

基于方位向信息分离的机动SAR成像算法

马彦恒 侯建强* 李根 刘新海

(陆军工程大学石家庄校区 石家庄 050003)

摘要: 针对机动SAR成像, 该文提出一种基于方位向运动信息分离的成像算法。在完成距离压缩后, 通过方位向运动信息分离, 去除非方位向运动造成的距离走动和空变性影响, 然后利用方位向速度等效变换实现距离弯曲校正, 最后通过非均匀傅里叶变换实现方位向的压缩。该算法利用3维坐标在斜距方程中性质相同的原理, 经过非方位向运动信息的校正, 将3维空间运动等效成方位向直线非匀速运动模型, 实现了机动SAR成像。通过仿真验证了算法在不同运动状态下的适用性。算法简单稳定、适用性强。

关键词: SAR成像; 频域; 机动

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0364-08

DOI: 10.11999/JEIT190757

Maneuvering SAR Imaging Algorithms Based on the Separation of Azimuthal Motion Information

MA Yanheng HOU Jianqiang LI Gen LIU Xinhai

(Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: A maneuvering SAR imaging algorithm is proposed based on the separation of azimuthal motion information. After range compression, the influence of non-azimuthal motion on range walk and spatiality is removed by separating azimuthal motion information. Then, the azimuth velocity equivalent transformation is used to realize range bending correction. Finally, the azimuth compression is realized by non-uniform Fourier transform. Using this principle, the parameters of three directions in the oblique distance equation have the same properties in the three-dimensional coordinate system. The algorithm transforms the three-dimensional spatial motion into the azimuthal non-uniform motion model. Through simulation, the applicability of the algorithm to different models and other motion states is verified. The algorithm is simple, stable and applicable.

Key words: SAR imaging; Frequency domain; Maneuvering

1 引言

传统匀速直线运动状态下的SAR成像, 已经不能满足侦察成像的需求。由于灵活的成像模式和广泛的应用前景, 机动SAR^[1-3]成像得到了越来越多的重视。复杂的运动轨迹具有更好的环境适应能力, 同时也会造成更高阶的斜距方程、非均匀的空间采样和更大的方位空变性。这些变化会给回波信号的距离徙动校正、空变性校正和方位向压缩带来更大的困难。SAR成像通常有两类算法即时域算法和频域算法。其中, 时域算法^[4-6]运算量大, 不适用于实时成像。频域算法^[7-12]依托4阶斜距方程和2维频谱级数反演求解, 能够较好地实现机动成像, 然而并不适用于任意场景, 需要针对不同的场

景做不同要求的修正和改进。而利用子孔径^[13]的频域算法对复杂运动轨迹进行分解, 简化后进行成像, 会降低方位向的分辨率。利用非均匀FFT^[14]的方法只适合于解决方位向非匀速运动的问题。

本文针对机动SAR成像, 提出了一种方位向信息分离的成像算法。依托空间3维坐标系, 利用3维坐标在斜距方程中具有“3维同性”(即 x, y, z 在斜距 R 中意义和地位相同)的特点, 通过方位向信息分离, 将斜距方程中与方位向运动信息不相关的部分提取出来, 用于距离走动校正和空变性校正, 与方位向运动信息相关的部分用于距离弯曲校正和方位压缩。利用速度等效变换去除距离弯曲, 方位压缩则可以通过非均匀傅里叶变换解决。算法将3维空间运动下的机动成像等效成方位向直线非匀速处理, 不依赖于不同模型下的2维频谱计算, 只与3维运动参数有关, 适用性广。同时, 坐标3维同性的

特点，能够从不同的维度对斜距方程进行分离分析，丰富了斜距信息，实现了更多信息的提取，为后期目标识别的研究做铺垫。

2 机动SAR运动模型

SAR平台在运动过程中，主要有匀速直线运动、直线非匀速运动、俯冲、爬升、左盘转向、右盘转向等基础运动，传统的侦察模式采用的是匀速直线运动。而对于机载SAR的实战要求而言，需要在多种运动状态下都能完成侦察成像的任务。这些主要的运动模型可以用简单的3维匀加速运动表示，3维参数的不同表示不同的运动模型。本文以聚束成像模式为例进行分析，如图1所示为在空间3维加速运动模型下，机动SAR成像示意图。

平台和目标点的距离可表示为

$$R(t_a) = \sqrt{(x_R - x_p)^2 + (y_R - y_p)^2 + z_R^2} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} x_R &= x_m + v_{x0}t_a + \frac{1}{2}a_x t_a^2 \\ y_R &= y_m + v_{y0}t_a + \frac{1}{2}a_y t_a^2 \\ z_R &= z_m + v_{z0}t_a + \frac{1}{2}a_z t_a^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中， (x_m, y_m, z_m) 表示SAR平台的初始位置， $(x_p, y_p, 0)$ 表示成像区域内任意点目标的位置， (v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}) 是SAR平台的3维初始速度， (a_x, a_y, a_z) 是3维空间内的初始加速度， t_a 是方位向的慢时间， (x_R, y_R, z_R) 表示SAR平台在方位向 t_a 时刻的3维空间位置， $R(t_a)$ 是SAR平台在 t_a 时刻的斜距。式(1)还可以表示为

$$R(t_a) = \sqrt{R_B^2 + \mu_1 t_a + \mu_2 t_a^2 + \mu_3 t_a^3 + \mu_4 t_a^4} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} R_B^2 &= (x_m - x_p)^2 + (y_m - y_p)^2 + z_m^2 \\ \mu_1 &= 2(x_m - x_p)v_{x0} + 2(y_m - y_p)v_{y0} + 2z_m v_{z0} \\ \mu_2 &= (x_m a_x - x_p a_x + v_{x0}^2) + (y_m a_y - y_p a_y + v_{y0}^2) \\ &\quad + (z_m a_z + v_{z0}^2) \\ \mu_3 &= v_{x0} a_x + v_{y0} a_y + v_{z0} a_z \\ \mu_4 &= \frac{1}{4}(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

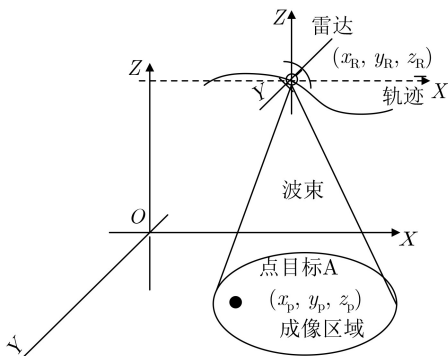


图1 机动SAR成像示意图

方程组 $(R_B^2, \mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4)$ 因目标点的位置和平台的运动信息的不同而有不同的结果。式(3)在 R_B 处进行泰勒展开可得

$$R(t_a) \approx R_B + k_1 t_a + k_2 t_a^2 + k_3 t_a^3 \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} R_B &= \sqrt{R_B^2} \\ k_1 &= \frac{\mu_1}{2R_B} \\ k_2 &= \frac{\mu_2}{2R_B} - \frac{\mu_1^2}{8R_B^3} \\ k_3 &= \frac{\mu_3}{2R_B} - \frac{\mu_1 \mu_2}{4R_B^3} + \frac{\mu_1^3}{16R_B^5} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(4)，式(5)和式(6)比较完整地表示SAR平台在3维加速运动模型下的斜距变化情况。

3 机动SAR成像算法

3.1 斜距方程方位向信息分离

从式(1)可以看出， x, y, z 在斜距 $R(t_a)$ 中的意义是一样的，这一现象在文中成为“3维同性”。充分利用这一点，就可以丰富成像信息。为了能够更详细地分析距离徙动、空变性变化和方位向调制的影响因素，需要将式(5)斜距方程进行方位向信息分离，其中的运动信息主要体现在系数方程组(6)中。首先，将式(6)中的分子分解成两部分：一部分分解成与目标点位置相关的，一部分分解成与目标点位置不相关的。记

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= x_m v_{x0} + y_m v_{y0} + z_m v_{z0} \\ A_2 &= x_m a_x + y_m a_y + z_m a_z + v_{x0}^2 + v_{y0}^2 + v_{z0}^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{A_1}{R_B} - \frac{x_p v_{x0} + y_p v_{y0}}{R_B} \\ k_2 &= \frac{A_2}{2R_B} - \frac{A_1^2}{2R_B^3} + \frac{A_1(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})}{R_B^3} \\ &\quad - \frac{x_p a_x + y_p a_y}{2R_B} - \frac{(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})^2}{2R_B^3} \\ k_3 &= \frac{\mu_3}{2R_B} - \frac{A_1 A_2}{2R_B^3} + \frac{A_1^3}{2R_B^5} + \frac{A_2(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})}{2R_B^3} \\ &\quad + \frac{A_1(x_p a_x + y_p a_y)}{2R_B^3} + \frac{3A_1(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})^2}{2R_B^5} \\ &\quad - \frac{3A_1^2(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})}{2R_B^5} \\ &\quad - \frac{(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})(x_p a_x + y_p a_y)}{2R_B^3} \\ &\quad - \frac{(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})^3}{2R_B^5} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

当 $x_p = 0$ 和 $y_p = 0$ 时，式(6)则是与目标点位置参数无关的量，可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_{B0}^2 &= x_m^2 + y_m^2 + z_m^2 \\ k_{10} &= \frac{A_1}{R_{B0}} \\ k_{20} &= \frac{A_2}{2R_{B0}} - \frac{A_1^2}{2R_{B0}^3} \\ k_{30} &= \frac{\mu_3}{2R_{B0}} + \frac{A_1^3}{2R_{B0}^5} - \frac{A_1 A_2}{2R_{B0}^3} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} k_{1p} &= -\frac{x_p v_{x0} + y_p v_{y0}}{R_{B0}} + \frac{x_k^2 (x_p v_{x0} + y_p v_{y0}) - A_1 x_k^2}{2R_{B0}^3} \\ k_{2p} &= -\frac{x_p a_x + y_p a_y}{2R_{B0}} - \frac{(x_p v_{x0} + y_p v_{y0})^2 - 2A_1 (x_p v_{x0} + y_p v_{y0}) - A_2 x_k^2 - x_k^2 (x_p a_x + y_p a_y)}{2R_{B0}^3} - \frac{A_2 x_k^2 - x_k^2 (x_p a_x + y_p a_y)}{4R_{B0}^3} \\ k_{3p} &= \frac{A_1 (x_p a_x + y_p a_y) + A_2 (x_p v_{x0} + y_p v_{y0}) - (x_p v_{x0} + y_p v_{y0}) (x_p a_x + y_p a_y)}{2R_{B0}^3} - \frac{\mu_3 x_k^2}{4R_{B0}^3} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

将式(10)代入式(5)中, 斜距方程可以被分解成如下两个3阶多项式的形式

$$R(t_a) \approx R_B + (k_{10} t_a + k_{20} t_a^2 + k_{30} t_a^3) + (k_{1p} t_a + k_{2p} t_a^2 + k_{3p} t_a^3) \quad (12)$$

其中, $(k_{10} t_a + k_{20} t_a^2 + k_{30} t_a^3)$ 与目标点位置信息不相关, $(k_{1p} t_a + k_{2p} t_a^2 + k_{3p} t_a^3)$ 则是与目标点位置相关的项。设定X向为方位向, 式(12)的系数如下

$$\left. \begin{aligned} k_{10} &= k_{10x} + k_{10\bar{x}} \\ k_{20} &= k_{20x} + k_{20\bar{x}} \\ k_{30} &= k_{30x} + k_{30\bar{x}} \\ k_{1p} &= k_{1px} + k_{1p\bar{x}} \\ k_{2p} &= k_{2px} + k_{2p\bar{x}} \\ k_{3p} &= k_{3px} + k_{3p\bar{x}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

由式(7), 式(9), 式(11)和式(13)可得

$$\left. \begin{aligned} k_{10x} &= \frac{x_m v_{x0}}{R_{B0}} \\ k_{20x} &= \frac{x_m a_x + v_{x0}^2}{2R_{B0}} - \frac{x_m^2 v_{x0}^2}{2R_{B0}^3} \\ k_{30x} &= \frac{v_{x0} a_x}{2R_{B0}} - \frac{x_m v_{x0} (x_m a_x + v_{x0}^2)}{2R_{B0}^3} + \frac{x_m^3 v_{x0}^3}{2R_{B0}^5} \\ k_{1px} &= -\frac{x_p v_{x0}}{R_{B0}} + \frac{x_k^2 x_p v_{x0}}{2R_{B0}^3} - \frac{x_m v_{x0} (x_p^2 - 2x_m x_p)}{2R_{B0}^3} \\ k_{2px} &= -\frac{x_p a_x}{2R_{B0}} - \frac{x_p^2 v_{x0}^2}{2R_{B0}^3} + \frac{x_m x_p v_{x0}^2}{R_{B0}^3} \\ &\quad - \frac{(x_m a_x + v_{x0}^2) (x_p^2 - 2x_m x_p)}{4R_{B0}^3} \\ k_{3px} &= \frac{A_1 x_p a_x}{2R_{B0}^3} + \frac{A_2 x_p v_{x0}}{2R_{B0}^3} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(5), 式(10)和式(13)可以得到斜距方程分离的结果

为了对斜距方程进行分离, 设定 $R_{B0} = R_B k_R$ 。根据式(4)和式(9)可知, k_R 可以被写成 $k_R \approx 1 - \frac{x_k^2}{2R_{B0}^2} + \frac{3x_k^4}{8R_{B0}^4}$, 其中 $x_k^2 = x_p^2 + y_p^2 - 2x_m x_p - 2y_m y_p$ 。将 k_R 代入式(8)有

$$\left. \begin{aligned} k_1 &\approx k_{10} + k_{1p} \\ k_2 &\approx k_{20} + k_{2p} \\ k_3 &\approx k_{30} + k_{3p} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$R(t_a) \approx R_B + (k_{10x} + k_{1px}) t_a + [(k_{10\bar{x}} + k_{1p\bar{x}}) t_a + (k_{20\bar{x}} + k_{2p\bar{x}}) t_a^2 + (k_{30\bar{x}} + k_{3p\bar{x}}) t_a^3] + [(k_{20x} + k_{2px}) t_a^2 + (k_{30x} + k_{3px}) t_a^3] \quad (15)$$

其中, 前两项表示目标点的位置, 第1个“[]”表示距离弯曲、距离走动和非方位向的调制项, 主要用于相位补偿和校正。第2个“[]”表示方位向的2阶和3阶调制, 主要用于方位压缩。

3.2 机动SAR成像处理

3.2.1 非方位向相位补偿

忽略幅度信息, 距离压缩后的回波方程可以表示为

$$s(R_B, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi (f_0 + f_r) [R_B + (k_{10x} + k_{1px}) t_a]}{c} \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi (f_0 + f_r)}{c} [(k_{20x} + k_{2px}) t_a^2 + (k_{30x} + k_{3px}) t_a^3] \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi (f_0 + f_r)}{c} [(k_{10\bar{x}} + k_{1p\bar{x}}) t_a + (k_{20\bar{x}} + k_{2p\bar{x}}) t_a^2 + (k_{30\bar{x}} + k_{3p\bar{x}}) t_a^3] \right\} \quad (16)$$

根据式(16)中的第1个中括号的内容, 构造距离频域的相位补偿函数为

$$H_1(f_r, t_a) = \exp \left\{ j \frac{4\pi (f_0 + f_r)}{c} [(k_{10\bar{x}} + k_{1p\bar{x}}) t_a + (k_{20\bar{x}} + k_{2p\bar{x}}) t_a^2 + (k_{30\bar{x}} + k_{3p\bar{x}}) t_a^3] \right\} \quad (17)$$

将式(16)与式(17)相乘, 就可以实现非方位向相位补偿, 得到结果如式(18)

$$\begin{aligned}
s_{rf}(R_B, t_a) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi(f_0 + f_r) [R_B + (k_{10x} + k_{1px}) t_a]}{c} \right\} \\
&\cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi(f_0 + f_r)}{c} [(k_{20x} + k_{2px}) t_a^2 + (k_{30x} + k_{3px}) t_a^3] \right\}
\end{aligned} \quad (18)$$

3.2.2 基于方位速度等效变换的距离弯曲校正

经过式(18)的变化, 去除了非方位向运动参数的影响, 原本的3维加速运动模型变换成了方位向直线非匀速运动, 本节通过方位向速度等效变换, 实现方位向运动带来的距离弯曲校正。首先将非匀速等时间间隔采样等效成匀速非等时间间隔采样, 计算等效匀速速度 \bar{v}_x , 其中 N_a 表示方位向慢时间的采样点数, $x_R(1)$ 和 $x_R(N_a)$ 分别表示成像时间内平台 x 方向的起始坐标和终止坐标

$$\bar{v}_x = \frac{x_R(N_a) - x_R(1)}{T_a} \quad (19)$$

根据传统匀速直线运动模型中距离徙动的计算可知, 在等效匀速运动状态下, 距离徙动量可以表示为

$$\Delta R(f_a) = \frac{\lambda^2 R_b f_a^2}{8\bar{v}_x^2} \quad (20)$$

其中, R_b 表示孔径中心处的斜距, 正侧视下表示为

$$R_b = \sqrt{(y_m - y_p)^2 + z_m^2} \quad (21)$$

根据式(21)可以构建2维频域内的方位向运动带来的距离弯曲校正函数, 表示为

$$H_{\text{rmc}} = \exp \left\{ j \frac{4\pi f_r \Delta R(f_a)}{c} \right\} \quad (22)$$

对经过非方位向相位补偿后的式(18)进行2维FFT运算, 然后与式(22)相乘就可以实现方位向运动造成的距离徙动校正。

3.2.3 基于非均匀傅里叶变换的方位压缩

为进行方位向的压缩, 继续利用上节的等效速度 \bar{v}_x , 同时计算等效非等时间间隔的方位向时间 t_u

$$t_u = \frac{\left[x_R - \frac{x_R(N_a) + x_R(1)}{2} \right]}{\bar{v}_x} \quad (23)$$

利用非均匀傅里叶变换将补偿后的信号变换到方位频域

$$s_{af}(R_B, f_a) = \int s_{rf}(R_B, t_a) \exp(-j2\pi f_a t_u) dt_u \quad (24)$$

经过非匀速等时间间隔采样向匀速非等时间间隔采样的等效变换, 可以根据等效匀速运动过程构建方位向压缩函数, 其中 K_a 表示方位调频率

$$K_a \approx \frac{2\bar{v}_x^2}{\lambda R_{B0}} \quad (25)$$

$$H_2(f_a, t_a) = \exp \left(j\pi \frac{f_a^2}{K_a} \right) \quad (26)$$

将式(24)与式(26)相乘, 并进行方位向逆傅里叶变换即可得到方位压缩结果。将压缩后的结果变换到时域即可得到成像结果

$$s_{\text{out}}(R_B, t_a) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0 [R_B + (k_{10x} + k_{1px}) t_a]}{c} \right\} \quad (27)$$

基于方位向运动信息分离的成像处理过程可分为4个步骤:

(1)距离压缩: 此过程主要是完成回波信号的距离压缩, 是在距离时域内实现的。

(2)基于非方位向运动信息分离的相位补偿: 此过程主要完成非方位向运动对成像影响的校正, 是在距离时域内完成的, 补偿因子为 $H_1(f_r, t_a)$ 。

(3)基于方位向速度等效的距离弯曲校正: 此过程主要完成方位向运动对成像造成的距离弯曲校正, 是在2维频域内实现的, 校正因子为 H_{rmc} 。

(4)基于非均匀傅里叶变换的方位压缩: 此过程主要是解决方位向非匀速运动带来的方位向压缩问题, 是在方位频域内实现的, 方位向压缩因子为 $H_2(f_a, t_a)$ 。

具体的处理过程如图2所示。

4 机动SAR成像算法仿真验证

本节通过仿真方法验证聚束模式下机动SAR方位向运动信息分离成像算法的有效性, 仿真模型为3维匀加速运动。仿真参数如下: 载频为1.5 GHz, 脉宽为5 μ s, 带宽为150 MHz, 方位向慢时间为4 s。

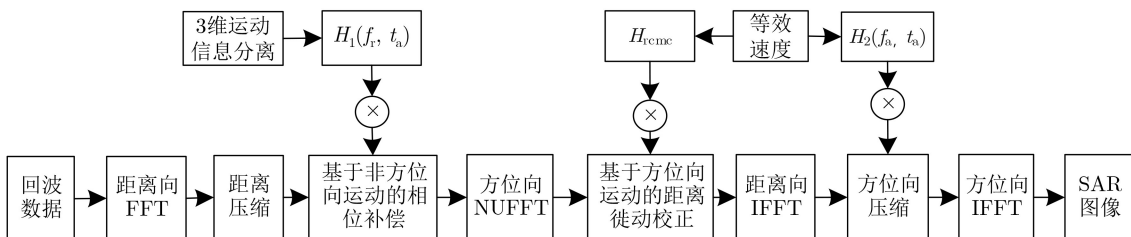


图2 机动SAR方位向运动信息分离成像处理流程图

根据雷达参数可知, 距离向分辨率的理论值为1 m, 方位向分辨率由等效速度 \bar{v}_x 和等效调频率 K_a 按照传统匀速直线运动近似得到, 不同的等效速度有不同的分辨率结果, 约为1 m。雷达初始位置 (x_m, y_m, z_m) 为 $(-200 \text{ m}, 1000 \text{ m}, 4000 \text{ m})$ 。

4.1 单点目标仿真

以无人机载机动SAR为例, 如图3所示, 为单点目标仿真结果, 属于爬升转弯运动或者俯冲转弯

运动。采用的速度参数为 $v_{x0} = 100 \text{ m/s}$, $v_{y0} = 5 \text{ m/s}$, $v_{z0} = 3 \text{ m/s}$, $a_x = 0.1 \text{ m/s}^2$, $a_y = -0.5 \text{ m/s}^2$, $a_z = -0.5 \text{ m/s}^2$ 。目标点的位置为 $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, 方位向成像时间为4 s。

4.2 多点目标仿真

仿真时, 选取5个点目标, 其坐标为 $(-50 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, -50 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, 50 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(50 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 。如图4为3维

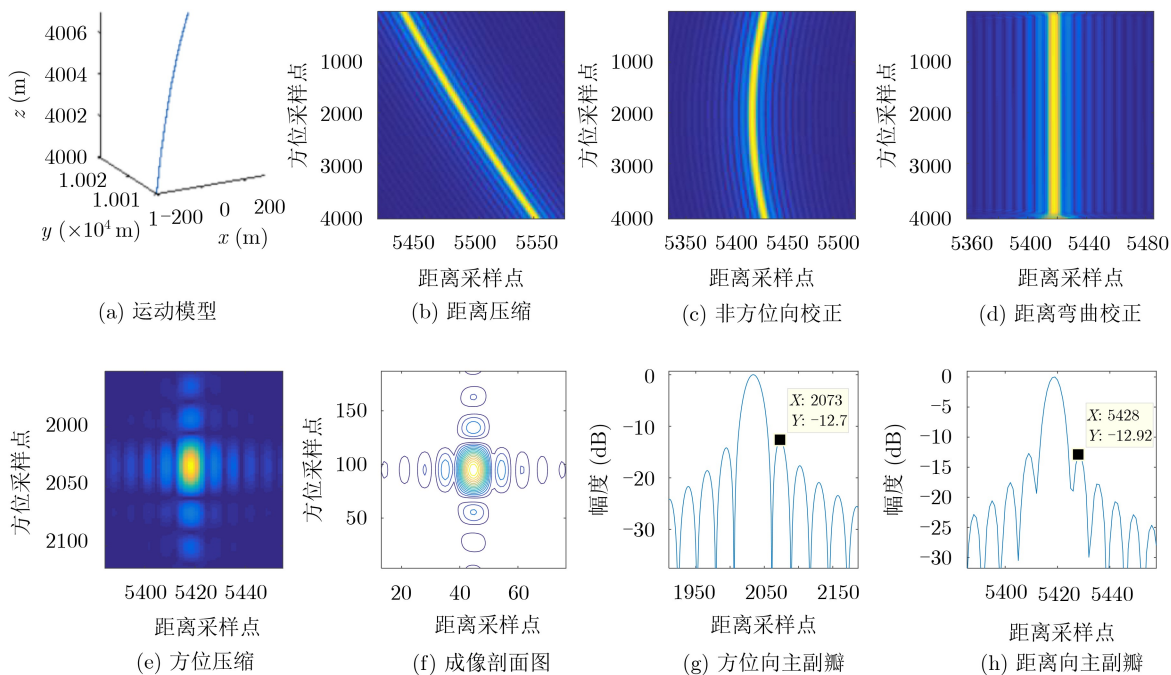


图3 3维匀加速运动下的单点目标仿真

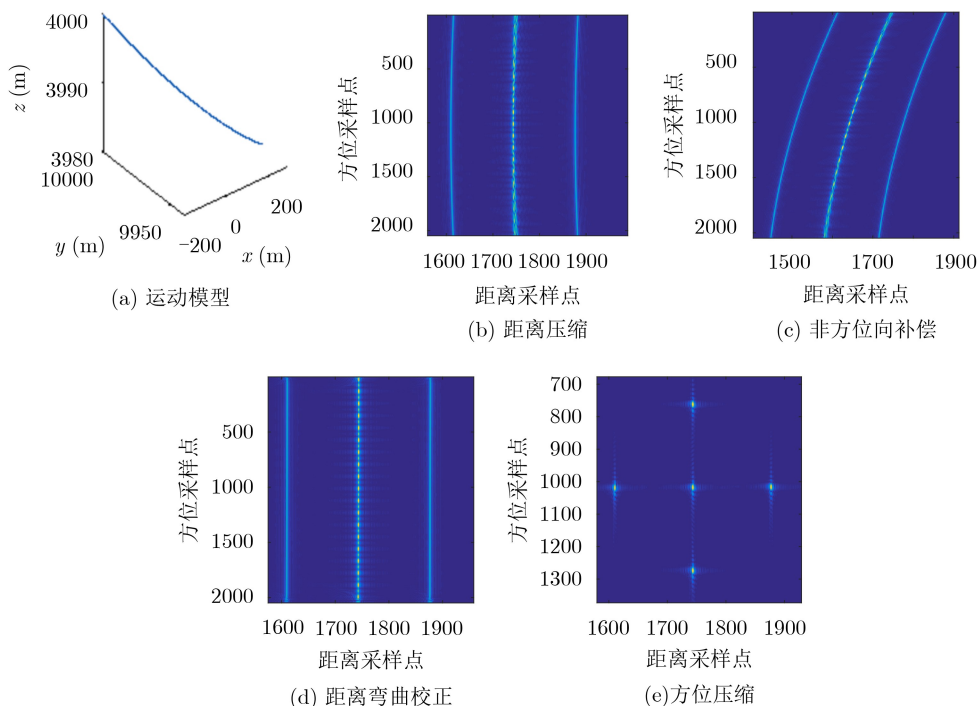


图4 3维匀加速运动下多目标仿真

匀加速运动模型下的多目标成像结果。在仿真中，采用的速度参数为 $v_{x0}=100\text{ m/s}$, $v_{y0}=-20\text{ m/s}$, $v_{z0}=-6\text{ m/s}$, $a_x=0.2\text{ m/s}^2$, $a_y=3\text{ m/s}^2$, $a_z=1\text{ m/s}^2$ 。

从上述实验结果中可以看出算法在3维匀加速运动的成像中，具有很好的效果。从图4(c)和图4(d)可以看出，算法对机动SAR成像的距离徙动和方位向距离弯曲校正有较好的效果。

5 空变性校正与分析

空变性问题是机动SAR成像需要解决的另一个关键问题。本文主要通过对大成像场景的小区域划分解空变性问题，即通过在不同的小区域内选择不同的成像参考点，实现空变性问题的解决。这种

方法是一种简单快捷的方法，主要是将大成像场景划分成若干个小成像区域，分别在各个小成像区域内选取运动参数和参考点，进行成像分析。

如图5到图7所示为仿真验证，以及与相位滤波校正算法^[15]的对比验证。在仿真中，采用的无人机平台的运动参数为 $v_{x0}=100\text{ m/s}$, $v_{y0}=5\text{ m/s}$, $v_{z0}=3\text{ m/s}$, $a_x=0.1\text{ m/s}^2$, $a_y=-1\text{ m/s}^2$, $a_z=-0.5\text{ m/s}^2$ 。目标点的位置为(1000 m, 500 m, 0 m)，方位向成像时间为5 s。图5(a)表示成像剖面图；图5(b)表示方位向主副瓣分析；图5(c)表示距离向主副瓣分析。

图5表示的是未经过空变性校正的机动SAR成像结果。图6采用子图像划分成像的方法，将大成像区域划分成若干小成像区域，然后依据不同的中

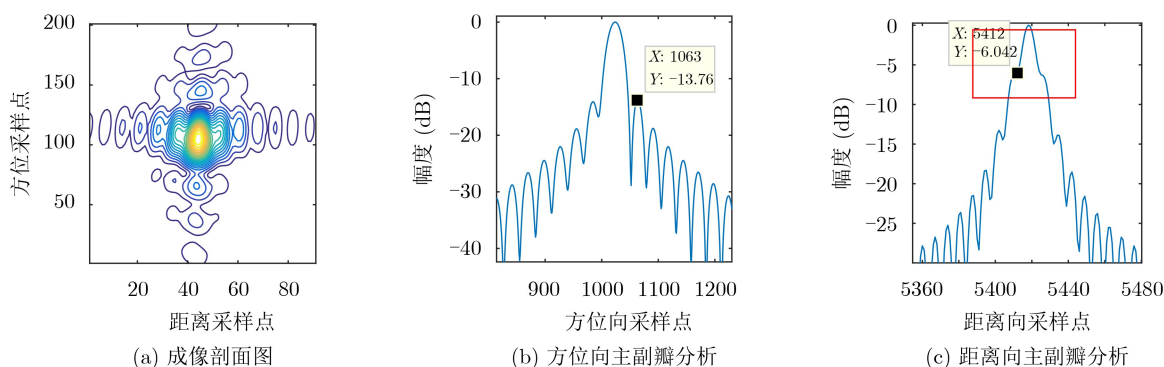


图5 未进行空变性校正的成像结果

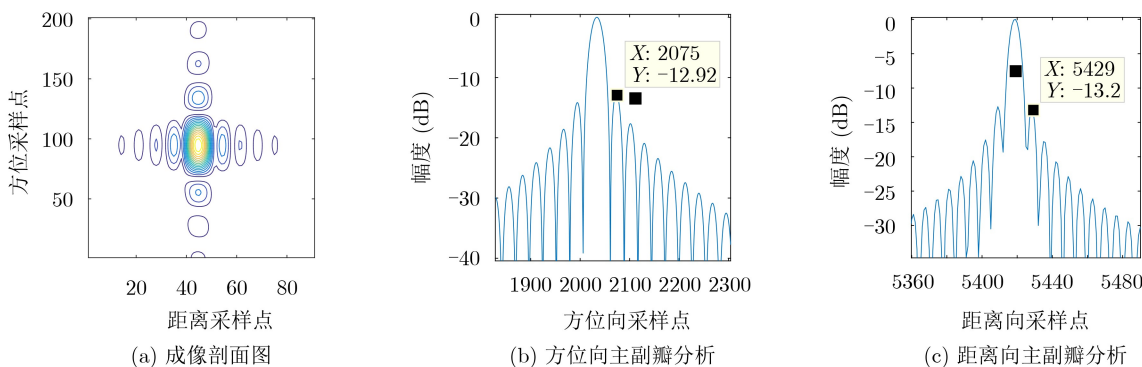


图6 基于子图像划分成像的空变性校正成像

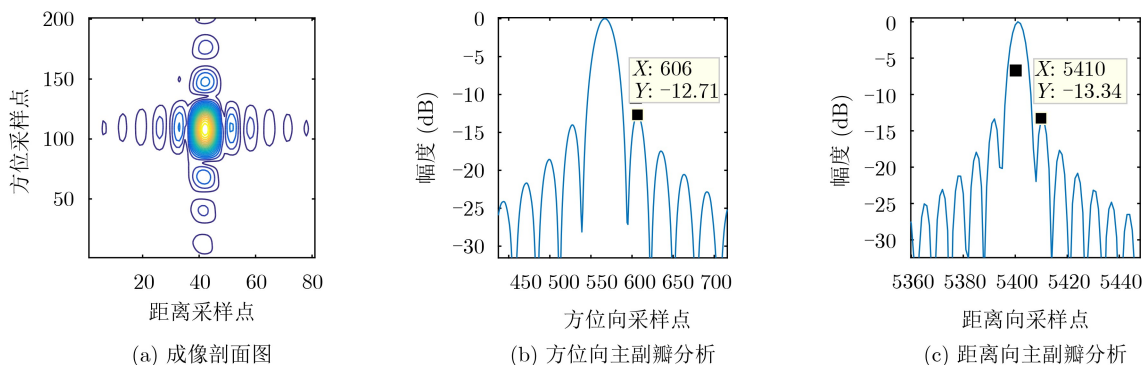


图7 基于频域相位滤波的空变性校正成像结果

心参考点进行成像的结果。图7表示采用频域相位滤波进行空变性校正的结果。从图5(b)可以看到较为明显的不对称性,图5(c)中方框内的阶梯形变化则显示了空变性造成的主瓣展宽。对比图5和图6、图7可以发现,经过后两种方法处理,都可以较好地实现机动SAR的空变性校正;采用子图像处理的方法更为简单快捷,成像效果也最好;采用频域相位滤波的方法能够处理较长孔径的数据。但是,孔径时间变长处理效果依旧会变差,这是由于在运算过程中进行了近似处理。

6 结束语

传统SAR成像需要平台保持匀速直线运动,针对传统算法不能满足SAR在作战条件下,适用于机动灵活的平台运动的要求,提出一种基于方位向运动信息分离的成像算法,通过分离非方位向运动信息对成像的影响,将不同模型下的成像等效成方位向直线非匀速运动成像。相比传统运动误差补偿算法,该算法能够适应更强的速度变化和运动变化。同时,利用3维同性的特点,丰富了斜距信息,能够为后续的目标识别提供更多的选择。该算法不依赖于传统频域算法对2维频谱的求解,扩展了频域成像算法对模型的适用性,减少了传统SAR成像的“工作状态盲区”。最后,通过不同运动模型下的仿真验证了算法的可行性、有效性。

参考文献

- [1] 刘雨雨. 复杂运动平台SAR成像技术研究[D]. [硕士学位论文], 电子科技大学, 2016.
LIU Yuyu. Study of SAR imaging algorithm based on complex motion platform[D]. [Master dissertation], University of Electronic Science and Technology, 2016.
- [2] 孟自强. 双基前视高机动平台SAR系统特性及成像算法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2016.
MENG Ziqiang. System characteristic and imaging algorithm study on bistatic forward-looking high-speed maneuvering-platform SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2016.
- [3] 周松. 高速机动平台SAR成像算法及运动补偿研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2013.
ZHOU Song. Study on imaging algorithm and motion compensation for high-speed manoeuvring-platform SAR[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2013.
- [4] 班阳阳. 基于后向投影的SAR成像算法与GPU加速研究[D]. [硕士学位论文], 南京航空航天大学, 2014.
BAN Yangyang. SAR imaging algorithm and GPU acceleration research based on back projection[D]. [Master dissertation], Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [5] 叶晓明, 张国峰, 胡晓光, 等. 近前视弹载SAR的改进后向投影成像算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(3): 492–501. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0223.
YE Xiaoming, ZHANG Guofeng, HU Xiaoguang, et al. Improved back-projection imaging algorithm for approximate forward looking missile-borne SAR[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(3): 492–501. doi: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0223.
- [6] 唐江文, 邓云凯, 王宇, 等. Bulk-FFBP: 基于距离向整体处理的快速分解后向投影算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(2): 405–411. doi: 10.11999/JEIT160373.
TANG Jiangwen, DENG Yunkai, WANG Yu, et al. Bulk-FFBP: Fast factorized back-projection algorithm based on range bulk processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(2): 405–411. doi: 10.11999/JEIT160373.
- [7] 周鹏. 弹载SAR多种工作模式的成像算法研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2011.
ZHOU Peng. Study on imaging algorithms for missile-borne SAR in multiple modes[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2011.
- [8] 彭岁阳, 张军, 胡卫东, 等. 非匀速平飞模式下双基地SAR成像分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11): 2648–2654. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.01461.
PENG Suiyang, ZHANG Jun, HU Weidong, et al. The imaging analysis of bistatic SAR with parallel track of variable velocity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(11): 2648–2654. doi: 10.3724/SP.J.1146.2009.01461.
- [9] 洪文, 林赞, 谭维贤, 等. 地球同步轨道圆迹SAR研究[J]. 雷达学报, 2015, 4(3): 241–253. doi: 10.12000/JR15062.
HONG Wen, LIN Yun, TAN Weixian, et al. Study on geosynchronous circular SAR[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(3): 241–253. doi: 10.12000/JR15062.
- [10] 景国斌. 机载/星载超高分辨率SAR成像技术研究[D]. [博士学位论文], 西安电子科技大学, 2018.
JING Guobin. Study on very-high-resolution of airborne/spaceborne SAR imaging[D]. [Ph.D. dissertation], Xidian University, 2018.
- [11] 张群英, 江兆凤, 李超, 等. 太赫兹合成孔径雷达成像运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(1): 129–137. doi: 10.11999/JEIT160201.
ZHANG Qunying, JIANG Zhaofeng, LI Chao, et al. Motion compensation imaging algorithm of terahertz synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(1): 129–137. doi: 10.11999/JEIT160201.
- [12] PONCE O, PRATS P, RODRIGUEZ-CASSOLA M, et al.

- Processing of circular SAR trajectories with fast factorized back-projection[C]. 2011 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 3692–3695. doi: [10.1109/IGARSS.2011.6050026](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2011.6050026).
- [13] 李震宇, 杨军, 梁毅, 等. 弹载SAR子孔径大斜视成像方位空变校正新方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2015, 42(4): 88–94, 197. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.015).
LI Zhenyu, YANG Jun, LIANG Yi, *et al.* New method for azimuth-dependent correction of highly squint missile-borne SAR subaperture imaging[J]. *Journal of Xidian University*, 2015, 42(4): 88–94, 197. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2015.04.015).
- [14] 邢涛, 李军, 王冠勇, 等. 基于非均匀快速傅里叶变换的SAR方位向运动补偿算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(5): 1023–1029. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00969](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00969).
XING Tao, LI Jun, WANG Guanyong, *et al.* An along-track motion compensation algorithm based on non-uniform fast Fourier transform (NUFFT) for SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(5): 1023–1029. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00969](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00969).
- [15] 董祺, 杨泽民, 李震宇, 等. 基于方位空变斜距模型的大斜视机动平台波数域SAR成像算法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3166–3173. doi: [10.11999/JEIT160785](https://doi.org/10.11999/JEIT160785).
DONG Qi, YANG Zemin, LI Zhenyu, *et al.* Wavenumber-domain imaging algorithm for high squint SAR based on azimuth variation range model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3166–3173. doi: [10.11999/JEIT160785](https://doi.org/10.11999/JEIT160785).
- 马彦恒: 男, 1968年生, 教授, 研究方向为无人机信息处理技术、SAR成像.
- 侯建强: 男, 1990年生, 博士, 研究方向为SAR信号处理、无人机组载机动SAR成像.
- 李根: 男, 1991年生, 博士, 研究方向为SAR信号处理、无人机组载机动SAR成像.
- 刘新海: 男, 1988年生, 助理工程师, 研究方向为无人机信息处理.

责任编辑: 陈倩