



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

一种稳健的频率步进SAR距离向栅瓣抑制方法

高文斌

引用本文

高文斌. 一种稳健的频率步进SAR距离向栅瓣抑制方法[J]. 计算机科学, 2024, 51(8): 209-216.

GAO Wenbin. [A Robust Method for Range Grating Lobe Suppression in Stepped Frequency SAR](#)[J].

Computer Science, 2024, 51(8): 209-216.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于多目特征交叉的服务推荐算法](#)

Service Recommendation Algorithm Based on Multi-features Crossing

计算机科学, 2023, 50(6A): 210800242-7. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.210800242>

[一种准确鲁棒的宽带信号DOA估计算法](#)

Accurate and Robust Algorithm for Broadband Signal DOA Estimation

计算机科学, 2019, 46(11A): 376-380.

[一种UWB稀疏阵列天线虚拟中心阵元到达角估计方法](#)

UWB Sparse Array Antenna Virtual Center Element Arrival Angle Estimation Method

计算机科学, 2019, 46(6A): 321-324.

一种稳健的频率步进 SAR 距离向栅瓣抑制方法

高文斌

北京电子科技学院电子与通信工程系 北京 100070

摘要 频率步进合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的系统传递函数中存在幅度和相位误差(Magnitude Error and Phase Error, MEPE),通过宽带合成操作在距离宽带信号中引入了周期性 MEPE,从而导致宽带合成后的高分辨率距离像(HRRP)中出现周期性栅瓣。经过后续 SAR 成像处理,这些周期性栅瓣在图像中表现为虚假目标,严重影响 SAR 图像目标的检测与识别。为此,基于 SAR 图像的栅瓣抑制(Grating Lobe Suppression, GLS)算法被提出,其基于点状目标假设,利用 SAR 图像中的强点目标实现图像栅瓣的有效抑制。然而,对于非点状目标场景,已有基于 SAR 图像的 GLS 算法的性能显著下降,而且会引起图像散焦。因此,文中提出了一种基于目标信息差异的 GLS 算法,取名为目标信息差异法。该算法不基于点状目标假设,通过估计宽带合成后的理想 HRRP 与实际 HRRP 之间的信息差异,稳健地估计出合成宽带信号中的周期性 MEPE。通过补偿该周期性 MEPE,该算法可以将频率步进 SAR 距离向栅瓣抑制到图像的背景水平。通过对不同 GLS 算法进行性能对比发现,所提 GLS 算法受图像信杂比影响小,且同时适用于非点状目标和点状目标场景,相比已有 GLS 算法具有明显的优势。实测数据处理结果证明了所提方法的有效性和相对已有 GLS 算法的优越性。

关键词 栅瓣图像;频率步进合成孔径雷达;背景水平;宽带信号;图像散焦

中图分类号 TP751

A Robust Method for Range Grating Lobe Suppression in Stepped Frequency SAR

GAO Wenbin

Department of Electronic and Communication Engineering, Beijing Electronic Science & Technology Institute, Beijing 100070, China

Abstract The magnitude error and phase error (MEPE) in the system transfer function of the stepped-frequency synthetic aperture radar (SAR) introduces periodic MEPE in the synthesized wideband signal, resulting in periodic grating lobes in the high-resolution range profile (HRRP). After subsequent SAR imaging processing, these periodic grating lobes appear as false targets in the SAR image, seriously affecting SAR image target detection and recognition. Therefore, the GLS algorithm based on SAR images has been proposed, which is based on the assumption of point targets and effectively suppresses image grating lobes by utilizing strong point targets in SAR images. However, for non-point target scenes, existing GLS algorithms based on SAR images can cause image defocusing while suppressing image grating lobes. Therefore, this paper proposes a GLS algorithm based on target information differences, named the target information difference method, which is not based on the assumption of point-shaped targets. By estimating the information difference between the ideal HRRP and the actual HRRP of the target after wideband synthesis, it can robustly estimate the periodic MEPE in the synthesized wideband signal. By compensating for this periodic MEPE, the algorithm can suppress the range grating lobes to the SAR image background level. By comparing the performance of different GLS algorithms, it is found that the proposed GLS algorithm is less affected by the image signal-to-noise ratio and is suitable for both non-point target and point target scenes, thus having obvious advantages comparing to existing GLS algorithms. Experimental data processing results demonstrate the effectiveness and superiority of the proposed method compared to existing GLS algorithms.

Keywords Grating lobe suppression, Stepped frequency synthetic aperture radar, Background level, Broadband signal, Image defocus

1 引言

频率步进技术^[1-5]通过发射和接收瞬时窄带信号,并利用信号处理手段获得合成宽带信号,有效降低了系统对 ADC

采样速率和 DDC 转换速率的要求,从而为雷达系统的轻量化提供了可能。频率步进技术与 SAR 技术^[6-10]的结合,促进了小型化、低成本、高精度成像传感器的发展与应用,而频率步进无人机载 SAR^[11-13]正是其典型代表。

到稿日期:2023-06-05 返修日期:2023-09-05

基金项目:中央高校基本科研业务费课题(328202207)

This work was supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(328202207).

通信作者:高文斌(bestilte@163.com)

然而,采用频率步进技术带来的问题是图像距离向会出现周期性栅瓣。在频率步进 SAR 中,由于中频放大器等系统器件的非理想特性,系统采集的窄带回波中包含 MEPE。当一组中心频率不同的窄带信号被拼接成宽带信号时,窄带信号内的 MEPE 会被拼接成周期性 MEPE。由成对回波理论可知,信号频域的周期性 MEPE 会导致信号时域出现成对回波^[14],因此,当窄带信号被拼接成宽带信号后,周期性成对回波也随之产生,习惯上称为距离向栅瓣。距离向栅瓣经过后续 SAR 成像处理后会形成虚假目标,严重影响基于 SAR 图像的目标检测和识别。

系统内定标技术^[15-16]通过获取系统 MEPE,并在宽带合成前对窄带信号进行 MEPE 补偿,进而达到抑制栅瓣的目的。然而,此方法只能获得系统闭环的 MEPE,无法获得系统闭环外的部分(如天线)对应的 MEPE。

针对系统内定标技术存在的问题,已有几种基于回波数据的 GLS 算法被提出,包括峰值点幅相法^[17]、强点对比度法^[18]和离散加窗 PGA(Phase Gradient Algorithm)法^[19]。峰值点幅相法^[17]利用强点主瓣和栅瓣的峰值点幅相信息进行周期性 MEPE 估计与补偿,进而达到抑制距离向栅瓣的目的。强点对比度法^[18]建立了强点对比度与宽带信号中周期性 MEPE 之间的定量关系,并采用逐次迭代思路,将强点对比度最优时所对应的 MEPE 作为最终估计结果。通过对估计所得 MEPE 进行补偿,从而抑制距离向栅瓣。离散加窗 PGA 法^[19]从距离图像聚焦的角度对待距离栅瓣抑制问题,将其栅瓣视为由主瓣散焦而成,将栅瓣抑制问题等效为图像聚焦问题。然而,峰值点幅相法无法有效利用多个场景目标同时参与 MEPE 估计,因此其误差估计精度不高;强点对比度法和离散加窗 PGA 法本质上基于点目标假设,在将非点状目标能量聚焦的过程中,非点状目标被“过聚焦”为点状目标,损失了目标的真实信息,而且引起了距离图像散焦。

因此,基于频率步进 SAR 回波数据,本文提出了一种新的 GLS 算法,即目标信息差异法。该算法不基于点目标假设,并利用多个目标理想 HRRP 与实际 HRRP 之间的信息差异,稳健地估计出系统传递函数中的周期性 MEPE,从而解决了已有基于回波数据的 GLS 算法(以下简称已有 GLS 算法)存在的误差估计精度不高和“过聚焦”问题。

本文首先简要分析了频率步进 SAR 距离向栅瓣的形成过程;然后基于此分析提出了基于图像信息差异的距离 GLS 算法,并从算法对目标形状要求和受图像信杂比影响这两个方面,将本文所提 GLS 算法与已有 GLS 算法进行了性能对比;最后利用基于频率步进无人机载 SAR 的实测数据实验,对本文提出的 GLS 算法进行了效果验证,证明了该算法的有效性和相对已有算法的优越性。

2 距离向栅瓣形成过程

频率步进 SAR 通过发射一组中心频率不同的窄带信号(简称为一个脉组)来获得距离向高分辨率。假定 T_p 为窄带信号脉宽, B 为窄带信号带宽, Δf 为相邻窄带信号间的步进间隔, PRT 为窄带信号脉冲重复周期, $f_c(n)$ 为第 n 个窄带信号的中心载频, N 为一个脉组内的窄带信号个数,发射信号调频斜率为 K_r ,且某一点 P 与雷达距离为 R ,则雷达接收到

的第 n 个窄带回波信号为:

$$S_{e_n}(t) = \sigma \cdot \text{rect}[(t - 2R/c)/T_p] \cdot \exp[j\pi K_r (t - 2R/c)^2] \cdot \exp[-j4\pi f_c(n)R/c] \quad (1)$$

其中, σ 为目标后向散射系数, $\text{rect}[\cdot]$ 为矩形窗函数, t 为距离时间, c 为光速。 $f_c(n) = f_c + n\Delta f, n=0,1,\dots,N-1, f_c$ 为第一个窄带信号的中心频率。

经过解调和匹配滤波,第 n 个窄带回波信号可以表示为:

$$S_{MF_n}(f_r) = \sigma \cdot \text{rect}(f_r/B) \cdot \exp(-j4\pi f_r R/c) \cdot \exp[-j4\pi R(f_c + n\Delta f)/c] \quad (2)$$

其中, f_r 为距离频率。

鉴于系统器件的非理想因素,将在窄带回波信号中引入无法避免的 MEPE,并对距离向宽带合成过程产生影响。假定雷达接收到的第 n 个窄带信号中包含的频域幅度和相位误差分别为 $A_n(f_r)$ 和 $\theta_n(f_r)$,则经过解调和匹配滤波后第 n 个窄带回波信号表示为:

$$S'_{MF_n}(f_r) = \sigma \cdot \text{rect}(f_r/B) \cdot A_n(f_r) \cdot \exp[j\theta_n(f_r)] \cdot \exp(-j4\pi f_r R/c) \cdot \exp[-j4\pi R(f_c + n\Delta f)/c] \quad (3)$$

由于各个窄带信号在被发射和接收过程中所经过的系统环路相同,因此可以认为各个窄带信号中所包含的幅度和相位误差差异较小且可以忽略不计,即 $A(f_r)$ 和 $\theta(f_r)$ 不随频点 n 变化。

式(3)所示的窄带回波信号经过宽带合成后可得:

$$S'_{\text{wide}}(f_r) = \sigma \cdot \exp[-j4\pi R(f_r + f_c + (N-1) \cdot \Delta f/2)/c] \cdot H(f_r) \quad (4)$$

其中,

$$H(f_r) = \sum_{n=0}^{N-1} \{ \text{rect}((f_r - f_n)/\Delta f) \cdot A(f_r - f_n) \cdot \exp[j\theta(f_r - f_n)] \} \quad (5)$$

且

$$f_n = (n+1/2 - N/2) \cdot \Delta f, n=0,1,\dots,N-1 \quad (6)$$

$H(f_r)$ 即为宽带信号中的周期性 MEPE,它由窄带信号 MEPE 经过宽带合成处理而形成,如图 1 所示。

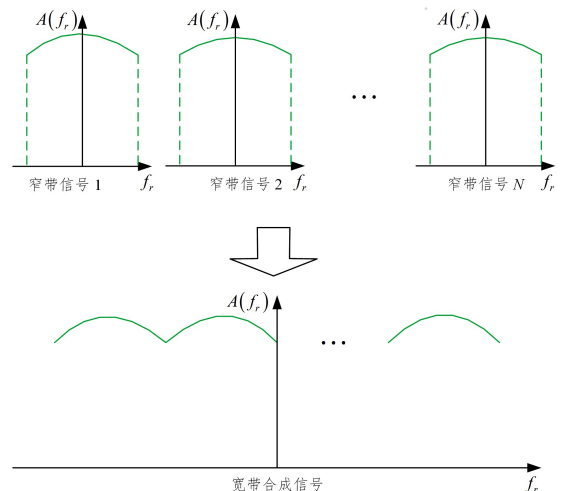


图 1 周期性 MEPE 形成过程示意图

Fig. 1 Illustration of periodic MEPE formation process

由周期信号性质可知,周期性 MEPE 可利用傅里叶级数表示为:

$$\begin{cases} |H(f_r)| = \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot [a_0 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \\ \Phi(f_r) = \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot [b_0 + \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \end{cases} \quad (7)$$

其中, $|H(f_r)|$ 和 $\Phi(f_r)$ 分别为 $H(f_r)$ 的幅度和相位, c_1 为 $H(f_r)$ 的基频, a_0 和 b_0 分别为 $|H(f_r)|$ 和 $\Phi(f_r)$ 的常数部分, a_l 和 b_l 分别为 $|H(f_r)|$ 和 $\Phi(f_r)$ 的 l 次谐波分量的系数, Φ_{al} 和 Φ_{bl} 分别为 $|H(f_r)|$ 和 $\Phi(f_r)$ 的 l 次谐波分量的初相。由于常数相位不影响最终图像质量, 为了简便起见, 在后续分析过程中将常数相位 b_0 忽略。

因此, $H(f_r)$ 又可以表示为:

$$H(f_r) = a_0 \cdot \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot [1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \cdot \exp[j \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \quad (8)$$

则宽带合成结果可重写为:

$$S'_{\text{wide}}(f_r) = \sigma \cdot a_0 \cdot \exp[-j4\pi R(f_r + f_c + (N-1) \cdot \Delta f/2)/c] \cdot \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot [1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \cdot \exp[j \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \quad (9)$$

对 $S'_{\text{wide}}(f_r)$ 进行傅里里叶变换得到宽带合成后的 HRRP。

$$s'_{\text{comb}}(t) = s(t) + \sum_{l=1}^{\infty} \{s(t+lc_1) \cdot [\frac{b_l}{2} \cdot \exp(j \frac{\pi}{2} + j\Phi_{bl}) + \frac{a_l}{2a_0} \cdot \exp(j\Phi_{al})] + s(t-lc_1) \cdot [\frac{b_l}{2} \cdot \exp(j \frac{\pi}{2} - j\Phi_{bl}) + \frac{a_l}{2a_0} \cdot \exp(-j\Phi_{al})]\} \quad (10)$$

其中,

$$s(t) = \sigma \cdot N\Delta f \cdot \text{sinc}[N\Delta f(t-2R/c)] \cdot \exp[-j4\pi R(f_c + (N-1) \cdot \Delta f/2)/c] \quad (11)$$

由式(10)可知, 由于周期性 MEPE 的存在, 宽带合成后的 HRRP 中除了主瓣 $s(t)$ 外, 还引入了无穷多对的成对回波 $s(t+lc_1)$ 和 $s(t-lc_1)$ 。这些成对回波与主瓣呈等间隔分布, 且形状相同, 只是幅度和相位有所差异, 被称为距离向栅瓣。

3 提出新的 GLS 算法——目标信息差异法

通过分析已有 GLS 算法可知, 强点对比度法^[18] 和离散加窗 PGA 法^[19] 基于一个前提假设, 即所选取的场景目标 HRRP 必须具备点状目标特征。这是因为这两种算法都基于距离图像聚焦原理进行 MEPE 估计。如果所选取的场景目标不具备点状目标特征, 则非点状目标会被“过聚焦”为点状目标, 此时包含多个尖峰的非点状目标被“过聚焦”成具有 sinc 函数主瓣形状的单尖峰目标, 即点状目标, 导致非点状目标主瓣出现畸变, 而整幅图像出现散焦, 如图 2 所示。

同时, 峰值点幅相法基于单一目标及其栅瓣的峰值点信息进行 MEPE 估计, 而无法有效利用多个场景目标同时参与 MEPE 估计, 因此其误差估计精度有限。为了解决已有 GLS 算法存在的上述问题, 本文提出了一种既能够适应各类场景目标特性, 又能够保证误差估计精度的 GLS 算法——目标信息差异法。

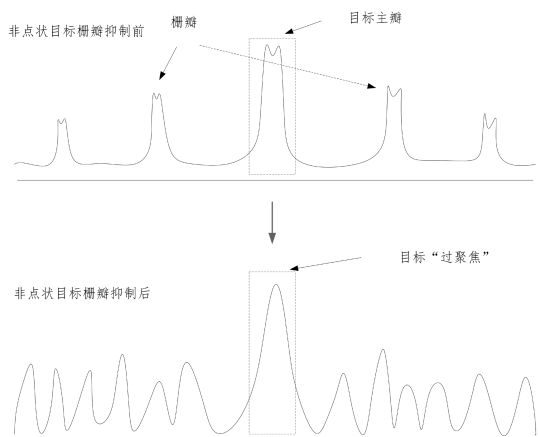


图 2 非点状目标“过聚焦”示意图

Fig. 2 Illustration of “over focusing” of non-point target

目标信息差异法的原理如下: 目标的理想 HRRP 包含目标的理想频谱, 目标的实际 HRRP 则包含目标的实际频谱; 利用离散加窗技术^[15], 可以从目标的完整 HRRP 中单独获取目标的主瓣及其附近的旁瓣, 对应目标的理想 HRRP, 也可以利用离散加窗技术同时获取目标的主瓣、旁瓣和栅瓣信息, 对应目标的实际 HRRP; 利用目标理想 HRRP 和实际 HRRP 之间的信息差异, 可以估计得到目标理想频谱与实际频谱之间的差异, 即周期性 MEPE。

离散加窗示意图如图 3 所示, 其中离散窗由主瓣窗和栅瓣窗构成。由于理想 HRRP 没有受周期性 MEPE 影响而不存在周期性栅瓣, 因此在获取目标的理想 HRRP 时, 可以只使用主瓣窗而无栅瓣窗, 从而单独获取目标的主瓣及其附近的旁瓣, 加窗后的信号对应于目标的理想 HRRP。然而, 由于目标的实际 HRRP 受到周期性 MEPE 的影响存在周期性栅瓣, 因此在获取目标的实际 HRRP 时, 需要同时使用主瓣窗和栅瓣窗, 从而同时获取目标的主瓣、旁瓣和栅瓣, 加窗后的信号对应于目标的实际 HRRP。

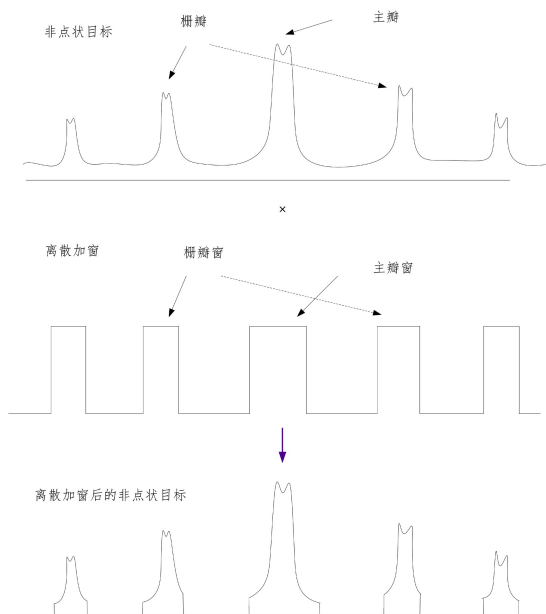


图 3 离散加窗示意图

Fig. 3 Illustration of discrete windowing technique

以点状目标为例,以上 MEPE 估计过程的计算式如下:

$$S_{\text{main}}(f_r) = \sigma \cdot a_0 \cdot \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot \exp(jb_0) \cdot \exp[-j4\pi R(f_r + f_c + (N-1) \cdot \Delta f/2)/c] \quad (12)$$

其对应于式(11)所表示的主瓣 $s(t)$ 的傅里叶变换。

$$S_{\text{Total}}(f_r) = \sigma \cdot a_0 \cdot \exp[-j4\pi R(f_r + f_c + (N-1) \cdot \Delta f/2)/c] \cdot \text{rect}(f_r/N\Delta f) \cdot [1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \cdot \exp[jb_0 + j \cdot \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \quad (13)$$

其对应于式(9)所表示的包含周期性 MEPE 的宽带合成结果。

则周期性 MEPE 可以被估计为:

$$\begin{cases} \hat{A}(f_r) = \frac{|S_{\text{Total}}|}{|S_{\text{main}}|} = 1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al}) \\ \hat{\theta}(f_r) = \arg[S_{\text{Total}} \cdot \text{conj}(S_{\text{main}})] \\ = \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl}) \end{cases} \quad (14)$$

假定场景中 M 个目标及其栅瓣被选定,则周期性 MEPE 可以被估计为:

$$\begin{cases} \hat{A}(f_r) = \sum_{m=1}^M \frac{|S_{m_Total}|}{|S_{m_main}|} \\ \hat{\theta}(f_r) = \arg[\sum_{m=1}^M S_{m_Total} \cdot \text{conj}(S_{m_main})] \end{cases} \quad (15)$$

其中, S_{m_main} 表示第 m 个目标的理想 HRRP 对应的频谱, S_{m_Total} 表示第 m 个目标的实际 HRRP 对应的频谱。

需要注意的是,为了表述方便,上述估计过程使用点状目标表达式进行描述。但是,上述估计过程对非点状目标同样适用。

目标信息差异法的总流程如图 4 所示。

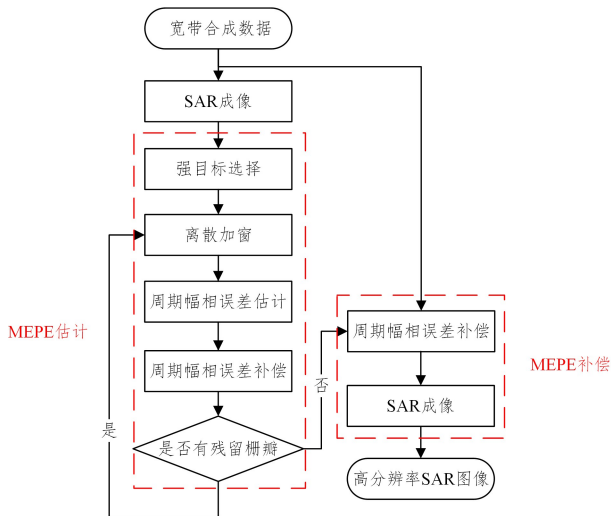


图 4 目标信息差异法栅瓣抑制总流程

Fig. 4 Total GLS process of target information difference method

首先对宽带合成数据进行 SAR 成像处理,获得 SAR 粗成像结果;然后在 SAR 粗成像结果中选择强目标及其栅瓣,对其进行离散加窗后利用目标信息差异法进行周期性 MEPE 估计,并利用估计所得 MEPE 对强目标进行 MEPE 补偿,如果还有残留栅瓣,则重复离散加窗、MEPE 估计和补偿步骤

直至栅瓣被完全抑制,当无残留栅瓣时再进行下一步骤;最后利用估计所得 MEPE 对宽带合成数据进行补偿,并再次进行 SAR 成像处理,可得栅瓣抑制后的 SAR 图像。

4 新提出的 GLS 算法与已有 GLS 算法的性能对比

下文将从目标形状和图像信杂比对算法性能影响这两个方面对本文所提 GLS 算法和已有 GLS 算法的性能进行对比分析。已有 GLS 算法主要有离散加窗 PGA 法^[19]、峰值点幅相法^[17]和强点对比度法^[18],本文所提 GLS 算法为目标信息差异法。

4.1 离散加窗 PGA 法

离散加窗 PGA 法^[19]从距离图像聚焦的角度来对待距离栅瓣抑制问题。从图像聚焦的角度,把栅瓣看作是由主瓣散焦而成,因此把距离栅瓣抑制问题等效为距离图像聚焦问题。

1) 目标形状对算法性能的影响分析

考虑非点状目标的情况,宽带合成后目标频谱可以表示为^[19]:

$$S_m(k) = (A_e(k)A_m + A_{cm}(k)) \cdot \exp[-j(\varphi_m(k) + \frac{2\pi k}{K}x_m + \varphi_e(k) + \varphi_{cm}(k))] \quad (16)$$

其中, m 为目标编号, $S_m(\cdot)$ 为第 m 个目标的离散频谱, $A_e(\cdot)$ 为幅度误差, $\varphi_e(\cdot)$ 为相位误差, $A_{cm}(\cdot)$ 为离散窗内杂波引入的幅度误差, $\varphi_{cm}(\cdot)$ 为离散窗内杂波引入的相位误差, A_m 为理想幅度, φ_m 为第 m 个非点状目标的真实相位, φ_{m0} 为初始相位, x_m 为目标所在距离向位置, K 为距离向点数, $k \in [0, K-1]$ 。

圆周移位后,目标离散频谱可以表示为^[19]:

$$S_m(k) = (A_e(k)A_m + A_{cm}(k)) \cdot \exp[-j(\varphi_m(k) + \varphi_e(k) + \varphi_{m0} + \varphi_{cm}(k))] \quad (17)$$

然后,基于加权最大似然估计,得到相位误差梯度为^[19]:

$$\Delta\tilde{\varphi}_e(k) = \arg(\sum_{m=1}^M w_m S_m(k) S_m^*(k-1) / \sum_{j=1}^M w_j) \quad (18)$$

由式(17)和式(18)可知,非点状目标的真实相位 φ_m 亦被当作相位误差,这将导致相位误差补偿后目标栅瓣被抑制的同时,目标主瓣将散焦。

同时,幅度误差的最小均方差估计结果为^[19]:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_e(k) &= \min_{A_e(k)} \sum_{m=0}^{M-1} (A_{sm}(k) - A_e(k)A_m)^2 \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} A_{sm}(k)A_m / \sum_{m=0}^{M-1} A_m^2 \end{aligned} \quad (19)$$

其中, $A_{sm}(k) = A_e(k)A_m + A_{cm}(k)$ 为目标观测幅度, A_m 为目标的理想幅度。由于目标为非点状目标,其理想幅度 A_m 无法通过观测幅度 $A_{sm}(k)$ 的简单平均得到。此时,幅度误差估计失败。

因此可以得出结论:目标形状对离散加窗 PGA 法的性能影响大。此算法要求参与估计的目标为点状目标,无法适用于非点状目标。

2) 图像信杂比对算法性能的影响分析

由式(18)和式(19)可知,离散加窗 PGA 法可以同时利用多个目标参与 MEPE 估计,从而提高误差估计精度。因此,在图像背景杂波固定的情况下,此算法的误差估计精度并不仅仅取决于单个目标的强度,还取决于目标数量。目标数量

越多,其理论误差估计精度越高,换言之,图像信杂比对离散加窗 PGA 法的性能影响小。

4.2 峰值点幅相法

峰值点幅相法^[17]利用目标主瓣和栅瓣的峰值点信息对周期性 MEPE 进行估计,进而达到抑制距离向栅瓣的目的。

1) 目标形状对算法性能的影响分析

考虑非点状目标的情况,则宽带合成后目标频谱可以表示为:

$$S'_{\text{wide}}(f_r) = S_{\text{ideal}}(f_r) \cdot [1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \cdot \exp[j \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \quad (20)$$

其中, $S'_{\text{wide}}(f_r)$ 为考虑 MEPE 情况下非点状目标对应的宽带

$$\begin{cases} \text{Real}_{\text{left}_l} = -\frac{b_l}{2} \sin \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \cos \Phi_{al}; \text{Imag}_{\text{left}_l} = \frac{b_l}{2} \cos \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \sin \Phi_{al} \\ \text{Real}_{\text{right}_l} = \frac{b_l}{2} \sin \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \cos \Phi_{al}; \text{Imag}_{\text{right}_l} = \frac{b_l}{2} \cos \Phi_{bl} - \frac{a_l}{2a_0} \sin \Phi_{al} \end{cases} \quad (22)$$

其中, $\text{Real}_{\text{left}_l}$ 和 $\text{Imag}_{\text{left}_l}$ 分别为第 l 对栅瓣中左瓣的实部和虚部, $\text{Real}_{\text{right}_l}$ 和 $\text{Imag}_{\text{right}_l}$ 分别为第 l 对栅瓣中右瓣的实部和虚部。

可以发现,式(22)与目标形状无关。也就是说,目标形状

$$\begin{cases} \text{Real}_{\text{left}_l} = -\frac{b_l}{2} \sin \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \cos \Phi_{al} + \frac{\cos \Phi_1}{\text{SCR}_1}; \text{Imag}_{\text{left}_l} = \frac{b_l}{2} \cos \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \sin \Phi_{al} + \frac{\sin \Phi_1}{\text{SCR}_1} \\ \text{Real}_{\text{right}_l} = \frac{b_l}{2} \sin \Phi_{bl} + \frac{a_l}{2a_0} \cos \Phi_{al} + \frac{\cos \Phi_2}{\text{SCR}_2}; \text{Imag}_{\text{right}_l} = \frac{b_l}{2} \cos \Phi_{bl} - \frac{a_l}{2a_0} \sin \Phi_{al} + \frac{\sin \Phi_2}{\text{SCR}_2} \end{cases} \quad (23)$$

其中, SCR_1 和 Φ_1 分别表示目标第 l 对栅瓣中左瓣处的信杂比和杂波相位, SCR_2 和 Φ_2 分别表示目标第 l 对栅瓣中右瓣处的信杂比和杂波相位。

如式(23)所示,栅瓣峰值点信息的准确性完全取决于栅瓣位置处的信杂比。信杂比越高,杂波相位影响越小,峰值点信息越准确。

由于峰值点幅相法无法同时利用多个场景目标参与 MEPE 估计,因此该算法的误差估计精度完全取决于目标位置处的图像信杂比。

因此可以得出结论:图像信杂比对峰值点幅相法的性能影响大。

4.3 强点对比度法

与离散加窗 PGA 法类似,强点对比度法^[18]也是从图像聚焦的角度来对待距离栅瓣抑制问题,并将距离栅瓣抑制问题等效为距离图像聚焦问题。

1) 目标形状对算法性能的影响分析

强点对比度法通过对 MEPE 不断迭代搜索,将强点对比度最优时所对应的 MEPE 作为 MEPE 估计结果。因此此算法与离散加窗 PGA 法一样,在将非点状目标距离向能量聚焦的过程中,非点状目标被“过聚焦”为点状目标,导致目标距离向真实信息丢失,且目标距离向散焦。

因此,可以得出结论:目标形状对强点对比度法的性能影响大。此算法要求参与估计的目标为点状目标,无法适用于非点状目标。

2) 图像信杂比对算法性能的影响分析

强点对比度法和离散加窗 PGA 法一样,可以同时利用多个目标参与 MEPE 估计,从而提高误差估计精度。换言之

合成频谱, $S_{\text{ideal}}(f_r)$ 为非点状目标对应的理想宽带合成频谱。

则与式(20)对应的目标 HRRP 为:

$$s'_{\text{comb}}(t) = s_{\text{ideal}}(t) + \sum_{l=1}^{\infty} \{s_{\text{ideal}}(t + l c_1) \cdot [\frac{b_l}{2} \cdot \exp(j \frac{\pi}{2} + j \Phi_{bl}) + \frac{a_l}{2a_0} \cdot \exp(j \Phi_{al})] + s_{\text{ideal}}(t - l c_1) \cdot [\frac{b_l}{2} \cdot \exp(j \frac{\pi}{2} - \Phi_{bl}) + \frac{a_l}{2a_0} \cdot \exp(-j \Phi_{al})]\} \quad (21)$$

其中, $s'_{\text{comb}}(t)$ 为非点状目标的实际 HRRP, $s_{\text{ideal}}(t)$ 为非点状目标的理想 HRRP。

按主瓣信息对式(21)进行归一化,则第 l 对栅瓣的峰值点幅相信息可以表示为^[17]:

对峰值点幅相法的性能影响小。即使场景目标为非点状目标,此栅瓣抑制算法依然适用。

2) 图像信杂比对算法性能的影响分析

考虑目标附近背景杂波的影响,则式(22)可以表示为^[17]:

之,图像信杂比对强点对比度法的性能影响小。

4.4 目标信息差异法

目标的理想 HRRP 包含目标的理想频谱,而目标的实际 HRRP 包含目标的实际频谱。利用两者之间的信息差异,可以直接有效地估计得到周期性 MEPE。

1) 目标形状对算法性能的影响分析

考虑非点状目标的情况,并结合式(9),可以得到宽带合成后的目标频谱为:

$$S_{\text{Total}}(f_r) = S_{\text{main}}(f_r) \cdot [1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al})] \cdot \exp[j \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl})] \quad (24)$$

其中, $S_{\text{Total}}(f_r)$ 为考虑 MEPE 情况下非点状目标对应的实际宽带合成频谱, $S_{\text{main}}(f_r)$ 为非点状目标对应的理想宽带合成频谱。

由式(24)知,目标理想 HRRP 对应的频谱为 $S_{\text{main}}(f_r)$,目标实际 HRRP 对应的频谱为 $S_{\text{Total}}(f_r)$,则周期性 MEPE 可以被估计为:

$$\begin{cases} \hat{A}(f_r) = \frac{|S_{\text{Total}}|}{|S_{\text{main}}|} = 1 + \sum_{l=1}^{\infty} a_l/a_0 \cdot \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{al}) \\ \hat{\theta}(f_r) = \arg[S_{\text{Total}} \cdot \text{conj}(S_{\text{main}})] = \sum_{l=1}^{\infty} b_l \cos(2\pi l c_1 f_r + \Phi_{bl}) \end{cases} \quad (25)$$

如式(25)所示,幅度误差 $\hat{A}(f_r)$ 和相位误差 $\hat{\theta}(f_r)$ 的估计值与目标的形状并不相关。换言之,目标形状对目标信息差异法的性能影响小。

2) 图像信杂比对算法性能的影响分析

假定场景中 M 个目标及其栅瓣被选定,则周期性 MEPE

可以被估计为:

$$\begin{cases} \hat{A}(f_r) = \sum_{m=1}^M \frac{|S_{m_Total}|}{|S_{m_main}|} \\ \hat{\theta}(f_r) = \arg[\sum_{m=1}^M S_{m_Total} \cdot \text{conj}(S_{m_main})] \end{cases} \quad (26)$$

其中, S_{m_main} 表示第 m 个目标的理想 HRRP 对应的频谱, S_{m_Total} 表示第 m 个目标的实际 HRRP 对应的频谱。

如式(26)所示,目标信息差异法可以同时利用多个目标参与 MEPE 估计,从而提高误差估计精度。因此,图像信杂比对目标信息差异法的性能影响小。

至此,将目标形状和图像信杂比对这 4 种 GLS 算法的性能影响进行总结,结果如表 1 所列。

表 1 4 种 GLS 算法的性能总结

Table 1 Performance summary of four GLS algorithms

栅瓣抑制算法	目标形状对算法性能的影响	图像信杂比对算法性能的影响
离散加窗 PGA 法	大	小
峰值点幅相法	小	大
强点对比度法	大	小
目标信息差异法	小	小

从表 1 可以看出,目标形状和图像信杂比对本文所提 GLS 算法的性能影响均很小。因此,本文所提 GLS 算法为 4 种 GLS 算法中的最优算法,适用于各种类型的成像场景,能够实现对频率步进 SAR 距离向栅瓣的稳健抑制。

5 实测数据验证

本章利用频率步进无人机载 SAR 挂飞实验对本文所提 GLS 算法的有效性进行验证。作为对比,同时给出了 3 种已有 GLS 算法的处理结果,从而验证本文算法的优越性。

无人机的光学图片如图 5 所示。



图 5 无人机图片

Fig. 5 Picture of unmanned aerial vehicle

SAR 载荷放置在无人机机腹内部,重量约 1kg,其图片如图 6 所示。在实际安装时,图 6 中的铁支架已被拆除,从而保证载荷能够顺利放置于机腹内部。

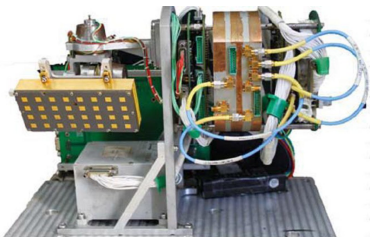


图 6 SAR 载荷图片

Fig. 6 Picture of SAR payload

该 SAR 系统工作在 Ku 波段,每个脉组内子带信号个数为 12,子带信号载频步进间隔为 40 MHz,其系统参数

如表 2 所列。

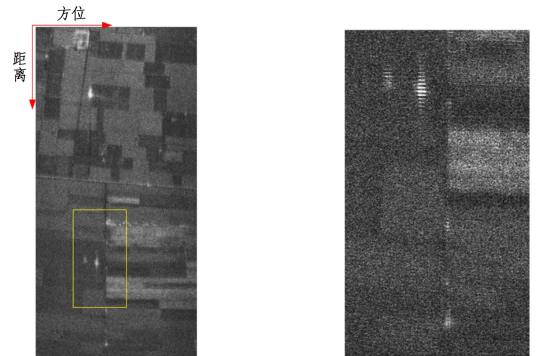
表 2 频率步进无人机载 SAR 系统参数

Table 2 System parameters of stepped-frequency unmanned aerial vehicle SAR

参数	符号	数值	单位
子带带宽	B	50	MHz
采样率	f_s	160	MHz
步进间隔	Δf	40	MHz
步进点数	N	12	

受体积和功耗限制,系统内定标技术无法适用于该小型频率步进无人机载 SAR 系统,回波信号 MEPE 导致回波数据的宽带合成结果中出现周期性栅瓣。

对回波数据进行成像处理,二维成像结果如图 7(a)所示,图中包含农田、树林和两座电力线铁塔。图 7(b)给出了图 7(a)方框区域的局部放大结果,其中包含一座电力线铁塔,其亮度较高,是需要检测和识别的目标。从中可以看到,电力线铁塔目标主瓣附近存在一些虚假目标,导致基于 SAR 图像的目标检测和识别算法把一个电力线铁塔目标错误检测成多个目标,导致对目标的误检和误判,严重影响基于 SAR 图像的后期应用。需要说明的是,由于电力线铁塔为立体目标,其本身包含多个立体散射结构,为非点状目标,其 HRRP 的形状将在下文进行具体阐述。



(a) 二维成像结果

(b) 方框区域局部放大图

图 7 栅瓣抑制前非点状目标场景 SAR 图像

Fig. 7 SAR image of non-point target scene before GLS

为了抑制图像距离向栅瓣,分别使用已有 GLS 算法和本文所提目标信息差异法对上述实测数据进行距离向栅瓣抑制,得到栅瓣抑制后的二维成像结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,使用峰值点幅相法进行栅瓣抑制后,目标主瓣附近仍然有少量栅瓣残留(见图 8(b)),这些栅瓣残留仍然会导致对目标的误检和误判;使用离散加窗 PGA 法和强点对比度法进行栅瓣抑制后,图像距离向出现散焦(见图 8(d)、图 8(f)),目标真实信息大部分已丢失,导致目标检测和识别结果错误,影响基于 SAR 图像的后期应用;使用目标信息差异法进行栅瓣抑制后,距离向栅瓣被抑制到图像背景水平,图像清晰度显著提升(见图 8(h)),有效保留了目标的真实信息,目标检测和识别算法能够准确地检测出图像中存在一个强度较强的目标。因此,本文所提 GLS 算法——目标信息差异法能够有效地将距离栅瓣抑制到图像背景水平,有效消除了距离向栅瓣对目标检测和识别算法的影响。

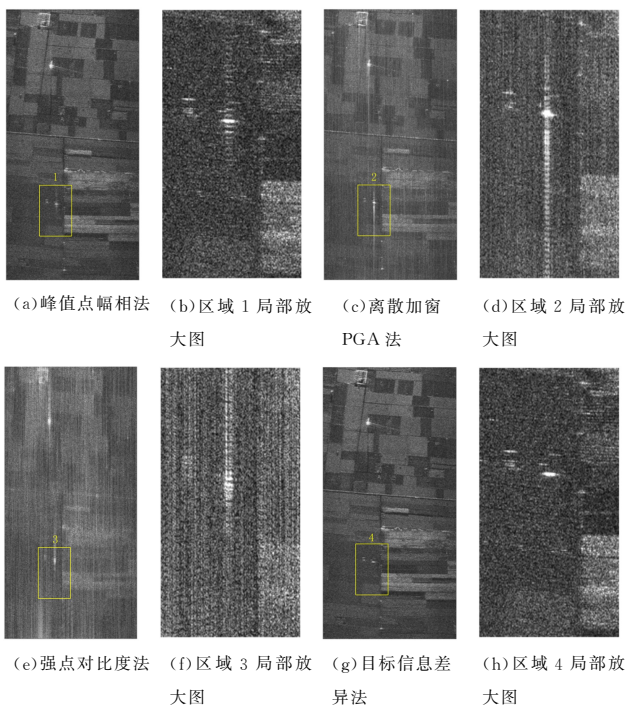


图 8 栅瓣抑制后非点状目标场景 SAR 图像

Fig. 8 SAR image of non-point target scene after GLS

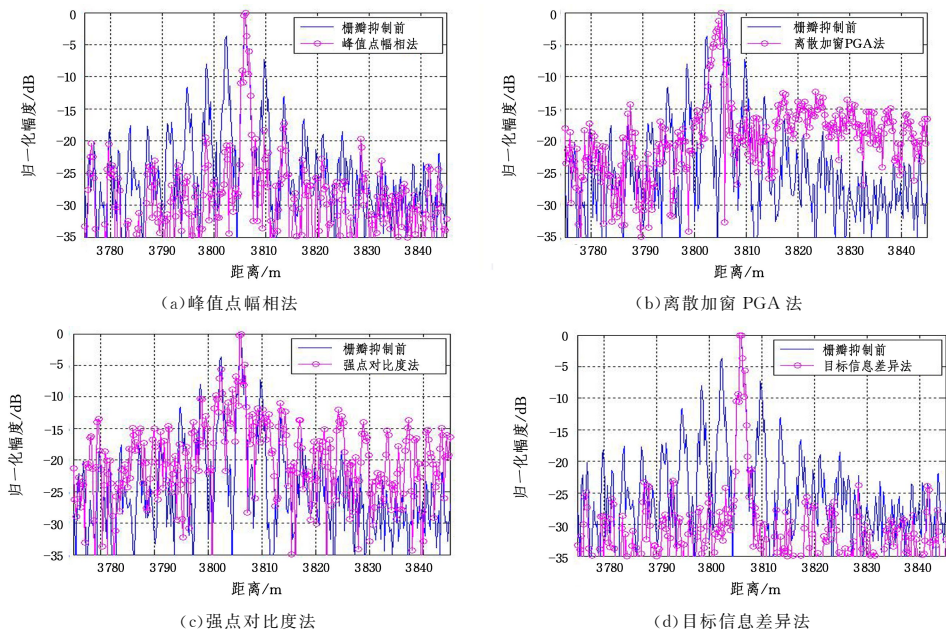


图 9 目标栅瓣抑制前后 HRRP 对比

Fig. 9 Comparison of target HRRPs before and after GLS

因此,本文所提目标信息差异法的有效性和相比其他已有 GLS 算法的优越性得到了验证。

结束语 本文提出了一种新的 GLS 算法——目标信息差异法。该算法基于频率步进 SAR 回波数据,利用 SAR 图像中多个强目标的理想 HRRP 与实际 HRRP 之间的信息差异,稳健估计出系统传递函数中的周期性 MEPE,解决了已有 GLS 算法存在的误差估计精度不高和“过聚焦”问题。理论对比分析从原理上说明了本文提出的 GLS 算法相对已有 GLS 算法的优越性。实测数据处理结果证明了理论对比分析的正确性,并表明该算法可以将距离向栅瓣抑制到 SAR

为了进一步分析不同 GLS 算法的栅瓣抑制效果,给出了栅瓣抑制前后目标的 HRRP,如图 9 所示。从目标的栅瓣可以清晰看出,该目标存在多个尖峰,为非点状目标,与单尖峰的具有 sinc 函数主瓣形状的点状目标明显不同(把目标主瓣放大也可以观察到同样的现象)。从图 9(b)和图 9(c)可以看出,离散加窗 PGA 法和强点对比度法导致非点状目标主瓣畸变旁瓣抬升,距离散焦严重,目标栅瓣被抑制到旁瓣水平,且被旁瓣包围。从图 9(a)和图 9(d)可以看出,峰值点幅相法和目标信息差异法能够显著抑制距离向栅瓣,且非点状目标主瓣信息被有效保留。但是,峰值点幅相法处理后,图像距离向栅瓣水平依然较高(高于 -20 dB),残留距离向栅瓣仍然会干扰后续目标检测和识别;而目标信息差异法能够将距离向栅瓣抑制到图像背景水平(低于 -25 dB),保证目标检测和识别算法不被距离向栅瓣干扰,从而确保了目标检测和识别算法的准确性。需要说明的是,虽然经过峰值点幅相法处理后 HRRP 中仍然残留有一些距离向栅瓣,但是不可否认的是该算法确实起到了栅瓣抑制的作用。从图 9(a)可以看出,使用峰值点幅相法处理后,HRRP 中的最高栅瓣已经从 -4 dB 水平被抑制到 -20 dB 水平。因此,有理由认为峰值点幅相法仍然适用于非点状目标场景,只是栅瓣抑制效果并不是足够好。

图像的背景水平。需要指出的是,与已有 GLS 算法一样,本文算法同样基于图像中的强目标,在图像中缺少强目标时,已有 GLS 算法和本文所提算法均失效。值得庆幸的是,目标栅瓣幅度往往显著低于目标主瓣,在图像中缺少强目标时,图像非强目标的栅瓣幅度较低,往往被图像背景淹没,此时图像栅瓣并不可见,不影响后续基于 SAR 图像的目标检测和识别。

参考文献

- [1] ZANDIEH A, BONEN S, DADASHM S, et al. 155 GHz FMCW and Stepped-Frequency Carrier OFDM Radar Sensor Transcei-

- ver IC Featuring a PLL With < 30 ns Settling Time and 40 fs rms Jitter [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2021, 69(11): 4908-4924.
- [2] LIU S, CAO Y, YEOT S, et al. Range Sidelobe Suppression for Randomized Stepped-Frequency Chirp Radar [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(6): 3874-3885.
- [3] JOHNSTON J, LI Y, LOPS M, et al. ADMM-Net for Communication Interference Removal in Stepped-Frequency Radar [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, 57(3): 1657-1671.
- [4] YOO K, CHOI B G, CHU N J. Rotating Target Size and Rotation Vector Estimation in a Distributed Stepped Frequency Radar System [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(13): 7189-7198.
- [5] WANG C, ZHANG Q, HU J, et al. An Efficient Algorithm Based on Frequency Scaling for THz Stepped-Frequency SAR Imaging[J/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9295364>.
- [6] DAI G, ZHANG L, HUAN S, et al. Random Stepped-Frequency SAR Imagery With Full Cell Doppler Coherent Processing[J/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9345702>.
- [7] JING G B, SUN G C, XIA X G, et al. A Novel Two-Step Approach of Error Estimation for Stepped-Frequency MIMO-SAR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(12): 2290-2294.
- [8] FERDOUSM S, HIMIU H, MCGUIRE P, et al. Assessing the Usefulness of Iceberg Electromagnetic Backscatter Modeling Using a C-Band SAR Classifier [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(8): 1353-1357.
- [9] SHAHZAD M, MAURER M, FRAUNDORFER F, et al. Buildings Detection in VHR SAR Images Using Fully Convolution Neural Networks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(2): 1100-1116.
- [10] SUN X, WU Y, ZHANG L, et al. Stepped Frequency Waveform Optimization for Formation Targets Detection [J/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9774335>.
- [11] DING Z, LI L, WANG Y, et al. An Autofocus Approach for UAV-Based Ultrawideband Ultrawidebeam SAR Data With Frequency-Dependent and 2-D Space-Variant Motion Errors[J/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9380507>.
- [12] DING M L, DING C B, TANG L, et al. A W-Band 3-D Integrated Mini-SAR System With High Imaging Resolution on UAV Platform [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 113601-113609.
- [13] XU W, XIANG M, WANG B, et al. Study on the Pivotal Imaging Technology of Mini SAR on UAV[C]// 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. 2021: 3936-3939.
- [14] WEHNER D R. *High Resolution Radar* [M]// Boston, MA, USA: ArtechHouse, 1994.
- [15] DENG Y K, ZHENG H F, WANG R. Internal Calibration for Stepped-Frequency Chirp SAR Imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(6): 1105-1109.
- [16] WANG X Y, WANG R, DENG Y K, et al. Precise Calibration of Channel Imbalance for Very High Resolution SAR With Stepped Frequency [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(8): 4252-4261.
- [17] DING Z G, GAO W B, LIU J Y, et al. A Novel Range Grating Lobe Suppression Method Based on the Stepped-Frequency SAR Image [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(3): 606-610.
- [18] GAO W, LONG T, DING Z, et al. A Robust Range Grating Lobe Suppression Method Based on Image Contrast for Stepped-Frequency SAR [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2066.
- [19] DING Z, GUO Y, GAO W, et al. A Range Grating Lobes Suppression Method for Stepped-Frequency SAR Imagery [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 12(9): 5677-5687.



GAO Wenbin, born in 1989, Ph.D, lecturer. His main research interests include communication and radar signal processing.

(责任编辑:喻藜)