

## 一种改进的星载 SAR 俯仰向 DBF 处理技术

冯帆<sup>\*①②</sup> 李世强<sup>①</sup> 禹卫东<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 在星载 SAR 系统的高分辨率宽测绘带成像应用中, 为了增大接收增益, 提高回波的信噪比, 可利用数字波束形成(DBF)技术实现俯仰向多通道接收并处理回波信号。该文分析并推导出了俯仰向通道的响应函数。基于这一结果, 提出了一种时变加权与 FIR 滤波相结合的 DBF 处理方法, 并且给出了系统实现框图。与其它 DBF 方法相比, 该方法能在不增加系统实现复杂度的前提下, 实现对长脉冲的接收增益最大化与系统性能最优化。仿真结果表明, 该方法能够近似达到理论上的系统性能最优值。

**关键词:** 星载合成孔径雷达; 数字波束形成; 时变加权; 有限冲激响应滤波; 接收增益

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)06-1465-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.01176

## An Improved Scheme of Digital Beam-forming on Elevation for Spaceborne SAR

Feng Fan<sup>①②</sup> Li Shi-qiang<sup>①</sup> Yu Wei-dong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In the high-resolution, wide-swath imaging application of spaceborne SAR, the technique of Digital Beam-Forming (DBF) can be employed to receive and process echo data with multiple channels on elevation, increase the receive gain and Signal-to-Noise Ratio(SNR). According to the geometric relationship among these channels, this paper analyzes the impulse response of the elevation channel, and derives the explicit expression of it. Based on this, this paper proposes a DBF processing scheme which combines the time-variant weighting and Finite Impulse Response (FIR) filtering, and further presents the block diagram of system realization. Compared with other DBF methods, this approach can maximize the receive gain and optimize the system performance for the long pulse, without increasing the complexity of the digital beam-former hardware. Simulation results indicate that it allows the system to achieve the theoretically optimal performance.

**Key words:** Spaceborne SAR; Digital Beam-Forming (DBF); Time-variant weighting; Finite Impulse Response (FIR) filtering; Receive gain

### 1 引言

为提高 SAR 图像中的信息量, 高分辨率与宽测绘带成为了星载 SAR 的发展趋势<sup>[1,2]</sup>。若利用常规 SAR 实现高分辨率和宽测绘带, 则需一个在方位向与俯仰向长度都较短的天线, 这会导致天线增益减小, 因而需要很大的发射功率, 在工程上较难实现。为解决这一问题, 文献[3,4]提出了基于俯仰向 DBF 与方位向多波束的高分辨率宽测绘带(High-Resolution Wide-Swath, HRWS)模式。这一模式采用一个小天线来发射脉冲, 而利用一个大的天线阵列来接收回波, 补偿发射增益的损失。接收天线在

方位向上用多个子孔径来增加采样率, 从而可降低系统 PRF, 增大测绘带宽。

在俯仰向上, HRWS 模式利用多通道来形成一个高增益数字波束接收回波。现已提出了两种俯仰向 DBF 处理方法: (1)扫描接收法(SCan-On-Receive, SCORE)<sup>[5,6]</sup>, 对各通道进行时变加权后累加成一一路数据, 该方法在回波接收期间, 能够始终将数字接收波束的波束中心对准脉冲中心所在位置, 增大接收增益。(2)对俯仰向各通道的数据先进行距离压缩处理, 而后针对每个距离门, 各通道的数据进行相位加权后叠加<sup>[7]</sup>。方法(1)实现起来较容易, 俯仰向各通道只需要一个相移器即可。但该方法只适用于脉冲长度较短、脉冲覆盖范围不超过接

2010-11-04 收到, 2011-01-25 改回

\*通信作者: 冯帆 sailingvon@126.com

收波束 3 dB 宽度在地面投影的情形, 这样可认为回波都以最大接收增益被接收。然而为提高发射脉冲占空比与增大接收增益, 会使用较长的脉冲以及俯仰向上高度较高的接收天线, 这时脉冲覆盖范围往往会超出接收波束的 3 dB 宽度, 若不做进一步处理, 会造成接收增益的损失与信噪比的降低。方法(2)首先通过距离压缩将目标弥散在时域空间内的能量压缩到相应的距离门内, 因此不存在方法(1)中脉冲长度限制的问题, 而后对每个距离门做俯仰向多通道的相位加权累加能够取得最优效果, 然而这一方法需要在星上完成距离向压缩, 会极大地增加了星上的处理量与系统实现难度, 目前往往用该方法仿真结果做参考, 来评估其它俯仰向 DBF 算法的性能<sup>[8,9]</sup>。

为解决俯仰向接收并处理长脉冲回波时系统性能优化与实现复杂度之间的矛盾, 本文提出了一种将时变相移加权与时域 FIR 滤波相结合的俯仰向 DBF 处理方法。这一方法在 SCORE 的基础上, 只需在各通道的时变相移器后加一个相应的 FIR 滤波器即可, 各通道的信号通过各自的 FIR 滤波器后直接累加, 合成一路数据。分析以及仿真结果表明, 在不增加星上运算量以及系统实现难度的条件下, 这一方法能够极大地改善系统性能, 并且使其接近最优化。

## 2 俯仰向多通道接收的原始信号模型

本节以点目标为参考, 分析俯仰向各通道接收到原始回波信号模型。设接收天线在俯仰向上具有  $N$  个通道, 通道间的间隔为  $d$ , 以通道 1 所在位置为参考, 接收天线的法线方向星下点视角为  $\alpha_0$ 。法线指向测绘带内的点目标  $P$ , 其对应的最短斜距为  $R_0$ 。

图 1 以点目标  $P$  为例, 给出了俯仰向 DBF 接收回波示意图。随着发射脉冲经过  $P$  点, 形成的数字波束也会扫过  $P$  点。图中显示了当脉冲中心经过  $P$  点时, 所形成的数字波束的波束中心恰好指向  $P$  点。

设星载 SAR 发射线性调频信号为

$$s(\tau) = \text{rect}[\tau/T] \cdot \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2) \quad (1)$$

其中  $f_c$  为载频,  $K_r$  为调频斜率,  $T$  为脉宽,  $\tau$  为距离向快时间变量。

经过  $P$  点反射回后, 通道 1 所接收到的信号为

$$s_1(\tau) = \text{rect}[(\tau - \tau_0)/T] \cdot \exp\{j2\pi f_c (\tau - \tau_0) + j\pi K_r (\tau - \tau_0)^2\} \quad (2)$$

式(2)中的  $\tau_0$  为脉冲发射后, 经  $P$  点反射返回到参考孔径所需的时间。由于星载 SAR 与场景的距离较

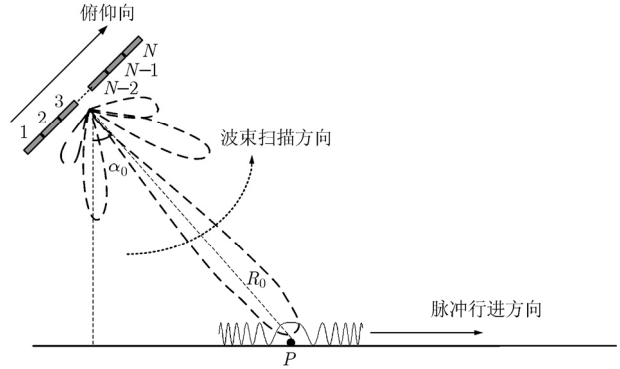


图 1 俯仰向 DBF 接收回波示意图

远, 因此可利用远场近似来得到第  $k$  个俯仰向通道的接收信号  $s_k(\tau)$  为

$$s_k(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k)}{T}\right] \cdot \exp\left\{j2\pi f_c (\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k)) + j\pi K_r (\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k))^2\right\} \quad (3)$$

式(3)中的  $\Delta\tau_k$  为从  $P$  点返回的回波到达参考通道与第  $k$  个通道之间的时间差

$$\Delta\tau_k = \frac{(k-1)}{c} \cdot d \cdot \sin(\theta_0) \quad (4)$$

$\theta_0$  为  $P$  点的法线偏移角  $\theta_0 = \alpha_c - \alpha_0$ 。

利用相移函数  $\exp\{-j2\pi f_c \tau\}$  对各个通道的信号进行下变频后, 第  $k$  个通道的信号表达式为

$$s_k(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k)}{T}\right] \cdot \exp\{-j2\pi f_c (\tau_0 - \Delta\tau_k) + j\pi K_r (\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k))^2\} = \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k)}{T}\right] \cdot \exp(j2\pi f_c \cdot \Delta\tau_k) \cdot \exp\{j\pi K_r (\tau - (\tau_0 - \Delta\tau_k))^2\} \quad (5)$$

式(5)即为第  $k$  个俯仰向通道经下变频后的精确的冲激响应函数表达式。在实际的宽测绘带星载 SAR 应用中, 测绘带内任意位置处的目标回波到达接收天线两端的距离差一般很小, 因此可近似认为俯仰向各通道的冲激函数的包络相同, 差别只在于由各通道到目标的距离差所引起的相位差。因此可将式(5)近似为

$$s_k(\tau) \approx \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_0}{T}\right] \cdot \exp(j2\pi f_c \cdot \Delta\tau_k) \cdot \exp\{j\pi K_r (\tau - \tau_0)^2\} \quad (6)$$

下一节将在式(6)的基础上给出本文的俯仰向 DBF 的处理方法。

### 3 俯仰向 DBF 处理

本文提出的俯仰向 DBF 方法分为两步:第 1 步与 SCORE 模式相同,都是通过时变加权处理,生成一个窄的数字接收波束来追踪回波;第 2 步将在第 1 步的基础上,根据各俯仰向通道的信号加权后的特性,设计时域 FIR 滤波器来做进一步处理,实现各子孔径信号的最优合成。

#### 3.1 时变加权处理

俯仰向 DBF 首先需要对俯仰向各通道接收到的数据进行时变加权,在加权处理中,要根据脉冲中心所在的位置来设计俯仰向各通道的加权系数,使得形成的接收波束中心时刻指向脉冲中心(如图 1 所示)。由于脉冲中心所在的位置是时变量,因此各子孔径的加权系数也为时变量。以点目标  $P$  为参考,设在接收  $P$  点回波的过程中,脉冲中心位置的法线偏移角为  $\theta(\tau)$ 。为满足波束中心指向脉冲中心的条件,第  $k$  个俯仰向通道的时变加权系数  $w_k(\tau)$  为

$$w_k(\tau) = \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}\sin[\theta(\tau)]\right\} \quad (7)$$

利用加权系数对返回的信号进行加权处理后,第  $k$  个通道的信号变为

$$s'_k(\tau) = \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_0}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - \tau_0)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}[\sin(\theta(\tau)) - \sin(\theta_0)]\right\} \quad (8)$$

由于测绘带内任意位置处的法线偏移角都非常小,因此可在测绘带内满足  $\sin(\theta) \approx \theta$ , 将该近似表达式代入到式(8)中可得

$$s'_k(\tau) \approx \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_0}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - \tau_0)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}[\theta(\tau) - \theta_0]\right\} \quad (9)$$

根据文献[10],在星载 SAR 的测绘带中,不同位置中的法线偏移角与其相应的回波时间存在着近似的线性关系,即

$$\theta(\tau) \approx \left.\frac{\partial\theta(\tau)}{\partial\tau}\right|_{\tau=\tau_c} (\tau - \tau_c) \quad (10)$$

式(10)中的  $\partial\theta(\tau)/\partial\tau|_{\tau=\tau_c}$  为函数  $\theta(\tau)$  在测绘带中心处对快时间  $\tau$  的一阶偏导值,  $\tau_c$  为场景中心对应的回波时间。将式(10)代入到式(9),可得到俯仰向第  $k$  个通道接收到的  $P$  点目标的回波经下变频、A/D 采样、时变加权后变为

$$s'_k(\tau | \tau_0) \approx \exp(-j2\pi f_c \tau_0) \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - \tau_0}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - \tau_0)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}\frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau}(\tau - \tau_0)\right\} \quad (11)$$

通过式(11),可以将第  $k$  个俯仰向通道的冲激函数表示为

$$h_k(\tau) \approx \exp\left\{-j4\pi\frac{R}{c}f_c\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R/c}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - 2R/c)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)d}{\lambda}\frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau}(\tau - 2R/c)\right\} \quad (12)$$

对于真实的测绘场景目标,第  $k$  个俯仰向通道的信号模型  $s_{\text{scene-}k}(\tau)$  为式(12)与地面反射率  $g(\tau)$  的卷积

$$s_{\text{scene-}k}(\tau) = h_k(\tau) \otimes g(\tau) \quad (13)$$

#### 3.2 FIR 滤波处理

通过式(12)可看出,俯仰向各通道的冲激函数之间存在着相位偏移,因此若在完成对俯仰向各通道的信号时变加权后直接合成,会因各通道的冲激函数之间的相干性下降而导致增益损失。本节首先分析一下俯仰向各通道的场景回波信号模型式(13)的频域特性,并据此来设计处理方法。

根据 Fourier 变换的性质,场景回波信号的频谱  $S_{\text{scene-}k}(f)$  等于冲激响应函数的频谱  $H_k(f)$  与地表反射率的频谱  $G(f)$  之积

$$S_{\text{scene-}k}(f) = H_k(f)G(f) \quad (14)$$

令  $f_0 = \frac{d}{\lambda}\frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau}$ , 通过线性调频信号的频域变换特性以及 Fourier 变换的性质,可得出  $H_k(f)$  如下所示

$$H_k(f) = \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}(f_c + f)R\right\} \cdot \text{rect}\left[\frac{f + (k-1)f_0}{K_r T}\right] \cdot \exp\left\{-j\pi\frac{f^2}{K_r}\right\} \cdot \exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)f_0}{K_r}f\right\} \cdot \exp\left\{-j\pi\frac{1}{K_r}[(k-1)f_0]^2\right\} \quad (15)$$

通过式(14),式(15)可看出,各通道接收到的场景回波信号的频谱之间具有一定的频谱偏移量  $(k-1)f_0$ 。同时,不同通道接收到回波的频谱带有

不同的线性相位因子  $\exp\left\{-j2\pi\frac{(k-1)f_0}{K_r}f\right\}$  和不同的

的复常数  $\exp\left\{-j\pi\frac{1}{K_r}[(k-1)f_0]^2\right\}$ 。通道间的频谱偏

移量  $(k-1)f_0$  相比于线性调频信号带宽  $KT$  非常小, 对最后的距离向分辨率几乎不产生影响, 因此可忽略掉这一项带来的差别。此外, 由于线性调频斜率  $K$  非常大, 使复常数的相位基本上趋为 0, 可近似认为各子孔径的复常数都为 1。因此, 为使各通道的信号能够相干合成, 最大化接收增益, 只需要消除掉线性相位项对各通道信号频谱的影响。

经以上分析, 可以看出, 在第  $k$  子孔径完成对回波信号的时变加权后, 只需要让回波继续通过一个系统函数为

$$H'_k(f) = \exp\left\{j2\pi\frac{(k-1)f_0}{K_r}f\right\} \quad (16)$$

的滤波器, 就能使得各个子孔径的信号具有最大相干性, 而后就可进行合成。由式(16)可得到这一系统函数所对应的时域 FIR 滤波器为一延时器, 其单位冲激响应为

$$h'_k(\tau) = \delta\left(\tau + \frac{(k-1)f_0}{K_r}\right) \quad (17)$$

相应的信号延迟量  $D_k$  为

$$D_k = -\frac{k-1}{K_r}f_0 \quad (18)$$

最后, 我们给出在星载宽测绘带 SAR 系统中的俯仰向 DBF 实现框图。

在图 2 中, 各俯仰向通道接收到的信号首先经过下变频与 A/D 采样处理, 将射频模拟信号变为基带数字信号, 再进入系统的 DBF 模块。首先, 各通道的基带信号先被式(7)所示的时变移相器加权, 而后经过式(18)所示的延时器, 最后将各路原始数据合成一路数据, 实现各路信号的最大相干合成。

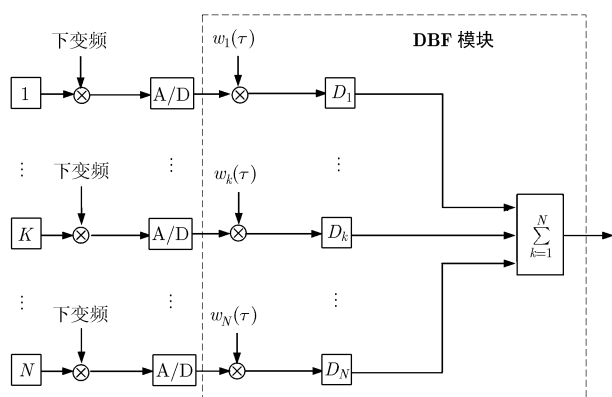


图 2 宽测绘带星载 SAR 的俯仰向 DBF 实现框图

#### 4 DBF 处理方法的仿真实验

本节将通过一个宽测绘带星载 SAR 系统来验证本文提出的俯仰向 DBF 处理回波方法的性能。SAR 系统的波位选择如图 3 所示。

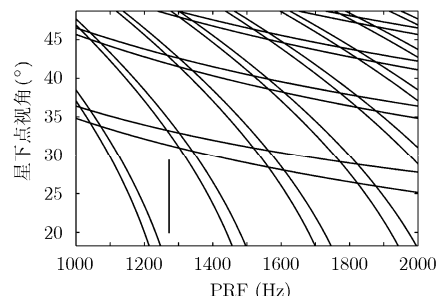


图 3 系统波位选择图

测绘带选择在视角为  $[20^\circ, 29.1^\circ]$  的范围内, 这一视角所对应的测绘带宽为 115 km, 系统的 PRF 为 1275 Hz。由于分析系统的俯仰向 DBF 性能, 现只考虑俯仰向系统参数。系统参数如表 1 所示。

表 1 星载宽幅 SAR 的俯仰向系统参数

|         |                         |
|---------|-------------------------|
| 信号带宽    | 30 MHz                  |
| 信号脉宽    | 50 $\mu$ s              |
| 系统载频    | 9.65 GHz                |
| 轨道高度    | 567 km                  |
| 测绘带视角范围 | $20^\circ - 29.1^\circ$ |
| 测绘带宽    | 115 km                  |
| 发射天线高度  | 0.2 m                   |
| 接收天线高度  | 2.5 m                   |
| 接收子孔径数目 | 25                      |

为了评估本文 DBF 算法的性能, 我们将选取 3 种方法得出的信号进行对比, 第 1 种是 SCORE 方法, 即经过时变加权后直接合成的信号  $p_1(\tau)$ ; 第 2 种是本文的 DBF 方法获得的信号  $p_2(\tau)$ ; 第 3 种是俯仰向各通道完全相干合成的理想信号  $p_{\text{ref}}(\tau)$

$$p_{\text{ref}}(\tau) = N s_{\text{ref}}(\tau) \quad (19)$$

$N$  为俯仰向通道数,  $s_{\text{ref}}(\tau)$  为参考孔径接收到的信号。

首先, 对比和分析 3 种处理方法得到的点目标回波信号以及压缩成像结果。图 4 给出了 3 种方法对位于场景中心点目标的回波信号实部。

通过图 4 可以看出, SCORE 方法获得的点目标回波具有严重的幅度调制现象。在回波时间的中

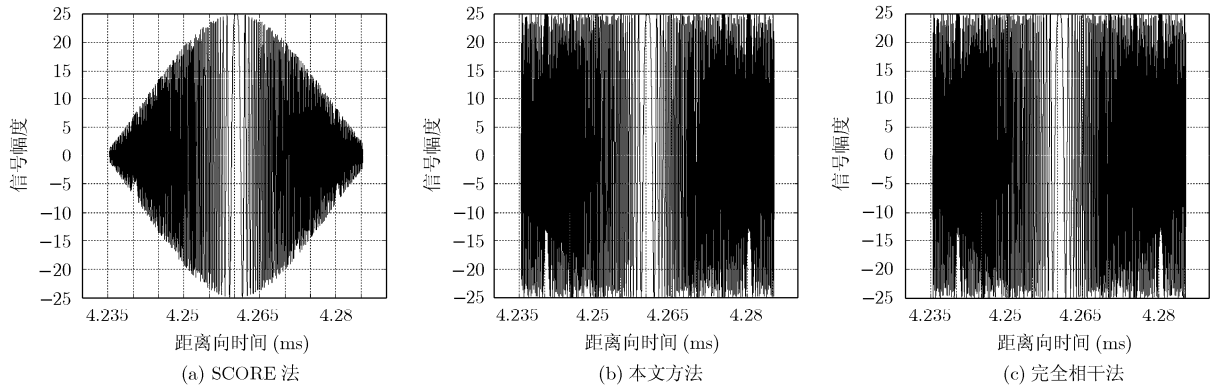


图4 3种方法得到的场景中心点目标回波的实部

心时刻，即脉冲中心通过目标时，波束中心恰好指向点目标，因此其回波幅度也达到最大。而随着回波时间偏离中心时刻，点目标逐渐偏离波束中心，回波增益也逐渐减小。而利用本文的方法，在SCORE的基础上对俯仰向各通道的信号进行进一步FIR滤波，消除影响它们之间相干性的线性相位因子后再合成，可看出其效果要明显优于SCORE法，回波信号的幅度不再受调制，在信号接收期间基本上具有一致性。同时，我们也可以看出，本文方法获得的回波信号幅度与完全相干所获得的信号幅度基本相同。

接下来再对比3种方法得到信号的距离压缩结果，以参考信号 $p_{ref}(\tau)$ 压缩结果的峰值做归一化处理，图5给出了相应的压缩结果。从图中可看出，与完全相干合成的回波信号压缩结果相比，SCORE方法使像点的幅度减弱约4 dB，而且由于原始信号受到幅度调制，主瓣被展宽，峰值旁瓣比下降。而本文方法获得的像点幅度基本上无减弱，同时主瓣也未被展宽。

表2给出了这3种方法的性能比较，可看出本文方法较SCORE法对系统性能有了较大的改进。针对场景中心的点目标，将其回波的平均接收增益提高了约3 dB，最后成像点的幅度提高约4 dB。与此同时，通过与完全相干合成的信号相比也可看出，本文方法使得系统性能已趋近于最优化。

最后，进一步观察该方法针对整个测绘带回波的性能。

图6给出了SCORE法与本文方法在整个测绘带内的性能（以完全相干合成的回波信号性能参数做归一化处理）。首先可看出，SCORE方法在测绘带远端的性能优于测绘带近端的性能，这是由于相比于测绘带近端的目标，系统在接收远端目标的回波时，SCORE所形成的接收波束扫过的角度较小，回波幅度调制的影响不大，因此远端目标回波的归一化增益与归一化像点幅度较近端目标要大。同时，还可看出本文方法在场景中心部分的性能要优于其在两端的性能，原因在于我们利用式(10)来线性拟合回波位置法线偏移角与回波时间的关系时，在场景中心部分误差较小，而在两端误差较大。因此式(16)所表示的FIR滤波器能够很好地消除各孔径接收到的场景中心回波中的非相干因子，但对于测绘带两端的回波，会留下剩余误差，从而影响系统性能。最后，通过对比两种方法的性能可看出，本文方法相比于完全相干合成，在整个测绘带内增益损失不会大于0.5 dB，像点幅度损失不会大于-1.5 dB，比SCORE法有着较大程度的性能改善。

### 5 结论

为了提高星载宽幅SAR的回波接收增益，改善系统性能，本文提出了一种将时变加权与FIR滤波相结合的俯仰向DBF方法。首先以点目标为参考得到俯仰向各孔径经过时变加权后的等效冲激响应，根据这一冲激响应分析了各子孔径接收到的场景回波时域和频域特性，通过各通道场景回波的频谱差别，设计了相应的滤波器系统函数，得到了FIR结构的滤波器。通过仿真可看出，本文方法既能够很好地改善原SCORE方法的性能，同时又逼近了系统最优性能，并易于工程化实现。

表2 俯仰向DBF对点目标回波处理的性能比较

|              | SCORE法  | 本文方法    | 完全相干合成法 |
|--------------|---------|---------|---------|
| 平均接收增益损失(dB) | -3.1461 | -0.0031 | 0       |
| 像点幅度损失(dB)   | -4.0413 | -0.002  | 0       |

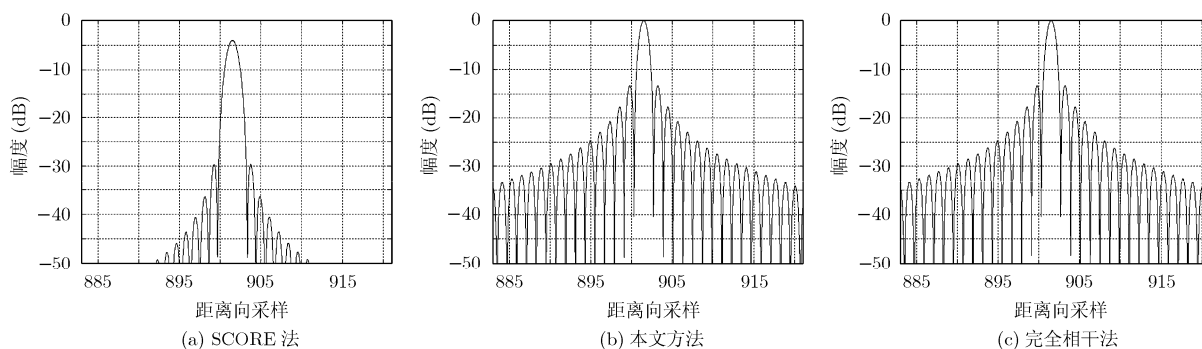


图 5 3 种方法得到的点目标回波的距离压缩结果

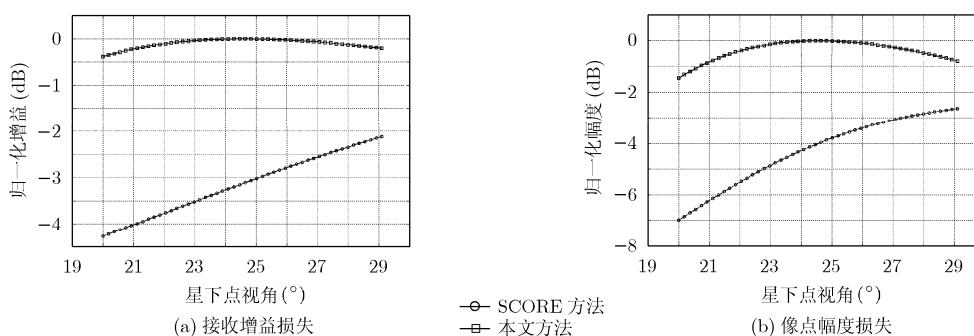


图 6 SCORE 与本文方法在整个测绘带内的性能比较

## 参考文献

- [1] Keydel W. Perspective and visions for future SAR system. *IEE Proceedings of Radar Sonar and Navigation*, 2003, 150(3): 97-103.
- [2] Moreira A and Krieger G. Spaceborne Synthetic Aperture Radar: state of the art and future developments. Euro Microwave Conference, Munich, Germany, 2003: 104-111.
- [3] Fisher C, Heer C, Krieger G, and Werninghaus R. A high resolution wide swath SAR. Proc. EUSAR, Dresden, Germany, 2006: 156-159.
- [4] Younis M, Huber S, Patyuchenko A, and Krieger G. Performance comparison of reflector and planar-antenna based digital beamforming SAR. Proc. IGARSS, Cape Town, South Africa, 2009: 211-215.
- [5] Suess M, Zubler M, and Zahn R. Performance investigation on high resolution wide swath SAR system. Proc. EUSAR, Cologne, Germany, 2002: 49-53.
- [6] Bordoni F, Younis M, Makhoul V, and Krieger G. Adaptive scan-on-receive based on spatial spectral estimation for high-resolution wide-swath SAR. Proc. IGARSS, Cape Town, South Africa, 2009: 431-435.
- [7] Varona E M. Adaptive digital beam-forming for high-resolution wide-swath SAR system. [MA. dissertation], Universitat Politecnica de Catalunya, France, 2009.
- [8] Huber S, Younis M, Patyuchenko A, and Krieger G. A novel digital beam-forming concept for spaceborne reflector SAR system. Proc. EURAD, Rome, Italy, 2009: 238-241.
- [9] Huber S, Younis M, Patyuchenko A, and Krieger G. Digital beam-forming techniques for spaceborne reflector SAR systems. Proc. EUSAR, Aachen, Germany, 2010: 962-965.
- [10] Suess M and Wiesbeck W. Side-looking synthetic aperture radar system. Euro Patent EP 1241 487 A1, 2001.

冯帆: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为高分辨率宽测绘带星载 SAR 设计与信号处理.

李世强: 男, 1965年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为分布式星载 SAR 系统与干涉 SAR 系统设计以及信号处理.

禹卫东: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为星载高分辨率宽测绘带与多发多收 SAR 的系统设计与信号处理.