

一种高分辨 SAR 层析成像方法*

孙希龙,余安喜,董臻,孙造宇,梁甸农
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:在城区建筑三维重建中,如何利用非均匀的少量观测数据,在保持方位向-距离向分辨率的同时实现高度向的高分辨成像是 SAR 层析面临的一个主要难题。在确定性点目标模型下,基于 RELAX 算法,提出了一种适用于城区建筑三维重建的 SAR 层析高分辨成像方法。与统计模型下的空间谱估计方法相比,该方法无需多视处理,能够保持方位向-距离向分辨率。与奇异值分解方法相比,该方法具有更优的高度向分辨能力。在仿真数据和 Envisat-ASAR 实测数据处理实验中,该方法的有效性得到了验证。

关键词:合成孔径雷达;层析;高分辨;松弛算法

中图分类号:TN957 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2012)03-0125-06

A high resolution imaging method for SAR tomography

SUN Xilong, YU Anxi, DONG Zhen, SUN Zaoyu, LIANG Diannong

(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the three-dimensional reconstruction of urban areas and man-made infrastructure, the urgent problem of SAR tomography is how to achieve satisfactory elevation resolution with a small number of non-uniform passes and preserve azimuth-range resolution simultaneously. An imaging method for SAR tomography based on RELAX algorithm is proposed in the framework of deterministic models. Compared with the spatial spectral estimation method that works statistically, this method does not need to deal with a spatial multilooking and maintains high resolution of direction dimension-distance dimension. Compared with the singular value decomposition method, this method has much better resolution of elevation dimension. Results obtained by processing simulated data and real data of ENVISAT-ASAR verified the promising potentiality of this imaging method.

Key words: Synthetic Aperture Radar; tomography; high resolution; RELAX

20 世纪末,层析成像技术被引入到合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)中,产生了 SAR 层析技术(SAR Tomography, TomoSAR)^[1],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-高度平面内的二维合成孔径,克服了传统 SAR 二维成像中高度向分辨能力丧失的难题,真正实现了对观测目标的三维成像,近年来受到了国内外众多研究机构和研究者的关注。

当前,SAR 层析数据通常由单天线 SAR 系统的重轨任务获得。由于当前在轨运行的单天线 SAR 系统在设计之初并未考虑 SAR 层析的应用需求,所以对同一目标的重轨观测次数较少,并且轨道间的间隔非均匀。在这种情况下,基于傅里叶变换的方法难以得到令人满意的高度向聚焦效果,旁瓣高且分辨率低。以 Capon 和 MUSIC 为代

表的基于空间谱估计的 SAR 层析成像方法^[2-3]虽然可以得到较好的高度向分辨能力,但是此类方法需要使用独立同分布的多视数据估计观测的协方差矩阵,从而降低了方位向-距离向分辨率。城区建筑的三维重建是 SAR 层析技术的重要应用领域之一^[4]。对于城区建筑目标,强散射元的尺寸小、密度高,需要独立同分布多视数据的 SAR 层析成像方法并不适用^[5]。城区建筑三维重建中,如何利用非均匀的少量观测数据,在保持方位向-距离向分辨率的同时实现高度向的高分辨成像是 SAR 层析中亟待解决的难题。

基于奇异值分解的成像方法(Singular Value Decomposition, SVD)^[6]虽然能够保持方位向-距离向分辨率,但是仅能通过压缩目标的高度向成像范围得到有限的超分辨能力。RELAX 算法^[7]是在 CLEAN 算法基础上发展起来的一种基于非

* 收稿日期:2011-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60903206,61101187);国防科技大学科研计划项目(JC10-04-03)

作者简介:孙希龙(1982—),男,山东高密人,博士研究生,E-mail:longlongsun@sohu.com;

余安喜(通信作者),男,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:yu_anxi@sina.com

线性最小方差(NLS)准则的谱估计算法,具有较好的分辨能力和鲁棒性。文献[8—9]在统计模型框架下,提出基于 M-RELAX (Multilook RELAX) 算法的 SAR 层析成像方法,并使用仿真实验对该方法进行了验证。但是该方法与其他空间谱估计方法相同,都需要多视处理估计观测的协方差矩阵,对城区建筑的 SAR 层析三维成像而言并不适用。本文基于经典 RELAX 算法^[7],在确定性点目标模型下,提出了适用于城区建筑三维重建的 SAR 层析成像方法。该方法对多轨单视数据进行处理,在保持方位向-距离向分辨率的同时实现了高度向的高分辨成像。在仿真数据和 Envisat-ASAR 实测数据处理实验中,本文方法的性能得到了很好的验证。

1 SAR 层析基本原理

为了实现对目标的三维成像,SAR 层析需要沿斜距垂向(normal-slant-range, nsr)形成合成孔径,当前这主要通过单天线 SAR 系统的重轨任务模式来实现。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。首先选取其中一幅图像作为主图像,在通过图像配准和去斜操作后,图像序列中某一分辨单元的复序列可表示为^[6]

$$g(n) = \int_{-s_{\max}}^{s_{\max}} \gamma(s) \exp(j2\pi\xi_n s) ds \quad (1)$$

$$\xi_n = \frac{2b_n}{\lambda r}, n = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, s 为 nsr 向高度, $[-s_{\max}, s_{\max}]$ 为目标的 nsr 向跨度, $\gamma(s)$ 为目标的复散射系数沿 nsr 向的分布函数, λ 为雷达波长, r 为主图像中心斜距, b_n 为垂直基线^[10]。

当垂直基线均匀采样、使用傅里叶变换方法进行高度向聚焦时,根据奈奎斯特定理,无模糊重构范围 $2s_{\max}$ 为

$$2s_{\max} = \frac{\lambda r}{2\Delta b} \quad (3)$$

其中, Δb 为垂直基线采样间隔。SAR 层析的 nsr 向等效合成孔径由垂直基线跨度决定,与等效合成孔径对应的 nsr 向瑞利分辨率(Rayleigh resolution) ρ_s 为

$$\rho_s = \frac{\lambda r}{2B} \quad (4)$$

其中, B 为垂直基线跨度。在单天线 SAR 系统重轨任务模式中,对同一目标的重轨观测数目通常较少,垂直基线跨度小并且采样非均匀。此时,无模

糊重构范围可由平均采样间隔 $\Delta b_{\text{ave}} = B/(N-1)$ 通过(3)式近似得到。由(4)式知,为了得到高度向的高分辨需要具有足够大的垂直基线跨度,但是非均匀采样情况下,基于傅里叶变换的成像方法甚至无法达到(4)式所示的分辨率,所以必须寻求更优的成像方法。

2 基于 RELAX 的 SAR 层析成像

城区场景电磁散射主要包含如下几种主要成分:(1) 倾斜屋角等倾斜面造成的单次散射;(2) 屋脊和屋檐处的边缘散射;(3) 垂直面与平行面间构成的二面角造成的二次散射;(4) 复杂结构造成的三次散射;(5) 粗糙表面造成的漫散射。前 4 种散射的强度较强,散射元尺寸小,通常可以用点目标模型表示^[5]。由粗糙表面引起的漫散射的散射强度较弱,通常被作为杂波。假设某一方位向-距离向分辨单元内存在 K 个强散射元,则(1)式可记为如下形式,

$$g(n) = \sum_{k=1}^K \gamma(s_k) \exp(j2\pi\xi_n s_k) + e_n \quad (5)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots, N$$

其中, s_k 和 $\gamma(s_k)$ 分别为第 k 个强散射元的 nsr 向高度和复散射强度。在单天线 SAR 系统重轨任务所获得的数据中,不可避免地存在着时间去相关、大气相位、形变相位以及杂波等不利因素,在进行 nsr 向聚焦之前必须对其进行补偿,提高数据质量^[6,11]。(5)式中的 e_n 表示对各种不利因素进行补偿之后的残余噪声。由于强散射元的位置 s_k 和散射强度 $\gamma(s_k)$ 是我们所关注的变量,所以 SAR 层析的高度向聚焦可以等效为复正弦信号的参数估计问题,待估参数为 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1}^K$ 。

RELAX 算法是在 CLEAN 算法基础上发展起来的一种基于最小非线性方差(NLS)准则的谱估计算法。RELAX 算法具有较好的超分辨能力,并且对噪声不作任何限定性假设,即使对色噪声也具有较好的鲁棒性和有效性^[7]。将(5)式写为矩阵形式为

$$\mathbf{g} = \mathbf{A}\boldsymbol{\gamma} + \mathbf{e} \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{g} = [g(1) \ g(2) \ \dots \ g(N)]^T \quad (7)$$

$$\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1 \ \mathbf{a}_2 \ \dots \ \mathbf{a}_K]$$

$$\mathbf{a}_k = [\exp(j2\pi\xi_1 s_k) \ \exp(j2\pi\xi_2 s_k) \ \dots \ \exp(j2\pi\xi_N s_k)]^T \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\gamma} = [\gamma(s_1) \ \gamma(s_2) \ \dots \ \gamma(s_K)]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{e} = [e_1 \ e_2 \ \dots \ e_N]^T \quad (10)$$

RELAX 算法通过最小化如下的 NLS 代价函数对各散射元的幅度与高度参量进行估计:

$$C_1(\{\gamma(s_k), s_k\}_{k=1}^K) = \|\mathbf{g} - \mathbf{A}\boldsymbol{\gamma}\|^2 \quad (11)$$

式中 $\|\cdot\|$ 代表欧几里德范数。观察(11)式可知,该 NLS 代价函数对 s_k 而言是非线性函数,但对 $\boldsymbol{\gamma}$ 而言却是线性函数。首先将 NLS 代价函数依据 $\boldsymbol{\gamma}$ 最小化求得 $\boldsymbol{\gamma}$ 的估计为

$$\hat{\boldsymbol{\gamma}} = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H \mathbf{g} \quad (12)$$

其中 $(\cdot)^H$ 表示共轭转置操作。散射元高度 $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_K]^T$ 可通过最小化如下的代价函数获得:

$$C_2(\{s_k\}_{k=1}^K) = \|\mathbf{I} - \mathbf{A}(\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H\| \mathbf{g}\|^2 \quad (13)$$

其中, \mathbf{I} 为单位矩阵。求解(13)式是一个非线性多维最优化问题,需要进行全局极值的多维搜索,计算量相当大,而且可能无法求出最优解。RELAX 算法基于信号分离机理,用迭代的方法将极为复杂的多维搜索问题简化为较简单的多个一维搜索问题进行求解。

假设除第 k 个强散射元外的其他强散射元的参数都已经成功估计出,则通过(12)、(13)式得到第 k 个强散射元的参数估计为

$$\begin{aligned} \hat{\gamma}(s_k) &= \left. \frac{(\mathbf{a}_k)^H \mathbf{g}_k}{(\mathbf{a}_k)^H \mathbf{a}_k} \right|_{s_k = \hat{s}_k} \\ &= \sum_{n=1}^N g_k(n) \exp(-j2\pi\xi_n \hat{s}_k) / N \\ \hat{s}_k &= \arg \max_{s_k} \left\{ \left| \sum_{m=1}^M g_k(n) \exp(-j2\pi\xi_m s_k) \right|^2 \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

其中 \mathbf{g}_k 的定义为

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_k &= [g_k(1) \ g_k(2) \ \dots \ g_k(N)]^T \\ g_k(n) &= g(n) - \sum_{i=1, i \neq k}^K \gamma(s_i) \exp(j2\pi\xi_n s_i) \end{aligned} \quad (16)$$

下面给出基于 RELAX 的 SAR 层析成像的具体迭代步骤:

步骤 1 假设 $K = 1$,

通过(14)和(15)式求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1}$;

步骤 2 假设 $K = 2$,

将求得的 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1}$ 代入(16)式计算得到 \mathbf{g}_2 , 进而通过(14)和(15)式求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=2}$;

将求得的 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=2}$ 代入(16)式计算得到 \mathbf{g}_1 , 进而通过(14)和(15)式重新求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1}$;

重复步骤 2 直至满足内部收敛条件。具体的内部收敛条件将在后面给出。

步骤 3 假设 $K = 3$,

将求得的 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1,2}$ 代入(16)式计算得到 \mathbf{g}_3 , 进而通过(14)和(15)式求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=3}$;

将求得的 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=2,3}$ 代入(16)式计算得到 \mathbf{g}_1 , 进而通过(14)和(15)式重新求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1}$;

将求得的 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=1,3}$ 代入(16)式计算得到 \mathbf{g}_2 , 进而通过(14)和(15)式重新求得 $\{\hat{\gamma}(s_k), \hat{s}_k\}_{k=2}$;

重复步骤 3 直至满足内部收敛条件。

步骤 4 重复上述相同的步骤直至 K 等于实际的强散射元个数或者预先设定的强散射元个数。

上述每一步骤中,当邻近两次迭代中由(11)式所示 NLS 代价函数的变化值小于某个门限 ε_{NLS} , 则认为达到了内部收敛。上述迭代算法中的另一个问题是强散射元个数 K 的估计问题,具体方法可参见文献^[12-13]。对于城区建筑目标,同一方位向-距离向分辨单元内包含的强散射元个数由建筑的结构复杂度决定,通常为 1 至 3 个^[5]。文献[7]证明当设定的强散射元个数大于真值时,RELAX 算法依然能够得到各复正弦参量的稳健估计。所以,在实测数据处理中无需对散射元个数进行精确的估计,通常设定 $K = 3$ 就可以得到较好的聚焦效果,并且不会增加太多的额外计算负担。

3 仿真与实测数据处理

本节将利用仿真实验和实测数据处理实验验证本文方法的性能。使用的实测数据为 Envisat 自 2003 年 10 月至 2007 年 11 月间获得的 20 轨 ASAR 数据,成像目标选定为美国的安那罕天使球场 (Angel Stadium of Anaheim, 北纬 33°48'0.11", 西经 117°52'58.85")。图 1 为球场的 SAR 图像。选取 2005 年 6 月 15 日获得的图像作为主图像,主图像中心斜距 r 为 843130m, 雷达波长 λ 为 0.056m, 入

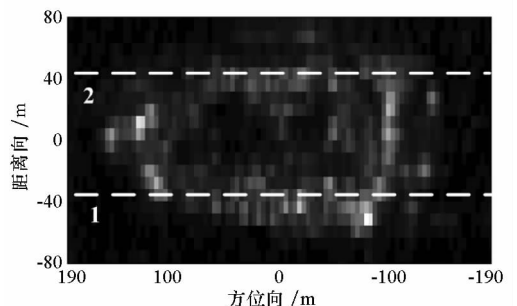


图 1 球场的 SAR 图像

Fig. 1 SAR image of Angel Stadium

射角约为 21° ，垂直基线总跨度为 1403m，垂直基线平均采样间隔为 73.8m。由(3) 式得无模糊重构范围 $2s_{\max}$ 约为 320m；由(4) 式得 nsr 向瑞利分辨率为 16.8m，与之对应的垂直于地面的绝对高度分辨率为 6.02m。图 2 为球场的三维模型，该球场顶棚的最大高度为 42m，距离向远端露天看台的高度为 24m。

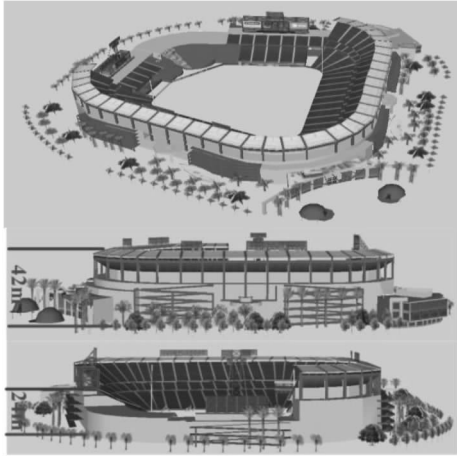
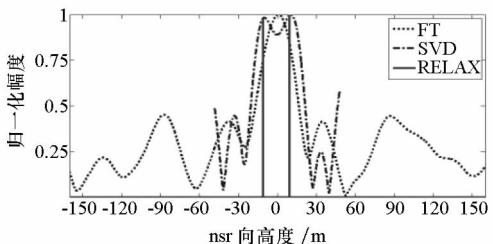


图 2 球场的三维模型

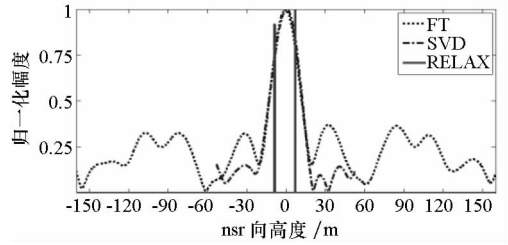
Fig. 2 Three-dimensional model of Angel Stadium

3.1 仿真实验

利用实测数据的系统和轨道参数进行仿真实验。假设加性噪声 e 的每个分量都服从零均值复高斯分布 $CN(0, \sigma^2)$ 且相互独立。首先设定 nsr 向相距 20m 的两个强散射元。两散射元的信噪比 $SNR_1 = SNR_2 = 10\text{dB}$ ，其中第 i 个强散射元的信噪比定义为 $SNR_i = \frac{|\gamma_i|^2}{\sigma^2}$ 。图 3 为傅里叶变换方法、SVD 方法与本文方法的处理结果。虽然两散射元的距离略大于 ρ_s ，但是由于非均匀基线采样的影响，基于傅里叶变换的成像方法仍无法将其分辨，并且结果中存在较高的旁瓣。基于奇异值分解的成像方法通过将成像范围压缩到 $0.6s_{\max}$ ，两个强散射元得到了分辨。在基于 RELAX 的成像中，设定内部收敛条件 ϵ_{NLS} 为 10^{-3} ，nsr 向搜索步长为 1m，最终两目标得到了成功分辨。接下来，将两个强散射元的距离缩短到 15m(低于 ρ_s)，此时傅里



(a) 相距 20m



(b) 相距 15m

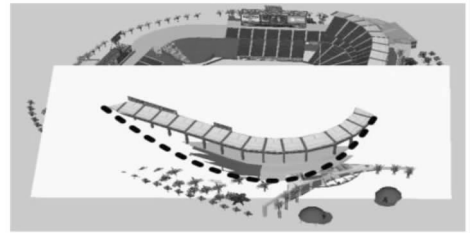
图 3 两个强散射元的成像结果

Fig. 3 Focusing results of two strong scatterers

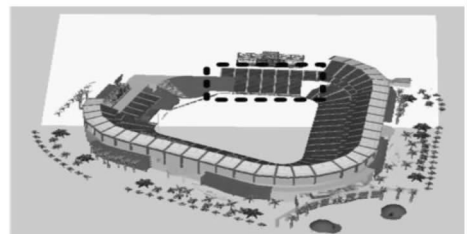
叶变换方法和 SVD 方法都无法将两个强散射元分辨开来，而本文方法仍得到了较好的分辨效果。上面的实验证明本文方法具有明显优于 SVD 方法的分辨能力。

3.2 实测数据处理

利用 Envisat 实测数据对安那罕天使球场进行层析成像，在成像之前使用文献[11]提出的方法对大气相位等进行了补偿。选取具有代表性的两个剖面进行处理，如图 1 中的虚线所示。为了便于对成像结果进行评估，图 4 给出了利用球场的三维模型得到的两个剖面的形状：第一个剖面切过球场的看台顶棚和前墙体，由于球场的金属顶棚和墙体的复杂结构会对电磁波产生较强的散射，所以在图中的抛物线型虚线上会存在强散射元，SAR 层析成像结果也应基本呈虚线所示的形状。此外，一些低矮附属建筑也可能带来强的散射。第二个剖面切过球场的远端看台，由于密集排布的座椅会对电磁波产生二次或多次散射，所以在虚线所示的矩形区域内应存在强散射元。



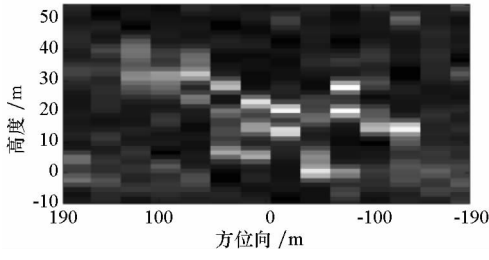
(a) 剖面 1



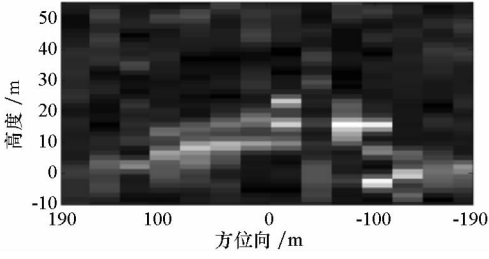
(b) 剖面 2

图 4 三维模型得到的剖面形状

Fig. 4 Sections from three dimension structure



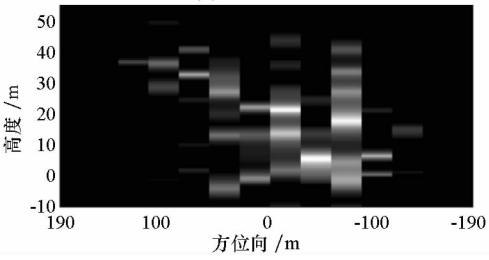
(a) 剖面 1



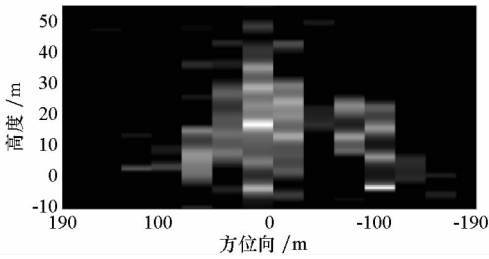
(b) 剖面 2

图 5 Capon 方法处理结果

Fig. 5 SAR Tomography results of Capon



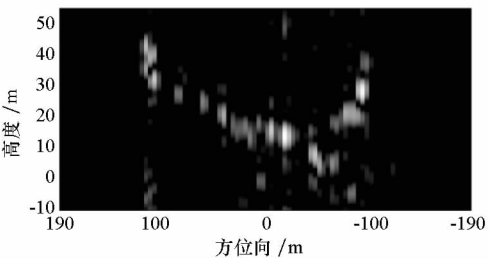
(a) 剖面 1



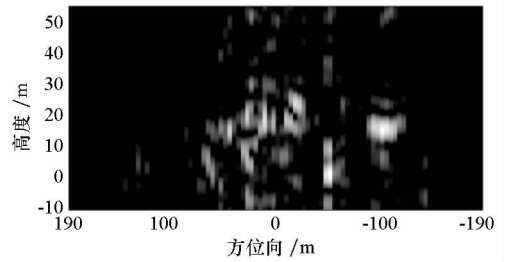
(b) 剖面 2

图 6 MUSIC 方法处理结果

Fig. 6 SAR Tomography results of MUSIC



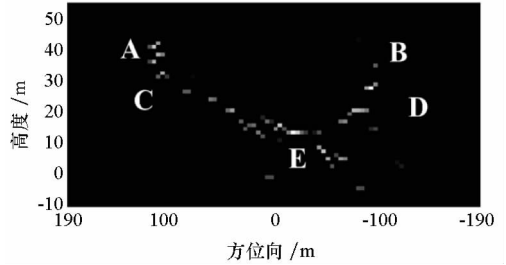
(a) 剖面 1



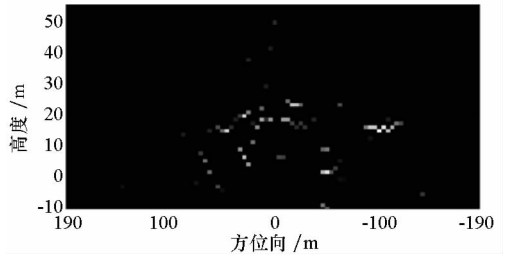
(b) 剖面 2

图 7 SVD 方法处理结果

Fig. 7 SAR Tomography results of SVD



(a) 剖面 1



(b) 剖面 2

图 8 RELAX 方法处理结果

Fig. 8 SAR Tomography results of RELAX

首先,使用 Capon 和 MUSIC 两种方法进行成像,处理中使用 7×3 (方位向 \times 距离向)的窗口估计协方差矩阵。图 5 和图 6 分别给出了处理结果,其中 nsr 向高度已根据雷达入射角转换为垂直于地面的绝对高度。该两种方法处理结果的方位向分辨率明显降低且成像效果较差,基本无法反映球场的高度向结构。这主要是因为强散射元密度高、尺寸小,相邻分辨单元内存在着不同的强散射元,观测数据的数学模型无法很好地满足 Capon 和 MUSIC 方法的前提假设,相邻分辨单元的数据无法准确地等效于快拍数据。接下来,利用 SVD 和本文方法进行成像。在 SVD 方法的处理中,成像范围被压缩到 $1.2s_{\max}$,此范围已经接近于球场的实际 nsr 向跨度。在本文方法的处理中,设定 nsr 向的搜索步长为 3.4m,迭代中内部收敛条件 ϵ_{NLS} 为 10^{-3} ,散射元个数 K 为 3。图 7 和图 8 分别给出了处理结果。这两种方法的处理结果与图 4 中由球场三维模型预测的结果吻合较

好,检测到的顶棚高度为 43m,露天看台的高度为 24m,符合该球场的实际高度。虽然 SVD 方法的成像结果也较好地反映了球场的高度向结构,但是从图 7 和图 8 的对比中可见本文方法具有更优的高度向分辨能力,而且不存在 SVD 方法中的高旁瓣问题。

下面结合球场的三维模型对图 8 中散射元的散射机理进行分析。由于球场的结构较为复杂,对各散射元的散射机理进行精确分析的难度较大,所以下面的分析较为粗略。根据图 4,第一个剖面的 A 和 B 处应该存在由球场顶棚造成的散射,C 和 D 处应该存在由顶棚的四棱形支柱造成的强散射。但是,B 处未出现强散射元,C 和 D 处散射元的强度也存在较大差别。这是由于顶棚和四棱柱的散射具有较强的各向异性,因为各处的人射角不同,所以散射强度也存在较大的差异,甚至无法产生强散射。E 处的散射元应该来自于球场门廊水平屋顶与球场垂直墙面的二次散射,所以具有较强的散射强度。第二个剖面切过球场的远端看台,较强的散射元应该由座椅引起的二次散射引起,较弱的散射元应该由三次散射或者更复杂的散射机理引起。

4 结 论

基于 RELAX 算法,提出了一种高分辨 SAR 层析成像方法。该方法对多轨单视数据进行处理,能够在保持方位向-距离向分辨率的同时实现高度向的高分辨成像。在利用实测数据系统参数和轨道参数进行的仿真实验中,本文方法得到了明显优于 SVD 方法的高度向分辨率。在利用 Envisat-ASAR 实测数据对安那罕天使球场进行的 SAR 层析处理中,本文方法同样得到了较好的成像效果。本文方法对城区建筑目标三维重建的有效性得到了很好的验证。

参考文献 (References)

- [1] She Z, Gray D A, Bogner R E. Three-dimensional SAR imaging via multiple pass processing[C]//Processing of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1999: 35-38.
- [2] Guillaso S, Reigber A. Scatterer characterisation using polarimetric SAR tomography [C]// Processing of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005: 2685-2688.
- [3] 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 Navigation, 2009, 3(4): 424-436.
- [4] 张红,江凯,王超,等. SAR 层析技术的研究与应用[J]. 遥感技术与应用,2010, 25(3): 282-287.
ZHANG Hong, JIANG Kai, WANG Chao, et al. The current status of SAR tomography[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(3): 282-287. (in Chinese)
- [5] Zhu X X, Bamler R. Very high resolution spaceborne SAR tomography in urban environment [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4296-4308.
- [6] 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.
- [7] Li J, Stoica P. Efficient mixed-spectrum estimation with application to target feature extraction [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44(2): 281-295.
- [8] Gini F, Lombardini F, Montanari M. Layover solution in multibaseline SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(4): 1344-1356.
- [9] 任笑真,杨汝良. 一种 SAR 层析成像的 RELAX 改进算法[J]. 数据采集与处理,2010, 25(3): 302-306.
REN Xiaozhen, YANG Ruliang. Improved RELAX algorithm for SAR tomography [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2010, 25(3): 302-306. (in Chinese)
- [10] 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.
WANG Min, SUN Xilong, YU Anxi, et al. Research on differential interferometry for bi-satellite formation SAR [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(4): 71-75. (in Chinese)
- [11] Sun X L, Dong Z, Yu A X, et al. Robust phase correction method for SAR tomography via phase gradient autofocus [C]//Processing of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2011.
- [12] Lombardini F, Gini F. Model order selection in multibaseline interferometric radar systems [J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processings, 2005, 20: 3206-3219.
- [13] Zhu X X, Adam N, Brcic R, et al. Space-borne high resolution SAR tomography: experiments in urban environment using TS-X data [C]// Processing of Joint Urban Remote Sensing Event, 2009: 1-8.