基于稀疏空间谱估计的星载 SAR DBF 算法

叶沙琳1,张 永2,杨桃丽2,李 威1

(1. 上海卫星工程研究所,上海 201109; 2. 电子科技大学 资源与环境学院,四川 成都 611731)

摘 要:针对星载合成孔径雷达(SAR)系统利用俯仰向数字波束形成(DBF)技术接收场景回波时受地形的影响,会出现波束指向偏差的问题,提出了基于稀疏空间谱估计的星载 SAR 数字波束形成方法。该方法将目标场景高程估计问题转换为波达方向估计问题,考虑到回波信号的稀疏性,进而等效为稀疏空间谱估计问题,然后利用凸优化方法求解得到目标波达方向。最后,仿真实验验证了该方法的有效性,结果表明该方法可以降低传统自适应方法受小样本和低信嗓比影响的限制,实现复杂地形下的正确波束指向,保证回波信号的接收增益。

关键词:星载合成孔径雷达;稀疏空间谱估计;数字波束形成;回波信号 中图分类号:TN 95 文献标志码:A DOI:10.19328/j. cnki. 1006-1630. 2018. 06. 011

An Algorithm for Spaceborne SAR DBF Based on Sparse Spatial Spectrum Estimation

YE Shalin¹, ZHANG Yong², YANG Taoli², LI Wei¹

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: In order to solve the problem that the imaging terrain will cause beam mispointing for spaceborne synthetic aperture radar (SAR) systems when the digital beamforming (DBF) technique in elevation is adopted, a novel DBF algorithm based on sparse spatial spectrum estimation is proposed in this paper. The estimation of target elevation is converted into the estimation of direction of arrival (DOA) angles. Considering the sparsity of the receiving signals, the estimation problem can also be converted into the sparse spatial spectrum estimation results verify the effectiveness of this method. Compared to traditional adaptive methods, the proposed method can realize the accurate beam pointing and high beam gain in the complex terrain with low sensitivity to SNR and a small number of snapshots.

Keywords:synthetic aperture radar(SAR); sparse spatial spectrum estimation; digital beamforming(DBF); receiving signal

0 引言

相比于传统的光学遥感,合成孔径雷达(SAR) 作为一种高性能的遥感工具,具有全天时、全天候、 远距离成像的能力,并且能穿透一定深度的地表和 覆盖植被进而获取大面积有效的遥感图像。因此, 在战略防御、地形测绘等军用和民用领域,SAR 有 着广泛的应用。然而,传统星载单通道 SAR 存在最 小天线面积限制^[1]:高方位分辨率和宽距离测绘带 是一对不可调和的矛盾量,高方位分辨率要求高脉 冲重复频率(PRF),而宽距离测绘带则要求低 PRF。为了解决传统星载单通道 SAR 方位高分辨 和宽距离测绘带的矛盾,国内外学者们提出了结合 数字波束形成(DBF)的多通道(MC)技术^[2-8]。其 中,利用距离多通道可实现距离模糊抑制,从而实现 距离宽测绘带成像,也可用来提高系统信噪比 (SNR)。

SUESS 等^[3]提出的俯仰向波束扫描(SCORE) 技术利用小天线发射宽波束信号覆盖宽测绘带,然

⁶⁵

收稿日期:2018-06-23;修回日期:2018-11-11

基金项目:国家自然科学基金(61601090);上海航天科技创新基金(SAST2016037)

作者简介:叶沙琳(1985一),男,硕士,工程师,研究方向为雷达载荷技术及仿真。

后结合 DBF 技术,利用多个接收通道形成等效的高 增益窄波束沿距离向扫描接收回波。但是,该成像 系统受地形高程的影响,导致波束指向产生偏差,从 而造成目标信号分量损失。当发射信号的脉冲宽度 较长时,脉冲覆盖范围将超出接收波束的宽度,造成 接收增益损失及 SNR 降低。

针对以上问题,李杨等^[9]研究了4种适用于不同发射信号带宽的距离向 DBF 处理方法。齐维孔 等^[10]分析了卫星滚动角对距离 DBF 的影响,提出 利用宽零陷技术抑制距离模糊。冯帆等^[11]提出了 一种将零点指向空域滤波和 FIR 时域滤波相结合 的方法,解决了脉冲空域延展和距离模糊的问 题^[12]。韩晓东等^[13]提出距离向两级 DBF 加权处理 方法来抑制距离模糊。王伟等^[14]分析了基于距离 DBF 的理想情况下的 SAR 系统性能,包括噪声等 效后向散射系数(NESZ)和距离模糊信号比 (RASR)。但是,这些方法均未考虑地形起伏的影 响。当地形高程起伏不可忽略时,以上方法将导致 波束指向产生偏差,损失目标信号分量,增加模糊 分量。

为了降低地形起伏的影响,BORDONI 等^[15]提 出在星上对各通道接收回波分别进行距离压缩和配 准后,再利用 MUSIC 等子空间类空间谱估计方法 来获取回波信号等效的波达方向,从而缓解地形高 程对波束指向的影响。冯帆等[16]和刘尧等[17]也提 出了类似的方法,对接收回波信号进行距离压缩后, 利用子空间谱估计方法来改善地形高程的影响。 HE 等^[18]提出将各通道接收回波下传至地面系统 后,利用 MUSIC 等空间谱估计方法来估计回波信 号的波达方向,从而缓解地形变化对波束形成的影 响。然而,这些星上处理方法对实时处理的要求很 高,会极大增加星上的处理量和系统实现难度。此 外,由于采用子空间类测向方法,必然受到样本数和 SNR 的影响。当样本数较少或 SNR 较低时,波达 方向的估计性能将大大下降。KRIEGER 等^[19]针 对地形高程对距离模糊抑制的影响,提出了在忽略 地形高程对目标信号分量损失的影响的前提下,先 利用 SCORE 技术对各子测绘带回波进行扫描接 收,然后将数据下传至地面系统,再结合自适应波束 形成的方法,利用各子测绘带的回波实现距离模糊 抑制。该方法理论上可在不增加星上系统复杂度的 前提下,实现距离模糊抑制。但是,当地形高程变化 较大时,SCORE 技术造成的目标分量损失将不可 忽略,此外自适应的波束形成方法也会受到小样本 和低 SNR 的影响。

本文提出了一种基于稀疏空间谱估计的星载合成孔径雷达数字波束形成的方法。该方法将目标场景高程估计问题转换为稀疏空间谱估计问题,降低了现有方法易受小样本和 SNR 约束影响的限制。

1 处理算法

本文方法的处理流程如图1所示,主要包括距 离压缩、波达方向估计和波束形成。



1.1 距离压缩

假设 SAR 系统的整个天线阵面沿俯仰向均匀 划分为 M 个子孔径,如图 2 所示。



图 2 SAR 系统在俯仰向的观测几何示意图 Fig. 2 Geometrical diagram of SAR system in elevation

图中: H_s 为卫星平台高度; d_m 为第m个子孔 径到第1个子孔径的距离; α 为天线水平倾角; r_1 和 r_m 分别表示地面目标 P至第1个和第m个子孔径 的斜距;h为目标 P的海拔高度; θ 为目标至第1个 子孔径的斜距连线与天线面板法线的夹角,其值离 开天线法线向上为正,向下为负,可由式(1)计算得 到,即

 $\theta =$

$$\arccos\left[\frac{(R_{\rm e} + H_{\rm s})^2 + r_1^2 - (R_{\rm e} + h)^2}{2(R_{\rm e} + H_{\rm s})r_1}\right] - \alpha \qquad (1)$$

式中:R。为地球半径。

根据成像几何关系可得

$$r_{m} = \sqrt{r_{1}^{2} + d_{m}^{2} - 2r_{1}d_{m}\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)} \approx$$
$$r_{1} - d_{m}\sin\theta + \frac{d_{m}^{2}}{2r_{1}}$$
(2)

由于天线尺寸相比目标斜距来说非常小,因此式(2) 可近似为

$$r_m \approx r_1 - d_m \sin \theta \tag{3}$$

假设第1个子孔径发射信号,所有子孔径同时 接收回波信号。考虑加性白噪声且仅考虑距离向回 波,第 m 个子孔径接收的回波信号进行距离压缩后 可写为

$$s_{m}(\tau) = \sigma p_{r} \left(\tau - \frac{2r_{1} - d_{m}\sin\theta}{c} \right) \cdot \exp\left(-j2\pi f_{c} \left(\frac{2r_{1} - d_{m}\sin\theta}{c}\right)\right) + n(\tau) \quad (4)$$

式中: σ 为目标后向散射系数; τ 为距离快时间; $p_r(\tau)$ 为压缩脉冲包络,对于矩形窗来说, $p_r(\tau)$ 为 sinc函数;c为电磁波传播速度; f_c 为发射信号载 频; $n(\tau)$ 为高斯白噪声。当 d_m sin θ 的大小相对于分 辨率来说不可忽略时,可对各子孔径接收回波相对 第1个子孔径进行配准,则式(4)可改写为

$$\sigma p_{r} \left(\tau - \frac{2r_{1}}{c}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi f_{c} \frac{r_{1}}{c}\right) \exp\left(j2\pi f_{c} \frac{d_{m}\sin\theta}{c}\right) + n_{m}(\tau) = s_{1}(\tau) \exp\left(j2\pi f_{c} \frac{d_{m}\sin\theta}{c}\right) + n_{m}(\tau)$$
(5)

其中

 $s_{-}(\tau) =$

$$s_1(\tau) = \sigma p_r \left(\tau - \frac{2r_1}{c}\right) \cdot \exp\left(-j4\pi f_c \frac{r_1}{c}\right) \quad (6)$$

经过距离压缩后,接收的回波信号能量将主要 集中在1个距离门内。将各子孔径接收回波用矢量 形式表示为

$$\boldsymbol{s}(\tau) = \boldsymbol{s}_1(\tau) \boldsymbol{p}(\theta) + \boldsymbol{n}(\tau) \tag{7}$$

其中

$$\mathbf{s}(\tau) = \begin{bmatrix} s_1(\tau), s_2(\tau), \cdots, s_M(\tau) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(8)

$$\boldsymbol{p}(\theta) = \begin{bmatrix} 1, e^{j2\pi f_c} \frac{u_c^{2\min}}{c}, \cdots, e^{j2\pi f_c} \frac{u_M^{\min}}{c} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(9)

$$\boldsymbol{n}(\tau) = \begin{bmatrix} n_1(\tau), n_2(\tau), \cdots, n_M(\tau) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \quad (10)$$

1.2 波达方向估计

根据稀疏空间谱估计方法,利用各距离单元回 波可估计得到每个距离时刻对应的目标场景的波达 方向。考虑回波信号的空域稀疏性,忽略快时间变 量τ,将距离向回波信号构建为

$$\boldsymbol{s} = \boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta}) \, \tilde{\boldsymbol{s}}_1 + \boldsymbol{n} \tag{11}$$

式中: s_1 为回波信号 $s_1(\tau)$ 的补零扩展形式,若回波 信号的方向角为 ϕ_q ,则 s_1 的第 q 个值为 $s_1(\tau)$,否则 其值为零; $P(\theta)$ 为所有波达方向信号构成的阵列响 应矩阵,即空域超完备字典集,有

 $\mathbf{\tilde{P}}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{p}(\theta_1), \boldsymbol{p}(\theta_2), \cdots, \boldsymbol{p}(\theta_q) \end{bmatrix}$ (12) 式中: θ_q 的取值范围为雷达波束的照射范围, q = 1, 2, ..., Q_o

一般来说,Q>M,因此可将目标场景的波达方向估计问题转换为以下稀疏问题^[20],即

 $\min \| s - \tilde{P}(\theta) \tilde{s}_1 \|_2^2 + \lambda \| \tilde{s}_1 \|_1$ (13) 式中: $\| \cdot \|_2 \| \cdot \|_1 \cap \beta \| \delta \|_2 \| \delta \|_1 \| \delta \|_2 \| \delta \|_1$ 稀疏规则化参数。求解上述优化问题即可得到 \tilde{s}_1 , 然后根据波峰位置得到信号的波达方向。式(13)所 示的稀疏问题为凸优化问题,现已有多种高效的求 解方法。与传统自适应 DBF 方法相比,稀疏空间谱 估计的方法不需要利用多个训练样本来估计回波信 号的协方差矩阵。当然,训练样本数的增加也有利 于稀疏空间谱估计法精度的提高。因此,本文基于 得到的波达方向,计算每个时刻的子孔径的加权矢 量,以便准确地得到目标中心位置。

1.3 波束形成

根据估计得到的波达方向,计算每个距离时刻 对应子孔径的加权矢量,使形成的接收波束中心能 够准确地指向目标所在的位置。利用估计得到的波 达方向 $\hat{\theta}$,可得到 τ 时刻各子孔径的加权矢量 $\boldsymbol{\omega}(\tau)$,即

$$\boldsymbol{\omega}(\tau) = \boldsymbol{p}^* \left(\hat{\boldsymbol{\theta}}(\tau) \right) \tag{14}$$

式中:上标 * 表示取共轭。

在实际应用中,目标场景地形变化缓慢且连续。 为了降低运算量,可对距离向回波进行分块,选取每 块场景中的某一距离单元估计得到波达方向,再根 据波达方向和斜距估计出每块场景的地形高度,然 后利用估计得到的各块距离向的地形高度拟合出整 个场景的高度,最后再根据几何关系求解得到所有 距离单元所对应的波达方向。下面结合仿真数据实 验对稀疏空间谱估计法的效果做进一步的说明。

2 仿真实验验证

为了验证所提方法的有效性,利用计算机仿真 数据进行实验验证。星载 SAR 系统的仿真参数如 表1所示,其中俯仰向天线尺寸总长为1.5 m,并沿 俯仰向均匀划分为15个接收子孔径,即单个子孔径 长度为0.1 m。俯仰向天线方向图为|sinc|形式,并 假设在场景中心有一点目标,目标斜距为 615.95 km。

表 1 仿真参数 Tab. 1 Simulation parameters

参数	值
卫星平台高度/km	514
卫星速度/(m•s ⁻¹)	7 611
场景中心下视角/(°)	32
天线水平倾角/(°)	32
载频/GHz	9.65
脉冲重复频率/Hz	1 775
俯仰向天线尺寸/(m×m)	15×0.1
俯仰向接收子孔径个数/个	15

对各子孔径回波信号进行距离压缩后,选取目

标所在的距离单元作为估计样本。图 3(a)和 图 3(b)分别给出了在不同目标海拔高度的情况下, 利用 SCORE 法和本文所提的稀疏空间谱估计法所 引入的波束指向偏差和相应的接收增益损失。当目 标海拔高度为 0 时,目标下视角为 32°,结合天线水 平倾角可得目标相对天线阵列的波达方向角为 0。 随着目标海拔高度的变化,相应的波达方向角为 0。 随着目标海拔高度的变化,相应的波达方向角也会 发生变化,而传统 SCORE 法不考虑目标海拔高度, 依然采用平地曲面模型,将导致所估计的目标波达 方向发生偏差。随着目标海拔高度的增加,利用 SCORE 法得到的波束指向偏差也越来越大,波束 指向偏差导致波束增益损失(图 3(b));而采用本文 方法得到的目标波达方向几乎不随着目标海拔高度 的变化而变化,即几乎不存在波束指向偏差和波束 增益损失。

与传统自适应法相比,本文提出的方法受 SNR 的影响较小。图 4 和图 5 分别给出不同 SNR 时,利 用本文方法和传统自适应法估计得到的目标空间谱 分布。假设海拔高度为 0,可得目标相对天线阵列 的波达方向为 0。从图 4 和图 5 中可看出,当 SNR 为 0 时,两个方法均能正确估计得到目标的波达方 向,而当 SNR 降低为一10 dB 时,本文方法也能正 确估计出目标的波达方向,传统自适应法却因噪声 的影响,使目标空间谱受到干扰,影响了目标波达方 向的估计。

综上可知,在考虑目标海拔高度的情况下,相较 于 SCORE 方法,本文所提方法在波束指向和增益 损失方面都有更好的性能;同时,相比于传统的自适 应法,本文所提方法受 SNR 的影响较小。



图 3 两种方法仿真结果 Fig. 3 Simulation results of two different algorithms









3 结束语

传统 SCORE 技术受地形影响,在进行接收波 束扫描时将出现波束指向偏差,导致波束增益损失, 而传统的自适应法受回波 SNR 影响较大。为解决 以上问题,本文提出了一种基于稀疏空间谱估计的 星载 SAR 数字波束形成方法,该方法将目标场景高 程估计问题转换为稀疏空间谱估计问题,然后通过 估计得到的目标波达方向形成正确的波束指向,从 而实现高分辨 SAR 成像。最后,通过仿真实验验证 了本文方法的有效性。

参考文献

[1] FREEMAN A, JOHNSON W, HUNEYCUTT B,

et al. The "Myth" of the minimum SAR antenna area constraint[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 320-324.

- [2] CURRIE A, BROWN M A. Wide-swath SAR[J]. IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing), 1992, 139(2): 122-135.
- [3] SUESS M, GRAFMUELLER B, ZAHN R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium (2001 IEEE International). 2001: 1013-1015.
- [4] KRIEGER G, GEBERT N, MOREIRA A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(4): 260-264.

- LIZF, WANG H Y. SUT. et al. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J].
 IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(1): 82-86.
- [6] KRIEGER G. MIMO-SAR: opportunities and pitfalls[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(5): 2628-2645.
- [7] KIM J H, YOUNIS M, MOREIRA A, et al. Spaceborne MIMO synthetic aperture radar for multimodal operation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(5): 2453-2466.
- [8] 王文钦.多天线合成孔径雷达成像理论与方法[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [9] 李杨,黄杰文,禹卫东.高分辨率宽测绘带星载 SAR 距离 DBF 处理[J].电子与信息学报,2011,33(6): 1510-1514.
- [10] 齐维孔,禹卫东,黄平平.基于 DBF 技术的星载 SAR 宽测绘带实现方法[J].数据采集与处理,2010,25 (3):289-294.
- [11] 齐维孔,禹卫东,黄平平.卫星滚动角误差对星载 SAR距离向DBF影响[J].系统仿真学报,2010,22 (7):1697-1701.
- [12] FENG F, LI S, YU W. et al. Study on the processing scheme for space-time waveform encoding SAR system based on two-dimensional digital beamforming[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(3): 910-932.
- [13] 韩晓东,宋红军,徐伟,等.基于星载 SAR 实时波束形成的星下点及距离模糊抑制方法[J].电子与信息学

报,2013,35(12):2823-2828.

- [14] 王伟,王宇,侯丽丽.俯仰向数字波束形成技术对 SAR系统性能的影响分析[J].电子与信息学报, 2014,36(11):2711-2716.
- [15] BORDONI F, YOUNIS M, VARONA E M, et al. Adaptive scan-on-receive based on spatial spectral estimation for high-resolution, wide swath synthetic aperture radar [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium(2009 IEEE International). 2010: 64-67.
- [16] 冯帆,党红杏,谭小敏.基于 Capon 谱估计的星载 SAR 自适应 DBF 研究[J]. 雷达学报, 2014, 3(1): 53-60.
- [17] 刘尧, 王辉, 禹卫东. 星载 Ka-SAR 俯仰向自适应 DBF 算法研究[J]. 信号处理, 2015, 31(7): 808-814.
- [18] HE F, MA X, DONG Z, et al. Digital beamforming on receive in elevation for multidimensional waveform encoding SAR sensing[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2014, 11(12): 2173-2177.
- [19] KRIEGER G, HUBER S, VILLANO M, et al. CE-BRAS: Cross elevation beam range ambiguity suppression for high-resolution wide-swath and MIMO-SAR imaging [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium (2015 IEEE International). 2015: 196-199.
- [20] MALIOUTOV D, CETIN M, WILLSKY A S. A sparse signal reconstruction perspective for source localization with sensor arrays[J]. IEEE Trans Signal Process, 2005, 53(8). 3010-3022.

(本文编辑:姚麒伟)