

引用格式:Ren Jiawei,Zhang Xiangkun,Shao Zelong.Research on FMCW ISAR Low Sidelobe Imaging Technology based on Improved Clean Algorithm[J].Remote Sensing Technology and Application,2020,35(6):1386-1393.
[任佳伟,张祥坤,邵泽龙.基于改进 CLEAN 算法的 FMCW ISAR 低副瓣成像算法的研究[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1386-1393.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1386

基于改进 CLEAN 算法的 FMCW ISAR 低副瓣成像算法的研究

任佳伟^{1,2},张祥坤^{1,2},邵泽龙^{1,2}

(1.中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室,北京 100190;

2.中国科学院大学 电子电气与通信工程学院,北京 100049)

摘要:在调频连续波逆合成孔径雷达成像中,由于雷达发射信号带宽的有限性,雷达接收到的信号经过去调频,脉冲压缩后会呈现一系列等效点目标的二维 sinc 函数的叠加,所以合成孔径雷达成像不可避免的会受到 sinc 函数旁瓣叠加问题的影响,据此引进天文图像恢复中广泛使用的 CLEAN 算法。针对由于雷达实际成像环境的复杂性,以及目标的非匀速运动等导致的回波 sinc 函数旁瓣失真的问题,提出了在进行 CLEAN 算法之前先进行时域加窗加权修正旁瓣的方法,减小了不规则旁瓣对后续数据处理的影响。最后,对 CLEAN 算法中的“脏束”、“清洁波束”进行了修正,使其具有更强的目标检测能力及鲁棒性,提高了成像分辨率。对实测数据的处理表明,该方法对实际工程应用具有一定的参考价值。

关键词:调频连续波逆合成孔径雷达;旁瓣抑制;改进 CLEAN 算法;道路行车成像

中图分类号:TN958.95 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2020)06-1386-08

1 引 言

调频连续波体制逆合成孔径雷达发射线性调频连续波信号,具有时宽大,峰值功率低的特点,降低了对发射端功率放大器的要求^[1],其不仅具有传统雷达的高分辨率,全天候、全天时监测的优势,又具有体积小,系统结构简单,造价低的特点,在实际成像监测中有着广泛的应用。

由于发射信号带宽以及合成孔径长度的有限性,逆合成孔径雷达对理想点目标的后向散射中心成像为二维 sinc 函数^[2],而 sinc 函数的旁瓣值较高,所以存在强目标的较强的旁瓣会淹没附近的弱目标,造成成像的模糊,因此有效地抑制旁瓣非常重

要。加窗加权是较为常用的旁瓣抑制方法,但其在减弱旁瓣幅度的同时会使主瓣展宽造成图像分辨率的下降^[3]。

据此引进用于改进天文图像质量的 CLEAN 算法,CLEAN 算法于 1974 年由 Hogbom^[5]提出用于提高射电天文综合孔径成像的质量;随后,Schwarz 于 1978 年对 CLEAN 算法做了深入的数学理论方面的研究^[5],研究表明 CLEAN 算法不仅能够抑制旁瓣,而且具有很高的信噪比。CLEAN 算法自诞生至今,演变出了很多扩展算法,针对传统 CLEAN 算法在迭代过程中可能会选择较强的“假点”,酒明远^[6]提出了基于树形搜索算法的 S-CLEAN 算法;在图像处理中针对当旁瓣干扰是主要原因时,演变

收稿日期:2019-01-15;修订日期:2020-12-11

作者简介:任佳伟(1992—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要从事雷达成像、算法仿真及微波遥感系统研究。

E-mail:renjiawei16@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:张祥坤(1972—),男,山东烟台人,研究员,主要从事合成孔径雷达信号处理与系统、微波遥感理论与技术等研究。

E-mail:zhangxiangkun@mirslab.cn

出了 I-CLEAN 算法^[7];针对当处理图像为各种不同大小尺度的目标组成时,发明的多尺度 CLEAN (MSC-CLEAN)算法^[8]等。CLEAN 算法是一种消卷积过程,用于消除因空间频率域覆盖的不完整而产生的影响^[9],其通过逐步迭代消卷积识别主瓣,消减旁瓣,重建真实目标的位置幅度信息,能够有效地减弱旁瓣对成像结果的影响。然而在实际工程中,系统存在的误差以及非合作运动目标的非平稳非匀速运动会使目标等效后向散射中心成像的 sinc 函数主瓣扭曲、旁瓣失真,造成了 CLEAN 算法“脏束”选择的困难,限制了 CLEAN 算法在实际工程中的应用。

针对系统本身或实际环境造成的旁瓣失真,先采用加窗加权的方法进行旁瓣抑制,减弱了不规则旁瓣对后续 CLEAN 算法的影响;针对主瓣扭曲失真及加窗带来的分辨率的下降,改进了传统的 CLEAN 算法中的“脏束”、“清洁波束”,提高了目标识别能力及算法的适用性。通过对实际数据的处理,验证了该方法的有效性。

2 FMCW ISAR 回波信号模型

在雷达成像中,目标被电磁波照射后,由于目标各部分对入射电磁波的角度不同以及二次、多次散射等原因,目标上会有一些对电磁波散射相对较强的位置,这些集中散射能量的位置称为散射中心^[10]。在实际雷达成像中,复杂目标的电磁散射可以看成是一系列强散射中心的集合。

图 1 为 FMCW ISAR 成像的模型图,雷达所在的高度为 h ,天线的波束角为 θ ;目标的运动速度为 v ,方向与 x 轴平行;雷达距目标的最短斜距为:

$$R_0 = \sqrt{h^2 + y^2}$$

相较于脉冲体制的雷达,FMCW 雷达发射线性调频连续波信号占空比大,时长较长,其瞬时斜距并进行泰勒级数的展开的近似表达式如下:

$$R(t_x, t) = \sqrt{R_0^2 + v^2(t_x + t)^2} \approx \sqrt{R_0^2 + v^2 t_x^2} + \frac{v^2 t_x}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_x^2}} t \quad (1)$$

其中: $R(t_x) = \sqrt{R_0^2 + v^2 t_x^2}$ 为方位时间 t_x 时刻目标与雷达的斜距。将上式对距离时间 t 求导,得到由于目标的连续运动引起的附加多普勒频移为:

$$\Delta f = -\frac{2}{\lambda} \frac{dR(t_x, t)}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \frac{v^2 t_x}{\sqrt{R_0^2 + v^2 t_x^2}} = f_x \quad (2)$$

其中: f_x 为多普勒频率,可知,附加的多普勒频移等

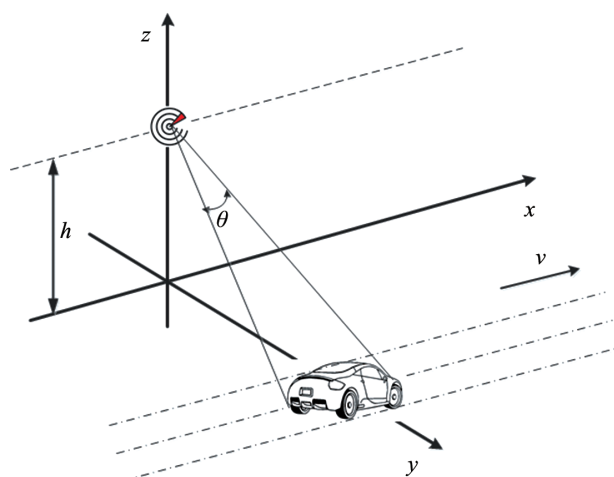


图 1 ISAR 回波信号模型

Fig.1 The model of ISAR echo signals

于方位向多普勒频率。与脉冲体制雷达不同的是,在 FMCW ISAR 系统中,该项不能忽略^[11],需要进行补偿。

逆合成孔径雷达接收的信号经过去斜得到完整的表达式如下^[12]:

$$s(t, t_x) = A \exp(-j \frac{4\pi R}{\lambda}) \exp[-j \frac{4\pi k}{c} (t - \frac{2R_{ref}}{c}) (R - R_{ref})] \cdot \exp(j 2\pi f_d t) \exp[j \frac{4\pi k}{c^2} (R - R_{ref})^2] \quad (3)$$

其中: A 为回波信号的幅度, t 为距离向时间, t_x 为方位向时间, R_{ref} 用于信号混频的参考距离, f_d 为多普勒频率, T_p 为脉冲持续时间;第一个指数项相位为方位向相位;第二个指数项相位为距离调制相位,其通过去调频相关处理,消除了二次相位;第三个指数项相位为调频连续波雷达特有的相位,是由于大的脉冲时宽内雷达的连续运动产生的;第四个指数项相位为经过去调频之后产生的剩余视频相位(RVP)^[13]。

其进行 RVP 校正并经过 RD 成像算法后得到最终信号的表现形式为:

$$s(t_x, f) = A_1 \text{sinc}(\pi B_x t_x) \text{sinc}[\pi T_p (f - \frac{2k}{c} (R_0 - R_{ref}))] \quad (4)$$

其中: A_1 为信号最终幅度, B_x 为方位向多普勒带宽。可见最终的理想点目标响应为二维 sinc 函数。

3 时域加窗原理

在实际的成像处理中,由于发射机发射信号带宽的有限性以及计算机在进行快速傅里叶变换(FFT)时,容易出现频谱泄漏和栅栏效应^[14],为了抑制频谱泄漏和栅栏效应对频谱分析的影响,一般

采用在时域加窗进行处理。

常用的窗函数有汉宁(Hanning)窗、汉明(hamming)窗、布莱克曼(Blackman)窗、凯撒(Kaiser)窗等。矩形窗具有主瓣宽度最窄,但是旁瓣电平较高,海明窗和汉宁窗具有相似的主瓣宽度,但汉宁窗旁瓣峰值略低,布莱克曼窗具有最低的旁瓣峰值,但是主瓣宽度最宽,而凯撒(Kaiser)窗通过调整相关参数,能够自由定义主瓣高度与旁瓣宽度之间

的比例,具有能够根据实际情况灵活调整参数以达到最佳的旁瓣抑制的效果。

对窗函数的选择,主要是考虑主瓣越窄越好,旁瓣越低越好,旁瓣衰减速率越快越好,然而,同时满足上述条件的窗函数是不存在的^[15],故在实际分析中,往往是以上因素进行妥协折中;本文选择Kaiser窗($\beta=6$)对数据进行时域加窗,Kaiser窗函数的时域及频域特性如图2所示。

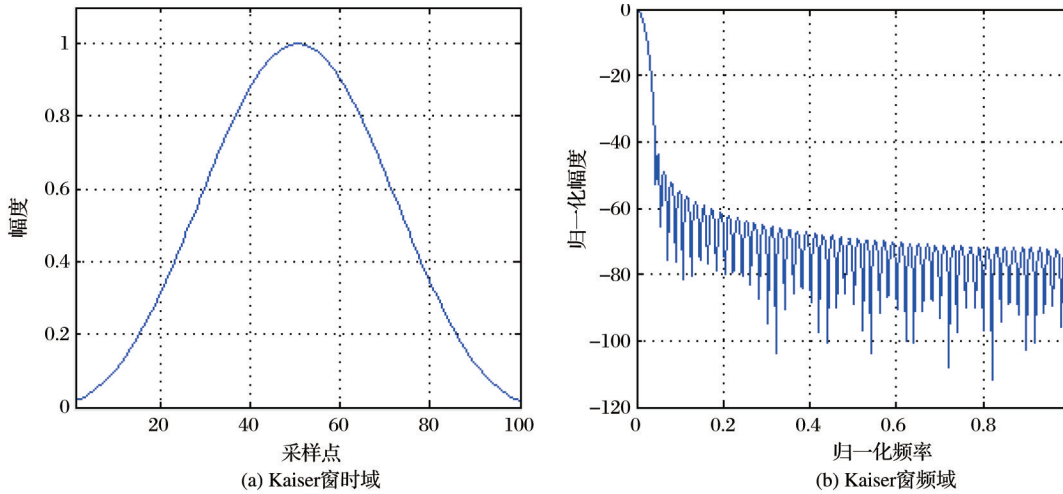


图2 Kaiser窗的时域频域特性

Fig.2 The characteristics of the Kaiser window

4 CLEAN算法的基本原理

在ISAR成像模型中,理想点目标的后向散射中心模型由式(4)可知为二维sinc函数,可见ISAR成像将受到sinc函数旁瓣叠加问题的影响,不妨将模型中的二维sinc函数称为“脏束”(dirty beam),将只含有主瓣的点扩散函数称为“清洁波束”(clean beam)^[16],一般选择二维高斯函数:

$$f(t_x, f) = A_i \cdot \exp\left(-\frac{(t_x - t_i)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(f - f_i)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (5)$$

其中: A_i 为幅度, (t_i, f_i) 为二维高斯函数的中心坐标, σ_x, σ_y 为高斯函数的方差,其通过调整相关参数实现与“脏束”中的sinc函数主瓣等宽。

算法通过对“脏”图进行循环消卷积得到去除旁瓣影响的真实场景散射点。CLEAN算法的具体实现步骤为:

(1)在经过RD算法处理得到的雷达图像 $\sum s(t_x, f)$ 中,找出图中最大值点 $(t_{xi \max}, f_{i \max})$,并记下幅度 $A_{i \max}$ 信息。

(2)构造本次循环的“脏束”,即:

$$A_{i \max} \text{sinc}(\pi B_x t_{xi \max}) \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_{i \max} - \frac{2k}{c}(R_0 - R_{ref})\right)\right] \quad (6)$$

(3)选定循环比例因子 $r = 1/256$,在原始图像中减去迭代比例因子与“脏束”的乘积,即:

$$s_i = s_{i-1} - \gamma \cdot A_{i \max} \text{sinc}(\pi B_x t_{xi \max}) \cdot \text{sinc}\left[\pi T_p \left(f_{i \max} - \frac{2k}{c}(R_0 - R_{ref})\right)\right] \quad (7)$$

(4)比较剩余部分图像的质量,即: $P_i = \sum s_i^m$ (s_i^m 为在本次循环结束时,图像中剩余的有效点目标。判断(3)中得到的图像质量值是否小于进行迭代相减之前图像的质量值;若小于则认为此次循环寻找到的点为真实点目标;若大于,则认为此次寻找到的点为假点,利用树形搜索的原理继续寻找下一个最大值点,再进行判断。

(5)循环步骤(1)~(4),直到得到的图像接近背景噪声或达到某一阈值则终止循环。

(6)将循环中得到的最大值点的集合 $\sum (t_{xi \max}, f_{i \max})$ 卷积上“清洁”波束 $f(t_x, f)$,得到CLEAN算法重构后的图像即:

$$\sum A_{i \max} \cdot \exp\left(-\frac{(t_x - t_{xi \max})^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(f - f_{i \max})^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (8)$$

5 旁瓣抑制方法仿真对比

为了验证加窗与 CLEAN 算法联合成像处理算法对检测弱小目标的有效性,用 Matlab 对小飞机距离向回波进行一维仿真实验验证。仿真参数设置如下:雷达发射信号的中心频率为 36.05 GHz,发射信号的带宽为 300 MHz,雷达的距离向观测角度为 10° ,方位向观测角度为 4° ,距离向采样 128 个点,并加入了随机的高斯白噪声,雷达观测时采用正侧视模式。分别在 -1.25、2.5、5.6、10、13.1 和 26 m 处设置 5 个散射点。飞机的距离向一维回波仿真如图 3 所示。

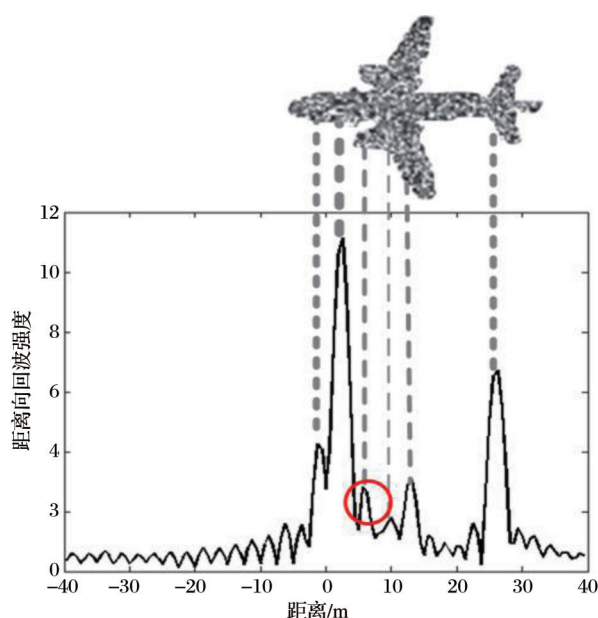


图3 小飞机旁瓣抑制仿真

Fig.3 The simulation of the Small aircraft

由图3可以看出,小飞机的主要散射位置有峰值存在,图中的第3个散射点(起落架)由于散射强度较弱及周围强目标旁瓣以及周围环境噪声相对较强,极易被第二个散射点淹没,与背景噪声混叠。

采用传统的时域加窗的方法对旁瓣进行抑制,由于 Kaiser 窗能够根据各种实验场景灵活调整参数,达到最佳的旁瓣抑制效果,选择 Kaiser($\beta=6$)窗对数据进行处理,效果如图4所示。可见,加窗对于旁瓣的抑制有着一定的效果,但其在抑制旁瓣的同时,加宽了主瓣的宽度(半峰值处,约展宽 5.2%),主瓣的展宽导致重建图像的分辨率下降,第三个散射点(起落架)与第二个散射点的主瓣混叠在了一起。

加窗对旁瓣抑制有着一定的效果,但旁瓣依旧存在,同时带来主瓣展宽及峰值下降的问题。故利用 CLEAN 算法对数据进行处理,效果如图5所示。

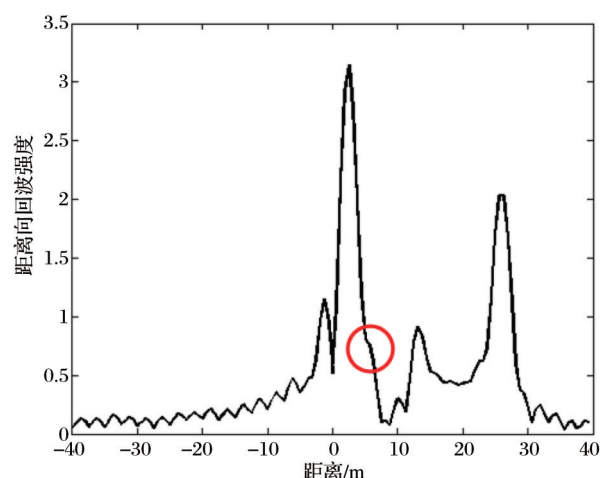


图4 时域加窗后的仿真图

Fig.4 The simulation of the Small aircraft with windowed time domain

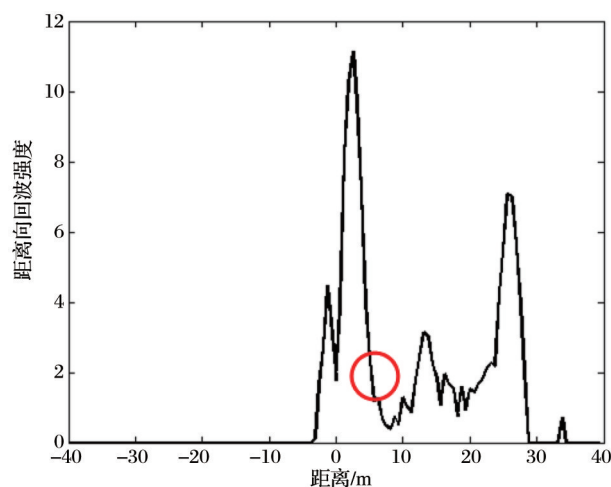


图5 应用 CLEAN 算法的仿真图

Fig.5 The simulation of the Small aircraft with CLEAN algorithm

图5为仅进行 CLEAN 算法后的效果图,可见 CLEAN 算法在旁瓣抑制的同时没有加宽主瓣。但由于仿真中加入的强的背景噪声以及第二个散射点设置时为非理想 sinc 函数对 CLEAN 算法识别目标造成干扰,导致 CLEAN 算法没有准确的检测出来第三个散射点。

图6为回波数据先进行加 kaiser($\beta=6$)窗进行旁瓣抑制,再经过序列 CLEAN 算法联合处理得到的重建图像。与单独的进行加窗和 CLEAN 算法的对比可知,经过时域加窗处理,有效地抑制了成像中由于角度、噪声、非合作运动目标不平稳运动等问题引起的强目标旁瓣失真对后续 CLEAN 算法检测准确性的影响,而后续的 CLEAN 算法解决了加窗带来的主瓣展宽及幅值下降的问题。在进行图

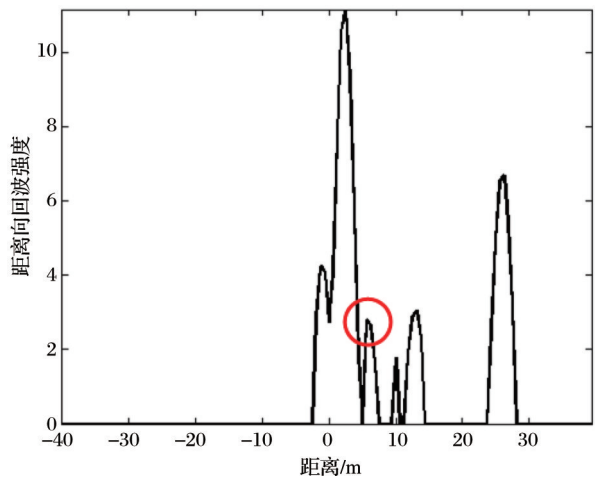


图 6 加窗与 CLEAN 算法联合处理的效果图

Fig.6 The simulation of the Small aircraft with windowed time domain and CLEAN algorithm

像的相关处理中,有效识别出了真实点目标的回波,抑制了旁瓣的同时而没有降低图像分辨率,达到了良好的仿真成像效果。

6 实测数据处理对比

为了验证本文提出的方法对于实际工程中数据处理的效果,采用 FMCW ISAR 系统对运动汽车进行实测成像,实验场景如图 7 所示。



图 7 实验场景图

Fig.7 The scene of experiment

系统的详细参数如表 1 所示。首先对测得的数据进行 RD 算法处理^[17],得到的雷达原始成像。由公式(4)推导可知,理想点目标回波经过过去斜压缩处理,得到的点目标成像为二维 sinc 函数,然而针对不同场景的实际情况,会存在观测角度的不同,目标非平稳运动等的影响,导致回波的二维 sinc 函数主瓣扭曲变形;据此,将对 CLEAN 算法中“脏束”的主瓣进行适当的尖锐化处理,以加强对目标的识别

表 1 FMCW ISAR 系统参数

Table 1 The parameters of the FMCW ISAR

参数	技术指标	参数	技术指标
中心频率	36.05 GHz	天线增益	30 dB
扫频带宽	300 MHz	波束宽度	$4^{\circ} \times 10^{\circ}$
发射功率	23 dBm	最大功率	50 W
距离分辨率	0.5 m	重量	<5 Kg
方位向分辨率	6 cm		

能力及对环境的适应性,如图 8 所示,成像结果的对比如图 9 所示。

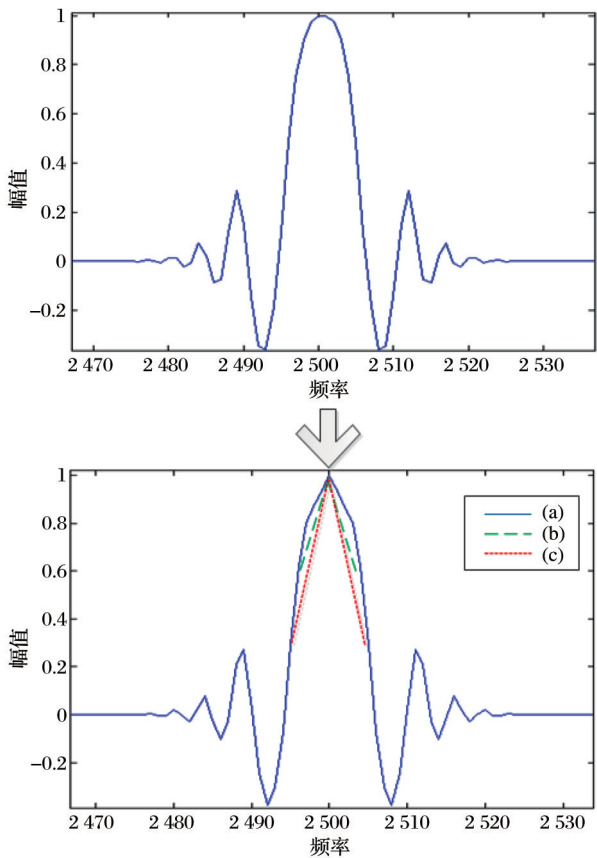


图 8 CLEAN 算法“脏束”的尖锐化处理

Fig.8 The sharpening of the dirty beam in the CLEAN algorithm

图 9(a)为经过 RD 算法处理过的原始图像,可见 RD 算法处理过的雷达图像与光学图像得到了良好的对应。图 9(b)为经过时域加窗后的图像,可见加窗对旁瓣有一定的抑制作用。图 9(c)为经过时域加窗并采用“脏束”为图 8 中(a)的 CLEAN 算法处理后得到的结果,可见其消除了旁瓣的影响,但图像信息有所缺失,原因是实际的成像场景复杂性导致的主瓣扭曲,变窄及目标旁瓣失真,当采用理想 sinc 函数为“脏束”进行相减的时候,可能会一次减去多个点目标响应以及无法识别强目标旁瓣下

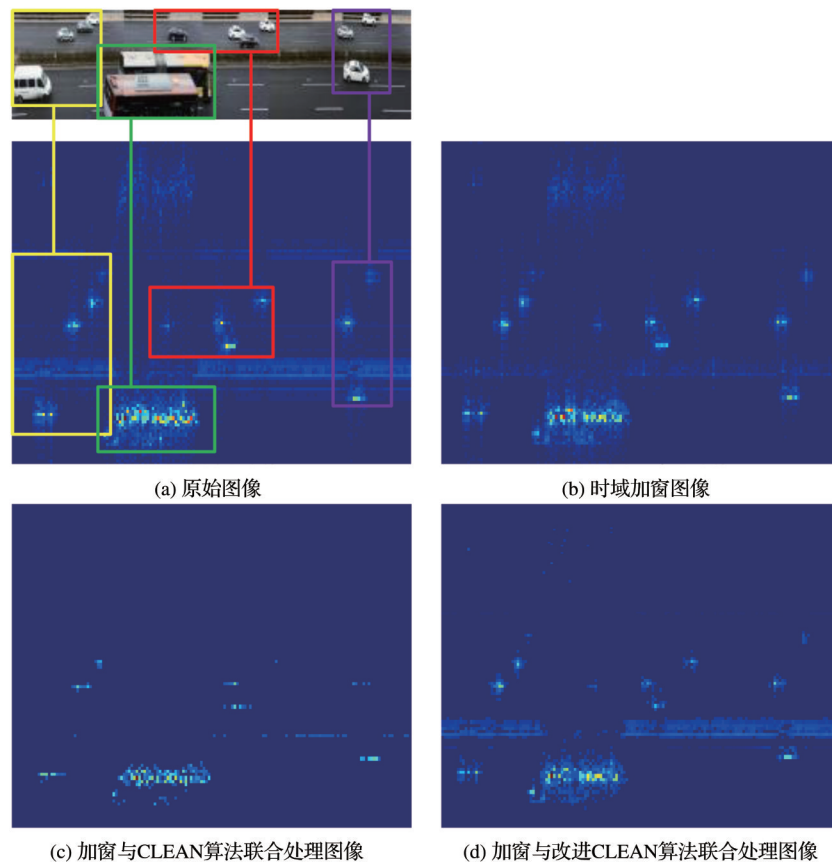


图 9 成像结果的对比

Fig.9 The comparison of results

的弱小目标从而导致信息的丢失。图 9(d)为进行时域加窗并采用“脏束”为图 8 中(c)的 CLEAN 算法处理后得到的结果,可见其通过对“脏束”的修改,在抑制旁瓣的同时,有效重建了目标的细节信息。通过对比可知,成像质量得到了显著的提高。

运用图像的平均均方误差(RMSE)和峰值信噪比(PSNR)衡量重建图像的质量。其定义分别为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} \|I(i,j) - I'(i,j)\|^2} \quad (9)$$

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{A^2}{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n [I(i,j) - I'(i,j)]} \right) \quad (10)$$

其中: $I(i,j)$ 、 $I'(i,j)$ 分别为处理前后图像的灰度值分布, A 为图像中灰度的最大值。处理结果的对比如表 2 所示。

平均均方误差反映的是当前图像和源图像在每一个像素点之间的方差,越小代表着重建图像准确度越高;峰值信噪比表示信号的最大可能功率和影响它的表示破坏性噪声功率的比值,越大代表着与原图越接近。

表 2 重建图像效果参数

Table2 The parameters of the reconstructed images

	平均均方误差	峰值信噪比/dB
时域加窗	19.893	35.143
Clean 算法	96.249	28.296
改进 clean 算法	19.816	35.161

如表所示,经过时域加窗,其只是降低旁瓣,所以可以认为对重建图像的准确性没有太大的影响;而经过 Clean 算法,导致的图像信息的缺失,平均均方误差远大于加窗时的误差,峰值信噪比也小于加窗的信噪比,经过改进的 clean 算法,平均均方误差和峰值信噪比均优于了时域加窗时的水平,接近时域加窗的效果参数,说明了改进的联合处理算法准确的重建了图像的细节信息,优化了成像效果。其对旁瓣的抑制和对信噪比的提高如图 10 所示。

图 10 为原始图像与经过联合处理算法的图像在距离向 64 m 处的方位向回波剖面图;可见在方位向,经过改进的联合处理算法,在不降低图像分辨率的情况下,消除了旁瓣,滤除了噪声,达到了预期的效果。

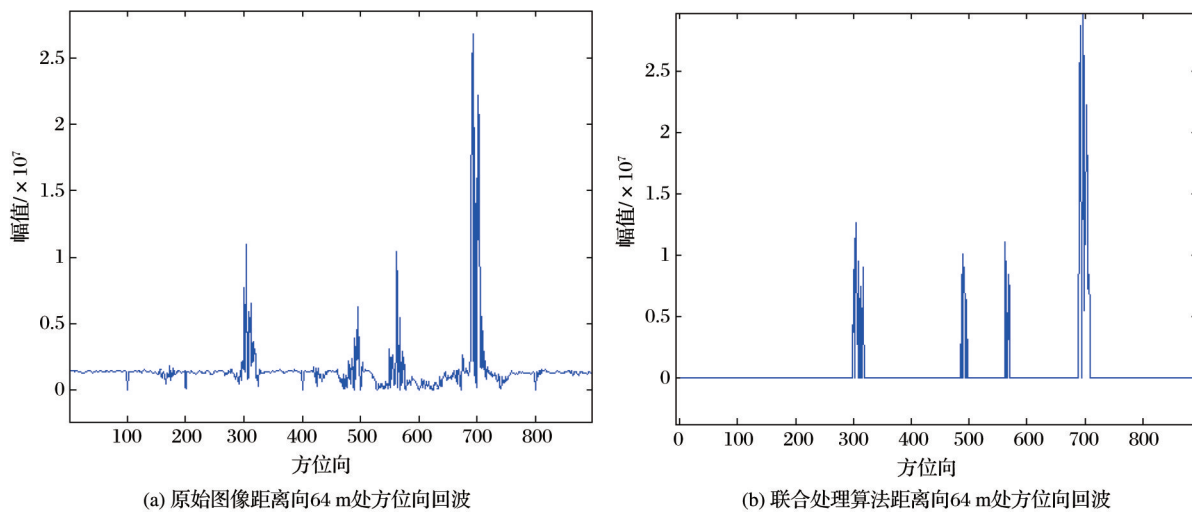


图10 距离向64处剖面对比
Fig.10 The comparison of the sections in the distance of 64

7 结 论

针对ISAR观测过程中非合作目标非平稳运动引起的点目标回波可能会存在旁瓣失真并掩盖弱小目标等导致的传统CLEAN算法难以进行有效处理的问题,本文采用了时域加窗加权修正旁瓣与CLEAN算法联合对数据进行处理的方法;针对实际情况造成的主瓣扭曲失真的问题,改进了CLEAN算法中的“脏束”,使其对实际场景具有更好的目标辨识能力以及适应能力,通过经过处理后的图像之间的对比,验证了本文提出的方法的有效性。

参考文献(Reference):

- [1] Jiang Zhihong, Zhao Yi, Huang Fukan. Development of FM-CW ISAR[J]. Modern Radar, 2008, 30(2): 20-24.[江志红, 赵懿, 皇甫堪. 调频连续波SAR的研究进展[J]. 现代雷达, 2008, 30(2): 20-24.]
- [2] Wang Zhijin. Research on Radar Imaging Algorithm[D]. Xi'an: Xidian University of Electronic Technology, 2012: 20-25. [王志金. 雷达成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012: 20-25.]
- [3] Oppenheim A V, Schaffer R W. Discrete-time Signal Processing[M]. 2nd ed. USA: Prentice Hall, 1999.
- [4] Zeng Bo, Tang Qiu, Qing Boyuan. Spectral Analysis Method based on Improved FFT by Nuttall Self Convolution Window [J]. Journal of Electrotechnics, 2014, 29(7): 60-62.[曾博, 唐求, 卿柏元. 基于Nuttall自卷积窗的改进FFT谱分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 60-62.]
- [5] Hogbom J A. Aperture Synthesis with a Nongular Distribution of Interferometer Baselines [J]. Astron. Astrophys, 1974, 15(2): 417-426.
- [6] Jiu Mingyuan. Research on Micro-Doppler Phenomena and CLEAN Technology in ISAR Imaging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 20-25.[酒明远. ISAR成像中微多普勒现象及CLEAN技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 20-25.]
- [7] Bose R, Avraham Freedman, B. D. Steinberg. Sequence CLEAN: A Modified Deconvolution Technique for Microwave Images of Contiguous Targets [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1): 89-97.
- [8] Li Linmao. Research on CLEAN Algorithm in Reconstructed Image[D]. Shanghai: Shanghai University of Applied Sciences, 2017: 2-4.[李林茂. 重构图像中CLEAN算法的研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2017: 2-4.]
- [9] He Yuntao, Jiang Yuesong, Zhong Yu. Application of CLEAN Algorithm in Airborne Millimeter Wave Synthetic Aperture Imaging [J]. Journal of Electronics and Information, 2007, 29(7): 1757-1758.[何云涛, 江月松, 钟宇. CLEAN算法在机载毫米波综合孔径成像中的应用[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(7): 1757-1758.]
- [10] Yang Xinfeng, Zhang Jinna, Teng Shuhua. Estimation of Scattering Center of Random Frequency Conversion Radar Using Compressed Sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5): 1-3.[杨新峰, 张金娜, 滕书华. 利用压缩感知实现随机变频雷达散射中心估计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 1-3.]
- [11] Meta A, Hoogeboom P. Time Analysis and Processing of FMCW SAR Signals[C]// Proc. IRS. 2003: 263-268.
- [12] Cai Yongjun, Zhang Xiangkun, Jiang Jingshan. Design and Imaging of Millimeter Wave FMCW SAR System [J]. Modern Radar, 2016, 38(2): 4-5.[蔡永俊, 张祥坤, 姜景山. 毫米波FMCW SAR系统设计与成像研究[J]. 现代雷达, 2016, 38(2): 4-5.]
- [13] Liang Yi, Wang Hongxian, Xing Mengdao. Analysis and Imaging of Frequency Modulated Continuous Wave SAR Signals

- [J]. Journal of Electronics and Information, 2008, 3(5): 1017-1020.[梁毅, 王虹现, 刑孟道. 调频连续波 SAR 信号分析与成像研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 3(5): 1017-1020.]
- [14] Yang R, Xue H. A Novel Algorithm for Accurate Frequency Measurement Using Transformed Consecutive Points of DFT [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1057-1062.
- [15] Schwarz U J. Mathematical-statistical Description of the Iterative Beam Removing Technique (Method CLEAN) [J]. Astron Astrophys, 1978, 65(2): 345 - 356.
- [16] Dwarakanath K S, Deshpande A A, Shankar N U. A Modified Algorithm for Cleaning Wide-field Maps with Extended Structures[J]. Journal of Astrophysics and Astronomy, 1990, 11(3): 311-322.
- [17] Ausherman D A, Kozma A, Walker J L, *et al.* Development in Radar Imaging [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 4: 363-398.

Research on FMCW ISAR Low Sidelobe Imaging Technology based on Improved Clean Algorithm

Ren Jiawei^{1,2}, Zhang Xiangkun^{1,2}, Shao Zelong^{1,2}

(1. CAS Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Frequency Modulation Continuous Wave Inverse Synthetic Aperture Radar (FMCW ISAR) images by transmitting the Frequency Modulation Continuous Waves, due to the limited bandwidth of the transmitted waves, the imaging is affected by the sidelobes of the sinc function inevitably. The CLEAN algorithm is widely used in the astronomical images. In order to solve the problems of the sidelobes of the sinc function, the algorithm which combines of the windowing in time domain and the CLEAN algorithm is proposed, and improves the quality of the images obviously. Finally, the “dirty beam” and “clean beam” in the CLEAN algorithm are modified to improve the capacity of the radar detection. The results show that the proposed method has a certain reference for the applications.

Key words: Frequency Modulation Continuous Wave; Inverse Synthetic Aperture Radar; Sidelobe suppression; The improve of the CLEAN algorithm; Road vehicle imaging