

文章编号: 1001 - 2486(2011)03 - 0105 - 06

基于模拟干涉相位去斜的 SAR 层析处理方法^{*}

孙希龙¹, 余安喜¹, 杜海东², 董 臻¹, 梁甸农¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 97497 部队, 海南 海口 571000)

摘要:合成孔径雷达层析解决了传统合成孔径雷达二维成像在高程向分辨率丧失的难题,通过不同空间位置的多次观测在目标高程向形成合成孔径,真正实现了对目标的三维成像。以合成孔径雷达层析处理中的去斜操作这一重要步骤为研究对象,提出一种基于模拟干涉相位的去斜方法。该方法可以避免额外大气相位误差的引入,并且仅需要低精度的地面高程数据就可得到理想的去斜效果,所以利于提高合成孔径雷达层析的精度和实用化程度。最后利用实测数据进行了合成孔径雷达层析处理实验,处理结果证明了基于模拟干涉相位去斜方法的正确性与有效性。

关键词:合成孔径雷达;层析;去斜;三维成像

中图分类号:TN957 文献标识码:A

SAR Tomography Based on Simulated Interferometric Phase

SUN Xi-long¹, YU An-xi¹, DU Hai-dong², DONG Zhen¹, LIANG Dian-nong¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. PLA Unit 97497, Haikou 571000, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) Tomography extends the capability of SAR systems and allows reconstructing the height profile of observed scene. The deramping, one of important processes of SAR tomography, was investigated and a new deramping method based on simulated interferometric phase was proposed. This method can avoid extra atmosphere phase and obtain excellent deramping result using low precise elevation of the target, so it facilitates SAR Tomography. Finally, the validity and availability of this method is validated by the results obtained by processing real data.

Key words: synthetic aperture radar; tomography; deramping; three-dimensional focusing

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)作为一种重要的主动微波传感器,自上世纪中期以来在民用遥感和军事侦察等领域都发挥了令人瞩目的作用。由于 SAR 图像是目标的空间三维特性在方位向-距离向二维平面上的投影,所以同一分辨单元内不同高程处的目标都被压缩到了 SAR 图像同一像素内,这样造成了目标高程向细节信息的丢失。在一些应用中,特别是重要人工建筑的监测中,目标的三维特性信息是我们所关注的,此时传统的 SAR 二维图像不能提供目标足够的细节信息。上世纪末,层析成像技术被引入到 SAR 中,产生了 SAR 层析技术(Tomography SAR, TomoSAR)^[1-2]。该技术利用在不同空间位置获得的多次观测将传统 SAR 的方位向一维合成孔径扩展成方位-高程平面内的二维合成孔径,使 SAR 具备了高程向的分辨能力,真正实现

了对观测目标的三维成像,因此, SAR 层析技术也被称为三维 SAR 成像技术(3-D SAR focusing)。

本世纪以来,众多研究机构开展了 SAR 层析的研究工作,提出了多种 3-D 聚焦方法,如自适应空间谱估计方法^[3],截断奇异值分解法(Truncated Singular Value Decomposition, TSVD)^[4]、信号稀疏表示方法^[5]等。但是由于 SAR 层析的处理繁琐复杂,并受到多种不利因素的影响,特别是在星载 SAR 数据处理中,受大气相位和空间非均匀稀疏采样的影响尤为严重,其实用程度受到了很大的限制。2005 年, Fornaro 利用 30 轨 ERS 的 C 波段数据对意大利罗马的 San Paolo 体育场进行了三维成像^[6],随后 Fornaro 利用更多的数据(63 轨)进行了相同的实验^[7]。2009 年, Lombardini 利用罗马 Cinecitta 工业区的 ERS 数据处理结果对 TSVD 和自适应空间谱估计两种方法进行了比

^{*} 收稿日期:2010-12-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61002031)

作者简介:孙希龙(1982—),男,博士生。

较^[8]。2010年,Zhu利用16轨 TerraSAR-X 数据对拉斯维加斯议会中心和 Wynn 酒店进行了三维重建,TerraSAR 的高分辨率优势在目标细节的提取中得到了体现^[9]。国内,王彦平等使用 17 轨 ASAR 数据对天津奥林匹克体育场进行三维成像实验,但效果并不理想^[10]。

SAR 层析处理包括去斜、相位补偿和高程向聚焦三个主要步骤。其中去斜操作起着至关重要的作用,正是由于主图像中心斜距相位的去除才建立了观测和待估参数间的频谱关系,使从多轨观测数据中恢复同一分辨单元内目标的高程向信息成为了可能^[4]。利用雷达记录的电磁波传输延迟进行中心斜距相位的去除是最为直接的去斜方法,但是由于回波延迟受到大气扰动的影响,使用其去斜将引入大气相位误差。当前,星载 SAR 层析数据主要由单天线 SAR 系统的多轨任务获得,由于在时间上存在较大的跨度,大气扰动在不同观测间将表现出不相关性^[11-12],这种随机乘性噪声将严重影响 SAR 层析的高程向聚焦效果^[13]。本文在对 SAR 层析基本公式进行修订的基础上,提出一种基于模拟干涉相位的去斜方法。由于该

方法仅使用成像几何关系来实现中心斜距相位的获取,所以避免了额外大气扰动引起的相位误差的引入,利于提高三维成像精度。此外,干涉相位模拟中仅需使用低精度的地形数据即可获得高精度的去斜效果,在实测数据处理中较易实现,可以提高 SAR 层析技术的实用程度。最后,使用实测数据 SAR 层析三维成像实验对基于模拟干涉相位的去斜方法进行验证。

1 SAR 层析基本原理

为了实现对目标的三维成像,TomoSAR 需要沿斜距垂向 (Normal-to-slant-range Direction, NSR Direction) 形成合成孔径,当前这主要通过单天线系统的重轨模式来实现,如图 1(a)所示。假设对同一目标从不同的空间位置进行了 N 次观测,经过方位向-距离向二维压缩后可得 N 幅 SAR 单视复图像。选取第 D 幅图像作为主图像,将其它的图像都配准到该主图像上。现在我们将关注同一分辨单元的复数序列 $h = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$,假设二维压缩函数为理想的冲击函数,则图像的复数值可以表示为式(1)^[4]

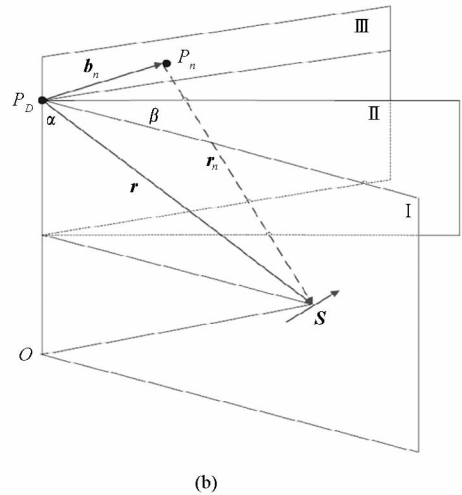
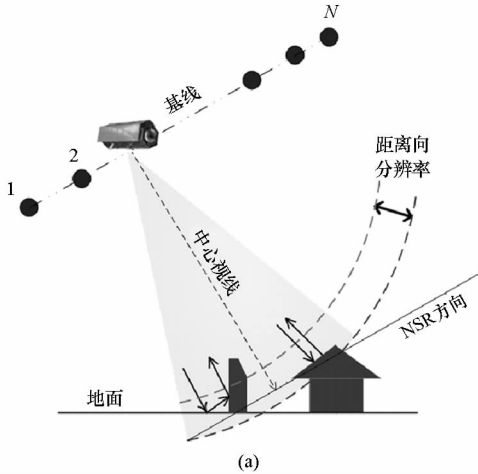


图 1 (a)SAR 层析示意图;(b)主副图像成像几何关系
Fig.1 (a)TomoSAR imaging geometry;(b)Geometry of master and slave image

$$h_n = \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(s) \exp[-j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(s)] ds \quad (1)$$

$(n = 1, 2, \dots, N)$

其中, s 为 NSR 方向高度, $[-s_{max}, s_{max}]$ 为目标的 NSR 跨度, $\gamma(s)$ 为目标电磁散射系数沿 NSR 方向的分布函数, λ 为雷达波长, $r_n(s)$ 为斜距。由图 1(a)和(1)式可知,高程不同的多个散射元经过方位向-距离向二维压缩后都被压缩到 SAR 图像同一个分辨单元内,这样就造成了目标高程向细节信息的丢失。

由于 $\gamma(s)$ 能够反映目标高程特性, SAR 层析就是要从 N 维观测向量 $h = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T$ 中反演得到 $\gamma(s)$ 。为了实现这一点,首先需要去除(1)式中由中心斜距 $r_n(0)$ 引起的相位项,这项操作被称为去斜 (Deramping)^[1-4]。

$$g_n = \exp[j \frac{4\pi}{\lambda} r_n(0)] \cdot h_n$$

$$= \int_{-s_{max}}^{s_{max}} \gamma(s) \exp\{-j \frac{4\pi}{\lambda} [r_n(s) - r_n(0)]\} ds \quad (2)$$

图 1(b)给出了主图像和副图像的成像几何关系,其中 O 为地心, P_D 和 P_n 分别为成像时刻雷达的

空间位置, \mathbf{b}_n 为基线向量, \mathbf{r} 为主图像中心斜距, I 为距离高度平面, II 为轨道平面, III 为 \mathbf{b} 和 O 决定的平面。由图 1(b) 给出的几何关系可知 $r_n(s)$ 与主图像中心斜距 r 存在如下关系:

$$r_n(s) - r = \langle \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_s \rangle^{1/2} - \langle \mathbf{r}, \mathbf{r} \rangle^{1/2} \quad (3)$$

将上式泰勒展开并仅保留其一阶项可得

$$r_n(s) - r_n(0) \approx \frac{s^2}{2r} - \frac{s\mathbf{b}_{\perp n}}{r} \quad (4)$$

其中, $\mathbf{b}_{\perp n}$ 为 \mathbf{b}_n 沿 \mathbf{r} 分解得到的垂直基线^[14]。由此, g_n 可表示为如下形式

$$g(\xi_n) = \int_{-s_{\max}}^{s_{\max}} \gamma(s) \exp(j2\pi\xi_n s) ds \quad (5)$$

$$\xi_n = \frac{2\mathbf{b}_{\perp n}}{r\lambda} \quad (6)$$

注意, 由于我们关注的是 $\gamma(s)$ 的幅度信息, (5) 式中仅与 s^2 有关的相位项已经被归结到了 $\gamma(s)$ 中。由(5)式可知, 通过去斜操作, 同一分辨单元的复数值 $g = [g(\xi_1), g(\xi_2), \dots, g(\xi_N)]$ 为该分辨单元内目标沿 NSR 方向的电磁散射特性函数 $\gamma(s)$ 的频谱 $g(\xi)$ 在 ξ_n 处的离散采样。由此, SAR 层析就变为一个从频谱离散采样中恢复原信号的问题。

2 基于模拟干涉相位去斜

由上节的分析可知, 去斜操作在 SAR 层析中有着重要的作用, 正是由于中心斜距相位的去除才建立了观测数据和目标 NSR 向结构信息之间的内在联系。中心斜距 $r_n(0)$ 可以由雷达记录的传输延迟时间得到, 但是雷达记录的传输延迟时间不可避免地受到大气扰动影响, 实际得到的中心斜距 $r'_n(0)$ 为

$$r'_n(0) = r_n(0) + \Delta r_n \quad (7)$$

Δr_n 为大气延迟引起的额外波程, 若利用 $r'_n(0)$ 进行去斜, 得到的实际观测值为

$$g'(\xi_n) = g(\xi_n) \exp[j\frac{4\pi}{\lambda} r'_n(0)] \quad (8)$$

大气扰动在时间上存在很强的随机性, 由于数据的单天线重轨获取模式, 不同观测间存在较大的时间间隔, 所以由大气扰动引起的额外波程在不同图像之间也表现出很强的随机性^[11-12], 即利用雷达记录的回波延迟去斜将在 g 中引入随机的乘性噪声, 这将对 NSR 向的聚焦效果造成严重的影响^[13]。为了避免去斜操作中额外大气扰动的引入, 下面提出一种基于模拟干涉相位的去斜方法。

将(2)式的两侧同乘上由主图像中心斜距 r

造成的相位项得

$$\begin{aligned} & \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} r] g_n \\ &= \int_{-s_{\max}}^{s_{\max}} \exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} r] \gamma(s) \exp\{j2\pi\xi_n s\} ds \quad (9) \end{aligned}$$

由于 SAR 层析中我们关心的是 $\gamma(s)$ 的幅度, 相位 $\exp[-j\frac{4\pi}{\lambda} r]$ 对 g 而言是一常数项, 所以将该相位项归结到 $\gamma(s)$ 中不会影响最终的重建结果, 此时 SAR 层析公式可以写为

$$p(\xi_n) = \int_{-s_{\max}}^{s_{\max}} \gamma'(s) \exp(j2\pi\xi_n s) ds \quad (10)$$

其中

$$p(\xi_n) = \exp(j \cdot \phi_n) \cdot h_n \quad (11)$$

$$\phi_n = -\frac{4\pi}{\lambda} [r - r_n(0)] \quad (12)$$

由式(12)可知, ϕ_n 可以看成不存在体散射、每个 SAR 分辨单元内仅有一个散射中心时的干涉相位, 这个相位可以由雷达位置和目标处的地面高程获得, 称其为模拟干涉相位。由于模拟干涉相位的获取中仅需使用成像中的几何关系, 所以利用其进行去斜可以避免额外大气扰动引起的相位误差的引入, 降低频谱 $p(\xi_n)$ 中的噪声水平, 利于提高三维成像精度。注意, ϕ_n 虽然可以看成干涉相位, 但是却不能使用由两幅 SAR 图像干涉而得到的干涉相位代替, 因为 SAR 图像对的干涉相位中包含着 $\gamma(s)$ 在 NSR 向的积分信息, 如果利用其代替 ϕ_n 去斜, 则不能反演得到 $\gamma(s)$ 。

SAR 层析的观测目标通常为人工建筑物, 这类目标的地面尺寸通常较小, 在十米到百米的量级, 而且目标处地形都较为平坦。此时并不需要精确的地面高程数据来计算模拟干涉相位, 仅需此处地面高程的一个粗略估计值即可, 下面对其中的原因进行分析。由于目标处的地形平坦, 可以使用一个高程为 H 的平面来表示。如果预先得到的该平面的高程估计值为 H' ,

$$H' = H + \Delta H \quad (13)$$

其中 ΔH 为高程误差。此时得到的模拟干涉相位 ϕ'_n 为,

$$\phi'_n = \phi_n + \Delta\phi_n \quad (14)$$

$\Delta\phi_n$ 为由 ΔH 造成的模拟干涉相位误差, $\Delta\phi_n$ 与 ΔH 之间存在如下的关系^[14],

$$\Delta\phi_n = -\frac{4\pi}{\lambda r \sin\alpha} \mathbf{b}_{\perp n} \Delta H \quad (15)$$

α 为雷达下视角。由于垂直基线 $\mathbf{b}_{\perp n}$ 与频谱采样值 ξ_n 相对应, 所以 $\Delta\phi_n$ 也与频谱采样值 ξ_n 相对

应,两者之间存在如下关系:

$$\Delta\phi_n = 2\pi s_0 \xi_n \quad (16)$$

其中

$$s_0 = -\frac{\Delta H}{\sin\alpha} \quad (17)$$

对目标内的所有分辨单元而言,利用 ϕ'_n 进行去斜后的像素值可表示为,

$$\begin{aligned} p'(\xi_n) &= p(\xi_n)\exp(j\Delta\phi_n) \\ &= p(\xi_n)\exp(j2\pi s_0 \xi_n) \end{aligned} \quad (18)$$

由于 $\gamma'(s)$ 和 $p(\xi_n)$ 之间是傅里叶变换对的关系,若直接利用 $p'(\xi_n)$ 进行 NSR 向聚焦,由傅里叶变换的性质知,所得到的结果 $\gamma''(s)$ 与 $\gamma'(s)$ 之间将存在如下关系:

$$\gamma''(s) = \gamma'(s + s_0) \quad (19)$$

可见,在基于模拟干涉相位去斜中,高程误差仅会造成目标三维结构的整体平移,而不会影响目标三维结构的相对位置,实际处理中仅需要利用先验知识对结果进行整体校正即可。图 2 给出了利用模拟干涉相位去斜的 SAR 层析处理流程。其中目标处地面的低精度高程可以使用目标所处地区的平均高程,也可使用低精度的 DEM 数据,对于海拔高度很低的目标甚至可以使用地球椭球模型来进行干涉相位模拟。图 2 中的相位校正过程主要是为了校正图像中由大气扰动和地形形变等造成的相位误差,多基线差分干涉技术,如永久散射体技术^[12]和小基线集干涉技术^[15],是一种有效的校正方法,该方法在校正大气扰动和地形形变等造成的相位误差的同时还可以对轨道数据不准

确造成的误差进行补偿。

3 实测数据处理

利用 Envisat 自 2003 年 10 月至 2007 年 11 月获得的 20 轨 ASAR 数据对位于美国加橘安市的安那罕天使球场(Angel Stadium of Anaheim,北纬 33°48'0.11",西经 117°52'58.85")进行 SAR 层析三维成像实验。雷达波长 λ 为 0.056m,图像的方位向、距离向分辨率分别为 7.9m、5m,主图像中心斜距 r 为 843 130m,雷达入射角约为 23°,选取 2005 年 6 月 15 日获得的图像作为主图像。图 3(a)为体育场的 SAR 图像,并标出了将要处理的三条剖面位置。图 3(b)为该体育场的等比例三维模型,体育场是一棒球场,外形近似于一个梯形,最大高度约为 41m。为了便于评估最终的高程向成像效果,首先利用体育场的等比例三维模型做剖面得到了沿 NSR 方向的三个剖面结构图,如图 4 所示。第一和第二剖面切过体育场的看台顶棚和前墙体,剖面呈抛物线型,第二条剖面切过墙体的范围较大,所以有较大的弧度。由于体育场的墙体上有复杂的附属结构(图 3(b)),会对电磁波产生

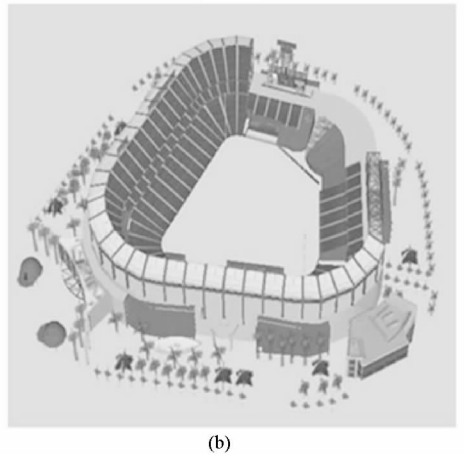
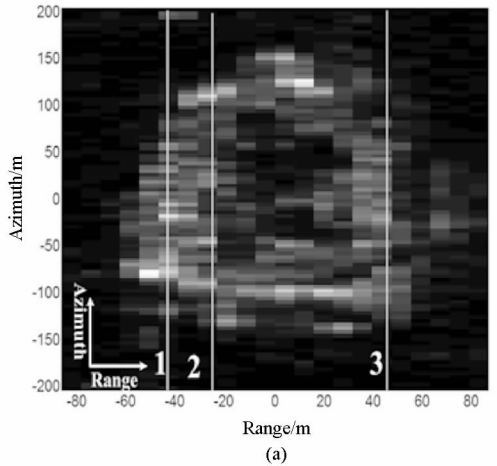


图 3 (a)SAR 图像;(b)体育场三维结构图
Fig.3 (a)SAR image;(b)Structure of the stadium

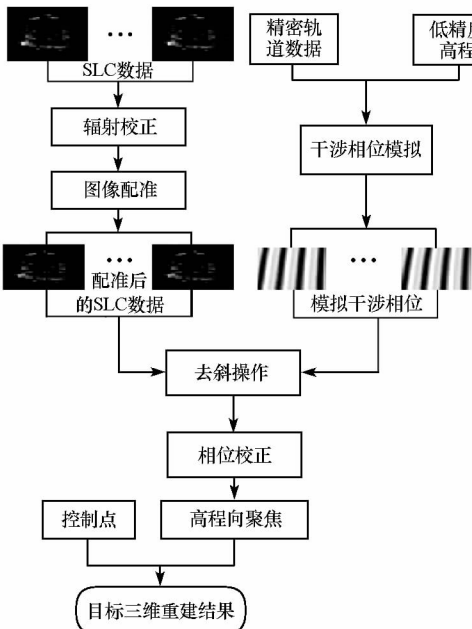


图 2 处理流程
Fig.2 Flow of Tomography SAR

较强的反射,所以在抛物线型剖面上会存在较多的强散射点,SAR 层析成像结果也应该呈虚线所示的形状。第三条剖面切过了体育场远端的看台,如图 4(c)中的虚线矩形所示,根据入射角可

知,沿 NSR 方向的剖面坡度为 23° ,该处看台的坡度约为 27° ,与剖面的坡度近似,由于看台处布满坐椅,坐椅的结构近似为一个二面角反射器,所以在该剖面的坐椅区应存在较多的强散射元。

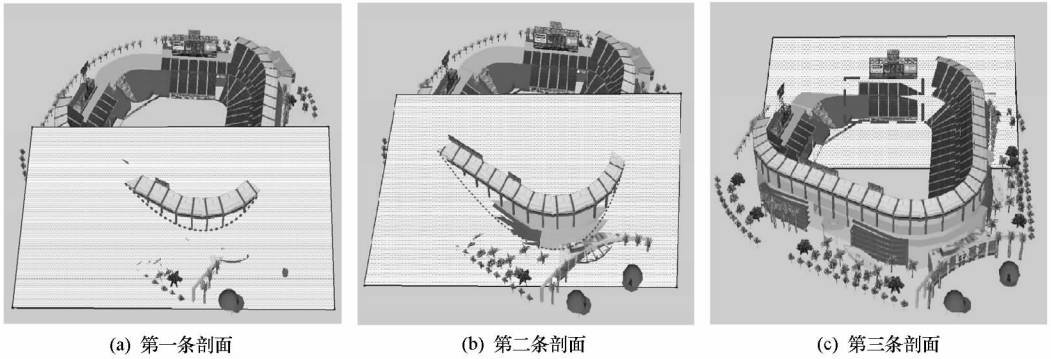


图 4 三维模型得到的剖面形状

Fig.4 Sections from three dimension structure

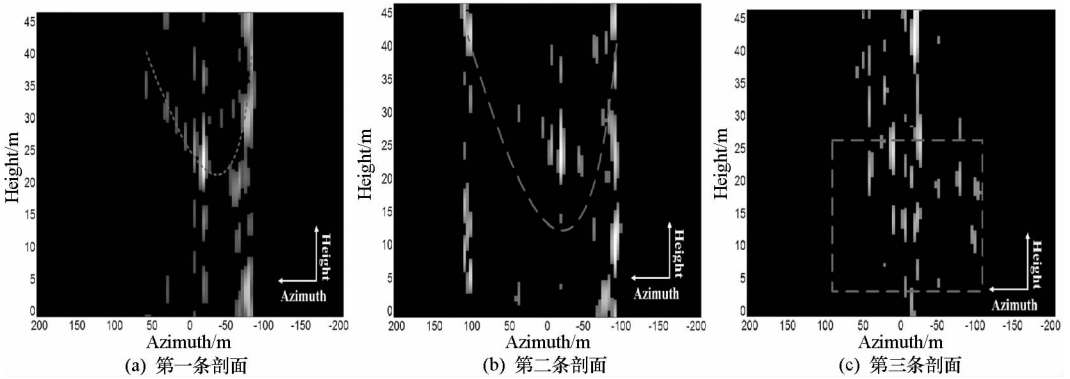


图 5 SAR 层析处理结果(斜距去斜)

Fig.5 SAR Tomography results (deramping using slant range)

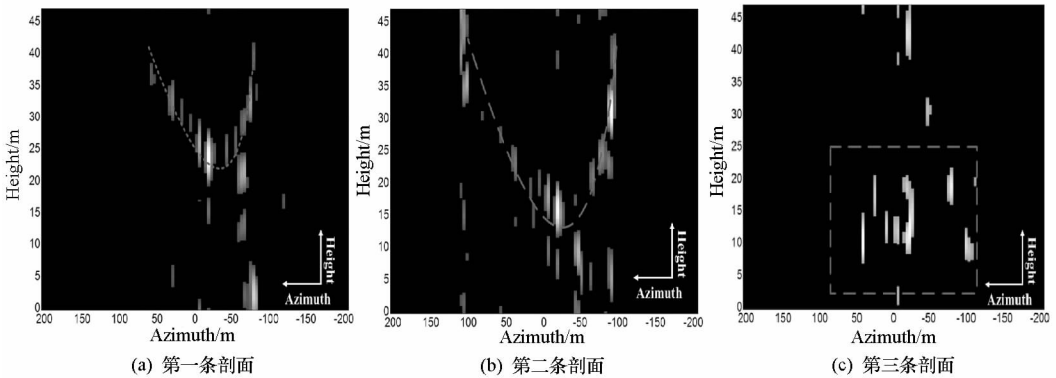


图 6 SAR 层析处理结果(模拟干涉相位去斜)

Fig.6 SAR Tomography results (deramping using simulated interferometric phase)

图 5 和图 6 分别给出了利用斜距去斜所得的 SAR 层析结果和利用模拟干涉相位去斜所得的 SAR 层析结果,NSR 向高度已经根据剖面的坡度换算到了高程向上。在基于模拟干涉相位去斜的 SAR 层析处理中参考高程平面使用地面分辨率为 90m 的粗 DEM 数据平均得到,轨道数据使用 Delft 大学提供的高精度轨道数据,对各种相位误差使

用永久散射体干涉处理技术进行补偿。NSR 向聚焦中使用了 Fornaro 提出的 TSVD 方法^[4],该方法可以有效解决空间非均匀稀疏采样的问题,并利用奇异值的截取有效地抑制补偿之后的残余误差的传播。比较图 5 与图 6 的结果可知,利用雷达记录的斜距进行去斜中额外相位误差的引入造成了严重的旁瓣和栅瓣,成像效果不佳;利用模拟干

涉相位去斜的 SAR 层析处理结果中旁瓣和栅瓣效应明显降低,与通过体育场三维立体模型所得的剖面很好地吻合,成像结果明显优于利用斜距去斜所得的结果。

4 结论

在 SAR 层析中,去斜操作起着至关重要的作用,正是主图像中心斜距相位的去除才建立了观测和待估参数间的频谱关系,使从多轨观测数据中恢复同一分辨单元内目标的高程向信息成为可能。在对 SAR 层析基本公式进行修订的基础上,提出一种基于模拟干涉相位的去斜方法。由于该方法仅使用成像几何关系来实现中心斜距相位的获取,所以避免了额外大气扰动引起的相位误差的引入,降低了目标 NSR 向电磁散射特性函数的频谱中的噪声水平,利于提高三维成像精度。并且干涉相位模拟中仅需使用低精度的地形数据即可获得高精度的去斜效果,由于低精度高程数据便于获取,所以该方法在实测数据处理中较易实现,可以提高 SAR 层析三维成像技术的实用程度。利用 20 轨 ASAR 数据对安那罕天使球场进行了实测数据处理实验,处理结果证明基于模拟干涉相位去斜方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] Lombardini F, Griffiths H. Effect of Temporal Decorrelation on 3D SAR Imaging Using Multipass Beamforming [C]//IEE-EUREL Meeting on Radar and Sonar Signal Processing, 1998.
- [2] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne Sar Tomography Using Multibaseline L-band Data [J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 2000,38(9): 2142-2152.
- [3] Lombardini F, Reigber A. Adaptive Spectral Estimation for Multibaseline SAR Tomography with Airborne L-Band Data [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium p. July 2003, Toulouse, France.
- [4] Fornaro G, Serafino F, Soldovieri F. Three-dimensional Focusing with Multipass SAR Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(3): 507-517.
- [5] Budillon A, Evangelista A, Schirinzi G. SAR Tomographic Focusing by Compressive Sampling: Experiments on Real Data [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Processings, 2010: 3785-3788.
- [6] Fornaro G, Serafino F, Lombardini F. Three-dimensional Multipass SAR Focusing: Experiments with Long-term Spaceborne Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4):702-714.
- [7] Fornaro G, Lombardini F, Serafino F. Multi-dimensional Imaging with ERS Datap [C]//Fringe Workshop, Frascati, Italy, 2005.
- [8] Lombardini F, Pardini M, Fornaro G, et al. Linear and Adaptive Spaceborne Three Dimensional SAR Tomography: A Comparison on Real Data [J]. IET Radar Sonar Navig., 2009, 3(4):424-436.
- [9] Zhu X X, Adam N, Brcic R, et al. Space-borne High Resolution SAR Tomography: Experiments in Urban Environment Using TS-X Data [C]//2009 Joint Urban Remont Sensing Event.
- [10] 王彦平,王斌,洪文,等. 长时间星载合成孔径雷达数据层析处理技术 [J]. 测试技术学报,2008,22(6):471-477.
- [11] 韩文俊,江长荫. 在大气中 SAR 的额外光程 [J]. 电波科学学报, 2004,19(6):658-662.
- [12] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using the Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5):202-212.
- [13] Tebaldini S, Rocca F. On the Impact of Propagation Disturbances on SAR Tomography: Analysis and Compensation [C]//2009 IEEE Radar conference.
- [14] 王敏,孙希龙,余安喜,等. 基于双星编队 SAR 的差分干涉研究 [J]. 国防科技大学学报,2008,30(4):71-75.
- [15] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A Small-baseline Approach for Investigating Deformations on Full-resolution Differential SAR Interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(7): 1377-1386.