

文章编号: 0253-2239(2010)01-0109-08

非相干合成孔径激光成像雷达:体系结构和算法

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所,中国科学院空间激光通信和检验技术重点实验室,上海 201800)

摘要 基于计算机层析投影成像原理,提出了非相干合成孔径激光成像雷达(SAIL)概念以及体系结构和算法,给出了详细的原理说明和数学分析,特点是信号收集和数据处理的技术难度低。该激光雷达包含三种工作模式即传统的聚束模式,逆聚束模式和层析聚束模式,具有两种传感方式即距离分辨成像和多普勒频移成像,提供多种维度变换成像,不仅可用于平面目标的距离或多普勒分辨二维成像,也可实施三维物体的距离分辨三维层析成像以及深度压缩的距离分辨和多普勒分辨二维成像。该雷达结构简单且具有操作多样性,扩展了合成孔径激光成像雷达的应用范围。

关键词 合成孔径激光成像雷达(SAIL);计算机层析术(CT);非相干处理;聚束模式;距离分辨;多普勒频移分辨;三维层析成像;逆合成孔径激光成像雷达

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103001.0109

Incoherently Synthetic Aperture Imaging Ladar: Architecture and Algorithm

Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Key Laboratory of Space Lasercom and Testing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A concept of incoherently synthetic aperture imaging ladar (SAIL) and its architecture and algorithm is proposed on the basis of computerized tomography (CT) and the detailed analysis and mathematics are given. The feature is that the difficulties in the signal collection and data processing are importantly relaxed. The proposed SAIL has three operations of conventional, inverse and CT spotlight modes, includes two sensing techniques of range resolution and Doppler resolution, and provides a variety of dimensional transformations for imaging that not only for 2-D range or Doppler resolution imaging of 2-D targets but also for 3-D range resolution as well as in the depth compressed 2-D range-resolution and 2-D Doppler-resolution imaging of 3-D targets. Due to the simplification in configuration and diversity of operations, it has a great potential for applications in the extensive fields.

Key words synthetic aperture imaging ladar (SAIL), computerized tomography (CT), incoherent processing, spotlight mode, range resolution, Doppler resolution, 3-D tomographic imaging, inverse SAIL

1 引言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理来自于微波合成孔径雷达,是能够在远距离获得厘米量级分辨率的唯一光学成像观察手段^[1,2]。合成孔径激光成像雷达在距离向聚焦成像采用啁啾激光外差接收解斜方法,在方位向的聚焦成像采用孔径合成的方法即空间二次项相位匹配滤波方法,因此合成孔

径激光成像雷达属于空间-时间全相干处理^[2~4],对信号收集和数据处理的时间域^[3,5]和空间域^[6~12]都提出了非常严格的要求,同时涉及光频信号的振幅、偏振、频率、时间相位和空间相位,实施上有非常高的技术难度。

微波合成孔径雷达是无线电频率下的相干处理成像雷达,聚束模式是主要工作模式之一,聚束模式

收稿日期: 2009-10-29; 收到修改稿日期: 2009-11-11

作者简介: 刘立人(1942—),男,研究员,博士生导师,主要从事光折变集成光学,光学测量和仪器,星间激光通信和激光雷达等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shonc.ac.cn

内在含义是依靠激光雷达与目标的相对转动成像。微波合成孔径雷达聚束模式可以采用计算机层析成像的体系和算法进行完整描述^[13],甚至实现三维成像^[13,14]。同样在合成孔径激光成像雷达中也存在聚束模式^[15],但是采用了点目标脉冲响应进行分析。这些聚束模式均是相干孔径合成处理的。

应当注意,计算机层析术(CT)在医疗成像的原始应用中是属于采用 X 射线光强的非相干处理方式,不涉及射线的相位问题^[13],可见计算机层析对于相干处理和非相干处理成像都适用。本文基于 CT 方法,提出了聚束模式的非相干合成孔径的激光成像雷达概念,采用距离分辨或者多普勒频移分辨的目标侧视投影的光强或光场振幅回波信号的时间积分进行数据收集,再通过反向投影或者雷登-傅里叶变换等等的反投影计算方法实现目标重构成像。本方法有如下的明显特点:由于采用非相干处理的孔径合成,不需要考虑光频的时间和空间相位特性,因此大大降低了实施技术难度,简化了雷达硬件结构。本文的非相干合成孔径激光成像雷达提供了三种工作模式,即传统的聚束模式,逆聚束模式和层析聚束模式;包含了两种传感成像方式,即距离分辨成像和多普勒频移成像;提供了多种维度变换成像,即不仅能够实施平面目标的距离分辨和多普勒频移分辨二维成像也能够进行三维物体的距离分辨三维层析成像或深度方向压缩的距离分辨或者多普勒频移分辨的二维成像。本方法具有多样化的操作性,开阔了合成孔径激光成像雷达的应用范围。

国际上之前报道过一种反射层析激光成像雷达的原理和实验^[16,17],也采用计算机层析术的概念和算法,但是只是对于被测物体的横截面观察得到的是物体的表面轮廓像,而本文方法是采用目标的侧视观察得到的是目标的平面像,因此成像方式完全不同。

本文首先给出非相干聚束模式的原理和分类,然后在第三节讨论非相干处理距离分辨聚束模式,在第四节讨论非相干处理多普勒频移分辨聚束模式,在第五节讨论非相干处理聚束模式的三维成像方法,作为与点目标脉冲响应方法的比较在第六节给出了相干处理 SAIL 聚束模式的 CT 层析数学解释。

2 合成孔径激光成像雷达聚束模式及其 CT 数学模型

SAIL 可能的聚束模式包括以下三种:1)传统聚束模式,即 SAIL 作直线运动,在运动中光学足迹恒定地指准在被测目标平面内所关注的成像区域[图 1(a)];2)逆聚束模式,被测目标作直线运动而 SAIL 作跟踪使得光学足迹恒定地指准目标[图 1(b)];3)层析聚束模式,SAIL 与被测目标相对静止,被测目标在光学足迹中只作旋转运动。光学足迹是激光照明光斑和接收视场共同作用的目标面上的可成像面积。

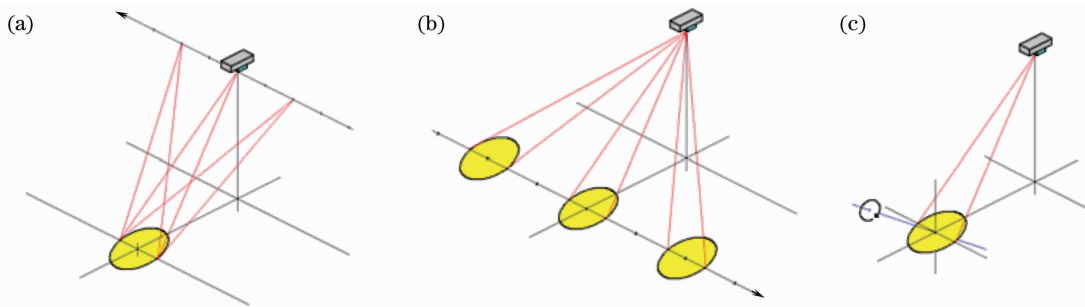


图 1 合成孔径激光成像雷达聚束模式分类。(a) 聚束模式;(b) 逆聚束模式;(c) 层析聚束模式

Fig. 1 SAIL classification of spotlight mode. (a) spotlight mode; (b) inverse spotlight mode; (c) CT spotlight mode

合成孔径激光成像雷达主要由三部分组成:1)激光头,包括激光发射机,光电接收机和光学天线,其作用是进行目标的距离分辨测量或者目标的多普勒频移分辨测量,用于距离分辨时可采用脉冲激光发射和强度直接探测,也可以采用脉冲激光发射和光学外差接收,也可以采用脉冲啁啾激光发射和外差接收及解斜解调,用于多普勒频移分辨时可以

采用连续单频激光发射和光学外差接收;2)光学扫描器,用于目标的精密跟踪;3)图像处理器,前两部分用于目标的数据收集而后一部分用于数据处理进行图像重构。显然可见,本文提出的非相干处理聚束模式 SAIL 的硬件结构远比相干处理的 SAIL^[2~7]简单的多。

对于上述模式中的 SAIL 与目标的相对转动的

描述可以用图 2 统一表示。基准参考面坐标系为 (x, y) ，其垂直轴与雷达的交点为基准参考轴。中间参考面 (x', y') ，其相对于基准面转动 θ 角。目标物面 (x'', y'') ，定义 φ 角 ($0 \leq |\varphi| < \pi/2$) 为水平面倾角(图中给出了 $\pi/2 - \varphi$ 示意)。三个坐标系的重合原点与雷达的距离为 Z 。对于层析聚束模式 θ 角即为目标自旋角，对于传统聚束模式和逆聚束模式可以求得有

$$\tan \theta = \frac{X}{Z} \cos \varphi, \quad (1a)$$

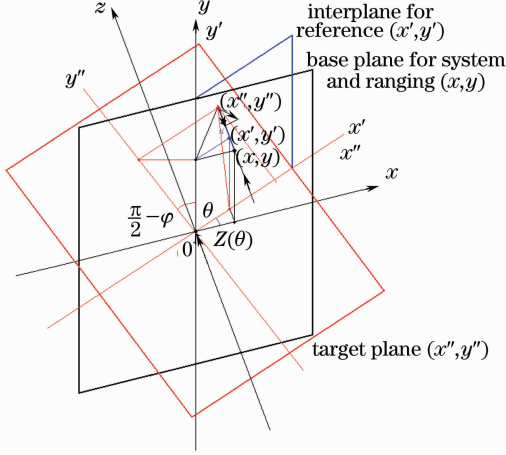


图 2 目标与 SAIL 相对转动的坐标系

Fig. 2 Coordinate system for the relative rotation between target and SAIL

其中 X 为 SAIL 或者目标的移动距离。三个坐标系的重合原点与雷达的距离为 $Z(\theta)$ ，即

$$Z(\theta) = \begin{cases} \sqrt{Z^2 + X^2}, & \text{spot-light mode and} \\ & \text{inverse spot-light mode} \\ Z, & \text{tomographic spot-light} \\ & \text{mode} \end{cases} \quad (1b)$$

垂直于基准参考面的入射点 (x, y) 对于其它两个面的坐标位置由图可以求得为

$$\begin{cases} x' = x / \cos \theta, \\ y' = y, \end{cases} \quad (2a)$$

$$\begin{cases} x'' = x / \cos \theta + y \tan \varphi \tan \theta, \\ y'' = y / \sin \varphi. \end{cases} \quad (2b)$$

3 二维目标非相干处理距离分辨聚束模式

本节讨论二维目标的距离分辨成像，SAIL 进行侧视面激光测距的距离分辨投影，所得到的距离回波信号为光强或者振幅，因为非相干处理而不需要时间相位信息。应当注意，如前所述距离分辨测

量可以采用相干探测也可以采用直接探测，前者具有较高的探测灵敏度但是接收视场受天线口径限制^[8]，后者可以设计更大接收视场和更大天线口径。

3.1 侧视面距离分辨投影积分

SAIL 对于目标的数据收集采用侧视面距离分辨投影积分，由图 2 的关系可以求得目标面上一点 (x'', y'') 所产生的相对于基准面的距离为

$$z = x'' \sin \theta + y'' \cos \varphi \cos \theta. \quad (3)$$

因此目标距离为 Z_k 的等位线方程为

$$y'' = \frac{Z_k}{\cos \varphi \cos \theta} - x'' \frac{\tan \theta}{\cos \varphi}. \quad (4)$$

采用顺时针转动的坐标变换

$$\begin{cases} \alpha = x'' \cos \gamma - y'' \sin \gamma \\ \beta = x'' \sin \gamma + y'' \cos \gamma, \end{cases} \quad (5)$$

在转动角为如下时

$$\tan \gamma = \frac{\tan \theta}{\cos \varphi}, \quad (6)$$

事实上 α 轴平行于等位线，目标点 (x'', y'') 对于基准平面的距离在投影 β 轴上的位置为

$$\beta = \frac{x'' \sin \theta + y'' \cos \varphi \cos \theta}{\cos \theta \sqrt{\tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}} = \frac{z(x'', y'')}{\cos \theta \sqrt{\tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}}. \quad (7)$$

设目标函数为 $p(x'', y'')$ ，如前所述为光强或者场强振幅分布。则沿距离等位线 α 方向上的距离分辨的图像函数在 β 轴上投影的积分为一维函数

$$p_{RR}(\beta; \gamma) = \int p(\alpha \cos \gamma + \beta \sin \gamma, -\alpha \sin \gamma + \beta \cos \gamma) d\alpha. \quad (8)$$

3.2 距离分辨层析解调

采用计算机进行距离分辨 CT 解调来重构目标图像。反向投影算法，滤波反向投影算法和雷登一傅里叶变换是最基本的层析解调方法，其它方法还包括匹配滤波算法，Hough 变换算法等^[13,16,17]。从上述重构算法所得到的像可以进一步采用阈值处理等等的操作进行进一步的图像处理。

具体的 CT 解调原理和方法如下：

1) 反向投影算法

反向投影算法的目标像的层析计算公式为

$$g_B(x'', y'') = \sum_{i=1}^m p_{RR}(\beta; \gamma_i) \Delta \gamma = \sum_{i=1}^m p_{RR}(x'' \sin \gamma_i + y'' \cos \gamma_i) \Delta \gamma, \quad (9)$$

其中 γ_i 为第 i 次投影的等效坐标系转角， $\Delta \gamma$ 是两次投影的角差， i 是投影次数。

为了降低反向投影算法在重建中的条纹效应,提供较好的图像质量,可以使用滤波反向投影算法,即在反向投影之前先采用适当的修正。修正投影 $q_R(\beta;\gamma_i)$ 给定为

$$q_R(\beta;\gamma_i) = \mathcal{F}_1^{-1}\{|f|\mathcal{F}_1[p_R(\beta;\gamma_i)]\}, \quad (10a)$$

其中 \mathcal{F}_1 和 \mathcal{F}_1^{-1} 分别为相对于空间变量 β 的一维傅里叶变换和逆变换, f 为傅里叶变换中的空间频率变量。采用滤波反向投影算法的重建图像为

$$g_{FB}(x'',y'') = \sum_{i=1}^I q_R(x''\sin\gamma_i + y''\cos\gamma_i)\Delta\gamma_i. \quad (10b)$$

2) 雷登-傅里叶变换变换

雷登-傅里叶变换方法基于投影-切片原理,即一个投影的傅里叶变换是该物体二维傅里叶变换的一个切片。因此对于物体作二维傅里叶变换为

$$\mathcal{F}(f_x, f_y) = \mathcal{F}_2[p(x, y)], \quad (11a)$$

对于投影作一维傅里叶变换:

$$P(f_\beta;\gamma) = \mathcal{F}_1[p(\beta;\gamma)], \quad (11b)$$

则根据投影-切片理论,有

$$\mathcal{F}(f_x \cos\gamma, f_y \sin\gamma) = P(f_\beta;\gamma). \quad (11c)$$

可见不同角度测量的投影所产生的傅里叶变换是通过坐标原点上不同直线上的数值分布。因此一系列的投影将产生图像的近似二维傅里叶变换,原则上重构像可以进一步采用逆傅里叶变换产生,其中有可能还需要采取插值或和极坐标-直角坐标变换处理^[13]。

3.3 距离分辨方式的成像分辨率

激光测距采用脉冲激光发射和强度直接探测方式时,激光脉冲宽度为 $\Delta\tau$,考虑到触发光脉冲误差则距离分辨全宽度为 $\Delta z = c\Delta\tau$ 。采用啁啾激光发射和外差解斜解调方式时,啁啾带宽为 B ,则距离分辨全宽度为 $\Delta z = 2c/B$ 。由此,测距误差产生的投影成像全宽度 $\Delta\beta(\theta)$ 为

$$\Delta\beta(\theta) = \frac{\Delta z(x'', y'')}{\sqrt{\sin^2\theta + \cos^2\theta \cos^2\varphi}}. \quad (12a)$$

假定共有 I 个反投影成像, I 个光强或振幅叠加的直径即成为成像点最大值的直径,即取 I 个阈值后的像点直径为

$$d_I = \Delta\beta(\theta = 0) = \frac{\Delta z}{\cos\varphi}. \quad (12b)$$

设 $\gamma = 0$ 和 γ_1 的反投影交叉叠加光强或振幅为 2 的最大区域为成像点的可能最大边缘,代表成像点发散,即有

$$d_2 \approx \frac{\Delta\beta(\theta = 0)}{\sin\gamma_1} = \frac{\Delta z}{\sin\gamma_1 \cos\varphi}. \quad (12c)$$

可见物面倾斜角 φ 越小则成像直径越小;转角间隔 γ_1 越大则成像点发散越小。

根据距离分辨层析的成像分辨率,这里进一步研究非相干聚束 SAIL 的空间相位问题。目前可以认为接收处理电子学的带宽容易达到 1.5 GHz,以此为据激光脉冲宽度为 0.7 ns,则距离分辨率为 10 cm。照明光斑和接收视场对于波前的平度在大约 10 cm 数量级上的要求远比相干处理 SAIL 的宽松的多,因为后者要求为十数到数百个波长的相位二次项^[5~12]。综上所述,非相干聚束 SAIL 可以达到的成像分辨率在原理上低于相干处理 SAIL 大约一个数量级,但是对于光频的空间相位分布和频率时间相位同步相对而言无严格要求。

3.4 数值仿真说明

为了充分理解非相干聚束 SAIL 的侧面 CT 层析投影和重构成像的原理,现在给出一个数值仿真的例子。假定目标面上同时存在两个点目标点 (5, 2) 和 (2, -5) [图 3(a)], 取目标面倾角为 $\varphi = 45^\circ$, 转动角为 9 个值即 $\theta = 0, \pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$, 相当于目标面坐标转角 $\gamma = 0, \pm 7.05^\circ, \pm 14.00^\circ, \pm 20.75^\circ, \pm 27.22^\circ$ 。因此在 9 个 $\beta(\theta)$ 投影轴上所得的一维积分函数如图 3(b) 所示。重构图像的单独的反向投影只举例给出 $\theta = 0$ [图 3(c)], $\theta = 20^\circ$ [图 3(d)] 和 $\theta = -10^\circ$ [图 3(e)] 三种情况,图 3(f) 是最终的所有 9 个反向投影的非相干叠加合成的输出图像,其中两个反向投影线的交叉点即是成像点,与原目标点一致。进一步可以采用阈值等处理,消除投影线噪音,突出像点。

4 二维目标非相干处理多普勒频移分辨聚束模式

在层析聚束模式中,当目标快速转动时多普勒频移效应明显,这时可以采用单频连续激光测量多普勒频移,实现非相干处理多普勒频移分辨层析聚束模式。这时所得到的回波信号为多普勒频移,同样不需要时间相位信息。

4.1 侧视面多普勒频移分辨投影积分

设定目标旋转角速度为 ω , 由图 2 可见某一目标点 (x'', y'') 的旋转臂长为

$$L = \sqrt{x''^2 + (y'' \cos\varphi)^2}, \quad (13)$$

相应的切向线速度为 $V_L = L\omega$ 。因此在基准面法线方向即观察方向上的激光光频的多普勒频移为

$$f_{dpl} = \frac{2\omega}{\lambda}(x'' \cos\theta - y'' \cos\varphi \sin\theta), \quad (14)$$

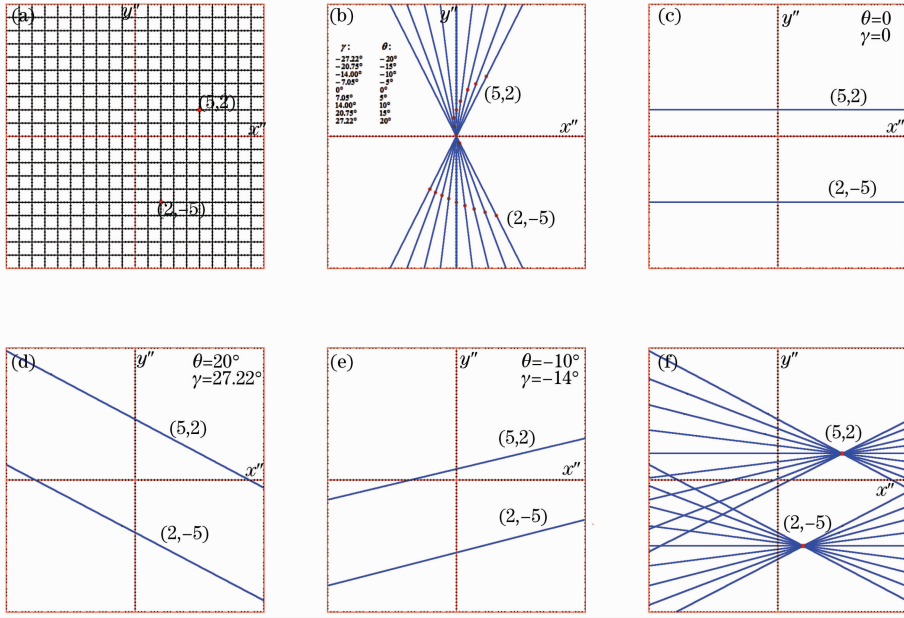


图 3 非相干聚束 SAIL 距离分辨二维成像过程示意

Fig. 3 Schematic of process of the range-resolution two-dimensional imaging from an incoherent spotlight-mode SAIL

某一个多普勒频移 f_{dpl}^k 的等位线方程为

$$y'' = \frac{x''}{\cos \varphi \tan \theta} - \frac{f_{\text{dpl}}^k \lambda / 2\omega}{\cos \varphi \sin \theta}. \quad (15)$$

采用与(5)式相同的坐标变换来定义投影轴方向,则当

$$\tan \gamma = -\frac{1}{\cos \varphi \tan \theta}, \quad (16)$$

某一次投影采样中目标点 (x'', y'') 对于基准平面的多普勒频移在投影轴上的位置为

$$\beta = -\frac{x'' \cos \theta - y'' \cos \varphi \sin \theta}{\sin \theta \sqrt{c \tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}} - \frac{f_{\text{dpl}}(x'', y'') \lambda / 2\omega}{\sin \theta \sqrt{c \tan^2 \theta + \cos^2 \varphi}}. \quad (17)$$

设目标函数为 $p(x'', y'')$ 为场强振幅分布,则沿多普勒频移等位线 α 方向上的多普勒分辨的图像函数在 β 轴上投影的积分为一维函数

$$p_{\text{DR}}(\beta; \gamma) = \int p(a \cos \gamma + \beta \sin \gamma, -a \sin \gamma + \beta \cos \gamma) da. \quad (18)$$

4.2 多普勒分辨层析解调

在距离分辨层析解调中采用的算法均可以应用于多普勒分辨层析解调,例如使用反向投影算法,目标像的计算公式为

$$g_{\text{B}}(x'', y'') = \sum_{i=1}^I p_{\text{DR}}(\beta; \gamma_i) \Delta \gamma = \sum_{i=1}^I p_{\text{DR}}(x'' \sin \gamma_i + y'' \cos \gamma_i) \Delta \gamma. \quad (19)$$

4.3 多普勒频移分辨方式的成像分辨率

假定多普勒频移的测量精度为 $\Delta F = \lambda \Delta f_{\text{dpl}} / \omega$, 投影误差全宽度 $\Delta \beta(\theta)$ 即为

$$\Delta \beta(\theta) = -\frac{\Delta F(x'', y'')}{\sqrt{\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \cos^2 \varphi}}. \quad (20)$$

因此成像点最大值的直径为

$$d_1 = \Delta \beta(\theta = 0) = \Delta F, \quad (21a)$$

而成像点函数最大边缘为

$$d_2 \approx \frac{\Delta \beta(\theta = 0)}{\sin \gamma_1} = \frac{\Delta F}{\sin \gamma_1}. \quad (21b)$$

5 非相干处理聚束模式三维物体成像

三维成像的基本原理是基于上述的二维平面成像,可以把三维物体沿 z 轴并且平行基本目标面 (x'', y'') 作多剖面分解(见图 4),各个剖面延长至旋转轴 y'' 。然后同时对于各个剖面作非相干处理的距离分辨或者多普勒分辨的聚束模式成像,最后再合成出三维图像。

对于第 n 距离剖面,相对于原点基准参考坐标系 $[x''(0), y''(0), z]$, 三维物体可以采用距离剖面方式表达为

$$g[x''(0), y''(0), z] = \sum_n r_n[x''(0), y''(0)] \delta(z + n \Delta Z''), \quad (22)$$

其中 $r_n[x''(0), y''(0)]$ 为在距离 $z = -n \Delta Z''$ 上的物体所有存在的相关点的反射率,而剖面在 z 方向上的间隔为 $\Delta Z''$ 。剖面在 y'' 上的面间隔为 $\Delta Y''$, 则有

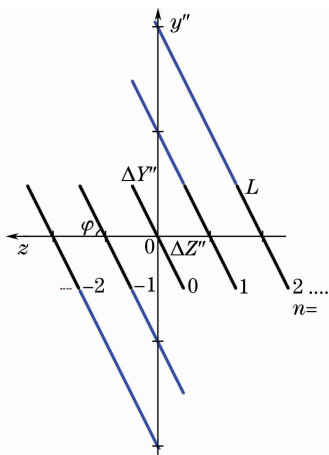


图4 距离方向层析分解剖面及其方位向延拓
Fig. 4 Tomographic layers in the range direction and its azimuth extension

$$\Delta Y'' = \Delta Z'' \tan \varphi. \quad (23)$$

定义第 n 距离剖面的坐标系为 $[x''(n), y''(n)]$, 所有的距离剖面的旋转轴均在 $y''(0)$ 上, 由此该剖面的坐标中心在 $[x''(0) = 0, y''(0) = n\Delta Y'']$ 。从上可知, 第 n 距离剖面的坐标 $[x''(n), y''(n)]$ 对于基准坐标系 $[x''(0), y''(0)]$ 的坐标变换为

$$\begin{cases} x''(n) = x''(0) \\ y''(n) = y''(0) - n\Delta Y'' \end{cases} \quad (24)$$

5.1 三维目标的距离分辨三维和二维成像

在距离分辨下, 第 n 个距离剖面的距离方程为

$$z(n) = x''(n) \sin \theta + y''(n) \cos \varphi \cos \theta = x''(0) \sin \theta + [y''(0) - n\Delta Y''] \cos \varphi \cos \theta. \quad (25)$$

第 n 个距离剖面的目标函数为光强或者场强振幅分布 $r[x''(n), y''(n)]$, 采用与(5)式相同的对于 $[\alpha(n), \beta(n)]$ 的坐标变换, 当转动角为

$$\tan \gamma(n) = \frac{\tan \theta}{\cos \varphi}, \quad (26)$$

则第 n 距离剖面的某一个 $\theta(\gamma)$ 角的目标距离在 $\beta(n)$ 轴上的一维投影为

$$p_{RR}[\beta(n); \gamma] = \int g_n[\alpha(n) \cos \gamma + \beta(n) \sin \gamma, -\alpha(n) \sin \gamma + \beta(n) \cos \gamma] d\alpha(n). \quad (27)$$

在剖面上同样可以采用上述各种层析解调, 使用反向投影算法, 第 n 距离剖面的目标像的计算公式为

$$g_{RR}^n[x''(n), y''(n)] = \sum_{i=1}^I p_{RR}[\beta(n); \gamma_i] \Delta\gamma = \sum_{i=1}^I p_{RR}[x''(n) \sin \gamma_i + y''(n) \cos \gamma_i] \Delta\gamma. \quad (28)$$

得到了所有距离剖面的目标二维像, 则可以求

得物体三维像如下:

$$g_{BRR}[x''(0), y''(0), z] = \sum_{n=0}^{\pm N} g_{RR}^n[x''(n), y''(n) + n\Delta Y''] \delta(z + n\Delta Z''). \quad (29)$$

假定目标在在 y'' 方向宽度为 L_y , 由距离方程(25)式和坐标变换(24)式, 在 $\theta = 0$ 条件下可以求得两个相邻剖面的距离间隔为 $L_y \cos \varphi$, 为了保证距离剖面的投影的积分在距离(时间)上不重叠, 要求距离间隔满足条件

$$\Delta Z'' \geq L_y \cos \varphi. \quad (30)$$

如果三维成像所用的距离剖面的间隔远远达不到上述条件, 将产生三维目标在深度方向压缩的距离分辨的二维像, 具体操作时则不需进行分层, 而只需作一次整体性的投影和解调。

5.2 三维目标的多普勒频移二维压缩成像

在多普勒频移分辨下, 第 n 个距离剖面的多普勒频移方程为

$$f_{dpl} = \frac{2\omega}{\lambda} [x''(n) \cos \theta - y''(n) \cos \varphi \sin \theta]. \quad (31)$$

采用同样的 $[\alpha(n), \beta(n)]$ 坐标变换即(5)式, 当转动角为

$$\tan \gamma(n) = -\frac{1}{\cos \varphi \tan \theta}, \quad (32)$$

第 n 剖面的某一个 $\theta(\gamma)$ 角的目标多普勒频移在 $\beta(n)$ 轴上投影的积分为一维函数

$$p_{DR}[\beta(n); \gamma] = \int p[\alpha(n) \cos \gamma + \beta(n) \sin \gamma, -\alpha(n) \sin \gamma + \beta(n) \cos \gamma] d\alpha. \quad (33)$$

在剖面上同样可以采用上述各种层析解调, 使用反向投影算法, 第 n 剖面的目标像的计算公式为

$$g_{DR}^n[x''(n), y''(n)] = \sum_{i=1}^I p_{DR}[\beta(n); \gamma_i] \Delta\gamma = \sum_{i=1}^I p_{DR}[x''(n) \sin \gamma_i + y''(n) \cos \gamma_i] \Delta\gamma. \quad (34)$$

假定目标在在 x'' 方向宽度为 L_x , 由多普勒方程(31)式在 $\theta = 0$ 条件下可以求得一个剖面的多普勒频移宽度 $2\omega L_x / \lambda$, 而两个剖面之间的多普勒频移间隔近似为零, 即 $f_{dpl}^{n+1}[x''(n+1), y''(n+1)] = f_{dpl}^n[x''(n), y''(n)] + \frac{2\omega}{\lambda} \Delta Y'' \cos \varphi \sin \theta \approx f_{dpl}(n)$ 。因此所有剖面的多普勒目标像不可能在剖面方向 z 上分辨出。所以在得到了所有剖面的目标像后, 仅可能求得三维目标在 z 方向压缩的多普勒频移二维像

$$g_{\text{BDR}}[x''(0), y''(0)] = \sum_{n=0}^{\pm N} g_{\text{DR}}''[x''(n), y''(n) + n\Delta Y'']. \quad (35)$$

事实上具体操作时不需进行分层,而只需作一次整体性的投影和解调。

文献[16]的反射层析激光雷达的多普勒成像实验中,实验对象是具有倾角的旋转三维物体,事实上在原理上已经与该文描述的方法有很大差别,严格意义上应当属于本文提出的多普勒分辨非相干处理聚束模式,即对于一个三维目标产生一个在深度压缩的多普勒频移二维图像。

应当注意在多普勒频移成像下,数据收集时得到的多普勒频移投影不能分辨被测物体的剖面(剖面),因此重构像一般并不相似于原物体^[16],但是仍然具有目标的特征并可以用于目标识别。

6 相干处理聚束模式的层析原理解释

作为与采用点目标脉冲响应的分析方法的对比^[6,15],这里给出聚束模式在相干处理时采用层析算法的数学分析。

相干处理的合成孔径激光成像雷达聚束模式采用脉冲啁啾激光和外差接收,解斜算法测量距离在距离向成像,在方位向采用相干孔径合成,即相位二次项及其匹配滤波。上述相干处理的聚束模式也可以采用距离分辨 CT 算法结构,但是应当严格满足距离方向的时间测量相位同步关系和方位向的空间二次项相位关系。

这时在数据收集过程中,在满足严格的光频外差时间同步条件下,在目标点 (x'', y'') 上经受的相位历程为

$$\varphi(\theta) = \frac{4\pi}{\lambda} \left[(x'' \sin \theta + y'' \cos \theta) \cos \theta + \frac{Z}{\cos \theta} \right], \quad (36a)$$

进一步近似并忽略常数,得到

$$\varphi(\theta) = \frac{\pi}{\lambda} \frac{X^2}{Z/2}, \quad (36b)$$

其中 X 为 SAIL 与目标的相对移动距离, Z 为 SAIL 和目标面的中心距离,事实上 $X = Z\theta$ 。

目标函数为场强振幅分布 $p(x'', y'')$,则在距离向聚焦后在距离等位线 α 方向上的距离分辨的图像函数投影的积分为一维函数

$$p_{\text{RS}}(\beta; \gamma) = \exp\left(j \frac{\pi X^2(\gamma)}{\lambda Z/2}\right) \int p(\alpha \cos \gamma + \beta \sin \gamma, -\alpha \sin \gamma + \beta \cos \gamma) d\alpha = \exp\left(j \frac{\pi X^2(\gamma)}{\lambda Z/2}\right) p_{\text{D}}(\beta; \gamma). \quad (37)$$

然后在图像处理中采用空间二次项相位匹配的反向投影算法(或者上述其它算法),目标像的计算公式为

$$g_{\text{B}}(x'', y'') = \sum_{i=1}^m \exp\left[-j \frac{\pi X^2(\gamma_i)}{\lambda Z/2}\right] p_{\text{RS}}(\beta; \gamma_i) \Delta\gamma = \sum_{i=1}^m p_{\text{D}}(x'' \sin \gamma_i + y'' \cos \gamma_i) \Delta\gamma. \quad (38)$$

其中 $\exp\left[-j \frac{\pi X^2(\gamma_i)}{\lambda Z/2}\right]$ 为匹配滤波器相位函数。

上述采用层析算法的相干处理聚束模式的分析结果与采用点目标脉冲响应^[6,15]的分析结果是一致的。应当注意,聚束模式在微波合成孔径雷达中的空间相位历程是恒值,二次项(即波前曲率)的存在是像点扩散成像质量降低的重要原因^[13]。而对于激光合成孔径雷达,在数据收集过程中产生精确的空间二次项相位是方位向相干合成的必要条件^[6,15]。

如上所述聚束相干 SAIL 比聚束非相干 SAIL 具有更锐的成像分辨率,同时也明显可见具有更高的信噪比,因为对于 N 个信号相干叠加的信噪比为 N^2 而非相干叠加的信噪比为 N 。

7 结 论

根据计算机层析术的投影成像原理,提出了非相干合成孔径激光成像雷达的概念和方法,特点是硬件结构简单,对于光频的空间相位分布和频率时间相位同步无严格要求,因此较大地降低了信号收集和数据处理中的技术难度,但是成像分辨率和信噪比原理上低于相干 SAIL。

提出的非相干 SAIL 具有操作的多样性——能提供三种工作模式即传统的聚束模式,逆聚束模式和层析聚束模式;包括两种传感成像方式即距离分辨成像和多普勒频移成像;多种维度变换成像的可能性,主要适用于平面目标的二维距离分辨和多普勒分辨成像也可以实施三维物体的距离分辨三维层析以及深度压缩的距离分辨和多普勒频移分辨二维成像。其中对于一个三维目标产生深度压缩的二维距离分辨或多普勒频移分辨成像更是一个有用的概念。应当注意到相干 SAIL 很难实现聚束模式,在相对运动中保持远低于厘米数量级成像分辨率的光学足印指精度是极其困难的。

本方法事实上在原理上也包含了用于目标轮廓成像的反射层析激光成像雷达,在数学上使 $\varphi = 0$,则文中距离分辨成像公式和多普勒频移成像公式都

可以简化到反射层析激光成像雷达的成像表达式^[16]。

在数据收集和图像处理时,剖面中心位置的确定是一项非常重要的关键技术,已有多种方法处理^[18],但是本文由于篇幅受限不作进一步讨论。

参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 2 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic Aperture Ladar for Tactical Imaging[R]. DARPA Strategic Technology Office, 2007
- 3 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging ladar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 4 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging ladar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 2030~2032
周煜,许楠,栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光雷达的二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 2030~2032
- 5 R. L. Lucke, M. Bashkansky, J. Reintjes *et al.*. Synthetic aperture ladar (SAL): fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 051 (2002)
- 6 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture ladar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~F13
- 7 Liren Liu. Antenna aperture and imaging resolution of synthetic aperture imaging ladar[C]. *SPIE*, 2009, **7468B**: 74680R1~R13
- 8 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (I): defocused and phase-biased telescope for reception antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 997~1000
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(I): 离焦和相位偏置望远镜接收天线[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 997~1000
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (II): spatial phase biased telescope for transmitting antenna[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1197~1200
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(II): 空间相位偏置发射望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1197~1200
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (III): Circulated duplex telescope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1405~1410
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(III): 双向环路发射接收望远镜[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1405~1410
- 11 Liren Liu. Synthetic aperture ladar (V): imaging resolution and antenna aperture shape[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 12 Liren Liu. Synthetic aperture imaging ladar (VI): space-time speckle effect and heterodyne SNR [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2326~2332
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(VI): 时空散斑效应和外差探测信噪比[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2326~2332
- 13 C. V. Jakowatz, Jr., D. E. Wahl, P. H. Eichel *et al.*. Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996
- 14 C. V. Jakowatz, P. A. Jhompson. A new look at spotlight mode synthetic aperture radar as tomography: Imaging 3-D targets[J]. *IEEE Trans. Image Processing*, 1995, **4**(5): 699~703
- 15 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging ladar (IV): unified operation mode and two-dimensional data collection equation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 1~6
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(IV): 统一工作模式和二维数据收集方程[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 1~6
- 16 C. M. Marino, R. N. Capes, W. E. Keicher *et al.*. Tomographic image reconstruction from laser ladar reflective projections[C]. *SPIE*, 1989, **999**: 248~268
- 17 C. L. Matson, D. E. Mosley. Reflective tomography reconstruction of satellite features-field results[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(14): 2290~2296
- 18 S. D. Ford, C. L. Matson. Projection registration in reflective tomography[C]. *SPIE*, 1999, **3815**: 189~198