基于 Capon 谱估计的星载 SAR 自适应 DBF 研究

冯 帆[*]　党红杏　谭小敏
(中国空间技术研究院西安分院　西安　710100)

摘 要：在地形起伏较大的山地区域，星载 SAR 利用传统俯仰向数字波束形成(DBF)方法接收场景回波时，都会出现波束指向偏差的问题，这一偏差使得回波接收增益与信噪比降低。针对这一问题，该文提出一种基于 Capon 空间谱估计的星载 SAR 自适应 DBF 方法。该方法首先通过有限的回波数据来准确地估计出各距离门内信源的波达角(AOA)，而后利用这些信息来更新接收波束的加权矢量，从而能够在任何时刻都使接收波束准确地指向信源位置，以此来改善回波增益与信噪比。仿真实验结果表明，该方法较传统的俯仰向波束扫描(SCORE)法有较大的性能改善，同时它还对系统及信源参数的变化有很强的鲁棒性。

关键词：星载合成孔径雷达(SAR)；空间谱估计；Capon 法；自适应数字波束形成(ADBF)；接收增益
中图分类号：TN958　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2095-283X(2014)01-0053-08
DOI: 10.3724/SP.J.1300.2014.13131

Study on Adaptive Digital Beamforming for Spaceborne SAR Based on Capon Spatial Spectrum Estimation

Feng Fan　Dang Hong-xing　Tan Xiao-min
(*China Academy of Space Technology*, *Xi'an Branch*, *Xi'an* 710100, *China*)

Abstract: In rough mountainous areas, beam-pointing mismatch problems always arise when a spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) uses the traditional Digital BeamForming (DBF) approach in elevation to receive echoes, leading to the degradation of the receiver's gain and system Signal-to-Noise Ratio (SNR). To solve this problem, an Adaptive Digital BeamForming (ADBF) approach based on the Capon spatial spectrum estimation is proposed. This approach first estimates the Angle Of Arrival (AOA) of the source signal in each range bin using the limited echo data. Then, it updates the weighting vector in the beamforming process, thereby enabling the receiving beams to precisely point to the signal source, and enhance the receiver's gain and SNR. Simulation results suggest that the ADBF approach significantly improves the performance compared to the SCan-On-REceive (SCORE) approach, exhibiting robustness to system and source parameters variations.

Key words: Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); Spatial spectrum estimation; Capon method; Adaptive Digital BeamForming (ADBF); Receive gain

1　引言

星载 SAR 在进行对地遥感成像时，为提高系统信噪比会利用俯仰向波束扫描(SCan-On-REceive, SCORE)技术来接收回波[1−4]。该技术在俯仰向配置多个子孔径，并通过时变加权处理，形成一个等效的高增益数字波束来追踪回波。在设置加权系数时，SCORE 法基于理想球体模型，并利用余弦定理确定出回波时间与波达角(Angle Of Arrival, AOA)的对应关系[5,6]，而后得出各时刻的加权矢量，以使接收波束中心能够时刻对准回波位置。然而，在山地起伏较大的区域，真实地形与理想地球模型往往有较大的差异，若仍采用 SCORE 法来设计权值，则会出现波束指向偏差的问题，导致接收增益的损失和信噪比的恶化[7, 8]。

针对 SCORE 法的这一问题，文献[8]中提出了同时形成多个相邻的俯仰向窄波束进行扫描接收，而后在这多个波束输出中选取最大值的方法。这一方法虽然在一定程度上能缓解指向偏差的问题，但由于波束之间是紧邻的，因此串扰效应非常严重。文献[9,10]提出了通过对原始数据进行星上实时分析来确定信源 AOA 的思想。然而，由于发射脉冲有一定的脉宽，因此信源的原始回波在时域上有一定的延展，这使得利用该方法来估计信源位置会有较大的误差。

2013-12-18 收到，2014-03-21 改回；2014-03-27 网络优先出版
*通信作者：　冯帆　sailingvon@126.com

本文提出一种基于Capon谱估计的新型自适应数字波束形成(Digital BeamForming, DBF)方法来解决SCORE的波束指向偏差问题(由于本文分析和解决的是俯仰向上的指向偏差问题，在这里假设方位向上地形起伏不大)。与以上提到的实时分析相比，本文方法只需利用有限的回波数据就可获得关于地貌特征的准确信息，而后再通过这些信息来调整俯仰向的加权矢量。此外，本文方法会在Capon谱估计前进行距离压缩处理，将信源在时间域上弥散的能量压缩到其相应的距离门内，从而提高估计计精度。

本文安排如下，第2节简要介绍SCORE的工作原理及其在山地区域存在的指向误差；在第3节中将给出俯仰向多孔径接收信号的矢量模型，并基于此推导出本文的自适应DBF方法；第4节中将对本文方法估计信源空间位置的性能进行仿真实验，结果表明本文方法较SCORE法有较大程度的改善；最后分析本文方法对系统及信源参数的鲁棒性。

2 SCORE原理及其指向误差

基于理想球体模型(地球为一标准球体且表面无地形起伏)，SCORE通过式(1)，式(2)确定出在τ时刻对应的波达角θ

$$R_c=\frac{c\cdot\tau}{2} \tag{1}$$

$$\theta=\cos^{-1}\left(\frac{R_{\rm orbit}^2+R_c^2-R_{\rm E}^2}{2R_{\rm orbit}\cdot R_c}\right) \tag{2}$$

其中c为光速，R_c为信源所在位置的斜距，$R_{\rm orbit}$为星载SAR平台的轨道半径，$R_{\rm E}$为地球半径。然而在地形陡峭的区域，利用式(1)，式(2)计算得到的值与真实波达角之间会有较大的误差。

图1示意在同等斜距R_c的条件下，SCORE计算出的信源位置与真实信源位置之间的差异。通过斜距R_c及信源所在的高度h，可确定出视角之差$\Delta\theta$为：

$$\begin{aligned}\Delta\theta&=\theta_{\rm real}-\theta_{\rm sc}\\&=\cos^{-1}\left[\frac{R_{\rm orbit}^2+R_c^2-(R_{\rm E}+h)^2}{2\cdot R_{\rm orbit}\cdot R_c}\right]\\&\quad-\cos^{-1}\left[\frac{R_{\rm orbit}^2+R_c^2-R_{\rm E}^2}{2\cdot R_{\rm orbit}\cdot R_c}\right]\\&\approx\frac{h}{R_c\cdot\sin(\theta_{\rm inc})}\end{aligned} \tag{3}$$

式中$\theta_{\rm real}$与$\theta_{\rm sc}$分别为真实位置与计算出的位置对应的波达角，$\theta_{\rm inc}$为信源位置的入射角。设天线的高度为h_a，脉冲波长为λ，则由波束指向偏差而导致的接收增益损失ΔG_r为：

$$\Delta G_r=\operatorname{sinc}^2\left[\frac{\pi h_a}{\lambda}\sin(\Delta\theta)\right] \tag{4}$$

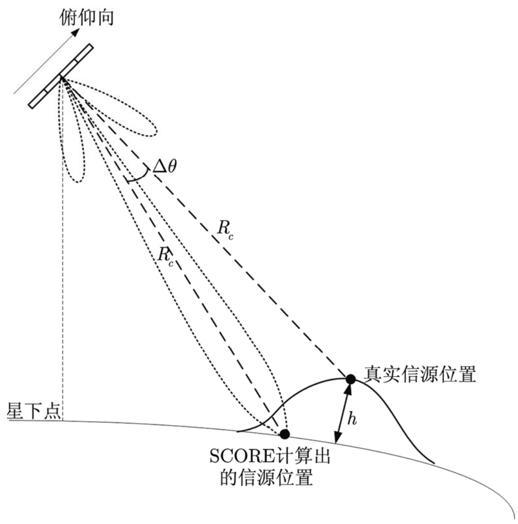


图1 SCORE出现的波束指向误差示意图

Fig. 1 Elevation Beam mispointing model for SCORE scheme

在海拔高度为1500 m时，ΔG_r就会达到3 dB，而且随着h的增大，ΔG_r也会逐渐增大，进一步恶化系统信噪比。下一节将基于俯仰向多孔径接收信号矢量模型给出本文的自适应DBF方法。

3 Capon谱估计的自适应DBF

在本节中，首先研究俯仰向多孔径接收信号的矢量模型，而后基于此模型推导出利用Capon空间谱估计确定信源位置的方法。最后将给出相应的俯仰向自适应DBF系统实现框图。

3.1 俯仰向多孔径接收信号矢量模型

由于星载SAR的天线高度h相比于接收天线与场景距离非常小，因此可用远场效应下的平面波模型来近似场景内目标的回波。图2示意了俯仰向多孔径接收视角为θ的目标回波，其中子孔径1发射脉冲信号，实现距离向宽幅覆盖，而所有的子孔径都接收回波，并进行后期的DBF处理。

对于图2中的第k ($k\in[1,N_e]$)个子孔径，其精确的接收信号模型为：

$$\begin{aligned}s_k(\tau,t)=&\operatorname{rect}\left[\frac{\tau-[R_1(t)+R_k(t)]/c}{T_{\rm p}}\right]\\&\cdot\exp\left\{j\pi K_r\left[\tau-[R_1(t)+R_k(t)]/c\right]^2\right\}\\&\cdot\operatorname{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_{\rm sar}}\right]\cdot\exp\left\{-j2\pi\frac{R_1(t)+R_k(t)}{\lambda}\right\}\end{aligned} \tag{5}$$

式中τ为距离向快时间变量，t为方位向慢时间变量，$R_1(t)$与$R_k(t)$分别为子孔径1与子孔径k到目标的斜距，$T_{\rm p}$为脉宽，c为传播速度，K_r为调频斜率，t_0为目标位置对应的方位向时间，$T_{\rm sar}$为合成孔径时间，λ为波长，β为天线的法线视角。

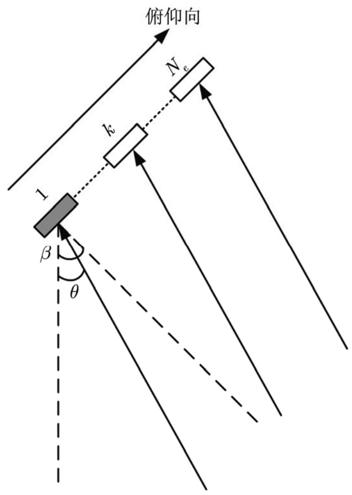


图 2 星载 SAR 俯仰向多孔径接收场景回波
Fig. 2　Receiving echoes by multiple elevation subapertures of spaceborne SAR

由于场景中任意位置处信源的回波到达阵列两端的距离差远小于一个距离门，即

$$R_N(t) - R_1(t) \le h_a \cdot \sin(\theta_{\max} - \beta) \ll \sigma_r \qquad (6)$$

其中 h_a 为天线俯仰向高度，$\theta_{\max}$ 为场景最大视角，σ_r 为距离分辨单元。可对 $s_k(\tau,t)$ 做如下初步近似：

$$s_k(\tau,t) \approx \mathrm{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1(t)/c}{T_\mathrm{p}}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r\left[\tau - \frac{2R_1(t)}{c}\right]^2\right\} \cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_\mathrm{sar}}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{R_1(t)+R_k(t)}{\lambda}\right\} \qquad (7)$$

根据远场效应，式(7)的 $R_k(t)$ 可近似为：

$$R_k(t) \approx R_1(t) + (k-1)d \cdot \sin[\beta - \theta_0(t)] \qquad (8)$$

其中 $\theta_0(t)$ 为目标对应的视角。结合式(7)与式(8)，$s_k(\tau,t)$ 可近似为：

$$s_k(\tau,t) \approx \mathrm{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1(t)/c}{T_\mathrm{p}}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r\left[\tau - \frac{2R_1(t)}{c}\right]^2\right\} \cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_\mathrm{sar}}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{2R_1(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}\sin[\beta - \theta_0(t)]\right\} \qquad (9)$$

由于在整个合成孔径时间 T_sar 内，信源的视角 θ_0 的变化会非常小，可近似认为是一常数。因此 $s_k(\tau,t)$ 能够进一步近似为：

$$s_k(\tau,t) \approx \mathrm{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1(t)/c}{T_\mathrm{p}}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r\left[\tau - \frac{2R_1(t)}{c}\right]^2\right\} \cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_\mathrm{sar}}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{2R_1(t)}{\lambda}\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}\sin[\beta - \theta_0]\right\} \qquad (10)$$

考虑到子孔径内存在的各种噪声 $e_k(t)$，第 k 个子孔径的接收信号最终可表示为：

$$y_k(\tau,t) = s_k(\tau,t) + e_k(\tau,t) \qquad (11)$$

根据式(11)，可得到俯仰向多孔径接收信号的矢量模型为：

$$\boldsymbol{y}(\tau,t) = s_1(\tau,t) \cdot \boldsymbol{a}(\theta_0) + \boldsymbol{e}(\tau,t) \qquad (12)$$

其中 $s_1(\tau,t)$ 为子孔径 1 接收到的信号模型，$\boldsymbol{a}(\theta_0)$ 为信源目标对应的导向矢量

$$\boldsymbol{a}(\theta_0) = \left[1, \exp\left\{-j2\pi\frac{d}{\lambda}\sin(\beta-\theta_0)\right\}, \cdots, \exp\left\{-j2\pi\frac{(N_e-1)d}{\lambda}\sin(\beta-\theta_0)\right\}\right]^\mathrm{T} \qquad (13)$$

而 $\boldsymbol{e}(\tau,t)$ 为噪声矢量

$$\boldsymbol{e}(\tau,t) = \left[e_1(\tau,t), e_2(\tau,t), \cdots, e_{N_e}(\tau,t)\right]^\mathrm{T} \qquad (14)$$

下一节将基于式(12)所表示的信号矢量模型，推导并给出本文确定信源位置的方法。

3.2 空间谱估计确定信源位置

以图 3 所示的场景为例，为避免 SCORE 波束指向偏差而导致增益损失的问题，需要利用前 N 个方位向采样得到的回波数据来估计出每个距离门内信源对应的精确视角(这里假设方位向上的地形起伏变化不大)，而后设定每个距离时刻相应的俯仰向加权矢量。

对于式(12)所示的俯仰向接收信号矢量，我们首先对其进行距离向压缩处理，压缩后的信号矢量 $\boldsymbol{y}_\mathrm{rc}(\tau,t)$ 为：

$$\boldsymbol{y}_\mathrm{rc}(\tau,t) = s_{1\_\mathrm{rc}}(\tau,t) \cdot \boldsymbol{a}(\theta_0) + \boldsymbol{e}'(\tau,t) \qquad (15)$$

其中 $s_{1\_\mathrm{rc}}(\tau,t)$ 为子孔径 1 接收信号的压缩结果

$$s_{1\_\mathrm{rc}}(\tau,t) = C_0 \mathrm{sinc}\left[K_r T_\mathrm{p}\left(\tau - 2R_1(t)/c\right)\right] \cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_\mathrm{sar}}\right] \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{2R_1(t)}{\lambda}\right\} \qquad (16)$$

这里，暂不考虑信号在方位向上的变化，因此可将式(16)改写为：

$$s_{1\_\mathrm{rc}}(\tau,t) = C_0 \mathrm{sinc}\left[K_r T_\mathrm{p}\left(\tau - 2R_1/c\right)\right] \cdot \mathrm{rect}\left[\frac{t-t_0}{T_\mathrm{sar}}\right] \cdot \exp\left\{-j4\pi\frac{R_1}{\lambda}\right\} \qquad (17)$$

在完成距离压缩处理后，利用方位向 N 次采样得到的 N 组训练样本，对每一距离门上的信号协方差矩阵进行估计，即

$$\widehat{\boldsymbol{R}}_{\boldsymbol{y}}(\tau) = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \boldsymbol{y}_\mathrm{rc}(\tau,n) \cdot \boldsymbol{y}_\mathrm{rc}^\mathrm{H}(\tau,n) \qquad (18)$$

基于式(18)，再通过 Capon 谱估计[11]的方法，

就可得到在距离向τ时刻相应的空间谱$P(\tau,\theta)$为：

$$P(\tau,\theta)=\frac{1}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\widehat{\boldsymbol{R}}_{\boldsymbol{y}}(\tau)^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{19}$$

在空间谱$P(\tau,\theta)$中寻找出峰值位置，即可估计得到τ时刻对应的信源AOA值$\hat{\theta}_0$。

3.3 俯仰向自适应DBF系统方案

在完成对每一距离时刻对应的信源空间位置估计后，即可设定或调整每一时刻的俯仰向加权矢量$\boldsymbol{w}$，使得相应形成的数字接收波束能够准确地将波束中心指向信源所在位置。利用估计出的$\hat{\theta}_0$，可得出τ时刻的$\boldsymbol{w}(\tau)$为：

$$\boldsymbol{w}(\tau)=\boldsymbol{a}^{*}\left[\hat{\theta}_0(\tau)\right] \tag{20}$$

最后，给出本文提出的星载SAR的自适应DBF相应的系统处理模块。为利于对比，同时也给出传统的俯仰向DBF处理模块。

从图4中可看出，传统星载SAR的俯仰向子孔径加权值是基于理想地球模型而提前设定的，并且

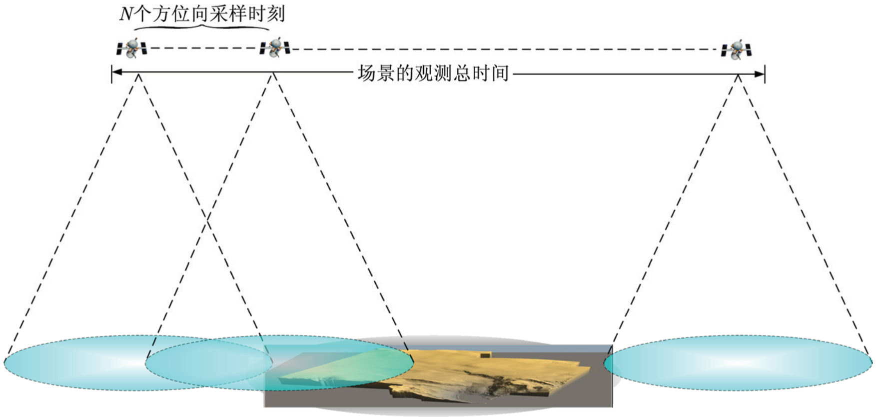
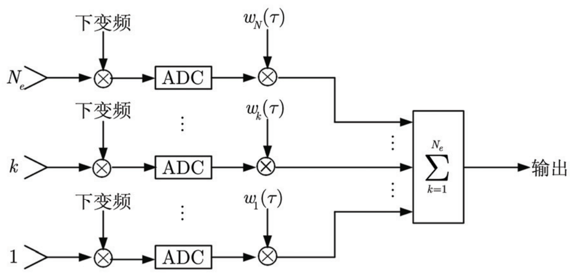


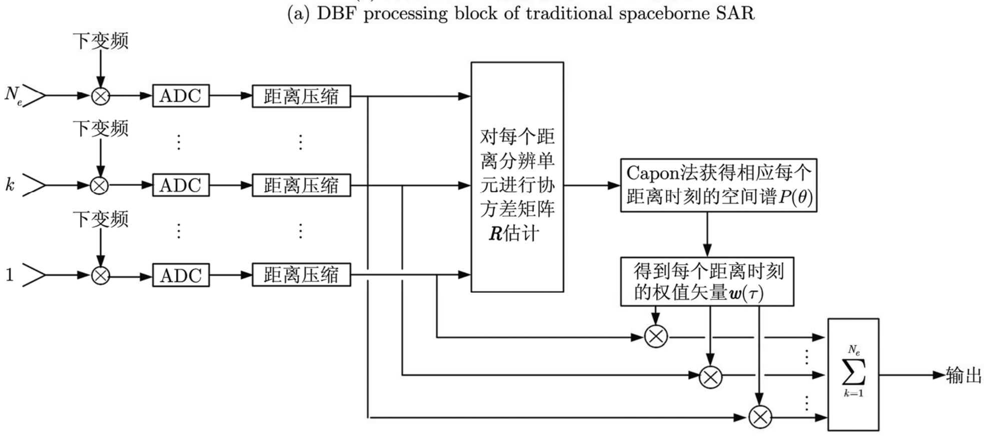
图3 星载ADBF-SAR进行场景观测

Fig. 3 Scene observation strategy employed by spaceborne ADBF-SAR



(a) 传统星载SAR的俯仰向DBF处理模块

(a) DBF processing block of traditional spaceborne SAR



(b) 自适应星载SAR的俯仰向DBF处理模块

(b) DBF processing block of adptive spaceborne SAR

图4 星载SAR的俯仰向自适应DBF处理模块

Fig. 4 Adaptive DBF processing block diagram within spaceborne SAR

一旦确定后就不再调整。而自适应星载 DBF-SAR 在观测距离向地形起伏较大(方位向上较为平稳)的区域时，都要首先利用一部分方位向上采样得到的训练样本对地形特征进行估计，在得到较为准确的信息后，调整每个距离时刻相应的权值矢量及波束指向，使得回波能够始终以高增益被接收，从而提高了系统信噪比。

4　星载 SAR 自适应 DBF 的仿真验证

本节将通过一个星载 SAR 系统来仿真验证本文自适应 DBF 方法的有效性。由于本文方法是在俯仰向上实现的，因此，在系统参数设计时暂且只考虑该方向上相关参数，仿真参数如表 1 所示。

表 1 星载 SAR 系统参数

Tab. 1　Spaceborne SAR simulation parameters

系统参数	参数值
系统载频	9.65 GHz
轨道高度	520 km
发射天线高度	0.5 m
接收天线高度	2.5 m
接收子孔径数	25
天线法线视角	32.25°
方位向采样数	50

同时，我们在 SAR 波束覆盖范围内选择一点目标信源，该信源相应的参数如表 2 所示。

表 2 点目标信源参数

Tab. 2　The target signal source parameters

目标参数	参数值
星下点地距	304.41 km
信源海拔高度	3 km
信源斜距	606.32 km
信噪比	9 dB

通过几何关系的计算，可求得该点目标相应的视角 θ_0 为 30.153° 。若假定地球是理想球体，则在表 2 所示斜距下所对应的视角为 29.627°，与真实值相差 0.526° 。这一角度差异会导致信源回波的接收增益损失约 10 dB。

利用本文的 Capon 空间谱估计法，得到相应的回波空间谱如图 5 所示。从空间谱的峰值位置来估计，信源对应视角所在范围为 30.0° ～ 30.2° 。以 100 次 Monte Carlo 实验进行平均，可得到对该信源回波的 AOA 估计期望值为：

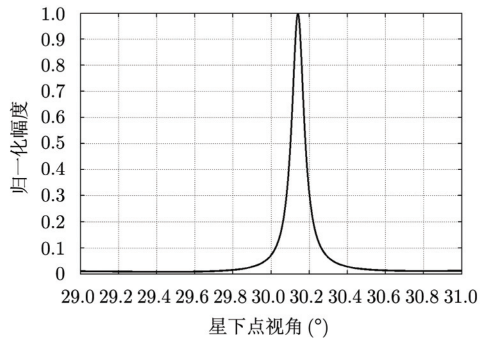


图 5 利用 Capon 法和 50 组训练样本得到的空间谱

Fig. 5　Spatial spectrum obtained by Capon algorithm using 50 training data sets

$$\hat{\theta}_0 = 30.142° \tag{21}$$

均方估计误差为：

$$\mathrm{rmse}(\theta_0) = 0.0042° \tag{22}$$

根据均方误差，得出 Capon 自适应 DBF 下信源回波的增益损失为 5.176×10^{-4} dB 。可看出利用本文方法能够使接收增益基本不发生损失。

最后，分析在星载 SAR 系统参数与信源目标参数变化时，本文方法的有效性。以下将分别从信源位置的高度、信源地距、信噪比和天线尺寸 4 个方面来评估本文方法的鲁棒性。在分析每一参数时，都先假设其它参数不变。

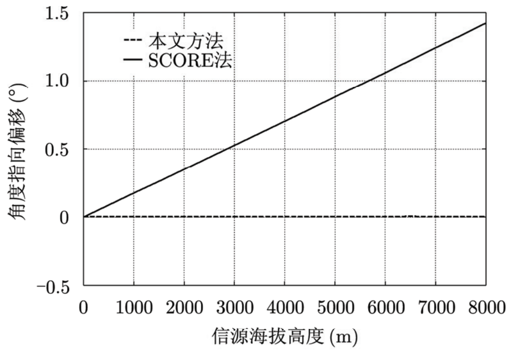
图 6 给出了本文方法与 SCORE 法对于不同的信源高度，所造成的波束指向偏差与接收增益损失。从图 6 中可看出，随着海拔高度的增加，SCORE 法相应的波束指向偏差与增益损失也越大(其中，$h = 4000$ m 恰为接收波束的第 1 零陷位置)。而本文方法能对不同海拔高度的信源都具有较精确的视角估计，因此波束指向偏差很小，同时使得接收增益基本上不发生损失。

接下来在图 7 中给出两种方法对不同地距的信源的波束指向偏差与增益损失。随着地距的增大，SCORE 法的波束指向偏移逐渐变小，同时增益损失也变小；但其最小的增益损失也为 5 dB，而这在实际应用中是不能接受的。本文方法对地距的变化仍具有很强的鲁棒性，在测绘带内都具有较准确的估计特性，能够基本上不出现波束指向偏差与增益损失。

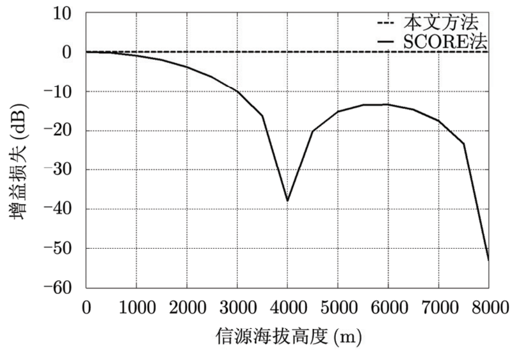
图 8 比较了两种方法在不同信噪比时的性能。SCORE 方法由于只受到信源几何参数的影响，因此其性能不会随信噪比的变化而变化，波束指向偏移和增益损失分别恒定在 0.526° 与 10 dB。而本文方

法在一定程度上会受到信噪比的影响，可看出当信噪比减弱时，波束指向偏移会增加，但即使信噪比为 0 dB 时，本文方法所造成的波束指向误差与增益损失仍非常小，从图 8 中可看出，增益损失基本保持在 0 dB。

最后，分析在天线参数变化时两种方法的性能。图 9 给出了在子孔径数目保持恒定，而子孔径尺寸逐渐增大时两种方法的性能比较。从图 9 中可看出，当子孔径尺寸变大时，两种方法的波束指向偏移基本上保持恒定。但随着天线尺寸的增加，接收波束逐渐变窄，SCORE 法的增益损失也逐渐增大，但本文方法仍能将增益损失保持在很低的水平。



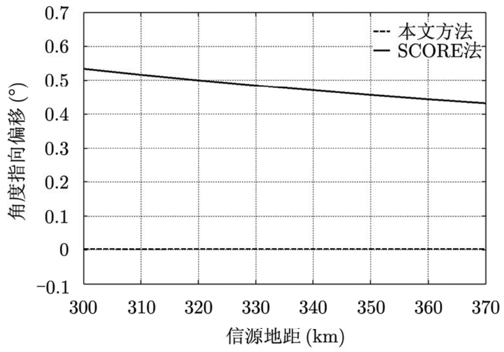
(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing



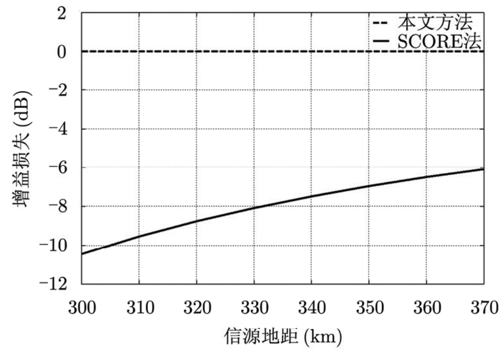
(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 6 两种方法在信源高度变化时所造成的的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 6 Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different target ground ranges



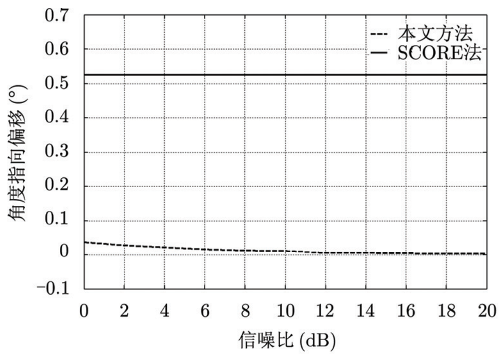
(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing



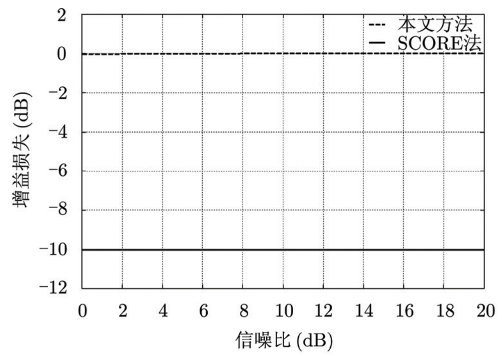
(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 7 两种方法在信源地距变化时所造成的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 7 Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different target ground ranges



(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing



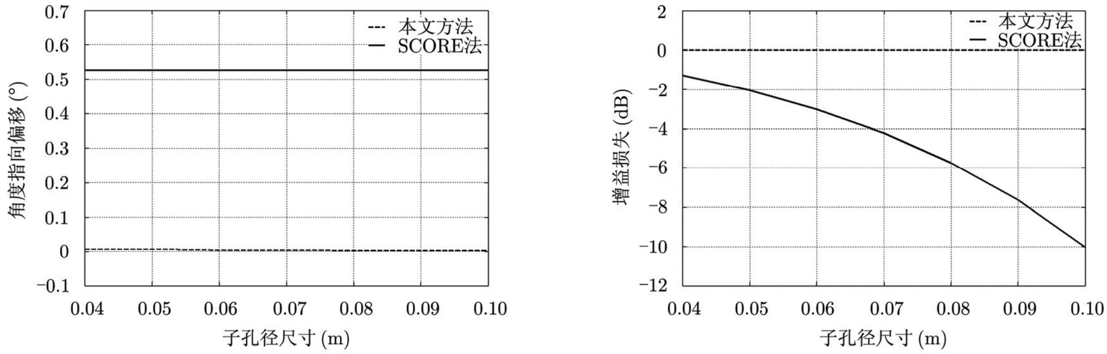
(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 8 两种方法在不同的信噪比下所造成的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 8 Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different SNRs

图 10 给出了在子孔径尺寸保持恒定，而子孔径数目逐渐增加的条件下两种方法的性能比较。可看出在这一情况随子孔径数目的增加，两种方法的波束指向偏移都基本上恒定，但 SCORE 方法的增益损失会变大，这是由于天线尺寸变大而接收波束变窄所导致的。而本文方法仍能够将增益损失维持在 0 dB 左右。

图 11 给出了天线高度保持恒定，而子孔径数目变化时两种方法的性能比较。在此情况下，两种方法的波束指向偏差与增益损失都维持在相对恒定的

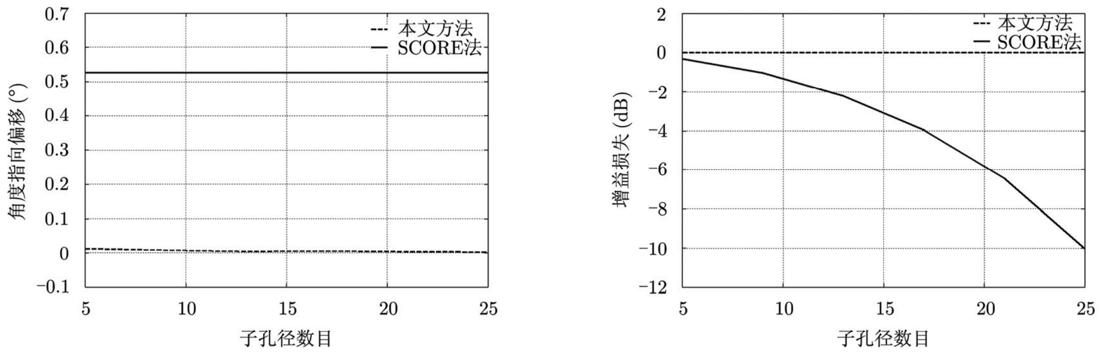


(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing

(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 9 两种方法在不同的俯仰向子孔径尺寸下所造成的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 9　Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different elevation subaperture sizes

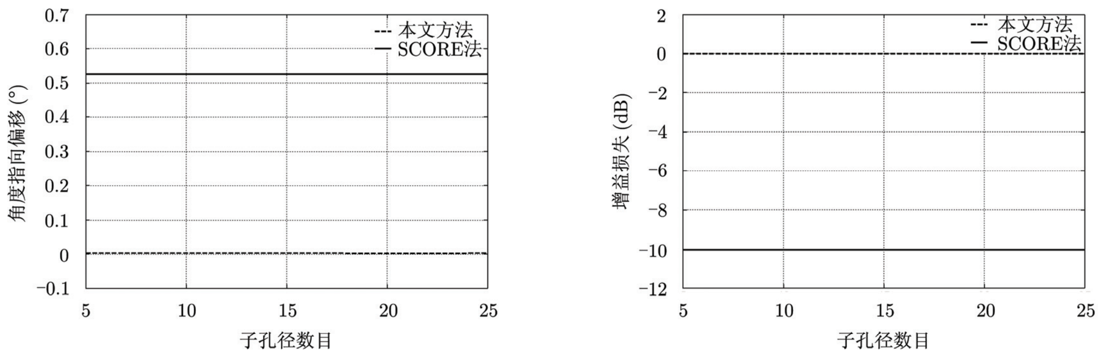


(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing

(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 10 两种方法在不同的俯仰向子孔径数目下所造成的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 10　Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different elevation subaperture numbers



(a) 波束指向偏移
(a) Beam mispointing

(b) 相应的增益损失
(b) Associated gain loss for different target heights

图 11 两种方法在天线高度恒定，而子孔径数目变化时所造成的波束指向偏移与相应的增益损失

Fig. 11　Comparison of two schemes in terms of beam mispointing and associated gain loss for different elevation subaperture numbers under the condition of constant antenna height

水平上。通过比较可看出，本文方法相比于 SCORE 法将接收增益提高了 10 dB，较大程度地改善了系统性能。

通过在系统及目标参数变化的情况下对本文方法的性能分析，可看出该方法对参数敏感度很低，因此具有很好的鲁棒性。这一特性保证了本文方法能够适用于不同的星载 SAR 系统、可应用于对不同特性场景的观测。

5 总结

为解决传统高分辨率宽测绘带星载 SAR 系统的接收波束扫描时出现的波束指向偏差问题，本文提出了一种基于 Capon 空间谱估计的自适应 DBF 方法，并给出了相应的系统实现框图。通过实验仿真，可看出本文方法能够达到比 SCORE 更高的波束指向精度，从而较大程度地减小增益损失，改善系统性能。此外，通过仿真实验，还验证了本文方法具有很强的鲁棒性，因此能够很好地适用于不同星载 SAR 系统观测不同类型场景的情形。

参 考 文 献

[1] Fischer C, Heer C, and Werninghaus R. Development for a high-resolution wide-swath SAR demonstrator[C]. Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 1166–1169.

[2] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multichannel azimuth processing in ScanSAR and TOPS mode operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2994–3008.

[3] Bordoni F, Younis M, Gebert N, *et al*. Performance investigation on the high-resolution wide-swath SAR system with monostatic architecture[C]. Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 1122–1125.

[4] Schaefer C, Heer C, and Ludwig M. X-band demonstrator for receive-only frontend with digital beamforming[C]. Proceedings of European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 1174–1177.

[5] Neronskiy L B, Likhansky S G, Elizavetin I V, *et al*. Phase and amplitude histories model adapted to spaceborne SAR survey[J]. *IEE Proceedings-Radars, Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 184–192.

[6] Suess M and Wiesbeck W. Side-looking synthetic aperture radar system[P]. Euro Patent EP 1241487 A1, 2001.

[7] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding for spaceborne synthetic aperture radar systems[C]. International Waveform Diversity and Design Conference, 2007: 282–286.

[8] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31–46.

[9] Bordoni F, Younis M, Varona M, *et al*. Performance investigation on Scan-On-Receive and adaptive digital beamforming for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar[C]. International ITG Workshop on Smart Antennas, Berlin, Germany, 2009: 114–121.

[10] Varona E M. Adaptive digital beam-forming for high-resolution wide-swath SAR system[D]. Universitat Politecnica. de Catalunya, France, 2009.

[11] Harry L and Van Trees. Optimum Array Processing: Detection, Estimation, and Modulation Theory[M]. New York: Wiley, 2002, Part IV.

作 者 简 介

冯 帆(1984–)，男，工程师，研究方向为高分辨率星载 SAR 系统设计及信号处理技术。

党红杏(1974–)，女，高级工程师，研究方向为高分辨率机载/星载 SAR 成像算法研究。

谭小敏(1980–)，男，高级工程师，研究方向为星载 SAR 系统设计及仿真分析。