

基于多维编码信号星载MIMO-SAR的回波分离方法

徐伟^{1,2}, 邓云凯¹

(1. 中国科学院电子学研究所 北京 海淀区 100190; 2. 中国科学院研究生院 北京 海淀区 100039)

【摘要】针对基于常规距离向DBF接收技术的回波分离方法存在数据量大的缺点和基于SCORE技术的分离方法受地形影响导致回波接收增益损失严重的问题,提出了一种结合距离向子阵SCORE技术和空时后处理的MIMO-SAR回波分离方法,它不仅可以降低星载SAR系统的数据率,还能减小SCORE技术中接收增益的损失;该方法还保留距离向部分多通道信息,利于其他模式的应用以及工程的实现。仿真结果验证了该方法的有效性,同时其分离效果好于基于SCORE技术回波分离方法。

关键词 数字波束形成; 多发多收合成孔径雷达; 多维编码信号; SCORE; 回波分离

中图分类号 TN958

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2012.01.005

Waveform Diversity Extraction in Spaceborne MIMO-SAR System Based on Multidimensional Waveform Encoding

XU Wei^{1,2} and DENG Yun-kai¹

(1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190;

2. Graduate University, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100039)

Abstract Spaceborne multi-input multi-output SAR (MIMO-SAR) system combined with multidimensional waveform encoding can obtain wider unambiguous swath width and higher azimuth resolution than traditional spaceborne SAR system. However, the amount of data of waveform diversity extraction method based on traditional digital beam-forming (DBF) techniques is seriously high and the great receive antenna gain loss from topography occurs with the recent presented scan-on-receive (SCORE) technique. A new waveform diversity extraction approach taking advantages of the SCORE technique via sub-array antennas and posterior space time processing (STP) is proposed in this paper. This approach can reduce the high data rate of SAR systems and the receiving antenna gain loss from topography in the SCORE technique. Furthermore, this approach remains some useful information of multi-channel in elevation for other applications and it is easy to be realized. Simulation results validate the presented approach is better than the waveform diversity extraction method based on the SCORE technique.

Key words digital beamforming; MIMO-SAR; multidimensional waveform encoding; scan-on-receive; waveform diversity extraction

对常规单波束SAR系统,测绘带宽和方位分辨率因受最小天线面积的约束不能同时提高^[1]。方位向多波束技术可以较好地解决该矛盾,从而有效地提高星载SAR高分辨、宽测绘能力^[2]。近年来,基于多波束技术的MIMO(multi-input multi-output)体制受到了科研工作者的广泛关注,文献[3]提出了MIMO-SAR的概念。在MIMO-SAR体制下,雷达能够获得更多的信息量和空间自由度,从而进一步提高SAR的高分辨、宽测绘能力及其在动目标检测、三维成像、模糊抑制等方面的能力。

在同载频MIMO-SAR系统中,通常选用正交编码信号(如正负调频信号和正交编码信号)作为发射信号,但由于信号之间存在互相关噪声使SAR系统很难对分布目标成像,同时模糊能量也无法得到真正的抑制^[4]。为了解决采用正交编码信号MIMO-SAR系统中模糊能量无法得到真正抑制的问题,文献[4]提出了多维编码的概念,并将其运用到MIMO-SAR体制中。基于多维编码信号星载MIMO-SAR系统,主要通过距离向DBF(digital beamforming)接收,分离具有不同波形分集信息的回波信号和抑

收稿日期: 2010-05-17; 修回日期: 2010-09-12

基金项目: 中国科学院青年创新促进会基金

作者简介: 徐伟(1983-),男,博士生,主要从事合成孔径雷达系统仿真与信号处理等方面的研究。

制模糊能量^[5]。但是,传统的距离向DBF接收方法存在数据量过大和数据率过高的问题,可能导致回波信号无法下传。而近些年提出的距离向SCORE (scan-on-receive)技术^[6],因受测绘带内地势影响,接收增益损失严重。针对该问题,本文提出,一种结合距离向子阵SCORE技术和空时后处理的回波分离方法,并通过系统性能分析及回波分离仿真,验证了该回波分离方法。

1 基于多维编码信号MIMO-SAR

多维编码信号的主要思想是通过发射不同延时的子脉冲信号,并根据SAR成像模式的几何关系,获得不同的距离向角度分集信息。不同角度分集信息的提取和模糊干扰能量的抑制可以通过距离向DBF接收技术完成。基于方位多维编码信号的MIMO-SAR系统主要可采用两种工作方式:1)第一种为多相位中心收发工作方式,如图1a所示;2)第二种为单相位中心发射多相位中心接收工作方式,如图1b所示。

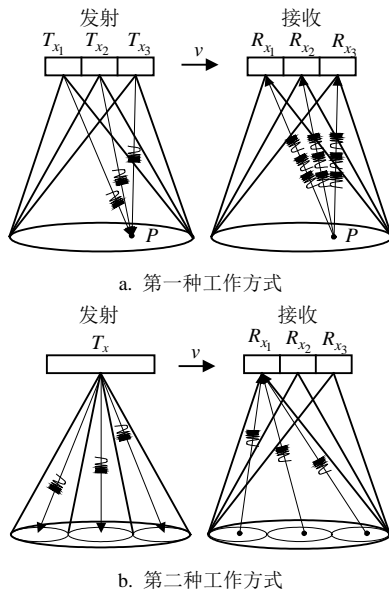


图1 基于多维编码信号的MIMO-SAR工作方式

第一种工作方式与传统MIMO-SAR基本相同,只是不同方位向发射子孔径不是同一快时间发射雷达信号,发射脉冲之间存在一定的时间间隔 τ_d ;接收回波时,各个方位向接收子孔径同时接收地面回波信号,由不同发射子脉冲引起的同一目标的回波信号依次到达各个接收子孔径,如图1a所示。第二种工作方式则在方位向采用整个天线在一个脉冲重复周期内发射一组脉冲序列,并采用脉内波束指向技术沿不同方位向发射各个子脉冲信号,若干个方位向发射窄波束组成一个完整的发射宽波束;接收

回波时,整个天线被划分成若干个接收子孔径,且每个接收波束都能完整地覆盖整个照射区域,由不同发射子脉冲引起的回波信号将陆续到达各个子孔径,如图1b所示。采用该两种工作模式,由于各个子脉冲发射时刻都存在着一定的时延,且各子脉冲的载频和调制方式相同,所以只需要一个发射机就能完成多发任务,在工程上大大降低了系统的复杂度。

由于发射子脉冲之间存在一定时延,使不同目标的回波信号被记录在各个接收通道回波记录窗的相同位置,如图2所示。回波信号的斜距差满足:

$$|\Delta R| = i \frac{c\tau_d}{2} \quad i=1,2,\dots,N_p-1 \quad (1)$$

式中, N_p 表示发射的子脉冲数。虽然回波信号会同时到达雷达接收天线,但由于回波信号在斜距上存在着一定差异,使它们在距离向上从不同入射角度到达雷达的接收天线,所以可以利用距离向DBF接收方法在空域上分离由不同子脉冲引起的回波信号。

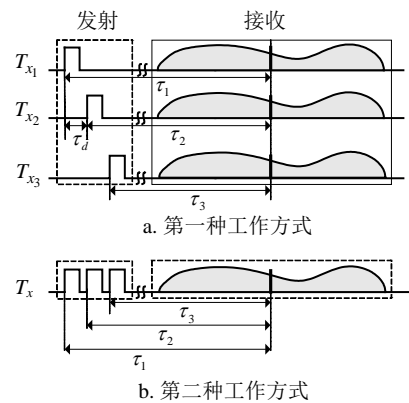


图2 回波混叠示意图

2 距离向DBF接收技术

2.1 传统距离向DBF接收技术

传统距离向DBF接收技术被称为距离向多孔径接收技术,该技术在距离向采用多个子孔径接收整个测绘带内的回波信号,每个接收子孔径通过单独的接收通道独立地接收和存储整个测绘带内的回波信号,并将这些回波下传到地面。为了让距离向每个子孔径接收波束完整覆盖整个测绘带,通常要求接收子孔径的高度不大于发射天线的高度。在星载HRWS模式下,如果距离向采用多孔径接收方法接收测绘带内的回波信号,要求距离向放置大量的接收子孔径。为了获取高分辨宽测绘能力,方位向也需采用多个通道,此时 $M_r \times M_a$ (M_r 和 M_a 分别表示距离向和方位向的通道数)个接收通道大大增加了星载SAR系统的数据量,系统的数据率甚至超出了

星载SAR系统的数据下传能力。

2.2 距离向SCORE技术

针对传统距离向DBF接收方法数据量过大的问题, 文献[6]提出了一种距离向扫描接收方法, 即距离向SCORE技术。系统使用由多个接收阵元组成的距离向大尺寸阵列天线, 形成高增益的接收窄波束接收地面回波信号。在接收地面回波信号时, 各阵元的加权系数不再是常数, 而是随快时间变化的函数, 通过适当的加权, 可使接收波束跟踪并接收地面反射回波信号。此时距离向仅存在一个接收通道, 系统的数据量与数据率得到了降低。

该方法主要存在距离向多通道回波信息丢失和扫描跟踪雷达回波受地势影响严重的缺点。距离向多通道回波信息可以用于干涉高程测量, 以及干扰及模糊信号抑制等。波束在扫描接收地面回波时, 受地势影响会造成接收天线增益的损失。在采用SCORE技术时, 由于地面高度变化导致的接收增益损失可表示为^[4]:

$$\Delta G_R = \text{sinc} \left[\frac{L_r}{\lambda} \sin \left(\frac{\Delta h}{r \sin \theta_{\text{inc}}} \right) \right] \quad (2)$$

式中, L_r 表示距离向接收天线长度; λ 表示雷达工作波长; Δh 表示目标高度; r 表示目标到雷达的斜距; θ_{inc} 表示入射角。地势变化对SCORE技术的影响如图3所示。假设斜距和入射角分别为650 km和30°, 从图中可以看出, 当接收天线总长度超过2 m时, 不能忽略地势变化的影响。

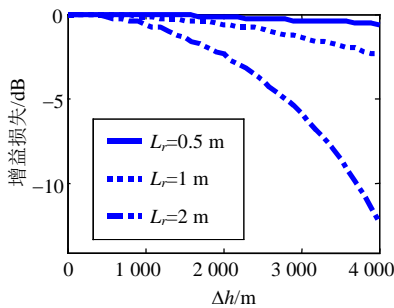


图3 地形变化的影响

3 回波分离方法

为了分离不同子脉冲的回波信号, 距离向接收天线总长度至少需要满足^[4]:

$$L_r \geq \frac{2\lambda r_{\text{far}} \tan \theta_{\text{inc,max}}}{c\tau_d} \quad (3)$$

式中, r_{far} 和 $\theta_{\text{inc,max}}$ 分别表示测绘带内最远端处的斜距和入射角。从式(3)可以看出, 随着远端入射角增加, 要求距离向接收天线长度加长, 故应选取远端

的波位, 系统仿真参数如表1所示。

表1 系统仿真参数

系统参数	数值
雷达载频/GHz	9.65
卫星高度/km	580
发射子脉冲宽度/ μs	40
子脉冲之间时延/ μs	50
子脉冲个数	3
发射天线长度/m	3.2×3
接收长度/m	3.2×3
发射天线高度/m	0.32
PRF/Hz	1 030
天线视角变化范围/(°)	39.5~44.5
地面入射角变化范围/(°)	43.94~49.88
斜距变化范围/km	776.5~852.5

距离向最小天线长度与子脉冲发射时延之间的关系如图4所示。从图中可以看出, 距离向接收天线长度必须大于4 m。假设选取的距离向接收天线总长度为4.8 m, 如果采用距离向多孔径DBF接收方法, 并且至少需要16个距离向通道, 方位向还有3个接收通道, 系统总通道数为48。此时, 系统的数据量和数据率过大, 甚至超出了星载SAR系统的承受范围。而直接采用距离向4.8 m长的接收天线完成SCORE, 受测绘带内地势影响, 天线接收增益损失严重。

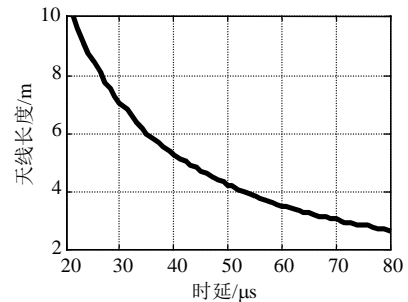


图4 天线长度的选择

本文提出了一种结合距离向子阵天线SCORE技术和距离向空时后处理的回波分离方法。将距离向接收阵列天线划分成若干个子阵, 每个子阵采用SCORE技术各自扫描接收地面回波, 然后再将各通道的回波信号下传至地面, 最后联合距离向多通道回波信号, 利用空时后处理方法分离回波。由于子阵的长度要大于距离向发射天线的长度, 减少了距离向接收通道数, 从而可降低系统的数据量和数据率; 另外, 采用子阵天线扫描接收的方法可减少天线接收增益损失, 并保留距离向部分多通道信息。

3.1 距离向子阵天线SCORE技术

对于目前的星载SAR系统, 通常要求其能工作在不同的视角范围, 且距离向波束指向的切换主要

采用平面相控阵天线电扫描完成。为了在波束指向改变后不引入栅瓣，以避免产生较强的距离模糊能量，根据平面相控阵工作原理^[8]，天线距离向阵元间距必须满足：

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + |\sin(\theta_{sc,max}/2)|} \quad (4)$$

式中， $\theta_{sc,max}$ 表示距离向最大扫描范围。假设某星载 SAR 系统的距离向视角变化范围为 $\pm 15^\circ$ (视角为 $15^\circ \sim 45^\circ$)，为了抑制栅瓣的出现，将天线阵元间距设为 2 cm，此时距离向发射阵元数为 16，距离接收天线阵元数为 240，而每个接收子阵的阵元数为 60。为了降低星上实现实时 SCORE 技术的复杂性，可以将几个阵元信号合并成一路信号，以减少需要实时调节加权系数的阵元的个数。但是，用于合并信号的阵元数不宜太多，否则在扫描接收过程中会导致具有较强接收增益的栅瓣出现，从而引入较强的距离模糊。本文采用四路阵元信号合并成一路信号的方法来实现距离向的扫描接收，距离向每个接收子阵需要实时调节加权系数的阵元数为 15；而且由于在接收回波时，每个接收子阵的波束指向相同(即它们的加权网络保持相同)，在工程上大大降低了星上实现实时 SCORE 技术的难度。

3.2 距离向空时后处理

由于子阵天线的长度无法满足式(3)的要求，利用子阵 SCORE 技术无法分离出具有不同距离向角度分集信息的回波信号，所以必须联合距离向子阵多通道信号，利用空时后处理完成回波的分离^[9-10]。假设有 3 个点目标 P_1 、 P_2 和 P_3 ，它们在 t 时刻的斜距满足 $R_3(t) - R_2(t) = R_2(t) - R_1(t) = c\tau_d/2$ 。此时，距离向第 m 个子阵接收的基带回波信号为：

$$s_m(\tau, t) = \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_p} G_{rr}(\theta - \theta_0(\tau)) \sigma_k \times \text{rect} \left[\frac{\tau - (R_{k,i,m}(t) + R_{k,i}(t))/c}{\tau_p} \right] \times \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} (R_{k,i,m}(t) + R_{k,i}(t)) \right] \times \exp \{ j\pi K_r [\tau - (R_{k,i,m}(t) + R_{k,i}(t))/c]^2 \} \quad (5)$$

其中：

$$R_{k,i,m}(t) \approx R_{k,i}(t) + (m - (M_r + 1)/2) d_r \sin \theta_{k,i} \quad (6)$$

$$R_{k,i}(t) = R_k(t) + \frac{i-1}{2} c\tau_d \quad (7)$$

式中， τ 和 t 分别表示快时间和慢时间； $G_{rr}(\cdot)$ 表示距离向接收波束的天线方向图； $\theta_0(\tau)$ 表示随快时间

变化的接收波束指向； σ_k 表示第 k 个点目标的后向散射系数； τ_p 和 K_r 分别表示发射脉冲宽度及其调频率； d_r 表示距离向子阵天线长度； M_r 表示距离向接收子阵天线个数。

对式(5)进行距离向脉压可得：

$$s_m(\tau, t) \approx \sum_{k=1}^3 \sum_{i=1}^{N_p} C_{k,i} \times \text{sinc}(\tau - 2R_{k,i}(t)/c) \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{k,i}(t) \right] \times \exp \left[-j \frac{2\pi d \sin \theta_{k,i}}{\lambda} \left(m - \frac{M_r + 1}{2} \right) \right] \quad (8)$$

式中， $C_{k,i}$ 为常数，表示回波幅度； $\theta_{k,i}$ 表示由第 i 个子脉冲引起的第 k 个点目标到达距离向接收天线的入射角。式(8)中忽略了由于子阵位置不同造成包络时延的变化。从式(8)中可得，在 $\tau = 2R_3(t)/c$ 时刻，3 个子脉冲引起的回波信号发生了混叠。

距离向各子阵接收通道分别进行距离向压缩后， τ 时刻距离向多通道回波信号可以写成矩阵向量形式：

$$\mathbf{S}(\tau, t) = \mathbf{W}(\tau) \mathbf{Z}(\tau, t) \quad (9)$$

其中：

$$\mathbf{S}(\tau, t) = [s_1(\tau, t), s_2(\tau, t), \dots, s_{M_r}(\tau, t)]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{W}(\tau) = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \dots & a_{1,N_p} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \dots & a_{2,N_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M_r,1} & a_{M_r,2} & \dots & a_{M_r,N_p} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$a_{m,i} = \exp \left[j \frac{2\pi d_r \sin(\theta_i(\tau))}{\lambda} (m - (M_r + 1)/2) \right] \quad m = 1, 2, \dots, M_r, \quad i = 1, 2, \dots, N_p \quad (12)$$

$$\mathbf{Z}(\tau, t) = [z_1(\tau, t), z_2(\tau, t), \dots, z_{N_p}(\tau, t)]^T \quad (13)$$

式中， d_r 表示距离向接收子阵间距； $z_i(\tau, t)$ 表示雷达接收到 τ 时刻第 i 子脉冲的回波信号； $\theta_i(\tau)$ 表示 τ 时刻回波信号到达方向与接收窄波束指向间的夹角； $\mathbf{W}(\tau)$ 表示距离向多通道数据的加权矩阵； $[\cdot]^T$ 表示转置运算。根据式(11)可以计算出伪逆矩阵 $\mathbf{W}^+(\tau)$ (要求 $M_r \geq N_p$)。对应不同发射子脉冲的 τ 时刻接收回波信号可以通过式(14)分离出来，即有：

$$\mathbf{Z}(\tau, t) = \mathbf{W}^+(\tau) \mathbf{R}(\tau, t) = (\mathbf{W}^H \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^H \mathbf{S}(\tau, t) \quad (14)$$

式中， $[\cdot]^H$ 表示共轭转置运算。

4 性能分析与仿真

采用窄波束扫描接收地面回波信号时，距离向接收窄波束的指向随快时间变化而变化，由于

SCORE技术造成的脉冲能量损失(pulse extension loss, PEL)为:

$$PEL = \frac{\int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} |G_{rr}(\tau - 2r/c)|^2 d\tau}{\tau_p} \quad (15)$$

在距离向采用SCORE技术扫描接收地面回波信号时, 采用不同长度的接收天线造成的脉冲能量损失PEL在测绘带内的变化情况如图5所示。从图5中可以看出, 当距离向接收天线较大(即接收波束较窄)时, 脉冲能量损失较为严重, 会在一定程度上降低SCORE分离回波的性能。

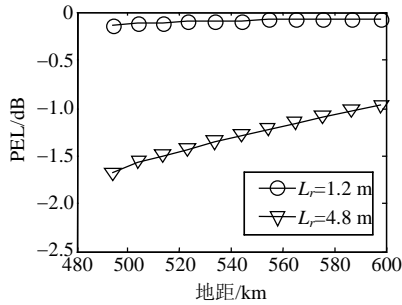


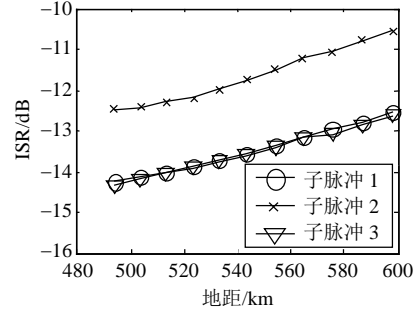
图5 脉冲能量损失PEL

为了分析距离向采用SCORE技术对不同子脉冲回波的分离效果, 本文定义性能参数接收干信比ISR衡量回波分离效果, 则ISR表示干扰子脉冲与有效子脉冲回波能量的比值。由于采用SCORE技术时, 距离向接收窄波束的指向随快时间变化而变化, ISR 可以表示为:

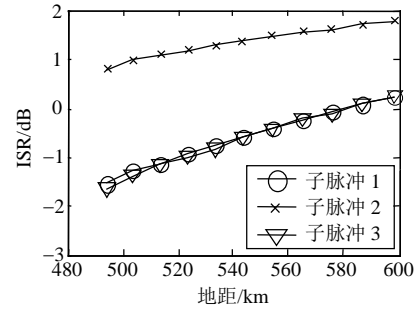
$$ISR_i(r) = \frac{\sum_{k \neq i} \int_{(k-i)\tau_d - \tau_p/2}^{(k-i)\tau_d + \tau_p/2} |G_{rr}(\tau - 2r/c)|^2 d\tau}{\int_{-\tau_p/2}^{\tau_p/2} |G_{rr}(\tau - 2r/c)|^2 d\tau} \quad (16)$$

距离向采用SCORE技术后接收干信比在测绘带内的变化情况如图6所示, 图中距离向接收孔径总长为4.8 m, 子阵长为1.2 m。从图6中可以看出, 即使距离向采用4.8 m的接收天线分离具有不同角度的分集信息, 分离效果也不十分理想。这主要是由于接收波束的指向随着快时间在不断发生改变, 而干扰目标信号的能量被分散在整个大脉冲时宽内, 干扰信号能量没有得到较好的聚集, 从而很难得到较好的抑制效果。零点指向和宽零陷技术能够进一步提高SCORE技术分离具有不同角度的分集信息回波的分离效果, 但会进一步增加系统的复杂度和星上实现实时扫描接收的难度, 并且零点指向和宽零陷技术可能会造成接收天线主瓣的畸变和接收天线增益的损失。在实际工程中, 零点的深度受限于每个阵元加权系数的量化精度^[7], 也影响了零点指

向技术在实时SCORE技术中分离回波的效果。



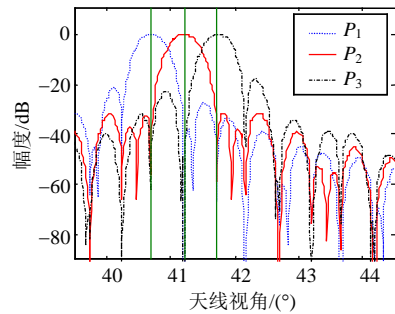
a. 全孔径SCORE技术



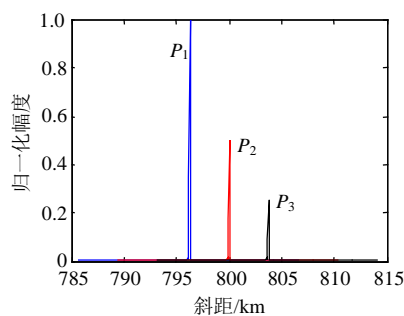
b. 子阵SCORE技术

图6 距离向SCORE技术ISR比较

本文提出的回波分离方法中的距离向子阵SCORE技术, 虽然不能分离不同子脉冲的回波信号, 但能保留距离向多通道信息同时降低星载SAR系统的数据量。多路距离向子阵回波信号经空域处理后, 可实现不同子脉冲回波信号的真正分离。为了能得到较好的抑制和分离效果, 本文先对各个子阵接收回来的信号进行距离向脉冲压缩, 然后再进行抑制和分离。在接收窗内某一时刻, 本文方法的分离效果如图7所示。从图7a中可以看出, 干扰信号的能量在空域上能被抑制至-30 dB以下, 符合实际工程的要求, 效果好于图6a全孔径SCORE方法。为了能够有效地区分3个不同的点目标, 本文假设它们的后向散射系数之比为 $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 = 4 : 2 : 1$ 。由图7b中可以看出, 本文的方法可以得到较好的回波分离效果。



a. 空域上的抑制效果



b. 回波分离结果

图7 某一距离门不同目标回波的分离

5 结论

本文提出了一种基于多维波形编码信号MIMO-SAR系统的回波分离方法,可降低传统DBF接收方法的数据量,并保留距离向的部分多通道信息,削弱了SCORE技术中地形变化对天线接收增益的影响,降低了星上SCORE技术的实现难度。仿真结果验证了该方法的分离效果好于基于SCORE的回波分离方法。

参考文献

- [1] FREEMAN A, JOHNSON W, HUNEVICUTT B, et al. The myth of the minimum SAR antenna area constraint[J]. IEEE Transaction on Geosciences Remote Sensing, 2000, 38(1): 320-324.
- [2] CURRIE A, BROWN M. Wide-swath SAR[J]. IEE Proceedings-F, 1992, 139(2): 122-135.
- [3] 武其松, 井伟, 邢孟道, 等. 多维波形编码信号大测绘带成像[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(5): 801-805.
WU Qi-song, JING Wei, XING Meng-dao, et al. Wide swath imaging with multidimensional waveform encoding[J]. Journal of Xidian University, 2009, 36(5): 801-805.
- [4] KRIEGER G, GEBERT M, MOREIRA A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing[J]. IEEE Transaction on Geosciences Remote Sensing, 2008, 46(1): 31-46.
- [5] BREMER A, ENDER J. First experimental results achieved with the new wideband SAR system PAMIR[C]//Proc of EUSAR. Germany: [s.n.], 2002.
- [6] SUESS M, GRAFMUELLER B, ZAHN R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]//Proc of IGARSS. Australia: [s.n.], 2001.
- [7] MAR J, LIN Y. Implementation of SDR digital beam-forming for micro-satellite SAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(1): 92-96.
- [8] 张光义, 赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 15-19.
ZHANG Guang-yi, ZHAO Yu-jie. Phased array radar technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [9] YOUNIS M, BORDONI F, GEBERT N, et al. Smart multi-channel radar techniques for spaceborne remote sensing[C] //Proc of IEEE IGARSS. Boston, USA: IEEE, 2008.
- [10] KRIEGER G, GEBERT N, YOUNIS M, et al. Advanced concepts for ultra-wide-swath SAR imaging with high azimuth resolution[C]//Proc of EUSAR. Friedrichshafen, Germany: [s.n.], 2008.

编辑 黄 莘