

双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达原理

刘立人

中国科学院上海光学精密机械研究所 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 提出了一种双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达系统, 结构上采用正交偏振同轴双光束发射和偏振干涉自差探测结构, 原理上应用波面变换产生双曲波前差照射光斑, 因此通过目标的相对运动在交轨向自动扫描产生目标面横向距离有关的线性相位调制, 同时在顺轨向产生目标顺轨向距离有关的二次项相位历程, 采用补偿二次多普勒频移的傅里叶变换和补偿交叉耦合的共轭二次项匹配滤波算法实现图像重构。本系统主要特点是结构简单, 无需使用任何光调制器, 没有交轨向信号的初始相位同步问题, 不存在目标时间延时影响, 同时也保留了直视合成孔径激光成像雷达的固有优点, 如有效地降低了大气等相位干扰, 照明光斑可以很大, 接收口径可以很大。本雷达适用于航空航天各种相对运动速度和作用距离的对地观察成像和基于逆合成孔径原理的激光成像雷达。

关键词 遥感; 合成孔径激光成像雷达; 直视合成孔径激光成像雷达; 波面变换; 双曲波面; 自动扫描线性相位调制

中图分类号 TN958

文献标识号 A

doi: 10.3788/AOS201535.0128001

Principle of Auto-Scanning Synthetic Aperture Imaging Ladar Using Hyperbolic Wavefront Difference

Liu Liren

Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technique, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract A kind of auto-scanning down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL) is proposed, which in construction uses two coaxial orthogonally polarized beams in transmitter and polarization interference based self-heterodyning detection in receiver and in principle adopts the wavefront transformation to generate illumination wavefronts with a hyperbolic spatial phase difference. Therefore, the wavefront scanning from the relative movement of target produces automatically the necessary linear phase modulation in the orthogonal direction of travel, and the quadratic phase history in the travel direction as well. The image is reconstructed by virtue of the Fourier transform with the Doppler quadratic compensation in the orthogonal direction of travel and the conjugate quadratic phase matched filtering with the crossed coupling compensation in the travel direction. The system is very simple in structure. Optical modulator isn't used. The initial phase synchronization for linear phase modulations doesn't exist. The time delay of target doesn't exist, too. And the advantages of the original down-looking SAIL remains such as the availability of big receiving aperture and big optical footprint, and the capability of suppression of phase interferences from atmospheric turbulence and others. The suggested SAIL is of practical potentials to applying for spaceborne and airborne observation or inverse-SAIL radar under every workable distance and speed.

Key words remote sensing; synthetic aperture imaging ladar; down-looking synthetic aperture imaging ladar; wavefront transformation; hyperbolic wavefront; auto-scanning linear phase modulation

OCIS codes 280.6730; 280.3640; 110.2990; 110.7348; 100.2000

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-10

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

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

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)的原理取之于射频领域的合成孔径雷达原理,是能够在远距离得到厘米量级成像分辨率的唯一的成像观察手段。合成孔径激光成像雷达有两种不同的体系原理^[1-2],即侧视合成孔径激光成像雷达和直视合成孔径激光成像雷达。侧视SAIL在距离方向(也称为交轨方向)实行斜距分辨成像,在方位方向(也称为顺轨方向)实行孔径合成成像。直视SAIL在交轨方向实行目标面横向距离分辨成像,在顺轨方向实行孔径合成成像。对于这两种SAIL其在顺轨向合成孔径成像的实现都要求在顺轨向获取目标的二次项相位历程,这是一个自然的过程因此不需要对激光进行任何时间调制,而它们在交轨方向的距离分辨成像则必须对于发射激光实施某种时间调制。

侧视SAIL的距离分辨成像的一种实现方法是采用啁啾激光发射和光学外差去斜解调接收的方法^[1-6],激光的线性频率调制采用变化激光器腔长的调制原理,即需要压电机械调制器。侧视SAIL的另外一种距离分辨成像的实现是采用窄脉冲激光内相位编码调制的测距原理^[7-8],需要使用电光振幅调制器和电光相位调制器。直视SAIL的距离分辨成像的实现采用发射波面变换和扫描产生横向距离线性相位调制的原理^[1-2,9-12],需要采用电控机械平移扫描或机械偏转扫描的方案。此外,从总体结构看这些合成孔径激光成像雷达的激光光源需要工作于具有一定重复频率的脉冲模式,因此也需要采用电光振幅调制器将连续激光转换为重复率脉冲激光。由此可见,包含电光,压电和电机械机理的实现光频振幅调制,光频相位调制,光频率调制,光学元件运动,光束偏转作用的光调制器是SAIL的必要器件。但是,采用光调制器增加了系统的复杂性和在航空航天应用上的坚固性。对于窄脉冲激光内相位编码调制系统而言,需要高速高带宽电子和数字处理,这又大大增加了电子系统的难度和复杂性。而机械性光调制器件一般不能实现高重复率运行,因此难于应用于高速航天航空使用。

上述的直视SAIL和侧视SAIL是在慢时间周期上发射快时间激光脉冲,对于所有的单个激光发射与接收采样信号之间都必须具有相关的光和电子学的时间同步关联,使得在顺轨向上分布的交轨向聚焦像之间具有相同的初始相位,这需要一种特殊的高精密光电子系统。同时,目标的作用距离将产生回波信号的时间延时,但是当回波信号的延时超过发射脉冲周期时激光发射信号需要寻求和识别它关联的回波脉冲,这种复杂技术限制了雷达的作用距离,用于远距离探测变得困难。此外,直视SAIL和侧视SAIL是在最多一个顺轨向分辨单元运行时间内进行目标的交轨向线性相位项数据的收集,并实施傅里叶变换交轨向聚焦成像,因此表征接收能量累积的最大积分时间为一个分辨单元时间或距离,可以预期增大回波接收的积分时间或距离可以提高系统的接收灵敏度。

本文的目的在于克服上述现有技术的困难,提供一种双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达,其采用连续激光,工作于同轴偏振正交双光束投射成像发射和偏振干涉自差光电探测接收方式,采用静止光学元件将激光平面波面转换为一种复合双曲波面,其包含了交轨向和顺轨向坐标相耦合的空间双曲面波前差和顺轨向空间二次项相位波前差,该复合双曲波面通过发射主镜投射成像于目标面,目标的回波在雷达接收端中通过偏振干涉自差方式的光电接收,回波信号包含了交轨向和顺轨向坐标交叉耦合的空间双曲面波差和顺轨向的空间二次项相位波前差,目标对于复合双曲波面的相对运动在交轨向自动扫描产生与目标横向距离有关的线性相位调制,而同时在顺轨向产生与目标顺轨向距离有关的二次项相位历程,成像算法由补偿二次多普勒频移的傅里叶变换和补偿交叉耦合的共轭二次项匹配滤波组成,分别实现交轨向聚焦成像和顺轨向聚焦成像。因此,双曲波前差自扫描直视SAIL不需要任何形式的光调制器,不需要发射和接收之间的光和电子的同步关联,结构十分简单,同时不存在回波延时的影响,具有较高系统接收灵敏度,也保留了直视SAIL的固有优点,如非常有效地降低了大气、运动平台、光雷达系统本身等相位干扰的影响,照明光斑可以很大,接收口径可以很大,因此能够获得较大的光学足趾和较强的回波接收功率,不需要光学延时线,允许使用低质量的接收光学系统,采用直视观察时目标反射率高并无成像阴影,以及可以在所有方位实现观察。适用于航空航天各种相对运动速度和作用距离的对地观察成像,特别适用于高速和远距离目标的成像观察,也可以用作探测空间活动目标的基于逆合成孔径原理的激光成像雷达。

2 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达的基本结构

双曲波前差自扫描直视 SAIL 的基本结构由发射端和接收端构成,如图 1 所示。发射端在系统控制计算机的控制下,连续激光光源输出的偏振光束经过发射偏振分束器 1(PBS1)在空间上被偏振分解为两个等强度的偏振正交的光束,一路为水平偏振光束通过空间相位变换器 1,再通过孔径光阑 1,然后通过空间相位变换器 2 到达发射偏振合束器 2(PBS2),空间相位变换器 1 和空间相位变换器 2 的联合相位构成水平偏振通道的空间相位。另外一路为垂直偏振光束,通过空间相位变换器 3 再通过孔径光阑 2,然后通过空间相位变换器 4,到达发射偏振合束器 2,空间相位变换器 3 和空间相位变换器 4 的联合相位构成垂直偏振通道空间相位。两路偏振正交光束通过偏振合束器 2 合成同心同轴光束,并经过发射主镜和目标作用距离的衍射传播投射成像于目标。水平偏振空间相位产生目标面上的水平偏振照射波前,垂直偏振空间相位产生目标面上的垂直偏振照射波前。在接收端目标回波由接收望远镜接收,并由偏振干涉自差探测光电接收机产生回波光电流信号,再通过模数转换(A/D)及预处理器产生数字化光电流信号,然后储存于存储器,存储器的数据再通过图像处理和系统控制计算机产生目标成像的输出图像。目标面上的发射激光照明光斑与接收视场应当设计为一致,其共同的作用面积定义为光学足址。

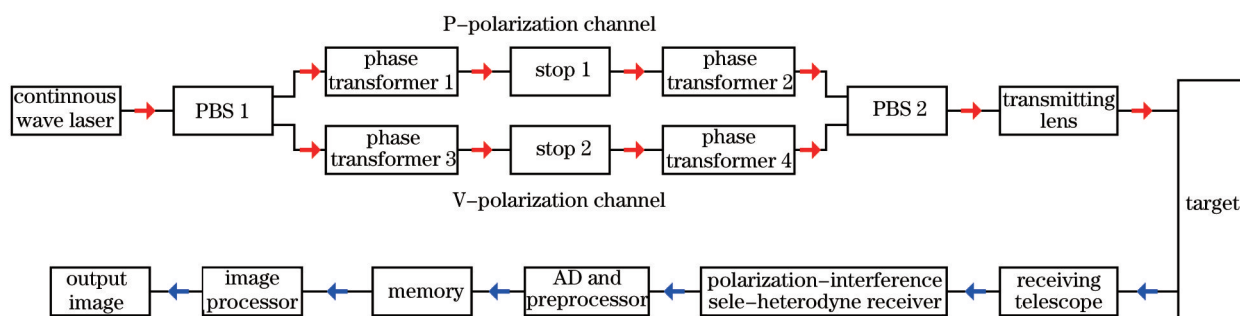


图 1 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达的一般结构

Fig.1 General configuration of auto-scanning SAIL using hyperbolic wavefront difference

所述的回波光电流信号包含了左臂照射波前和右臂照射波前的空间相位差,即目标面上两个偏振正交光斑的空间相位差,其存在的必要条件是目标面上的空间相位差必须包含交轨向坐标和顺轨向坐标相耦合的双曲波面波差和顺轨向坐标的二次项波面波差的两项波面波差,用数学表达为

$$\exp[j\Delta\varphi(x,y)] = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda F_x}(x-S)y\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda F_y}y^2\right], \quad (1)$$

式中 x 为交轨向坐标, y 为顺轨向坐标, F_x 为双曲面等效交轨向曲率半径, F_y 为顺轨向相位二次项的曲率半径, S 为双曲面波差中心在交轨向的偏置量,当双曲波面波差光学中心与发射透镜光轴一致时 $S=0$ 。 S 也代表交轨向线性相位调制项的中心零位偏置。

满足上述数学关系的空间相位变换器 1, 2, 3 和 4 为柱面镜,柱面镜组合或者无光学元件,其中最多 3 个可为无光学元件。它们有两种组合结构: 1) 水平偏振通道和垂直偏振通道中均可能包含顺轨向柱面镜和 45° 取向柱面镜,但是水平偏振通道和垂直偏振通道至少含有一个顺轨向柱面镜和一个 45° 取向柱面镜; 2) 水平偏振通道和垂直偏振通道均可能包含近 45° 取向柱面镜,但是水平偏振通道和垂直偏振通道中至少含有一个近 45° 取向柱面镜。偏振干涉自差探测光电接收机可以采用 2×4 的 90° 空间光桥接器的同相和 $\pi/2$ 移相双通道输出结构,或者采用偏振分光棱镜和两个光电探测器的平衡接收结构,或者采用单一检偏镜和单一光电探测器结构,前者双通道输出结构需要在预处理中实现复数化处理。应当注意光电接收机结构的选择与双曲波面波差中心和发射透镜光轴的相对位置布置密切相关,当 $S=0$ 时必须采用上述双通道探测结构,当 S 足够大时也可以采用其它探测结构。A/D 变换及预处理器产生的数字化光电流信号,用距离表示其基本采样周期为 d_s , 应当有 $d_s = D_y/N$, 其中 D_y 为顺轨向光学足址宽度, N 为正整数是顺轨向光斑宽度内的采样数; 信号处理的顺轨向读出间隔为 d_l , 应当有 $d_l = d_s P_1$, P_1 为正整数, 读出宽度为 $D_k = K d_s$, 其中 K 为正整数, 因此光斑宽度对顺轨向读出宽度之比为 $G = N/K$ 。

上述的记录和读出的周期关系应当满足采样定律:在顺轨向应当有 $d_1 = d_y/P_2$, 其中 d_y 为顺轨向成像分辨率, $P_2 \geq 2$; 在交轨向应当有 $d_s \leq \frac{d_x}{4G(\frac{1}{2} + \frac{S}{D_x})}$, 其中 d_x 为交轨向成像分辨率, D_x 为交轨向光学足址宽度。

成像算法由实现交轨向聚焦成像的补偿二次多普勒频移相位项的傅里叶变换和实现顺轨向聚焦成像的补偿交叉耦合的共轭二次项匹配滤波所组成, 顺轨向的补偿匹配滤波聚焦成像算法有两种, 第一种方案为倾斜向线性相位项补偿和倾斜向局部卷积共轭二次相位项匹配滤波算法, 第二种方案为倾斜向线性相位项加共轭二次项补偿和倾斜向积分求和算法。

3 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达的一种典型结构设计

为了具体说明双曲波前差自扫描直视 SAIL 的工作原理, 图 2 给出了一种典型的实施结构。实施例结构部件相对于基本原理结构部件的对应关系如下: 激光光源 → 激光光源; 偏振分光镜 1 包括反射镜 1 和反射镜 2 → 发射偏振分束器; 柱面透镜 1 → 水平偏振通道空间相位变换器 1; 孔径光阑 1 → 孔径光阑 1; 柱面透镜 2 → 水平偏振通道空间相位变换器 2; 柱面透镜 3 → 垂直偏振通道空间相位变换器 3; 孔径光阑 2 → 孔径光阑 2; 柱面透镜 4 → 垂直偏振通道空间相位变换器 4; 偏振分光镜 2 包括 1/4 波片 1 和 1/4 波片 2 → 发射偏振合束器; 发射主镜 → 发射主镜; 目标 → 目标; 接收望远镜包括干涉滤光片和视场光阑 → 接收望远镜; 偏振分光镜 3, 1/4 波片 3, 1/4 波片 4, 反射镜 3, 反射镜 4, 2×4 90° 空间光学桥接器, 平衡探测器 1, 平衡探测器 2 → 偏振干涉自差探测光电接收机; A/D 变换器 1, A/D 变换器 2 和复数化转换器 → A/D 变换及预处理器; 回波数据储存器 → 回波数据储存器; 图像处理和系统控制计算机 → 图像处理和系统控制计算机; 输出图像 → 输出图像。注意本实施方案中 $S=0$ 。

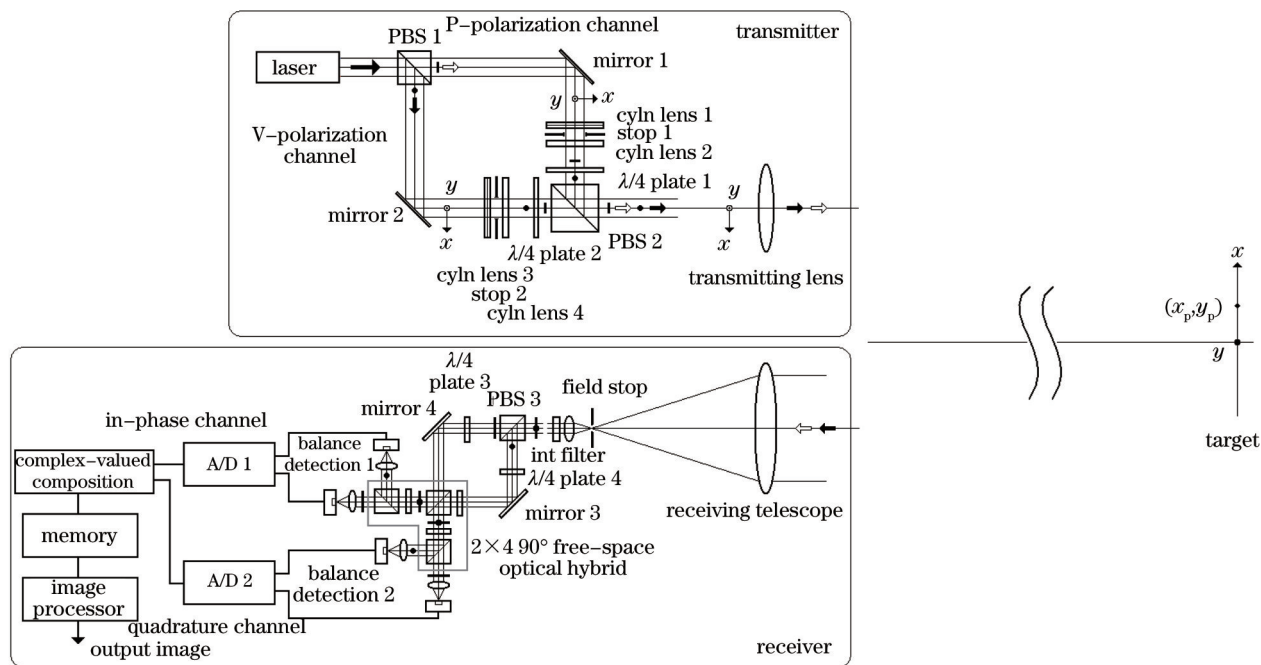


图 2 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达的一种典型结构

Fig.2 A typical arrangement of auto-scanning SAIL using hyperbolic wavefront difference

柱面透镜的安置坐标如图 3 所示, 其中 (α, β) 坐标系相对于 (x, y) 坐标系旋转了 45° 。4 个柱面透镜的相位分布分别为

$$\begin{cases} \exp[j\varphi_1(x,y)] = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\beta^2\right) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} - xy\right)\right], \\ \exp[j\varphi_2(x,y)] = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right), \\ \exp[j\varphi_3(x,y)] = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\alpha^2\right) = \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} + xy\right)\right], \\ \exp[j\varphi_4(x,y)] = \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right). \end{cases} \quad (2)$$

因此,在合成孔径激光成像雷达内的光阑窗口平面上的左臂P-通道和右臂V-通道的内光场分别为

$$\begin{cases} e_{p,0}(x,y) = E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} - xy\right)\right] \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right), \\ e_{v,0}(x,y) = E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} + xy\right)\right] \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right). \end{cases} \quad (3)$$

式中窗口为矩形函数 $w(x,y) = \text{rect}\left(\frac{x}{W_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{W_y}\right)$ 。

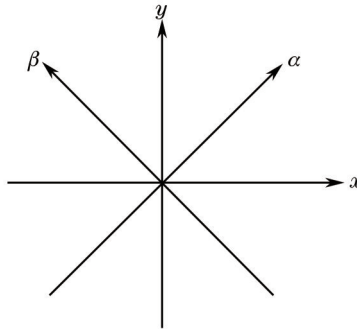


图3 柱面透镜座标

Fig.3 Coordinate systems of cylindrical lenses

4 典型结构双曲波前差自扫描直视SAIL的目标二维数据收集过程分析

从激光发射,目标反射,光学接收,光电探测到数码变换构成了目标二维数据收集链。发射主镜的焦距为 f_1 ,目标距离为 Z ,内光场在目标面上的投射成像放大率为

$$M = Z/f_1. \quad (4)$$

因此目标面上的P-通道和V-通道在目标面上产生的光斑光场分别为

$$\begin{cases} e_{p,z}(x,y) = C_1 E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{D_y}\right) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} - xy\right)\right] \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right), \\ e_{v,z}(x,y) = C_1 E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{D_y}\right) \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f'_x}\left(\frac{x^2}{2} + \frac{y^2}{2} + xy\right)\right] \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f'_y}y^2\right). \end{cases} \quad (5)$$

式中 C_1 为与光束传播和透射有关的常数, $D_x = MW_x$, $D_y = MW_y$, $f_x = M^2 f'_x$, $f_y = M^2 f'_y$ 。它们所包含的相同的衍射相位二次项已经被忽略。

可见上述光斑光场的波面相位差满足系统结构存在的必要条件即(1)式($S=0$),目标面上的空间相位差包含交轨向坐标和顺轨向坐标相耦合的双曲波面波差和顺轨向坐标的二次项波面波差。

目标与雷达平台相对运动的慢距离表达为 $y(t) = v_y t$,其中 t 为时间, v_y 为平台运动速度,目标点 (x_p, y_p) 产生

的接收机光学接收天线面上的接收光场为

$$\begin{cases} e_{p,R}[x_p, y_p; y(t)] = C_1 C_2 E_0 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left[\frac{y_p - y(t)}{D_y}\right] \exp\left(j\frac{\pi}{2\lambda f_x} x_p^2\right) \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda f_x} x_p [y_p - y(t)]\right\} \times \\ \exp\left\{j\frac{\pi}{2\lambda f_x} [y_p - y(t)]^2\right\} \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda f_y} [y_p - y(t)]\right\}, \\ e_{v,R}[x_p, y_p; y(t)] = C_1 C_2 E_0 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left[\frac{y_p - y(t)}{D_y}\right] \exp\left(j\frac{\pi}{2\lambda f_x} x_p^2\right) \exp\left\{j\frac{\pi}{\lambda f_x} x_p [y_p - y(t)]\right\} \times \\ \exp\left\{j\frac{\pi}{2\lambda f_x} [y_p - y(t)]^2\right\} \exp\left\{-j\frac{\pi}{\lambda f_y} [y_p - y(t)]\right\} \end{cases} \quad (6)$$

式中 C_2 包含目标反射特性, 光束传播和透射等因子。同样, 它们所包含的相同的衍射相位二次项已经被忽略, 应当注意包含在正交偏振接收光场中的相同的空间和时间相位因子均将被偏振干涉自差探测自动消除, 这是直视 SAIL 消除大气等外界和内部相位干扰的原因。

带有 2×4 的 90° 空间光学桥接器的偏振干涉自差双通道光电接收机将产生回波光电流。光学接收的同相通道的同相和反相, 正交项通道的同相和反相的等效接收面的光场分别为

$$\begin{cases} e_1[x_p, y_p; y(t)] = \frac{1}{2} e_{p,R}[x_p, y_p; y(t)] + \frac{1}{2} e_{v,R}[x_p, y_p; y(t)], \\ e_2[x_p, y_p; y(t)] = \frac{1}{2} e_{p,R}[x_p, y_p; y(t)] + \frac{1}{2} e_{v,R}[x_p, y_p; y(t)] \exp(j\pi), \\ e_3[x_p, y_p; y(t)] = \frac{1}{2} e_{p,R}[x_p, y_p; y(t)] + \frac{1}{2} e_{v,R}[x_p, y_p; y(t)] \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right), \\ e_4[x_p, y_p; y(t)] = \frac{1}{2} e_{p,R}[x_p, y_p; y(t)] + \frac{1}{2} e_{v,R}[x_p, y_p; y(t)] \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \exp(j\pi). \end{cases} \quad (7)$$

光电探测是平方律检波, 即为

$$i_k[x_p, y_p; y(t)] = \frac{\eta S}{2} \left| e_k[x_p, y_p; y(t)] \right|^2, \quad (8)$$

式中 S 为探测面积, 等效为接收口径面积, η 为光电流对于光功率的转换率。

接收复数化光电流为

$$i[x_p, y_p; y(t)] = \left\{ i_1[x_p, y_p; y(t)] - i_2[x_p, y_p; y(t)] \right\} + j \left\{ i_3[x_p, y_p; y(t)] - i_4[x_p, y_p; y(t)] \right\}. \quad (9)$$

光电流通过双通道 A/D 转换器和复数化转换器转换为数字化光电流复数信号, 其基本采样周期为 d_s , 有 $d_s = D_y / N$, 其中 D_y 为顺轨向光斑宽度, N 为正整数是顺轨向光斑宽度内的采样数。因此数字化光电流复数信号为

$$i(x_p, y_p; md_s) = C_3 |C_2 C_1 E_0|^2 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - md_s}{D_y}\right) \exp\left[-j\frac{2\pi x_p (y_p - md_s)}{\lambda f_x}\right] \exp\left[j\frac{\pi (y_p - md_s)^2}{\lambda f_y / 2}\right]. \quad (10)$$

式中 C_3 涉及光电探测器干涉积分面积以及光电探测特性有关的常数。式中第一个相位项由双曲面波前差产生, 第二个相位项为顺轨向二次项。数字化光电流复数信号存储在存储器。

5 典型结构双曲波前差自扫描直视 SAIL 的数据处理和成像过程分析

图像处理时先从存储器读出信号数据再处理, 当然也可以实时处理。顺轨向读出间隔为 d_1 , 序号为 k , 应当有 $d_1 = d_s P_1$ 和 $d_1 = d_s / P_2$, P_1 和 P_2 为正整数, 读出宽度为 $D_k = K d_s$, 其中 K 为正整数, 因此光斑宽度对顺轨向读出宽度之比为 $G = N / K$ 。在每个 $k d_1$ 时刻开始进行 $k' d_s$ ($k' = 0, 1, 2, \dots$) 系列的等效交轨向基本采样的存储信号读出。

在满足采样频率要求下, 为了数学运算方便, 快距离可以用 y_k 即 $k' d_s \rightarrow y_k$ 来表达, 同时考虑只提取傅里叶变换零级。因此在 $k d_1$ 开始的读出信号数据即为

$$i(x_p, y_p; kd_t + y_k) = C_3 |C_2 C_1 E_0|^2 \text{rect}\left(\frac{y_k - \frac{D_k}{2}}{D_k}\right) \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - kd_t}{D_y}\right) \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda f_x} x_p y_k\right) \times \\ \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f_y/2} y_k (y_p - kd_t)\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_y/2} y_k^2\right] \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f_x} x_p (y_p - kd_t)\right] \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_y/2} (y_p - kd_t)^2\right], \quad (11)$$

(11)式已经对两个相位项进行了展开,共有五个相位项,第一项和第二项由双曲面波前差产生,第三项、第四项和第五项由顺轨向相位二次项波前差产生。它们的作用是:第一项为所需的目标交轨向成像用的线性调制项;第二项为交轨和顺轨向交叉耦合线性项,需要补偿掉;第三项为二次多普勒频移项,需要补偿掉;第四项为多普勒频移线性项,将对交轨向成像产生移位影响;第五项为所需的目标顺轨向成像用的相位二次项历程。(11)式考虑了近似关系 $\text{rect}\left(\frac{y_p - kd_t - y_k}{D_y}\right) \approx \text{rect}\left(\frac{y_p - kd_t}{D_y}\right)$ 。

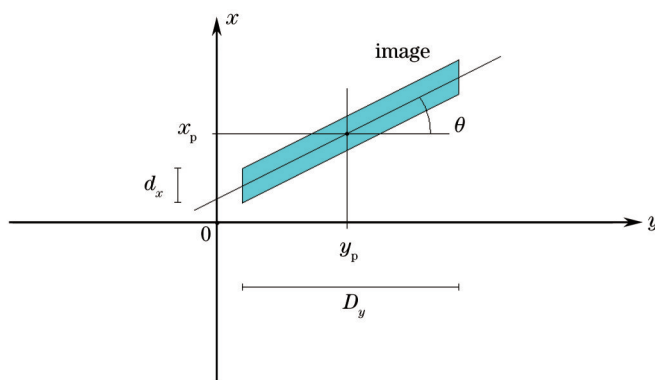


图4 一个目标点的交轨向成像

Fig.4 Image of a point target in the orthogonal direction of travel

5.1 交轨向聚焦成像分析

成像处理先实施交轨向聚焦。交轨向采用补偿二次多普勒频移的傅里叶变换聚焦成像,即在傅里叶变换前先进行二次多普勒补偿,补偿函数为 $\exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda f_y/2} y_k^2\right)$ 。变换后再采用空间频率-空间转换 $f_k = x_k/\lambda f$,交轨向聚焦像为

$$I_{\text{OR}}(x_p, y_p; x, kd_t) = D_K C_4 C_3 |C_2 C_1 E_0|^2 E_0 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - kd_t}{D_y}\right) \exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f_x} x_p (y_p - kd_t)\right] \times \\ \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda f_y/2} (y_p - kd_t)^2\right] \left\{ \text{sinc}\left(\frac{x D_K}{\lambda f_x}\right) * \delta\left[x_k - x_p + \frac{f_x}{f_y/2} (y_p - kd_t)\right] \right\}, \quad (12)$$

式中 $D_K C_4$ 为傅里叶变换附加因子,符号 * 表示卷积积分。

交轨向分辨率用点扩展函数表征,分辨率的零值全宽度为

$$d_x = \frac{2\lambda f_x}{D_K}. \quad (13)$$

而交轨向成像位置在

$$x_k = x_p - \frac{2f_x}{f_y} (y_p - kd_t). \quad (14)$$

交轨向成像位置依赖 k ,如图4所示。因此可以求得一次多普勒效应产生的成像位置的倾斜斜率为

$$\tan \theta = \frac{x_{n+1} - x_n}{d_t} = \frac{2f_x}{f_y}. \quad (15)$$

交轨向聚焦成像后再进行顺轨向聚焦,为了数学运算方便,满足采样频率要求下,交轨向聚焦成像可以采用

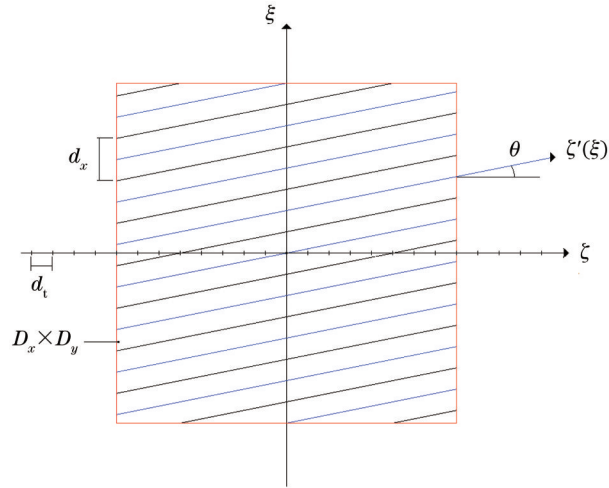


图5 滤波器结构

Fig.5 Structure of filter

连续量 $y(k)$ 即 $kd_t \rightarrow y(k)$ 来表达。

5.2 顺轨向聚焦成像分析

顺轨向聚焦可以采用两种匹配滤波算法,第一种方案为倾斜向线性相位项补偿和倾斜向局部卷积共轭二次相位项匹配滤波算法,第二种方案为倾斜向线性相位项加共轭二次项补偿和倾斜向积分求和算法。滤波器窗口的正交坐标系为 (ξ, s) , 并且定义沿 θ 方向的 $s'(\xi)$ 轴,其结构如图5所示。

1) 倾斜向交叉线性相位项补偿的倾斜向局部卷积共轭二次相位项匹配滤波算法

沿 θ 方向的 s' 轴,先采用耦合项补偿函数 $\exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f_x}x_p s'(k)\right]$ 相乘目标交叉向聚焦成像函数,然后采用共轭相位二次项 $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f_y/2}s'^2(k)\right]$ 进行 d_y 宽度内的局部卷积的匹配滤波,可以得到顺轨向的最终成像在滤波器窗口 (ξ, s, s') 坐标系上为

$$I(\xi, s, s'; x_p, y_p) = D_y D_K C_5 C_4 C_3 |C_2 C_1 E_0|^2 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \text{rect}\left(\frac{s}{d_y}\right) \text{sinc}\left(\frac{s}{d_y/2}\right) \times \text{sinc}\left(\frac{\xi}{d_x/2}\right) * \delta\left\{\xi - [x_p + s'(x_p) \sin \theta]\right\}. \quad (16)$$

式中 $D_y C_5$ 为匹配滤波附加因子。

因此顺轨向的零值全宽度分辨率为

$$d_y = \frac{\lambda f_y}{D_y}. \quad (17)$$

总体考虑上要求 $d_x = d_y$, 所以必须有

$$f_x = \frac{f_y}{2G}. \quad (18)$$

2) 倾斜向交叉线性相位项加共轭二次项补偿的倾斜向积分求和算法

沿 θ 方向的 s' 轴,采用耦合项补偿函数 $\exp\left[-j\frac{2\pi}{\lambda f_x}x_p s'(k)\right]$ 和共轭相位二次项 $\exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda f_y/2}s'^2(k)\right]$ 相乘目标交叉向聚焦成像函数,然后在沿 θ 方向的 s' 轴进行积分求和,可以得到顺轨向的最终成像在滤波器窗口 (ξ, s) 坐标系上为

$$I(\xi, s; x_p, y_p; \Delta y) = D_y D_K C_6 C_4 C_3 |C_2 C_1 E_0|^2 \text{rect}\left(\frac{x_p}{D_x}\right) \left[\text{sinc}\left(\frac{\xi}{d_x/2}\right) * \delta(\xi - x_p) \right] \text{sinc}\left[\frac{D_y}{\cos \theta} \frac{2 \sin(4\Delta\varphi)}{\lambda f} \Delta y\right]. \quad (19)$$

式中 $D_y C_6$ 为匹配滤波附加因子, Δy 为顺轨向移动量。

因此顺轨向的零值全宽度分辨率为

$$d_y = \frac{\lambda f_y}{2D_y}. \quad (20)$$

总体考虑上要求 $d_x = d_y$, 所以必须有

$$f_x = \frac{f_y}{4G}. \quad (21)$$

5.3 数据采样条件

为了保证采样数据的准确还原保真, 交轨向的采样应当满足 $\frac{1}{d_s} \geq 2f_{\max}$, 即有

$$d_s \leq \frac{d_x}{2G}. \quad (22)$$

方位向采样要求 $d_t \leq \frac{d_y}{2}$, 即有

$$P_2 \geq 2. \quad (23)$$

应当注意输出图像的常数因子中包含了 $D_k D_y$ 乘积, 这事实上代表了光电探测在两维方向的等效接收能量累积时间, 比较先期的直视合成孔径激光成像雷达的相关常数因子 $d_t D_y$ ($d_t \leq d_t$), 具有一个增益, 相当于系统接收灵敏度的提高倍数 (M_A), 其最小为

$$M_A \geq \frac{K}{P_1}. \quad (24)$$

6 结 论

双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达, 原理上采用空间相位变换器将激光波面转换为一种包含了交轨向和顺轨向坐标相耦合的双曲面波前差和顺轨向二次项相位波前差的复合双曲波面, 目标的相对运动导致在交轨向产生目标横向距离有关的线性相位调制, 同时在顺轨向产生目标顺轨向距离有关的二次项相位历程。这与侧视合成孔径激光成像雷达的工作原理完全不同, 也与直视合成孔径激光成像雷达的工作原理不同, 说明了本原理已充分发挥了光学波面变换的特性, 完全突破了合成孔径雷达的传统实施原理。

本建议依靠特定波面在雷达平台与目标的相对运动中同时获得与目标有关的线性相位调制和二次项相位历程, 属于运动自然产生的一维空间扫描, 因此不需要任何光调制器件。不存在电驱动机械器件和电光调制器件的适用性, 坚固性和耐用性问题。发射端和接收端相对独立, 不存在发射和接收之间关联造成的交轨向聚焦像的初始相位同步问题, 因此不需要任何发射端和接收端之间的光和电子学的同步关联, 即不需要高精密同步光学和电子学系统。发射信号和接收信号之间没有关联, 因此不存在回波延时的影响, 适合于各种距离应用, 在远距离应用时不产生任何额外问题。目标回波在几分之一的光学足址尺度上进行交轨向采样, 而先期的直视和侧视合成孔径激光成像雷达是在顺轨向分辨率长度上进行交轨向采样, 因此具有数量级提高的交轨向采样累积时间。相对于先期直视和侧视合成孔径激光成像雷达本建议在交轨向上采样时间有了数量级的提高, 即回波接收能量累积有了数量级的提高, 因此大大提高了系统的接收灵敏度。成像算法由交轨向的补偿二次多普勒频移相位项的傅里叶变换和顺轨向的补偿交叉耦合线性相位项的共轭二次项匹配滤波所组成, 是先前的侧视和直视合成孔径激光成像雷达的成像算法的进一步发展。

综上所述, 双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达适用于对各种速度和距离的星载和机载的遥感对地观察, 也适用于对各种速度和距离的空间目标进行成像探测的逆直视合成孔径激光成像雷达。

双曲波前差自扫描直视合成孔径激光成像雷达保留了先期直视合成孔径激光成像雷达的可以实行全方位观察的特点, 即除了直视观察外还可以实现侧视观察, 前视观察和后视观察, 也保留了其固有的优点, 即非常有效地降低了大气、运动平台、光雷达系统本身等相位干扰的影响; 照明光斑可以很大, 接收口径可以很大, 因此能够获得较大的光学足址和较强的回波接收功率; 不需要光学延时线; 允许使用低质量的接收

光学系统;采用直视观察成像目标反射率高并且无阴影。

参 考 文 献

- 1 Liu Liren. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations (invited) [J]. Appl Opt, 2013, 52 (4): 579-599.
- 2 Liu Liren. A new way to high-resolution remote sensing—synthetic aperture imaging lidar [J]. Science, 2014, 66(6): 25-29.
刘立人. 高分辨率遥感新途径—合成孔径激光成像雷达[J]. 科学, 2014, 66(6): 25-29.
- 3 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.
- 4 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 .
- 5 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.
- 6 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Yanan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 37(9): 0900112.
刘立人, 周 煜, 职亚楠, 等. 大口径合成孔径激光成像雷达演示样机及其实验室验证[J]. 光学学报, 2011, 37(9): 0900112.
- 7 J Buck, B W Krause, A I Malm, *et al.*. Synthetic aperture imaging at optical wavelengths [C]. Lasers and Electro- Optics/ International Quantum Electronics Conference, 2009. PThB3.
- 8 B Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. CLEO:2011-Laser Applications to Photonic Applications 2011. PDPB7.
- 9 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0920002.
刘立人. 直视合成孔径激光成像雷达原理[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0920002.
- 10 Liu Liren. Principle of self-interferometric synthetic aperture lidar for 3D imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0528001.
刘立人. 自干涉合成孔径激光三维成像雷达原理[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0528001.
- 11 Luan Zhu, Sun Jianfeng, Zhi Ya'nan, *et al.*. Two-dimensional imaging experiment of down-looking synthetic aperture lidar under simulated far-field conditions [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0710003.
栾 竹, 孙建锋, 职亚楠, 等. 直视合成孔径激光成像雷达模拟远场条件下的二维成像实验[J]. 光学学报, 2014, 34 (7): 0710003.
- 12 Zhu Luan, Jianfeng Sun, Yu Zhou, *et al.*. Down-looking synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its experiments over 1.2 km outdoor [J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(11): 111101.

栏目编辑: 胡 冰