

# 一种大斜视 SAR 俯冲段频域相位滤波成像算法

李震宇, 梁毅, 邢孟道, 保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 大斜视 SAR 俯冲阶段的高速下降以及加速度等特点, 导致距离方位耦合严重, 方位平移不变性的假设不再成立, 无法得到精确的二维频谱, 给成像处理带来困难. 针对这些问题, 本文提出一种基于频域相位滤波处理的子孔径俯冲段成像算法. 采用级数反演(MSR)得到精确的二维频谱, 时域校正距离走动, 频域校正距离弯曲的方式实现距离和方位的二维解耦合, 最后在方位频域引入高次频域相位滤波因子校正调频率的空变并结合谱分析技术(SPECAN)实现信号方位频域聚焦. 整个算法只包含快速傅里叶变换(FFT)和复乘, 不涉及插值, 易于工程实现. 点目标仿真数据和机载实测数据处理验证了本文提出算法的有效性和实用性.

**关键词:** 大斜视 SAR; 子孔径; 俯冲段; 频域相位滤波; 级数反演; 谱分析

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)10-2014-08

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.020

## A Frequency Phase Filtering Imaging Algorithm for High-Squint SAR in Diving Movement

LI Zhen-yu, LIANG Yi, XING Meng-dao, BAO Zheng

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

**Abstract :** During the diving movement for highly squinted synthetic aperture radar (SAR), the echo is coupled greatly between azimuth and range, invariance in azimuth is not accurate, which are caused by high vertical velocity and acceleration, making SAR imaging difficult to process. Due to these issues, a frequency phase filtering algorithm (FPFA) is proposed. First, the accurate 2-D spectrum can be got via the method of series reversion (MSR), the range walk will be eliminated in the time domain and in the frequency domain the range curvature removed. Then, a frequency filtering phase is leaded into frequency domain in order to correct the dependence of the FM rates. At last, the signal is focused in the Doppler domain by Spectral Analysis technique (SPECAN). As the whole procedure only involves short fast Fourier transforms (FFTs) and complex multiplications without interpolation, the FPFA is computationally efficient and facilitates hardware real-time implementation. The simulated results and raw data processing validate the effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words :** high squint SAR; subaperture; diving movement; FPFA; MSR; SPECAN

## 1 引言

近年来, SAR 成像与高速机动平台相结合并运用于制导技术成为研究热点. SAR 将所获取的地面场景信息与自带的电子图像进行匹配, 进而计算出载体所在的位置, 及时修正自身位置, 从而提高制导精度<sup>[1]</sup>. SAR 为保证平台具有一定的转弯机动时间, 一般需要在大前斜视的情况下成像. 另一方面, 高速机动平台 SAR 天线尺寸通常较小, 其全孔径方位分辨率一般远高于匹配参考图, 为了保证后续景象匹配等一系列处理正常进行, 通常成像算法不宜太过复杂, 可在适当损失分辨率的代价

下仅使用部分孔径数据进行相干处理, 尽可能简化处理流程、减小运动补偿复杂度以及计算量等, 以实现快视成像. 因此, 对于采用子孔径的大斜视 SAR 成像研究具有重要意义<sup>[2,3]</sup>.

在下降阶段, 机动平台的高速俯冲以及较大的加速度, 其运动轨迹为曲线型, 使得 SAR 的回波信号频谱的推导存在很大的困难. 当存在加速度时, 其斜距表达式中含有慢时间的四次项, 直接使用驻定相位原理需要求解六次方程, 运算量大. 传统的机载 SAR 成像算法在二维频谱的推导中均对斜距方程做了不同程度的近似, 文献[4,5]给出运用级数反演<sup>[6]</sup>方法, 通过斜距的高阶近

似式来推导二维频谱,但文中均采用正侧视模型.针对大斜视算法,文献[7]提出一种扩展 NCS,在一定程度上解决了大斜视中调频率空变问题;文献[8]在文献[7]的基础上进一步修正了 ENCS 操作精度,扩展了大斜视方位幅宽;然而两者均是针对全孔径处理的,无法直接应用于子孔径上;文献[9]给出一种 FNCS 方法解决了窄带波束下的大斜视子孔径问题,但是其方位幅宽受限.针对俯冲段成像,文献[10,11]给出了一种基于方位非线性变标的下降段成像算法,但是由于是全孔径成像,实时处理效率低,且所提算法仅适用于低斜视角以及较小的成像场景;文献[12]给出一种直线的俯冲模型,考虑了偏航速度,而在实际处理过程中,可以将偏航速度和水平航线速度的合速度作为新模型的水平速度从而简化模型,且文献中未考虑加速度.

考虑到实时处理以及实际情况,本文提出适用于子孔径俯冲段成像的算法—频域相位滤波算法(FP-FA),运用级数反演推导高近似度的二维频谱,距离频域方位时域校正距离走动,二维频域校正弯曲;最终在方位频域引入高次频域相位滤波因子校正调频率的空变并结合谱分析技术实现信号方位频域聚焦.点目标仿真数据和机载实测数据处理验证了本文提出算法的有效性和实用性.

## 2 俯冲段成像模型

俯冲段的成像几何模型如图 1 所示,载体沿着轨迹 ABC 做加速曲线运动.用  $t_m$  表示方位慢时间,假设在  $t_m = 0$  时刻,载体位于 B,高度为  $H$ ;在该时刻载体沿水平方向速度为  $v_x$ ,加速度  $a_x$ ,下降速度为  $v_z$ ,加速度为  $a_z$ ;为简化模型:令沿  $Y$  轴的速度和加速度分量均为零.定义水平速度方向与波束射线指向的斜视角的余角为  $\theta$ ,则目标点  $P$  的瞬时斜距表达式为:

$$R(t_m) = \sqrt{\left(v_x t_m + \frac{1}{2} a_x t_m^2 - X_n - R_0 \sin \theta\right)^2 + \left(v_z t_m + \frac{1}{2} a_z t_m^2 + H\right)^2 + \left((R_0 \cos \theta)^2 - H^2\right)} \quad (1)$$

式(1)中根号下主要可分为三项:第一项是由水平

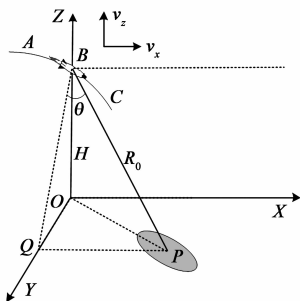


图1 俯冲段成像几何模型

方向的速度和加速度引起的,如果速度在水平方向上是恒定的,这部分与理想的前斜视是一致的;第二项是由下降的位移引起的,第三项为常数项.但由于这三项是在根号下,相互耦合在一起的,它们相互影响,从式(1)可以看出下降速度和加速度是影响下降段成像质量的关键因素.

## 3 信号分析及距离向处理

假设雷达发射信号为线性调频(LFM)信号,则基频回波可以写为

$$S_0(t; t_m) = w_r \left( t - \frac{2R(t_m)}{c} \right) w_a(t_m) \cdot \exp \left( j\pi \gamma \left( t - \frac{2R(t_m)}{c} \right)^2 \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) \right) \quad (2)$$

其中,  $c$  为光速,  $t$  为快时间,  $\gamma$  为发射信号的调频率,  $\lambda$  为雷达中心波长,  $w_r(\cdot)$  表示发射信号的窗函数,  $w_a(\cdot)$  表示方位窗函数.对式(2)作距离向傅里叶变换,将其变换到距离频域为

$$S_s(f_r, t_m) = W_r(f_r) w_a(t_m) \cdot \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_m) \right) \quad (3)$$

其中,  $f_r$  为距离频率,  $f_c$  为雷达中心载频,  $W_r(\cdot)$  为距离窗函数的频域形式.

由于下降速度和斜视角的存在使得距离向与方位向存在很大程度的耦合,为了消除这个包络线性徙动分量,对式(3)的 SAR 回波信号做线性走动校正,即对式(1)在  $t_m = 0$  处做泰勒展开,其慢时间一次项系数为

$$A = -v_x \sin \theta + \frac{v_z H}{R_X} \quad (4)$$

式中  $R_X = \sqrt{R_0^2 + 2R_0 \sin \theta X_n + X_n^2}$ .通常以场景中心为基准做线性走动校正,由上式易知走动校正因子为

$$H_{RWC}(f_r, t_m) = \exp \left( -j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} \left( v_x \sin \theta - \frac{H v_z}{R_S} \right) t_m \right) \quad (5)$$

其中  $R_S$  为  $t_m = 0$  时刻地面波束中心到载体的距离,校正走完走动后的斜距式可写为

$$R_1(t_m) \approx R_X + b_1 t_m + b_2 t_m^2 + b_3 t_m^3 + b_4 t_m^4 \cdots \quad (6)$$

下面运用级数反演来推导二维频谱<sup>[5,10]</sup>,则任意一点 SAR 回波信号的二维频谱高阶近似式

$$SS(f_r, f_a) = W_r(f_r) W_a(f_a) \exp \left( -j\pi \frac{f_r^2}{\gamma} \right) \exp(j\Phi) \quad (7)$$

其中

$$\Phi = -4\pi \frac{R_X}{c} (f_r + f_c) + \pi \frac{c}{4b_2(f_r + f_c)} \left( f_a + (f_r + f_c) \frac{2b_1}{c} \right)^2$$

$$\begin{aligned}
& + \pi \frac{c^2 b_3}{16 b_2^3 (f_r + f_c)^2} \left( f_a + (f_r + f_c) \frac{2b_1}{c} \right)^3 \\
& + \pi \frac{c^3 (9b_3^2 - 4b_2 b_4)}{256 b_2^5} \frac{1}{(f_r + f_c)^3} \left( f_a + (f_r + f_c) \frac{2b_1}{c} \right)^4
\end{aligned} \quad (8)$$

式(8)中  $f_a$  为多普勒频率,式(7)中第一个相位为距离向的调制项,式(8)中由于  $f_a$  的 4 阶以上的高次项影响远小于  $\pi/4$ ,因此保留到 4 阶及以下;由于式(8)距离频率与多普勒频率相互耦合,不利于后续处理,因此在  $f_r = 0$  处作泰勒展开,并整理成如下形式

$$\begin{aligned}
\Phi \approx & \varphi_c + \varphi_0(f_a; R_0) + \varphi_1(f_a; R_0) f_r \\
& + \varphi_2(f_a; R_0) f_r^2 + \varphi_3(f_a; R_0) f_r^3
\end{aligned} \quad (9)$$

其中,第一项为常数项,对成像处理没有影响;第二项为方位向调制项;第三项为距离徙动项;第四项为二次距离压缩项;第五项为距离项与方位向耦合的高次项.通常以场景中心  $R_0 = R_s$ ,  $X_n = 0$  为基准作距离徙动校正、二次压缩以及高阶耦合项的补偿,对于距离向场景幅宽较大的,可以对距离向分段处理,取每段的场景中心为基准.补偿因子为

$$\begin{aligned}
H_{RCM}(f_r, f_a) \\
= \exp(-j(\varphi_1(f_a; R_0) f_r + \varphi_2(f_a; R_0) f_r^2 + \varphi_3(f_a; R_0) f_r^3))
\end{aligned} \quad (10)$$

至此,距离向的操作已完成;下面主要讨论由时域线性走动校正所带来的方位向相位空变问题以及引入方位高次频域相位滤波因子来校正相位空变等.

#### 4 方位向处理及算法流程

校正距离徙动、距离压缩以及二次压缩后并忽略常数项的信号在距离-多普勒域形式可写为

$$sS(t; f_a) = \text{sinc} \left\{ B_r \left( t - \frac{2R_X}{c} \right) \right\} W_a(f_a) \exp(j\varphi_0(f_a; R_0)) \quad (11)$$

其中

$$\begin{aligned}
\varphi_0(f_a; R_0) = & 2\pi \left[ \frac{b_1}{2b_2} + \frac{3b_1^2 b_3}{8b_2^3} + \frac{b_1^3 (9b_3^2 - 4b_2 b_4)}{16b_2^5} \right] f_a \\
& + 2\pi \lambda \left[ \frac{1}{8b_2} + \frac{3b_1 b_3}{16b_2^3} + \frac{3b_1^3 (9b_3^2 - 4b_2 b_4)}{64b_2^5} \right] f_a^2 \\
& + 2\pi \lambda^2 \left[ \frac{b_3}{32b_2^3} + \frac{9b_1 (b_3^2 - 4b_2 b_4)}{64b_2^5} \right] f_a^3 \\
& + 2\pi \lambda^3 \left[ \frac{9b_3^2 - 4b_2 b_4}{512b_2^5} \right] f_a^4
\end{aligned} \quad (12)$$

式(12)中第一项为  $f_a$  的线性项反映目标点经方位聚焦后所处的方位位置;用  $-\Delta t$  来表示一次项的系数,并在  $X_n = 0$  处对  $\Delta t$  作一阶泰勒展开得

$$\Delta t \approx \Delta t_0 + \rho X_n \quad (13)$$

式中  $\Delta t_0 = \Delta t|_{X_n=0}$ ,  $\rho = \frac{d\Delta t}{dX_n}|_{X_n=0}$ ;为了真实反映目标点的方位位置,需要通过几何形变校正来消除  $\rho X_n$  对成像的影响,使得  $\Delta t = -X_n/v_x$ . 式(12)等号右边  $f_a$  的四次项通常可忽略随着方位位置  $X_n$  的变化,因此直接以方位位置中心处  $X_n = 0$  为参考构造  $f_a$  的四次相位滤波和补偿三次相位的非空变相位;但是对于  $f_a$  的二次项和三次项的空变项,令

$$\begin{cases} k_{xn} = \lambda \left[ \frac{1}{8b_2} + \frac{3b_1 b_3}{16b_2^3} + \frac{3b_1^3 (9b_3^2 - 4b_2 b_4)}{64b_2^5} \right] = -\frac{1}{2k_{az}} \\ k_{in} = 2\lambda^2 \left[ \frac{b_3}{32b_2^3} + \frac{9b_1 (b_3^2 - 4b_2 b_4)}{64b_2^5} \right] \approx k_{ic} + k_{ix} X_n \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中  $k_{az}$  表示位于距离单元  $R_X$  处的多普勒调频率,  $k_{ic}$  为三次相位非空变项可直接补偿,  $k_{ix} X_n$  为三次相位空变项;回波经过距离徙动校正和距离压缩处理后,原位于  $(R_0, X_n)$  的目标点处于  $R_X$  距离单元处;同一距离单元  $R_X$  处的不同方位点的多普勒调频率随着方位位置的变化而剧烈变化,即调频率空变;若仍以方位中心  $X_n = 0$  来构造匹配函数,会导致场景边缘点严重散焦,这就是聚焦深度的本质.因此,在构造方位匹配函数之前,需通过频域相位滤波补偿调频率随着方位位置的变化,改善聚焦深度和成像效果.

由式(14)可知,方位调频率是方位位置的函数,这样不同方位位置点对应的时频分布线斜率就会发生变化(以三点为例,如图 2(a)所示,三点所对应的时频分布线斜率不同),造成方位无法统一聚焦处理.由于采用部分孔径进行 SAR 成像,场景中各点数据支撑区在时域是重叠在一起的,对应的时频分布线在时间轴的投影也是重叠在一起的,因此无法将各点的时频分布线斜率修正成一样;而在将数据变换到频域后,相当于时频翻转,则频域的相位-频率变化率曲线是错开的(如图 2(c)所示);因此可以想到在频域通过叠加另一个高次相位的相位-频率变化率曲线,将频域原先错开、具有不同形状的相位-频率变化率曲线修正成一样,进而能够进行统一的方位聚焦处理,如图 2(c)所示.

然而,在构造高次频域相位滤波因子校正调频率空变还需要知道  $k_{az}$  与  $X_n$  之间的关系式以及  $k_{az}$  与  $\Delta t$  之间的关系式.由式(14)可得调频率  $k_{az}$ ,为得到更为精准的调频率空变项,以  $X_n = 0$  对调频率作二阶泰勒近似展开得

$$\begin{cases} k_{az} \approx k_{az0} + k_s X_n + k_T X_n^2 \approx k_{az0} + k_a \Delta t + k_v \Delta t^2 \\ k_{ix} X_n \approx k_{il} \Delta t \end{cases} \quad (15)$$

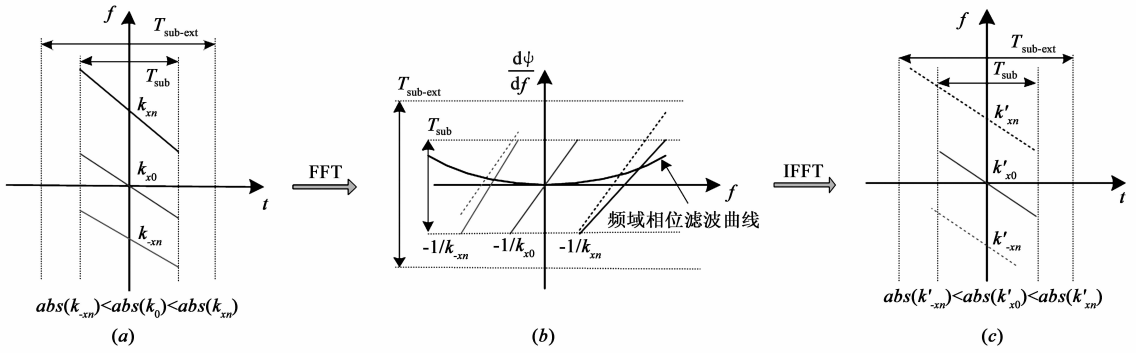


图2 调频率由空变到非空变校正示意图

式中  $k_{az0} = k_{az}|_{X_n=0}$ ,  $k_s = \frac{dk_{az}}{dX_n}|_{X_n=0}$ ,  $k_T = \frac{1}{2} \frac{d^2 k_{az}}{dX_n^2}|_{X_n=0}$  分别对应  $K_{az}$  展开的常数项、一阶系数和二阶系数; 其中  $k_a = \frac{dk_{az}}{d\Delta t} = \frac{dk_{az}}{\rho dX_n} = \frac{1}{\rho} k_s$ ,  $k_v = \frac{1}{2} \frac{d^2 k_{az}}{d\Delta t^2} = \frac{1}{\rho^2} k_T$ . 对式(11)在补偿完方位向三次、四次相位后(补偿因子为式(16)), 剩余的方位向相位可写为式(17).

$$H_{\text{High}}(f_a; R_0) = \exp\left(-j\pi k_{ic} f_a^3 - j2\pi\lambda^3 \left[\frac{9b_3^2 - 4b_2b_4}{512b_5^2}\right] f_a^4\right) \quad (16)$$

$$\varphi_0(f_a; R_0) = -2\pi\Delta t f_a - \pi \frac{1}{k_{az}} f_a^2 + \pi k_{il} \Delta t f_a^3 \quad (17)$$

为了校正调频率随着方位位置的变化量,即消除  $k_s X_n$  和  $k_T X_n^2$ , 需在方位频域引入频域相位滤波因子

$$H_{\text{filter}} = \exp(j\pi q f_a^3 + j\pi p f_a^4) \quad (18)$$

式中  $q, p$  为待定量. 将式(18)与式(17)相乘并将式(15)代入后变到方位时域得

$$\begin{aligned} \Phi(t_m; R_0, x_n) \approx & A(t_m, t_m^2, t_m^3, t_m^4, R_0, p, q) \\ & + B(R_0, p, q) X_n t_m + C(R_0, p, q) X_n^2 t_m \\ & + D(R_0, p, q) X_n t_m^2 + E(R_0, p, q) X_n^2 t_m^2 \\ & + F(R_0, p, q, X_n, X_n^2, X_n^3, X_n^4) \end{aligned} \quad (19)$$

对式(19)的各个相位进行分析: 第一项为  $t_m$  的高次项与  $\Delta t$  无关, 用于方位匹配滤波;  $B, C$  为  $t_m$  的线性项, 反映目标点的方位位置信息, 这部分存在着一定的形变, 需在后续投影处理中校正这部分形变<sup>[13~16]</sup>;  $D, E$  所对应的相位为空变项, 需要消除的; 最后一项是与  $t_m$  无关的项, 这部分不影响成像.

为消除空变的方位调制项, 令  $D(R_0, p, q) = 0$ ,  $E(R_0, p, q) = 0$ , 即建立如下方程组

$$\begin{cases} D(R_0, p, q) = 0 \\ E(R_0, p, q) = 0 \end{cases} \quad (20)$$

求解该方程组, 可以得到

$$\begin{cases} p = \frac{k_a}{3k_{az0}^3} \\ q = \frac{3k_{il}k_{az0} + 3k_a^2 - k_{az0}k_v}{6k_{az0}^5} \end{cases} \quad (21)$$

由于相位因子的引入, 最终在式(19)中包含有  $t_m$  的高次项; 补偿高次残留项并对信号乘以方位 Deramp 函数, 并作方位 FFT, 可以得到聚焦后的两维图像. 其中相应的补偿函数和 Deramp 参考函数为

$$\begin{aligned} H_{azi}(t_m; R_0) = & \exp\left(-j\pi k_{az0} t_m^2 - j\pi \frac{k_a}{3} t_m^3 + j\pi \frac{3k_{il}k_{az0} + 3k_a^2 - k_{az0}k_v}{6k_{az0}} t_m^4\right) \end{aligned} \quad (22)$$

综上所述, 算法的详细流程图如图 3 所示.

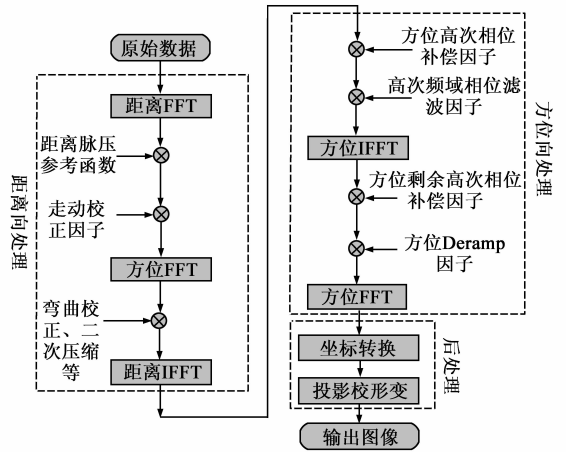


图3 俯冲段子孔径成像算法流程

上述算法主要由 3 部分组成: 距离向处理、方位向处理以及形变校正后处理. 距离向处理包括距离脉压、距离走动校正、距离弯曲校正和二次距离脉压. 方位向处理包括高次相位补偿、频域相位滤波处理、残余相位补偿和方位 SPECAN 处理. 几何校正完成成像的斜地投影转换以及几何形变校正处理. 从图 3 的整个处理流程图可以看出, 本文提出的子孔径成像算法只包含复乘和 FFT 运算, 不涉及插值处理, 因此易于工程实现.

5 仿真结果与实测数据处理

为验证算法的有效性,采用表 1 雷达参数进行点目标仿真验证,成像几何和坐标定义如图 1 所示.在地面垂直于雷达视线方向布一  $3 \times 3$  矩形点阵,大小为  $3\text{km} \times 1\text{km}$ ;点 1 和点 3 为方位空变最剧烈的边缘点,点 2 为场景中心点作为对比参考,如图 4 所示.

表 1 雷达系统参数

信号带宽	80MHz
水平方向速度	1000m/s
铅垂速度	-400m/s
水平加速度	50 m/s <sup>2</sup>
铅垂加速度	-50 m/s <sup>2</sup>
PRF	4kHz
作用距离	30km
高度	8km
斜视角	70°

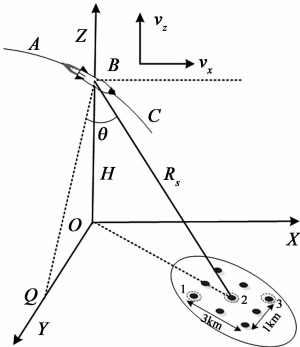


图4 仿真点阵几何示意图

文献[4,7]等只补偿了调频率一阶空变即只消除  $k_s X_n$  而未考虑二阶空变项  $k_T X_n^2$  给方位聚焦深度带来的影响.本文算法考虑到二阶空变项对方位向边缘点的聚焦.图 5 给出了未考虑调频率空变情况下边缘点的方位脉冲响应剖面图,容易看出边缘点 1 和点 3 已经严重散焦.图 6 给出了传统方法只考虑一阶空变的情况下三点的成像效果,可以看出点目标能够聚焦,但是第一零点过高,明显有偶次项未被补偿,成像质量较差.图 7 为本文所述算法成像效果,补偿了调频率的一阶和二阶空变;与图 6 相比,第一零点明显下降,成像质量显著提高,说明本文所述算法改善了方位聚焦性能、扩大方位聚焦深度.图 8 给出本文方法点目标所对应的二维插值图,图中主副瓣明显分开,聚焦性能良好,说明本文方

法的可行性和有效性.

为评估本文提出算法的性能,计算点目标 1、2、3 的分辨率、峰值旁瓣比、积分旁瓣比指标参数如表 2 所示,可以看出,传统方法所得指标与理论值(方位分辨率 2m,峰值旁瓣比 -13.26dB,积分旁瓣比 -9.8dB)有着一定的偏差;分辨率、峰值旁瓣比以及积分旁瓣比都较差,而本文方法所得性能指标参数与理论值基本吻合.

表 2 成像性能分析

点目标	性能指标	P1		P2		P3	
		理论值	传统方法	本文方法	传统方法	本文方法	传统方法
方位分辨率/m	2	3.17	2.10	2.1	2.06	3.13	2.10
峰值旁瓣比/dB	-13.26	-9.89	-13.21	-13.26	-13.26	-10.13	-13.23
积分旁瓣比/dB	-9.8	-6.87	-9.60	-9.67	-9.68	-7.32	-9.63

为进一步验证算法的有效性,采用本文算法对某机载俯冲段实测数据进行处理,雷达系统工作在 Ku 波段,发射信号带宽为 80MHz,斜视角为 60°,作用距离约 17km,场景大小为  $3\text{km} \times 1\text{km}$ (沿雷达视线方向和垂直于雷达视线方向),分辨率为  $3\text{m} \times 3\text{m}$ .图 9(a)为实测数据成像结果,整个场景地貌特征明显,聚焦效果良好;采用方位向不同处理方法,并选取方位向边界处作为对比比较(矩形虚线框),图 9(b)(c)(d)分别给出了不同的处理结果,其中图 9(b)未校正调频率空变,可以看出其方位向边缘处的点已经严重散焦;图 9(c)为传统方法的结果,其成像质量较图 9(b)已有明显提高,但是聚焦效果仍然较差;图 9(d)给出本文方法成像结果,可以看出图 9(d)中边缘点成像聚焦效果比图 9(c)有着显著地提升,验证了本文算法的有效性.

6 结束语

本文研究了基于子孔径的大斜视俯冲段成像问题,提出了一种基于频域相位滤波的子孔径成像方法.首先分析了大斜视 SAR 俯冲段成像几何模型,采用级数反演得到精准的二维频谱.针对距离向处理,采用时域校正走动、二维频域校正弯曲.针对方位向处理,考虑到采用部分孔径数据进行成像,为了实现空变补偿与聚焦,提出一种基于频域相位滤波的方位处理方法,其创新思想是通过频域引入相位滤波因子,来校正时域调频率随方位位置的一阶和二阶空变特性.最后基于 SPECAN 处理实现方位的聚焦成像.整个算法只包含复乘和 FFT 运算,不涉及插值处理,易于工程实现.点目标仿真数据和机载实测数据处理验证了本文提出算法的有效性和实用性.

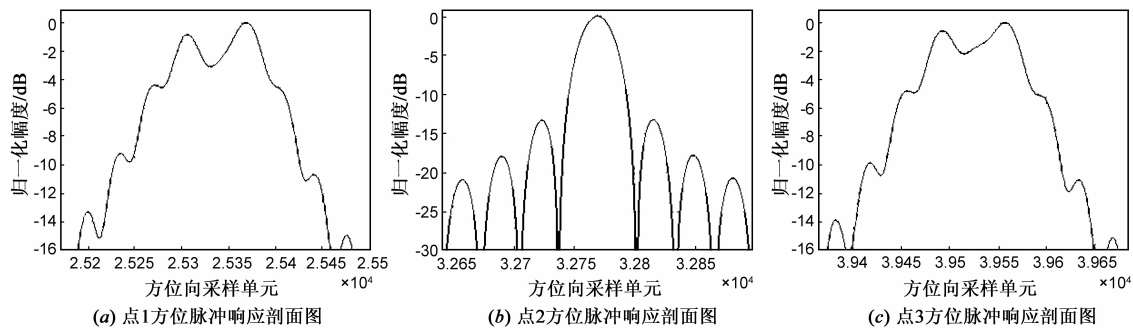


图5 未考虑调频率空变时成像效果

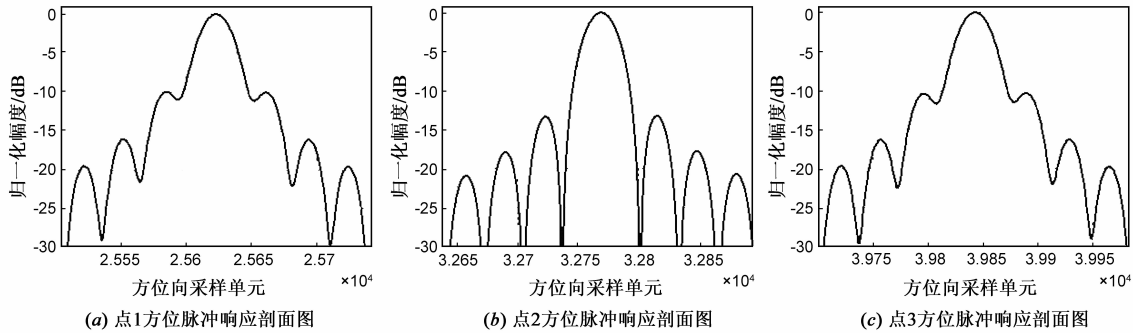


图6 传统方法成像效果

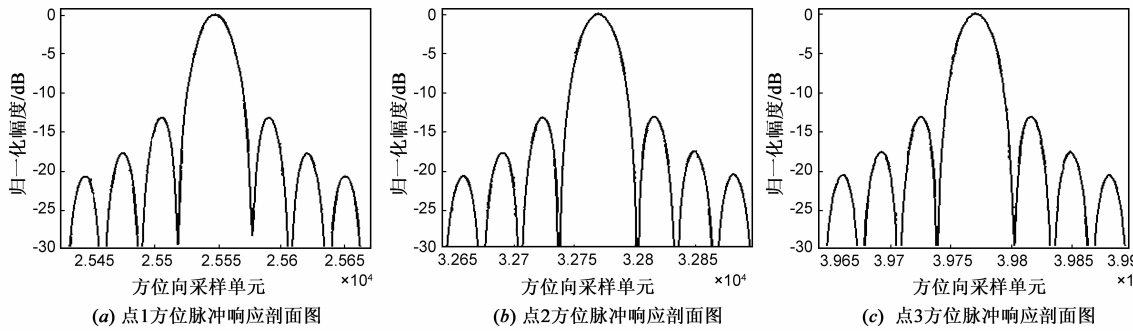


图7 本文算法成像方位剖面图

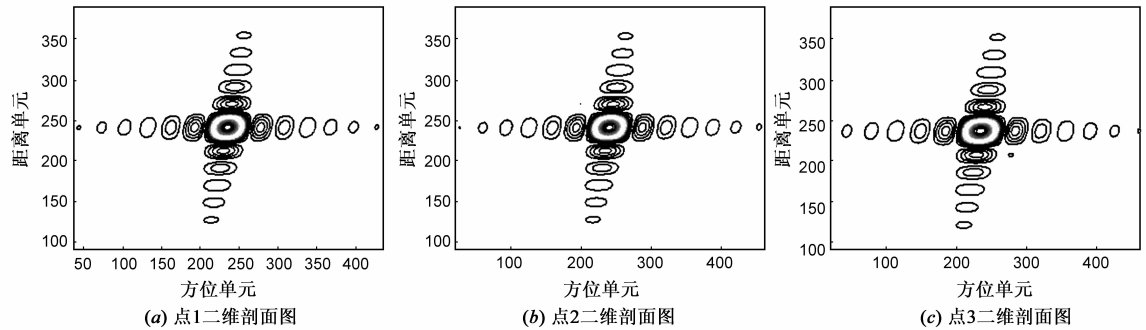


图8 本文算法成像二维剖面图

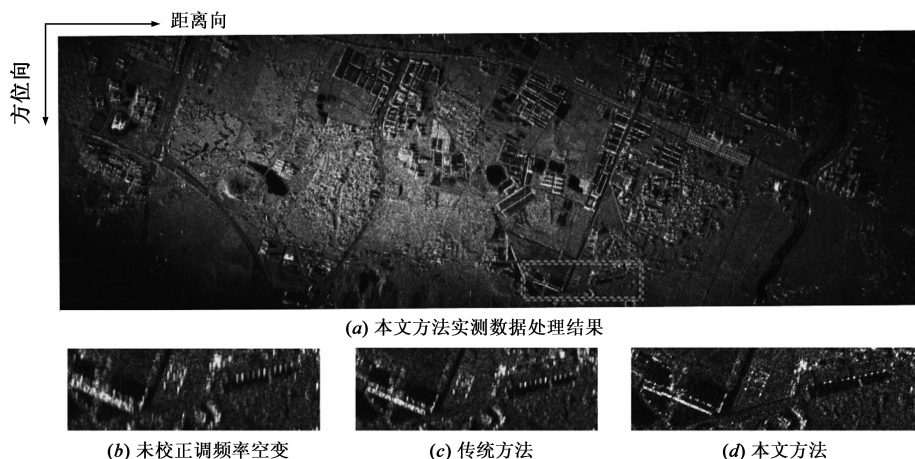


图9 机载俯冲段子孔径实测数据结果

## 参考文献

- [1] 秦玉亮, 黄宗辉, 邓彬. INS/双天线弹载 SAR 组合弹体定位技术[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1216 – 1221.  
Qin Yu-liang, Huang Zong-hui, Deng Bin. Missile geo location using INS and dual-antenna missile-borne SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1216 – 1221. (in Chinese)
- [2] 梁毅, 郭亮, 邢孟道, 保铮. 一种斜视 FMCW SAR 的等效正侧视处理方法[J]. 电子学报, 2009, 37(6): 1159 – 1164.  
Liang Yi, Guo Liang, Xing Meng-dao, Bao Zheng. An equivalent side-looking method for squint FMCW SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(6): 1159 – 1164. (in Chinese)
- [3] 左伟华, 皮亦鸣, 闵锐. 大斜视机载聚束 SAR 时域校正距离走动的频率尺度成像算法[J]. 电子学报, 2013, 41(9): 1716 – 1723.  
Zuo Wei-hua, Pi Yi-ming, Min Rui. Improved frequency scaling algorithm based on the range walk correction in time domain for high squint spotlight airborne SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(9): 1716 – 1723. (in Chinese)
- [4] 易予生, 张林让, 刘楠, 等. 基于级数反演的俯冲加速运动状态弹载 SAR 成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(12): 2863 – 2866.  
Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu nan, et al. Imaging algorithm for missile-borne SAR with diving acceleration based on series reversion[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(12): 2863 – 2866. (in Chinese)
- [5] 周鹏, 周松, 熊涛, 等. 基于级数反演的弹载 SAR 下降段 CZT 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(12): 2861 – 2867.  
Zhou Peng, Zhou Song, Xiong Tao, et al. A chirp-z imaging algorithm for missile-borne SAR with diving maneuver based on the method of series reversion[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(12): 2861 – 2867. (in Chinese)
- [6] Yew L N, Frank Wong, Ian G Cumming. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion[J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2007, 4(1): 93 – 96.
- [7] Sun G C, Jiang X W, Xing M D. Focus improvement of highly squinted data based on azimuth nonlinear scaling[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2011, 49(6): 2308 – 2322.
- [8] Dao-xiang An, Xiao-tao Huang, Tian Jin. Extended nonlinear chirp scaling algorithm for high-resolution highly squint SAR data focusing[J]. IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing, 2012, 50(9): 3595 – 3609.
- [9] 杨军, 吴玉峰, 孙光才, 邢孟道, 等. 基于方位 FNCS 的斜视 TOPS SAR 成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(11): 2237 – 2243.  
Yang Jun, Wu Yu-feng, Sun Guang-cai, Xing Meng-dao, et al. Squint TOPS SAR imaging method based on azimuth FNCS[J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(11): 2237 – 2243. (in Chinese)
- [10] 周松, 包敏, 周鹏, 等. 基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(6): 1420 – 1426.  
Zhou Song, Bao Ming, Zhou peng, et al. Imaging algorithm for missile-borne SAR with downward movement based on azimuth nonlinear chirp scaling[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(6): 1420 – 1426. (in Chinese)
- [11] 周松, 杨磊, 周鹏, 等. 基于双曲线修正斜距模型的弹载 SAR 成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1168 – 1176.  
Zhou Song, Yang lei, Zhou peng, et al. Imaging method for missile-borne SAR based on model of hyperbolic slant range with linear modilying[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(6): 1168 – 1176. (in Chinese)

- [12] 肖忠源,徐华平,李春生.基于俯冲模型的频域距离走动校正 NLCS-SAR 成像算法[J].电子与信息学报,2013,35(5):1090–1096.  
Xiao Zhong-yuan, Xu Hua-ping, Li Chun-sheng. NLCS-SAR imaging algorithm with range walk correction in frequency domain based on dive model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(5): 1090–1096. (in Chinese)
- [13] 俞根苗,尚勇,邓海涛,等.弹载侧视合成孔径雷达信号分析及成像研究[J].电子学报,2005,33(5):778–782.  
Yu Gen-miao, Shang Yong, Deng Hai-tao, et al. Signal analysis and imaging processing of missile-borne side-looking SAR [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(5): 778–782. (in Chinese)
- [14] 俞根苗,等.弹载 SAR 图像几何失真校正方法[J].西电

学报,2006,33(3):386–389.

Yu Gen-miao, et al. Method for geometric distortion correction of missile-borne SAR[J]. Journal of Xidian University, 2006, 33(3): 386–389. (in Chinese)

- [15] T Long, Y Li, Z Ding, L Liu. Interpolation method for geometric correction in highlysquint synthetic aperture radar[J]. IET Radar Sonar Navig, 2012, 7(6): 620–626.
- [16] 李学仕,梁毅,李蓓蕾,等.基于 SPECAN 处理的斜视 SAR 实时成像算法及其 FPGA 实现[J].系统工程与电子技术,2011,33(12):2618–2622.  
Li Xue-shi, Liang Yi, Li Bei-lei, et al. Real-time imaging algorithm for squint SAR based on SPECAN processing and its implementation in FPGA[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(12): 2618–2622. (in Chinese)

## 作者简介



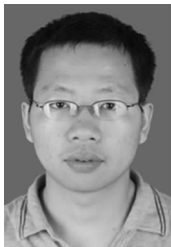
**李震宇** 男,1991年5月出生于安徽六安.2008年就读于西安电子科技大学,2012年获学士学位,现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在读博士研究生,主要研究方向:雷达成像.

E-mail: zhenyuli\_2012@sina.com



**邢孟道** 男,1975年11月出生于浙江嵊州,西安电子科技大学教授、博士生导师,主要研究方向为雷达成像、动目标检测.

E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn



**梁毅** 男,1981年12月生于陕西咸阳,西安电子科技大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为雷达成像、动目标检测以及雷达信号实时处理.

E-mail: yliang@xidian.edu.cn



**保铮** 男,1927年12月生于江苏省南通市,教授、博士生导师、中国科学院院士、中国电子学会会士,主要研究方向为雷达信号处理.