ 表示 t_a 时刻点 T 的瞬时斜距。 R_i 与 $R_{T,i}$ 的计算均基于 $O_i-X_iY_iZ_i$ 坐标系。采用局部直角坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$, 可使斜距模型直接适配距离走动校正后的方位向信号, 不需要对斜距进行变量代换 [3,8]。同时, 该建模方式对后续不同子区域的处理具有通用性。

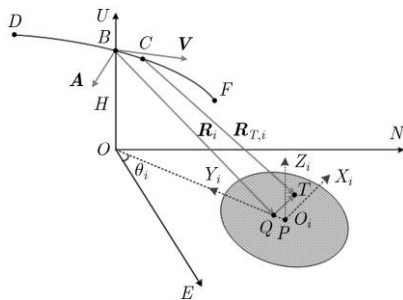


图 1 弹载 SAR 恒加速成像几何模型

由于成像场景与平台轨迹分别处于两个坐标系下, 为计算场景中任意点 T 的瞬时斜距, 需将 $O-ENU$ 坐标系下的 $C e, n, u$ 转换至 $O_i-X_iY_iZ_i$, 转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ -\cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ n \\ u \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ |OO_i| \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

场景中任意点 T 的瞬时斜距可表示为方位时间 t_a 的 4 阶 Taylor 级数:

$$R_{T,i}(t_a; R_i, x_i) = |CT| \approx \sum_{n=0}^4 k_n R_i, x_i t_a^n \quad (2)$$

其中, $k_n R_i, x_i = 1/n! \cdot d^n R_T(t_a; R_i, x_i) / dt_a^n |_{t_a=0}$ 。

在式 (2) 计算中, x_i 被表示为 R_i 的函数, 这样 $k_n R_i, x_i$ 就被表示为 $O_i-X_iY_iZ_i$ 坐标系下, 参考斜距 R_i 和波束视线投影垂向位置 x_i 的函数。

2.2 距离走动校正对斜距建模的影响

距离走动校正为处理大斜视数据的常用操作, 可去除距离徙动中的线性分量, 解除距离和方位的大部分耦合。在直线轨迹条件下, 回波信号在方位向满足平移不变性。在建模时, 取飞行方向相对场景中心偏移位置 Δ 的 T 为参考点。这样具有相同参考斜距 R_0 的点都可用 R_0 和空变量 Δ 表示。

距离走动校正后, 传统斜距模型 [3,13] 需要进行斜距修正, 以适应距离走动校正引起的斜距模型与方位信号的失配。这一代换通常表示为 [3]

$$R'_0 = R_0 + \Delta \sin \theta_0 \quad (3)$$

其中, θ_0 为场景中心斜视角, R'_0 为修正后的斜距。这一代换需要在整个信号表达式中进行, 在后续的方位向处理中, 方位相位要表示为 Δ 的 Taylor 级数, 这一过程会引入很大的近似误差。

引起上述斜距模型与方位信号失配的原因是距离走动校正引起了坐标的旋转, 将原有的斜视模式校正至正侧视模式, 又被称为“正侧化”处理。若直接采用图 1 中 $O_i-X_iY_iZ_i$ 坐标系建模, 则距离走动校正后的方位信号即可与斜距模型直接适配, 无需进行斜距修正, 很大程度提升了信号模型的精度。考虑到恒加速模型下, 信号的形式比直线模型更加复杂, 如仍采用传统的建模方式 [8], 由斜距修正引入的误差将会更大。

3 子区域成像

进行子区域成像的目的是为了减弱距离包络和方位相位的空变, 可显著提升边缘点方位向的聚焦效果。不同于全孔径时域成像, 短孔径频域成像时, 场景中任意点目标的频域支撑区远小于采样率。依

据这一特性和场景多普勒信息，可根据不同的子区域对其在频域的支撑区进行分离。传统算法^[7]在数据域对方位信号进行直接截取分块，在进行最终方位聚焦时，还需要对各块数据进行重新拼接。这种方法无法保证信号完整性，且不利于处理的并行化。不同于传统算法，在不同的支撑区数据中，同一子区域中的点目标的方位谱均保持完整。因此，各子区域数据的处理可完全并行，最终的聚焦效果均已达到录取合成孔径的最大分辨率，无需在聚焦前对方位信号进行拼接。

3.1 子区域划分

图2所示为方位子区域划分示意图。其划分准则为，同一子区域内的空变包络和加速度引起的空变相位均在可忽略范围内。下面分别对空变相位和空变包络进行分析。

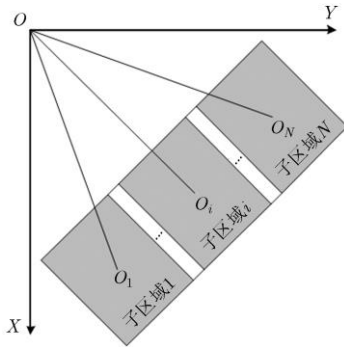


图2 子区域划分

由斜距式(2)可知，加速度出现在2阶及以上的系数中。其中，2次项中的加速度分量对方位相位的影响最大，其使信号频谱发生畸变。文献[8,9,14]在进行方位向傅里叶变换前，均在方位时域进行了加速度补偿，用于抑制加速度引起的方位谱畸变，但其均忽略了加速度对方位相位影响的空变性。为对加速度引起的空变相位进行分析，其解析式可表示为

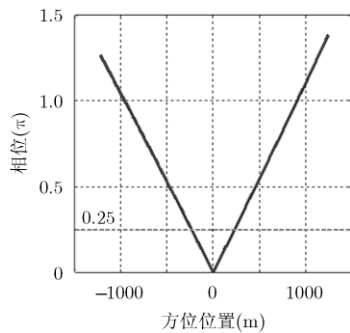


图3 加速度引起的2次空变相位

$$\Phi_{AV} t_a \approx \frac{4\pi}{\lambda} |k_2 R_c, x_i; \mathbf{A} - k_{20} R_c; \mathbf{A} t_a^2| \quad (4)$$

式(4)中， R_c 为场景中心斜距， $k_2 R_c, x_i; \mathbf{A}$ 表示场景中心处的加速度2次分量， $k_{20} R_c; \mathbf{A}$ 表示其中的非空变分量，剩余部分即可表示为加速度的2次空变分量。以表1中的仿真系统参数计算 $\Phi_{AV} t_a$ ，得到加速度引起的空变相位绝对值随方位位置的变化曲线如图3所示。在最大合成孔径时间下，当方位位置偏移量较大时，空变相位的绝对值将超过 $\pi/4$ ，产生不可忽略的相位误差。

信号的距离和方位耦合主要体现为距离徙动，即 $\Phi_{RV} f_r, f_a$ 。在经过统一的时域距离走动校正和多普勒中心补偿后，具有相同参考斜距的点目标具有不同的残余多普勒中心 f_{dr} 。因此，信号包络在2维频域可展开为 $f_a - f_{dr}$ 的级数，其对应展开项的系数依次为 $L_2 R_c, x_i$ 和 $L_3 R_c, x_i$ 。可见 $L_2 R_c, x_i$ 和 $L_3 R_c, x_i$ 均与 x_i 有关，即具有方位空变性。为进一步分析包络的方位空变性，我们将其展开为 x_i 的级数，如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \Phi_{RV} f_r, f_a = & \exp j f_r L_{21} R_c x_i + L_{22} R_c x_i^2 \\ & \times f_a - f_{dr}^2 + L_{31} R_c x_i \times f_a - f_{dr}^3 \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)变换至距离时域，即可得到空变包络的距离偏移量值。同样采用表1的仿真系统参数，可计算得到时域包络偏移量随方位位置的变化曲线，如图4所示。由仿真系统的距离采样频率可知，距离采样间隔为0.76 m，则同一子区域内的包络空变量值均要小于这一量值。

由上述分析可知，满足式(6)条件的 x_i 最大值即为子区域方位长度的最大值。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{AV} T_a/2 & < \pi/4 \\ \Phi_{RV} t_r, f_a & < 2\Delta R/c \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中， T_a 为合成孔径时间， ΔR 为距离采样间隔。

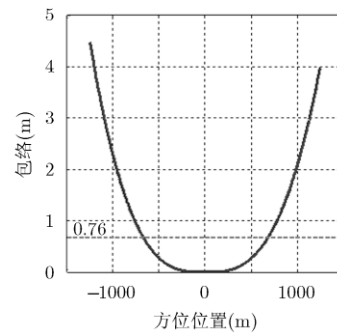


图4 方位空变包络

根据图 1 中的成像几何关系, 场景中任意点 T 在方位时间 t_a 时的瞬时多普勒中心为

$$DP_{\text{ins}} t_a; x_i, y_i = \frac{2|\mathbf{V} \cdot \mathbf{CT}|}{\lambda|\mathbf{CT}|} \quad (7)$$

距离走动校正后, 点目标的多普勒中心发生了平移, 其在频域的位置变为

$$f_{\text{ins}} t_a; x_i, y_i = DP_{\text{ins}} t_a; x_i, y_i - f_{\text{dc}} \quad (8)$$

其中, f_{dc} 为场景中心点处的参考多普勒中心。由此, 可设计在距离-多普勒域的子区域滤波函数:

$$W_i f_a = \begin{cases} 1, & \min f_{\text{ins}} \leq f_a \leq \max f_{\text{ins}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

将子区域滤波函数与信号在距离-多普勒域相乘, 即可得到分离的各子场景数据。

3.2 基于子区域的距离徙动校正

经过子区域滤波, 不同子区域对应的距离-多普勒域数据支撑区(Data Support Region, DSR)被分离, 各子区域的数据可并行化处理。在文献[8,14]中, 为避免加速度引起的方位谱畸变, 预先进行了以场景中心为基准的加速度补偿(Acceleration Compensation, AC)。同样, 在距离向处理前, 需要以子区域场景中心为基准, 进行残余距离走动校正(Residual Range Walk Correction, RRWC)和残余加速度分量补偿(Residual Acceleration Compensation, RAC)。

$$H_{\text{RRWC/RAC}} f_r, t_a = \exp\left\{j\frac{4\pi}{c} f_r + f_c k_{10,i} R_{c,i} - k_{10} R_c t_a + k_{20,i} R_{c,i}; \mathbf{A} - k_{20} R_c; \mathbf{A} t_a^2\right\} \quad (10)$$

其中, $k_{10} R_c$ 和 $k_{20} R_c; \mathbf{A}$ 依次为全场景中心处的斜距 1 次和 2 次项系数分量; 与之对应, $k_{10,i} R_c$ 和 $k_{20,i} R_c; \mathbf{A}$ 为其在子区域 i 场景中心处的取值。

假设同一子区域内具有相同参考斜距的点目标 A, B, C 。在进行方位子区域滤波前, 3 个点目标的包络和相位被以场景中心为参考的距离走动校正函数和加速度补偿函数修正。不同于全孔径信号^[5], 短孔径(部分孔径)数据的包络在方位时域是重合的。由于残余距离走动量的存在, 其包络还存在明显的倾斜特性。在经过式(10)的残余距离走动和加速度补偿后, 子区域包络的线性分量被去除, 但是仍存在弯曲等高次分量。将信号变换至多普勒域后, 3 个点目标的包络发生分离。在经过子区域滤波后, 同一子区域内点目标包络的方位空变可忽略, 因此可构造统一的子区域距离徙动校正(Subregion

Range Cell Migration Correction, SR-RCMC)和 2 次距离脉冲压缩(Secondary Range Compression, SRC)函数:

$$H_{\text{SR_RCMC/SRC},i} f_r, f_a = \exp\left\{j f_r L_{20,i} R_{c,i} f_a^2 + L_{30,i} R_{c,i} f_a^3 - j f_r^2 G_{20,i} R_{c,i} f_a^2\right\} \quad (11)$$

其中, $L_{20,i} R_{c,i}$ 为子场景包络的弯曲分量, $L_{30,i} R_{c,i}$ 为包络的高次分量, $G_{20,i} R_{c,i}$ 为 2 次脉冲压缩项。通过驻定相位原理(Principle of Stationary Phase, POSP)^[1]和级数反演法(Method of Series Reversion, MSR)^[16], 以上系数均可从子场景信号的 2 维谱中求得。

经过子区域距离徙动校正和 2 次距离脉冲压缩, 子区域内同一点目标的包络被校正至同一距离单元内。由傅里叶变换的时移性可知, 频域相位相乘会引起时域的平移。在子区域距离徙动校正后, 点目标多普勒中心对应的距离位置发生了偏移, 这一偏移量可通过子区域形变校正进行修正。

3.3 多普勒调频率空变补偿

距离向处理完毕后, 子区域内任意点目标的方位信号在多普勒域可表示为

$$\Phi_{\text{az},i} f_a = \exp\left\{j\pi \sum_{n=2}^4 K_n R_i, x_i f_a - f_{\text{dc_res}}^n\right\} \quad (12)$$

其中, $f_{\text{dc_res}}$ 为子区域多普勒中心补偿后, 点目标的残余多普勒中心, $K_n R_i, x_i$ 为多普勒域方位相位在 $f_a = f_{\text{dc_res}}$ 处的 Taylor 展开系数。 $K_2 R_i, x_i$ 为调频率项, 其中含有的 x_i 使同一距离单元的信号调频率具有空变性, 导致信号无法统一聚焦。为对方位信号的方位空变性进行分析, 将 $K_2 R_i, x_i$ 和 $K_3 R_i, x_i$ 展开为 x_i 的 Taylor 级数:

$$K_2 R_i, x_i = K_{20} R_i + K_{21} R_i x_i + K_{22} R_i x_i^2 \quad (13)$$

$$K_3 R_i, x_i = K_{30} R_i + K_{31} R_i x_i \quad (14)$$

为使方位信号在时域具有统一的调频率, 在频域引入 NCS 相位扰动函数:

$$H_{\text{NCS}} f_a = \exp\left\{j\pi \alpha f_a^3 + \beta f_a^4\right\} \quad (15)$$

将式(15)与式(12)相乘并变换至方位时域, 可得

$$\Phi_{\text{az},i} t_a = \exp\left\{j\pi D_1 t_a + D_2 t_a^2 + D_3 t_a^3 + D_4 t_a^4\right\} \quad (16)$$

其中,

$$D_2 x_i = \frac{3\alpha f_{\text{dc_res}} + 6\beta f_{\text{dc_res}}^2 - K_2}{K_2^2}, \quad D_3 x_i = -\frac{K_3 + \alpha + 4\beta f_{\text{dc_res}}}{K_2^2} \quad (17)$$

式 D_1 反映方位聚焦位置； D_2 为调频率项，其中仍含有空变量 x_i ； D_3 和 D_4 为方位高次项，可忽略其空变性，在时域进行统一补偿。

为去除 D_2 x_i 和 D_3 x_i 中的空变项，令

$$\left. \begin{aligned} \frac{d D_2 x_i}{d x_i} &= 0 \\ \frac{d D_3 x_i}{d x_i} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

解得：

$$\begin{aligned} \alpha &= K_{30} + \frac{K_{20}}{3f_{dc_res}} - \frac{K_{20}K_{31}}{3K_{21}}, \\ \beta &= \frac{K_{20}K_{31}}{6f_{dc_res}K_{21}} - \frac{K_{20} + 6f_{dc_res}K_{30}}{12f_{dc_res}^2} \end{aligned} \quad (19)$$

将式(15)与式(12)相乘，即可完成子区域方位调频率空变校正。接着将方位信号变换至时域，构造 Deramp 参考信号：

$$H_{Deramp} t_a = \exp -j\pi D_{20}t_a^2 + D_{30}t_a^3 + D_{40}t_a^4 \quad (20)$$

其中， D_{20} 、 D_{30} 和 D_{40} 依次为方位时域信号各次项系数的非空变(常数)分量。将式(20)与式(16)相乘，最后通过方位向傅里叶变换，即可得到最终聚焦的距离-多普勒域图像。

综上所述，本文所提出的弹载 SAR 频域成像算法流程图如图 5 所示。

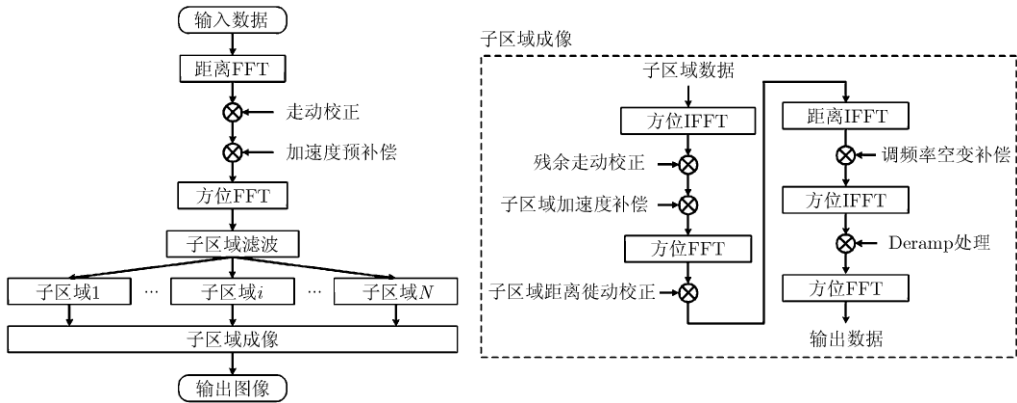


图 5 弹载 SAR 频域成像算法流程图

表 1 仿真系统参数

载频 f_c	15 GHz	速度矢量 V	(100, 800, -500) m/s
脉冲宽度 T_p	10 μ s	加速度矢量 A	(5, -10, -20) m/s ²
距离带宽 B_r	200 MHz	偏航角 θ	70°
距离采样率 F_s	220 MHz	中心斜距 R_c	31 km
天线方位长度 D_a	0.2 m	高度 H	24 km
重频 PRF	12000 Hz	合成孔径时间 T_a	0.5 s

4 仿真与实测数据处理

表 1 为仿真采用的系统参数，这里采用俯冲高机动宽幅成像参数，以验证本文算法的有效性。在延波束视线投影方向和垂直波束视线投影方向布下 3×9 的点阵，两维幅宽均为 2.5 km。根据 3.1 节对子区域划分准则的分析，我们将成像区域在方位向三等分，在得到子区域图像后，将子区域成像结果校正至地平面网格后，可得到最终的全场景图像，如图 6 所示。地平面网格分辨率为 0.3 m，由图 6 全场景中的边缘点坐标可看出，全场景图像的几何畸变在一个像素内。

为了进一步评估本文算法的性能，选取场景中的边界点 $T1$ 、 $T3$ ，以及参考点(中心点) $T2$ 进行包络空变校正和方位聚焦效果的对比分析。

图 7 为采用传统频域统一校正方法和基于子区域处理的包络空变校正结果。传统频域统一校正方法以场景中心为基准，只有中心点 $T2$ 处的包络被校正，二边缘点处的残余包络空变量值仍超过了一个距离单元。与之相比，在方位子区域滤波后， $T1$ 、 $T2$ 和 $T3$ 分别位于 3 个子区域内。以各子区域的场景中心为基准，包络的方位空变被精确补偿，同一点目标的包络均被校正至一个距离单元内。

为了评估本文算法的方位向聚焦效果，我们分别画出了场景边缘点 $T1$ 和 $T3$ 的方位剖面图，并与传统 ANCS^[3]算法对比，其结果如图 8 所示。同时就

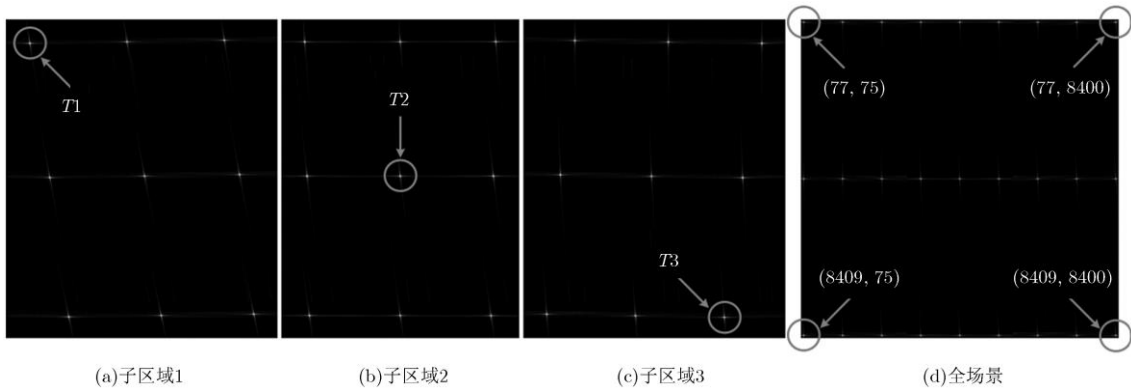


图 6 点目标子区域和全场景成像结果

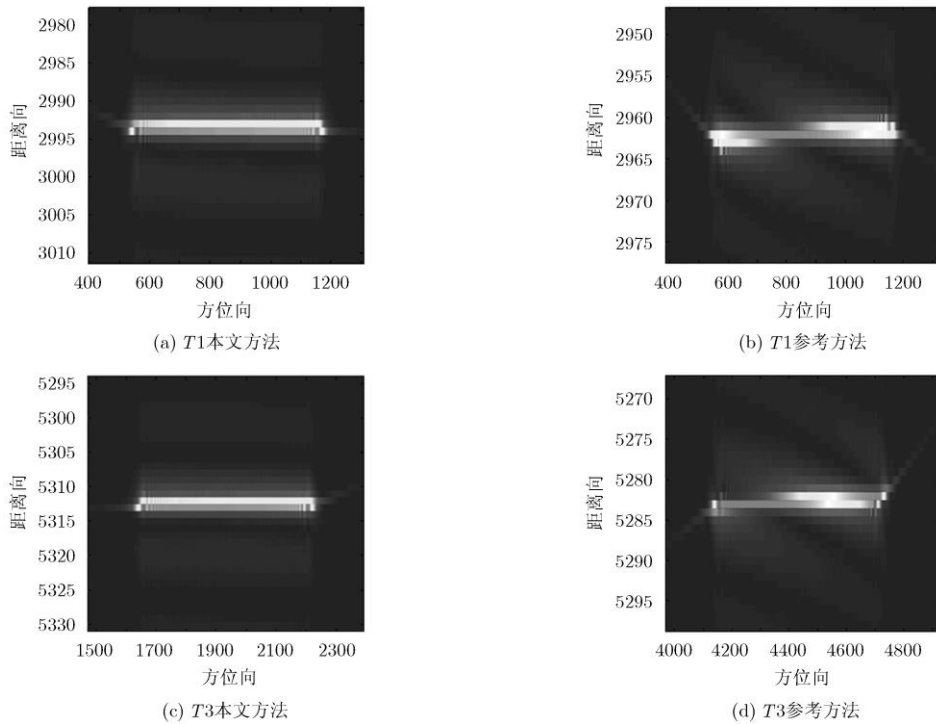


图 7 本文方法与参考方法距离徙动校正结果对比

PSLR, ISLR 和 IRW (− 3 dB) 指标, 对两种算法的方位聚焦效果进行了对比, 如表 2 所示。传统 ANCS 算法由于未进行子区域滤波且模型精度较低, 边缘点 $T1$ 和 $T3$ 的调频率空变只得到部分补偿, 导致方位散焦、聚焦性能指标下降。

为了进一步验证本文算法的实用性, 分别用本文算法和 ANCS 算法处理同一机载实测数据。机载实验系统工作于 Ku 波段。在大斜视模式下, 其波束地面投影偏航角达 74° , 作用距离 6.9 km。合成孔径中心时刻的速度和加速度矢量依次为 (2.47, 76.50, -1.25) m/s, (0.08, -0.13, -0.04) m/s²。图 9 为两种算法的处理结果对比图, 从中选取一处局部区域放大, 可见本文算法的聚焦效果优于参考算法。

通过点目标仿真和实测数据处理结果对比, 本

文算法在经过基于子区域处理的包络和调频率空变补偿后, 其聚焦效果与传统 ANCS 算法相比具有显著提升。

5 结论

本文提出了一种基于局部直角坐标和子区域处理的弹载 SAR 频域成像算法。针对距离走动校正引起的方位信号与斜距模型的失配问题, 采用基于局部直角坐标的斜距模型, 不用进行空变量代换修正斜距式, 具有更高的精度。针对弹载平台高机动性运动导致的包络和相位空变, 采用基于子区域处理的包络和调频率空变补偿方法, 精确补偿了宽幅场景边缘点的空变包络和调频率。通过对点目标仿真和实测数据的处理, 本文算法与传统 ANCS 算法在

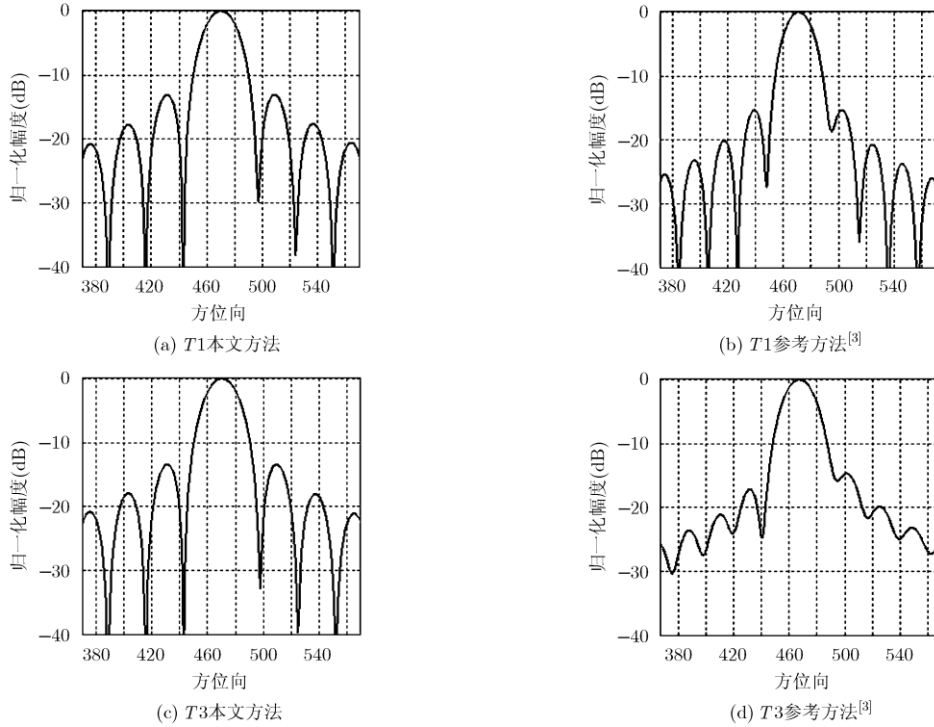


图8 本文方法与参考方法方位向成像结果对比

表2 性能指标对比

点目标	本文算法			ANCS		
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(采样点)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(采样点)
T1	-13.06	-9.76	0.88	-15.30	-12.42	0.93
T2	-13.22	-9.94	0.87	-13.21	-9.90	0.89
T3	-13.44	-10.18	0.89	-14.68	-11.93	1.04

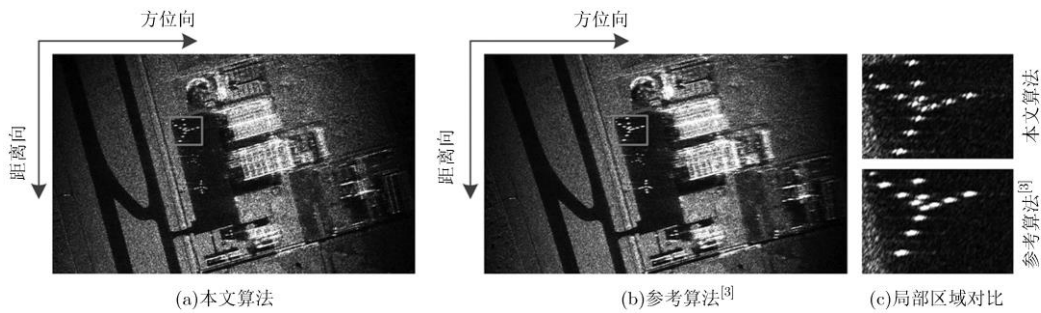


图9 实测数据处理结果对比

聚焦质量上相比具有显著提升，验证了所提算法的有效性。

参考文献

[1] CUMMING I G and FRANK H W. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data[M]. Washington DC: Artech House, 2005: 1-30.

[2] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 9.

[3] LIANG Y, LI Zhenyu, ZENG Letian, et al. A high-order phase correction approach for focusing HS-SAR small-aperture data of high-speed moving platforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(9): 4551-4561. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2459765.

[4] 李震宇, 陈溅来, 梁毅, 等. 带有多普勒中心空变校正的大斜视 SAR 成像方法[J]. *西安电子科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(3): 19-24. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.004.

- LI Zhenyu, CHEN Jianlai, LIANG Yi, *et al.* Imaging method for highly squinted SAR with spatially-variant Doppler centroid correction[J]. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2016, 43(3): 19–24. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2016.03.004.
- [5] LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* Focusing of highly squinted SAR data with frequency nonlinear chirp scaling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(1): 23–27. doi: 10.1109/LGRS.2015.2492681.
- [6] 怀园园, 梁毅, 李震宇, 等. 一种基于方位谱重采样的大斜视子孔径 SAR 成像改进 Omega-K 算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(7): 1743–1750. doi: 10.11999/JEIT141383.
- HUAI Yuanyuan, LIANG Yi, LI Zhenyu, *et al.* Modified Omega-K algorithm for sub-aperture high squint SAR imaging based on azimuth resampling[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1743–1750. doi: 10.11999/JEIT141383.
- [7] LIANG Yi, HUAI Yuanyuan, DING Jinshan, *et al.* A modified $\omega-k$ algorithm for HS-SAR small-aperture data imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(6): 3710–3721. doi: 10.1109/TGRS.2016.2525787.
- [8] LI Zhenyu, XING Mengdao, LIANG Yi, *et al.* A frequency-domain imaging algorithm for highly squinted SAR mounted on maneuvering platforms with nonlinear trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(7): 4023–4038. doi: 10.1109/TGRS.2016.2535391.
- [9] ZENG Tao, LI Yinghe, DING Zegang, *et al.* Subaperture approach based on azimuth-dependent range cell migration correction and azimuth focusing parameter equalization for maneuvering high-squint-mode SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(12): 6718–6734. doi: 10.1109/TGRS.2015.2447393.
- [10] LI Zhenyu, XING Mengdao, XING Wenjie, *et al.* A modified equivalent range model and wavenumber-domain imaging approach for high-resolution-high-squint SAR with curved trajectory[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3721–3734. doi: 10.1109/TGRS.2017.2678763.
- [11] LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* An improved range model and omega-K-based imaging algorithm for high-squint SAR with curved trajectory and constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(5): 656–660. doi: 10.1109/LGRS.2016.2533631.
- [12] 江淮, 陈思, 赵惠昌, 等. 一种弹载 SAR 子孔径成像算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(10): 2526–2530. doi: 10.11999/JEIT161337.
- JIANG Huai, CHEN Si, ZHAO Huichang, *et al.* Subaperture imaging algorithm for missile-borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2526–2530. doi: 10.11999/JEIT161337.
- [13] 李震宇, 梁毅, 邢孟道, 等. 弹载合成孔径雷达大斜视子孔径频域相位滤波成像算法[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(4): 953–960. doi: 10.11999/JEIT140618.
- LI Zhenyu, LIANG Yi, XING Mengdao, *et al.* A frequency phase filtering imaging algorithm for highly squint missile-borne synthetic aperture radar with subaperture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 953–960. doi: 10.11999/JEIT140618.
- [14] TANG Shiyang, ZHANG Linrang, GUO Ping, *et al.* An omega-K algorithm for highly squinted missile-borne SAR with constant acceleration[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1569–1573. doi: 10.1109/LGRS.2014.2301718.
- [15] SUN Guangcai, XING Mengdao, WANG Yong, *et al.* A 2-D space-variant chirp scaling algorithm based on the RCM equalization and subband synthesis to process geosynchronous SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4868–4880. doi: 10.1109/TGRS.2013.2285721.
- [16] NEO Y L, FRANK W, and CUMMING I G. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1): 93–96. doi: 10.1109/LGRS.2006.885862.
- 别博文: 男, 1991年生, 博士生, 研究方向为 SAR 成像.
- 孙路: 男, 1982年生, 副研究员, 研究方向为雷达信号处理.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和稀疏信号处理.
- 梁毅: 男, 1981年生, 副教授, 研究方向为 SAR 成像和实时信号处理.
- 孙光才: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为新体制雷达、雷达成像和动目标检测.