

基于 CSI-ISAR 的非合作目标成像技术

聂 松 郝 明 庄 龙 刘 颖

(南京电子技术研究所 南京 210016)

摘 要: 合成孔径雷达(SAR)针对静止目标成像,依靠雷达平台的运动形成较长的合成孔径,达到方位高分辨。而在地面静止场景中,必然会存在运动目标,其运动参数的未知使得目标在 SAR 图像上难以聚焦成像。另一方面,逆合成孔径雷达(ISAR)技术在雷达平台静止条件下,依靠目标运动形成长合成孔径后聚焦成像。本文将结合多通道合成孔径雷达-地面动目标指示(SAR-GMTI)技术,提出了基于杂波抑制干涉(CSI)和 ISAR 相结合的非合作动目标聚焦成像。成像过程中,利用多通道图像信息,动目标在 CSI 处理后被检测到,针对动目标的能量范围进行 ISAR 处理,实现该区域内动目标的聚焦成像。最后仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;地面动目标指示技术;杂波抑制干涉;逆合成孔径雷达

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Non-cooperative target imaging technology based on CSI-ISAR method

Nie Song Hao Ming Zhuang Long Liu Ying

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210016, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) utilizes relative motion between the radar platforms and targets to form long aperture, which is designed for static targets and finally obtain high resolution images. There are moving targets in the ground stationary scene. Since the motion parameters are unknown, the moving targets are hardly focused in SAR image. On the other hand, inverse synthetic aperture radar (ISAR) technology has been known that moving targets can be focused depending on the motion of targets and static radar platform. The work of this paper combines the multichannel SAR-GMTI technology and come up with the image of non-cooperative moving target based on clutter suppression interference (CSI) and ISAR. And meanwhile moving targets are detected after CSI processing before ISAR processing which picks the main energy area of the targets. At the end of the paper, simulation results prove the effectiveness of the chain and success of moving targets defocus.

Keywords: synthetic aperture radar(SAR); ground moving target indication(GMTI); clutter suppression interference (CSI); inverse synthetic aperture radar(ISAR)

0 引 言

合成孔径雷达利用雷达平台与地面目标的相对运动,形成沿航向的长合成孔径。成像过程中利用脉冲间,回波相位变化的多普勒信息获得方位向高分辨率。除此之外,机载雷达还需要具有对地面运动目标进行检测、定位和识别的能力,即地面动目标指示能力(ground moving target indication, GMTI)。当雷达和目标的运动状态已知,多普勒信息有效利用,目标回波能量就能被压缩至观测区域的正确位置,形成聚焦图像。当目标运动状态未知,即非合作目标,在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)图像中就会导致目标产生相对偏移和散焦。

逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像要求目标相对于雷达视线有绕某一参考点的旋转运动,以产生的横向分辨率^[1],通常目标运动不仅包括这种有效的旋转运动,而且还包括不需要的平移运动。对于做直线运动或其他形式运动的目标,其相对于雷达的视线角会发生变化,相当于目标相对于雷达的转动,也可得到方位分辨率。将 ISAR 技术引入到 SAR-GMTI 系统中,对非合作目标聚焦成像具有一定的可行性^[2-3]。需要说明的是,在聚焦成像之前必须检测出 SAR 图像中的非合作目标。因此本文引入杂波抑制干涉算法(clutter suppression interference, CSI)^[4],利用多通道图像信息抑制杂波。直接在图像域补偿通道间相位差并进行对消,不影响对消后通

道间干涉相位。

现阶段 GMTI 技术重点在于杂波抑制,国内外工程上采用的技术主要是相位中心偏置天线(displaced phase center antenna, DPCA)法、沿航迹干涉(along track interferometry, ATI)法^[5],以及改进后适用于多通道的 EDPCA 法等,但是依然容易受多种强杂波背景的干扰^[6-7]。同时,GMTI 技术国内主要集中在点目标的检测和定位方面,对动目标的成像效果方面的研究基本没有。本文基于以上分析提出的 CSI-ISAR 技术,一方面结合了 DPCA 和 ATI 优点的杂波抑制 CSI 法,提高了杂波抑制能力和检测概率,另一方面 ISAR 技术能够用于动目标的再聚焦和成像技术,提高动目标的信息利用率。

1 点目标回波分析

机载 SAR 平台在运动过程中,按照脉冲重复周期 PRF 发射与接收脉冲,波束在地面形成观测区域,地面目标散射点发射形成回波,携带目标信息的回波经过处理形成 SAR 图像。雷达发射信号为线性调频信号,数学表达式如下^[8]:

$$S_0(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}\left(\frac{t-nT}{T_p}\right) \cdot \exp[j\pi K_r(t-nT)^2 + 2j\pi f_c t] \quad (1)$$

式中: $\text{rect}(\cdot)$ 表示矩形窗信号; K_r 为发射 chirp 信号调频率; f_c 为载频; n 为雷达发射信号的第 n 个脉冲。

1.1 多通道模型

常见的机载三通道 SAR-GMTI 的信号收发模式采用全孔径发射脉冲信号,子孔径接收回波,相位中心等间距为 d 。接下来考虑雷达系统对地面场景的观测模型,假设以雷达平台飞行方向为 x 轴建立空间几何,天线沿航迹排列并编号 A_1 、 A_2 和 A_3 ,几何模型如图 1 所示。

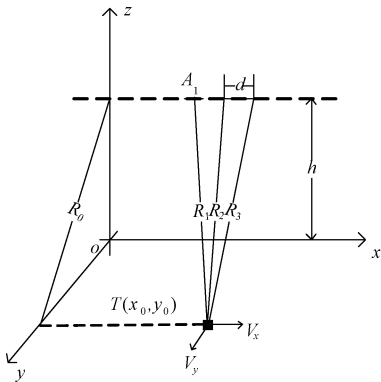


图 1 多通道模型

载机速度 V_a ,飞行高度 H ,雷达天线排列与飞行方向平行。初始时刻 $\eta=0$ 时,雷达处于点 A ,运动目标处于波束扫描区域中 P_0 点,雷达与目标距离为 R_0 ,雷达斜视角为 θ 。动目标初始位置坐标 (X_0, Y_0) ,速度为 (V_x, V_y) 。在 η 时刻,雷达运动至 B 处,目标运动至 P_η 处。可以推导出此

时目标与雷达距离如下:

$$R(n)_i = \sqrt{(X_0 + V_x \eta - d_i - V_a \eta)^2 + (Y_0 + V_y \eta)^2 + H^2} \approx R_0 + \frac{X_0^2}{2R_0} + \frac{d_i - 2X_0 d_i}{2R_0} + \frac{(d_i - X_0)(V_a - V_x) + Y_0 V_y}{R_0} \eta + \frac{(V_a - V_x)^2}{2R_0} \eta^2 \quad (2)$$

式中: $d_1=d, d_2=0, d_3=-d$ 分别是各子孔径等效相位中心间距。

实际中,雷达一般工作在正侧视,即动目标初始位置 $X_0=0, R_0 \gg d$,上述距离公式可以得到进一步简化^[9]。为了方便表示接收回波信号,以相位中心与全孔径相重合的子孔径 A_2 为例,省略矩形窗信号表达式,得到如下结果:

$$S_2(\tau, \eta) = \sigma \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi R(\eta)_2}{\lambda}\right] \cdot \exp\left\{j\pi\gamma \left[\tau - \frac{2R(\eta)_2}{c}\right]^2\right\} \quad (3)$$

式中: σ 是目标散射系数; τ, η 分别是慢时间域和快时间域。式(3)直观的说明了 SAR 成像过程中,距离压缩则与等式右边第 2 个 chirp 信号相匹配,方位压缩是将前半部分信号近似为 chirp 信号进行匹配。同理可得到另外子孔径的回波信号表达式,仅在距离 R 的计算上考虑孔径间距 d 即可,此处不再列出。

1.2 动目标对 SAR 成像影响

SAR 成像过程中,经典的 RD 算法主要包括了距离压缩和方位向压缩,距离向压缩的参数仅仅与雷达系统相关^[10],说明动静目标在该方面的成像效果基本相同,而在方位向压缩过程中,匹配滤波器的设计不仅与系统参数有关,运动目标参数也会产生很大影响。

1) 多普勒调频影响

运动目标信号的方位压缩过程中,由于其运动的未知性而无法获得其多普勒参数的情况下,常规的方位压缩过程只能通过静止目标所对应的匹配滤波参考函数来进行。而以静止目标的方位向参考函数去匹配运动目标回波的方位向信号,则信号中会存在二次相位误差,这会造成图像函数的主瓣展宽、能量下降等现象^[11],致使图像出现散焦和模糊。

假设距离压缩后的动目标信号如下所示,为了方便则省略快时间对应的 Sinc 函数部分。

$$S_r(t) = \sigma \cdot T_p \cdot \exp\left(j\pi K_a t^2 + 2\pi f t - \frac{4j\pi R_0}{\lambda}\right) \quad (4)$$

其中 $K_a = \frac{-2 \cdot [(V_a - V_x)^2 + V_y^2]}{\lambda R_0}$ 为动目标的多普勒参数,可由式(2)、(3)联合得到,采用静止目标匹配滤波器进行处理,即调频率采用 $K_0 = -\frac{2V_a^2}{\lambda R_0}$,将动静目标调频

率处理结果对比,可以得到峰值幅度对比如下^[12]:

$$\frac{S_a(t)}{S_{a0}(t)} = \frac{\text{IFFT}\{\text{FFT}[S_r(t)] \cdot \text{FFT}[h_a]\}}{\text{IFFT}\{\text{FFT}[S_r(t)] \cdot \text{FFT}[h_{a0}]\}} =$$

$$\frac{\sigma T_p T_s}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{|K_a - K_{a0}|}} \quad (5)$$

式中: S_a 是利用运动目标参数得到调频率结果; S_{a0} 是采用静止目标参数处理得到。明显采用静止目标参数处理, 动目标会表现出峰值的降低, 意味着目标在 SAR 图像上呈现模糊和散焦。

2) 多普勒中心频率影响

前面分析得到调频率的误差会导致图像散焦, 而动目标中心频率的误差则会导致目标在图像位置上的偏移^[13-14]。距离压缩后目标能量会集中在目标距离向位置处, 而方位压缩时, 如果调频率已知, 动目标方位峰值对应位置估计为:

$$\hat{t} = \frac{-f}{K_a} = \frac{(V_a - V_x) \cdot X_0 - V_y Y_0}{(V_a - V_x)^2 + V_y^2} \quad (6)$$

当方位向和距离向速度均为 0 时, 也就得到静止目标在图像方位向的位置, 则可以分析出动目标在静止目标场景中, 其方位位置与真实位置存在的偏差, 偏差量如下所示:

$$\Delta X = \frac{-V_y Y_0}{V_a} \quad (7)$$

由此可见引起位置偏差主要是距离向速度, 偏差量与距离向速度成正比。

2 动目标检测与成像

由上文分析得出静止目标与动目标的区别。实际观测场景对动目标而言, 静止目标回波属于杂波, 动目标的散焦使其容易淹没其中, 无法检测, 所以杂波需要消除或者抑制, 然后对动目标检测和聚焦成像。基于这个前提所提出的联合 CSI 和 ISAR 处理, 实现模块如图 2 所示。

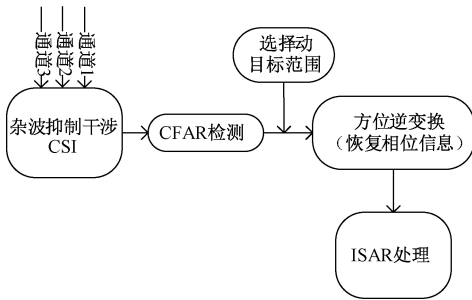


图 2 联合 CSI-ISAR 处理模块

联合处理主要利用了三通道图像信息先进行 CSI 处理, 然后利用幅相联合检测动目标, 由于检测是在图像域, 需要将动目标所在区域进行逆变换恢复方位向信息后进行 ISAR 处理。

2.1 杂波抑制 CSI

SAR 图像中, 动目标能量往往淹没在地杂波之中, 而地杂波频谱又占有一定宽度, 给动目标检测增加了一定的

困难。如果是快速目标, 其频谱在地杂波之外则易于检测, 而慢速目标则相反。所以必须利用多通道 SAR 图像信息进行动目标检测。CSI 方法是一种结构较为简单、易于实现的技术, CSI 结构如图 3 所示。

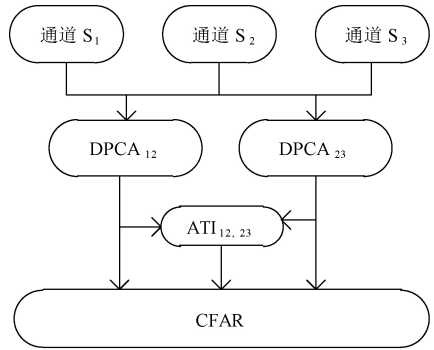


图 3 CSI 处理

CSI 处理结合了相位中心偏置技术 (displaced phase center antenna, DPCA) 和沿航迹干涉 (along-track interferometry, ATI) 各自优点, 有效利用了动目标的幅度和相位信息进行 CFAR 检测, 其中 ATI 处理同时能够利用干涉相位进行测速, 得到动目标的距离向速度, 即实现方位向的定位, 接下来就可以进行聚焦成像处理。

2.2 动目标 ISAR 成像

传统的 ISAR 成像主要包括了距离向 dechirp 和快速傅里叶逆变换 (IFFT) 得到距离像, 然后进行运动补偿, 将目标回波能量在距离向对准, 方位 IFFT 即可得到运动目标聚焦像。在 SAR-GMTI 中, 动目标在检测前已经进行了成像处理, 所以进行 ISAR 处理前进行方位逆变换, 同时省去 ISAR 的距离向处理, 仅进行方位向 dechirp, 而该方位向处理需要对动目标的多普勒调频率进行估计, 相关算法在文献[15]中可以得到。成像流程如图 4 所示。

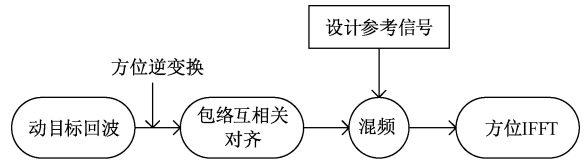


图 4 ISAR 处理

ISAR 处理中, 考虑到动目标存在散焦和跨距离单元徙动, 采用包络互相关对其进行补偿。该方法利用相邻回波的峰值对应时延作补偿, 若相邻回波包络分别是 $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$, 则互相关函数为:

$$R_{12}(\tau) = \int u_1(t) u_2(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

对 τ 进行搜索即可得到相对时延, 实际情况中相邻回波时延差值较小, 该搜索过程计算量对整个过程影响不大。

3 仿真验证

该部分主要通过仿真实验对上述算法的可行性进行验证。假设雷达平台工作在正侧视模式,仿真目标包含了 1 个静目标和 2 个动目标,以便于进行比对。动目标 1 运动参数是:距离向速度 $V_y=3\text{ m/s}$,方位向速度 $V_x=3\text{ m/s}$;动目标 2 运动参数为:距离向速度 $V_y=-2\text{ m/s}$,方位向速度 $V_x=8\text{ m/s}$ 。仿真系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

参数	说明	参数值
V_a	平台速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	200
R_s	场景中心斜距/km	10
B	带宽/MHz	150
d	通道间距/m	0.5
SNR	信噪比/dB	20
P	通道数	3

仿真首先对动目标个静目标进行 SAR 成像,成像采用经典的距离多普勒算法(range Doppler, RD),成像结果如图 5 所示。

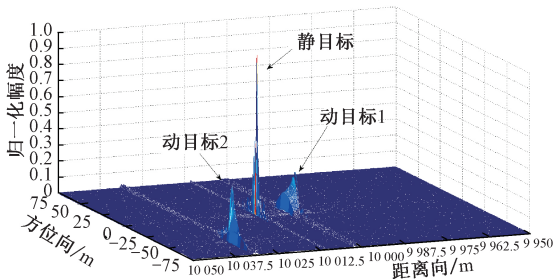


图 5 SAR 成像结果

静目标和动目标位置设定中,三者方位位置相同,距离向位置不同,分布在不同距离单元便于观察。从图 5 明显看出,静止目标幅度远大于两个动目标,动目标出现散焦和跨距离单元现象,同时方位向两个动目标均出现不同程度的偏移,印证了前文关于动目标成像问题的分析。

接下来进行杂波抑制 CSI 处理,通过该处理可以看出静止目标被抑制,残余信号主要是动目标,杂波抑制结果如图 6 所示。

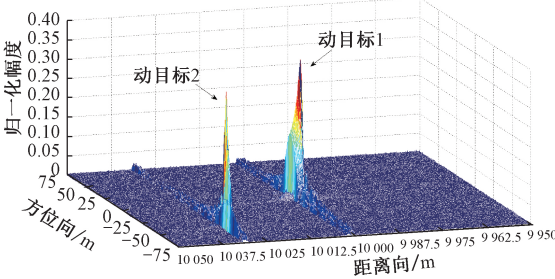


图 6 杂波对消

此时进过动目标检测可以很容易确定存在动目标和其距离向位置,想要对动目标进行聚焦成像,需要将动目标包络进行对齐,采用包络互相关算法,经过计算可以得到两个动目标所在距离单元的互相关系数如图 7 和 8 所示,以及动目标包络对其后的图像如图 9 所示。

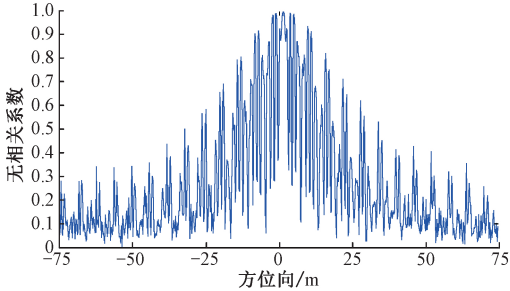


图 7 动目标 1 互相关系数

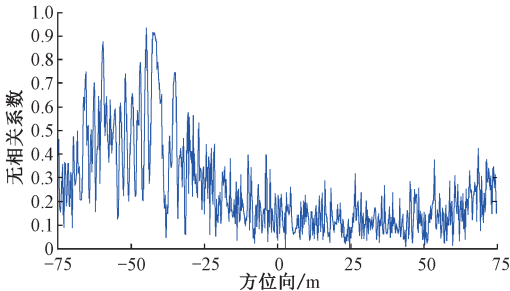


图 8 动目标 2 互相关系数

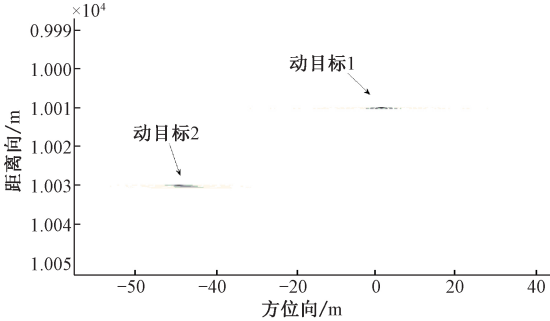


图 9 包络对齐结果

最后将能量对齐后的动目标进行聚焦成像,成像结果如图 10 所示,可以看出,动目标能量相比较 SAR 图像,能

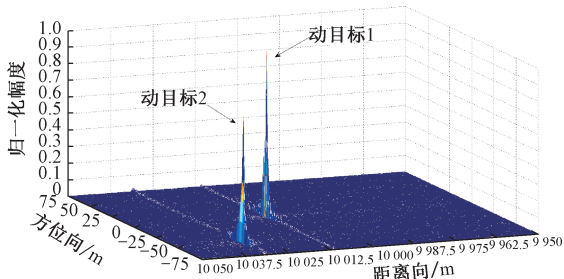


图 10 动目标聚焦结果

量明显得到集中,归一化幅度由图 5 中的 0.3 提高到 0.8 左右,证明该方法能够实现动目标的聚焦成像。

4 结 论

本文 ISAR 处理被证明是获得 SAR 图像中动目标图像的有效手段。在地杂波环境中,检测是重要的一步,目标在 SAR 图像中呈现能量散焦,运动状态未知无法聚焦,在结合 CSI 和 ISAR 处理的方法后,动目标完成了杂波抑制和动目标成像,同时该方法给工程实际中运用提供了一定的理论基础,为在 SAR 图像中识别和分类动目标提供了可能性。

参考文献

- [1] KULPA J S, GROMEK D, SAMCZYSKI P, et al. Results of high-resolution ISAR imaging of ground moving targets [C]. Signal Processing Symposium, IEEE, 2013:1-4.
- [2] BERIZZI F, MESE E D, DIANI M, et al. High-resolution ISAR imaging of maneuvering targets by means of the range instantaneous Doppler technique: Modeling and performance analysis [J]. IEEE Trans Image Process, 2001, 10(12):1880-1890.
- [3] MARTOTELLA M, GIUSTI E, BERIZZI F, et al. ISAR based techniques for refocusing non-cooperative targets in SAR images [J]. IET Radar Sonar & Navigation, 2012, 6(5):332-340.
- [4] 张绪锦,张长耀,朱兆达,等.基于 CSI 处理的三通道机载 SAR 地面动目标检测[J].电子学报,2008(4):789-793.
- [5] CERUTTI MAORI D, SIKANETA I. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2012, 51(1):560-572.
- [6] 张升,孙光才,李学仕,等.一种新的基于瞬时干涉的 SAR-GMTI 精聚焦和定位方法[J].电子与信息学报,2015,37(7):1729-1735.
- [7] 周辉,赵凤军,禹卫东.SAR 运动目标微动信号模型及微多普勒效应研究[J].电子测量技术,2015,38(11):135-142.
- [8] 韦北余,朱岱寅,吴迪.基于杂波对消-自聚焦的多通道 SAR-GMTI[J].航空学报,2015,36(5):1585-1595.
- [9] 陈戈,董明明.基于特征点检测与光流法的运动目标跟踪算法[J].电子测量技术,2017,40(12):214-219.
- [10] FIENUP J R. Detecting moving targets in SAR imagery by focusing [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2001, 37(3):794-809.
- [11] 钱江,苏军海,李凉海,等.利用 KWT 进行动目标成像的三通道 SAR-GMTI 快速目标运动参数估计[J].电子与信息学报,2010,32(7):1660-1667.
- [12] 罗丁利,向聪.一种基于 Keystone 变换的运动目标相参积累方法[J].现代雷达,2017,39(10):49-54,66.
- [13] ROSENBERG L, GRAY D. Anti-jamming techniques for multichannel SAR imaging[J]. Radar, Sonar and Navigation, 2016, 153(3):234-242.
- [14] ZHU S, LIAO G, QU Y, et al. Performance improvement for monostatic clutter mitigation using space-time-range three-dimensional adaptive processing [J]. Digital Signal Processing, 2011, 21(2):248-261.
- [15] 王明辉,王辉,赵凤军.基于 DBF-SCORE 的 Ka SAR-GMTI 信号处理方法研究[J].国外电子测量技术,2016,35(6):37-41,46.

作者简介

聂松,硕士研究生,主要研究方向为 SAR-GMTI 数据处理、聚焦成像技术等。

E-mail: niesong2016@163.com