

菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达:原理

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 提出了一种菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达的概念, 原理基于对目标进行同轴同心相位二次项偏振正交双光束扫描的光电数据收集以及光学和数字计算空间复相位解调的图像重构。具有两种工作模式即目标移动而光束一维扫描和目标静止而光束二维扫描, 能够实现目标超光学分辨率极限的二维成像并具有三维成像能力。由于实施了空间对时间的传输信号转化并且采用了同轴光束相干探测和复数相位合成, 提高了接收灵敏度和成像信噪比, 大大降低了大气对于激光传输的影响, 允许使用低质量的接收光学系统从而能大大增加接收光学口径而降低激光发射功率, 由于使用了光桥接器使得整体光、电、机械结构更加简单。给出了详细原理叙述和数学分析。

关键词 遥感; 合成孔径激光成像雷达; 菲涅耳望远镜; 相位二次项; 光束扫描; 光桥接器; 相干探测和平衡接收; 复值函数; 时间空间域变换; 重采样插值

中图分类号 TN958 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0128001

Fresnel Telescope Full-Aperture Synthesized Imaging Ladar: Principle

Liu Liren

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

Abstract An idea of Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging ladar is proposed, which is based on the optoelectronic data collection from the relative scanning between target and two cocentric coaxial beams of polarization-orthogonal quadratic wavefronts, and the image reconstruction from the complex quadratic phase decoded with optics and digital processing. It has two operational modes with moving target by 1D beam scanning and statistic target by 2D scanning. The imaging resolution is higher than that from the diffraction limit and 3D imaging is also possible. Because of the transformation of spatial signal to temporary signal and the utilization of coherent detection of coaxial beams, both the imaging S/N ratio and the receiving sensitivity are improved, and particularly the atmospheric influence is decreased greatly, optical receiving system of low quality is allowed to use to increase optical receiving aperture and decrease laser transmitting power. The systematic optoelectronic and mechanical configuration is quite simple due to the use of an optical hybrid. The detailed description of principle and mathematical analysis is given.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; Fresnel telescope; quadratic phase; beam scanning; optical hybrid; coherent detection and balanced reception; complex-valued function; time-to-space domain transformation; resampling interpolation

OCIS codes 280.6730; 110.3175; 050.1970; 100.2000

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

分辨率的唯一的光学成像观察手段, 自 2002 年^[1]在距离向时间同步上取得突破性进展来得到了很大发展^[2~6]。

收稿日期: 2010-10-09; 收到修改稿日期: 2010-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)资助课题。

作者简介: 刘立人(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 目前主要从事空间信息光学方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

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^[1~14],在信号收集和数据处理的时间域^[1,2,7,8]和空间域^[7~14]中都提出了非常严格的要求,涉及光频信号的振幅、偏振、频率、时间相位和空间相位,实施上有极高的技术难度。为了降低难度也有非相干聚束模式合成孔径激光成像雷达的体系结构建议^[15],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同步需要,降低了实施难度和简化了硬件结构,但是成像分辨率和接收灵敏度都有所下降。

本文提出了一种菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达,原理是对目标投射一个扫描的由两个同轴同心偏振正交的球面波组成的光斑。为了能够对任何一个物点实施类似菲涅耳波带片分布的二维编码,对目标进行二维周期性扫描是必要的,因此本成像激光雷达具有两种工作模式:即目标移动而光束作一维周期性扫描和目标静止而光束作二维周期性扫描。目标和光束相互二维扫描将每个目标点的空间二维回波转化为时间流信号,接收端采用同轴相干接收,同时将物体点编码成为一个二维菲涅耳波带结构的复数二次项相位分布,最终通过处理器的匹配滤波重构出物体图像。本文方案的优点为:能够实现目标超光学分辨率极限的高分辨率二维成像,同时具有三维成像能力,由于实施了空间对时间的传输信号转化和采用了同轴相干探测,具备了高接收灵敏度和高成像信噪比的特性,并且极大降低了大气对于激光传输的影响,允许使用低质量接收光学系统从而能大大增加接收口径降低激光发射功率,本文方案的激光雷达光机械结构简单,同时由于采用空间光桥接器实现复数相位合成,电子设备也相当简单。

从相干探测的本振激光束的产生方式看,本文方案的本振激光束事实上是相对于信号光束同轴产生的,两者具有完全相同的目标距离的时间延时,因此自然消除了数据合成所需要的时间和空间同步问题,相对于合成孔径激光成像雷达从而极大降低了技术困难。早期的某些合成孔径激光成像雷达的实验报道^[16,17]事实上是采用距离向横向叠加不同方位向的合成成像结果而实现的,本质上只属于一维孔径合成。国际上之前报道过一种扫描全息电视的原理和实验^[18,19],它对于物体投射一个二维扫描的

光强分布菲涅耳波带片光斑,因此每个物体点被编码成为一个二维菲涅耳波带片结构的光强调制并且转化为时间流信号,接收端把时间信号转化为空间相位信号,采用空间光调制器经过衍射重构出物体图像,在处理中采用了声光调制光频以及余弦拍频和正弦拍频解调合成来产生复数信号,这种系统只适用于静止物体,结构复杂,而且因为采用光强分布的菲涅耳波带片编码而降低了接收灵敏度和成像信噪比,本文方案是从光强投射到双光束场强投射和相干探测的原理上重大发展。目前有一种实现成像激光雷达的新原理,即傅里叶望远镜成像系统^[20,21],这种激光成像雷达把不同取向和不同空间频率的光栅状的激光光斑投向运动目标,目标在运动中扫描这些光栅状空间载波形成目标的空间傅里叶谱,考虑到相类似的激光光斑投射和空间-时间编码方式,本文方案也可以称为菲涅耳望远镜成像系统。

本文首先给出菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达的系统性概述,再以第一种工作模式为基础详细研究整个过程的数据收集和图像处理的数学原理和分析,在这基础上再引入第二种工作模式的分析,最后给出讨论分析。

2 系统概述

菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达的系统结构如图1所示,单频单模激光器的输出光束经过偏振分束器分为等光强和偏振正交的两路光束,左路光束直接通过具有等效焦距 R_l 的相位二次项左通道空间相位调制器,右路光束通过具有等效焦距 R_r 的相位二次项右通道空间相位调制器,两路光束通过偏振合束器再合成为偏振正交的同轴同心光束,然后由发射望远镜和光束扫描器投向目标。光束扫描器使得光束作周期性扫描,对于活动目标将采用一维扫描方式(第一种工作模式),对于静止目标将采用二维扫描方式(第二种工作模式),目标回波由接收望远镜进行光学接收。接收光束经过接收偏振分束镜再重新分解为偏振正交的两路光束并都经过偏振 45° 旋转板后并进入 $2 \times 4 \ 90^\circ$ 空间光学桥接器,该空间光学桥接器由三个偏振分(合)束器和三个 $\lambda/4$ 波片组成,输出四组相互 90° 相移的双光束输出^[22,23],两组同轴输出的双光束由两个光电探测器相干探测并通过消直流的上路平衡接收机接收和转化为时间流电子信号再通过放大和码数转换器处理,另外两组同轴输出的双光束由另外两个光电探

测器相干探测并也通过相应的消直流的下路平衡接收机接收和转化为时间流电子信号再通过放大和码数转换器处理。这两路数字化电子信号通过复数转换器转换为复数数学表达,再通过时间-空间转换器将时间流信号重新转回空间域的空间二次项相位的复数表达信号。目标和光束扫描相互运动产生的目

标点的空间采样是非正交均匀分布的,因此进一步采用重采样插值方法转变为空间坐标正交均匀分布的数据,最后通过相位匹配滤波器使用照明波前的共轭相位二次项通过复相关积分而得到物体的输出图像。另外一种输出的选择是采用相位型空间光调制器,经光源照明后直接产生目标像的视频演示。

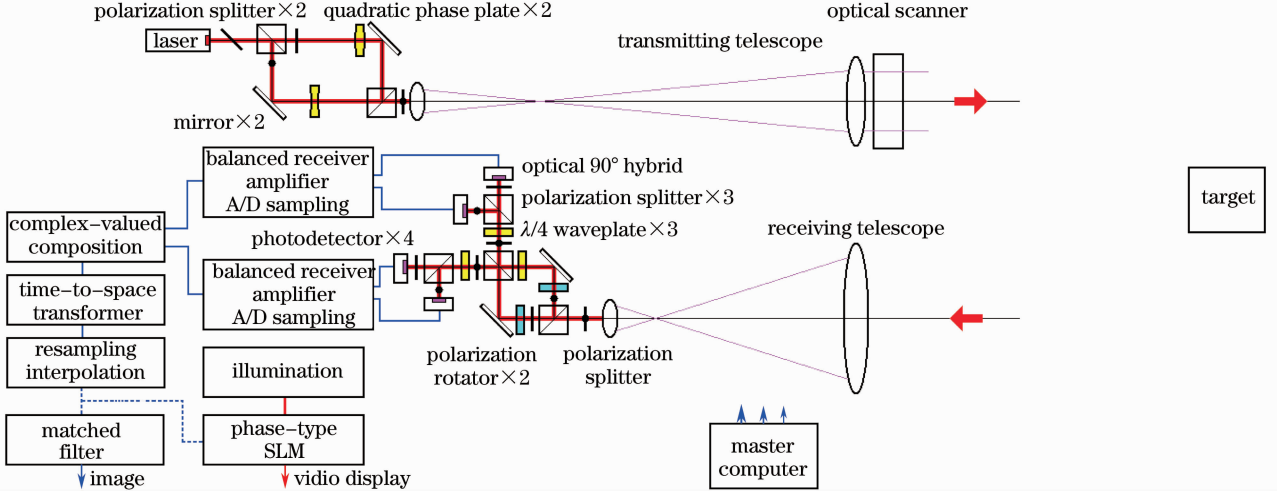


图 1 菲涅耳望远镜全孔径合成成像激光雷达的原理图

Fig. 1 Schematic diagram of Fresnel telescope full-aperture synthesized imaging lidar

为了分析方便这里先定义坐标和时间系统:雷达发射端时间为 t_1 , 目标面时间为 t_2 , 雷达接收端时间为 t_3 , 因此 $t_2 = t_1 - \Delta t_{12}$ 和 $t_3 = t_2 - \Delta t_{12}$, 其中雷达到目标的来回渡越时间为 Δt_{12} , 目标面坐标系统为 (x, y) 。本文以目标面的空间坐标和时间系统为参考坐标系, 其坐标原点位于 $(x = 0, y = 0; t_2 = 0)$ 。

3 第一种工作模式原理

首先详细讨论第一种工作模式, 即对活动目标采用一维光束扫描方式进行数据收集。

3.1 光学发射系统和波面控制

一个在入瞳面进行空间二次项相位偏置的发射望远镜在远场产生的场强可以采用图 2 来研究。

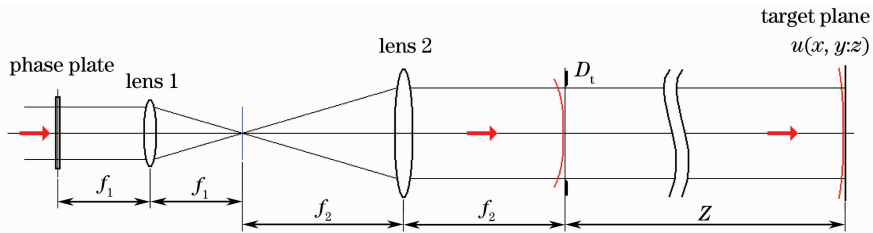


图 2 空间相位二次项偏置望远镜的远场分布

Fig. 2 Far-field distribution from transmitting telescope biased with spatial quadratic phase

设望远镜前后透镜焦距分别为 f_1 和 f_2 , 放大倍数 $M = f_2 / f_1$, 主镜出瞳直径为 D_t , 则在传播距离 Z 上的远场衍射为^[10,11]

$$u(x, y; z) = E \frac{\exp(jkZ)}{j\lambda Z} \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda Z}\right) \frac{\pi d^2}{4} S(x, y),$$

$$S(x, y) = \frac{2J_1\left(\frac{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda Z}\right)}{\pi d \sqrt{x^2 + y^2} / \lambda Z}.$$

令相位平板的调制函数为 $p_1(x, y) = \exp\left(\pm j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda R}\right)$,

则在出瞳上产生相位函数 $p_2(x, y) = \exp\left(\pm j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda R M^2}\right) / M^2$,

最终的远场分布为 $u(x, y; z) = A \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda Z}\right) \times \left[\exp\left(\mp j\pi R M^2 \frac{x^2 + y^2}{\lambda z^2}\right) \otimes S(x, y) \right]$.

其中的卷积部分根据二维函数的稳相法^[24]可以求得为

$$\iint \frac{J_1\left(\frac{\pi d \sqrt{(\alpha-x)^2 + (\beta-y)^2}}{\lambda z}\right)}{\sqrt{(\alpha-x)^2 + (\beta-y)^2}} \exp\left[\mp j\pi \frac{\alpha^2 + \beta^2}{\lambda \frac{z^2}{R M^2}}\right] d\alpha d\beta = \mp \frac{2\pi \exp\left(j \frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi}{\lambda} \frac{R M^2}{z^2}} \frac{J_1\left(\frac{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda z}\right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \exp\left[\mp j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda \frac{z^2}{R M^2}}\right].$$

因此, 相位二次项偏置的望远镜的远场场强为

$$u(x, y; z) = A S(x, y) \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \exp\left[\mp j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda \frac{z^2}{R M^2}}\right]. \quad (1)$$

(本文为了简化数学表达, 所有公式中的复系数都用常数表示。) 所以, 图 1 目标面上的两个照明场的波前分别为

$$\begin{cases} E_L(x, y; t_2) = A_1 S[x, y - y_w(t_2)] \exp\left\{\frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2 + [y - y_w(t_2)]^2}{R_L}\right\} i \exp[j(2\pi f t_2 + \Delta\varphi_L)] \\ E_R(x, y; t_2) = A_1 S[x, y - y_w(t_2)] \exp\left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2 + [y - y_w(t_2)]^2}{R_R}\right] j \exp[j(2\pi f t_2 + \Delta\varphi_R)] \end{cases}, \quad (2)$$

式中波前等效曲率半径分别为

$$\frac{1}{R_L} = \frac{1}{Z} + \frac{(-M^2 f_1)}{Z^2} \text{ 和 } \frac{1}{R_R} = \frac{1}{Z} + \frac{(-M^2 f_r)}{Z^2},$$

$\Delta\varphi_L$ 和 $\Delta\varphi_R$ 分别为两通道的相延(以后将包括所有相延时), 等效的艾里斑半径为 $r_0 = 1.22 \frac{\lambda Z}{D_t}$ 。事实上这两个波前不产生任何干涉, 但是隐含着菲涅耳波带片分布, 如果采用 45° 方向的检偏镜对这两个波前进行偏振干涉即可以产生菲涅耳波带的光强分布。

3.2 目标扫描轨迹

一个目标点 $(x_i, y_i; t_2 = 0)$ 的运动速度为 v 和运动方向为 θ (如图 3 所示), 其运动函数可以表达为

$$f_i(x, y; t_2) = f(x_i, y_i) \delta[x - (x_i + v t_2 \cos \theta), y - (y_i + v t_2 \sin \theta)]. \quad (3)$$

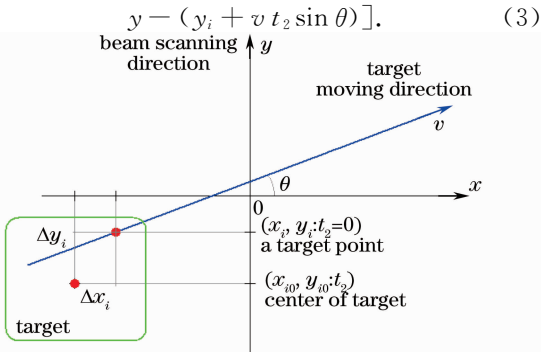


图 3 目标的运动

Fig. 3 Movement of target

光束扫描函数 $y_w(t)$ 为线性扫描, 同时假定 $t_2 = 0$ 时光斑中心在 y 轴最上面, 振幅为 Y_m , 因此周期为 T 的线性周期扫描可以用三角函数表达为

$$y_w(t) = Y_m \sum_{n=0, \pm 1, \pm 2, \dots} (-1)^n \text{tri}\left(\frac{t - n \frac{T}{2}}{\frac{T}{4}}\right). \quad (4)$$

如图 4 所示, 目标点在光斑中的运动轨迹为

$$\begin{cases} x = x_i + v t_2 \cos \theta \\ y = y_i + v t_2 \sin \theta - y_w(t_2) \end{cases}. \quad (5)$$

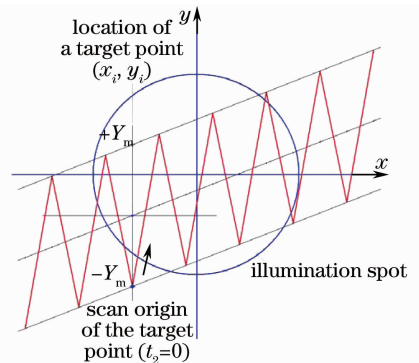


图 4 目标点对于照明光斑的扫描轨迹

Fig. 4 Scanning locus of a target point on

illumination spot

3.3 信号收集和处理

接收信号为时间信号, 以 t_2 和物面坐标为参考, 可以采用偏振矢量 (i, j) 的表达方法为

$$\begin{cases} e_L(t_2) = A_2 f(x_i, y_i) S[x_i + vt_2 \cos \theta, y_i + (vt_2 \sin \theta - y_w(t_2))] \times \\ \exp\left\{\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)]^2}{R_L}\right\} i \exp[j(2\pi ft_2 + \Delta\varphi_{L1})] \\ e_R(t_2) = A_2 f(x_i, y_i) S[x_i + vt_2 \cos \theta, y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)] \times \\ \exp\left\{\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)]^2}{R_R}\right\} j \exp[j(2\pi ft_2 + \Delta\varphi_{R1})] \end{cases} \quad (6)$$

这时, $2 \times 4 \ 90^\circ$ 空间光学桥接器的上路和下路光学平衡接收的输出分别为

$$\begin{aligned} i_{i,A}(t_2) &= A_3 f^2(x_i, y_i) S^2[x_i + vt_2 \cos \theta, y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)] \times \\ &\cos\left\{\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)]^2}{R_{\text{equ}}} + \Delta\varphi_{\text{RLi}}\right\}, \\ i_{i,B}(t_2) &= A_3 f^2(x_i, y_i) S^2[x_i + vt_2 \cos \theta, y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)] \times \\ &\cos\left\{\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)]^2}{R_{\text{equ}}} + 90^\circ + \Delta\varphi_{\text{RLi}}\right\}. \end{aligned}$$

式中 $\Delta\varphi_{\text{RLi}} = \Delta\varphi_{\text{Ri}} - \Delta\varphi_{\text{Li}}$, $\frac{1}{R_{\text{equ}}} = \frac{(-M^2 f_1)}{Z^2} - \frac{(-M^2 f_r)}{Z^2}$ 。当 $f_r = -f_1$ 时, $|R_{\text{equ}}| = \frac{Z^2}{2M^2 f_{1,r}}$ 。

上述两个三角函数先进行码数转换, 然后实施复数化, 即 $i(t) = i_A(t) + ji_B(t)$ 。因为接收合成的复数时间流解析信号为

$$\begin{aligned} i_{i,AB}(t_2) &= A_4 f^2(x_i, y_i) S^2[x_i + vt_2 \cos \theta, y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)] \times \\ &\exp\left\{j\left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vt_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vt_2 \sin \theta - y_w(t_2)]^2}{R_{\text{equ}}} + \Delta\varphi_{\text{RLi}}\right]\right\}. \end{aligned} \quad (7)$$

假如采样周期为 Δt_2 , 则上述复数化的采样数学信号应当为

$$\begin{aligned} i_{i,AB}(t_2 = n\Delta t_2) &= A_5 f^2(x_i, y_i) \exp(j\Delta\varphi_{\text{RLi}}) S^2[x_i + vn\Delta t_2 \cos \theta, y_i + vn\Delta t_2 \sin \theta - y_w(n\Delta t_2)] \times \\ &\exp\left\{j\left[\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x_i + vn\Delta t_2 \cos \theta)^2 + [y_i + vn\Delta t_2 \sin \theta - y_w(n\Delta t_2)]^2}{R_{\text{equ}}}\right]\right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

复数化的函数仍然为时间函数, 因此需要实现时间域到空间域的变换, 以恢复信号的空间域表达。目标物面的坐标原点 (x_{i0}, y_{i0}) 的时间信号采用(7)式的扫描路径的反推可以恢复为二维空间分布, 其在 $t_2 = 0$ 时的相位二次项的中心设定在坐标 $(0, 0)$ 上, 即为 $S^2(x-0, y-0) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x-0)^2 + (y-0)^2}{R_{\text{equ}}}\right]$ 的(7)式扫描采样分布。可以看到, 所有其它目标点的时间信号均按同样的时间过程恢复空间分布, 因此目标点 $(x_i = x_{i0} + \Delta x_i, y_i = y_{i0} + \Delta y_i)$ 所恢复的二维空间分布的中心位于 $(-\Delta x_i, -\Delta y_i)$, 即为 $S^2(x + \Delta x_i, y + \Delta y_i) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x + \Delta x_i)^2 + (y + \Delta y_i)^2}{R_{\text{equ}}}\right]$ 的(7)式扫描采样分布。应当注意, 事实上激光雷达的接收信号相对于物面坐标还有一个时间延时 Δt_{12} , 在时间域到空间域的变换前应当从接收信号中扣除, 因此精确确定目标时延是关键技术问题之一。

按照(7)式采样方式恢复的空间分布复数数据属于非正交非均匀采样, 因此为了适合于傅里叶变换等数字算法必须采用空间坐标系变换及其重采样插值方法将其变换成正交坐标规则采样^[25], 这时所得到的目标点的正交坐标规则采样函数完全可以表达为

$$\begin{aligned} i_i(x, y) &= \sum_m^n B_i \exp(j\Delta\varphi_{\text{RLi}}) S^2(x + \Delta x_i - n\Delta L, y + \Delta y_i - n\Delta L) \times \\ &\exp\left[j\frac{\pi}{\lambda} \frac{(x + \Delta x_i - n\Delta L)^2 + (y + \Delta y_i - n\Delta L)^2}{R_{\text{equ}}}\right], \end{aligned} \quad (9)$$

式中 ΔL 为采样距离间隔。

最后, 通过信号的相位二次项的共轭匹配滤波可以得到目标的像, 即有

$$E_i(x, y) = \sum_i i_i(x, y) \otimes \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda} \frac{x^2 + y^2}{R_{\text{match}}}\right) =$$

$$\sum_i B_i \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) \iint S^2(x + \Delta x_i - n\Delta L, y + \Delta y_i - n\Delta L) \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(\alpha + \Delta x_i)^2 + (\beta + \Delta y_i)^2}{R_{\text{equ}}}\right] \times \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda} \frac{(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2}{R_{\text{match}}}\right] d\alpha d\beta. \quad (10)$$

容易看到,在满足相位匹配条件 $R_{\text{equ}} = R_{\text{match}}$ 以及理想情况下有

$$E_i(x, y) = \sum_i B_i \exp(j\Delta\varphi_{RLi}) \delta_i(x + \Delta x_i, y + \Delta y_i). \quad (11)$$

得到了目标的所有物点的成像的集合,即目标成了像。

也可以将所得到的目标正交坐标规则采样函数[(8)式]输入相位型空间光调制器,调整复数化时的相位二次项的符号,能够以实像或者虚像的方式重构目标视频像。

4 第二种工作模式原理

第二种工作模式是对静止目标采用二维光束扫描方式采样。设光束作二维正交扫描,令 $\theta=0$ 和 v 为扫描器光束在 x 方向的扫描速度,则第一种工作模式的所有数学分析都可以直接采用。

5 分析和讨论

照明光斑的波面曲率为 R_{equ} ,其半径 r_0 上的相位二次项半波数为 $N = \frac{r_0^2}{\lambda R_{\text{equ}}}$,其中 $r_0 = 1.22 \frac{\lambda Z}{D_t}$ 。波面曲率 R_{equ} 的半径 r_0 上的最小半波宽度为 $\Delta r_{\text{min}} = \frac{\lambda R_{\text{equ}}}{2r_0}$,因此在光斑直径上的横向采样数应当至少为

$$K_x = 2 \frac{r_0}{\Delta r_{\text{min}}} = 4N. \quad (12)$$

二维采样数为 $K = K_x \times K_y$,纵向采样数一般为 $K_y = K_x$ 。一般应当选择光束扫描器的振幅半宽度 $Y_m = r_0$ 。

因为目标运动或者扫描器另一维扫描造成的光束横向扫描周期为 $d_x = vT \cos \theta$,考虑到扫描周期内的平均采样数为 2,所以要求光束扫描周期为 $T = \frac{2\Delta r_{\text{min}}}{v \cos \theta}$,总的扫描时间为 $T_{\text{total}} = 2NT$,因此点采样的速率为

$$V_{\text{spl}} = \frac{K^2}{T_{\text{total}}} = \frac{8N}{T}, \quad (13)$$

这时采样周期为 $\Delta t_2 = \frac{T}{8N}$ 。

已知照明直径 $D_{\text{illu}} = 2r_0$,由衍射极限的成像分

辨率定义可知系统理想成像分辨率为 $d = 2.44 \times \frac{\lambda R_{\text{equ}}}{D_{\text{illu}}}$,或者理想成像分辨率(点成像直径)表达为

$$d = \frac{D_t R_{\text{equ}}}{Z}. \quad (14)$$

比较合成孔径激光成像雷达和微波合成孔径雷达的结构设计,可以认为 $R_{\text{equ}} = Z/2$ 的是一种标准设计,这时有 $d = D_t/2$,即成像分辨率为发射天线口径的一半,这与合成孔径激光成像雷达和微波合成孔径雷达的结论完全一致,也证明了本文是一种超光学分辨率极限的激光雷达。

激光雷达方案具有三维成像的可能。一个三维目标其物点具有纵向不同距离,如相对于坐标中心的位置差为 ΔZ_i ,则目标点距离为 $Z + \Delta Z_i$,由(2)式可知其照明波前曲率半径不同,即由(7)式所得的接收信号形成的二次项等效聚焦不同,因此不论使用匹配滤波成像或者空间光调制器衍射成像都能够实现三维成像,但是应当合理设计目标纵向深度对平均距离的比值。

6 结 论

菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达采用两个同轴同心偏振正交的球面波扫描目标,将每个目标点的回波转化为时间流信号,接收端采用同轴相干接收,同时将物体点编码成为一个复数二次项相位分布,最终通过处理器的匹配滤波重构出物体图像。激光雷达属于全孔径合成工作原理,因此能够实现目标的超光学分辨率极限的高分辨率二维成像,同时具备高接收灵敏度和高成像信噪比的特性,并大大降低了大气对于激光传输的影响。所以允许使用低质量大口径接收光学系统以期最大程度降低激光发射功率,光机械结构和电子设备简单,总之是一种能够有效克服大气湍流影响的高分辨率成像激光雷达。激光雷达有两种工作模式即目标移动而光束一维扫描和目标静止而光束二维扫描,具有广泛的应用范围。本文方案具有三维成像能力,因此还可以实现扫描全息三维电视。

激光光源可以采用连续激光或者脉冲激光,这种选择与所要求的点采样速率,使用波长及其激光

器类型有关。采样速率较低时宜用重复频率脉冲激光,以获得较高的单脉冲激光能量。

采样速率较高时必须采用高重复频率或者连续激光器。本文给出的光束扫描是典型的线性扫描,实际上也可以采用其它形式的扫描,在一定条件下能够实现正交规则采样而避免重采样插值。也可以参照傅里叶望远镜的结构^[21]采用多重双光束发射,

这时只需要目标运动而不需光束扫描就可以实现成像。

事实上除了典型的合成孔径激光成像雷达外,还有两种基于合成原理的激光成像雷达,即非相干聚束模式合成孔径激光成像雷达^[15]和本文的菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达,下面给出它们的特点,供设计参考。

| 种类 | 非相干聚束模式合成孔径激光成像雷达 | 合成孔径激光成像雷达 | 菲涅耳望远镜全孔径合成的成像激光雷达 |
|-----------|---------------------------------|--|--------------------------------|
| 基本原理 | 距离向和方位向均距离(或多普勒)分辨成像 | 距离向斜视距离分辨成像,方位向孔径合成成像 | 距离向和方位向均孔径合成成像 |
| 目标和雷达运动方式 | 斜视中心旋转(一维) | 直线或者中心旋转(一维) | 相对二维扫描 |
| 工作方式 | 不同方向上距离(或多普勒频移)分辨数据收集,计算机层析算法重构 | 距离向啁啾激光去斜解调和傅里叶变换变换聚焦成像,方位向相位二次项历程匹配滤波聚焦成像 | 同轴双二次项波面扫描数据收集,空间相位二次项匹配滤波聚焦成像 |
| 处理模式 | 非相干处理(较容易) | 两轴相干处理(困难) | 同轴相干处理(较容易) |
| 关键技术难点 | 目标相对旋转中心的精确确定 | 啁啾差频的时间同步,相位历程的精确空间二次项产生(难度最高) | 目标距离延时的精确确定 |
| 大气湍流影响 | 小 | 方位向有影响 | 小 |
| 成像分辨率 | 约5倍测距分辨率(较低) | 约光学天线孔径一半(高) | 约光学天线孔径一半(高) |
| 应用方向 | 空间活动目标成像 | 对地对空观察 | 特别适合于大气环境下使用 |

参 考 文 献

- 1 M. Bashkansky, R. L. Lucke, E. Funk *et al.*. Two-dimensional synthetic aperture imaging in the optical domain[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1983~1985
- 2 S. M. Beck, J. R. Buck, W. F. Buell *et al.*. Synthetic-aperture imaging lidar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
- 3 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic Aperture Lidar for Tactical Imaging[R]. DARPA Strategic Technology Office, Nov. 14, 2007
- 4 Zhou Yu, Sun Jianfeng, Luan Zhu *et al.*. Aperture-synthesizing experiment of a down-scaled synthetic aperture imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2446~2448
周煜, 孙建锋, 栾竹等. 尺度缩小合成孔径激光成像雷达的孔径合成实验[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2446~2448
- 5 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of a point target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 556~568
周煜, 许楠, 栾竹等. 实验室合成孔径激光成像雷达点目标二维成像实验[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 556~568
- 6 Zhou Yu, Xu Nan, Luan Zhu *et al.*. 2D imaging experiment of a 2D target in a laboratory-scale synthetic aperture imaging lidar [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
- 7 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture lidar[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 7094F1~13

- 8 Liren Liu. Antenna aperture and imaging resolution of synthetic aperture imaging lidar[C]. *SPIE*, 2009, **7468B**: 74680R1~13
- 9 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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
- 10 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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
- 11 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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
- 12 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging lidar (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
- 13 Liren Liu. Synthetic aperture lidar (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(IV): 成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- 14 Liren Liu. Synthetic aperture imaging lidar (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
- 15 Liren Liu. Incoherently synthetic aperture imaging ladar: Architecture and algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 110~116
- 刘立人. 非相干合成孔径激光成像雷达:体系结构和算法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 110~116
- 16 T. J. Green, Jr., S. Marcus, B. D. Colella. Synthetic-aperture-radar imaging with a solid-state laser[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30): 6941~6949
- 17 S. Yoshikado, T. Aruga. Feasibility study of synthetic aperture infrared laser radar techniques for imaging of static and moving objects[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(24): 5631~5639
- 18 T. C. Poon, M. Wu, K. Shinoda *et al.*. Optical scanning holography[C]. *Proc. IEEE*, 1996, **84**(5): 753~764
- 19 T. C. Poon. Three-dimensional television using scanning holography[J]. *J. Information Display*, 2002, **3**(3): 12~16
- 20 R. B. Holmes, S. Ma, A. Bhowmik *et al.*. Analysis and simulation of a synthetic-aperture technique for imaging through a turbulent medium [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1996, **13**(2): 351~364
- 21 E. L. Cuellar, J. Cooper, J. Mathis *et al.*. Laboratory demonstration of a multiple beam Fourier telescope imaging system[C]. *SPIE*, 2008, **7094**: 70940G-1~12
- 22 R. Garreis, C. Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. *SPIE*, 1991, **1522**: 210~219
- 23 Zhou Yu, Wan Lingyu, Zhi Yanan *et al.*. Polarization-splitting 2×4 90° free-space optical hybrid with phase compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 周煜, 万玲玉, 职亚楠等. 相位补偿偏振分光 2×4 90°自由空间光学桥接器[J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3291~3294
- 24 A. W. Lohmann. *Optical Information Processing*[M]. Z. Yu and G. Jing Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 1987. 96~104
- 罗曼. *光学信息处理*[M]. 虞祖良和金国藩译. 北京: 清华大学出版社, 1987. 96~104
- 25 W. G. Carrara, R. S. Goodman, R. M. Majewski. *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms* [M]. Norwood, MA: Artech, House 1995