

一种新的弹载 SAR 高分辨成像方法

周 鹏* 熊 涛 周 松 李亚超 邢孟道

(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: 导弹在俯冲下降运动中飞行姿态变化较大、造成目标斜距表达式较为复杂,给弹载合成孔径雷达(SAR)成像算法提出了新的要求。针对这个问题,该文提出了一种新的弹载 SAR 成像方法,首先将目标斜距方程近似为慢时间的 4 阶近似式,再利用卡尔丹方程解得驻相点的精确解,进而得到信号的 2 维频谱表达式,然后以此为基础推导了相应的成像算法。最后,点目标仿真结果说明,与传统方法相比该文所提方法具有良好的成像效果,能够在导弹俯冲下降运动实现全孔径高分辨成像。

关键词: 弹载 SAR; 卡尔丹方程; 2 维频谱

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)03-0622-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00904

A Novel High Resolution Imaging Method for the Missile-borne SAR

Zhou Peng Xiong Tao Zhou Song Li Ya-chao Xing Meng-dao

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

Abstract: Due to the variational flight path during the diving maneuver, the range function of the point target for the missile-borne SAR becomes complicated. Thus, a new imaging method is proposed in this paper. Firstly, the target range function is expanded to a quartic polynomial. Secondly, the stationary point is solved via the Cardano's formula, and then the tow-dimensional spectrum is obtained, based on which a new imaging algorithm is derived. Finally, the simulation result of the point targets shows that the algorithm proposed is effective to give a high resolution imagery with the entire aperture of the missile-borne SAR than the traditional method.

Key words: Missile-borne SAR; Cardano's formula; Tow-dimensional spectrum

1 引言

弹载 SAR 是近年来雷达成像领域的研究热点之一。通过将实时 SAR 图像与弹上数据库中的基准图像进行景象匹配,可以确定 SAR 图像在基准图中的位置,进而由几何关系解算出导弹位置坐标,达到修正 INS 积累误差、提高导弹制导精度的目的。

在实际中,由于导弹俯冲下降运动中飞行姿态变化较大,造成目标斜距方程较为复杂^[1],此时常规的 SAR 成像算法已经难以完成目标的精确聚焦,必须研究能够适应弹载环境的新成像算法。

在成像算法的研究过程中,推导回波信号的 2 维频谱表达式是首要的一步。由于弹载 SAR 目标斜距方程中根号下存在慢时间的 4 次项,直接使用 POSP(驻相点法)^[2]推导信号 2 维频谱表达式需要解 6 次方程,而根据阿贝耳定理^[3]6 次方程没有一般的代数解法,因此,如何获得信号 2 维频谱表达式,成为弹载 SAR 成像算法研究的一个难点。传统的弹

载 SAR 成像算法^[4-7]在 2 维频谱的推导过程中均对斜距方程进行了不同程度的近似(通常为 2 阶近似),这种近似舍弃了高阶斜距信息,在弹体飞行姿态变化不大的子孔径成像中可以适用,但当分辨率要求较高、成像时间较长、弹体飞行姿态变化较大时所得的 2 维频谱会产生较大的误差,影响成像效果,具有一定的局限性。文献[8,9]提出了利用级数反演法^[10]通过斜距高阶近似式推导 2 维频谱高阶近似式的方法,能够实现全孔径成像,提高了成像精度。

本文从获得高精度 2 维频谱的角度出发,提出了一种新的弹载 SAR 成像思路。首先,对斜距进行合理近似,在保证成像质量的条件下降低利用 POSP 求解驻相点时的方程阶数,再通过卡尔丹方程解得驻相点的精确解,进而得到信号 2 维频谱表达式。由于在整个推导过程中仅对斜距进行了一次高阶近似,因此所得的 2 维频谱具有较高的精确度。

文中首先分析了弹载 SAR 成像的几何关系,讨论了算法研究所面临的问题,然后将斜距方程展开为慢时间的 4 阶多项式,再利用卡尔丹方程求解驻相点,并以此推导 2 维频谱表达式。接着对 2 维频谱进行分析并给出了相应的成像处理思路与算法流

2010-08-24 收到, 2010-11-25 改回

国家自然科学基金重大项目(60890072)和新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0861)资助课题

*通信作者: 周鹏 zhoupeng_23@tom.com

程。最后通过点目标成像仿真结果的对比,验证了本文方法的有效性。

2 成像模型与问题分析

图1为弹载SAR成像几何模型。弹体在 XOZ 平面内沿曲线 \widehat{AB} 做俯冲下降运动,其瞬时速度为 V , V 在 X 方向和 Z 方向的分量分别记为 v_x 与 v_z 。 P 为测绘带中一点,坐标为 $(x_p, y_p, 0)$ 。令 t_m 为慢时间,设 O' 为 $t_m = 0$ 时导弹位置, H 为此时弹体高度, (v_{x0}, v_{z0}) 为此时速度分量, (a_x, a_z) 为加速度分量。假设弹体在任意 t_m 时刻的位置坐标为 $(x_R, 0, z_R)$,则有 $(x_R, 0, z_R) = (v_{x0}t_m + 0.5a_x t_m^2, 0, H + v_{z0}t_m + 0.5a_z t_m^2)$ 。

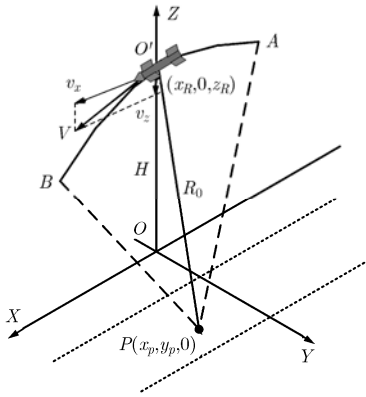


图1 弹载SAR成像几何模型

由以上条件可以得到弹体与点 P 之间的瞬时斜距方程为

$$R(t_m) = \left((v_{x0}t_m + 0.5a_x t_m^2 - x_p)^2 + y_p^2 + (H + v_{z0}t_m + 0.5a_z t_m^2)^2 \right)^{1/2} = \sqrt{R_0^2 + \mu_1 t_m + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3 + \mu_4 t_m^4} \quad (1)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} R_0 &= \sqrt{x_p^2 + y_p^2 + H^2}, \quad \mu_1 = -2(v_{x0}x_p - v_{z0}H) \\ \mu_2 &= v_{x0}^2 + v_{z0}^2 - a_x x_p + a_z H, \\ \mu_3 &= v_{x0}a_x + v_{z0}a_z, \quad \mu_4 = \frac{1}{4}(a_x^2 + a_z^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通常合成孔径雷达发射线性调频信号,设 γ 为信号调频率,则目标 P 的基带回波信号可以表示为

$$s(\hat{t}, t_m) = w_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m)}{c} \right) w_a(t_m) \cdot \exp \left[j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t_m) \right] \quad (3)$$

其中 $w_r(\hat{t})$, $w_a(t_m)$ 分别为雷达线性调频信号的窗函数和方位窗函数, \hat{t} 为快时间, c 为光速, λ 为波长。

下面先用式(1)推导信号 $s(\hat{t}, t_m)$ 的2维频谱表达式。令 f_r 为距离频率,对式(3)做距离向傅里叶变换(以下推导忽略窗函数的形式变化),可以得到

$$S(f_r, t_m) = w_r(f_r) w_a(t_m) \exp \left[-j\pi(f_r^2/\gamma) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} R(t_m)(f_r + f_c) \right] \quad (4)$$

再令 f_a 为多普勒频率,对式(4)做方位向傅里叶变换,得到2维频谱表达式

$$S(f_r, f_a) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f_r, t_m) \exp(-j2\pi f_a t_m) dt_m \quad (5)$$

用POSP求解式(5),由于距离脉冲压缩项 $\exp[-j\pi(f_r^2/\gamma)]$ 对POSP没有影响,式(5)中傅里叶积分的相位项可以写为

$$\phi(t_m) = -\frac{4\pi}{c} R(t_m)(f_r + f_c) - 2\pi f_a t_m \quad (6)$$

将斜距表达式(1)代入式(6),可以得到 $\phi(t_m)$ 对 t_m 的导数

$$\phi'(t_m) = -\frac{2\pi}{c} (f_r + f_c) \cdot \frac{1}{\sqrt{R_0^2 + \mu_1 t_m + \mu_2 t_m^2 + \mu_3 t_m^3 + \mu_4 t_m^4}} \cdot (\mu_1 + 2\mu_2 t_m + 3\mu_3 t_m^2 + 4\mu_4 t_m^3) - 2\pi f_a \quad (7)$$

若当 $t_m = t_m^*$ 时 $\phi'(t_m^*) = 0$,则 t_m^* 即为所求驻相点。为求解 t_m^* ,令式(7)等于零,整理后得到如下的6次方程

$$\left(R_0^2 - \mu_1^2 \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} \right) + \left(\mu_1 - 4\mu_1 \mu_2 \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} \right) t_m + \left(\mu_2 - (6\mu_1 \mu_3 + 4\mu_2^2) \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} \right) t_m^2 + \left(\mu_3 - (8\mu_1 \mu_4 + 12\mu_2 \mu_3) \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} \right) t_m^3 + \left(\mu_4 - (16\mu_2 \mu_4 + 9\mu_3^2) \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} \right) t_m^4 - 24\mu_3 \mu_4 \cdot \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} t_m^5 - 16\mu_4^2 \frac{(f_r + f_c)^2}{(f_a c)^2} t_m^6 = 0 \quad (8)$$

由以上推导可以看出,由于式(1)在根号下含有 t_m 的4次项,导致在使用POSP求解信号2维频谱时需要解式(8)所示的6次方程,而由阿贝尔定理^[3]可知6次方程没有一般的代数解法,因此直接使用式(1)的原始斜距方程无法得到驻相点 t_m^* 。传统的解决方法^[4-7]是对斜距进行2阶近似后求解驻相点,这种方法舍弃了高阶斜距信息,在子孔径成像时可以适用,在全孔径成像时则会产生较大的误差,因此需要考虑其他求解思路。

3 基于卡尔丹方程的2维频谱计算

由 SAR 成像的性质可知,如果斜距的近似误差小于波长的1/8,可以认为对成像精度没有影响。因此,可以对斜距进行一定程度的近似,在保证成像质量的条件下,降低方程阶数,方便求解。

将式(1)按泰勒级数展开并保留至4次项

$$R(t_m) = R_0 + k_1 t_m + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 + k_4 t_m^4 \cdots \quad (9)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= \frac{\mu_1}{2R_0} \\ k_2 &= \frac{\mu_2}{2R_0} - \frac{\mu_1^2}{8R_0^3} \\ k_3 &= \frac{\mu_3}{2R_0} - \frac{\mu_1\mu_2}{4R_0^3} + \frac{\mu_1^3}{16R_0^5} \\ k_4 &= \frac{\mu_4}{2R_0} - \frac{2\mu_1\mu_3 + \mu_2^2}{8R_0^3} + \frac{3\mu_1^2\mu_2}{16R_0^5} - \frac{5\mu_1^4}{128R_0^7} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

假设弹体飞行参数为, $H=13000$ m, $v_{x0}=1500$ m/s, $v_{z0}=-500$ m/s, $a_x=-50$ m/s², $a_z=-10$ m/s², 目标坐标为(0,4500,0), 雷达波长为0.04 m。分别计算一个合成孔径时间内目标斜距的3阶近似误差与4阶近似误差。如图2,图3所示,3阶近似误差在边缘最大处约为0.00745 m,大于波长的1/8,而4阶近似误差的最大值约为0.00012 m,远小于波长的1/8。因此,对弹载 SAR 而言,在保证成像质量的前提下,可以对斜距方程进行4阶近似。

于是,将斜距4阶近似式(9)代入式(6),可以得到 $\phi(t_m)$ 对 t_m 的导数

$$\begin{aligned} \phi'(t_m) = & -\frac{4\pi}{c}(k_1 + 2k_2 t_m + 3k_3 t_m^2 + 4k_4 t_m^3) \\ & \cdot (f_r + f_c) - 2\pi f_a \end{aligned} \quad (11)$$

同样令 $\phi'(t_m)=0$,整理后可以得到以下3次方程

$$\left[k_1 + \frac{cf_a}{2(f_r + f_c)} \right] + 2k_2 t_m + 3k_3 t_m^2 + 4k_4 t_m^3 = 0 \quad (12)$$

由以上推导可以看出,通过对斜距的合理近似,方程阶数由6阶降为3阶,在保留了足够的斜距变

化信息的同时降低了求解驻相点的难度。

下面利用卡尔丹方程^[3]对式(12)进行求解。首先,设

$$\alpha = 4k_4, \beta = 3k_3, \gamma = 2k_2, \delta = \left(f_a / \left(\frac{2}{\lambda} + \frac{2f_r}{c} \right) + k_1 \right) \quad (13)$$

则式(12)可以改写为

$$\alpha t_m^3 + \beta t_m^2 + \gamma t_m + \delta = 0 \quad (14)$$

再定义

$$t_m = y - \beta / (3\alpha) \quad (15)$$

则式(14)可以转换为卡尔丹方程

$$y^3 + 3py + 2q = 0 \quad (16)$$

其中

$$p = -(1/9)(\beta/\alpha)^2 + \gamma/(3\alpha) \quad (17)$$

$$q = \frac{1}{27} \left(\frac{\beta}{\alpha} \right)^3 - \frac{1}{6} \frac{\beta\gamma}{\alpha^2} + \frac{\delta}{2\alpha} \quad (18)$$

由卡尔丹方程的性质^[3]可以得到,式(16)的判别式为 $\Delta = q^2 + p^3$ 。

当 $\Delta \geq 0$ 时式(16)有一个实数解

$$y_1 = \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}} \quad (19)$$

当 $\Delta < 0$ 时有3个实数解

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= 2\sqrt{-p} \cos[\theta/3] \\ y_2 &= 2\sqrt{-p} \cos[\theta/3 + 2\pi/3] \\ y_3 &= 2\sqrt{-p} \cos[\theta/3 + 4\pi/3] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

其中

$$\cos \theta = -q / \sqrt{-p^3} \quad (21)$$

在实际求解过程中,若 $\Delta < 0$,则需要根据具体雷达参数选择3个解中具有实际物理意义的一个。

假设通过以上过程得到式(16)的解为 y^* ,将其代入式(15)中即可得到所求驻相点。

$$t_m^* = y^* - \beta / (3\alpha) \quad (22)$$

将 t_m^* 代回到式(5),计算傅里叶积分^[2]可以得到信号的2维频谱表达式

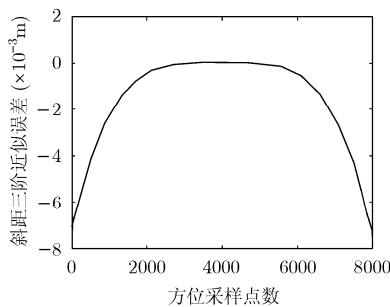


图2 斜距3阶近似误差

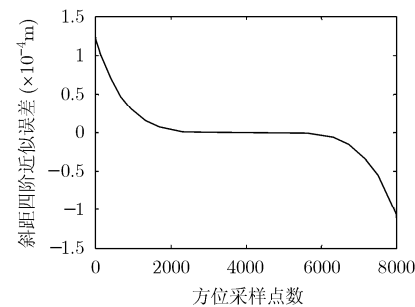


图3 斜距4阶近似误差

$$\begin{aligned}
 S(f_r, f_a) &= w_r(f_r)w_a(f_a)\exp\left[-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right]\exp\left[j\phi(t_m^*)\right] \\
 &= w_r(f_r)w_a(f_a)\exp\left[-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right] \\
 &\quad \cdot \exp\left[j\left(-\frac{4\pi}{c}R(t_m^*)(f_r+f_c)-2\pi f_a t_m^*\right)\right] \quad (23)
 \end{aligned}$$

从以上对 2 维频谱的推导过程可以看出，由于在推导中仅对斜距方程进行了一次高阶近似，所以解得的驻相点 t_m^* 中包含了斜距的 4 个系数 k_1, k_2, k_3, k_4 ，因此由此驻相点所得的 2 维频谱表达式能够体现出较多的斜距变化信息，具有较高的精确度，有利于在弹载条件下对目标进行精确成像。

4 成像算法分析

下面利用所得 2 维频谱进行成像算法推导。

从上节的推导过程可以看出，在 t_m^* 的表达式中，同时具有变量 f_r, f_a 与 R_0 。因此，与通常的频域类算法类似，在成像处理中首先需要在 2 维频域中补偿与场景中心距离 R_s 相对应的频谱，再在距离-多普勒域补偿随 R_0 空变的相位差。

算法流程如下：

(1)首先对式(3)的回波信号做 2 维 FFT 得到式(23)所示的 2 维频谱。

(2)乘以以下因子，用场景中心距离处的频谱对信号进行补偿并做距离脉冲压缩

$$H_1(f_r, f_a; R_s) = \exp\left[j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right]\exp\left[-j\phi(t_m^*; R_s)\right] \quad (24)$$

(3)做距离 IFFT 将信号变换到距离-多普勒域，补偿随距离空变的相位差。

首先需要推导随距离空变的相位差^[11]的表达式。由于在 SAR 成像中通常有 $f_c \gg f_r$ ^[12]，因此 $f_r/c \ll 1/\lambda$ 。可以将式(13)中的 δ 近似为 $\delta \approx (\lambda f_a/2 + k_1)$ 。于是式(18)可以近似写为

$$\tilde{q} \approx \frac{k_1}{8k_4} + \frac{1}{64}\left(\frac{k_3}{k_4}\right)^3 - \frac{1}{16}\frac{k_2k_3}{k_4^2} + \frac{\lambda f_a}{16k_4} \quad (25)$$

由此 \tilde{q} 得到的式(16)的解记为 \tilde{y} ，于是可以得到新的驻相点

$$\tilde{t}_m = \tilde{y} - k_3/(4k_4) \quad (26)$$

可以看出，式(26)中 \tilde{t}_m 仅随 f_a 与 R_0 变化，将其代入式(5)得到新的 2 维频谱

$$S(f_r, f_a; R_0) = w_r(f_r)w_a(f_a)\exp\left[-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}\right]\exp\left[j\phi(\tilde{t}_m)\right] \quad (27)$$

将式(27)中场景中心距离 R_s 处的相位与将其他距离 R_0 处的相位相减就可以得到随距离空变的相

位差为

$$\Delta\phi(f_a; R_s; R_0) = \exp\left[-j\left(\phi(\tilde{t}_m; R_s) - \phi(\tilde{t}_m; R_0)\right)\right] \quad (28)$$

最后，将式(28)与变换到距离多普勒域的回波信号相乘，就可以补偿掉随距离空变的相位差。

(4)最后对信号做方位向 IFFT 就可以得到聚焦后的 SAR 图像

$$s(\hat{t}, t_m; R_0) = \text{sinc}\left[B\left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c}\right)\right]\text{sinc}[\Delta f_a t_m] \quad (29)$$

其中 B 为发射信号带宽， Δf_a 为多普勒带宽。完整的算法流程图如图 4 所示。

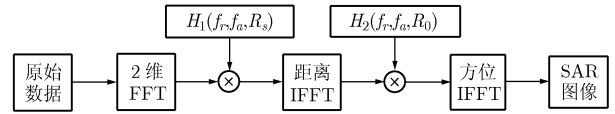


图 4 算法流程图

5 仿真结果对比

为验证本文算法的有效性，下面分别采用本文方法和传统的斜距 2 阶近似条件下的 R-D 算法进行点目标全孔径成像仿真对比。仿真参数如表 1 所示，场景中有近、中、远 3 个点目标，点目标坐标分别为 $P_{\text{near}}(0, 4000, 0)$ ， $P_{\text{mid}}(0, 4500, 0)$ ， $P_{\text{far}}(0, 5000, 0)$ 。

表 1 雷达参数

波长	0.04 m	H	13 km
信号带宽	50 MHz	v_{z0}	1500 m/s
采样率	100 MHz	a_x	-50 m/s ²
脉冲宽度	2 μ s	v_{z0}	-500 m/s
天线方位孔径长度	0.4 m	a_z	-10 m/s ²
PRF	9 kHz	场景中心坐标	(0, 4500, 0)

将两种算法对场景中心点 P_{mid} 的成像结果进行对比，如图 5 和图 6 所示，其中图 5(a)，图 6(a) 为点目标等高线图，图 5(b)，图 6(b) 为方位脉冲响应，图 5(c)，图 6(c) 为距离脉冲响应。可以看出，在由于导弹在俯冲下降飞行中运动姿态较为复杂，对斜距的 2 阶近似无法保留足够的斜距变化信息，造成点目标聚焦效果畸变，难以满足成像要求。而本文所提算法由于对斜距进行 4 阶近似，所得 2 维频谱中能够体现出较多的斜距变化信息，具有较高的精确度，因此对点目标具有良好的聚焦效果。

表 2 为本文算法对远、中、近 3 个点目标的成像质量评价结果。由表 2 可以看出，各项质量评价指标均与理论值较为接近，说明本文所述算法能够在弹载俯冲下降运动条件下进行全孔径高分辨成像。

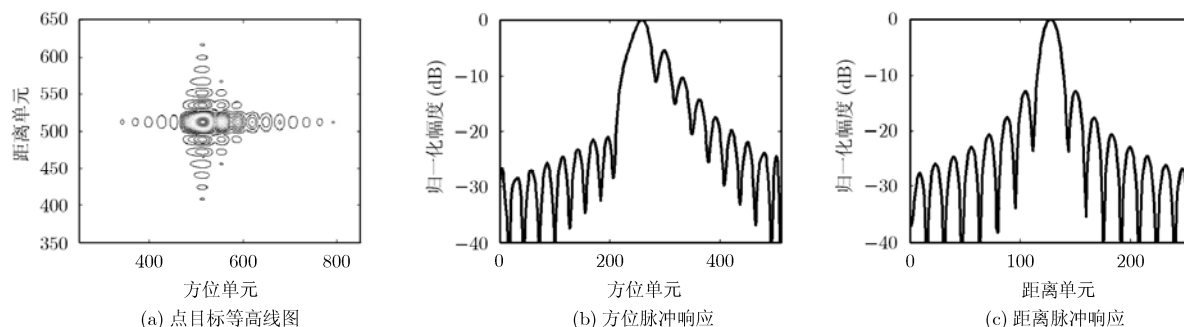


图 5 斜距 2 阶近似下的 R-D 算法成像结果

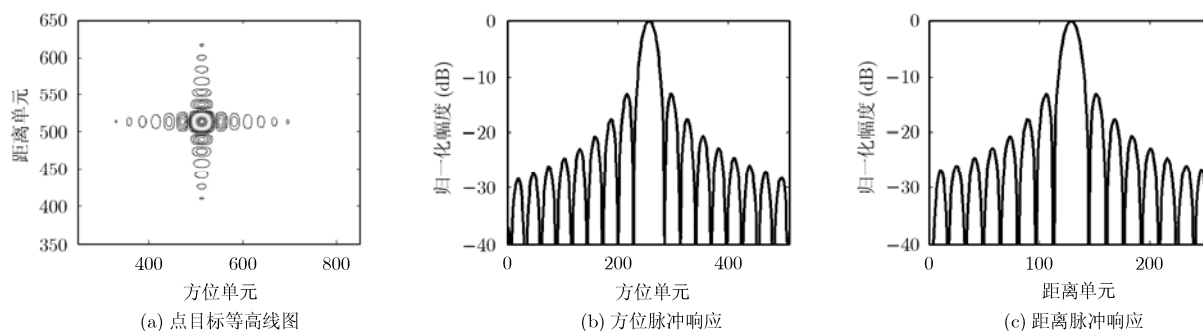


图 6 本文方法成像结果

表 2 本文算法成像结果质量评价

	理论值		P_{near}		P_{mid}		P_{far}	
	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向	方位向	距离向
分辨率(m)	0.2	3	0.2	3	0.2	3	0.2	3
PSLR(dB)		-13.26	-13.23	-13.18	-13.25	-13.26	-13.30	-13.29
ISLR(dB)		-9.8	-9.90	-9.98	-9.94	-9.82	-9.96	-9.98

6 结束语

本文首先分析了弹载 SAR 成像几何关系,指出了弹载 SAR 成像的难点,然后针对难点提出了对斜距公式进行 4 阶展开,利用卡尔丹方程解 3 阶相位方程得到驻相点的解决思路,进而得到信号的 2 维频谱表达式,并推导了相应的成像算法。文章最后通过点目标仿真对比,验证了本文所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 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.
Fang Li-li and Wang Yan-fei. Signal analysis and motion compensation of SAR data with diving acceleration [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(6): 1316-1320.
- [2] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 47-48.
- [3] Weisstein E W. CRC Concise Encyclopedia of Mathematics [M]. Boca Raton, London, New York, Washington D C CRS Press LLC, 1999: 362-365.
- [4] 秦玉亮, 王建涛, 王宏强, 黎湘. 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.
Qin Yu-liang, Wang Jian-tao, Wang Hong-qiang, and Li Xiang. Range Doppler algorithm based missile-borne SAR imaging with diving maneuver [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(11): 2563-2568.
- [5] 俞根苗, 尚勇, 邓海涛, 张长耀, 葛家龙, 吴顺君. 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, Zhang Chang-yao, Ge Jia-long, and Wu Shun-jun. Signal analysis and imaging processing of missile-borne side-looking SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(5): 778-782.
- [6] 孙兵, 周荫清, 陈杰, 李春升. 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.
- Sun Bing, Zhou Yin-qing, Chen Jie, and Li Chun-sheng. CA-ECS algorithm for squinted SAR imaging based on constant acceleration model [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(9): 1595-1599.
- [7] 秦玉亮, 王建涛, 王宏强, 黎湘. 基于 RD 算法的横向规避弹道弹载 SAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 731-733.
- Qin Yu-liang, Wang Jian-tao, Wang Hong-qiang, and Li Xiang. Range-Doppler algorithm based missile-borne SAR imaging with lateral avoidance trajectory[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(4): 731-733.
- [8] 易予生, 张林让, 刘楠, 刘昕, 申东. 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, Liu Xin, and Shen Dong. Imaging algorithm for missile-borne SAR with diving acceleration based on series reversion[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(12): 2863-2866.
- [9] 易予生, 张林让, 刘昕, 刘楠, 申东. 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.
- Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu Xin, Liu Nan, and Shen Dong. A large scene imaging algorithm for missile-borne side-looking SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(3): 587-592.
- [10] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(1) : 93-96.
- [11] Eldhuset K. A new fourth-order processing algorithm for spaceborne SAR[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 824-835.
- [12] Eldhuset K. Spaceborne bistatic SAR processing using the EETF4 algorithm [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(2): 194-198.
- 周 鹏: 男, 1982 年生, 博士生, 从事弹载 SAR 成像方面的研究工作.
- 熊 涛: 男, 1984 年生, 博士生, 从事双基 SAR 成像方面的研究工作.
- 周 松: 男, 1984 年生, 博士生, 从事弹载 SAR 成像方面的研究工作.
- 李亚超: 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 从事实时信号处理、雷达成像等方面的研究工作.
- 邢孟道: 男, 1975 年生, 博士, 教授, 从事雷达成像和目标识别等方面的研究工作.