

文章编号: 2095-4980(2022)09-0941-05

太赫兹雷达宽带 STAP 算法研究

李思明^{1,2}, 吴福伟^{1,2}, 周 洋^{1,2}

(1.南京电子技术研究所, 江苏 南京 210039; 2.中国电子科技集团公司 智能感知技术重点实验室, 江苏 南京 210039)

摘 要: 太赫兹雷达可以对地面进行高帧率高分辨力成像, 是太赫兹技术领域研究热点。针对太赫兹雷达宽带高分辨成像与地面动目标检测一体化实现需求, 提出了一种基于宽带空时自适应处理(STAP)的地面运动目标检测算法, 首次在机载太赫兹雷达上实现了同时对地高分辨雷达成像监视和多通道地面动目标指示(GMTI)检测。机载太赫兹雷达实测数据验证了算法的有效性。

关键词: 太赫兹雷达; 地面动目标指示; 空时自适应处理

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021298

Study of terahertz radar wide band STAP algorithm

LI Siming^{1,2}, WU Fuwei^{1,2}, ZHOU Yang^{1,2}

(1.Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing Jiangsu 210039, China;

2.Key Laboratory of IntelliSense Technology, CETC, Nanjing Jiangsu 210039, China)

Abstract: Terahertz radar bears the advantages of high resolution and high frame rate. It is one of the current research hotspots in the field of terahertz. Aiming at the demand for real-time ground imaging and moving target tracking, a Ground Moving Target Indication(GMTI) processing algorithm based on wide band Space-Time Adaptive Processing(STAP) is proposed. The radar imaging and Multi-channel GMTI are achieved simultaneously on the airborne terahertz radar for the first time. The effectiveness of the algorithm is verified by the experimental data of the airborne terahertz radar.

Keywords: terahertz radar; Ground Moving Target Indication; Space-Time Adaptive Processing

太赫兹雷达具有高分辨高帧率特性, 可对地面运动目标实现视频级成像与持续检测, 有效解决了传统光学传感器无法穿透云层的问题, 在对地遥感以及灾后搜救等领域拥有重要的应用潜力, 获得了国内外极大的关注^[1-4]。

早在 1971 年, R Keith Raney 即分析了运动目标对合成孔径雷达的影响, 并提出了频率和相位的检测方法^[5]; 1992 年, S Barbarossa 等提出了利用 Wigner-Ville 分布对信号进行时频分析的运动目标检测方法^[6]; 此外还有截断平均法、子孔径序列法等多种单通道地面动目标检测算法。此类算法对杂波区内目标检测性能普遍较差, 且难以对目标的真实位置进行准确的定位。为克服这个问题, 研究人员提出了多通道地面运动目标检测算法, 主要包括相位中心偏置天线技术(Displaced Phase Center Antenna, DPCA)^[7]、沿航迹干涉技术(Along-Track Interferometry, ATI)^[8]和空时自适应处理技术(STAP)^[9]。

传统雷达系统中, 高分辨 SAR 模式与地面动目标指示(GMTI)模式通常分时工作。这是因为为了获得高分辨 SAR 图像, 需要雷达工作在宽带模式下且需要较大的合成孔径时间, 运动目标在合成孔径时间内可能具有较大的状态改变, 导致运动目标检测和定位难以进行。而太赫兹雷达为了实现地面运动目标视频级成像和检测, 要求高分辨 SAR 与 GMTI 一体化完成。为解决上述问题, 本文提出了一种基于宽带 STAP 的地面动目标检测算法, 可以同时完成高分辨 SAR 成像和 GMTI。

1 基于宽带 STAP 的 GMTI 算法

太赫兹雷达载频高, 波长短, 载机平台的旋转、偏移、振动等不规则运动对回波的相位具有较大影响。STAP 算法通过二维空时自适应处理, 具有较好的误差校正能力, 可以较好地完成机载太赫兹雷达通道间静止地

物杂波的抑制，提高系统对地面运动目标的检测能力。其基本处理流程如图 1 所示。

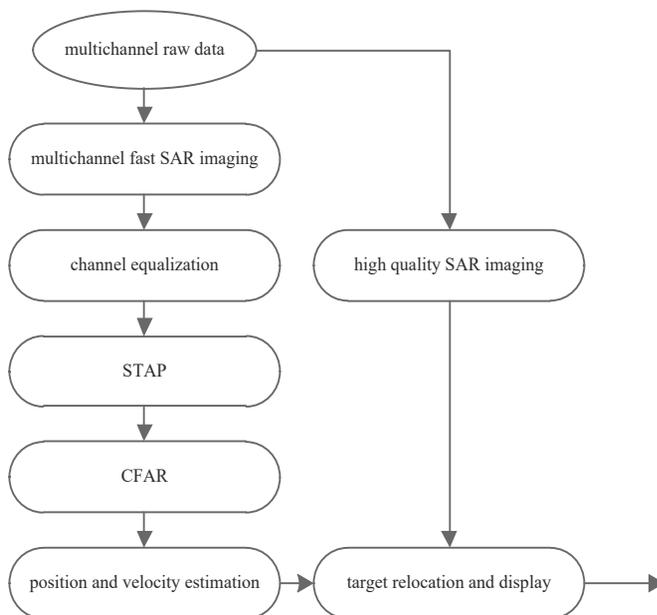


Fig.1 The flowchart of STAP-GMTI algorithm
图 1 多通道 GMTI 算法简略流程图

图 2 为一个典型的一发三收 SAR-GMTI 系统工作示意图。雷达工作在侧视模式，一个通道发射雷达信号，3 个通道同时接收回波。多通道 SAR 的空-频域 STAP 处理等效于 1DT 的降维 STAP 方法，因此可以在只取少量参考数据情况下完成多通道杂波协方差矩阵的估计，大幅降低了计算量。

多通道数据经过通道校正、脉冲压缩、方位脉冲压缩等处理后，数据变换到距离-多普勒域，其中多普勒频率也代表了方位向。设系统一共有 N 个通道，第 i 个通道的数据表示为 $S_i(r, f)$ 。由于雷达阵面在方位上有一定的旋转速度，不同通道的回波数据可能存在多普勒偏移问题，在进行 STAP 处理之前，需对通道间多普勒偏移进行修正。首先对二维图像幅度值进行二维傅里叶变换，其中一个取共轭后相乘，最后进行二维逆傅里叶变换，所得矩阵的最大值所在位置即为两幅图像的包络偏移量。进行相应多普勒校正后即完成了通道间的初步配准。

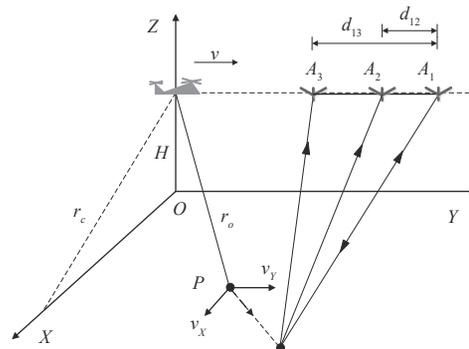


Fig.2 The imaging geometry for the SAR-GMTI system
图 2 三通道 GMTI 系统示意图

$$Y = \text{IFFT2} \left\{ \text{FFT2} \left[\text{abs}(S_i(r, f))^* \right] \times \text{conj} \left[\text{FFT2} \left(\text{abs}(S_j(r, f)) \right) \right] \right\} \quad (1)$$

经过配准后的通道数据记为 $Z_i(r, f)$ ，可以将数据多普勒频率 f 处阵列数据用式(2)表示。

$$\mathbf{Z}(r, f) = \begin{bmatrix} Z_1(r, f) \\ Z_2(r, f) \\ \vdots \\ Z_N(r, f) \end{bmatrix} \quad (2)$$

取距离门 r 周围 K 个样本，计算出 $N \times N$ 的协方差矩阵。

$$\hat{\mathbf{R}}(r, f) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{Z}(r_k, f) \mathbf{Z}^H(r_k, f) \quad (3)$$

对 $\hat{\mathbf{R}}(r, f)$ 进行特征值分解，根据子空间投影方法得到滤波加权矩阵：

$$\mathbf{P}(r, f) = \mathbf{I} - \hat{\mathbf{u}}_1(f) \hat{\mathbf{u}}_1^H(f) \quad (4)$$

式中 $\hat{\mathbf{u}}_1(f)$ 为最大特征值对应的特征向量。设 $\mathbf{b}(u_s)$ 为波束形成指向矢量，则检测量可以表示为：

$$\mathbf{Q}(r, f) = \mathbf{b}^H(u_s) \mathbf{P}(r, f) \mathbf{Z}(r, f) \quad (5)$$

经过对消处理后，静止杂波已得到较好抑制，但仍存在一定剩余。存在形状轮廓较为尖锐的物体时，单一幅度检测仍可能产生虚警。针对此种情况，设计了幅度和相位双门限检测器进行目标检测，检测概率计算公式为：

$$\begin{cases} P_d = \int_{g_A}^{\infty} \int_{-\pi}^{-g_\varphi} f_{BA\varphi}(A, \varphi) d\varphi dA + \int_{g_A}^{\infty} \int_{g_\varphi}^{\pi} f_{BA\varphi}(A, \varphi) d\varphi dA \\ P_{fa} = \int_{h_A}^{\infty} \int_{-\pi}^{-h_\varphi} f_{A\varphi}(A, \varphi) d\varphi dA + \int_{h_A}^{\infty} \int_{h_\varphi}^{\pi} f_{A\varphi}(A, \varphi) d\varphi dA \end{cases} \quad (6)$$

式中： g_A 和 g_φ 分别为幅度门限和相位门限； $f_{A\varphi}(A, \varphi)$ 为杂波干涉幅度与相位的联合概率密度函数； $f_{BA\varphi}(A, \varphi)$ 为杂波加上运动目标的幅度相位联合概率密度函数。根据给定的虚警概率 P_{fa} 及表达式可得幅度与相位的门限。同时为进一步提高检测性能，利用宽带系统高分辨的特性，可以对目标尺寸做进一步的判别，过滤掉尺寸过大和过小的虚假点迹。

若所检测出的目标位于 (r, f_i) 处，对应数据样本 $\mathbf{Z}(r, f_i)$ ，可根据 MUSIC 算法估计出目标所在的方位角度，首先按式(7)计算高分辨力谱。

$$\gamma(f) = \frac{1}{1 - |\mathbf{u}_1^H(f) \mathbf{Z}(r, f_i)|^2 / \|\mathbf{Z}(r, f_i)\|^2} \quad (7)$$

若 $\gamma(f)$ 的峰值位于 f_m 处，设成像时选择的多普勒中心频率为 f_{dc} ，飞机速度为 v ，多普勒分辨力为 f_{dr} ，由式(8)计算目标方位位置：

$$x = \frac{(f_m - f_{dc})v}{f_{dr}} \quad (8)$$

联合 f_m 和 f_i ，估计目标径向速度：

$$\hat{v}_i = \frac{(f_i - f_m - f_{dc})\lambda}{2} \quad (9)$$

2 实测数据验证

为验证太赫兹雷达的运动目标检测性能，开展了挂飞试验。雷达装于机腹下方，载机绕目标区域飞行，进行高分辨聚束成像。试验场景内合作运动目标如下：两辆汽车进行绕圈、折返、加速、减速等多种机动运动，用于验证算法对机动目标的检测跟踪性能；一辆三轮自行车进行慢速直线运动，用于检验慢速目标检测性能。试验证明算法对运动目标检测稳定可靠，在虚警概率小于 10^{-5} 条件下，运动目标检测概率大于 90%。同时运动定位结果与图像中目标阴影位置基本一致，表明算法对运动目标具有较高的定位精确度。图 3 为一组典型检测结果：图 3(a) 为原始成像，两辆汽车相向行驶，回波本体能量位于杂波区之外，而低速前进的三轮车回波则位于杂波区之内；图 3(b) 为多通道杂波对消结果图像，经过通道配准和杂波对消后，静止目标的回波能量被抑制消除，而运动目标的能量得到保留；图 3(c) 为利用双门限 CFAR 算法进行运动目标检测结果图像，可以看出，已经较好地将运动目标能量检测出来，后续亦可据此提取运动目标回波能量用于运动目标成像；图 3(d) 为子孔径子带检测结果数据融合后对运动目标重新定位结果图像，可以看出，自动跟踪得到的目标位置与地面目标阴影位置几乎一致，本文算法对运动目标测速定位精确度较高。同时由于太赫兹雷达目标多普勒信息十分敏感，运动目标仅需具有很小的径向速度即可进行有效的检测和跟踪，因此在目标多种机动条件下，太赫兹雷达均具有较好的地面运动目标检测跟踪性能。图 4 为算法对运动目标连续观察过程中的一些典型结果。

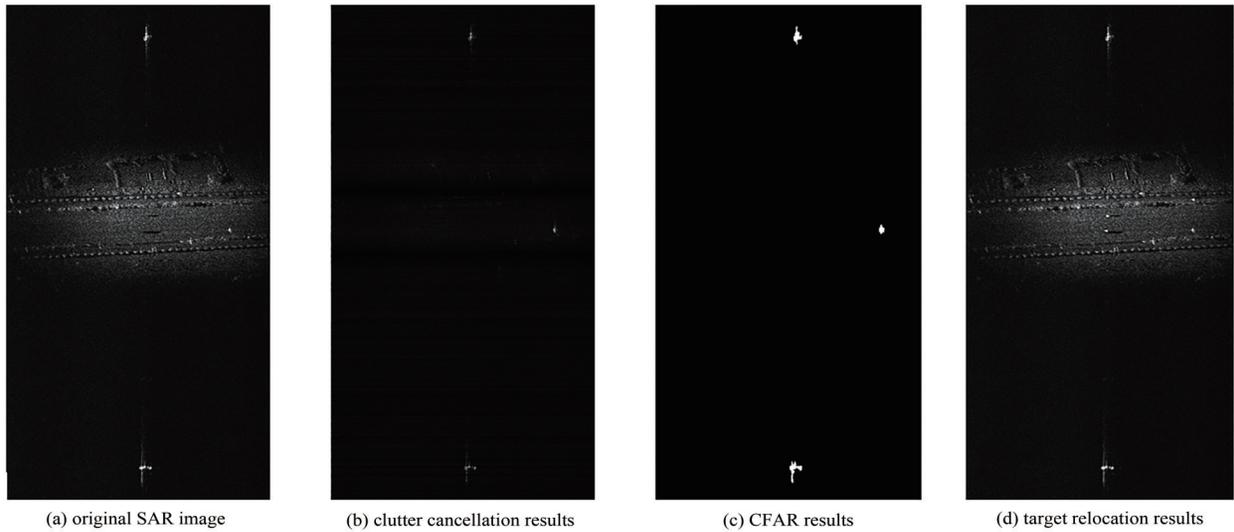


Fig.3 STAP-GMTI results of typical frames
图3 典型动目标检测结果

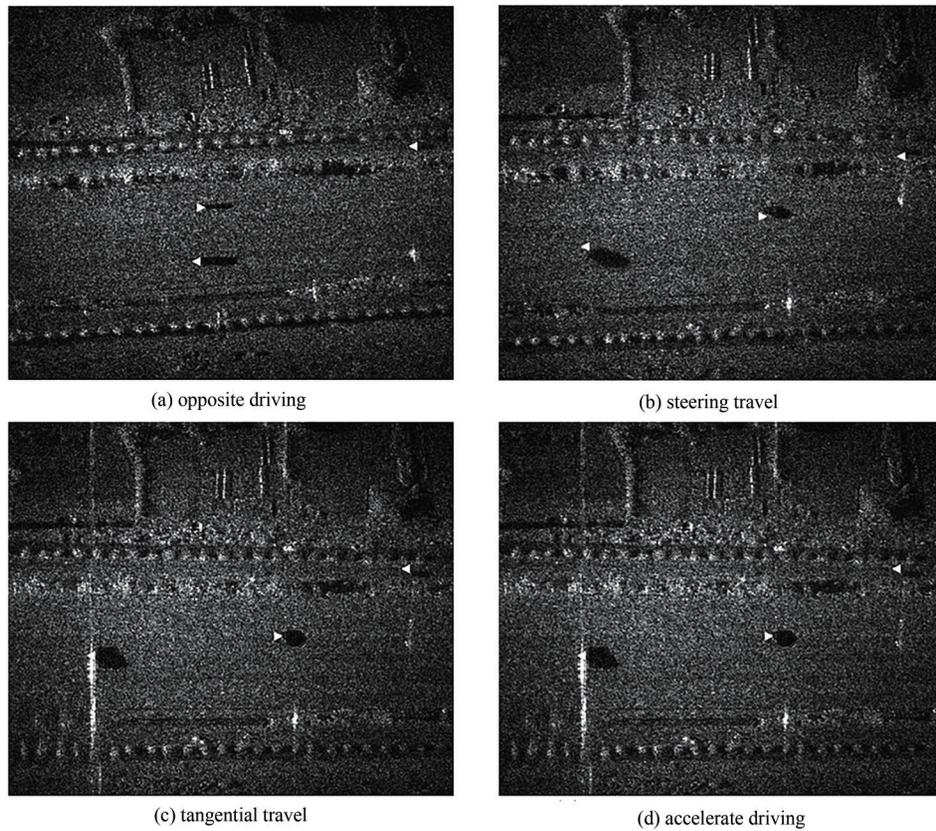


Fig.4 Continuous tracking results of ground moving targets in typical scenes
图4 典型动目标持续跟踪结果

3 结论

利用STAP算法可以较好地实现杂波对消,对于慢速目标、机动目标均可得到稳定的检测定位结果。本文提出的算法实现了对地面场景高帧率高分辨SAR成像和对地面运动目标的持续跟踪。

参考文献:

- [1] 李大圣,邓楚强,刘振华,等. 太赫兹成像雷达系统研究进展[J]. 微波学报, 2015,31(6):82-87. (LI Dasheng,DENG Chuqiang, LIU Zhenhua,et al. Research progress of THz imaging radar system[J]. Journal of Microwaves, 2015,31(6):82-87.)

- [2] DARPA. Video synthetic aperture radar electronics and advanced algorithms[Z]. DARPA-BAA-12-41, 2012:1-54.
- [3] LINNEHAN R, MILLER J, BISHOP E, et al. An autofocus technique for Video-SAR[C]// The International Society for Optical Engineering. Baltimore MD, USA: SPIE, 2013:1-10.
- [4] 吴福伟, 刘振华, 李大圣, 等. 220 GHz 太赫兹合成孔径雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(3):368-371. (WU Fuwei, LIU Zhenhua, LI Dasheng, et al. A 220 GHz terahertz Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(3):368-371.)
- [5] RANEY R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971, AES-7(3):499-505.
- [6] BARBAROSSA S. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. 1. Optimal detection and parameter estimation theory[J]. IEEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1992, 139(1):79-88.
- [7] BARBAROSSA S, FARINA A. Detection and imaging of moving objects with synthetic aperture radar. 2. Joint time-frequency analysis by Wigner-Ville distribution[J]. IEEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1992, 139(1):89-97.
- [8] LIGHTSTON L, FAUBER D, REMPEL G. Multiple phase center DPCA for airborne radar[C]// Proceedings of the 1991 IEEE National Radar Conference. Los Angeles, CA, USA: IEEE, 1991:36-40.
- [9] KIM D, MOON W M, IMEL D, et al. Remote sensing of ocean waves and currents using NASA(JPL) AIRSAR along-track interferometry(ATI)[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto, Canada: IEEE, 2002:931-933.

作者简介:

李思明(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为雷达成像与目标检测识别. email: lisiming5@cetc.com.cn.

周洋(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达总体设计与信号处理.

吴福伟(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为雷达总体设计与信号处理.