层析 SAR 系统基线优化设计

卢红喜* 刘宏伟 罗涛 索志勇 纠 博 保 铮 (西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 自然场景 3 维影像重构是层析合成孔径雷达(TomoSAR)的重要应用。传统方法在沿高程维进行层析处理时,均通过对等距线阵模型进行加权的方式,以主瓣展宽为代价来抑制方向图旁瓣水平。针对该问题,该文建立一种基于非等距线阵的峰值旁瓣比极小极大优化模型,即在约束主瓣宽度一定的情况下,通过阵元位置的优化配置来获取观测场景视角范围内任意指向的最优旁瓣水平;提出一种目标函数离散栅格化方法,进而采用序列二次规划(SQP)方法并结合差分进化算法特有的全局记忆能力,以获取最优阵元配置方案。对 PolSARpro 全极化层析 SAR 仿真数据的处理结果表明该方法能够有效地应用于自然场景的 3 维影像重构。 关键词: 层析合成孔径雷达;基线优化设计;极小极大最优化;序列二次规划 中图分类号: TN957.51 文献标识码: A 文章编号: 1009-5896(2015)04-0919-07 DOI: 10.11999/JEIT140710

Optimal Baseline Design for SAR Tomography System

Lu Hong-xi Liu Hong-wei Luo Tao Suo Zhi-yong Jiu Bo Bao Zheng (National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Nowadays 3-D reconstruction for natural scene is an important aspect of the Earth observation with SAR Tomography (TomoSAR). The general method for pattern sidelobe suppression, during the tomographic processing, is usually implemented with the weighting of uniform linear array, however at the expense of mainlobe broadening. In this paper, a minimax optimization model for cells configuration is constructed based on non-uniform linear array, to achieve the optimal peak sidelobe ratio with a fixed mainlobe width for any beam direction in the range of perspectives. For this, an objective function rasterisation is proposed and then the optimal solution can be figured out by the Sequence Quadratic Programming (SQP) with differential evolution for its unique ability of global memory. Finally, experimental results with PolSARpro polarimetric TomoSAR data validate the effectiveness of the proposal for natural scene 3-D image reconstruction.

Key words: SAR Tomography (TomoSAR); Optimal baseline design; Minimax optimization; Sequence Quadratic Programming (SQP)

1 引言

层析合成孔径雷达(SAR Tomography, Tomo SAR)3 维成像,具有传统 SAR 全天时全天候、高 分辨率及电磁穿透等优势,能够对自然场景进行 3 维重构,是复杂空间结构检测与识别技术的基础, 在地球遥感、海洋监测、军事侦察、环境保护以及 灾情监测等方面具有广泛应用前景^[1,2]。目前非等距 线阵设计方法主要可分为两大类,一是阵元间距为 半波长整数倍的非均匀线阵,如最小冗余阵列^[3]、最

2014-05-27 收到, 2014-07-31 改回

*通信作者: 卢红喜 xdkd@163.com

大连续延迟线阵^[4]和最小间隙阵列^[5]等,此类方法阵 元间距要求严格使其实际应用受到了较大限制;二 是在阵列孔径和阵元数确定等特定应用背景下的阵 列优化方法,如利用智能仿生学优化算法来实现优 化布阵[6-8],此类方法求解结果受初始值影响较大, 无法保证全局最优; 文献[9]提出一种基于插值的大 规模非线性阵方向图快速优化方法,然而该方法无 法解决局部视角范围内的方向图旁瓣优化问题。针 对这些问题,本文将层析 SAR 系统的基线设计构造 为非等距线阵峰值旁瓣比的极小极大最优化问题, 即在阵列孔径和阵元数确定的情况下,考虑阵列在 观测视角范围内各个方向的聚焦性能,以阵元位置 为自变量,以阵列指向观测范围内各个方向目标点 形成的方向图最大峰值旁瓣比(Peak Side Lobe Ratio, PSLR)为代价函数,建立非线性数学优化模 型。同时,提出一种目标函数离散栅格化方法,将

国家自然科学基金(61271291, 61201285, 61271024, 61201292, 61201283),新世纪优秀人才支持计划(NCET-09-0630),全国优秀博士学位论文作者专项资金(FANEDD-201156)和中央高校基本科研业务费专项资助课题

原问题转换为极小极大优化问题,再结合差分进化 算法(Differential Evolution, DE)特有的记忆能力, 采用序列二次规划方法 (Sequence Quadratic Programming, SQP)获得最优阵元位置配置方案。 为了验证该方法应用于3维重构的有效性,针对机 载单天线 SAR 重复航过^[10]系统,本文采用欧空局 PolSARpro 软件获取的层析 SAR 仿真数据进行了 试验。仿真试验结果表明,在阵列孔径及阵元数一 定的情况下,本文算法可以稳健地获取最优阵元位 置配置方案,能够有效地抑制旁瓣水平并获取观测 场景的3维影像。

2 层析 SAR 系统基本原理与数据获取体制

层析 SAR 系统利用合成孔径原理获得沿航向 高分辨能力,利用脉冲压缩技术实现距离向高分辨 能力,利用波束形成技术获取垂直距离向(cross range,即斜平面法向)的高分辨能力。图 1 所示为 层析 SAR 系统雷达几何示意图, 雷达平台高度为 H, 雷达下视角为 θ , 层析 SAR 系统 N 个天线沿垂 直航向呈直线分布,形成有效孔径长度为L的线性 阵列,线阵倾角为 α (以下考虑有效基线的情况,即 $\alpha = \theta$)。层析 SAR 系统通过距离向脉冲压缩和方位 向合成孔径处理分别对各副天线接收的信号进行成 像,对于各"方位-斜距"分辨单元,联合N副天线 获取的 SAR 图像数据,通过层析处理技术(如数字 波束形成)可区分该分辨单元中沿垂直距离向分布 的各个散射目标,从而获取"方位-斜距-垂直距离 向"分辨单元对应的目标散射特征,实现3维空间 的高分辨成像。

层析处理需要大量不同视角的空间采样,其数据获取体制主要包括单天线 SAR 系统重复航过、多 天线 InSAR 系统重复航过和天线阵列 SAR 系统单 航过等。天线阵列 SAR 系统采用天线阵列单次航过 进行观测即可获取层析 SAR 数据,但系统设计难度 和成本较大,对于机载情况天线阵列孔径也难以提 高。因此,为了降低系统设计的成本和复杂性,空 间采样的增加主要通过重轨观测实现,即采用单天 线 SAR 系统重复航过或多天线 InSAR 系统重复航 过体制。

3 层析 SAR 系统基线优化设计

层析 SAR 系统的基线设计主要考虑垂直距离 向分辨率和不模糊观测范围两方面的问题。为了获 得垂直距离向的高分辨能力,必须保证足够大的垂 直航向孔径长度;为了保证观测场景内不产生模糊, 又要求阵元间距足够小。在满足所需分辨力要求的 情况下,配置过多的阵元会导致数据冗余并增加不 必要的系统载荷或运行成本。因此,应尽量减少阵 元数量(观测次数),但这会引起所需的观测角度内 出现栅瓣和高旁瓣。针对这些问题,本文在选定天 线阵列长度 L (即保证所需的空间角分辨率,约为 λ/2L)的前提下,研究了层析 SAR 系统的基线优化 设计方法,在阵元数量确定的情况下,通过阵元位 置的优化设计抑制观测视角范围内的栅瓣和高旁 瓣,以得到更好的阵列指向性及聚焦性能。

层析 SAR 系统垂直距离向聚焦性能主要由沿 垂直航向分布的天线阵列方向图特性决定。当主瓣 不展宽或展宽系数较小时,天线阵列方向图在观测 视角范围内峰值旁瓣比越低,阵列系统指向性以及 聚焦性能也就越好。对于确定的天线阵列构型,阵 列方向图具有确定的空间分布形式。根据波束空间 传播理论,如图 2 所示,斜距分辨单元r,中的目标 点 D_i 处与斜距分辨单元 r_i 中的目标点 D₁ 处具有相 同的角分辨能力,即其天线阵列方向图的 PSLR 一 致。因而,斜距分辨单元r,中各方向的聚焦性能可 由斜距分辨单元r,(称为参考距离单元)中相应方向 的聚焦性能进行表征。如图 2 所示,参考距离单元 中 AC 段是考虑了天线阵列系统波束同步后,测绘 带场景范围 AB 段沿垂直距离向的投影(目标点 D, 的投影为 D₁)。在实际处理中,可选取场景中心的 斜距单元作为参考。沿垂直距离向的层析处理在 2 维合成孔径成像处理基础之上进行,因而只需抽取 各阵元所录取的对应于同一"方位-距离"分辨单 元的信号进行高程维聚焦即可。基于这一前提,对 于如图 2 中所示的聚焦方向,综合考虑雷达视线跨 越的各个距离分辨单元,进行层析处理所需考虑的 方向图栅瓣模糊及旁瓣抑制范围仅在图中标示的矩 形区域,即认为阵列接收的数据仅仅来源于该矩形 区域范围,而该区域以外没有回波,图中 $\varepsilon = h/\sin\theta$, h为观测场景深度。根据以上分析,非 等距线阵近场阵列基线优化设计的雷达几何等效模 型可简化为如图 3 所示。

层析 SAR 系统的最优基线配置可通过对指向 参考距离单元中各方向目标点的阵列方向图的联合 优化进行实现。如图 3 所示,参考距离单元中考虑 阵列系统波束同步的观测范围为 AC 段, L 为孔径 长度, x_n 为阵元位置, H_s 为阵列到场景中心处的垂 直距离。基于这一雷达几何等效模型,本文将层析 SAR 系统的基线优化设计构造为极小极大最优化问 题,即在阵列有效孔径长度和阵元数量确定的情况 下,综合考虑观测场景范围内各个方向的聚焦性能, 卢红喜等: 层析 SAR 系统基线优化设计



以各阵元的相对位置为自变量,以阵列指向参考距 离单元中各方向目标点形成的天线方向图最大 PSLR为代价函数,建立多元非线性数学优化模型, 并通过非线性最优化方法求解最优的基线配置方 案。若不考虑时间去相干、航迹控制偏差以及航迹 扰动等影响因素,单天线 SAR 系统重复航过和天线 阵列 SAR 系统(可等效为各阵元自发自收)单航过在 层析数据获取上并没有本质的区别。然而,实际中 天线阵列 SAR 系统设计难度大、成本高,且阵列长 度难以提高,无法保证所需的空间分辨率。因此, 下文主要针对机载 SAR 系统重复航过体制探讨和 分析基线优化设计方法。

下面以机载单天线 SAR 重轨系统为例进行分 析,暂不考虑因重轨引起的时间去相干对各幅图像 间相干性的影响,且所形成的有效孔径长度小于极 限基线长度^[11]。如图 3 所示的雷达几何等效模型, 坐标系 3 轴分别为方位向(垂直纸面向外)、垂直距 离向和雷达视线(反)方向, H_s 为雷达平台等效高度 (沿雷达中心视线方向),L为阵列长度,阵元个数 为N,其坐标分别记为 (x_n, H_s) , $n=0, 1, \dots, N-1$ 。 以阵列中心点为参考,第 1 个阵元坐标为 $x_0 = -L/2$,第N个阵元的坐标为 $x_{N-1} = L/2$,阵元坐 标向量记为 $x=[x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]^T$ 。图中AC段为波束 同步观测的场景视角范围,记 $\Omega_0 = [\zeta_a, \zeta_c]$ 。考虑观 测场景中某一方向点目标D,坐标记为 $(\zeta_d, 0)$,则 点目标D对应的数据接收导向矢量为

$$oldsymbol{a}(\zeta_d)$$

 $= \left[e^{j2k\Delta r_0(\zeta_d)}, e^{j2k\Delta r_1(\zeta_d)}, e^{j2k\Delta r_2(\zeta_d)}, \cdots, e^{j2k\Delta r_{N-1}(\zeta_d)} \right]^{\mathrm{T}} (1)$ 式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为电磁波波数, λ 为波长。 $\Delta r_n(\zeta_d) = \sqrt{(\zeta_d - x_n)^2 + H_s^2} - \sqrt{\zeta_d^2 + H_s^2} (n = 0, 1, \cdots, N - 1)$ 为 目标到第 n 个阵元和阵列中心点的单程波程差。由 于各天线为自发自收模式,导向矢量相位对应为双 程波程差。 将天线阵列波束形成指向点目标 D,即以点目标 D的阵列接收数据导向矢量作为权值,则天线阵 列方向图可表述为

$$P(\zeta; \zeta_{d}, \boldsymbol{x}) = \boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\zeta_{d})\boldsymbol{a}(\zeta) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2k(\Delta r_{n}(\zeta) - \Delta r_{n}(\zeta_{d}))}$$
$$= \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2k\cdot\left[\left(\sqrt{(\zeta - x_{n})^{2} + H_{s}^{2}} - \sqrt{\zeta^{2} + H_{s}^{2}}\right) - \left(\sqrt{(\zeta_{d} - x_{n})^{2} + H_{s}^{2}} - \sqrt{\zeta_{d}^{2} + H_{s}^{2}}\right)\right]}$$
(2)

式中, $\zeta \in \Omega_0$, $\forall \zeta_d \in \Omega_0$ 。其中, $x_0 = -L/2$, $x_{N-1} = L/2$, $x_n \in (-L/2, L/2)$, $n = 1, 2, \dots, N-2$ 。利用泰 勒展开式 $\sqrt{1+x^2} \approx 1+x^2/2$, $0 < x \ll 1$, 则式(2)可 表示为

$$P(\zeta; \zeta_d, \boldsymbol{x}) \approx \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_n(\zeta - \zeta_d)}{H_s}}$$
(3)

通过典型参数仿真分析验证,式(3)的近似误差约为-30 dB,满足工程精度要求。

由式(2)可见,对于确定的雷达工作频率和平台 高度 H_s,指向位置 ζ_d 处点目标 D 的阵列波束形成 与阵元位置 x 密切相关,阵列方向图 PSLR 是各个 阵元位置 x 的函数。在等距线阵情况下,阵元间距 d 必须满足奈奎斯特(Nyquist)准则,以抑制高旁瓣和 栅瓣模糊对层析图像的影响。对于非等距线阵,在 观测场景高度范围内不出现栅瓣模糊的有效(即沿 垂直雷达视线方向投影)最大阵元间距必须满足^[12]

$$d \le \frac{\lambda r_0}{2h_n} = \frac{\lambda r_0}{2h} \sin \theta \tag{4}$$

式中, r_0 为雷达观测距离,h为场景深度, θ 为雷达 视角, h_n 为待观测场景沿垂直距离向的高度。因此 所需的最少观测次数为

$$N_{\min} = \left[\frac{L}{d}\right] + 1 = \left[\frac{2Lh}{\lambda r_0 \sin \theta}\right] + 1 \tag{5}$$

其中, F1为向上取整, L为有效孔径长度。在实际 系统设计过程中,如果适当地增加观测次数,阵列 天线方向图的性能还将会得到进一步改善。

对于确定的阵列长度和阵元数量,在约束主瓣 宽度一定的情况下,通过阵元的非等距配置可在最 大程度上保证阵列的指向性,并减小其旁瓣对垂直 距离向聚焦质量的影响。因此,本文综合考虑指向 观测场景内各个目标单元方向的阵列方向图,构建 以阵列指向各方向目标点形成的天线方向图最大 PSLR 为代价函数,以阵元位置x为自变量的多元 非线性数学优化模型,再利用非线性优化方法求解 得到最优的基线配置方案。结合图 3 所示的雷达几 何等效模型,对于观测场景内任意的目标单元位置 ζ_a ,要求在目标单元的邻域[$\zeta_a - \varepsilon, \zeta_a + \varepsilon$]内相应的 方向图 PSLR 最低,则该数学模型可描述为

$$\begin{array}{l}
\min_{\boldsymbol{x}} \quad F(\boldsymbol{x}) = \max_{\zeta_d \in \Omega_0} \quad \operatorname{PSLR}_{\zeta \in \Omega_1} \quad P\left(\zeta; \ \zeta_d, \ \boldsymbol{x}\right) \\
= \max_{\zeta_d \in \Omega_0} \quad \operatorname{PSLR}_{\zeta \in \Omega_1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_n(\zeta - \zeta_d)}{H_s}} \\
\text{s.t.} \quad x_0 = -L/2, \ x_{N-1} = L/2, \ \zeta_{3 \text{ dB}} \le \delta_{hn} \\
\quad x_n \le x_{n+1}, \ n = 0, \ 1, \ \cdots, \ N-2
\end{array} \right\}$$
(6)

其中, $\Omega_0 = [\zeta_a, \zeta_e]$ 为测绘带观测区间, $\Omega_1 = [\zeta_d - \varepsilon, \zeta_d + \varepsilon]$ 为待聚焦层析单元所需考虑的实际观测范 围, $\varepsilon = h/\sin\theta \circ \zeta_{3 dB}$ 为方向图 3 dB 主瓣宽度,模型中约束其低于系统垂直距离向分辨率 δ_{hn} 。目标函数 F(x)为指向场景内各方向目标单元阵列方向图的最大峰值旁瓣比,自变量 x 为阵元位置向量。 PSLR(·)表示在给定的观测区间 Ω 上的峰值旁瓣比 算子,其它参数含义同上。针对式(6)进行变量替换,上述模型可简化为

$$\begin{array}{l}
\underset{\boldsymbol{x}}{\min} \quad F(\boldsymbol{x}) = \max_{\zeta_{d} \in \Omega_{0}} \quad \operatorname{PSLR}_{\zeta \in \Omega_{1}} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_{n}(\zeta - \zeta_{d})}{H_{s}}} \\
= \max_{\zeta_{d} \in \Omega_{0}} \quad \operatorname{PSLR}_{\zeta' \in \Omega'} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_{n}\zeta'}{H_{s}}} \\
= \operatorname{PSLR}_{\zeta' \in \Omega'} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_{n}\zeta'}{H_{s}}} \\
\text{s.t.} \quad x_{0} = -L/2, \ x_{N-1} = L/2, \ \zeta_{3 \text{ dB}} \le \delta_{hn} \\
\quad x_{n} \le x_{n+1}, \quad n = 0, \ 1, \ \cdots, \ N-2
\end{array} \right|$$
(7)

式中, $\zeta' = \zeta - \zeta_d$, $\Omega' = [-\varepsilon, \varepsilon]$ 。

由式(7)可见,式(6)所描述的场景范围 Ω_0 内阵列方向图峰值旁瓣比的极小极大问题,最终可等效 为将波束形成指向目标点 $\zeta' = 0$ 时(而与 ζ_d 无关)的 阵列方向图在观测区间[$-\varepsilon, \varepsilon$]内的峰值旁瓣比最小 化问题。根据式(7)阵列方向图的对称性,峰值旁瓣 比最小化的寻优过程可在观测区间[$0, \varepsilon$]内进行。然 而,由于目标函数具有较复杂的非线性形式,PSLR 的表达形式无法解析求取。因此,本文首先根据系 统分辨率 δ_{hn} 要求所需的主瓣宽度 ζ_{3dB} 计算出方向 图的主瓣第1零陷位置 ζ_0 ,则峰值旁瓣比最小化的 寻优过程可在观测区间[ζ_0, ε]内进行,即目标函数可 表示为

$$F(\boldsymbol{x}) = \operatorname{PSLR}_{\zeta' \in \Omega'} \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_n \zeta'}{H_s}}$$
$$= \max_{\zeta \in \Omega} \quad G_{\boldsymbol{x}}(\zeta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_n \zeta}{H_s}} \right|$$
(8)

式中, $\Omega = [\zeta_0, \varepsilon]$ 。由于第 1 零陷位置 ζ_0 由系统分 辨率 δ_{hn} 限定,式(8)等效于在目标函数中对方向图 的主瓣宽度进行了约束,即 $\zeta_{3 dB} \leq \delta_{hn}$ 。

由于方向图具有非凸性质,旁瓣 $G_x(\zeta)$ 峰值无 法通过常规凸优化方法求解。因此,本文提出了一 种方向图 PSLR 的离散解析表达方法,即以主瓣宽 度的十分之一为间隔对 ζ 进行采样,经离散栅格化 得到 $G_x(\zeta)$ 的离散形式 $G_x(\zeta_m)$,则模型式(7)可转换 为极小极大问题

$$\min_{\boldsymbol{x}} F(\boldsymbol{x}) \doteq \max_{\zeta_m \in \Omega} G_{\boldsymbol{x}}(\zeta_m) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} e^{-j2k \frac{x_n \zeta_m}{H_s}} \right| \\
\text{s.t.} \quad x_0 = -L/2, \quad x_{N-1} = L/2, \\
\quad x_n \le x_{n+1}, \quad n = 0, 1, \dots, N-2$$
(9)

其中, $\zeta_m \in \Omega = [\zeta_0, \varepsilon]$, $m = 1, 2, \dots, M$ 。 ζ_0 为主 瓣第1零陷位置, M 为离散采样点数。

对于有约束的极小极大问题,目前已有成熟算 法进行求解,如 SQP 方法^[13],文献[14]也给出了一 种有效的超线性收敛方法。然而,这些较为成熟的 算法依然无法避免收敛到局部最小的情况,因此本 文在运用 SOP 算法求解式(9)的同时,还结合了差 分进化算法的全局搜索能力,以获取精确的全局最 优解。DE 算法基于差分的简单变异操作和一对一的 竞争生存策略,降低了遗传操作的复杂性并保留了 基于种群的全局搜索策略。同时, DE 特有的记忆能 力使其可以动态跟踪当前的搜索情况,以调整其搜 索策略,具有较强的全局收敛能力和鲁棒性[15]。本 文首先随机初始化若干不同的初始值 x_i^0 ,并通过 SQP 方法解出由各初始值得到的极小点 x_i^* 。然后, 以这些极小点作为粒子,再增加若干随机粒子以增 强其多样性,作为 DE 算法的粒子初始集,利用 DE 算法基于种群的全局搜索策略近似逼近以得到式(7) 的最优解。

以第4节表1的仿真参数为例,结合式(5)可知, 当阵列指向观测场景范围内任意目标单元 ζ_d 时,其 邻域[$\zeta_d - \varepsilon, \zeta_d + \varepsilon$]内不出现栅瓣所需的最少观测次 数为N = 12,此时由模型式(9)得到的非等距配置最 优解也具有高达-15.2 dB的旁瓣水平。通过增加观 测次数 N 并结合模型式(9)可在约束主瓣宽度不变 的情况下进一步降低旁瓣水平。图 4 给出了表 1 中 雷达几何参数下,场景深度分别为h = 10 m, h =30 m 和 h = 50 m 时,场景观测范围内阵列方向图最 优 PSLR 随航过次数(即观测次数 N)的变化曲线。 如图 4 所示,当观测次数增加到 $N \approx [8Lh/\lambda r_0 \sin \theta]$ 时,对应的最优 PSLR 不再有明显的改善。根据表 1 参数的仿真结果,随着观测次数的增加,最优基 线配置中阵元空间位置发生重合的阵元数也随之增 加,而不同的空间位置(以下称为有效空间观测位 置)的阵元数量 N_{eff} 也趋于稳定,有 $N_{\text{eff}} \approx$ $[4Lh/\lambda r_0 \sin \theta]$ 。图 5 给出了基线配置最优时有效空 间观测位置数随着实际观测次数的变化曲线。当阵 元空间位置发生重合时,由于阵元数目确定,相当 于对阵列进行整数加权约束。因此,虽然有效空间 观测位置数趋于稳定,但有效空间观测位置会有所 不同。对于位置发生重合的阵元,其接收信号以加 权的形式叠加到阵列波束形成的输出信号中,相应 的权值即为其位置重合的数量。考虑阵元加权的阵 列基线配置最优化模型可直接根据模型式(7)进行 扩展,因此本文不作深入探讨。

在实际中,单天线 SAR 系统重复航过受时间去 相干影响(尤其是星载情况重访周期较长)严重,且 重复飞行成本较高(如机载情况)。多天线 InSAR 系 统能够很好地弥补这些缺陷,单次航过多副天线既 能获取相干性较好的数据,还能通过较少的重复航 过实现天线阵列孔径提升,其系统设计载荷轻、成 本小、难度低(例如机载三天线 InSAR 系统),也大 大地降低了飞行成本。相比较于单天线 SAR 系统情 况,多天线 InSAR 重复航过系统增加了对阵元位置 的约束,即多天线 InSAR 系统各天线的相对位置确 定,而各次航过观测基线长度可变。此外,由于多 天线 InSAR 系统通常为一发多收模式,单次飞行各 阵元间接收信号的波程差为单程,而各次航过间各 参考阵元接收信号波程差为双程。因此,在模型设



图 4 不同场景深度时最优峰值旁瓣比随阵元数变化曲线

计时还需要将一发多收模式通过等效相位中心原 理^[16]等效为自发自收模式,即各阵元间的波程差为 双程,而各基线长度也对应为等效之后的有效基线 长度。

4 实验与结果分析

本节利用欧空局研发的 PolSARpro 仿真软件验 证了本文提出的层析 SAR 系统基线优化设计方法, 并对仿真得到的 L 波段全极化层析 SAR 数据进行成 像处理^[12],验证了所提算法应用于层析 SAR 系统 3 维成像的有效性。根据表 1 给出的层析 SAR 系统及 观测场景基本参数,求解的最优基线配置结果由表 2 给出,其中各次航过对应的观测位置坐标系统对 应于图 3 所示的雷达几何坐标系。

表1 雷达几何及场景仿真参数

雷达工作频率(Hz)	$1.3 imes 10^9$
载机平台高度(m)	3000
雷达下视角(°)	45
阵列孔径长度(m)	175
阵列倾角(°)	45
观测场景深度(m)	21
航过次数(次)	24

表 2 最优基线配置下空间观测相对位置

航次	位置(m)	航次	位置(m)	航次	位置(m)
1	-87.50	9	-19.36	17	28.35
2	-73.36	10	-8.47	18	33.97
3	-61.83	11	-8.47	19	40.71
4	-50.82	12	1.38	20	48.37
5	-44.17	13	4.26	21	55.57
6	-35.57	14	11.04	22	64.20
7	-30.22	15	16.60	23	76.59
8	-21.25	16	22.18	24	87.50



图 5 不同场景深度时有效空间观测位置数随实际阵元数变化曲线

由上文分析结果可知,当系统航过次数超过 $N_{\text{eff}} \approx [4Lh / \lambda r_0 \sin \theta]$ 时,最优基线配置下的部分空 间观测位置会有所重合。如表 2 所示,各次航过空 间观测位置呈非等距变化,且第 10 次和第 11 次航 过空间观测位置相同。此外,其航过间最大间隔为 14.14 m,也满足小于垂直距离向最大不模糊间距 $d_{\text{max}} = \lambda r_0 \sin \theta / 2h$ 的条件。根据表 2 提供的最优基 线配置方案可计算出观测孔径沿垂直距离向的天线 阵列方向图,且指向测绘带中任意位置的不模糊观 测范围为 $r_{\text{amb}} = 2h / \sin \theta$,约为 59.4 m。基于图 3 所示的雷达几何等效模型,图 6 给出了在最优基线 配置下阵列分别对准目标方位 $\zeta_d = -45$ m (虚线)和 $\zeta_d = 50$ m (实线)时的方向图,可见在局部范围内方 向图性能与阵列指向无关,这一点与上文推导结果 一致。根据文献[6]提出的非均匀线阵方向图优化方 法,对于相同视角范围内的旁瓣抑制问题,图 7 给 出了该算法与本文所提的栅格化目标函数簇极小极 大最优算法的性能对比,可见本文方法能获取更优 的旁瓣抑制性能。

根据表1和表2所提供的层析SAR系统及仿真 场景参数,即可利用欧空局研发的PolSARpro仿真 软件计算全极化层析SAR数据。本试验中设置的仿 真自然场景为包含164棵树的灌木丛林,树高Hv 为21m、种植密度约为48棵/公顷。图8为仿真场 景的下视投影图像,图中给出了仿真场景中的灌木 树高度、树冠大小及其生长分布,其中灰度值表示 每棵树木的实际高度,灰度条为场景内树木的高度 值范围。图9为VV极化通道的层析成像结果方位 向剖面图,其灰度条表示层析图像的像素灰度值范 围,该方位向剖面位置由图8中的虚线切剖线所示。





图 9 SAR 层析成像结果方位向剖面图

为便于 3 维成像结果对比分析,图 10 给出了 VV 极化通道的 SAR 主图像(灰度条表示该图像像 素的灰度值),图 11 为试验仿真自然场景在高程值 为 Hv = 21 m 处的实际剖面情况(灰度值为该树木 的实际高度),图 12 为全极化层析 SAR 3 维成像结 果在高程值为 Hv = 21 m 处的层析伪彩色合成图像 剖面图,图中分别标出了 3 排灌木的真实空间分布 和相应的成像结果。由此可见,本文提出的层析 SAR 系统基线优化设计方法能够有效地应用于自然场景 3 维影像重构。

5 结束语

本文针对层析 SAR 系统的基线设计问题,建立 了机载平台重复航过系统基线优化配置的数学模 型,结合数学优化方法给出了层析系统的基线最优 配置方案。在系统基本参数给定的情况下,本文算 法首先通过构建以阵列指向各方向目标点形成的天 线方向图最大 PSLR 为代价函数,在约束主瓣宽度 一定的情况下,以阵元位置为自变量的多元非线性 数学优化模型,再利用非线性优化方法求解得到最 优的基线配置方案。仿真试验处理结果表明,在阵 列孔径及阵元数一定的情况下,本文算法通过对阵 元位置进行优化配置,能够稳健地抑制旁瓣水平的 影响,有效地获取观测场景的3维影像。



参考文献

- Dinh Ho Tong M, Thuy Le T, Rocca F, et al.. Relating P-band synthetic aperture radar tomography to tropical forest biomass[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(2): 967–979.
- [2] 王金峰,皮亦鸣,曹宗杰. 一种机载 SAR 层析三维成像算法
 [J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1029-1033.
 Wang Jin-feng, Pi Yi-ming, and Cao Zong-jie. An algorithm for airborne SAR tomography 3D imaging[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1029-1033.
- [3] Moffet A T. Minimum-redundancy linear arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1968, 16(2): 172–175.
- [4] Chambers C, Tozer T C, and Sharman K C. Temporal and spatial sampling influence on the estimates of superimposed narrowband signals: when less can mean more[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1996, 44(12): 3085–3098.
- [5] Abramovich Y I, Spencer N K, and Gorokhov A Y. Positive-definite Toeplitz completion in DOA estimation for nonuniform linear antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1999, 47(6): 1502–1521.
- [6] Ahmad A, Behera A K, and Mandal S K. Artificial bee colony algorithm to reduce the side lobe level of uniformly excited linear antenna arrays through optimized element spacing[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Information & Communication Technologies 2013 (ICT 2013), Casablanca, Morocco, 2013: 1029–1032.
- [7] Yang S H and Kiang J F. Optimization of asymmetrical difference pattern with memetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(4): 2297–2302.
- [8] Joshi P and Dubey R. Optimization of linear antenna array using genetic algorithm for reduction in Side lobs levels and improving directivity based on modulating parameter M[J]. *Optimization*, 2013, 1(7): 1475–1482.
- [9] Yang K, Zhao Z, and Liu Q H. Fast pencil beam pattern synthesis of large unequally spaced antenna arrays[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(2): 627–634.
- [10] 钟雪莲,向茂生,郭华东,等. 机载重轨干涉合成孔径雷达的

发展[J]. 雷达学报. 2013, 2(3): 367-381.

Zhong Xue-lian, Xiang Mao-sheng, Guo Hua-dong, *et al.*. Current development in airborne repeat-pass interferometric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(3): 367–381.

- [11] Gatelli F, Guamieri A M, Parizzi F, et al.. The wavenumber shift in SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 855–865.
- [12] Reigber A. Airborne polarimetric SAR tomography[D]. [Ph.D. dissertation], University of Stuttgart, 2001.
- [13] Han S P. A globally convergent method for nonlinear programming[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 1977, 22(3): 297–309.
- [14] 薛毅. 求解 Minimax 优化问题的 SQP 方法[J]. 系统科学与数 学, 2002, 22(7): 355-364.
 Xue Yi. An SQP method for minimax optimazation problem[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2002, 22(7): 355-364.
- [15] Storn R and Price K. Differential evolution a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces[R]. Berkeley: University of California, 2006.
- [16] 李真芳.分布式小卫星 SAR-InSAR-GMTI 的处理方法[D].
 [博士论文],西安电子科技大学,2006.
 Li Zhen-fang. Approaches to SAR-InSAR-GMTI for distributed small satellite SAR systems[D]. [Ph.D. dissertation], Xi'dian University, 2006.
- 卢红喜: 男, 1987 年生,博士生,研究方向为极化 InSAR 信号 处理、多基线 InSAR 信号处理、阵列优化设计与极化层 析成像技术研究.
- 刘宏伟: 男,1971年生,教授,博士生导师,雷达信号处理国家 重点实验室主任,研究方向为自适应信号处理、雷达信 号处理、雷达目标识别等.
- 罗 涛: 男,1982年生,博士生,研究方向为波形设计与 MIMO 雷达.
- 索志勇: 男,1979年生,副教授,研究方向为 SAR 成像和 InSAR 数据处理技术.