

前视多通道合成孔径雷达解模糊成像方法

卢景月 张磊* 王冠勇

(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: 传统合成孔径雷达方位向分辨率仅由合成孔径提供,但在正前视区域多普勒分集有限,成像性能迅速下降且前视成像也存在固有的左右多普勒模糊问题。针对上述问题该文讨论前视多通道合成孔径雷达系统模型,提出一种理想直线航迹下空域零点约束自适应波束形成的成像方法,有效综合阵列实孔径和合成孔径提高正前视区域的成像质量,利用有限阵列空域自由度实现左右多普勒解模糊。首先对回波数据大前斜成像处理,得到左右模糊的图像,然后进行波束形成,将各通道图像加权并且相干累加,实现左右多普勒解模糊以及方位分辨率增强。仿真实验表明空域零点约束自适应波束形成的成像方法可对前视场景进行高分辨成像。

关键词: 合成孔径雷达; 前视成像; 方位向分辨率; 多普勒模糊; 波束形成

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)12-2820-06

DOI: 10.11999/JEIT180177

Ambiguity Resolving and Imaging Algorithm for Multi-channel Forward-looking Synthetic Aperture Radar

LU Jingyue ZHANG Lei WANG Guanyong

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

Abstract: The azimuth resolution of traditional synthetic aperture radar is only provided by synthetic aperture. However, in the forward looking area, the Doppler diversity is limited, so the imaging performance declines rapidly. And forward looking imaging also has the Doppler ambiguity problem. In this paper, an adaptive beam forming method with spatial confinement under ideal line track is proposed. The imaging quality of the positive forward region is improved effectively by combining the array of real aperture and synthetic aperture, and the Doppler solution is blurred by using the array space domain. First, the echo data is processed by High Squint SAR imaging to obtain the blurred image. Then the beam-forming is performed, weighted and coherent accumulated with each channel image, so as to resolve Doppler ambiguity and enhance the azimuth resolution. Simulation confirms the validity of the proposed approach.

Key words: SAR; Forward-looking imaging; Azimuth resolution; Doppler ambiguity; Beam forming

1 引言

合成孔径雷达(SAR)^[1-3]可对平台运动方向两侧场景进行高分辨成像,受工作原理限制,平台运动方向正前方区域没有多普勒分集,传统SAR成像存在前视盲区。但在精确制导、战场侦察等应用领域,迫切需要对正前方区域进行高分辨成像,也即前视成像。在前视成像模式下,方位向与距离向接近一致使得前视分辨困难^[4],同时运动航线两侧对称场景具有相同的多普勒历史,导致前视成像处理

需要同时面对距离-方位强耦合和左右多普勒模糊两个特点问题^[5]。现有前视雷达成像技术原理上可分为以下几类:(1)密集阵列SAR系统的前视成像技术^[6],典型代表为德国宇航局提出的视景增强的新型区域成像雷达系统(Sector Imaging Radar for Enhanced Vision, SIREV)^[7]。该技术利用阵列天线在垂直航向方向形成实孔径,前视方位分辨率仅由阵列实孔径提供,受阵列实孔径物理尺寸约束,系统复杂度相对较大。(2)双天线前视SAR成像技术^[8],利用合成孔径对前视区域进行模糊成像,通过双天线组成二元阵列利用波程差解左右模糊;该技术前视方位分辨率仅由合成孔径提供,而在正前方区域合成孔径对方位分辨贡献较小,导致正前视区域分辨率较低;且二元阵列方位自由度较低,容易出现奇异点导致无法解模糊,成像性能不够稳健。(3)单

收稿日期: 2018-02-09; 改回日期: 2018-07-10; 网络出版: 2018-07-24

*通信作者: 张磊 775807665@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771372, 61771367)

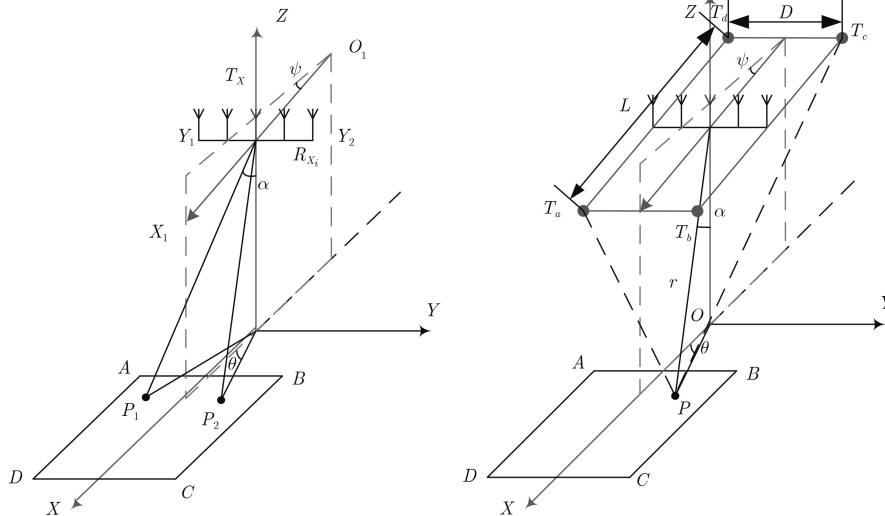
Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61771372, 61771367)

脉冲前视成像技术，该技术原理是对脉冲压缩信号沿距离单元内的目标信号进行解卷积^[9]或者和差测角^[10-13]实现信号分量方位定位聚焦提高前视场景可视性，该技术一般需要结合系统波束扫描工作，成像性能受单脉冲测角原理约束，在复杂且对比度较低的场景，成像性能下降较快，此外其前视分辨率理论机理也较为模糊。

传统SAR方位向分辨率仅由合成孔径提供，在正前视区域成像质量较差。本文讨论前视多通道合成孔径雷达(Forward Looking Multi-Channel SAR, FLMC-SAR)模型，定义方位向为垂直航线方向，通过拓展波数域理论^[14]推导FLMC-SAR方位向角分辨率显式表达，明确指出FLMC-SAR方位向角分辨率由合成孔径和阵列实孔径共同提供；然后详细分析了FLMC-SAR成像中的左右多普勒模糊问题，提出了一种空域零点约束自适应波束形成的高分辨成像方法，有效综合阵列实孔径和合成孔径实现前视高分辨，利用有限阵列空域自由度解左右多普勒模糊，实现FLMC-SAR无模糊成像聚焦。首先对回波信号大前斜SAR成像处理，得到左右模糊的图像，然后进行空域波束形成，将各通道图像加权并且相干累加，实现左右多普勒解模糊以及方位分辨率增强。与现有的前视成像技术相比，该系统综合利用合成孔径与实孔径，提高了前视成像质量，具有系统复杂度低、通道数少、成像稳健可靠等优点。仿真实验表明该方法可对前视场景进行高分辨成像。

2 系统模型与问题分析

FLMC-SAR几何模型如图1(a)所示。以雷达航迹方向在地面上的投影为X轴，天线阵列分布方向为Y轴，离地高度方向为Z轴，建立直角坐标系。



(a) FLMC-SAR几何模型

O_1X_1 为航迹，航迹与X轴夹角为下压角 ψ ；波束与Z轴夹角为波束指向俯仰角 α ，波束地面投影与X轴夹角为波束指向方位角 θ ， R_{X_i} 为接收天线阵列，采用均匀线性阵列，均匀对称分布在 Y_1Y_2 上，天线阵元间距为 d 。 T_x 为发射天线，位于 Y_1Y_2 中点，与中心接收天线重叠。

首先考虑单天线，点目标的情况。假设波束照射区域内存在两个点目标 P_1 和 P_2 ，关于X轴对称，其坐标分别为 $P_1(x_0, -y_0, 0)$ ， $P_2(x_0, y_0, 0)$ ，天线阵列坐标为 (vt_m, y_i, h) ，则目标 P_1, P_2 的斜距方程，发射斜距 R_{Tx_1}, R_{Tx_2} 和接收斜距 R_{Rx_1}, R_{Rx_2} 为

$$\left. \begin{aligned} R_{Tx_1}(t_m) &= \sqrt{(vt_m - x_0)^2 + y_0^2 + h^2} \\ R_{Tx_2}(t_m) &= \sqrt{(vt_m - x_0)^2 + y_0^2 + h^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} R_{Rx_1}(t_m, y_i) &= \sqrt{(vt_m - x_0)^2 + (y_0 + y_i)^2 + h^2} \\ R_{Rx_2}(t_m, y_i) &= \sqrt{(vt_m - x_0)^2 + (y_0 - y_i)^2 + h^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中， v 为平台飞行速度， t_m 为慢时间， h 为平台高度， y_i 为第 i 个接受天线的方位向坐标。则对于一个点目标而言，电磁波双程斜距为

$$R(t_m, y_i) = R_{Tx}(t_m) + R_{Rx}(t_m, y_i) \quad (3)$$

于是天线接收信号可表示为

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t_m, y_i) &= A_{ps0}(\hat{t}, t_m, y_i) = A_{pw_r} \left(\hat{t} - \frac{R(t_m, y_i)}{c} \right) \\ &\cdot \exp \left[j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{R(t_m, y_i)}{c} \right)^2 \right] \cdot w_a \left(t_m - \frac{x_a}{v} \right) \\ &\cdot \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} R(t_m, y_i) \right], \quad -\frac{D}{2} \leq y_i \leq \frac{D}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

图 1 FLMC-SAR系统模型

式中, A_p 为点目标的散射系数, x_a 为目标载机飞行方向的坐标, \hat{t} 为快时间, t_m 为慢时间, $w_r(\hat{t})$ 为距离向包络, $w_a(t_m)$ 为方位向包络, γ 为发射线性调频信号的调频率, D 为阵列天线孔径大小, $s_0(\hat{t}, t_m, y_i)$ 表示幅度归一化后的接收信号。

由式(1)可以看出 $R_{Tx_1}(t_m) = R_{Tx_2}(t_m)$, 发射斜距 R_{Tx} 与接收阵列坐标 y_i 无关, 而接收斜距 R_{Rx} 与阵列坐标有关, 不同通道之间接收斜距存在差异, $R_{Rx_1}(t_m) \neq R_{Rx_2}(t_m)$ 。但是由于 $y_i \ll h$, 则 $\Delta R_{Rx} = R_{Rx_1} - R_{Rx_2} \ll R_{Rx_1}$, 对于左右对称的两个点目标, 各个通道的接收斜距存在差值, 但其引起的波程差也是非常小的, 因此在距离分辨率不是特别高的情况下, 该差值不足以导致一个距离

$$R = \sqrt{(X - r \sin \alpha \cos \theta)^2 + (Y - r \sin \alpha \sin \theta)^2 + r \cos \alpha^2} \quad (5)$$

由式(5)对 $\sin \theta$ 求导可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial R}{\partial \sin \theta} &= \frac{-2r^2 \sin^2 \alpha \sin \theta + 2Xr \sin \alpha \tan \theta + 2r^2 \sin^2 \alpha \sin \theta - 2Yr \sin \alpha}{2\sqrt{(X - r \sin \alpha \cos \theta)^2 + (Y - r \sin \alpha \sin \theta)^2 + r \cos \alpha^2}} \\ &= \frac{r \sin \alpha (X \tan \theta - Y)}{\sqrt{(X - r \sin \alpha \cos \theta)^2 + (Y - r \sin \alpha \sin \theta)^2 + r \cos \alpha^2}} \end{aligned} \quad (6)$$

角度波数定义如式(7)

$$K_{\sin \theta}(X, Y) = \frac{\partial R}{\partial \sin \theta} \cdot K_{rc} \quad (7)$$

由 $r \gg X, r \gg Y$ 可得 $R \gg X, R \gg Y$, 则 R 可以看作与 X, Y 无关, 式(7)可化为

$$\begin{aligned} K_{\sin \theta}(X, Y) &= \frac{\partial R}{\partial \sin \theta} \cdot K_{rc} \\ &= \frac{r \sin \alpha (X \tan \theta - Y)}{R} \cdot K_{rc} \end{aligned} \quad (8)$$

角度分辨率对应的波数带宽为

$$\begin{aligned} \Delta K_{\sin \theta} &= (K_{\sin \theta_MAX} - K_{\sin \theta_MIN}) \\ &= \{r \sin \alpha [\tan |\theta| (X_{\max} - X_{\min}) \\ &\quad + Y_{\max} - Y_{\min}]\} / R \cdot K_{rc} \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $|\theta|$ 为目标方位角 θ 的绝对值, 由图1(b)易得

$$\left. \begin{aligned} X_{\max} - X_{\min} &= L \cos \psi \\ Y_{\max} - Y_{\min} &= D \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

代入式(9)可得

$$\Delta K_{\sin \theta} = \frac{r \sin \alpha (\tan |\theta| L \cos \psi + D)}{R} \cdot K_{rc} \quad (11)$$

则方位角分辨率为

$$\begin{aligned} \Delta(\sin \theta) &= \frac{2\pi}{\Delta K_{\sin \theta}} = \frac{2\pi R}{r \sin \alpha (\tan |\theta| L \cos \psi + D) K_{rc}} \\ &= \frac{\lambda R}{2r \sin \alpha (\tan |\theta| L \cos \psi + D)} \end{aligned} \quad (12)$$

门的变化, P_1 和 P_2 的回波信号混叠, 这就造成了FLMC-SAR的左右多普勒模糊。

3 FLMC-SAR成像方位角分辨率分析

FLMC-SAR通过发射大的带宽信号以及脉冲压缩技术来获得距离向高分辨, 而方位向高分辨是由合成孔径以及阵列实孔径共同提供。图像的分辨率是由空间波数域的覆盖范围决定的, 系统的空间波数域覆盖范围示意图如图1(b)所示, 波束地面投影与 X 轴夹角为波束指向方位角 θ , D 为阵列天线孔径长度, L 为合成孔径长度, r 为目标参考斜距, T_a, T_b, T_c, T_d 为合成孔径时间内飞行轨迹的边缘点, P 为点目标其坐标为 $P(r \sin \alpha \cos \theta, r \sin \alpha \sin \theta, 0)$, 设天线坐标为 $(X, Y, r \cos \alpha)$, 代入斜距方程得

由式(12)可见, 系统方位角分辨是由合成孔径和阵列实孔径共同提供, 且随着目标方位角绝对值变小, 即目标靠近正前视中心区域, 前视方位角分辨将越来越取决于实孔径尺寸。

4 FLMC-SAR成像处理流程

与传统SAR不同, FLMC-SAR存在距离-方位强耦合前视分辨困难和左右多普勒模糊两个问题。本文提出一种空域零点约束自适应波束形成的高分辨FLMC-SAR成像方法, 有效综合阵列实孔径和合成孔径提高前视分辨率, 并利用有限阵列空域自由度解左右多普勒模糊, 实现FLMC-SAR无模糊成像聚焦。首先对回波信号大前斜SAR成像处理, 这里采用向后投影(Back Projection, BP)算法, 然后进行空域波束形成解模糊, 将各通道图像加权并且相干累加, 实现左右多普勒解模糊以及方位分辨率增强。

对回波信号进行距离脉冲压缩处理, 脉冲压缩后的信号可表示为

$$\begin{aligned} s_1(\hat{t}, t_m, y_i) &= \text{IFFT}\{\text{FFT}[s(\hat{t}, t_m, y_i)] \cdot \text{FFT}[s_{\text{ref}}(\hat{t})]\} \\ &= A_p \text{sinc} \left[\pi B \left(\hat{t} - \frac{R(t_m, y_i)}{c} \right) \right] \\ &\quad \cdot w_a \left(t_m - \frac{x_0}{v} \right) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} R(t_m, y_i) \right] \end{aligned} \quad (13)$$

式中, $s(\hat{t}, t_m, y_i)$ 为原始信号, B 为发射信号带宽, sinc 为采样函数, $s_{\text{ref}}(\hat{t})$ 为匹配函数。

$$s_{\text{ref}}(\hat{t}) = w_r(\hat{t}) \exp(-j\pi\gamma\hat{t}^2) \quad (14)$$

得到距离脉冲压缩后的回波数据后, 接下来进行BP成像, BP成像的实质是一个像素重建的过程, 设目标函数 $f(\rho, \theta)$ 表示点位置 $(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)$ 的散射函数, 则重建结果为

$$f_{P_1}(\rho, \theta, y_i) = \sum \left\{ s_1(\hat{t}, t_m, y_i) \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R(t_m, y_i) \right] \right\} \quad (15)$$

则对于关于X轴左右对称点目标 $P_1(\rho \cos \theta, -\rho \sin \theta)$, $P_2(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta)$, 由于其信号是模糊的, 故BP结果为

$$\begin{aligned} f_{P_1}(\rho, -\theta, y_i) &= f_{P_2}(\rho, \theta, y_i) \approx \begin{bmatrix} A_{P_1} \cdot s_0(\hat{t}, t_m, y_i) \\ A_{P_2} \cdot s_0(\hat{t}, t_m, y_i) \end{bmatrix}^T \\ &\cdot \begin{bmatrix} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_1}(t_m, y_i) \right] \\ \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_2}(t_m, y_i) \right] \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_{P_1} A_{P_0} \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_1}(t_m, y_i - y_0) \right] \\ A_{P_2} A_{P_0} \cdot \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_1}(t_m, -y_0) \right] \\ \cdot \begin{bmatrix} s_0(\hat{t}, t_m, y_i) \\ s_0(\hat{t}, t_m, y_i) \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (16) \end{aligned}$$

式中, $R_{P_1}(t_m, y_i)$, $R_{P_2}(t_m, y_i)$ 分别为阵列坐标为 y_i 的天线到点 P_1, P_2 的双程斜距, $s_0(\hat{t}, t_m, y_i)$ 为幅度归一化的接收信号, A_{P_0} 为阵列中心到点 P_1, P_2 的相位延时, 该项是与导向矢量无关的常数, 如式(17):

$$A_{P_0} = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_1}(t_m, 0) \right] = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} R_{P_2}(t_m, 0) \right] \quad (17)$$

以阵列坐标为零的阵元作为基准点, 则阵列的导向矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{v}(\theta) &= \left[\exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} y_1 \sin(\theta) \right] \quad \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} y_2 \sin(\theta) \right] \right. \\ &\quad \left. \cdots \quad \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} y_M \sin(\theta) \right] \right]^T \quad (18) \end{aligned}$$

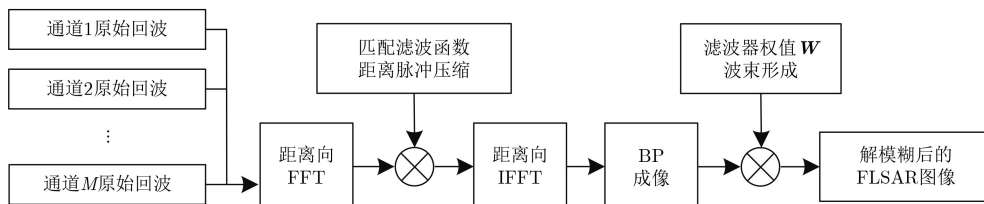


图2 算法处理流程

设网格点 P_1, P_2 处存在点目标, 则网格处重建结果为式(16)的峰值, 可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= [f_{y_1}, f_{y_2}, \dots, f_{y_M}]^T \\ &= \begin{bmatrix} f_{P_2}(\rho, \theta, y_1) & f_{P_2}(\rho, \theta, y_2) & \cdots & f_{P_2}(\rho, \theta, y_M) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v(-\theta) & v(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_{P_1} A_{P_0} \\ A_{P_2} A_{P_0} \end{bmatrix} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \quad (19) \end{aligned}$$

式中 \mathbf{F} 为各个通道BP成像的结果, M 为天线阵元个数, \mathbf{V} 为阵列导向矢量矩阵, \mathbf{A} 为左右对称目标点的散射系数矩阵。算法采用自适应波束形成实现左右多普勒解模糊, 约束条件如下, 要求在干扰方向上形成一个零点, 且要求在回波方向即主瓣方向上信号无畸变; 在此约束条件下, 求解一组滤波器的权值使得阵列的输出功率最小, 具体可表示为

$$\left. \begin{aligned} \min_{\mathbf{W}_k} J_{\text{LCMP}} \\ \mathbf{W}_k^H \mathbf{V} = \mathbf{g}_k^H, \quad k = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, J_{LCMP} 为代价函数, 表示阵列输出功率。

$$J_{\text{LCMP}} = E \left(\left| \mathbf{W}_k^H \mathbf{X} \right|^2 \right) = \mathbf{W}_k^H \mathbf{R} \mathbf{W}_k \quad (21)$$

\mathbf{W}_k 为滤波器权值, \mathbf{X} 为阵列接收信号, \mathbf{R} 为阵列接收信号的协方差矩阵, \mathbf{V} 为阵列导向矢量矩阵, N 为模糊维数, 对于FLMC-SAR成像左右多普勒模糊问题, $N = 2$; \mathbf{g}_k 为 N 维单位矩阵的第 k 列。可求得零点约束波束形成方法的最优权值为^[15]

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{V} (\mathbf{V}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{V})^{-1} \mathbf{g}_k \quad (22)$$

通过由该权值确定的滤波器进行波束形成, 对各个通道BP结果加权并且相干累加得到最终成像结果。令 $\mathbf{W} = [\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2]$, 则有

$$\begin{aligned} \mathbf{W}^H \cdot \mathbf{F} &= [\mathbf{W}_1^H, \mathbf{W}_2^H]^T \cdot \mathbf{V} \cdot \mathbf{A} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1^H \cdot \mathbf{V} \\ \mathbf{W}_2^H \cdot \mathbf{V} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{A} \quad (23) \end{aligned}$$

求解出散射系数矩阵 \mathbf{A} , 如上所述, 对矩阵 \mathbf{A} 取模即可得左右对称的点目标 P_1, P_2 的散射系数 A_{P_1}, A_{P_2} , 算法流程图如图2所示。

5 仿真实验

实验模拟5通道FLMC-SAR系统对点目标进行

成像，分别设置不同方位角的若干点目标组成的点阵进行回波模拟和成像处理，仿真参数如表1。

表1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
载频 F_c	30 GHz	脉冲重复频率PRF	8000 Hz
信号带宽B	55 MHz	波束方位宽度	8°
采样带宽 F_s	64 MHz	波束俯仰宽度	22°
下压角	20°	场景中心斜距 R_s	7000 m
合成孔径长度	100 m	阵列实孔径长度	0.4 m

仿真所用点目标设置方式如图3(a)所示。X轴为目标参考斜距，Y轴为目标方位角，点目标采用 5×5 点阵形式，其参考斜距以场景中心参考斜距 R_s 为中心依次均匀分布在距离向，方位角正负交替分布在X轴两侧。从成像结果中计算图像冲击响应宽度(Impulse Response Width, IRW)，与全孔径分

辨率以及仅合成孔径分辨率相对比，结果如表2。

点目标仿真结果的IRW随着方位角变化而变化，与理论全孔径分辨率的相对误差较小，且较仅合成孔径分辨率有所提升，实验表明综合利用合成孔径与实孔径可提高前视区域成像分辨率，且空域零点约束自适应波束形成成像方法可实现左右多普勒解模糊，对前视区域进行高分辨成像。

根据以上所述，接下来进行面目标FLMC-SAR回波信号仿真，并用上述方法对仿真数据进行成像处理来验证算法的有效性。实验模拟5通道FLMC-SAR系统，采用逆向仿回波，利用真实反射场景的SAR图像作为基准图，以此来得到目标场景的后向散射系数，进行同心圆回波仿真。回波仿真基准图像、解模糊前的图像以及解模糊后的图像如图4所示。

6 结论

FLMC-SAR系统方位角分辨率由合成孔径和

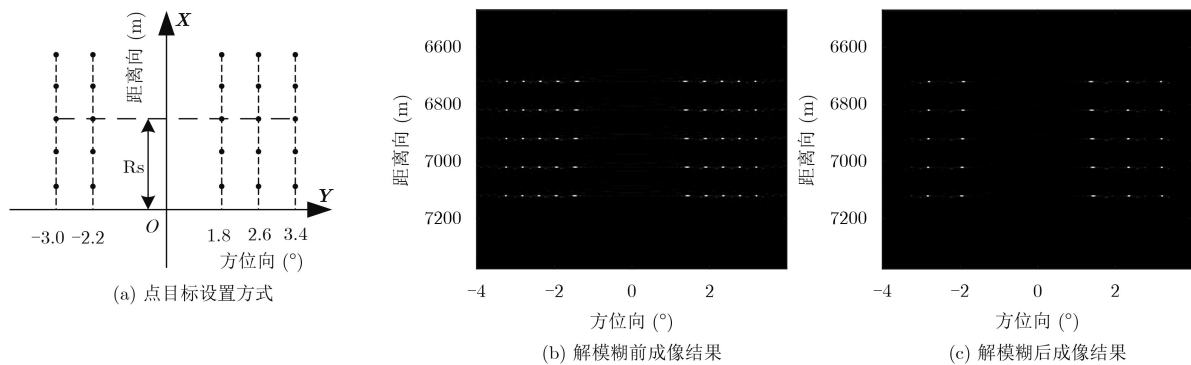


图3 点目标成像结果

表2 各方位点目标仿真分辨率与理论分辨率对比

参数	数值	数值	数值	数值	数值
坐标	$(R_0, 3.4^\circ)$	$(R_0, -3.0^\circ)$	$(R_0, 2.6^\circ)$	$(R_0, 2.2^\circ)$	$(R_0, 1.8^\circ)$
仿真分辨率IRW(rad)	$6.76E-04$	$7.63E-04$	$8.72E-04$	$1.13E-03$	$1.53E-03$
理论全孔径分辨率(rad)	$7.00E-04$	$7.91E-04$	$9.09E-04$	$1.07E-03$	$1.29E-03$
理论合成孔径分辨率(rad)	$7.50E-04$	$8.55E-04$	$9.94E-04$	$1.19E-03$	$1.46E-03$

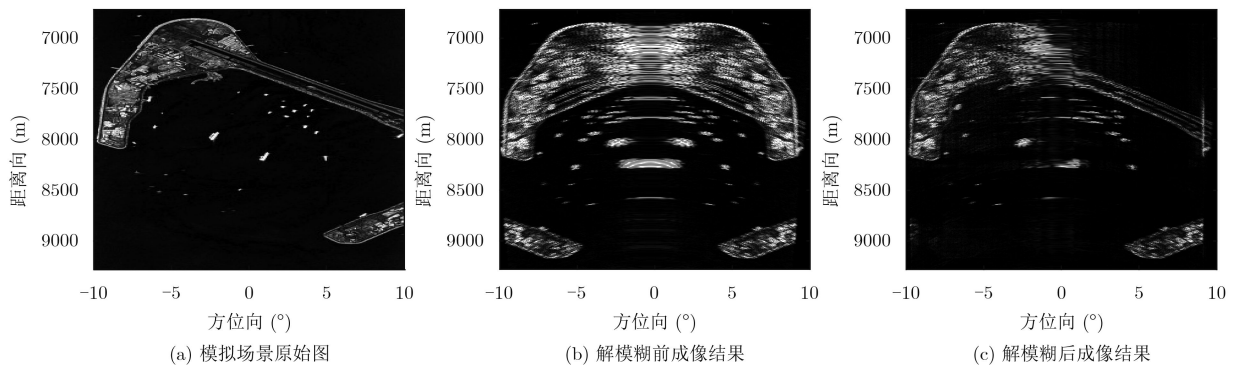


图4 面目标成像结果

阵列实孔径共同提供, 随着目标方位角绝对值变小, 即目标靠近正前视区域系统方位角分辨率越来越取决于阵列实孔径。有效综合阵列实孔径和合成孔径可提高前视分辨率, 利用有限阵列空域自由度解左右多普勒模糊, 实现FLMC-SAR无模糊成像聚焦。仿真结果表明理想直线航迹下, 空域零点约束自适应波束形成的成像方法可对前视场景进行高分辨成像。

参考文献

- [1] WU Xiaoli and WANG Weiwei. The burst mode of geosynchronous Synthetic Aperture Radar[C]. IEEE 5th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Piscataway, USA, 2015: 200–203.
- [2] LI Caipin and HE Mingyi. A novel attitude steering strategy for GEO SAR staring Imaging[C]. IEEE China Summit and International Conference on Signal and Information Processing, Piscataway, USA, 2015: 630–634.
- [3] RODRIGUEZ M, PRATS P, SCHULZE D, *et al.* First bistatic spaceborne SAR experiments with TanDEM-X[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 33–37.
- [4] INGO W, THOMAS E, and JENS K, *et al.* Potential and limitations of forward-looking bistatic SAR[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Piscataway, USA, 2010: 216–219.
- [5] 孟自强, 李亚超, 邢孟道, 等. 基于斜距等效的弹载双基前视 SAR相位空变校正方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(3): 613–621. doi: [10.11999/JEIT150782](https://doi.org/10.11999/JEIT150782).
MENG Ziqiang, LI Yachao, XING Mengdao, *et al.* Phase space-variance correction method for missile-borne bistatic forward-looking sar based on equivalent range equation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(3): 613–621. doi: [10.11999/JEIT150782](https://doi.org/10.11999/JEIT150782).
- [6] REN Xiaozhen, SUN Jiantao, YANG Ruliang, *et al.* A new three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 153–157. doi: [10.1109/LGRS.2010.2055035](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2055035).
- [7] SUTOR T, BUCKREUSS S, KRIEGER G, *et al.* Sector imaging radar for enhanced vision: theory and applications[C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, Munich, Germany, 2000: 357–359.
- [8] 包敏, 周鹏, 史林, 等. 双天线前视弹载SAR解模糊算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(12): 2857–2862. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00083](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00083).
BAO Min, ZHOU Peng, SHI Lin, *et al.* Study on deambiguity algorithm for double antenna forward looking missile borne SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(12): 2857–2862. doi: [10.3724/SP.J.1146.2013.00083](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2013.00083).
- [9] 李悦丽, 梁甸农, 黄晓涛, 等. 一种单脉冲雷达多通道解卷积前视成像方法[J]. *信号处理*, 2007, 23(5): 699–703.
- [10] LI Yueli, LIANG Diannong, HUANG Xiaotao *et al.* A multi-channel deconvolution based forward-looking imaging method in monopulse radar[J]. *Signal Processing*, 2007, 23(5): 699–703.
- [10] 曾操, 陈昊, 何学辉, 等. 相控阵子阵级和差多波束测角方法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2013, 40(1): 19–25. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.004).
ZENG Cao, CHEN Hao, HE Xuehui *et al.* Monpulse angle estimation using sun-difference multi-beamforming based on the phase array at the sub-array level[J]. *Journal of Xidian University*, 2013, 40(1): 19–25. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2013.01.004).
- [11] 赵珊珊, 张林让, 刘楠, 等. 利用幅度比特特征进行有源假目标鉴别[J]. *西安电子科技大学学报*, 2017, 44(5): 51–57. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.009).
ZHAO Shanshan, ZHANG Linrang, LIU Nan, *et al.* Active false-target discrimination method based on the amplitude ratio feature[J]. *Journal of Xidian University*, 2017, 44(5): 51–57. doi: [10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-2400.2017.05.009).
- [12] 韦北余, 朱岱寅, 吴迪, 等. 一种基于和差波束的机载SAR定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2013, 35(6): 1464–1470. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01194](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01194).
WEI Beiyu, ZHU Daiyin, WU Di, *et al.* An airborne SAR geolocation approach based on sum-difference beam SAR imagery[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(6): 1464–1470. doi: [10.3724/SP.J.1146.2012.01194](https://doi.org/10.3724/SP.J.1146.2012.01194).
- [13] 马晓峰, 沈爱松, 盛卫星, 等. 可控测角精度和范围的数字阵列单脉冲和差波束优化[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(12): 3107–3113. doi: [10.11999/JEIT160873](https://doi.org/10.11999/JEIT160873).
MA Xiaofeng, SHEN Aisong, SHENG Weixing *et al.* Sum and difference patterns optimization for digital array with controllable accuracy and range of angle estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3107–3113. doi: [10.11999/JEIT160873](https://doi.org/10.11999/JEIT160873).
- [14] 温鑫, 黄培康, 年丰, 等. 主动式毫米波近距离圆柱扫描三维成像系统[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 36(6): 1044–1049.
WEN Xin, HUANG Peikang, NIAN Feng *et al.* Active millimeter-wave near-field cylindrical scanning three-dimensional imaging system[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2004, 36(6): 1044–1049.
- [15] 马喜乐. 方位多相位中心SAR高分辨率宽测绘带成像技术研究[D]. [博士学位], 国防科技大学, 2014.
MA Xile. Research on high-resolution wide-swath imaging technologies of azimuth multiple phase center SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2014.

卢景月: 男, 1994年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。

张磊: 男, 1984年生, 副教授, 主要研究方向为合成孔径雷达成像、目标识别。

王冠勇: 男, 1989年生, 工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达成像。