

一种弹载侧视SAR大场景成像算法

易予生 张林让 刘昕 刘楠 申东
(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: 导弹的俯冲加速运动所带来的较大距离徙动使得 SAR 成像难度较大。该文根据弹载 SAR 平台的运动特点,使用高阶逼近模型建立了 SAR 的回波信号模型。考虑到大场景下的距离空变问题,对目标斜距随时间的变化进行了详细的分析。结合级数反演法,得到了弹载 SAR 回波信号的 2 维频域的精确表达式。基于此式,提出了一种适用于弹载 SAR 俯冲加速运动下的大场景成像算法。理论分析和实验结果表明,该算法对较大场景取得了较好的成像效果,距离向和方位向分辨率都达到了理论分辨率。

关键词: 弹载SAR; 俯冲加速运动; 距离徙动; 级数反演; 运动补偿

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)03-0587-06

DOI:10.3724/SP.J.1146.2009.00283

A Large Scene Imaging Algorithm for Missile-borne Side-looking SAR

Yi Yu-sheng Zhang Lin-rang Liu Xin Liu Nan Shen Dong
(National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The large range migration produced by missile diving acceleration flight make SAR image difficult. This paper establishes the echo model of the missile-borne SAR by using the high order range model based on the characters of the missile movements. Considering the large scene, the change of the slant range is analyzed in details. Then, the two-dimensional point target spectrum is derived by the method of series reversion. A large scene imaging algorithm used for diving acceleration flight is presented. Finally, simulation results are presented to demonstrate the accuracy and validity of the proposed algorithms. The resolution of range and azimuth are identical with the theoretical values.

Key words: Missile-borne SAR; Diving acceleration; Range migration; Series reversion; Motion compensation

1 引言

为了提高导弹精确打击能力,除了采用先进的初始定位系统,提高初段和中段引导精度,赋予导弹足够的机动能力外,还需要借助末段探测装置,以提高末端制导精度。弹载条件下,如能利用合成孔径雷达得到高分辨率图像,通过景象匹配提高目标命中精度,军事意义更大,因此,近年来弹载SAR的研究也逐渐升温。

导弹攻击目标时,通常伴随着高度和速度的变化。该运动特点使得弹载SAR的距离徙动现象十分严重,致使一些成像算法的成像精度降低甚至无法成像。文献[1,2]将导弹飞行模型近似为直线,从而转化为斜视成像,这对于导弹垂直方向速度小的情况是适用的,但当垂直速度较大时上述近似很难成立。文献[3]研究了高速俯冲条件下SAR成像方法,提出了一种等效正侧视的工作模式,在这种模式下场景中心处目标的距离徙动较小,因而可以实现成像功能。但由于实际条件的限制,一般情况下会偏

离这种等效正侧视工作模式,该算法的使用也受到一定的限制。文献[4]探讨了弹载侧视合成孔径雷达在导弹下降飞行过程中成像的可能性。通过采用子孔径处理,能够得到聚焦良好的子孔径图像。但采用子孔径处理后,虽然距离徙动能够得到很好的校正,但方位向的分辨率降低。文献[5,6]根据高速俯冲SAR的信号特点,利用改进的ECS成像算法进行成像处理,但在距离徙动校正时采用了插值处理,一方面增加了运算量,另一方面校正的精度取决于插值的精度。

本文提出了一种适用于弹载 SAR 俯冲加速运动下的大场景成像算法。该算法对弹载 SAR 的几何构型没有采取任何近似并采用了全孔径处理,在处理中同时考虑了距离空变的问题,因而能够精确地校正距离徙动并且保证了方位向的分辨率,适应于较大场景的成像。理论分析和实验结果表明,该算法对较大场景取得了较好的成像效果,距离向和方位向分辨率都达到了理论分辨率并且运算量小(成像过程中不需要插值)。

2 弹载侧视 SAR 的斜距历史分析

弹载侧视 SAR 在俯冲运动时的几何关系如图 1

2009-03-06 收到, 2009-09-21 改回

国家自然科学基金(60672130)和重点实验室基金资助课题

通信作者: 易予生 yiyusheng@163.com

所示。图中，弧 \widehat{ABC} 为导弹飞行轨迹，在地面的投影为 Y 轴。虚线中的部分为成像带，与 Y 轴平行。 t_m 为方位慢时间。设在 $t_m = 0$ 时刻，导弹位于 B 点，高度为 H ，沿 X 轴的速度分量为 0，沿 Y 轴方向的速度分量为 V_y ，加速度为 a_y ，沿 Z 轴的速度分量为 V_z ，加速度为 a_z 。 P 点为一点目标，到 Y 轴的距离为 x_0 。在任意 t_m 时刻，导弹到目标斜距为 $R(t_m; \Delta R)$ 。

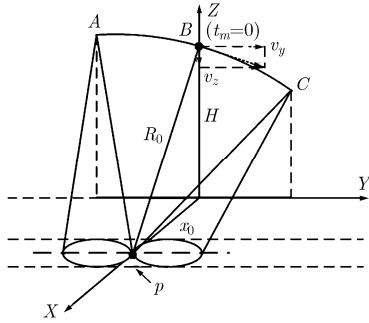


图 1 弹载侧视 SAR 几何模型

$$R(t_m; \Delta R) = \sqrt{\left(H + V_z t_m + \frac{1}{2} a_z t_m^2\right)^2 + (x_0 + \Delta R)^2 + \left(V_y t_m + \frac{1}{2} a_y t_m^2\right)^2} \quad (1)$$

其中 ΔR 代表目标相对场景中心的距离位置偏移。

考虑到导弹垂直向速度和加速度将产生较严重的距离走动，本文在推导过程中对斜距进行三阶泰勒展开，令 $a = 2H V_z$ ， $b = V_z^2 + H a_z + V_y^2$ ， $e = V_z a_z + V_y a_y$ ， $d = (a_z^2 + a_y^2)/4$ ， $R_0 = \sqrt{H^2 + x_0^2}$ ，有

$$R(t_m; \Delta R) = R_s + k_{10} t_m + k_{20} t_m^2 + k_{30} t_m^3 + \dots \quad (2)$$

其中

$$R_s = R_0 + \frac{x_0}{R_0} \Delta R, \quad k_{10} = \frac{a}{2R_s}, \quad k_{20} = \frac{1}{2} \left(\frac{b}{R_s} - \frac{a^2}{4R_s^3} \right),$$

$$k_{30} = \frac{1}{6} \left(\frac{3e}{R_s} - \frac{3ab}{2R_s^3} \right)$$

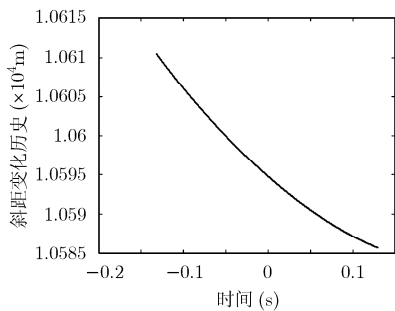


图 2 P_1 点的斜距历史

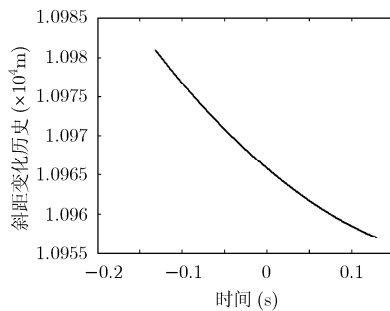


图 3 P_2 点的斜距历史

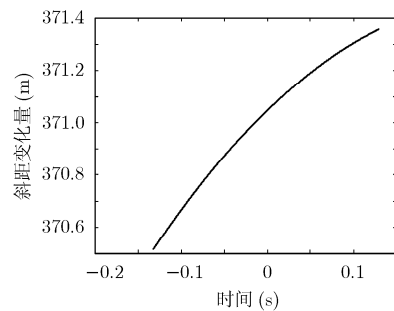


图 4 P_1 点与 P_2 点的斜距历程差

为了比较弹载侧视条件下大场景中的目标斜距的历史差异，现假设地面有 P_1, P_2 两个点目标， P_1, P_2 分别位于成像带的两端，沿距离向相距 1000 m(其余参数见第 4 节表 1)。图 2 为场景中心点 P_1 的斜距变化曲线，图 3 为 P_2 点的斜距变化曲线。从图 2，图 3 可以看出，导弹作俯冲加速运动时的斜距历史与常规直线运动时的斜距历史有较大差异，这即是一些成像算法的成像精度降低甚至无法成像的原因。图 4 为 P_1 点和 P_2 点的斜距历程差。由图 4 可以看出， P_1 点和 P_2 点具有不同的斜距历史，即由距离弯曲引起的耦合部分在条带场景内是变化的，场景两端的距离弯曲差为 0.85 m，按照 3 m 的距离分辨率计算，距离弯曲差超过了距离分辨率的 1/4，表明该系统的距离空变性需要考虑。下面将在对斜距进行三阶泰勒展开的基础上，提出一种基于级数反演法的 ECS(Extended Chirp Scaling)算法来解决大场景下的距离空变问题，实现场景成像。

表 1 弹载 SAR 系统参数

信号带宽	50 MHz
信号脉宽	2 μ s
信号波长	0.03 m
脉冲重复频率	20000 Hz
采样频率	200 MHz
弹体高度	10000 m
零时刻导弹的投影点到场景中心的距离	4000 m
平台水平方向速度	2000 m/s
平台水平方向加速度	-50 m/s ²
平台竖直方向速度	-100 m/s
平台竖直方向加速度	-9.8 m/s ²
天线方位向长度	0.6 m

3 弹载侧视 SAR 成像算法分析

假设雷达发射线性调频信号，则雷达接收的点目标回波的基频信号在距离快时间-方位慢时间域 ($\hat{t} - t_m$ 域)可写为

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

式(3)中, $a_r(\cdot)$ 为发射脉冲包络, $a_a(\cdot)$ 由收发系统天线的方向性函数决定。 \hat{t} 为距离快时间, $\lambda = c/f_0$ 为中心频率对应的波长, c 为光速, γ 为调频率。

3.1 基于级数反演法的目标 2 维频谱计算

令 $R_1(t_m) = R_{\text{cen}} + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 + \dots$, $R_{\text{cen}} = 2R_s, k_1 = 2k_{10}, k_2 = 2k_{20}, k_3 = 2k_{30}$, 有

$$S_A(\hat{t}, t_m) = a_r \left(\hat{t} - \frac{R_1(t_m)}{c} \right) a_a(t_m) \cdot \exp \left[j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{R_1(t_m)}{c} \right)^2 \right] \exp \left[-j2\pi \frac{R_1(t_m)}{\lambda} \right] \quad (4)$$

把上述信号变换到距离频域(f_r), 得

$$S_A(f_r, t_m) = a_r(f_r) a_a(t_m) \exp \left\{ -j2\pi \frac{(f_0 + f_r) R_1(t_m)}{c} \right\} \cdot \exp \left[-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \right] \quad (5)$$

对式(5)进行方位维 FFT, 采用级数反演法^[7,8]可得 $s_A(\hat{t}, t_m)$ 2 维频域表达式为

$$S_A(f_r, f_a) = a_r(f_r) a_a(f_a) \exp \left\{ -j2\pi \frac{(f_0 + f_r) R_1(t_m(f_a))}{c} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_a t_m(f_a) \right\} \exp \left[-j \frac{\pi f_r^2}{\gamma} \right] \quad (6)$$

f_a 为方位频率。由傅里叶变换的性质并保留了 f_a 的 3 次及以下相位, 可得目标回波 $s(\hat{t}, t_m)$ 的 2 维频谱为

$$S(f_r, f_a) = a_r(f_r) a_a(f_a) \exp \{ j\psi(f_r, f_a) \} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \psi(f_r, f_a) = & -2\pi \left(\frac{f_0 + f_r}{c} \right) R_{\text{cen}} - \frac{\pi f_r^2}{K_r} \\ & + 2\pi \frac{c}{4k_2(f_0 + f_r)} \left(f_a + (f_0 + f_r) \frac{k_1}{c} \right)^2 \\ & + 2\pi \frac{c^2 k_3}{8k_2^3(f_0 + f_r)^2} \left(f_a + (f_0 + f_r) \frac{k_1}{c} \right)^3 \end{aligned}$$

3.2 弹载侧视 SAR 成像算法

SAR 系统中一般 $f_0 \gg f_a$, 可将式(7)中的相位项进一步展开, 可得

$$\psi(f_r, f_a) = \psi_0(f_a) + \psi_1(f_a) f_r + \psi_2(f_a) f_r^2 \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \psi_0(f_a) = & -2\pi f_0 \frac{R_{\text{cen}}}{c} + \frac{\pi c f_a^2}{2f_0 k_2} + \frac{\pi k_1 f_a}{k_2} + \frac{\pi f_0 k_1^2}{2c k_2} \\ & + \frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{4f_0^2 k_2^3} + \frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{4k_2^3 f_0} + \frac{3\pi k_1^2 k_3 f_a}{4k_2^3} + \frac{\pi f_0 k_1^3 k_3}{4c k_2^3} \\ \psi_1(f_a) = & -\frac{2\pi R_{\text{cen}}}{c} - \frac{\pi c f_a^2}{2k_2 f_0^2} + \frac{\pi k_1^2}{2c k_2} - \frac{\pi c^2 k_3 f_a^3}{2k_2^3 f_0^3} \\ & - \frac{3\pi c k_1 k_3 f_a^2}{4k_2^3 f_0^2} + \frac{\pi k_1^3 k_3}{4c k_2^3} \\ \psi_2(f_a) = & -\frac{\pi}{\gamma} + \frac{\pi c f_a^2}{2k_2 f_0^3} + \frac{3\pi c^2 k_3 f_a^3}{4k_2^3 f_0^4} + \frac{3\pi c^2 k_1 k_3 f_a^2}{4k_2^3 f_0^3} \end{aligned}$$

式(8)中的第 1 项 ψ_0 与 f_r 无关, 为方位调制项, 第 2 项 ψ_1 为 f_r 线性项的系数, 表征了目标的距离徙动, 第 3 项 ψ_2 为 f_r 平方项的系数, 为目标的距离调频率, 这 3 项均与 ΔR 有关, 体现了弹载 SAR 的距离空变性。为了便于设计成像算法, 需要得到 ψ_0, ψ_1, ψ_2 相对 ΔR 的解析表达式。将 k_1, k_2, k_3 分别代入 ψ_0, ψ_1, ψ_2 , 并在 $\Delta R=0$ 处做泰勒级数展开(大多数情况下可用 ΔR 的一次多项式作较准确的近似, 对于一些特殊情况, 如测绘带宽度与斜距很接近, 并且非常大时, 可通过对条带分块处理来解决), 即可得到 ψ_0, ψ_1, ψ_2 相对 ΔR 的解析表达式。其中 ψ_1 为

$$\psi_1(f_a, \Delta R) = A(f_a) + B(f_a) \Delta R \quad (9)$$

令 $w = \frac{b}{R_0} - \frac{a^2}{4R_0^3}$, 则

$$\begin{aligned} A(f_a) = & -\frac{4\pi R_0}{c} - \frac{\pi c f_a^2}{2w f_0^2} + \frac{\pi a^2}{2c w R_0^2} - \frac{\pi c^2 f_a^3}{2f_0^3 w^3} \left(\frac{e}{R_0} - \frac{ab}{2R_0^3} \right) \\ & - \frac{3\pi c f_a^2}{4f_0^2 w^3} \left(\frac{ae}{R_0^2} - \frac{a^2 b}{2R_0^4} \right) + \frac{\pi}{4c w^3} \left(\frac{a^3 e}{R_0^4} - \frac{a^4 b}{2R_0^6} \right) \\ B(f_a) = & -\frac{4\pi x_0}{c R_0} - \frac{\pi c x_0 f_a^2}{2w^2 f_0^2} \left(\frac{b}{R_0^3} - \frac{3a^2}{4R_0^5} \right) - \frac{\pi x_0}{2c w^2} \left(\frac{a^2 b}{R_0^5} \right. \\ & \left. + \frac{a^4}{4R_0^7} \right) - \frac{\pi c^2 x_0 f_a^3}{2w^4 f_0^3} \left(\frac{2be}{R_0^4} - \frac{2a^2 e}{R_0^6} + \frac{3a^3 b}{4R_0^8} \right) \\ & - \frac{3\pi c x_0 f_a^2}{4w^4 f_0^2} \left(\frac{abe}{R_0^5} + \frac{2a^2 b^2 - 7a^3 e}{4R_0^7} + \frac{5a^4 b}{8R_0^9} \right) \\ & + \frac{\pi x_0}{4w^4 c} \left(-\frac{a^3 b e}{R_0^7} + \frac{6a^4 b^2 - 5a^5 e}{4R_0^9} + \frac{3a^6 b}{8R_0^{11}} \right) \end{aligned}$$

对上式进行距离 IFFT, 可得

$$s(\hat{t}, f_a) = a_r \left(\hat{t} + \frac{\psi_1(f_a, \Delta R)}{2\pi} \right) a_a(f_a) \cdot \exp \left\{ j \left[\psi_0(f_a) - \frac{\pi^2}{\psi_2(f_a)} \left(\hat{t} + \frac{\psi_1(f_a, \Delta R)}{2\pi} \right)^2 \right] \right\} \quad (10)$$

为了将所有距离单元目标的距离徙动轨迹都调整到与场景中心目标的距离徙动一致, 在距离多普勒域乘以 CS 变标因子^[9]

$$H_1(\hat{t}, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{\pi^2}{\psi_2(f_a)} C_s(f_a) [\hat{t} - \hat{t}_{\text{ref}}(f_a)]^2 \right\} \quad (11)$$

其中

$$\begin{cases} C_s(f_a) = B(f_a) - 1 \\ \hat{t}_{\text{ref}}(f_a) = 2A(f_a)/c \end{cases} \quad (12)$$

经过 CS 因子相乘后, 对信号进行距离 FFT 得

$$\begin{aligned} S(f_r, f_a) = & a_r \left[-\frac{\psi_2(f_a) f_r}{\pi [1 + C_s(f_a)]} \right] a_a(f_a) \exp \{ j \psi_0(f_a) \} \\ & \cdot \exp \left\{ j \frac{\psi_2(f_a) f_r^2}{B(f_a)} \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi A(f_a) f_r}{c} \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi \Delta R}{c} f_r \right\} \\ & \cdot \exp \left\{ j \frac{4\pi^2 B(f_a) [1 - B(f_a)] \Delta R^2}{c^2 \psi_2(f_a)} \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

2 维频率域的距离聚焦和距离徙动校正函数 $H_2(f_r, f_a)$ 为

$$H_2(f_r, f_a) = \exp \left\{ -j \frac{\psi_2(f_a) f_r^2}{B(f_a)} \right\} \exp \left\{ j \frac{4\pi A(f_a) f_r}{c} \right\} \quad (14)$$

接下来对信号进行距离 IFFT 后, 即可进行方位压缩和方位剩余相位校正, 补偿函数 $H_3(\hat{t}, f_a)$ 为

$$\begin{aligned} H_3(\hat{t}, f_a) = & \exp \{ -j \psi_0(f_a) \} \\ & \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi^2 B(f_a) [1 - B(f_a)] \Delta R^2}{c^2 \psi_2(f_a)} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $\Delta R = c\hat{t}/2$ 。将完成方位脉压后的信号进行方位逆傅里叶变换, 将信号变换到 $\hat{t} - t_m$ 域, 至此即完成了成像处理。此算法流程如图5所示。

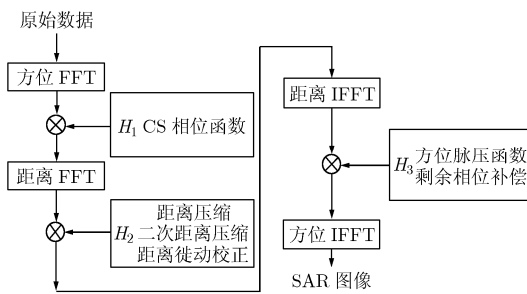


图5 弹载侧视SAR成像算法流程

4 仿真实验

为了比较子孔径方法和本文方法的成像结果, 首先对单点目标进行成像仿真。设该点位于零时刻的波束中心点的位置, 坐标为 (4000, 0, 0) m, 其它参数见表1。

图6和图7分别为采用子孔径方法和本文方法的

成像结果。其中, (a)为点目标的成像结果, (b), (c)为方位向脉冲响应和距离向脉冲响应的归一化幅度图。由图6(b), 7(b)可以看出, 采用本文方法得到的方位向脉冲响应的-3 dB宽度明显小于采用子孔径处理的方法得到的结果。本文方法的方位分辨率达到了理论分辨率0.3 m, 而子孔径方法得到的方位分辨率仅为1 m。可见本文算法在方位向上能够得到更高的分辨率。从图6(c), 7(c)可以看出, 本文方法和子孔径方法得到得距离分辨率都为3.5 m, 与理论值3 m的分辨率比较接近。

下面给出本文方法的场景成像结果。假设场景中不存在3个点目标, 坐标分别为 $P_1(3500, 0, 0)$ m, $P_2(4000, 0, 0)$ m, $P_3(4500, 0, 0)$ m。其中, P_2 为波束中心点。其它参数同表1, 采用图5的处理流程, 成像结果如图8所示。

表2给出了 P_1, P_2, P_3 3个点目标在上述参数下的成像性能分析, 其中, PSLR为峰值旁瓣比, ISLR为积分旁瓣比。场景边缘的 P_1, P_3 点的距离向和方位向的峰值旁瓣比、积分旁瓣比与其理论值-13.26 dB和-9.8 dB比较接近, 可见, 本文方法能够解决较大的场景的距离空变问题, 取得了较好的成像效果。

表2 点目标成像结果性能分析

	距离向		方位向	
	PSLR(dB)	ISLR(dB)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
P_1	-13.18	-9.69	-13.16	-9.71
P_2	-13.24	-9.78	-13.23	-9.74
P_3	-13.21	-9.64	-13.09	-9.68

5 结论

本文首先根据弹载SAR平台俯冲加速运动的特点, 使用高阶逼近模型建立SAR回波信号模型, 推导了目标距离的一般化的数学表达式。通过级数反演法, 推导出了弹载SAR回波信号的2维频域的精确表达式, 在此基础上, 提出了一种适用于弹载SAR俯冲加速运动下的成像算法。该算法采用全孔径处理从而保证了方位向的分辨率。在处理中同时考虑了距离空变的问题, 因而能够精确地校正距离徙动, 适应于较大场景的成像。理论分析和实验结果表明, 该算法对较大场景取得了较好的成像效果, 距离向和方位向分辨率都达到了理论分辨率。

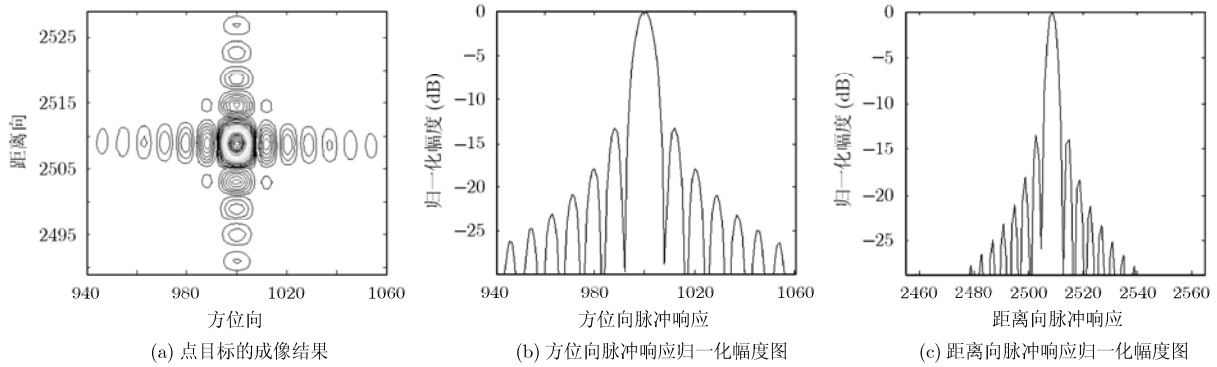


图 6 采用子孔径方法点目标成像结果

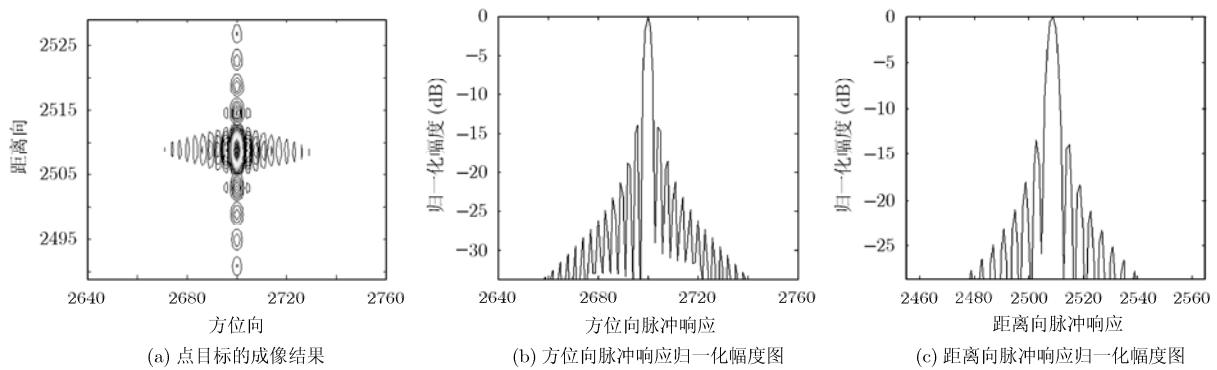


图 7 采用本文方法点目标成像结果

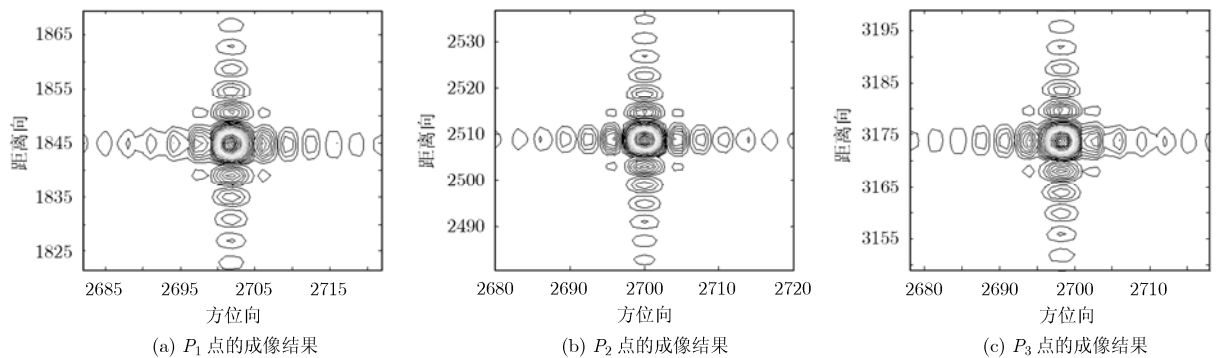


图 8 大场景点目标成像结果

参 考 文 献

[1] Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu Xin, Liu Nan, and Shen Dong. Study on imaging algorithm for missile-borne side-looking SAR[C]. 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Huangshan, China, November. 5-9, 2007: 413-417.

[2] 燕英, 周荫清, 李春升, 许丽香. 弹载合成孔径雷达成像处理及定位误差分析[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(12): 1932-1938.

Yan Ying, Zhou Yin-qing, Li Chun-sheng, and Xu Li-xiang. Missile-borne SAR imaging and error analysis of positioning[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2002, 24(12): 1932-1938.

[3] 孙兵, 周荫清, 陈杰. 高速俯冲 SAR 成像方法研究[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(9): 173-180.

Sun Bing, Zhou Yin-qing, and Chen Jie. Imaging method of missile-borne SAR with high diving speed[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2004, 26(9): 173-180.

[4] 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.

- [5] 孙兵, 周荫清, 陈杰, 李春升. 基于俯冲模型的 SAR 成像处理和几何校正[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(4): 435-439. Sun Bing, Zhou Yin-qing, Chen Jie, and Li Chun-sheng. SAR imaging formation and geometric correction method based on diving model[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(4): 435-439.
- [6] 房丽丽, 王岩飞. 俯冲加速运动状态下 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.
- [7] Neo Y L, Wong F H, and Cumming I. 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.
- [8] 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.
- [9] 李燕平, 邢孟道, 井伟, 保铮. 一种双基 SAR 的 SR-ECS 成像算法[J]. 自然科学进展, 2008, 3(18): 323-333.
- 易予生: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为弹载 SAR 成像算法以及双站 SAR 成像算法研究.
- 张林让: 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为阵列信号处理、自适应信号处理和雷达系统建模与仿真.
- 刘 昕: 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像、信号检测与估计.
- 刘 楠: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达信号建模与处理、地面动目标检测.
- 申 东: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 波形设计.