

文章编号: 0253-2239(2008)07-1405-06

合成孔径激光成像雷达(Ⅲ): 双向环路发射接收望远镜

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 提出了一种用于合成孔径激光成像雷达的双向环路结构的发射接收望远镜,双向环路包括发射 $4-f$ 转像系统、接收 $4-f$ 转像系统和独立的望远镜。发射通道中设置离焦和相位调制平板偏置,接收通道中设置离焦和相位平板偏置。控制发射离焦量,发射相位调制函数,接收离焦量,接收相位调制函数,用同一个望远镜可以同时实现空间二次项相位附加偏置的激光发射和消除目标点散射回波接收波面像差的离焦光学接收,并产生雷达运动方向上合适的和可控制的相位二次项历程,从而实现孔径合成成像。详细介绍了系统设计,给出了从发射到光电外差接收的全过程传输方程。

关键词 合成孔径激光成像雷达; 望远镜; 双向环路; $4-f$ 转像系统; 离焦; 相位平板

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082807.1405

Synthetic Aperture Ladar (Ⅲ): Circulated Duplex Telescope

Liu Liren

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A kind of circulated duplex telescope for synthetic-aperture laser imaging radar is presented, in which a circulator connects among a reception-channel $4-f$ system with defocusing and phase biasing, a transmitting-channel $4-f$ system with defocusing and phase biasing and a primary telescope. By controlling the biasing functions and the defocusing amounts of both channels it is realized with a single telescope to receive the echo with its aberration eliminated and to transmit a beam with an additional quadratic phase. As a result, a suitable and controllable phase history can be generated to correctly synthesize the image in the azimuth-direction. The designs as well as a full transmission equation are detailed in the paper.

Key words synthetic-aperture laser imaging radar; telescope; duplex circulator; $4-f$ system; defocusing; phase plate

1 引 言

合成孔径激光成像雷达的原理取之于射频频域的合成孔径雷达原理,是能够在远距离取得厘米量级分辨率的唯一的成像观察手段。但是由于光频段波长比射频频短 $3\sim 6$ 个数量级,而且光学望远镜主镜的尺度大于波长 $3\sim 6$ 个数量级,其光学的空间发射和接收与射频频的发射和接收有原理性差别。合成孔径激光成像雷达采用光学望远镜作为接收天线和发射天线,但是用作回波信号接收和激光光束发射时对于望远镜的要求也有所不同^[1,2]。因

此,采用同一望远镜作为接收和发射天线时,望远镜必须同时满足光学接收要求和激光发射要求,保证在回波外差接收信号中产生目标的合适的相位二次项历程,实现激光孔径合成成像。

在光学接收过程中,目标散射点的反射回波经过距离衍射到达合成孔径激光成像雷达的光学望远镜时,将产生不同的波面像差或者波前形状,波面像差将极大影响外差光电探测效率,甚至导致探测失效。因此在前文中提出了一种离焦和空间相位偏置的望远镜光学接收天线^[1],克服回波信号的衍射波

收稿日期: 2008-03-26; 收到修改稿日期: 2008-04-20

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、星际激光通信和激光雷达等方面的研究。E-mail: lirenliu@mail.shenc.ac.cn

面像差保证外差探测要求,并产生相位二次项历程。在激光发射过程中,望远镜作为激光发射天线的基本要求是需要保证主镜口径上的衍射极限发射,因此目标距离上的激光照明光斑的波前特性取决于望远镜发射光场分布和衍射距离。在前文中提出了一种空间二次项相位偏置结构的发射望远镜^[2],在望远镜内放置相位调制平板,控制望远镜的离焦量和位相调制函数,能够在发射望远镜的激光照明光斑上相对于原衍射波面产生一个附加的空间相位二次项,用于改变激光照明波前,产生适当的和所需的目标照明二次项波前。

因此,实现合成孔径激光成像的核心关键问题是用同一光学望远镜实现不同离焦量和不同的附加相位调制的同时的激光发射和光学接收。

本文提出一种合成孔径激光成像雷达双向环路发射接收望远镜,在光学望远镜、激光光源和光电探测器之间设置双向发射接收环路,双向环路具有独立的发射通道和独立的接收通道,并均为 $4-f$ 转像结构。因此可以在双向环路的接收通道中进行望远镜发射所需的离焦操作或者附加相位设置,在发射通道中进行发射望远镜所需的离焦操作和附加相位设置,用同一个光学望远镜实现附加空间相位偏置的激光发射和消回波像差的离焦光学接收,得到合适的和可以控制的雷达运动方向上的相位二次项历程。

合成孔径激光成像首先在国外实验室实现验证^[3,4],但是这些实验属于细小光束的近距离模拟,没有采用真实光学望远镜接收和发射天线。在美国国防先进研究计划局支持下 2006 年美国雷声公司

和诺格公司分别实现了机载合成孔径激光雷达试验^[5],但是没有考虑光学天线的接收波面像差或者波前形状的影响,也没有考虑光学天线的发射时的附加空间相位偏置。

本文提出了在同一光学望远镜中实现空间相位偏置的激光发射和消回波像差的离焦光学接收的这样一种核心概论,并建议了一种简单有效的合成孔径激光成像雷达双向环路发射接收望远镜实施方案。

2 双向环路发射接收望远镜的总体结构

合成孔径激光成像雷达的双向环路发射接收望远镜的总体结构如图 1 所示,从激光光源 1 发射激光光束开始,然后是半波片(或四分之一波片)2 和偏振分光棱镜 3,偏振分光棱镜 3 输出的一路作为本机振荡激光光束经过四分之一波片 4 并由反射镜 5 返回后到达并通过偏振分光棱镜 3,偏振分光棱镜 3 输出的另一路作为发射激光光束依次经过发射转像透镜 6,发射离焦量 7,发射空间相位调制板 8、发射转像透镜 9、偏振分光棱镜 10、四分之一波片 11、望远镜目镜 12、望远镜物镜 13 和望远镜出(入)瞳 14 射向目标,回波激光光束经原路返回至偏振分光棱镜 10,反射后再经过接收空间相位调制板 15、反射镜 16、接收转像透镜 17、接收离焦量 18、接收转像透镜 19 到达偏振分光棱镜 20,本机振荡激光光束和回波激光光束通过偏振分光棱镜 20 合束,再经过半波片(或四分之一波片)21 并通过偏振分光棱镜 22 将其分为两束偏振方向相同的接收光束,分别由光电探测器 23 和光电探测器 24 进行外差平衡接收。

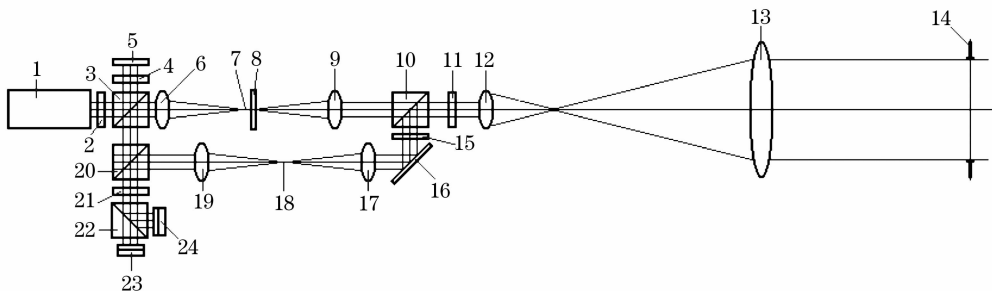


图 1 双向环路发射接收望远镜结构

Fig. 1 Configuration of circulated duplex telescope

所有偏振分光棱镜设定为水平偏振方向光束通过而垂直偏振方向光束反射。本文以水平偏振方向为参考方向。半波片(或四分之一波片)2 的角度设置以控制偏振分光棱镜 3 的分光强度比,一般要求透过的发射光束光强远远大于反射的本机振荡激光

光束光强。四分之一波片 4 的角度设置使得从偏振分光棱镜 3 反射出的本机振荡激光光束从反射镜 5 返回到偏振分光棱镜 3 上的偏振旋转了 90° 而能够直接通过偏振分光棱镜 3。四分之一波片 11 的角度设置使得透过偏振分光棱镜 10 的发射激光光束

经过望远镜发射,目标反射并由望远镜接收的光束返回到偏振分光棱镜 10 上的偏振旋转了 90° 而能够被偏振分光棱镜 10 反射。本机振荡激光光束以水平偏振状态入射并直接通过偏振分光棱镜 20, 回波激光光束以垂直偏振状态入射并经过偏振分光棱镜 20 反射, 因此后本机振荡激光光束和回波激光光束通过偏振分光棱镜 20 进行了光束合束, 偏振正交的合成光束再经过半波片(或四分之一波片)21 旋转偏振态 45° (或者成为园偏振态), 偏振分光棱镜 22 进行偏振分光, 都是水平方向偏振的合成光束用光电探测器 23 进行外差接收, 都是垂直方向偏振的合成光束用光电探测器 24 进行外差接收。

物镜 13 和目镜 12 组成用于激光发射和接收的天线望远镜, 设望远镜物镜 13 的焦距为 f_1 和目镜 12 的焦距为 f_2 , 则望远镜的放大倍数为 $M=f_1/f_2$ 。望远镜的出(入)瞳 14 位于物镜的外焦面上, 可以设置一个实的孔径光阑, 也可以无实物光阑而代表一个位置, 望远镜的目镜 12 的外焦面为望远镜的入(出)瞳面, 出(入)瞳面与目镜入(出)瞳面相互成像。

发射转像透镜 6 和发射转像透镜 9 组成一个发射 $4-f$ 转像望远镜, 发射转像透镜 9 的出瞳平面与天线望远镜的入(出)瞳面重合。这个发射 $4-f$ 转像望远镜具有发射离焦量 7, 空间位相调制板 8 放置在发射转像透镜 9 的焦面上。发射转像透镜 6 和发射转像透镜 9 的焦距设定为 f_3 。

接收转像透镜 17 和接收转像透镜 19 组成一个

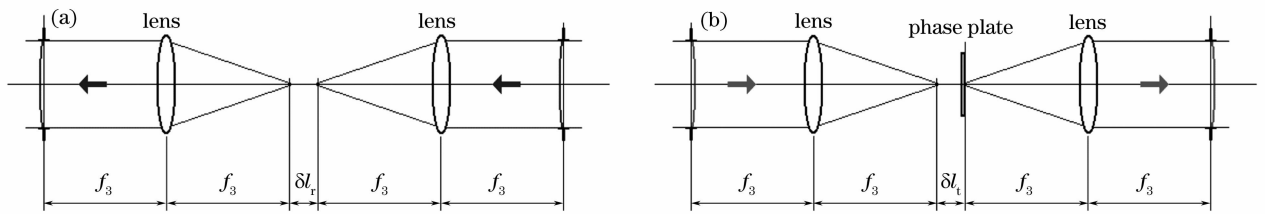


图 2 (a) 离焦接收通道 $4-f$ 转像系统, (b) 相位偏置激光发射通道 $4-f$ 转像系统

Fig. 2 (a) $4-f$ image-transferring system in the reception channel, (b) $4-f$ image-transferring system in the transmitting channel

3 接收通道和发射通道的 $4-f$ 转像系统计算

3.1 接收通道

望远镜用作回波接收时为了消除入射波前的二次项像差应当控制接收望远镜的离焦量达到 $\Delta l_r = \frac{f_1^2}{z}$ 。因此采用图 2(a) 的接收 $4-f$ 转像系统, 在主望远镜不离焦下其离焦量应当为:

接收 $4-f$ 转像望远镜, 接收转像透镜 17 的入瞳面与天线望远镜的入(出)瞳面重合。这个接收 $4-f$ 转像望远镜具有接收离焦量 18, 空间位相调制板 15 放置在转像望远镜的入瞳面上。接收转像透镜 17 和接收转像透镜 19 的焦距设定为 f_4 。

半波片(或四分之一波片)2、偏振分光棱镜 3、四分之一波片 4、反射镜 5、发射转像透镜 6, 发射离焦量 7, 发射空间相位调制板 8、发射转像透镜 9、偏振分光棱镜 10、四分之一波片 11、接收空间相位调制板 15、反射镜 16、接收转像透镜 17、接收离焦量 18、接收转像透镜 19、偏振分光棱镜 20 和半波片(或四分之一波片)21 构成了一个 3 端口的双向调制接收发射环路。其中: 半波片(或四分之一波片)2 是激光光源入射端口, 四分之一波片 11 是发射激光输出和回波接收端口, 半波片(或四分之一波片)21 是探测光信号输出端口。

在双向调制接收发射环路中, 从偏振分光棱镜 3 到偏振分光棱镜 10 是只存在发射激光光束的光路, 引入发射离焦量 7 和发射空间位相调制板 8 能够在激光望远镜的照明区产生附加空间相位二次项, 改变发射激光照明波前。

从偏振分光棱镜 10 到偏振分光棱镜 20 是只存在回波激光光束的光路, 引入接收空间位相调制板 15 或者接收离焦量 18 能够对接收望远镜进行等效离焦而消除接收光束离焦像差的目的。

$$\Delta l_r = (f_3^2/f_1^2)\Delta l_r. \quad (1)$$

另外一种方法是在望远镜出瞳位置即接收转像望远镜的入瞳位置上放置接收空间相位调制板, 其相位函数为:

$$\varphi(x, y) = -\frac{\pi(x^2 + y^2)}{\lambda f_1^2/\Delta l_r}. \quad (2)$$

3.2 发射通道

望远镜用作激光发射时要求在费涅尔衍射照明

区产生附加空间相位二次项为 $\exp\left(j\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right)$, 为了实现这一波前偏置, 接收望远镜的离焦量应当为 $\Delta l_t = -\frac{f_2^2}{z+F_{\text{add}}}$, 而空间相位二次项偏置的等效焦距应当为 $R_t = \frac{f_2^2}{2z}$ 。因此采用图 2(b) 的发射 $4-f$ 转像系统, 在主望远镜不离焦情况下其离焦量应当为:

$$\delta l_t = (f_3^2/f_1^2)\Delta l_t, \quad (3)$$

而发射空间位相调制板的二次项等效焦距应当为:

$$R_3 = (f_3^2/f_1^2)R_t, \quad (4)$$

当目标处于夫琅禾费衍射区域, 达到空间相位二次项 $\exp\left(j\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right)$ 偏置所要求的离焦量为 $\Delta l=0$, 而发射空间位相调制板空间相位二次项偏置的等效焦距应当为 $R_t = (f_2^2/z^2)F_{\text{add}}$ 。因此, 在主望远镜不离焦情况下发射 $4-f$ 转像系统的空间位相调制板的二次项等效焦距应当为:

$$R_3 = (f_3^2/f_1^2)R_t, \quad (5)$$

4 全过程激光传输方程

采用了双向环路发射接收望远镜结构后, 可以

求得从望远镜出瞳发射光束到目标到光电探测器接收面上的光束全过程传输方程。

发射光束采用高斯光束, 望远镜出瞳光阑直径为 d , 取发射高斯光束在出瞳的波腰为

$$\omega_0 = d/4, \quad (6)$$

因此在附加相位偏置后, 距离 z 的物体面上的照明光场为:

$$u_t(x, y) = A_0 e(jkl_t) \exp\{j[kz + \Phi(z)]\} \times \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}\right) \exp\left[j\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda R(z)}\right] \times \exp\left(j\pi \frac{x^2+y^2}{\lambda f_{\text{add}}}\right), \quad (7)$$

其中波腰, 波面曲率和附加相位因子分别为:

$$\omega(z) = \omega_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right)^2\right]^{1/2},$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{k\omega_0^2}{2z}\right)^2\right], \quad (8)$$

$$\xi(z) = \arctan\left(\frac{2z}{k\omega_0^2}\right).$$

当 $z \gg \pi\omega_0^2/\lambda$ 时, 即夫琅禾费衍射区域, 有进一步的近似^[2]。

接收望远镜进行离焦相位补偿后, 目标散射点的回波到达望远镜系统的光电探测面的光场为:

$$u_r(x, y) = u_t(s_x, s_y) \rho \frac{-M \exp[j(kz + l_r)]}{j\lambda z} \text{cyl}\left(-M \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{d}\right) \exp\left(-j2\pi M \frac{x s_x + y s_y}{\lambda z}\right) \exp\left(j\pi \frac{s_x^2 + s_y^2}{\lambda z_r}\right), \quad (9)$$

其中物体反射率为 $\rho(z; s_x, s_y) \exp[j\varphi_\rho(z)]$, 同时也考虑到了菲涅尔衍射和夫琅禾费衍射的差别, 即接收二次项相位历程的等效曲率半径可取:

$$z_r = \begin{cases} z, & \text{Fresnel} \\ \infty, & \text{Fraunhofer} \end{cases}$$

因此从发射到光电接收的全过程传输方程(9)可以改写为:

$$u_r(x, y) = E_r(s_x, s_y) \exp\left[-\frac{s_x^2 + s_y^2}{\omega^2(z)}\right] \text{cyl}\left(-\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{d/M}\right) \exp[jk(l_t + l_r + 2z)] \exp[j\Phi(z)] \times \exp\left(-j2\pi M \frac{x s_x + y s_y}{\lambda z}\right) \exp\left(j\pi \frac{s_x^2 + s_y^2}{\lambda F}\right), \quad (10)$$

式中 $E_r(s_x, s_y) = jA_0 \rho(z; s_x, s_y) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \frac{M}{\lambda z} \exp\left[-\frac{s_x^2 + s_y^2}{\omega^2(z)}\right]$; l_r 和 l_t 分别为接收光学系统的光程和发射光学系统的光程, 可以不计; z_r 等于 $R(z)$ 或者近似于 z , 相位二次项等效焦距 $1/F = 1/z_r + 1/z_t + 1/f_{\text{add}}$ 。

激光发射光源为频率线性调制 $f(t) = f_0 + \dot{f}t$ 的啁啾信号:

$$u_0(t) = E_0 \exp[j\varphi(t)] = E_0 \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{\dot{f}}{2} t^2\right) + j\varphi_{\text{loc}}(n)\right], \quad (11)$$

式中 $\varphi_{\text{loc}}(n)$ 为第 n 过发射激光脉冲的初始相位。回波信号为时间延迟的频率线性调制信号:

$$u_r(t) = E_r \exp[j\varphi(t-\tau)] = E_r \exp\left[j2\pi\left(f_0(t-\tau) + \frac{\dot{f}}{2}(t-\tau)^2\right) + j\varphi_{\text{loc}}(n)\right]. \quad (12)$$

本机振荡器激光信号为第 $n+N$ 个光源脉冲:

$$u_{\text{loc}}(t) = E_{\text{loc}} \exp[j\varphi(t)] = E_{\text{loc}} \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{\dot{f}}{2} t^2\right) + j\varphi_{\text{loc}}(n+N)\right]. \quad (13)$$

外差探测采用平衡接收方式,接收光路分为偏振相同和偏振相反的相位相差 π 的两路。先分析偏振相同的一路外差接收,令回波场强为 E_r ,每路为 $E_r/\sqrt{2}$ 。同时设本机振荡器激光参考光束的场强为 $E_0 = E_r/\sqrt{2}$,因此在偏振相同一路的本振和回波产生的外差信号为光强表达:

$$I_{\text{sm}}(x, y; t) = 2E_r E_r^* \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos[2\pi f\tau + 2\pi \dot{f} \tau t - \pi \dot{f} \tau^2 + \Delta\varphi_{\text{loc}}(n:N) - \varphi_\rho] \right\}, \quad (14)$$

其中 $\Delta\varphi_{\text{loc}}(n:N) = \varphi_{\text{loc}}(n+N) - \varphi_{\text{loc}}(n)$ 。

信号光的延迟为:

$$\tau = \frac{2z}{c} + \frac{\Phi(z)}{2\pi c} \lambda_0 - \frac{\lambda_0}{c} M \frac{x s_x + y s_y}{\lambda z} + \frac{s_x^2 + s_y^2}{2c} \frac{1}{F}.$$

因此在(12)式的相位因子展开式中忽略固定相位项,并假设理想的相位同步条件 $\Delta\varphi_{\text{loc}}(n:N) = 0$ 和 $\varphi_\rho = 0$,则有:

$$I_{\text{sm}}(x, y; t) = 2E_r E_r^* \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left[2\pi\left(\dot{f} \frac{2z}{c} t - M \frac{x s_x + y s_y}{\lambda z} + \frac{s_x^2 + s_y^2}{2\lambda F}\right)\right] \right\}, \quad (15)$$

式中 $\dot{f} \frac{2z}{c} t$ 为距离方向的线相位性调制项, $M \frac{x s_x + y s_y}{\lambda z}$ 为目标倾斜因子, $\frac{s_x^2 + s_y^2}{2\lambda F}$ 为目标二次项相位历程。

在光电探测器口径($d_r = 2r_0$)中的光能量时间函数为积分^[1]为 $e_{\text{sm}}(t) = \iint_{\pi r_0^2} I_{\text{sm}}(x, y; t) dx dy$, 即有:

$$e_{\text{sm}}(t) = 2 |E_r|^2 \frac{\pi r_0^2}{2} \left[1 + 2J_1\left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right] \cos\left(2\pi \dot{f} \frac{2z}{c} t + \pi \frac{s_x^2 + s_y^2}{\lambda F}\right), \quad (16)$$

其中偏离角为 $\theta_s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}/z$ 。

同样可以求得偏振相反一路的光能量时间函数 $E_{\text{op}}(t)$ 。光电探测器的灵敏度为 η ,则平衡接收的光电流为 $i(t) = \eta[E_{\text{sm}}(t) - E_{\text{op}}(t)]$ 。因此从激光发射到光学接收到外差光电转换的全过程传输方程为:

$$i(t) = \eta \pi r_0^2 \left| A_0 \rho(z; s_x, s_y) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \frac{M}{\lambda z} \exp\left[-\frac{s_x^2 + s_y^2}{\omega^2(z)}\right] \right|^2 \cos\left(2\pi \dot{f} \frac{2z}{c} t + \pi \frac{s_x^2 + s_y^2}{\lambda F}\right) \left[2J_1\left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right] \left/ \left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right|. \quad (17)$$

事实上激光是脉冲发射,波形函数为 $W(t) = \text{rect}(t/T)$,其中 T 是发射脉冲宽度。同时考虑到距离延迟的快时间 τ_f (忽略 N 个脉冲周期的慢时间),因此(17)式可以最终修改为

$$i(t) = \eta \pi r_0^2 \left| A_0 \rho(z; s_x, s_y) \frac{\omega_0}{\omega(z)} \frac{M}{\lambda z} \exp\left[-\frac{s_x^2 + s_y^2}{\omega^2(z)}\right] \right|^2 \text{rect}\left[\frac{t - (T + \tau_f)/2}{T - \tau_f}\right] \times \cos\left(2\pi \dot{f} \tau_f t + \pi \frac{s_x^2 + s_y^2}{\lambda F}\right) \left[2J_1\left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right] \left/ \left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right|, \quad (18)$$

式中 $\text{rect}(\cdot)$ 的脉冲宽度表示距离成像的积分时间长度(见附录 A);三角函数 $\cos(\cdot)$ 中第一项为目标在距离方向产生的线性调制项,第二项为目标在方位方向产生的二次项相位历程,属于合成空间激光雷达的关键数据; $2J_1\left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \left/ \left(\pi \frac{d\theta_s}{\lambda}\right) \right|$ 表明由于光学外差而产生的方向性函数等于望远镜出瞳口径的远场衍射函数(艾里斑)。

5 讨 论

当激光发射光源是光纤激光器或光纤放大器时,除了准直使用外,激光光纤发射端口或者再配以

透镜聚焦点可以直接放在发射转像透镜 6 的后焦面位置上。当光纤系统用于光学接收部件时,在接收转像透镜 19 后或者在偏振分光棱镜 22 后可以加聚光镜,把出射光束汇集入光纤端口。

此外,位相调制板 6 和位相调制板 11 还可以进行另外的专门目的的设计。例如,可以设计发射位相调制函数产生柱面激光发射光束或/和设计接收位相调制函数产生柱面接收相位偏置,以在合成孔径激光成像雷达中产生距离方向和飞行方位方向的可分离变量的方位方向相位二次项历程,降低成像算法的复杂性。

方位方向的激光合成孔径成像分辨率为^[2]:

$$\Delta d = (d_r/Kz)F.$$

因此必须特别注意控制二次项相位历程 F 。表 1 总结了等效焦距 F 值的具体组成。作为对比,附录 A

给出了合成孔径激光成像雷达距离方向的成像分辨率计算。

表 1 接收和发射过程产生的相位二次项历程的组成

Table 1 Decomposition of phase history from the reception and transmitting in the different diffraction regions

Reception process				
Equivalent radius of curvature	Fresnel region		Fraunhofer region	
z_r	z		∞	
Transmitting proces				
Composition of equivalent focal lengthsp	Fresnel region	Fraunhofer region	Fresnel region	Fraunhofer region
z_t	$R(z)$	z	$R(z)$	z
f_{add}	Controllable	Controllable	Controllable	Controllable

6 结 论

综上所述,在同一光学望远镜中采用双向环路结构能够实现不同离焦量的光学接收^[1]和不同附加相位调制的激光发射^[2],从而解决了合成孔径激光成像雷达的关键光学问题。在这基础上才能够进一步研究条带扫描,聚束模式等各种合成孔径激光成像雷达的工作特性和应用条件。关于空间应用的一些具体问题和检验方法可参见文献[7,8]。

参 考 文 献

1 Liu Liren. Synthetic aperture laser imaging radar (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
 2 Liu Liren. Synthetic-Aperture 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): 1197~1120
 3 M. Bashkansky, R. L. Lucke, F. 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 ladar: laboratory demonstration and signal processing [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(35): 7621~7629
 5 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic aperture ladar for tactical imaging [C]. *DARPA Strategic Technology Office*
 4 J. D. Gaskill. *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics* [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1978
 7 Liu Liren. Laser communications in space I: Optical link and terminal technology[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
 刘立人. 卫星激光通信 I: 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
 8 Liu Liren. Laser communications in space II: Test and verification techniques on the ground[J]. 2007, **34**(2): 147~155
 刘立人. 卫星激光通信 II: 地面检测和验证技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 147~155

附录 A: 距离方向成像分辨率

(18)式中与距离方向延迟有关的因子为:

$$i(t) = K \text{rect} \left[\frac{t - (T + \tau_t)/2}{T - \tau_t} \right] \cos(2\pi \dot{f} \tau_t t), \tag{A1}$$

其傅里叶变换为:

$$I(f) = B \exp \left(-j2\pi \frac{T + \tau_t}{2} f \right) \text{sinc}[(T - \tau_t)f] \otimes [\delta(f - \dot{f} \tau_t) + \delta(f + \dot{f} \tau_t)]. \tag{A2}$$

可见,全带宽为 $\Delta f = \frac{2}{T - \tau_t}$,基本频率为 $f_0 = \dot{f} \tau_t = \frac{B}{T} \tau_t$,其中 B 为啁啾带宽。令距离方向上成像弥散园直径为 Δz ,由 $\frac{2\Delta z}{2z} =$

$\frac{\Delta f}{f_0}$ 得到:

$$\Delta z = \frac{cT}{(T - \tau_t)B}, \quad \tau > 0 \tag{A3}$$

当 $\tau_t \ll T$ 时, $\Delta z = c/B$; 当 $\tau_t = T/2$ 时, $\Delta z = 2c/B$ 。微波合成孔径雷达的传统定义的距离分辨率公式为 $\Delta L = c/(2B)$,这时 ΔL 只代表成像分辨率半宽度,是一致的。