

基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法

周松* 包敏 周鹏 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 西安 710071)

摘要: 俯冲下降阶段, 弹体自身较大的俯冲下降速度和加速度导致 SAR 回波信号方位不变性的假设不再成立, 给 SAR 成像处理带来困难。针对该问题, 该文提出了一种基于方位非线性变标的弹载 SAR 下降段成像算法。结合级数反演, 在 2 维频域完成距离徙动校正和距离脉冲压缩之后, 通过方位向上的非线性变标操作, 补偿空变的多普勒调频率, 从而较为有效地改善了方位聚焦深度和聚焦质量。数据仿真验证了算法的有效性。

关键词: 弹载 SAR; 级数反演; 非线性变标

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1420-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01124

An Imaging Algorithm for Missile-borne SAR with Downward Movement Based on Azimuth Nonlinear Chirp Scaling

Zhou Song Bao Min Zhou Peng Xing Meng-dao Bao Zheng
(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: During the downward movement for missile-borne SAR, the assumption that echo signal invariance in azimuth is not accurate, which is caused by high vertical velocity and acceleration, making SAR imaging difficult to process. Due to this reason above, by using azimuth NonLinear Chirp Scaling (NLCS), an imaging algorithm for missile-borne SAR is proposed in this paper. After range cell migration correction and range compression in the 2-D frequency domain, via the Method of Series Reversion (MSR), azimuth variation of Doppler FM rates for echo signal can be compensated with the operation of azimuth nonlinear chirp scaling, which effectively improves focusing depth and focusing effect. Simulation results are provided to validate the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: Missile-borne SAR; Method of Series Reversion (MSR); NonLinear Chirp Scaling (NLCS)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)成像具有光学成像所不具备的全天时、全天候以及远作用距离的特点, 将 SAR 成像与精确制导技术相结合已成为近年来的研究热点^[1]。弹载条件下, SAR 导引头通过获取包含特征地貌的微波图像, 将其与数据库中存储的基准图像进行匹配, 从而由几何关系解算出弹体位置坐标, 达到修正 INS 累积误差、提高制导精度的目的^[2]。

俯冲下降阶段, 弹体复杂的运动状态使得 SAR 回波信号不再满足方位不变性的假设, 常规机载 SAR 成像方法往往不能直接应用于弹载 SAR。文献[3]探讨了弹载侧视 SAR 成像的可能性, 在分辨率要求不高的条件下, 通过分子孔径处理, 得到了良好的聚焦图像。文献[4]提出了一种俯冲加速平台下的

SAR 成像算法, 通过频谱拟合获得了较理想的聚焦效果。文献[5,6]分别提出了适用于曲线弹道的 CA-ECS 算法和 RD 算法, 算法具有较高的运算效率, 而在弹道倾角较大的条件下, 边缘点成像质量下降明显。文献[7]结合级数反演提出的弹载 SAR 全孔径成像方法, 有效提高了方位分辨率, 而方位成像范围仍受限制。本文针对弹载 SAR 下降段成像, 提出了一种基于方位非线性变标的新算法。

非线性变标(NLCS)算法由 Davidson 等人^[8]于 1996 年提出, 该算法最早用于二次距离压缩处理, 既考虑了二次距离压缩的调频率随多普勒频率的变化, 也考虑了其随距离的线性变化, 从而使非线性变标算法处理斜视 SAR 数据的能力大大提高。随后, Wong 等人^[9]将改进的非线性变标算法用于双基 SAR 成像处理中, 用以解决距离徙动校正后的多普勒调频率空变。在俯冲下降阶段, 弹体自身复杂的运动形式使得 SAR 回波信号的多普勒调频率变化较为剧烈, 如不进行补偿, 方位边缘点处将发生严

2010-10-20 收到, 2011-01-21 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和国家 973 计划项目(2010CB731903)资助课题

*通信作者: 周松 zhousong8411@sina.com

重的散焦；在方位向引入非线性变标操作，能够较好地补偿多普勒调频率沿方位向的变化，从而有效提高聚焦深度和聚焦质量。

针对弹体俯冲下降阶段的运动形式，本文首先建立了弹载SAR下降段回波信号模型，随后利用级数反演给出了SAR回波信号的2维频谱高阶近似式，详细分析了由弹体俯冲下降速度和加速度引入的信号多普勒调频率沿方位变化的问题；结合级数反演，在2维频域完成距离徙动校正和距离压缩之后，提出了在方位向上采用非线性变标操作补偿空变多普勒调频率，从而改善方位聚焦深度和聚焦质量的方法。本文的最后，通过点阵目标仿真和场景目标仿真，验证了所述算法的有效性。

2 弹载SAR下降段信号模型

弹载SAR下降段成像几何模型如图1所示。俯冲下降阶段，弹体沿弹道ABC做匀加速曲线运动。用 τ 表示距离向时间， η 表示方位向时间，假设在方位时间 $\eta=0$ 时刻，弹体位于位置B，高度为 h_0 ，并且在该时刻，弹体沿X轴的速度分量为 V_X ，沿X轴的加速度分量为 a_X ，沿Y轴的速度分量为 V_Y ，沿Y轴的加速度分量为 a_Y ，沿Z轴的速度分量和加速度分量都为零。定义弹载SAR下降段斜视角 θ_s 为： $\eta=0$ 时刻水平速度分量 V_X 与波束中心线BP夹角的余角。对于地平面上任意一点P，其斜距历程用 $R(\eta)$ 表示。不考虑回波信号强度随距离的变化，地平面上任意一点的SAR回波信号可表示为

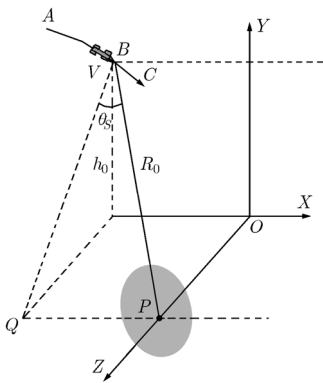


图1 弹载SAR下降段成像几何模型

$$S(\tau, \eta) = p_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] w_{az}(\eta) \exp \left[-j4\pi \frac{R(\eta)}{\lambda} \right] \quad (1)$$

式中 c 为光速， λ 为波长， $p_r(\bullet)$ 表示距离向信号发射形式，这里为FM信号。 $w_{az}(\bullet)$ 为方位向信号包络。 $R(\eta)$ 表示如下：

$$R(\eta) = \left[R_0^2 + \left(V_X \eta + \frac{1}{2} a_X \eta^2 - X_n \right)^2 - 2R_s \left(V_X \eta + \frac{1}{2} a_X \eta^2 - X_n \right) \sin \theta_s + \left(V_Y \eta + \frac{1}{2} a_Y \eta^2 \right)^2 + 2 \left(V_Y \eta + \frac{1}{2} a_Y \eta^2 \right) h_0 \right]^{1/2} \quad (2)$$

对式(2)在 $\eta=0$ 处展开成泰勒级数形式：

$$R(\eta) \approx R_X + \left[k_1 - V_X \sin \theta_s + \frac{V_Y h_0}{R_s} \right] \eta + k_2 \eta^2 + k_3 \eta^3 \quad (3)$$

式(2)，式(3)中， R_s 为 $\eta=0$ 时刻地面上的波束中心点到弹体的距离， $R_X = \sqrt{R_0^2 + X_n^2 + 2R_s X_n \sin \theta_s}$ ， k_1 ， k_2 ， k_3 为泰勒展开系数，其推导详见文献[10]。由于斜视角和下降速度的存在，回波信号存在较大的包络线性徙动分量，因此将式(1)表示的SAR回波信号进行线性徙动校正；同时为了讨论方便，可将其频谱搬移到零频附近。将式(1)变换到距离频域-方位时域后，乘以如下校正函数：

$$H_1 = \exp \left[-j4\pi \frac{f_r + f_c}{c} \left(V_X \sin \theta_s - \frac{V_Y h_0}{R_s} \right) \eta \right] \quad (4)$$

得到SAR回波信号在距离频域-方位时域的表达式 $S_1(f_r, \eta)$ 如下：

$$S_1(f_r, \eta) = W_r(f_r) w_{az}(\eta) \exp \left[-j\pi \frac{1}{K_r} f_r^2 \right] \cdot \exp \left[-j4\pi \frac{f_c + f_r}{c} R_1(\eta) \right] \quad (5)$$

式(4)和式(5)中， f_c 为载频， f_r 为距离频率， $W_r(\bullet)$ 为距离频域信号包络， K_r 为发射信号调频率， $R_1(\eta)$ 的表示如下：

$$R_1(\eta) = R_X + k_1 \eta + k_2 \eta^2 + k_3 \eta^3 \quad (6)$$

式(6)中的泰勒展开系数 k_1 ， k_2 ， k_3 的值随距离位置 R_X 和方位位置 X_n 变化。以下将以式(5)和式(6)所表示的SAR信号形式为基础，推导SAR回波信号在2维频域的表达式，并进一步给出适用于弹载SAR下降段成像的方位非线性变标算法。

3 成像分析

为了有效进行距离徙动校正，通常需要获得SAR回波信号在2维频域的表示形式。以式(5)和式(6)为基础，利用级数反演^[11,12]，可以得到任意一点SAR回波信号的2维频谱高阶近似式，表示如下：

$$S_1(f_r, f_\eta) = W_r(f_r) W_{az} \left[f_\eta + (f_c + f_r) \frac{2k_1}{c} \right] \cdot \exp \left[j\varphi(f_r, f_\eta) \right] \quad (7)$$

式中

$$\begin{aligned}
\varphi(f_r, f_\eta) = & -2\pi \frac{2(f_C + f_r)}{c} R_X - \pi \frac{f_r^2}{K_r} \\
& + 2\pi \frac{1}{4k_2} \left[\frac{c}{2(f_C + f_r)} \right] \left[f_\eta + \frac{2(f_C + f_r)}{c} k_1 \right]^2 \\
& + 2\pi \frac{k_3}{8k_2^3} \left[\frac{c}{2(f_C + f_r)} \right]^2 \left[f_\eta + \frac{2(f_C + f_r)}{c} k_1 \right]^3 \\
& + 2\pi \frac{9k_3^2}{64k_2^5} \left[\frac{c}{2(f_C + f_r)} \right]^3 \left[f_\eta + \frac{2(f_C + f_r)}{c} k_1 \right]^4
\end{aligned} \quad (8)$$

式(7)和式(8)中, f_η 表示多普勒频率, $W_{az}(\bullet)$ 表示多普勒域信号包络。通过级数反演所获得的频谱精度受式(8)中展开阶数的影响。式(8)中关于 f_η 高阶项的影响远小于 $\pi/4$, 因此只保留关于 f_η 的 4 次项及以下。然而, 式(8)中存在距离频率 f_r 和多普勒频率 f_η 的耦合, 不便于后续分析与处理。因此, 将式(8)在距离频率 $f_r = 0$ 处进行泰勒级数展开, 整理后得到如下形式:

$$\varphi(f_r, f_\eta) \approx \varphi_{rg}(f_r) + \varphi_{rcm}(f_r, f_\eta) + \varphi_{az}(f_\eta) + \varphi_{res} \quad (9)$$

由于弹载 SAR 通常工作在高频段, 因此可忽略 2 次距离压缩 (SRC) 项的影响 (即忽略式(9)中除 $-\pi(f_r^2/K_r)$ 以外关于 f_r 的 2 次及 2 次以上项)。式(9)等号右边第 4 项为残余相位项, 该项与距离频率 f_r 和多普勒频率 f_η 无关, 对成像的影响可以忽略。式(9)等号右边的其余 3 项可描述如下:

(1) 距离调制项 式(9)等号右边第 1 项 $\varphi_{rg}(f_r)$ 表示距离向的信号调制, 即

$$\varphi_{rg}(f_r) = -\pi(f_r^2/K_r) \quad (10)$$

由于忽略了 2 次距离压缩 (SRC) 项的影响, 成像处理中可直接根据式(10)在 2 维频域构造距离脉冲压缩函数。

(2) 距离徙动 (RCM) 项 式(9)等号右边第 2 项为关于距离频率 f_r 的 1 次项, 该项体现为包络越距离单元徙动, 即

$$\begin{aligned}
\varphi_{rcm}(f_r, f_\eta) = & -2\pi \frac{2R_X}{c} f_r + 2\pi \frac{k_1}{2k_2 f_C} \left(f_\eta + \frac{2k_1 f_C}{c} \right) f_r \\
& + 2\pi \left(-\frac{c}{8k_2 f_C^2} + \frac{3k_1 k_3 c}{16k_2^3 f_C^2} \right) \\
& \cdot \left(f_\eta + \frac{2k_1 f_C}{c} \right)^2 f_r \\
& + 2\pi \left(-\frac{k_3 c^2}{16k_2^3 f_C^3} + \frac{9k_1 k_3^2 c^2}{64k_2^5 f_C^3} \right) \\
& \cdot \left(f_\eta + \frac{2k_1 f_C}{c} \right)^3 f_r
\end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中等号右边的第 2, 第 3, 第 4 项为距离徙动

校正需要去除的部分, 通常可用场景中心 $R_X = R_S$, $X_n = 0$ 为参考构造距离徙动校正函数, 使得距离徙动校正误差在 1/4 距离采样单元之内。由式(11)等号右边第 1 项可知, 对于任意目标点 (R_X, X_n) 的 SAR 回波信号经距离徙动校正之后, 将被压缩至距离单元 R_X 处的一条方位向直线。

(3) 方位调制项 式(9)等号右边第 2 项 $\varphi_{az}(f_\eta)$ 与距离频率 f_r 无关, 该项体现了方位向的信号调制, 即

$$\begin{aligned}
\varphi_{az}(f_\eta) = & 2\pi \left(\frac{k_1}{2k_2} + \frac{3k_1^2 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_1^3 k_3^2}{16k_2^5} \right) f_\eta \\
& + 2\pi \left(\frac{c}{8k_2 f_C} + \frac{3k_1 k_3 c}{16k_2^3 f_C} + \frac{27k_1^2 k_3^2 c}{64k_2^5 f_C} \right) f_\eta^2 \\
& + 2\pi \left(\frac{k_3 c^2}{32k_2^3 f_C^2} + \frac{9k_1 k_3^2 c^2}{64k_2^5 f_C^2} \right) f_\eta^3
\end{aligned} \quad (12)$$

式(12)等号右边第 1 项为 f_η 的线性项, 该项反映了目标点经方位聚焦后所处的方位位置。用 $-\eta_{X_n}$ 表示式(12)中关于 f_η 的 1 次项系数, 并将 η_{X_n} 在 $X_n = 0$ 处写成一阶泰勒级数形式为

$$\eta_{X_n} \approx \eta_0 + \rho X_n \quad (13)$$

式中 $\eta_0 = \eta_{X_n}|_{X_n=0}$, $\rho = [d\eta_{X_n}/(dX_n)]|_{X_n=0}$, 通常 $\eta_0 \neq 0$, $\rho X_n \neq X_n/V_X$, 并且 ρ 随距离向空变。为了利于弹载 SAR 图像的特征匹配, 可通过后续的方位向处理消除 η_0 和 ρ 对成像的影响, 使得 $\eta_{X_n} = -(X_n/V_X)$ 。

式(12)等号右边关于 f_η 的 3 次项, 通常可忽略其系数随方位位置 X_n 的变化, 因此可直接以方位中心 $X_n = 0$ 处为参考构造关于 f_η 的 3 次方位匹配滤波。然而, 对于式(12)等号右边关于 f_η 的 2 次项系数: 令 $K_{X_n} = \frac{k_1}{2k_2} + \frac{3k_1^2 k_3}{8k_2^3} + \frac{9k_1^3 k_3^2}{16k_2^5}$, $-\frac{1}{2K_{az}} = K_{X_n}$,

K_{az} 为多普勒调频率。位于 (R_0, X_n) 处的目标点回波经距离徙动校正和距离压缩处理之后, 处于距离单元 R_X 处; 而同一距离单元 R_X 处的不同目标点回波信号, 其多普勒调频率 K_{az} 随方位 X_n 变化较为剧烈 (后续的仿真部分将对此做进一步的定量分析); 如果直接以方位中心 $X_n = 0$ 为参考构造关于 f_η 的 2 次匹配滤波, 中心点两侧的目标点将出现严重散焦, 方位聚焦深度受到较大限制。因此, 在构造方位匹配滤波之前, 可通过引入方位非线性变标操作, 补偿多普勒调频率沿方位向的变化, 改善聚焦深度和聚焦效果。

4 方位非线性变标处理

根据以上成像分析, 可按式(10)和式(11)构造相

应的距离徙动校正函数和距离压缩函数。任意一点SAR回波信号经距离徙动校正和距离压缩处理之后，可写成如下距离-多普勒域形式：

$$S_2(\tau, f_\eta) = \text{sinc}\left[B\left(\tau - \frac{2R_X}{c}\right)\right] W_{az1}(f_\eta) \exp[j\varphi_{az}(f_\eta)] \quad (14)$$

式中 B 为发射信号带宽， $\varphi_{az}(f_\eta)$ 如式(12)所示。式(12)中关于 f_η 的3次项系数通常可近似认为不随方位 X_n 变化，因此可以方位中心 $X_n = 0$ 处为参考沿距离单元构造关于 f_η 的3次匹配滤波函数，去除式(12)中关于 f_η 的3次项影响；空变多普勒调频率的补偿，可在方位非线性变标操作中完成。首先，在距离-多普勒域沿距离单元引入方位3次相位滤波，3次相位滤波函数如下^[8]：

$$H_{cub} = \exp(j2\pi Y_m f_a^3) \quad (15)$$

式中3次相位滤波系数 Y_m 为待定量。回波信号经方位3次相位滤波之后，变换到距离时域-方位时域，得到如下形式：

$$S_{2Y}(\tau, \eta) = \text{sinc}\left(\tau - \frac{2R_X}{c}\right) w_{az1}(\eta) \exp[j\pi K_{az} \cdot (\eta - \Delta\eta)^2 + j2\pi Y_m K_{az}^3 (\eta - \Delta\eta)^3] \quad (16)$$

式中 $\Delta\eta$ 表示目标点 X_n 所对应的方位时间，由式(13)可知，其对应关系为： $\Delta\eta = \eta_0 + \rho X_n$ ，通常 $\eta_0 \neq 0$ ， $\rho X_n \neq X_n/V_X$ ； K_{az} 表示位于距离单元 R_X 处的SAR回波信号多普勒调频率， K_{az} 随方位位置 X_n 近似线性变化。然而，在方位时域构造非线性变标操作，还需得到 K_{az} 与方位采样时间 η 的变化关系， X_n 与 η 的对应关系可由 $\Delta\eta = \eta_0 + \rho X_n$ 确定。将 K_{az} 于 $\eta = 0$ 处展开成泰勒1阶形式，表示如下：

$$K_{az} \approx K_{az0} + K_S \eta \quad (17)$$

式中 K_{az0} 为方位中心 $X_n = 0$ 处对应的多普勒调频率， K_S 为1阶展开系数，表示如下：

$$K_S \approx \left. \frac{dK_{az}}{dX_n} \right|_{X_n=0} \times \frac{dX_n}{d\eta} = \frac{1}{\rho} \times \left. \frac{dK_{az}}{dX_n} \right|_{X_n=0} \quad (18)$$

随后，在距离时域-方位时域构造方位非线性变标函数^[8]：

$$H_{NLCS} = \exp(j\pi q_2 \eta^2 + j2\pi q_3 \eta^3) \quad (19)$$

式中变标因子 q_2 ， q_3 为待定量。将式(16)与式(19)相乘后，变换到距离-多普勒域，得到如下形式：

$$S_{Y\alpha}(\tau, f_\eta) = \text{sinc}\left(\tau - \frac{2R_X}{c}\right) W_{az2}(f_\eta) \cdot \exp[j2\pi\psi(\tau; f_\eta, \Delta\eta)] \quad (20)$$

式中相位 $\psi(\tau; f_\eta, \Delta\eta)$ 表示如下：

$$\psi(\tau; f_\eta, \Delta\eta) \approx A + B \times f_\eta \Delta\eta + C \times f_\eta^2 \Delta\eta^2 + D \times f_\eta^2 \Delta\eta + E \quad (21)$$

为实现空变多普勒调频率的有效补偿，下面对式(21)的各个相位项进行分析：式(21)等号右边第1项表示与方位时间 $\Delta\eta$ 无关的 f_η 高次项，该项用于构造方位匹配滤波函数；第2项和第3项为多普勒频率 f_η 的线性项，其系数为方位时间 $\Delta\eta$ 的函数，这两项体现了方位时间 $\Delta\eta$ 所对应的目标点经方位聚焦后处在图像中的位置；第4项表示随方位时间 $\Delta\eta$ 线性变化的多普勒频率调制项，该项体现了多普勒调频率随方位的变化；第5项表示与 f_a 无关的残余相位，该项不影响方位成像，可不予考虑；忽略其余高次项的影响。

通过设置待定量 Y_m ， q_2 ， q_3 ，可消除线性多普勒频率调制项的影响，并且使得方位向上任意一点 X_n 经方位聚焦后处于方位时刻 $\Delta\eta = X_n/V_X$ 。因此，令

$$\left. \begin{aligned} B &= -1/\alpha \\ C &= 0 \\ D &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

可求得待定量 Y_m ， q_2 ， q_3 如下：

$$\left. \begin{aligned} Y_m &= \frac{K_S(\alpha - 0.5)}{3K_{az0}^3(\alpha - 1)} \\ q_2 &= K_{az0}(\alpha - 1) \\ q_3 &= \frac{K_S(\alpha - 1)}{6} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中 α 为校正系数，令 $\alpha = \rho V_X$ 。可按照式(15)，式(19)和式(23)构造方位3次滤波函数和非线性变标函数，补偿空变的多普勒调频率并消除式(13)中 ρ 的影响。随后，在多普勒域构造关于 f_η 的3次匹配滤波函数如下：

$$H_{cmf} = \exp\left[-j2\pi \frac{Y_m K_{az0}^3 + q_3}{(K_{az0} + q_2)^3} f_\eta^3\right] \quad (24)$$

将式(20)与式(24)相乘后进行方位IFFT，得

$$S_{Y2}(\tau, \eta) = \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{2R_X}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[j\pi(K_{az0} + q_2) \times (\eta + \eta_0/\alpha)^2\right] \quad (25)$$

式中 η_0 如式(13)所示。至此，已完成空变多普勒调频率的补偿，即式(25)所示信号在同一距离单元 R_X 处具有相同的多普勒调频率。通常弹体具有较高的飞行速度，因此采用相干累积时间较短的方位Deramp处理^[9]也能获得较大的多普勒带宽和米级的方位分辨率，数据量的降低也利于弹载条件下的实时成像处理；另外，由于方位相干时间选取较短，采用Deramp处理的另一个优势体现在对运动误差累积的相对不敏感，从而降低了对惯导精度和运动误差补偿精度的要求。构造Deramp相位因子的同

时可消除式(13)中 η_0 的影响, 构造的 Deramp 相位因子如下所示:

$$H_{\text{deramp}} = \exp[-j\pi(K_{az0} + q_2)\eta^2] \cdot \exp[-j2\pi(K_{az0} + q_2)\eta \times \eta_0/\alpha] \quad (26)$$

将式(25)与式(26)相乘后进行方位 FFT, 得到的 SAR 图像表示为

$$S_{Y2}(\tau, f_\eta) = \text{sinc}\left[B_r\left(\tau - \frac{2R_X}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[\Delta f_a\left(f_\eta + \frac{(K_{az0} + q_2)X_n}{V_X}\right)\right] \quad (27)$$

式中 Δf_d 为方位相干累积时间所对应的多普勒带宽。至此, 平面上任意一点 (R_0, X_n) 重建于 SAR 图像上的 $\tau = 2R_X/c$, $f_\eta = -\{[(K_{az0} + q_2)X_n]/V_X\}$ 处。由 $R_X = \sqrt{R_0^2 + X_n^2 + 2R_S X_n \sin\theta_S}$ 得, $R_0 \approx R_X - X_n \sin\theta_S$, 并由此进一步构建以 $\tau = 2R_0/c$, $f_\eta = -\{[(K_{az0} + q_2)X_n]/V_X\}$ 为表示的 SAR 图像。整个成像处理流程如图 2 所示。

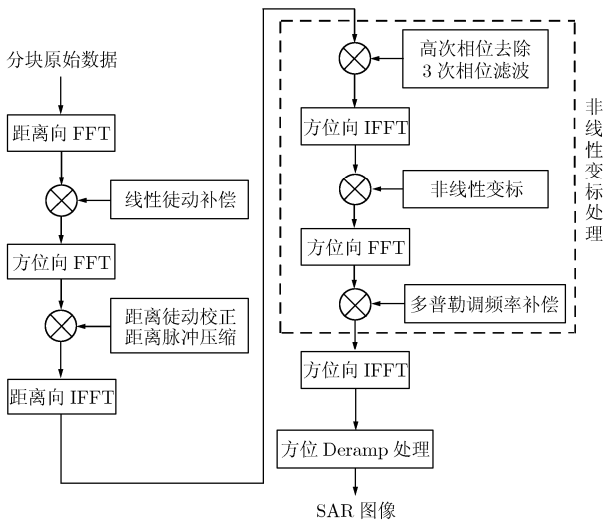


图 2 算法流程图

5 算法处理效率分析

由图 2 可以看出, 方位向的非线性变标操作将增加额外的运算量, 增加的运算量主要来自 2 次 FFT 和 3 次相位点乘(如图 2 虚线框所示)。以下将定量分析由引入方位非线性变标操作所增加的浮点运算量(FLOP)。

假设数据大小为: 距离向点数 $N_{rg} = 4096$, 方位向点数 $N_{az} = 4096$, 距离脉冲压缩后选取的距离向输出点数 $N_{rg,out} = 3072$ 。由文献[13]可知, 1 次 N 点 FFT 或 IFFT 所需的计算量为 $5N \log_2(N)$ 次 FLOP, 一次复数相位相乘所需的计算量为 6 次 FLOP。考虑到在实际处理中相邻的相位相乘可以

合并, 同时忽略滤波器设置等运算开销, 由方位非线性变标操作所增加的浮点运算量为

$$\Delta C = 2 \times 5N_{rg,out}N_{az} \log_2(N_{az}) + 3 \times 6N_{rg,out}N_{az} = 1.74 \times 10^9 \text{ (FLOP)} \quad (28)$$

由式(28)可知, 仅从运算量的角度考虑, 本文算法在运算量上相比常用的 RD 算法(4.08×10^9 次 FLOP^[13])和近似 Omega-K 算法(3.95×10^9 次 FLOP^[13])略有增加; 然而, 通过引入方位非线性变标操作, 成像处理的聚焦深度可得到成倍的改善, 一定程度上减少了繁琐的方位向重叠分块和拼接操作, 从而使整个成像处理效率得到提高(后续的仿真部分将对此做进一步定量分析)。因此, 本文提出的弹载 SAR 成像算法具有一定的应用价值。

6 仿真结果与分析

仿真采用表 1 所示的弹载 SAR 系统参数, 成像几何和坐标定义如图 1 所示。设置的矩形点阵由 25 个目标点组成, 大小为 $400 \times 400 \text{ m}^2$, 相邻点之间沿 X 轴方向间隔 100 m, 沿 Z 轴方向间隔 100 m, 点 1 和点 2 为方位空变最为剧烈的边缘点, 如图 3 所示。

图 4 给出了经距离向处理后, 距离单元 R_S 处多普勒调频率随方位 X_n 的变化曲线。由图 4 可知, 多普勒调频率随方位向变化较为剧烈, 如果直接以方位中心 $X_n = 0$ 为参考构造方位匹配滤波, 引入的相

表 1 弹载 SAR 系统参数

信号带宽	80 MHz	弹体水平向速度	1000 m/s
信号脉宽	4 μs	弹体水平向加速度	-50 m/s^2
载频	35 GHz	弹体垂直向速度	-600 m/s
脉冲重复频率	10 kHz	弹体垂直向加速度	-40 m/s^2
采样频率	100 MHz	方位相干点数	2048 点
弹体高度	约 10 km	斜视角 θ_s	30°
作用距离	约 16 km		

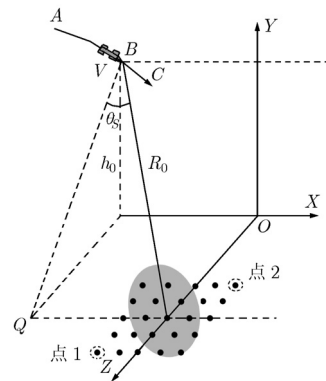


图 3 仿真点目标设置

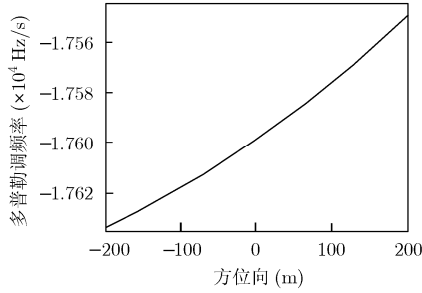


图4 补偿前的多普勒调频率变化曲线

位误差将严重影响边缘点的聚焦。例如，按照表 1 所示的系统参数进行方位 Deramp 处理，可以计算在边缘点 $X_n = 200$ m 处由空变多普勒调频率引入的相位误差为 1.61 rad，不满足远小于 $\pi/4$ rad 的条件。因此，有必要补偿变化的多普勒调频率，提高聚焦深度并改善边缘点的聚焦效果。

图 5 给出了未考虑多普勒调频率变化情况下场景边缘点 1 的聚焦结果；图 6 给出了采用本文方法处理后场景边缘点 1 的聚焦结果，边缘点 2 的聚焦结果与边缘点 1 类似，这里予以省略。点目标的聚焦未加窗抑制旁瓣。可见，由于较大俯冲下降速度和加速度的存在，如不考虑多普勒调频率沿方位向的变化，引入的相位误差导致了场景边缘点的严重散焦，如图 5 所示。实际上，此时偏离方位中心 100 m 处的目标点即已存在较严重的散焦，方位聚焦深度不超过 200 m；而采用本文方法处理，边缘点的

聚焦效果得到了较大改善，如图 6 所示，方位聚焦深度提高到 400 m 以上。

通常，用于图像特征匹配的弹载 SAR 不需要很大的测绘带宽，采用本文的方法，距离向和方位向最多只需一次图像拼接即可完全满足弹载 SAR 图像匹配的场景尺寸要求。例如，需要获得 800 m 方位宽度的 SAR 图像，按照表 1 的系统参数并假设每块原始数据的距离向点数为 1024，如不考虑方位空变，不超过 200 m 的方位聚焦深度至少需要处理 4 次方位分块的图像并进行 3 次图像拼接，如采用常用的近似 Omega-K 算法，总的浮点运算量约为 2.13×10^9 次 FLOP；而采用本文方法，400 m 以上的方位聚焦深度只需处理 2 次方位分块的图像和 1 次图像拼接即可满足要求，总的浮点运算量约为 1.47×10^9 次 FLOP。因此本文方法在整体上较有效地提高了成像处理效率。

表 2 给出了点目标成像性能分析，成像各项性能指标均与理论值较为接近(理论方位分辨率和距离分辨率分别为 1.66 m 和 0.30 m)。图 7 进一步给出了点阵目标的仿真结果，图 8 给出了场景目标的仿真结果(场景大小为 425×395 m，距离向和方位向均采用汉明窗抑制旁瓣)，成像质量总体良好。可见，本文方法在一定程度上较为有效地解决了弹载 SAR 下降段成像中方位空变的问题，获得了较好的成像结果。

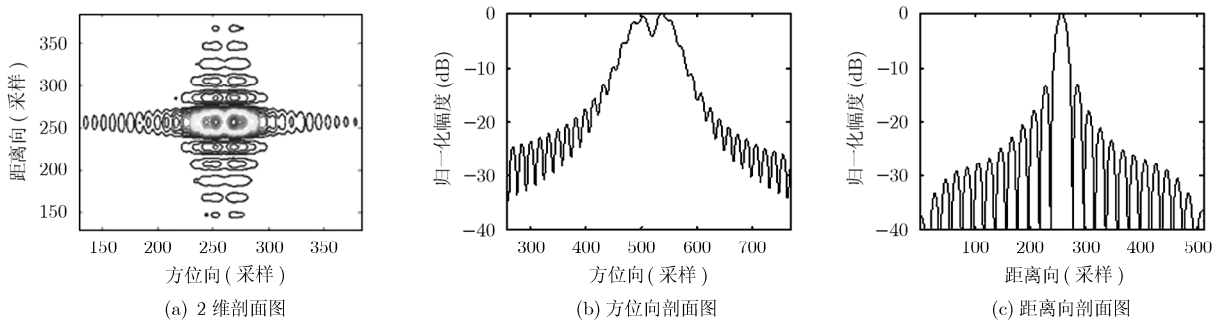


图5 未考虑多普勒调频率空变时边缘点 1 的聚焦结果

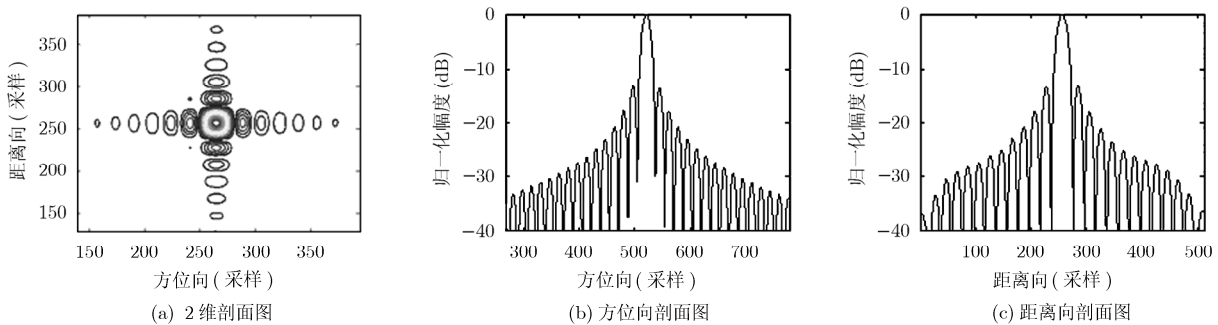


图6 采用本文方法边缘点 1 的聚焦结果

表 2 成像质量分析

参数	方位向 PSLR(dB)	方位向 ISLR(dB)	方位向分辨率(m)	距离向 PSLR(dB)	距离向 ISLR(dB)	距离向分辨率(m)
边缘点 1	-13.04	-9.79	0.31	-13.25	-9.72	1.65
边缘点 2	-12.95	-9.83	0.32	-13.27	-9.74	1.66

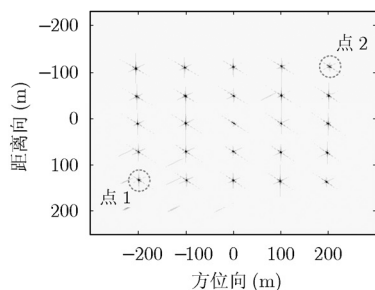


图 7 点阵目标仿真结果

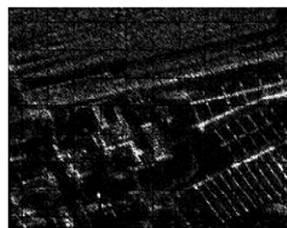


图 8 场景目标仿真结果

7 结束语

本文首先根据弹载 SAR 下降段特点,建立了 SAR 成像信号模型,利用级数反演得到了 SAR 回波信号的 2 维频谱高阶近似式,并以此为基础,详细分析了弹载 SAR 下降段成像中的特点与难点;在完成距离向处理之后,该文进一步给出了用以补偿空变多普勒调频率的方位非线性变标成像算法,一定程度上较为有效地改善了方位聚焦深度和聚焦质量。文章最后的点阵目标仿真和场景目标仿真,验证了所述算法的有效性。

参考文献

- [1] 尹德成. 弹载合成孔径雷达制导技术发展综述[J]. 现代雷达, 2009, 31(11): 20-24.
- [2] 秦玉亮, 黄宗辉, 邓彬等. 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.
- [3] 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.
- [4] 房丽丽, 王岩飞. 俯冲加速运动状态下的 SAR 信号分析及运动补偿. [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6): 1316-1320.
- [5] 孙兵, 周荫清, 陈杰等. 基于恒加速度模型的斜视 SAR 成像 CA-ECS 算法 [J]. 电子学报, 2006, 34(9): 1595-1599.
- [6] 秦玉亮, 王建涛, 王宏强等. 基于距离-多普勒算法的俯冲弹道条件下弹载 SAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(11): 2563-2568.
- [7] 易予生, 张林让, 刘昕等. 一种弹载侧视 SAR 大场景成像算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(3): 587-592.
- [8] Davidson G W, Cumming I G, and Ito M R. A chirp scaling

approach for processing squint mode SAR data [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1996, 32(1): 121-133.

- [9] Wong F H, Cumming I G, and Neo Y L. Focusing bistatic SAR data using the nonlinear chirp scaling algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(9): 2493-2505.
 - [10] 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.
 - [11] Neo Y L, Wong F H, 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.
 - [12] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I G. Processing of azimuth-invariant bistatic SAR data using the range Doppler algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 14-21.
 - [13] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation* [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005, Chapter 11.
- 周松: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像.
包敏: 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为星载 SAR 成像.
周鹏: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像.
邢孟道: 男, 1975 年生, 博士, 教授, 主要从事雷达成像和目标识别等方面的研究工作.
保铮: 男, 1927 年生, 中国科学院院士, 教授, 主要从事自适应信号处理、阵列信号处理、雷达成像和目标识别等方面的研究工作.