

一种新型圆迹阵列三维SAR系统的点扩散函数分析与地面实验结果

明婧* 张晓玲 蒲玲 师君

(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

摘要: 阵列合成孔径雷达(ASAR)具备3维成像能力,是3维SAR成像领域的研究热点之一。该文针对线阵SAR在高分辨率成像方面和圆周SAR在旁瓣抑制方面的问题,提出一种新型圆迹阵列合成孔径雷达(CASAR)系统用于3维高分辨率雷达成像。首先推导基于CASAR系统的点扩散函数模型,从理论上分析圆迹阵列这一新型构型在3维成像中的优势。在此基础上构建原型CASAR实验系统,通过点扩散函数仿真实验和室外实测3维CASAR成像实验验证了3维CASAR成像的有效性,与线阵SAR和圆周SAR实验结果相比,证明CASAR系统可获得3维高分辨率SAR图像以及有效的旁瓣抑制能力。

关键词: 合成孔径雷达; 圆迹阵列; 3维成像; 高分辨率; 旁瓣抑制

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)06-0770-07

DOI: 10.12000/JR18068

引用格式: 明婧, 张晓玲, 蒲玲, 等. 一种新型圆迹阵列三维SAR系统的点扩散函数分析与地面实验结果[J]. 雷达学报, 2018, 7(6): 770-776. DOI: 10.12000/JR18068.

Reference format: Ming Jing, Zhang Xiaoling, Pu Ling, *et al.* PSF analysis and ground test results of a novel circular array 3-D SAR system[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(6): 770-776. DOI: 10.12000/JR18068.

PSF Analysis and Ground Test Results of a Novel Circular Array 3-D SAR System

Ming Jing Zhang Xiaoling Pu Ling Shi Jun

(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Array Synthetic Aperture Radar (ASAR) system radar imaging field has gained attention because of its three-dimensional (3-D) imaging ability. A novel Circular Array SAR (CASAR) system is employed for 3-D high-resolution radar imaging to overcome the drawbacks exhibited by linear array SAR in high-resolution imaging and by circular SAR in side-lobe suppression. Point Spread Function (PSF) model based on the CASAR system is derived, and the advantages of the new configuration of the circular array in 3-D imaging are theoretically analyzed. Prototype CASAR experimental system is built on the basis of the abovementioned analysis. PSF simulation experiments and outdoor 3-D CASAR imaging experiments under outdoor conditions are performed to verify performance of the CASAR system in 3-D SAR imaging. Compared imaging results acquired using linear array SAR, circular SAR, and CASAR system proves that the CASAR system has high-resolution 3-D SAR images and demonstrates effective side-lobe suppression capability.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Circular array; 3-D imaging; High-resolution; Side-lobe suppression

收稿日期: 2018-09-03; 改回日期: 2018-12-19

*通信作者: 明婧 1519485326@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金(61571099), 博士后面上项目基金(2015M570778)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61571099), The China Postdoctoral Science Foundation (2015M570778)

责任主编: 洪文 Corresponding Editor: Hong Wen

1 引言

随着对雷达技术的深入理解, 3维合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像技术已成为雷达成像领域的研究热点之一^[1]。传统SAR成像技术将3维成像空间投影到2维(距离-方位)平面空间, 目标的高度向信息与距离向信息产生混叠, 将影响后续基于目标散射信息的分析研究。而3维

SAR成像技术则通过具体的成像技术直接获取目标的3维散射信息。为克服2维SAR成像技术的固有缺陷,发展新型3维SAR成像技术成为未来发展的必然趋势。目前,3维SAR技术主要包括层析SAR^[2]、曲线SAR^[3,4]以及阵列SAR^[5,6],且具有广阔的应用前景^[7]。

圆周SAR(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)是一种曲线SAR成像体制,其天线沿圆周轨迹移动并在扫描路径中持续照射目标^[4]。在该体制下,雷达平台360°圆周运动形成一个圆形的2维孔径,结合脉冲压缩技术实现对目标的3维重建。与传统的2维SAR成像体制相比,CSAR可以提供多角度测量,获得更高的SAR图像分辨率和更丰富的目标信息。同时,CSAR体制具有3维成像能力。然而,CSAR在圆周平面的稀疏采样导致图像旁瓣增大,其3维成像质量远不如其他3维SAR成像体制。

线阵SAR(Linear Array Synthetic Aperture Radar, LASAR)作为另一种3维阵列SAR体制,因其在阵列方向上的充分采样,与CSAR体制相比拥有更好的旁瓣抑制能力^[6]。然而,若要实现高分辨率3维成像,传统LASAR需要满足大尺寸线阵和高采样率的条件,而这将引起高成本和运算量大的问题。

结合LASAR在旁瓣抑制方面和CSAR在高分辨率成像方面的优势是解决上述问题的一种可行方案。本文提出一种新型圆迹阵列SAR(Circular Array Synthetic Aperture Radar, CASAR)体制来实现高质量的3维成像。CASAR阵列平面呈环状,可由线阵天线通过圆周运动合成,也可由单个天线通过螺旋运动合成。与传统的LASAR体制相比,CASAR在相同线阵尺寸和采样率下可扩展有效孔径,增大在阵列平面上的图像分辨率;与CSAR相比,CASAR通过在垂直于距离向的平面上用阵列天线代替单个天线的方式,增大阵列平面上的采样点数,从而抑制图像旁瓣。

本文由4部分组成:第2节研究CASAR的基本模型和点扩散函数;第3节进行原型CASAR系统的地面实测实验;第4节为结论。

2 基本模型与理论推导

2.1 CASAR基本模型

图1(a)是传统LASAR的基本模型, X 轴为切航迹向, Y 轴为沿航迹向, Z 轴为高度向,其阵列天线的排列近似为矩形。雷达平台通过沿航迹直线运动合成虚拟孔径(如图1(a)中的 L_A)以获取沿航迹向分辨率,在切航迹(即垂直于沿航迹向)上通过布置线性阵列(Linear-Array, LA)天线的方式获取切航迹向分辨率(如图1(a)中的 L_C)。

图1(b)是CSAR的基本模型,其雷达平台绕观测中心 O 做圆周运动合成一个圆形的2维孔径。 X , Y 轴构成CSAR的圆周平面。在极坐标下,类比LASAR的切航迹和沿航迹定义,该模型切航迹向合成孔径为图1(b)中的 L_A ;沿航迹向合成孔径为以切航迹向孔径为直径形成的圆,长度为 πL_A 。CSAR因其在圆周平面的点扩散函数为零阶贝塞尔函数,其峰值旁瓣比约为-8 dB,在SAR图像中表现为高旁瓣影响成像质量。

图1(c)是CASAR的基本模型,其阵列天线的排列近似为环状,由线阵单元沿观测中心 O 作圆周运动以合成更大的虚拟孔径。 X , Y 轴构成CASAR的阵列平面。同样地,在极坐标系下,CASAR模型的切航迹向合成孔径长度等于图1(c)中的 L_A ,沿航迹向孔径长度为 πL_A 。当图1(a)和图1(c)中的孔径 L_C 相同时,CASAR的切航迹向孔径 L_A 将大于LASAR的切航迹向孔径 L_C 。因此,CASAR模型相较于传统LASAR模型增大了阵列方向的合成孔径,进而在相同线阵尺寸下阵列向分辨率将得到改善。另外,CASAR成像模型相较于传统SAR成像扩展了视角,可从多个视线方向获取3维目标场景丰富的散射信息,与CSAR模型类似。CASAR模

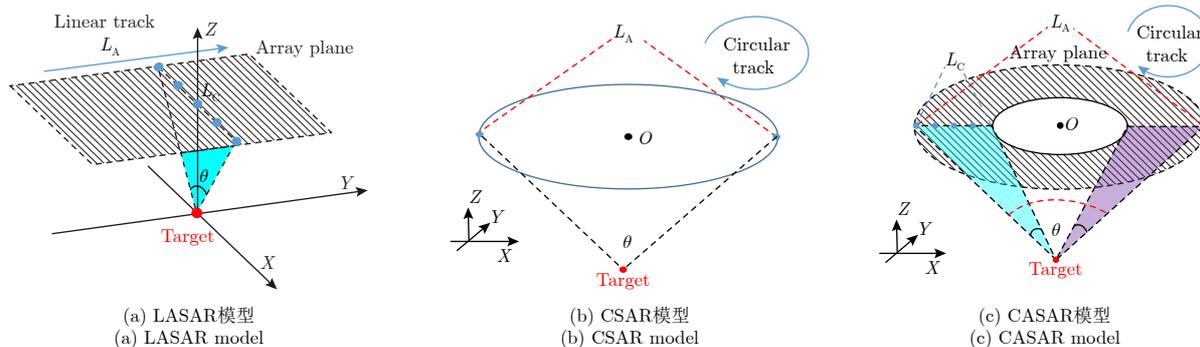


图1 几何模型

Fig. 1 Geometry model

型在阵列平面上的布型为环状线性阵列, 与CSAR模型相比, 提高了垂直于距离向的平面上的采样点数, 达到抑制高旁瓣的目的。

2.2 CASAR的点扩散函数分析

由于距离向分辨率仅由雷达信号带宽决定, 本文将主要分析阵列方向的2维分辨率。将直角坐标系转换为极坐标系, 图1(c)中CASAR的天线相位中心(Antenna Phase Centers, APC)可表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p} &= (x(\theta) \ y(\theta) \ z_0) \\ x(\theta) &= r \cos \theta, \ y(\theta) = r \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_M]$ 是圆迹阵列的半径, M 为环的数目。

设发射信号为 $\mathbf{s}(t)$, 则目标 \mathbf{p}_0 的回波可表示为

$$\mathbf{s}_r(t; \mathbf{p}) = k\sigma \mathbf{s} \left(t - \frac{2r}{c} \right) \quad (2)$$

其中, k 表示剩余变量, σ 表示目标散射系数, \mathbf{p} 为由式(1)确定的一个APC, 且满足 $r = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_0|$ 。经过匹配滤波后, SAR图像可通过CASAR模型中所有APC的相干叠加来重建, 如式(3)和式(4):

$$\mathbf{E}(\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1) = k \int_{\text{APC}} \sigma x \chi(\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1) d\mathbf{p} \quad (3)$$

$$\chi(\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1) = \int_0^T \mathbf{s} \left(t - \frac{2r_1}{c} \right) \mathbf{s}^* \left(t - \frac{2r}{c} \right) dt \quad (4)$$

其中, \mathbf{p}_1 为3维SAR图像中的任一分辨率单元, 满足 $r_1 = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_1|$ 。设 $\mathbf{s}(t) = u(t) \exp(-j2\pi f_c t)$, 其中 f_c 为载频, $u(t)$ 为调制函数。代入式(3)和式(4), 则重建的SAR图像可近似为标准化形式

$$\mathbf{E}(\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1) \sim \int_{\text{APC}} \exp \left(\frac{4\pi f_c (|\mathbf{p} - \mathbf{p}_0| - |\mathbf{p} - \mathbf{p}_1|)}{c} \right) d\mathbf{p} \quad (5)$$

将式(5)中的 \mathbf{p} , \mathbf{p}_0 , \mathbf{p}_1 由式(1)中的 $\mathbf{p} = (x(\theta) \ y(\theta) \ z_0)$ 替代, 根据文献[8]可将 $\mathbf{E}(\mathbf{p}_0(x_0(\theta) \ y_0(\theta) \ 0); \mathbf{p}_1(x_1(\theta) \ y_1(\theta) \ 0))$ 简化为

$$\mathbf{E}(\varphi) = \sum_1^M r_i \cdot \mathbf{J}_0 \left(\frac{4\pi r_i \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \quad (6)$$

其中, $\lambda = c/f_c$, $\varphi = \text{atan} \left(\left(x_1^2 + y_1^2 \right)^{1/2} / z_0 \right)$,

$\mathbf{J}_0(\cdot)$ 表示0阶贝塞尔函数。

当 $M=1$ 时, CASAR的环数为1, 即简化为单航过的CSAR模型, 则正侧视情况下CSAR对于目标点(0, 0, 0)的点扩散函数(Point Spread Function, PSF)公式可近似表示为

$$E_0(\varphi) \approx r_0 \cdot \mathbf{J}_0 \left(\frac{4\pi r_0 \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \quad (7)$$

$$G_0(\varphi_x, \varphi_y) \approx \mathbf{J}_0^2 \left[\frac{4\pi r_0 (\tan(\varphi_x) + \tan(\varphi_y))}{\lambda} \right] \quad (8)$$

其中, $\tan(\varphi_x) = x/z_0$, $\tan(\varphi_y) = y/z_0$, r_0 为圆周半径。由于CSAR的点扩散函数为0阶贝塞尔函数形式, 与sinc函数-13 dB的峰值旁瓣比不同, 0阶贝塞尔函数的峰值旁瓣比约为-8 dB, 因此CSAR具有较高的旁瓣。

当 $M>1$ 时, CASAR模型可等效为 M 圈的同心圆阵列, 且其圆周半径 r_i 满足 $r_{\min} \leq r_i \leq r_{\max}$, $i = 1, 2, \dots, M$ 。因此, $\mathbf{E}(\varphi)$ 可表示为 r_{\min} 到 r_{\max} 的积分形式

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\varphi) &= \sum_1^M r_i \cdot \mathbf{J}_0 \left(\frac{4\pi r_i \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \\ &\approx \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} r \cdot \mathbf{J}_0 \left(\frac{4\pi r \tan(\varphi)}{\lambda} \right) dr \end{aligned} \quad (9)$$

进一步, 将 $\mathbf{E}(\varphi)$ 化简为

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\varphi) &= C(r_{\max}) \cdot \mathbf{J}_1 \left(\frac{4\pi r_{\max} \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \\ &\quad - C(r_{\min}) \cdot \mathbf{J}_1 \left(\frac{4\pi r_{\min} \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$C(r) = r^2 / \left(\frac{4\pi r \tan(\varphi)}{\lambda} \right) \quad (11)$$

因此, CASAR图像重建中的点扩散函数 $\mathbf{F}(\varphi)$ 可近似为

$$\mathbf{F}(\varphi) = \frac{|\mathbf{E}(\varphi)|^2}{|\mathbf{E}(0)|^2} \quad (12)$$

其中, $\mathbf{J}_1(\cdot)$ 为1阶贝塞尔函数。式(12)中 φ 由距离历史决定而载波波长 λ 由雷达信号决定, 除去这两个因素的影响, 式(10)和式(11)表明CASAR模型在阵列方向上的分辨率是对称的, 且分辨率的大小与 r_{\min} (最小半径)和 r_{\max} (最大半径)即阵列布局有关。

2.3 点扩散函数图像仿真

为直观反映多种3维SAR成像体制下阵列向分辨率的差异。本文通过仿真LASAR模型、单航过CSAR模型以及CASAR模型在相同尺寸线阵天线条件下的PSF, 利用3维后向投影(Back Projection, BP)成像算法对成像结果进行对比分析。天线与目标相对位置如图1模型所示。仿真参数如表1所示, 投影的场景大小为4 m×4 m, 仿真成像结果如图2所示, 证明了CASAR 3维成像的可实施性。

图3为不同SAR模型下PSF图像切航迹向(见图1 X轴方向)的剖面图对比, 表2为PSF图像切航迹向3 dB带宽、峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)和积分旁瓣比(Integral Side Lobe Ratio, ISLR)的参数对比。由图2可知, 由于线阵长度的限制, LASAR图像在切航迹向的分辨率较差, 而CSAR图像与CASAR图像中点目标在X及Y方向具有相同的分辨率且分辨率较好。由图2、图3以及表2可见CASAR相对于CSAR有更低的ISLR, 即目标的整体旁瓣得到了抑制; 而CASAR的PSLR并没有得到很好的改善。这是由于根据点扩散函数分析式(7)和式(9)可知, CASAR与CSAR具有类似的PSF, 即0阶和1阶贝塞尔函数。然而CASAR采用阵列天线圆周运动的形式, 通过用阵列天线代替单个天线, 即在垂直于距离向的平面上增加采样的方式, 使目标整体

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

仿真参数	SAR系统		
	LASAR	CSAR	CASAR
信号	单脉冲	单脉冲	单脉冲
载频(GHz)	5	5	5
参考距离(m)	1000	1000	1000
PRF (Hz)	10	10	10
平台速度(m/s)	6	6	6
合成孔径时间(s)	105	105	105
目标位置	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
线阵单元数	500	1	500
线阵长度(m)	30	-	30
圆周半径 r (m)	-	100	70~100
合成孔径长度	-	$2\pi r$	$2\pi r$

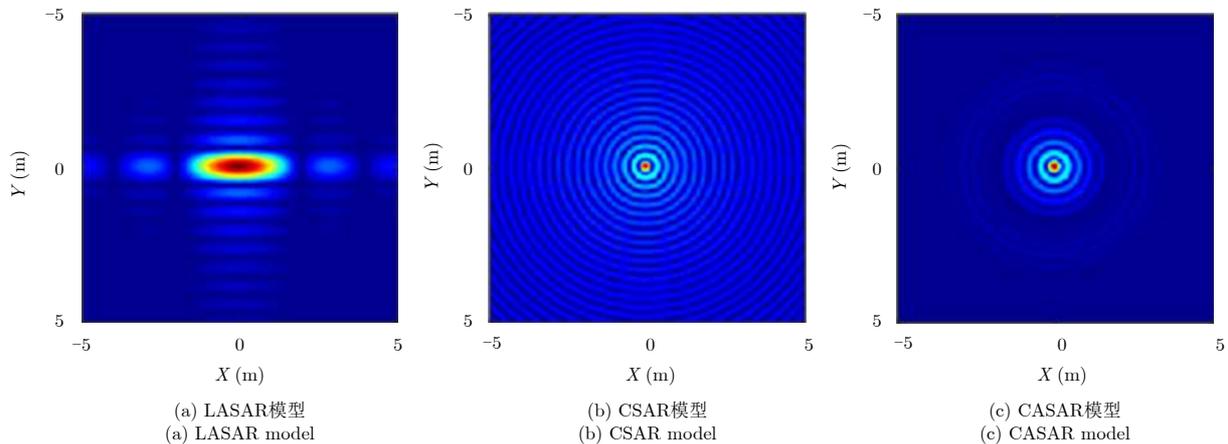


图 2 不同SAR模型点扩散函数图像

Fig. 2 PSF images of the different SAR models

的旁瓣得到抑制。因此, 经SAR模型点扩散函数仿真验证, CASAR在保证阵列向分辨率的同时具备一定的旁瓣抑制能力, 在多散射中心的目标模型或信杂比较低的环境中比CSAR更有优势。

表 2 切航迹向性能比较

Tab. 2 Cross-track performance comparison

实验模型	3 dB带宽(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
LASAR	1.80	-13.28	-11.60
CSAR	0.22	-7.89	-1.58
CASAR	0.25	-8.56	-5.31

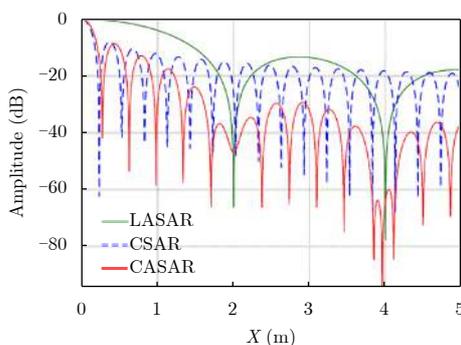


图 3 点扩散函数图像切航迹向剖面图

Fig. 3 Slice image of PSF in the cross-track direction

3 地面实测结果

3.1 地面实验系统设计

图4(a)为基于上述理论设计的原型CASAR实验系统用于实际测量验证, 图4(b)为由4个金属球构造的室外目标场景。为验证CASAR系统3维成像的可行性, 将发射天线作为强散射源, 对目标场景进行近距离成像实验。

通过使用图4(a)所示原型CASAR实验系统,

安装在导轨中的单天线进行直线运动形成阵列天线并连续照射目标场景,再通过导轨的旋转合成本文所提CASAR模型中的圆迹阵列,如图5(a)所示。图5(b)为实验场景的3维图,圆迹阵列处于X-Y平面。为了便于实现地面实测实验,本文采用单天线螺旋运动形成圆迹阵列,等效为由多个天线单元构成的直线阵列天线进行1次圆周运动。

选择步进频率(Step Frequency, SF)信号^[9]作为CASAR实验系统的发射信号。CASAR实验系统基本框图如图6所示。SF信号从矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)的1端口产生,经发射机预处理(如功率放大)后通过发射设备(如固定发射天线)进行发射。散射信号由接收设备进行接收及预处理,之后传输到VNA的2端口,经VNA的“S21”测量功能获得目标场景的散射信息。通过使用高分辨率距离像(High Resolution Rang Profile, HRRP)技术^[10]和3维BP成像算法^[4,7,11],可以重建3维目标场景。实验参数如表3所示。

3.2 地面实验结果及分析

实验1 阵列天线移动轨迹近似传统的CSAR

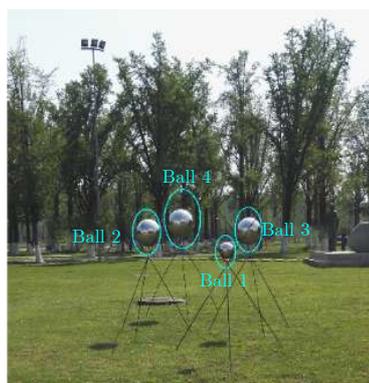
模型,如图7(a)所示。此时,Z,Y轴构成CSAR的圆周平面。经CSAR模型得到的3维成像结果如图7(b),球1在圆周平面的2维切片图像如图7(c)。可见CSAR 3维成像存在旁瓣高成像质量差的问题。

实验2 采用本文所提的CASAR模型,利用单个天线进行8周螺旋运动形成圆迹阵列,如图8(a)所示,等效为8个天线构成的直线阵列天线进行圆周运动,阵列长为0.5 m,圆迹阵列最大/最小半径由表3所示。此时,Z,Y轴构成CASAR的阵列平面。经CASAR模型得到的3维成像结果如图8(b),球1在阵列平面的2维切片图像如图8(c)。

观察图8(b)和图7(b),可以发现实验2中的CASAR 3维成像结果比实验1中的传统CSAR 3维成像结果更清晰,4个目标大部分的旁瓣得到了明显的抑制。比较图8(c)和图7(c)所示的阵列平面2维切片示意图,CASAR的单目标图像旁瓣明显下降。CSAR模型和CASAR模型的成像性能比较如表4所示,CASAR模型的ISLR明显优于CSAR模型,而PSLR没有得到明显改善,与2.3节点扩散函数仿真实验结果类似。因此可验证CASAR模型具有有效



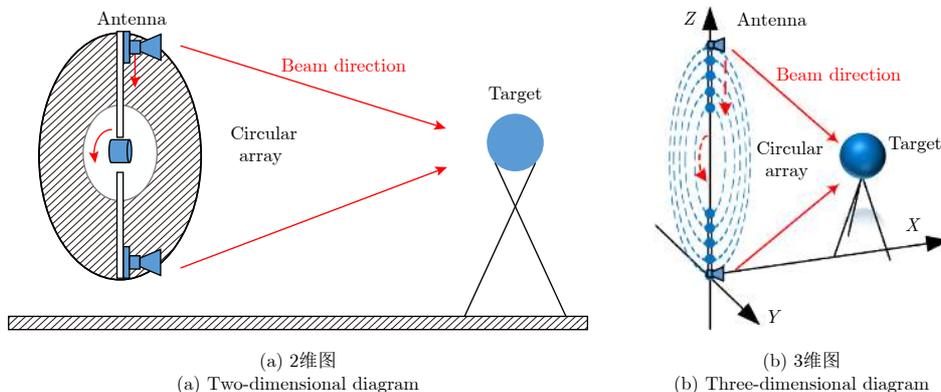
(a) 原型CASAR实验系统
(a) Proto-type CASAR experiment system



(b) CASAR成像实验目标场景
(b) Target scene of CASAR imaging experiment

图 4 地面实验

Fig. 4 Ground test



(a) 2维图
(a) Two-dimensional diagram

(b) 3维图
(b) Three-dimensional diagram

图 5 CASAR实验场景

Fig. 5 CASAR experiment scene

的积分旁瓣抑制能力，且能保持CSAR所具有的高分辨成像能力。

4 结论

本文所提新体制CASAR模型可应用于高质量3维雷达成像。阵列平面呈环状，可由线阵天线通过圆周运动合成，也可由单个天线通过螺旋运动合成。在图像分辨率方面，CASAR模型近似于多轨迹CSAR模型，因此与CSAR模型具备同样的高分

辨率。在垂直于距离向的平面上使用圆迹阵列的布局相较于单航过CSAR，可以增加在2维平面上的采样率，从而有效地抑制3维SAR图像的旁瓣。综上，CASAR模型拥有高分辨率成像能力以及有效的旁瓣抑制能力，可以明显提高3维SAR成像质量。通过理论分析和地面实测，证明了3维CASAR成像的有效性。

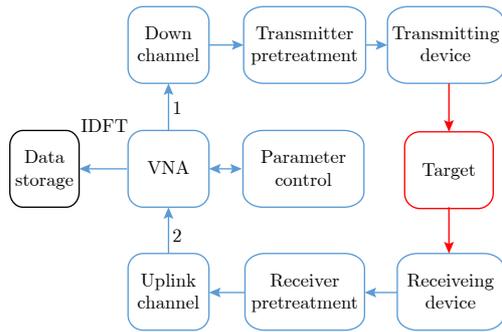


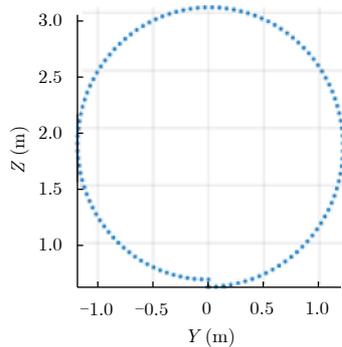
图 6 CASAR实验系统基本框图

Fig. 6 Basic flow of CASAR experiment system

表 3 实验参数

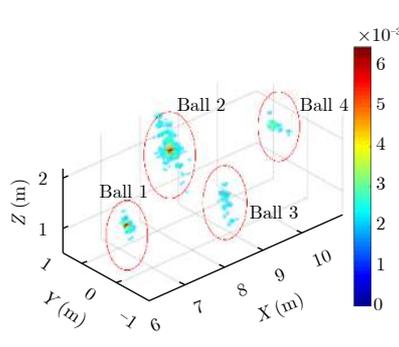
Tab. 3 Experiment parameters

CASAR参数	值
起始频率(GHz)	6.5
终止频率(GHz)	8.5
SF信号步数	801
圆迹阵列最大半径(m)	1.3
圆迹阵列最小半径(m)	0.8
目标位置	球1: (6.7, 0, 1.4) m 球2: (8.5, 0.9, 1.6) m 球3: (8.5, -0.8, 1.6) m 球4: (10.9, 0.5, 1.8) m



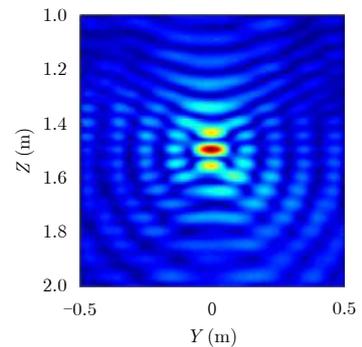
(a) 传统CSAR运动轨迹

(a) Moving track of traditional CSAR experiment



(b) 3维CASAR成像结果

(b) Experiment result of 3-D CASAR imaging

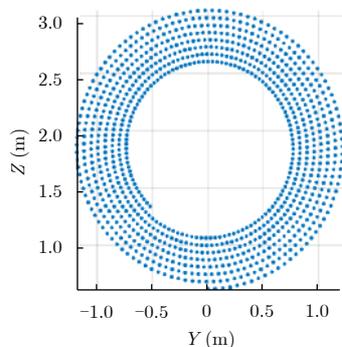


(c) 球1的2维切片示意图

(c) Slice of the Ball 1 in CASAR

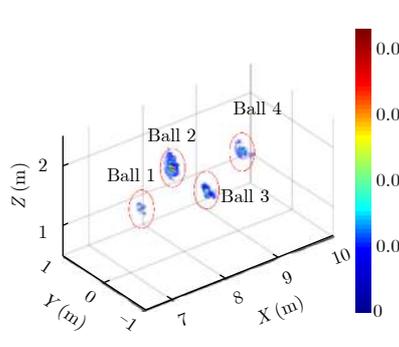
图 7 CSAR 实验结果

Fig. 7 CSAR experimental results



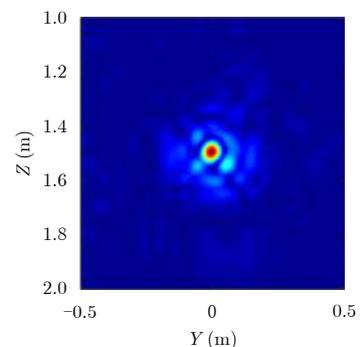
(a) 传统CASAR运动轨迹

(a) Moving track of traditional CASAR experiment



(b) 3维CASAR成像结果

(b) Experiment result of 3-D CASAR imaging



(c) 球1的2维切片示意图

(c) Slice of the Ball 1 in CASAR

图 8 CASAR 实验结果

Fig. 8 CASAR experimental results

表 4 性能比较

Tab. 4 Performance comparison

实验模型	分辨率(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)
CSAR	0.05	-8.325	-2.999
CASAR	0.05	-9.191	-6.433

参 考 文 献

- [1] Devadithya S, Pedross-Engel A, Watts C M, *et al.* GPU-accelerated enhanced resolution 3-D SAR imaging with dynamic metamaterial antennas[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(12): 5096–5103. DOI: [10.1109/TMTT.2017.2766060](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2766060).
- [2] Ren X Z, Qin Y, and Tian L J. Three-dimensional imaging algorithm for tomography SAR based on multiple signal classification[C]. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, Guilin, China, 2014: 120–123. DOI: [10.1109/ICSPCC.2014.6986165](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2014.6986165).
- [3] Xie H T, Shi S Y, An D X, *et al.* Fast factorized backprojection algorithm for one-stationary bistatic spotlight circular SAR image formation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(4): 1494–1510. DOI: [10.1109/JSTARS.2016.2639580](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2639580).
- [4] Chen L P, An D X, and Huang X T. A backprojection-based imaging for circular synthetic aperture radar[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3547–3555. DOI: [10.1109/JSTARS.2017.2683497](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2683497).
- [5] Liu X, Yu J, Zhao H, *et al.* An along-track sparse imaging method for forward-looking array SAR[C]. Proceedings of IET International Radar Conference 2015, Hangzhou, China, 2015: 1–5. DOI: [10.1049/cp.2015.0996](https://doi.org/10.1049/cp.2015.0996).
- [6] Shi J, Zhang X L, Yang J Y, *et al.* APC trajectory design for “one-active” linear-array three-dimensional imaging SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1470–1486. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2031430](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031430).
- [7] Wei S J, Zhang X L, and Shi J. Spaceborne-airborne bistatic linear array SAR high resolution 3-D imaging based on sparsity exploiting[C]. Proceedings of the 2016 19th International Conference on Information Fusion, Heidelberg, Germany, 2016: 1518–1522.
- [8] Axelsson S R J. Beam characteristics of three-dimensional SAR in curved or random paths[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(10): 2324–2334. DOI: [10.1109/TGRS.2004.834802](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.834802).
- [9] Tang L, Zhu Y F, and Fu Q. Stepped frequency SAR imaging based on compensation in Doppler domain[C]. Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing, Guilin, China, 2014: 627–631. DOI: [10.1109/ICSPCC.2014.6986269](https://doi.org/10.1109/ICSPCC.2014.6986269).
- [10] Li Y C, Zhang L, Liu B C, *et al.* Stepped-frequency inverse synthetic aperture radar imaging based on adjacent pulse correlation integration and coherent processing[J]. *IET Signal Processing*, 2011, 5(7): 632–642. DOI: [10.1049/iet-spr.2009.0301](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2009.0301).
- [11] Shi J, Zhang X L, Sun H, *et al.* Explanation of synthetic aperture 3-D imaging technique via EFIE[C]. Proceedings of the 2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, South Korea, 2011: 1–4.

作 者 简 介



明 婧(1995–), 女, 四川成都人, 电子科技大学硕士生, 研究方向为合成孔径雷达成像。

E-mail: 1519485326@qq.com



蒲 羚(1991–), 四川成都人, 博士生, 研究方向为雷达信号处理及SAR系统。

E-mail: 741176055@qq.com



张晓玲(1964–), 女, 四川成都人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为SAR成像技术、雷达探测技术。

E-mail: xlzhang@uestc.edu.cn



师 君(1979–), 男, 河南南阳人, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为SAR成像技术、雷达信号处理。

E-mail: shijun@uestc.edu.cn