

## 一种多维编码全极化 SAR 回波分离改进方法

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:**通过依次发射 H 与 V 极化脉冲和双极化通道接收回波,多维编码全极化 SAR 能在一个脉冲重复间隔(PRI)内获得所有极化分量。然而,该模式下不同的极化回波会发生混叠,因此需要将它们有效分离开。该文提出了一种将 FIR 时域滤波处理嵌入到零点指向波束形成器的新型俯仰向数字波束形成(DBF)方法来分离回波。与传统零点指向法相比,该文方法中的 FIR 滤波能够解决脉冲空域延展所带来的问题,从而取得更好的分离效果。文中给出了详细的信号处理流程及新型波束形成器系统框图。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:**星载合成孔径雷达;全极化矩阵;多维编码;数字波束形成;回波分离

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0172-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00279

## An Improved Approach to Separating Echoes in Multidimensional Waveform Encoding Fully-polarimetric 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:** By emitting H- and V-polarized pulses adjacently and receiving echoes with duo-polarized channels, multidimensional waveform encoding fully-polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) can obtain all polarimetric components in one Pulse Repetition Interval (PRI). However, different polarized echoes will overlap under this mode, and thus should be separated effectively to realize fully-polarimetric remote sensing. To solve this problem, this paper proposes a new elevation Digital BeamForming (DBF) approach, which systematically integrates Finite Impulse Response (FIR) filters into the null-steering beamformer, to separate echoes. Compared with conventional null-steering beamforming, FIR filters in the approach can deal with the issue of pulse extension well, thereby achieving better separation results. In the paper, detailed signal processing procedures, along with the block diagram of the new DBF, are provided. Simulation results are given to demonstrate the validation of the proposed approach.

**Key words:** Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR); Fully-polarimetric matrix; Multidimensional waveform encoding; Digital BeamForming (DBF); Echo separation

### 1 引言

多极化信息能够提高后期 SAR 图像处理中特征参数提取<sup>[1]</sup>、地物分类<sup>[2]</sup>、目标识别<sup>[3]</sup>的能力。因此,该技术被广泛地应用到灾害监测、植被高度提取、海洋信息获取以及城市规划等任务中<sup>[4-6]</sup>,并成为星载 SAR 未来发展的一个重要方向<sup>[7]</sup>。

目前在轨的全极化星载 SAR 系统,如 ALOS-PALSAR, TerraSAR-X 和 RADARSAT-2 等<sup>[8-10]</sup>,都是采用极化时分(Polarization Time-Division, PTD)<sup>[11]</sup>方式来实现全极化。它要求脉冲重复频率(PRF)为单极化 SAR 的两倍以避免方位模糊比恶

化,这会限制距离向测绘带宽度,不利于宽幅成像。为解决这一问题,文献[12]提出了一种将多维编码与数字波束形成(DBF)接收技术相结合的新型全极化 SAR 模式,并有作者在此基础上给出一种“空分+码分”的方法<sup>[13]</sup>来分离此模式下不同的极化回波。然而这一方法却存在以下两个问题:(1)未考虑脉冲的空域延展性,导致分离度较低。(2)采用正负调频脉冲只适用于分离点目标的回波信号<sup>[14]</sup>。

为进一步提高不同极化回波的分离度,本文提出了一种将零点指向空域滤波与 FIR 时域滤波相结合的新型俯仰向 DBF 方法。与传统空域滤波法相比,本文方法能够提高信号干扰比,达到增强分离度的目的。

2011-03-27 收到, 2011-09-14 改回

\*通信作者: 冯帆 sailingvon@126.com

## 2 多维编码的全极化星载 SAR 实现方案

以PTD全极化为参考,图1给出了多维编码全极化模式的脉冲发射示意图。

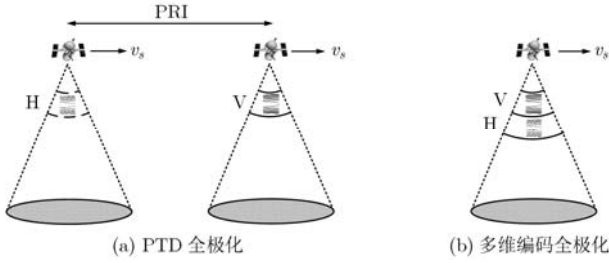


图1 脉冲发射示意图

在天线结构上,多维编码全极化 SAR 采用是2维相控阵天线。天线在方位向上被分为 H 与 V 两个极化通道;每种通道在俯仰向上都有  $N_e$  个接收子孔径。在脉冲发射期间,两种极化通道依次发射相应的极化脉冲,经由地表散射后返回,被两种极化通道接收。这样, H 通道中就包含 HV 与 HH 两种极化分量;而 V 极化通道中包含另两种极化分量。

然而在这一模式下,每种极化通道内的不同极化分量会发生混叠。图2以一幅场景为例,给出无任何预处理时得到的原始回波(图中的  $T_d$  为两种极化子脉冲的发射时延)。从图中可看出,在某一区间范围里,两种极化回波混叠在一起。因此,需将它们有效地分离开以实现全极化。

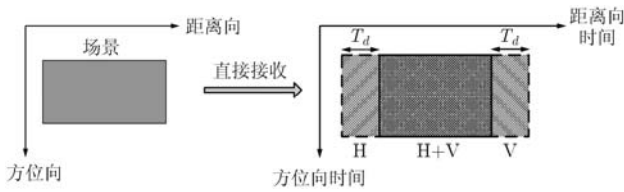


图2 无预处理时得到的原始回波示意图

## 3 俯仰向 DBF 分离不同极化回波

### 3.1 俯仰向 DBF 分离原理

由于两种极化脉冲是依次发射的,因此在任意时刻,两个脉冲的回波来自不同的地表区域,具有不同的波达角(Angle of Arrival, AOA)。因此可通过俯仰向上两个具有零点指向(null-steering)能力的数字子波束来分离它们<sup>[15]</sup>(如图3所示)。

设在  $\tau$  时刻 H 极化与 V 极化回波对应的波达角分别为  $\theta_1(\tau)$  与  $\theta_2(\tau)$ , 俯仰向子孔径间隔为  $d$ , 则这

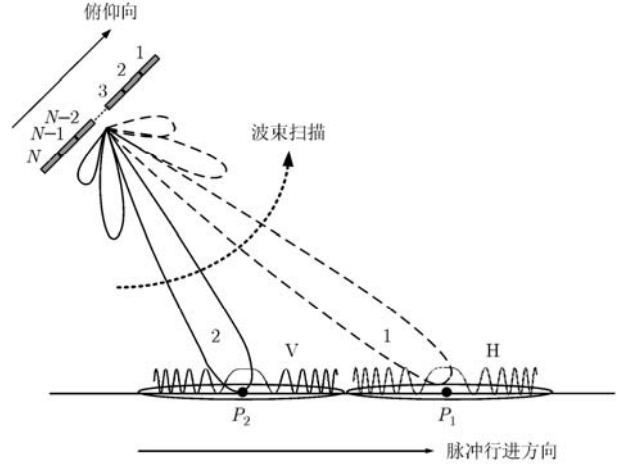


图3 俯仰向数字波束分离不同极化回波

两种极化回波的俯仰向导向矢量矩阵  $\mathbf{A}(\tau)$  为

$$\mathbf{A}(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}d \cdot \sin\theta_1(\tau)\right\} \\ 1 & \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}d \cdot \sin\theta_2(\tau)\right\} \\ \dots & \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}(N_e - 1)d \cdot \sin\theta_1(\tau)\right\} \\ \dots & \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda}(N_e - 1)d \cdot \sin\theta_2(\tau)\right\} \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据传统的零点指向波束形成法(null-steering beamforming), 形成子波束  $i(i = 1, 2)$  来提取出第  $i$  个子脉冲回波的加权矢量  $\mathbf{w}_i$  为

$$\mathbf{w}_i^H = \mathbf{A}^H \left( \frac{\mathbf{A}\mathbf{A}^H}{N_e} \right)^{-1} \mathbf{e}_i^H \quad (2)$$

符号  $(\cdot)^H$  表示共轭转置。下一节将指出传统零点指向法无法达到较高分离度的原因, 并给出相应的改进方案。

### 3.2 俯仰向 DBF 中的 FIR 时域滤波

在上节分离原理介绍中, 都是以脉冲中心位置来代表脉冲位置的。因此, 若直接利用式(2)的加权矢量进行处理, 则只能在脉冲中心处形成相应的峰值增益或深度零陷, 而其它区域无法获得相同的接收增益, 这将致使分离度很低。

为解决该问题, 我们首先将式(2)拆分为以下两项

$$\mathbf{w}_i^H = \left[ \mathbf{A}^H \right] \left[ \left( \frac{\mathbf{A}\mathbf{A}^H}{N_e} \right)^{-1} \mathbf{e}_i^H \right], \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

通过式(3)可看出, 传统零陷空域滤波可分为两步: 第 1 步是  $\mathbf{A}^H$  的两列矢量对原始回波进行加权后合成; 第 2 步是这两路信号经矢量  $\left[ \left( \frac{\mathbf{A}\mathbf{A}^H}{N_e} \right)^{-1} \mathbf{e}_i^H \right]$  处理,

由此分离出第  $i$  个子脉冲的回波信号。

现分析回波经第 1 步  $\mathbf{A}^H$  处理后的信号特征。在多维编码全极化 SAR 模式中, H 与 V 极化脉冲为时频相同的 LFM 脉冲。两者的表达式分别为

$$s_H(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau}{T}\right] \exp\{j2\pi f_c \tau + j\pi K_r \tau^2\} \quad (4a)$$

$$s_V(\tau) = \text{rect}\left[\frac{\tau - T_d}{T}\right] \cdot \exp\{j2\pi f_c (\tau - T_d) + j\pi K_r (\tau - T_d)^2\} \quad (4b)$$

在场景中设定两个点目标  $P_1$  与  $P_2$  (如图 3 所示), 两者斜距  $R_1$  与  $R_2$  满足

$$\frac{2R_1}{c} = \frac{2R_2}{c} + T_d \quad (5)$$

则  $P_1$  的 H 极化回波与  $P_2$  的 V 极化回波会重叠在一起。设  $P_1$  与  $P_2$  的法线偏移角分别为  $\theta_1$  与  $\theta_2$ , H 与 V 极化脉冲的中心位置法线偏移角为  $\theta_1(\tau)$  与  $\theta_2(\tau)$ 。在俯仰向第  $k$  个通道中,  $P_i$  ( $i=1,2$ ) 的回波信号经过  $\mathbf{A}^H$  的第  $j$  列 ( $j=1,2$ ) 相应的加权系数加权后可表示为

$$s_{ijk}(\tau) = \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R_1\right\} \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1/c}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r [\tau - 2R_1/c]^2\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\} \quad (6)$$

其中  $k \in [1, N_e]$ , 经过拆分合并项处理, 式(6)变为

$$s_{ijk}(\tau) = \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R_1\right\} \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1/c}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - 2R_1/c)^2\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i) - \sin(\theta_i(\tau))]\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\} \quad (7)$$

根据文献[16]的结论, 在星载宽幅 SAR 系统中, 回波位置的法线偏移角  $\theta$  与相应的回波时间  $\tau$  存在以下近似的线性关系:

$$\theta(\tau) \approx \frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau} (\tau - \tau_c) \quad (8)$$

式(8)中的  $\partial\theta(\tau_c)/\partial\tau$  为函数  $\theta(\tau)$  在回波窗的中心时刻  $\tau_c$  对时间变量  $\tau$  的一阶偏导值。利用这一关系, 可将  $s_{ijk}(\tau)$  近似为

$$s_{ijk}(\tau) \approx \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R_1\right\} \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R_1/c}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r (\tau - 2R_1/c)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d\frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau} \left(\tau - \frac{2R_1}{c}\right)\right\} \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\} \quad (9)$$

通过式(9)可以看出, 两种混叠的极化回波之间唯一差别就在于最后一个指数项。同时由式(9)还可推导得出第  $i$  个子脉冲的场景回波信号表达式为

$$s_{ijk}(\tau) \approx [h_k(\tau) \otimes g(\tau)] \cdot \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\} \quad (10)$$

式(10)中  $\otimes$  为卷积符号,  $g(\tau)$  为地面散射系数函数,  $h_k(\tau)$  为

$$h_k(\tau) = \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R\right\} \text{rect}\left[\frac{\tau - 2R/c}{T}\right] \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(\tau - \frac{2R}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d\frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau} \left(\tau - \frac{2R}{c}\right)\right\} \quad (11)$$

根据式(1)所示的导向矢量矩阵  $\mathbf{A}$ , 我们得出矩阵  $\mathbf{A}\mathbf{A}^H$  中位于第  $(i, j)$  项为

$$\sum_{k=1}^N \exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\}$$

可看出式(10)中的指数项是该项中的一个元素。因此, 为能够在经过  $\mathbf{w}_i^H$  的第 2 部分处理后取得最佳分离效果, 在合并式(10)所示的俯仰向子孔径信号前, 需要消除由  $h_k(\tau) \otimes g(\tau)$  所引起的差别, 以保证它们能够相干叠加。

通过式(10)和式(11), 可推导出  $s_{ijk}(\tau)$  的频谱表达式为

$$S_{ijk}(f) = [H_k(f) \cdot G(f)] \otimes F_{ijk}(f) \quad (12)$$

式(12)中  $H_k(f)$ ,  $G(f)$  与  $F_{ijk}(f)$  分别为  $h_k(\tau)$ ,  $g(\tau)$  以及  $\exp\left\{j\frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d[\sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau))]\right\}$  的频

谱表达式。令  $f_0 = \frac{d}{\lambda} \frac{\partial\theta(\tau_c)}{\partial\tau}$ , 利用线性调频信号的频谱表达式以及 Fourier 变换的性质, 可得出  $H_k(f)$  如下所示:

$$H_k(f) \approx \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c} (f_c + f)R\right\} \text{rect}\left[\frac{f}{K_r T}\right] \cdot \exp\left\{-j\pi \frac{f^2}{K_r}\right\} \exp\left\{-j2\pi \frac{(k-1)f_0}{K_r} \cdot f\right\} \quad (13)$$

通过式(13)可看出, 各通道的  $h_k(\tau) \otimes g(\tau)$  项之间的差别是由式(13)最后的指数项所引起。因此, 在合并俯仰向各通道信号前, 我们需要补偿掉该项。

在俯仰向子孔径  $k$  接收到的回波信号经第 1 步  $\mathbf{A}^H$  的加权处理后, 令其通过一个系统函数为

$$H'_k(f) = \exp\left\{j2\pi \frac{(k-1)f_0}{K_r} f\right\} \quad (14)$$

的滤波器，这时信号的频谱将变为

$$S'_{ijk}(f) = S_{ijk}(f)H'_k(f) = [H'_k(f)H_k(f)G(f)] \otimes F_{ijk}(f) \quad (15)$$

由式(13)与式(14)可得到  $S'_{ijk}(f)$  的近似表达式

$$S'_{ijk}(f) \approx \left\{ \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} (f_c + f) R \right\} \text{rect} \left[ \frac{f}{K_r T} \right] \cdot \exp \left\{ -j\pi \frac{f^2}{K_r} \right\} G(f) \right\} \otimes F_{ijk}(f) \quad (16)$$

再由式(16)可得到相应的信号时域形式  $s'_{ijk}(\tau)$  为

$$s'_{ijk}(\tau) = [h(\tau) \otimes g(\tau)] \cdot \exp \left\{ j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d \left[ \sin(\theta_i(\tau)) - \sin(\theta_j(\tau)) \right] \right\} \quad (17)$$

通过式(17)可看出，经补偿处理后，俯仰向各通道信号间的差别只在于第 2 项的相位因子，这时即可将俯仰向各通道信号进行合并后输出。

由式(14)所示的滤波器系统函数，我们能够得出相应的 FIR 滤波器冲激响应为

$$h'_k(\tau) = \delta \left( \tau + \frac{(k-1)f_0}{K_r} \right) \quad (18)$$

这一滤波器对应一个延迟量为

$$D_k = -\frac{(k-1)f_0}{K_r} \quad (19)$$

的信号时延处理。

### 3.3 俯仰向 DBF 系统实现

最后以 H 极化通道为例，图 4 为本文方法分离不同极化回波的系统实现框图（图中权值的下标表明了其在相应矩阵中的所在位置）。

## 4 俯仰向 DBF 处理仿真验证

本节通过一个星载 SAR 系统，来验证本文方法在分离不同极化回波时的有效性。卫星轨道高度为 576 km，极化子脉冲的脉宽为 50 μs，带宽为 30 MHz，系统波位图如图 5 所示。

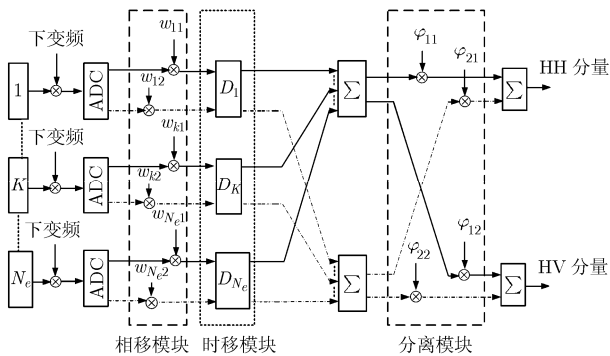


图 4 多维编码全极化 SAR 的俯仰向 DBF 分离回波系统框图

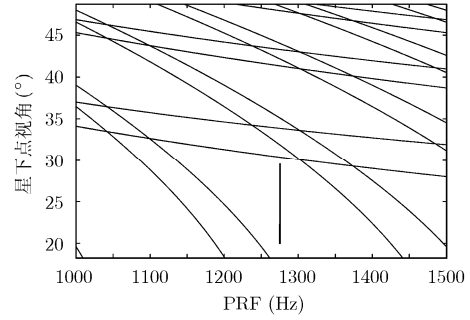


图 5 多维编码全极化 SAR 的系统波位图

测绘带选择在  $[20^\circ, 29.1^\circ]$  的视角范围内，该范围对应的测绘带宽为 115 km，系统 PRF 选为 1275 Hz。表 1 列出了仿真参数。

表 1 全极化星载 SAR 的系统参数

子脉冲带宽	30 MHz	视角范围	$20^\circ - 29.1^\circ$
子脉冲脉宽	50 μs	发射天线高度	0.2 m
系统载频	9.65 GHz	接收天线高度	2.5 m
轨道高度	567 km	子孔径数目	25

以下将以子波束 1 为例，来观察本文方法的分离效果。为对比起见，将同时给出传统零点指向法形成的子波束 1 的分离结果。

首先对比两种方法对点目标回波的分离结果。在测绘带中取两个点目标  $P_1$  与  $P_2$ ， $P_1$  位于场景中心， $P_2$  的斜距  $R_2$  与  $P_1$  的斜距  $R_1$  满足式(5)，因此  $P_1$  的 H 极化回波与  $P_2$  的 V 极化回波在时域上混叠。图 6 给出在回波接收期间，两种方法形成的波束 1 对两种极化回波的接收增益（以各通道信号完全相干合成时对应的增益做归一化处理）。根据结果可看出，传统零点指向法只有在中心时刻才对 H 极化回波有最大增益，在两侧有较大的衰减；此外，该方法对 V 极化回波的整体抑制也不是很强。而本文方法形成的波束 1 能够始终以最大增益来接收 H 极化回波，同时能够降低 V 极化回波的接收增益，从而提高干扰抑制程度。

在用子波束 2 分离得到 V 极化回波时，本文方法也会有类似的性能改善。表 2 给出这两种方法形成的子波束 1 与子波束 2 对两种极化回波的平均接收增益（以完全相干合成时对应的增益归一化）。计算结果表明，本文方法有效提高了有用与干扰信号之间的接收增益隔离度。

接下来对比两种方法对应的距离压缩结果。由于  $P_1$  的 H 极化回波与  $P_2$  的 V 极化回波是重叠的，

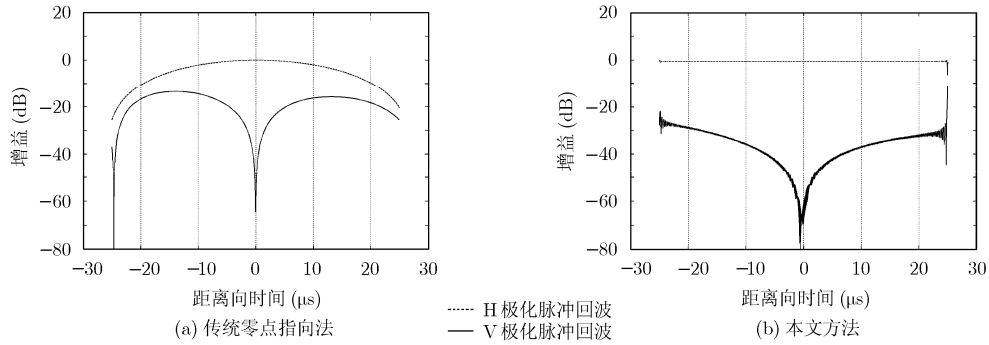


图 6 波束 1 对两种极化脉冲回波的增益比较

表 2 数字子波束对点目标回波的平均接收增益(dB)

子波束	点目标 $P_1$ 的 H 极化回波		点目标 $P_2$ 的 V 极化回波	
	传统零点指向法	本文方法	传统零点指向法	本文方法
子波束 1	-3.1122	-0.0045	-17.3078	-33.5079
子波束 2	-18.9047	-39.9263	-3.4550	-0.0271

距离压缩后它们的像点也会重合。图 7 给出两种方法下的子波束 1 接收到的信号距离压缩的结果。可看出在传统零点指向法下,  $P_1$  的像点会发生幅度损失, 而且由于回波受到幅度调制, 主瓣被展宽; 另外, 干扰像点幅度只比  $P_1$  低不到 -15 dB, 若  $P_2$  是强点目标, 则依然会形成较为明显的干扰。而在本文的分离方法下,  $P_1$  取得了很好的成像效果, 而且干扰像点  $P_2$  的幅度被抑制到大约 -37 dB, 极大地降低了对  $P_1$  的干扰。

表 3 给出了在两种不同方法下获得的原始回波的距离压缩结果(以相干合成信号的压缩结果峰值做归一化)。通过对比可看出, 本文方法一方面使得期望像点的幅度不发生损失, 另一方面又将干扰像点的幅度进一步抑制, 减小它对期望像点的干扰, 从而提高 SAR 图像的质量。

最后, 我们进一步来对比这两种方法在处理场景回波时的性能。基于表 1 中的系统参数, 图 8 给出了在整个测绘带回波接收窗内波束 1 和波束 2 分

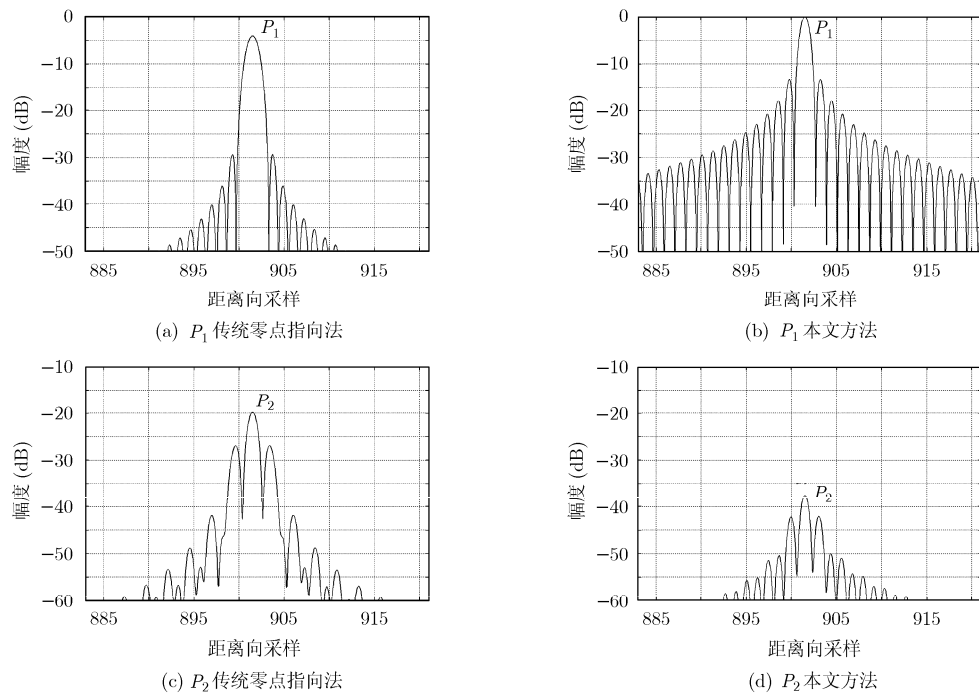


图 7 波束 1 接收到的信号距离压缩结果比较

表3 数字子波束接收回波后的压缩结果(dB)

子波束	点目标 $P_1$ 的像点幅度		点目标 $P_2$ 的像点幅度	
	传统零点指向法	本文方法	传统零点指向法	本文方法
子波束 1	-3.9933	-0.0032	-19.8273	-37.6547
子波束 2	-21.9021	-44.5226	-4.7278	-0.0254

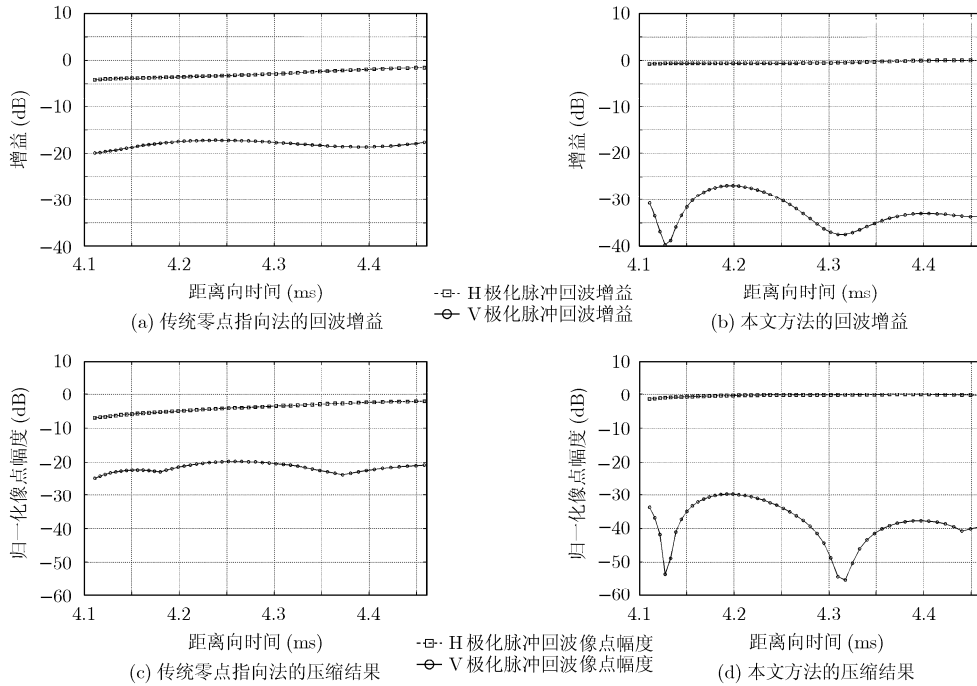


图8 波束1分离场景回波性能比较

离两种回波的性能仿真结果，左列与右列分别对应传统零点指向法与本文方法的分离结果。

从图8可看出，在采用传统零点指向法时，有用与干扰信号之间的波束增益及压缩后的像点幅度之差都小于15 dB；而本文方法能够使两者间的隔离度高于25 dB。在整个回波接收窗内，将不同极化回波的分离程度提高了10 dB，充分说明了它对系统性能的改变。

### 5 结论

为实现宽测绘带下的星载SAR全极化遥感，本文针对多维编码的全极化模式，提出了一种将零点指向空域滤波与FIR时域滤波相结合的俯仰向DBF预处理方法。与传统零点指向法相比，本文方法能够增大不同极化回波的隔离度，从而更好地将它们分离。通过实验仿真，验证了本文方法较传统零点指向法在性能上的改善。

### 参考文献

[1] Cai A M, Shao Y, and Gong H Z. Parameters extraction of crop based on PolSAR data [C]. Proceedings of International Image Analysis and Signal Processing Conference, Zhejiang,

China, 2010: 12-15.  
 [2] Xu M S, Zhang F L, et al. Forest type discrimination using polarimetric RADARSAT-2 data[C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Cape Town, South Africa, 2009: 601-604.  
 [3] Liu T, Lampropoulos G, and Fei C H. CFAR ship detection using polarimetric data [C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Rome, Italy, 2008: 1-4.  
 [4] Hajnsek I, et al. Tropical-forest-parameter estimation by means of Pol-InSAR: the INDREX-II campaign [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 481-493.  
 [5] Chen Hao, et al. Topographic relief compensation on spaceborne polarimetric SAR for forest applications [C]. Proceedings of IEEE Radar Conference, Bordeaux, France, 2009: 1-4.  
 [6] Margarit G, Mallorqui J J, and Pipia L. Polarimetric characterization and temporal stability analysis of urban target scattering [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2038-2048.  
 [7] Moreira A and Krieger G. Spaceborne synthetic aperture radar: state of the art and future developments [C]. Euro Microwave Conference, Munich, Germany, 2003: 104-111.

- [8] Sato M, Watanabe M, and Iribe K. Polarimetric SAR observation by ALOS[C]. Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, Thailand, 2007: 1-4.
- [9] Werninghaus R and Buckreuss S. The TerraSAR-X mission and system design [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 606-614.
- [10] Burini A and Schiavon G. RADARSAT-2: main features and near real-time applications [C]. Proceedings of Euro Radar Conference, Rome, Italy, 2009: 153-155.
- [11] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Advanced concepts for ultra-wide-swath SAR imaging [C]. Proceedings of Euro SAR Conference, Friedrichshafen, Germany, 2008: 31-34.
- [12] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Advanced synthetic aperture radar based on digital beamforming and waveform diversity [C]. Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, USA, 2008: 408-413.
- [13] 齐维孔, 禹卫东. 一种新的多极化星载 SAR 模式研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2010, 40(10): 1394-1408.  
Qi Wei-kong and Yu Wei-dong. A new multi-polarimetric spaceborne SAR mode research [J]. *Science China: Series F*, 2010, 40(10): 1394-1408.
- [14] 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 and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-45.
- [15] Krieger G, Younis M, Gebert N, *et al.* Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging [C]. Proceedings of Euro SAR, Aachen, Germany, 2010: 524-527.
- [16] Suess M and Wiesbeck W. Side-looking synthetic aperture radar system [P]. Euro Patent, EP 1241487, 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.