

圆周 SAR 与线性 SAR 成像特性分析与对比*

贾高伟,常文革

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要:圆周合成孔径雷达因其独特优势已经成为雷达领域的研究热点。分析圆周合成孔径雷达与线性合成孔径雷达在成像区域大小、点散布函数特性、回波频谱特点、三维成像能力等方面的差异,凸显了圆周合成孔径雷达的成像特点。发现单航过圆周合成孔径雷达频域成像处理的难点在于其回波频谱的空变性。为提高频域成像处理的效率,分析了平面圆周合成孔径雷达与多航过圆周合成孔径雷达成像模式,并指出这两种模式易于在频域开展一致化处理。仿真试验证明了分析内容的正确性。

关键词:圆周合成孔径雷达;线性合成孔径雷达;回波频谱;点散布函数;三维成像

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)05-161-08

Comparison and analysis of the imaging properties between circular SAR and linear SAR

JIA Gaowei, CHANG Wenge

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: With its intrinsic characteristics, circular synthetic aperture radar has lately become a particular interest to the radar community. The differences of imaging processing between the circular synthetic aperture radar and linear trajectory synthetic aperture radar were compared and analyzed. The detailed comparisons containing the size of the observed area, the properties of the point spread function, and the properties of echo spectrum were carried out. It was learnt that the difficulty of the imaging processing of single-pass circular synthetic aperture radar lies on its space dependence. To overcome this difficulty, the plane circular synthetic aperture radar and multi-base line circular synthetic aperture radar imaging models were analyzed. Simulation test was carried out and the corresponding results prove the proposed analysis is valid.

Key words: circular synthetic aperture radar; linear synthetic aperture radar; echo spectrum; point spread function; three dimensional imaging

通过对感兴趣区域进行全方位长时间的观测,圆周合成孔径雷达(Circular Synthetic Aperture Radar, CSAR)具有二维超高分辨力、高信噪比以及能三维成像等突出优势^[1-6],已成为 SAR 领域的研究热点。目前,瑞典防务研究院^[7]、法国宇航局^[8]、德国宇航中心^[9-11]及中国科学院电子所^[12-13]已开展了圆周 SAR 的机载试验,初步验证了其独特优势。

就成像技术而言,目前圆周 SAR 的成像算法并不成熟。在机载试验中广泛采用的成像算法为后向投影算法(Back-Projection, BP)及其改进型快速 BP 算法^[9]。BP 算法的优点是处理过程简单,且对雷达轨迹的依赖性很低。近年来快速后向投影算法^[9](Fast Factorized Back Projection, FFBP)的出现较大地减小了 BP 算法的计算量并

有力促进了其在实际系统中的应用。总的来讲,尽管人们可以利用 BP 算法获得圆周 SAR 相参积累结果,但却从未停止对具有更好效率的频域成像算法的探索。贾高伟等基于频域信号分析对圆周 SAR 的成像特性进行研究,这对开展圆周 SAR 的频域成像处理具有指导性作用。

线性轨迹 SAR,包括条带 SAR、聚束 SAR、滑动聚束 SAR 等,在成像技术方面已日臻成熟^[14],相应的频域成像算法是人们最为常见和熟悉的 SAR 数据处理方式。贾高伟等通过对比圆周 SAR 与线性 SAR 的成像特性差异凸显了圆周 SAR 的成像特点。分析表明,单航过圆周 SAR 频域成像处理的难点体现在其回波频谱的空变性,这不利于在频域进行一致化处理以提高成像效率。为提高圆周 SAR 频域成像处理效率,贾高伟

* 收稿日期:2014-11-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61501477)

作者简介:贾高伟(1989—),男,河南周口人,博士研究生,E-mail:ji_as@126.com;

常文革(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:changwenge@nudt.edu.cn

等从信号频谱分析的角度指出多航过圆周 SAR 成像模型易于在频域开展高效率成像处理,且具有三维精确成像的能力。

1 圆周 SAR 成像模型简介

圆周 SAR 的成像几何模型如图 1 所示,图 1 中雷达沿半径为 R 的圆周运动,方位向观测角为 θ ,雷达天线相位中心(Array Phase Center, APC) 的三维坐标为 (x_r, y_r, H) ,其极坐标表示为 $(R\cos\theta, R\sin\theta, H)$ 。

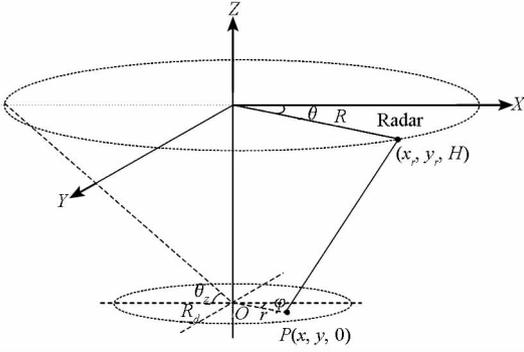


图 1 圆周 SAR 成像几何
Fig. 1 Geometry of CSAR

在雷达运动过程中,雷达波束始终指向半径为 R_a 的成像区域。设定成像区域为水平地面,其中某一点目标 P 的坐标为 $(x, y, 0)$,其极坐标表示为 $(r\cos\varphi, r\sin\varphi, 0)$, O 为坐标原点。 θ_r 表示场景中心点对应的雷达入射角。直观地,可以得到雷达 APC 同目标 P 之间的瞬时斜距为:

$$\begin{aligned} R_r &= \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + H^2} \\ &= \sqrt{R^2 + r^2 + H^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)} \end{aligned} \quad (1)$$

设雷达发射信号为线性调频信号(Linear Frequency Modulation, LFM):

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c t + j\pi\gamma t^2) \quad \hat{t} \in [0, T_p] \quad (2)$$

其中, f_c 和 γ 分别为 LFM 信号的载频和调频率, LFM 信号的持续时间是 T_p , t 为时间变量, \hat{t} 为快时间变量。针对点目标 P ,其雷达回波经快时间域匹配滤波后可以表示为:

$$S(k) = \exp(-j2kR_r) \quad (3)$$

其中, $k = \frac{2\pi(f_c + f)}{c}$ 表示快时间域对应的波数, c 为光速, f 为距离向频率。式(3)具有广泛适用性,针对不同的成像模型,瞬时斜距 R_r 的表达式会有不同。具体地,对于圆周 SAR,其回波可以表示为:

$$S_c(k) = \exp[-j2k\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + H^2}] \quad (4)$$

对于线性 SAR(以条带 SAR 为例),雷达 APC 同目标 P 之间的瞬时斜距可以表示为:

$$R_l = \sqrt{R_d^2 + (x_r - x)^2} \quad (5)$$

其中, R_d 表示条带 SAR 雷达 APC 同目标之间的零多普勒斜距。类似于式(4),可以得到条带 SAR 模式下目标 P 对应的雷达回波为:

$$S_l(k) = \exp[-j2k\sqrt{R_d^2 + (x_r - x)^2}] \quad (6)$$

2 圆周 SAR 与线性 SAR 的差异

2.1 成像区域大小及数据处理平面的选择

以条带 SAR 为例,当雷达运行轨迹确定,其距离向的测绘带宽由雷达波束入射角以及波束俯仰宽度决定;方位向测绘带宽则没有限制。鉴于线性 SAR 系统可以涵盖单/双站 SAR,为表述准确,文中线性 SAR 专指线性单站正侧视条带 SAR。依据图 1,圆周 SAR 工作模式下,当雷达运行轨迹确定,雷达有效观测区域的大小由“波足”决定:观测区域半径同载机飞行半径之间满足 $R_a \approx R\sin(\Theta_w/2)$, Θ_w 为天线方位向波束宽度。对比发现,在雷达运行高度及入射角确定的情况下,圆周 SAR 对应的观测场景小于条带 SAR 工作模式的。

此外,对于线性 SAR,人们通常选用斜距平面进行成像处理,且最终的雷达成像结果亦可以展现在斜距平面上。针对圆周 SAR,其回波录取面不再是一个平面。为此,圆周 SAR 的成像处理结果一般呈现在水平平面,即为正射雷达图像。

2.2 频谱支撑域及点散布函数

由式(6),可以获得线性 SAR 回波对应的相位历程为:

$$\Phi_l = -2k\sqrt{R_d^2 + (x_r - x)^2} \quad (7)$$

定义 $k_R = 2k$ 为视线方向(Line Of Sight, LOS)的波数, k_a 表示线性 SAR 沿航向的波数,即为:

$$k_a = \frac{d\Phi_l}{dx} = 2k \frac{x_r - x}{\sqrt{R_d^2 + (x_r - x)^2}} = k_R \sin\theta_m \quad (8)$$

其中 θ_m 为线性 SAR 瞬时方位角。式(8)表明了 k_a 的取值同目标方位向位置无关,这一特性被称为“方位不变性”。该特性有利于在多普勒频域开展一致化处理以提高成像效率。此外,式(8)表明线性 SAR 回波频谱支撑域的形状 $(k_R, k_a) = (2k, 2k\sin\theta_m)$ 为梯形,且与目标位置无关。

图 2 展现了大家熟知的条带 SAR 回波频谱支撑域,结合线性 SAR 知识^[14],可以得到二维波

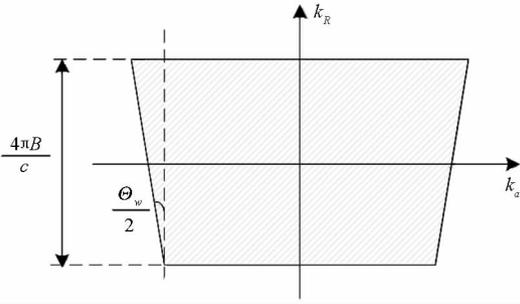


图2 线性 SAR 回波频谱支撑域

Fig.2 Spectrum support domain of linear SAR

数的取值范围:

$$\begin{cases} k_R \in [2k_{\min}, 2k_{\max}] = \left[\frac{4\pi}{c}(f_c - \frac{B}{2}), \frac{4\pi}{c}(f_c + \frac{B}{2}) \right] \\ k_a \in \left[-\frac{4\pi}{\lambda}(1 + \frac{f}{f_c}) \sin \frac{\Theta_w}{2}, \frac{4\pi}{\lambda}(1 + \frac{f}{f_c}) \sin \frac{\Theta_w}{2} \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中 λ 为载波波长。以距离向的频谱为例,其包络为矩形窗。基于傅里叶变换知识^[14],矩形窗函数的傅里叶变换对为 sinc 函数,即距离向点散布函数为 $\text{sinc}[\pi Bt]$,这表明距离向分辨率同信号带宽 B 相关,而点散布函数(Point Spread Function, PSF)对应的峰值旁瓣比、积分旁瓣比等均由 sinc 函数特性决定。类似地也可以得到方位向点散布函数的特性^[14]。需要指出的是,线性 SAR 对应的回波频谱支撑域形状不会随着目标位置变化而变化,因而其点散布函数是唯一的。

针对单航过圆周 SAR,设 k_x, k_y 分别表示目标 P 在 x, y 方向的波数。由式(4)得知圆周 SAR 的相位历程为 $\Phi_c = -2k \sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2 + H^2}$,则 k_x, k_y 可以分别表示为:

$$\begin{cases} k_x = \frac{d\Phi}{dx} = -2k \frac{x - R\cos\theta}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2 + H^2}} \\ k_y = \frac{d\Phi}{dy} = -2k \frac{y - R\sin\theta}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2 + H^2}} \end{cases} \quad (10)$$

定义水平面径向波数 $\rho = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$,其表达式为:

$$\rho = -2k \frac{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2}}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2 + H^2}} \quad (11)$$

ρ 的取值决定了圆周 SAR 在地平面波数支撑域的形状。观察式(11)得知 ρ 的取值同目标空间位置相关,即回波频谱支撑域的取值不再是恒定的,而是空变的。由此可知,单航过圆周 SAR

对应的频谱支撑域不再具有“方位不变性”且其点散布函数同样是空变的。

对于场景中心点,结合式(11)及式(12),其频谱波数表示为 $k_x = 2k\cos\theta_z\cos\theta, k_y = 2k\cos\theta_z\sin\theta$ 水平平面的径向波数 $\rho = 2k\cos\theta_z$ 。则地平面二维频谱支撑域呈标准圆环形,其中内圆的波数半径 $\rho_{\min} = 2k_{\min}\cos\theta_z$,外圆的波数半径 $\rho_{\max} = 2k_{\max}\cos\theta_z$ 。基于 Hankel 函数的傅里叶变换特性,半径为 ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 的圆形频谱支撑域对应的傅里叶变换结果分别为 $\rho_{\max} \frac{J_1(\rho_{\max}\hat{r})}{\hat{r}}$ 和 $\rho_{\min} \frac{J_1(\rho_{\min}\hat{r})}{\hat{r}}$,其中 \hat{r} 为水平面径向变量。由此得到标准圆环状频谱支撑域对应的点散布函数为:

$$PSF(x, y) = \rho_{\max} \frac{J_1(\rho_{\max}\hat{r})}{\hat{r}} - \rho_{\min} \frac{J_1(\rho_{\min}\hat{r})}{\hat{r}} \quad (12)$$

式(12)中 $J_1(\cdot)$ 为 1 阶第一类贝塞尔函数。特殊地,当雷达发射的 LFM 信号的带宽为零,即为单频信号时,场景中心点对应的频谱支撑域由圆环变为圆周,且半径 $\rho_c = 4\pi f_c \cos\theta_z/c$ 。同样基于 Hankel 函数的傅里叶变换特性,得知此时场景中心点对应的点散布函数为:

$$PSF(x, y) = \rho_c J_0(\rho_c r) \quad (13)$$

式(13)中 $J_0(\cdot)$ 表示 0 阶第一类贝塞尔函数。由式(12)和式(13)可以得知圆周 SAR 工作模式下,目标二维分辨率同雷达波数相关,即同雷达发射电磁波的载频和带宽均有关,而不再仅仅取决于信号带宽,这是圆周 SAR 能够获取超高分辨率二维图像的原因。此外,圆周 SAR 对应的点散布函数特性,包括峰值旁瓣比、积分旁瓣比等,由贝塞尔函数特性决定,而不再是 sinc 函数。

然而,对于非场景中心点,人们难以得到其点散布函数的解析表达式,但可以采用数值分析的方法得到目标的点散布函数^[15]。在圆周 SAR 的实际应用中,有必要对非场景中心点进行点散布函数的数值计算,以保证有效观测场景中所有目标具有相似的点散布函数特性。

2.3 单航过圆周 SAR 的三维成像能力

已知单航过线性 SAR 不具备高度维的分辨能力。而对于圆周 SAR,基于单航过录取回波可以获得目标的高度信息。具体地,基于式(10),可以得到圆周 SAR 工作模式下水平地面上目标 P 在高度维 z 的频谱分量:

$$\begin{aligned} k_z &= -\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} \\ &= -2k \frac{H}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2 + H^2}} \end{aligned}$$

$$= -2k\sin\hat{\theta}_z(\theta) \quad (14)$$

其中 $\hat{\theta}_z(\theta)$ 表示目标 P 对应的雷达入射角。注意到 $\hat{\theta}_z(\theta)$ 是观测角 θ 的函数,其变化范围可以如图 3 所示。

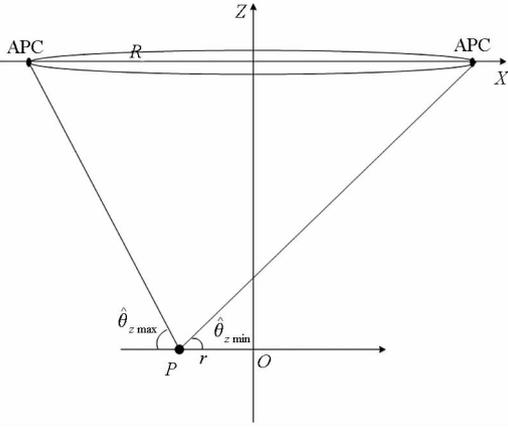


图 3 圆周 SAR 成像几何侧视图

Fig. 3 Side-view of the imaging geometry of CSAR

图 3 给出了单航过圆周 SAR 雷达入射角的变化范围,图 3 中目标 P 距场景中心的径向距离为 r ,其对应的最大及最小雷达入射角分别为 $\hat{\theta}_{z\max}$ 和 $\hat{\theta}_{z\min}$:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_{z\max} = \arctan\left(\frac{H}{R-r}\right) \\ \hat{\theta}_{z\min} = \arctan\left(\frac{H}{R+r}\right) \end{cases} \quad (15)$$

定义波数 k_z 的带宽为 B_z ,观察式(14),可知:

$$B_z = |2k_{\max}\sin(\hat{\theta}_{z\max}) - 2k_{\min}\sin(\hat{\theta}_{z\min})| \quad (16)$$

式(16)表明,对于非场景中心点, B_z 始终大于零,故而无论雷达辐射信号为宽带信号或是单频信号,单航过圆周 SAR 对非场景中心点均具有高度维分辨能力。对于场景中心点,其对应的雷达入射角为恒定值 θ_z 。若雷达辐射信号为宽带信号且带宽为 B ,则场景中心点对应的高度维波数宽度为 $4\pi B\sin\theta_z/c$,此时圆周 SAR 对其具有高度维分辨能力。若辐射信号为单频信号,则场景中心点对应的高度维波数宽度为零,圆周 SAR 对其不再具备高度维分辨能力。

经过本节分析,可以得到以下结论:

1) 在雷达飞行高度及入射角确定的情况下,圆周 SAR 工作模式相比于线性 SAR 具有较小的观测范围;线性 SAR 的成像处理可以在斜距平面上进行;圆周 SAR 成像结果通常需要呈现在地平面,为正射成像处理。

2) 线性 SAR 对应的点散布函数具有一致性,点散布函数特性由 sinc 函数决定;圆周 SAR 对应的点散布函数是空变的,其特性由贝塞尔函

数决定。

3) 线性 SAR 对应的频谱具有“方位不变性”,利于在多普勒域进行一致化处理以提高成像效率;单航过圆周 SAR 在水平地面对应的频谱支撑域是二维空变的,这为在频域开展高效率成像处理带来了挑战。

4) 当雷达辐射信号为宽带信号时,单航过圆周 SAR 具备高度向分辨能力,但场景中不同径向距离处目标对应的高度向分辨率不同。

3 圆周 SAR 不同成像模型分析

在圆周 SAR 的成像特性中,如何克服空变频谱以提高圆周 SAR 频域成像处理效率已成为 SAR 领域的研究热点。对圆周 SAR 的成像模型进行调整,即可在频域进行一致化处理,进而提高频域成像算法的效率。本节分析了两种圆周 SAR 成像模型的调整方案。

3.1 平面圆周 SAR

在 $H=0$ 的情况下(或雷达运动平面等同于目标所在平面),圆周 SAR 回波相位历史可以表示为:

$$\Phi_c = -2k\sqrt{(x-R\cos\theta)^2 + (y-R\sin\theta)^2} \quad (17)$$

此时 x, y 方向波数 k_x, k_y 可以重新表示为:

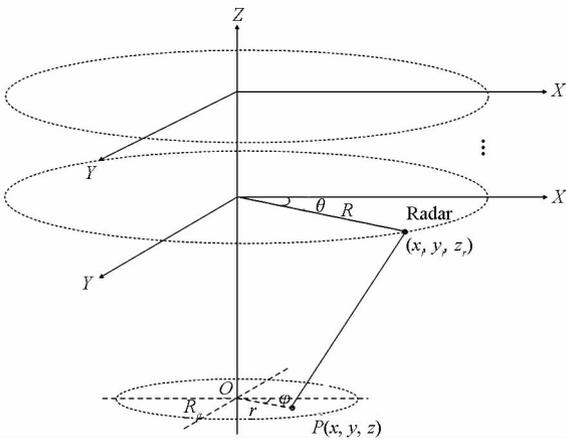
$$\begin{cases} k_x = -2k\frac{x-R\cos\theta}{\sqrt{(x-R\cos\theta)^2 + (y-R\sin\theta)^2}} \\ k_y = -2k\frac{y-R\sin\theta}{\sqrt{(x-R\cos\theta)^2 + (y-R\sin\theta)^2}} \end{cases} \quad (18)$$

观察得知此时水平地面的径向波数 $\rho_g = 2k$ 是一个恒定值,它表明此时圆周 SAR 在地平面的回波频谱支撑域是一个形状恒定的圆环,不再是空变的。因而此时圆周 SAR 的成像处理不再涉及空变处理,可以在频域进行一致化成像处理。但此时圆周 SAR 不再具备高度向分辨能力。总的来说, $H=0$ 条件下的圆周 SAR 具有相同的点散布函数且能够在频域进行快速成像处理,具有重要的理论意义。该成像模型不利于开展外场试验以实现大区域成像和监测,但在某些特殊领域具有重要意义,如医学成像以及高分辨率安检设备设计等方面。

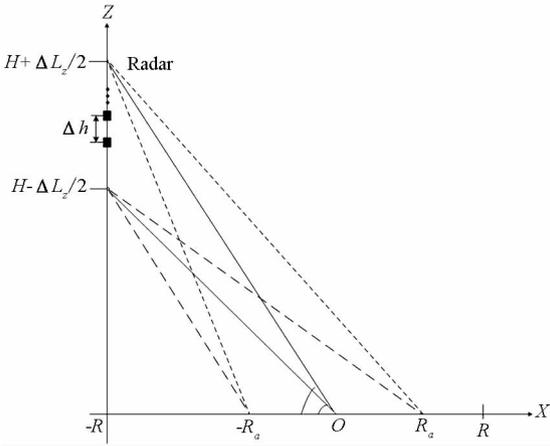
3.2 沿不同高度平面的多航过圆周 SAR

另一种更具有实际意义的圆周 SAR 模式即为多航过圆周 SAR,图 4 给出了多航过圆周 SAR 的成像几何。

图 4(a) 为多航过圆周 SAR 成像示意图,图



(a) 多航过圆周 SAR 三维几何
(a) 3-D geometry of multi-pass CSAR



(b) 多航过圆周 SAR 侧视图
(b) Side-view of multi-pass CSAR

图4 多航过圆周 SAR 成像几何

Fig.4 Imaging geometry of multi-pass CSAR

4(a)中参数定义同图1一致,只是雷达轨迹高度不再是恒定值 H ,而是多个等间隔排列的平行轨迹。不失一般性,此时目标 P 的坐标设为 (x, y, z) 。图4(b)为图4(a)的侧视图,高度维孔径长度为 ΔL_z ,相邻两基线沿高度向的间隔为 Δh 。基于式(4),对场景中任意非场景中心点目标 $P(x, y, z)$,多航过圆周 SAR 对应的雷达回波可以表示为:

$$S_c(k, \theta, z_r) = \exp[-j2k \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}] = \exp[-j2k \sqrt{R^2 + r^2 + (z_r - z)^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)}] \quad (19)$$

首先开展沿高度维 z 的傅里叶变换:

$$S_c(k, \theta, k_z) = \int \exp[-j2k \sqrt{R^2 + r^2 + (z_r - z)^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)} - jk_z z] dz, \quad (20)$$

基于驻定相位原理,可以得到:

$$\frac{z^* - z}{\sqrt{R^2 + r^2 + (z_r - z)^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)}} = -\frac{k_z}{2k} \quad (21)$$

式(21)中 z^* 表示高度向驻定相位点。基于三角函数知识,式(21)可以化简为:

$$\sin\left(\arctan\left(\frac{z^* - z}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)}}\right)\right) = -\frac{k_z}{2k} \quad (22)$$

进而可以得到驻定相位点为:

$$z^* = -\frac{k_z}{\sqrt{4k^2 - k_z^2}} \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)} + z \quad (23)$$

由此得到经高度维傅里叶变换后的信号为:

$$S_c(k, \theta, k_z) = \exp[-j \sqrt{4k^2 - k_z^2} \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos(\theta - \varphi)} - jk_z z] = \exp[-j \sqrt{4k^2 - k_z^2} \sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2} - jk_z z] \quad (24)$$

具体地,可以得到 k_z 的表达形式为:

$$k_z = -2k \frac{z_r - z}{\sqrt{(x_r - x)^2 + (y_r - y)^2 + (z_r - z)^2}} = -2k \sin \theta_c \quad (25)$$

θ_c 表示多航过圆周 SAR 模式下目标 P 处对应的雷达入射角,类似于图3,可以得到 θ_c 的变化范围,如图5所示。

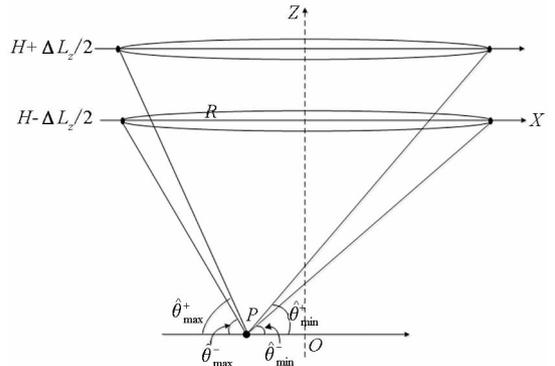


图5 多航过圆周 SAR 雷达入射角示意图

Fig.5 Incident angle according to multi-pass CSAR

图5中,目标 P 的径向坐标仍为 r , θ_{\max}^- 和 θ_{\min}^- 分别表示最低飞行平面对应的最大及最小雷达入射角; θ_{\max}^+ 和 θ_{\min}^+ 分别表示最高飞行平面对应的最大及最小雷达入射角。结合式(15),可以得知多航过圆周 SAR 对应的雷达入射角变化范围为:

$$\theta_c \in \left[\arctan\left(\frac{H - \Delta L_z / 2}{R + r}\right), \arctan\left(\frac{H + \Delta L_z / 2}{R - r}\right) \right] \quad (26)$$

由此得到多航过圆周 SAR 对应的高度维波数宽度为:

$$B_z = \left| 2k_{\max} \sin \left(\arctan \left(\frac{H + \Delta L_z / 2}{R - r} \right) \right) - 2k_{\min} \sin \left(\arctan \left(\frac{H - \Delta L_z / 2}{R + r} \right) \right) \right| \quad (27)$$

对比式(27)和式(16),可知多航过圆周 SAR 对应的高度维波数宽度一直大于单航过圆周 SAR,且无论发射信号为宽带信号还是单频信号,多航过圆周 SAR 对观测场景中任意位置的目标均具备高度维分辨能力。

观察式(27),可以得知场景边缘处对应更大的高度维波数宽度,由此得到整个观测场景中高度维波束宽度的最大值为:

$$B_{z_{\max}} = \left| 2k_{\max} \sin \left(\arctan \left(\frac{H + \Delta L_z / 2}{R - R_a} \right) \right) - 2k_{\min} \sin \left(\arctan \left(\frac{H - \Delta L_z / 2}{R + R_a} \right) \right) \right| \quad (28)$$

其对应的高度维采样间隔为 $2\pi/B_{z_{\max}}$,为避免高度维的混叠,对于多航过圆周 SAR,其基线采样间隔需满足:

$$\Delta h < 2\pi/B_{z_{\max}} \quad (29)$$

类似于式(10),可以得到经高度维傅里叶变换后回波频谱在 x 和 y 向的波数分别为:

$$\begin{cases} k_x = -\sqrt{4k^2 - k_z^2} \frac{x - R\cos\theta}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2}} \\ k_y = -\sqrt{4k^2 - k_z^2} \frac{y - R\sin\theta}{\sqrt{(x - R\cos\theta)^2 + (y - R\sin\theta)^2}} \end{cases} \quad (30)$$

此时,水平面径向波数 ρ 演变为 $\sqrt{4k^2 - k_z^2}$,对于不同的高度维频率 k_z ,径向波数 ρ 是恒定的。这表明在高度维频域,针对不同的 k_z ,能够在水平面开展一致化处理。这对提高成像效率具有重要意义。

紧接着,对式(24)中的信号进行角度域的傅里叶变换,可以得到:

$$S_c(k, \xi, k_z) = \int \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_z^2} \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)} - jk_z z - j\xi\theta) d\theta \quad (31)$$

其中 ξ 表示角度域波数。基于驻定相位原理,可以通过求解式(32)来得到驻定相位点。

$$\frac{\sin(\theta - \varphi)}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr\cos(\theta - \varphi)}} = -\frac{\xi}{\sqrt{4k^2 - k_z^2} Rr} \quad (32)$$

经计算,可以得到两个驻定相位点,分别为:

$$\theta_1^* = \pi + \arcsin\left(\frac{\xi}{R\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) + \arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) + \varphi \quad (33)$$

$$\theta_2^* = \arcsin\left(\frac{\xi}{R\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - \arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) + \varphi \quad (34)$$

将式(33)、式(34)带入式(32)可以得到:

$$\begin{aligned} S_c(k, \xi, k_z) &= \exp\left[-j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)R^2 - \xi^2} - j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)r^2 - \xi^2} - j\xi\pi - j\xi\varphi - j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{R\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - jk_z z\right] + \\ &\exp\left[-j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)R^2 - \xi^2} + j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)r^2 - \xi^2} - j\xi\varphi - j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{R\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) + j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - jk_z z\right] \end{aligned} \quad (35)$$

式(35)给出了多航过圆周 SAR 的三维频谱表达式。观察发现圆周 SAR 三维频谱由两部分叠加而成。这是由于圆周 SAR 角度域频谱变换中对应两个驻定相位点造成的。对于式(35),构造匹配滤波函数:

$$H_c(k, \xi, k_z) = \exp\left[-j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)R^2 - \xi^2} - j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{R\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right)\right] \quad (36)$$

观察发现式(36)中匹配滤波函数同目标所在位置无关,是非空变的(这有利于在频域进行一致化处理,提高成像效率)。经匹配滤波后,得到:

$$\begin{aligned} S_1(k, \xi, k_z) &= \exp\left[-j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)r^2 - \xi^2} - j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - jk_z z - j\xi\pi - j\xi\varphi\right] + \\ &\exp\left[j\sqrt{(4k^2 - k_z^2)r^2 - \xi^2} + j\xi\arcsin\left(\frac{\xi}{r\sqrt{4k^2 - k_z^2}}\right) - jk_z z - j\xi\varphi\right] \end{aligned} \quad (37)$$

定义 $2k_\rho = \sqrt{4k^2 - k_z^2}$ 并对式(37)进行角度域傅里叶逆变换,得到:

$$\begin{aligned} S_2(k, \theta, k_z) &= \exp[j2k_\rho r\cos(\theta - \varphi)] \exp(-jk_z z) \end{aligned}$$

$$= \exp(j2k_p \cos\theta r \cos\varphi + j2k_p \sin\theta r \sin\varphi - jk_z z)$$

$$\theta \in [0, 2\pi]$$
(38)

定义新的 x, y 向波数:

$$\begin{cases} k_x = -2k_p \cos\theta \\ k_y = -2k_p \sin\theta \end{cases}$$
(39)

针对 $S_2(k, \theta, k_z)$, 需基于 $2k_p = \sqrt{4k^2 - k_z^2}$ 以及式(39)进行二维插值, 以得到笛卡尔坐标系沿 k_x, k_y, k_z 均匀采样的新的频谱形式:

$$S_3(k_x, k_y, k_z) = \exp(-jk_x x) \exp(-jk_y y) \exp(-jk_z z)$$
(40)

式(40)中三个指数项分别决定了目标在成像处理后的位置。对 $S_3(k_x, k_y, k_z)$ 进行三维逆傅里叶变换, 即可得到精确的圆周 SAR 三维成像结果。

事实上, 类似于对式(10)的分析, 多航过圆周 SAR 观测场景中不同目标的点散布函数仍是不同的。但在高度维频率域, 却可以开展一致化匹配滤波, 这大大提高了成像效率。

3.3 多航过圆周 SAR 仿真结果

鉴于多航过圆周 SAR 成像模式具有重要的实际应用价值, 这里利用计算机仿真对其成像流程做出验证。三维成像处理运算量十分巨大, 为减小运算量, 选用小尺度的圆周 SAR 成像几何, 具体参数见表 1。

表 1 多航过圆周 SAR 仿真参数设置

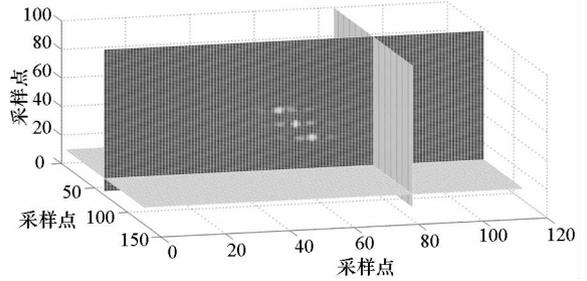
Tab. 1 Parameters of multi-pass CSAR

参数	量值
雷达波段	P 波段
中心频率	600MHz
LFM 带宽	100MHz
采样率	200MHz
雷达运行半径	20m
高度维孔径长度	4m
圆周轨迹基线间隔	0.2m
观测轨迹次数	21

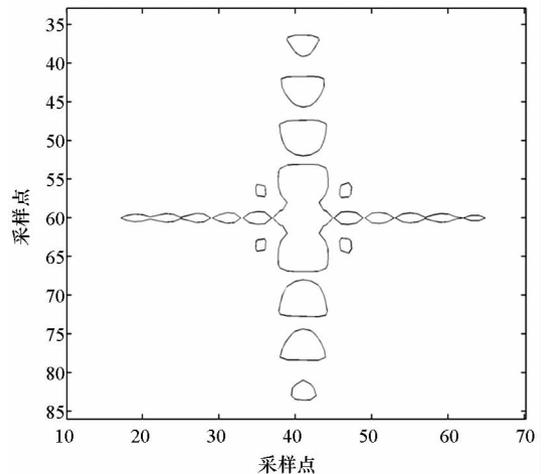
在场景布置方面, 在观测场景内布置三个散射点, 其三维坐标分别为 $(0, 0, 0)$, $(0, -0.5, 1)$ 和 $(0, 0.5, -1)$, 单位均为 m。利用 3.2 节阐述的成像处理方法, 可以得到如图 6 所示成像结果。

图 6 给出了多航过圆周 SAR 对点目标的成像结果。图 6(a) 给出了三个点目标的三维成像

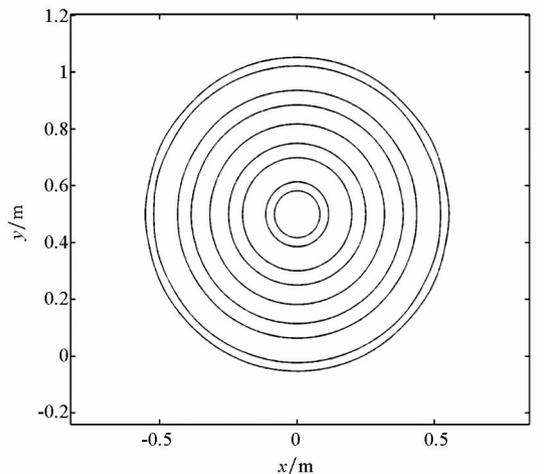
结果, 由于三维图像不易表达, 针对点目标 $(0, 0.5, -1)$, 分别沿 $y-z$ 平面及 $x-y$ 平面进行剖切, 得到了其点散布函数在 $y-z$ 平面及 $x-y$ 平面的剖面图, 分别如图 6(b) 及图 6(c) 所示。更进一步地, 可以得到点散布函数沿 x 向, y 向及 z 向的剖面图, 分别如图 6(d)、图 6(e)、图 6(f) 所示。具体地, 对点散布函数的特性进行了测量, 得到了如表 2 所示的测量结果。



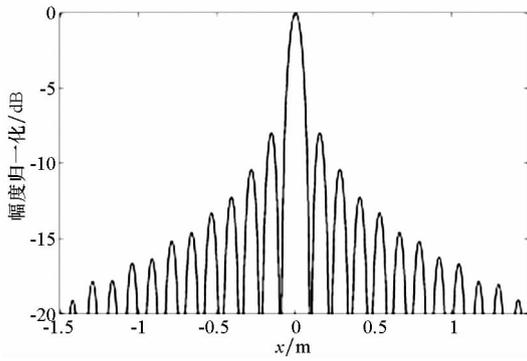
(a) 三维成像结果
(a) 3-D imaging results



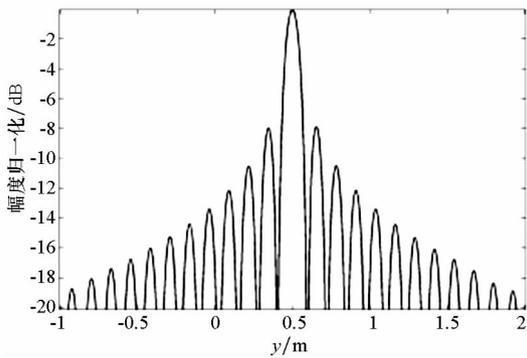
(b) $y-z$ 平面剖面图
(b) Profile in $y-z$ plane



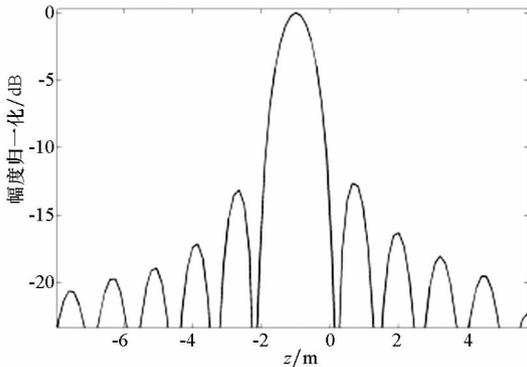
(c) $x-y$ 平面剖面图
(c) Profile in $x-y$ plane



(d) x 向剖面图
(d) Profile in x



(e) y 向剖面图
(e) Profile in y



(f) z 向剖面图
(f) Profile in z

图 6 多航过圆周 SAR 成像结果

Fig. 6 Imaging results of multi-pass CSAR

表 2 目标点散布函数分析

Tab. 2 Quantitative analysis of point target

PSF 不同 剖面	3dB 带宽/ m	峰值旁瓣比/ dB	积分旁瓣比/ dB
沿 z 向	0.963 4	-13.3	-10.07
沿 x 向	0.090 3	-8.23	-2.229
沿 y 向	0.090 3	-8.24	-2.229

圆周 SAR 以及多航过圆周 SAR 的频域成像是精确高效的。但在实际应用中,单航过/多航过圆周 SAR 面临的挑战包括运动误差、不同轨迹间非均匀间隔以及观测轨迹次数较少等因素。鉴于这些挑战同本文主旨有所区别,作者将在其他文章中对上述实际问题给出相应的处理方法。

4 结论

本文建立了圆周 SAR 信号模型,基于理论分析对比了圆周 SAR 同线性 SAR 在成像处理中的差异,凸显了圆周 SAR 的成像特性,包括二维超高分辨率、三维成像能力等;得知了圆周 SAR 对应的点散布函数是空变的,其频域成像处理的难点在于空变频谱不便于进行一致化处理,成像效率低。分析了平面 CSAR 和多航过 CSAR 两种成像模式,从理论上严格证明了这两种成像模式便于在频域开展一致化处理,成像效率高。该分析有助于了解圆周 SAR 成像特性并进一步地开发高效精确的圆周 SAR 频域成像方法。

参考文献 (References)

[1] Soumekh M. Synthetic aperture radar signal processing with matlab algorithms [M]. USA: Wiley-Interscience, 1999: 486 - 552.

[2] Ishimaru A, Chan T K, Kuga Y. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(5): 1524 - 1530.

[3] Lin Y, Hong W, Tan W X, et al. Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 651 - 655.

[4] 闵锐. 机载 SAR 三维成像理论及关键技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2008.
MIN Rui. Research on airborne SAR three-dimensional imaging theory and key technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)

[5] 刘燕. 高分辨率及新模式 SAR 成像算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学,2012.
LIU Yan. Study on high-resolution SAR and new type SAR imaging [D]. Xi'an: XiDian University, 2012 (in Chinese).

[6] 刘燕,吴元,孙光才,等. 圆轨迹 SAR 快速成像处理 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 852 - 858.
LIU Yan, WU Yuan, SUN Guangcai, et al. Fast imaging processing of circular SAR [J]. Journal Electronics & Information Technology, 2013, 35(4): 852 - 858. (in Chinese)

[7] Frolind P, Gustavsson A, Lundberg M, et al. Circular-aperture VHF-band synthetic aperture radar for detection of vehicles in forest concealment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1329 - 1339.

- operating range of a IR system for stealth aircraft[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(11): 1243 - 1247. (in Chinese)
- [10] 李力, 袁溯, 金伟其, 等. 基于最小可分辨对比度的近红外距离选通成像系统作用距离模型[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3481 - 3487.
- LI Li, QIU Su, JIN Weiqi, et al. Operating distance model of near-infrared range gated imaging system based on minimum resolvable contrast[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, 30(12): 3481 - 3487. (in Chinese)
- [11] 赵妙娟, 车宏. 军用光电系统作用距离分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(s2): 501 - 503.
- ZHAO Miaojuan, CHE Hong. Analysis of the efficient distance of O - E system for military[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(s2): 501 - 503. (in Chinese)
- [12] 毛峡, 常乐, 刁伟鹤. 复杂背景下红外点目标探测概率估算[J]. *北京航空航天大学学报*, 2011, 37(11): 1429 - 1434.
- MAO Xia, CHANG Le, DIAO Weihe. Estimation for detection probability of infrared point target under complex backgrounds[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2011, 37(11): 1429 - 1434. (in Chinese)
- [13] 贾庆莲, 邓文渊. 红外警戒系统的探测概率计算[J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(10): 1856 - 1861.
- JIA Qinglian, DENG Wenyuan. Detection probability calculation of infrared warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1856 - 1861. (in Chinese)
- [14] 李克新, 张伟, 丛明煜, 等. 一种深空背景空间小目标条痕检测算法[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 445 - 450.
- LI Kexin, ZHANG Wei, CONG Mingyu, et al. A streak detection algorithm of space target in deep space background[J]. *Acta Optic Sinica*, 2010, 30(2): 445 - 450. (in Chinese)
- [15] 李朝晖, 王冰, 陈明. 基于小波多尺度和最大似然法的红外目标探测[J]. *光学学报*, 2009, 29(12): 3404 - 3409.
- LI Chaohui, WANG Bing, CHEN Ming. Infrared target detection based on wavelet multi scale and maximum likelihood[J]. *Acta Optic Sinica*, 2009, 29(12): 3404 - 3409. (in Chinese)
- [16] 时成文, 隋强强, 石碧艳. 一种新型光电设备响应时间与探测概率自动测试系统[J]. *光电技术应用*, 2008, 23(1): 38 - 41.
- SHI Chengwen, SUI Qiangqiang, SHI Biyan. A new automatic test system of reaction time and detection probability for electro-optic equipments[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2008, 23(1): 38 - 41. (in Chinese)

(上接第 168 页)

- [8] Palm S, Oriot H M, Cantalloube H M. Radargrammetric DEM extraction over urban area using circular SAR imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4720 - 4725.
- [9] Ponce O, Prats-Iraola P, Pinheiro M, et al. Fully polarimetric high-resolution 3-D imaging with circular SAR at l-band[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(6): 3074 - 3090.
- [10] Ponce O, Prats P, Scheiber R, et al. Study of the 3-D impulse response function of holographic SAR tomography with multicircular acquisitions[C]//Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR, 2014: 1 - 4.
- [11] Ponce O, Prats-Iraola P, Scheiber R, et al. Polarimetric 3-D reconstruction from multicircular SAR at P-band[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(4): 803 - 807.
- [12] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. *雷达学报*, 2012, 1(2): 124 - 135.
- HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of radars*, 2012, 1(2): 124 - 135. (in Chinese)
- [13] 林赞, 谭维贤, 洪文, 等. 圆迹 SAR 极坐标格式算法研究[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(12): 2802 - 2807.
- LIN Yun, TAN Weixian, HONG Wen, et al. Polar format algorithm for circular synthetic aperture radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(12): 2802 - 2807. (in Chinese)
- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. The technology of radar imaging [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [15] Prats-Iraola P, Rodriguez-Cassola M, De Zan F, et al. Efficient evaluation of fourier-based SAR focusing kernels[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(9): 1489 - 1493.