

文章编号: 0253-2239(2008)06-1197-04

合成孔径激光成像雷达(Ⅱ): 空间相位偏置发射望远镜

刘立人

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 报道一种可以进行空间相位偏置的光学望远镜, 用作合成孔径激光成像雷达中的光学发射天线。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平板的相位函数, 能够在激光望远镜的照明区产生可控制的附加空间相位二次项, 灵活改变激光照明波前, 以在目标回波接收信号中产生雷达运动方向上的所需的二次项相位历程, 因此能够实现特定的方位向成像分辨率。

关键词 合成孔径激光成像雷达; 发射望远镜; 离焦; 相位调制平板; 相位二次项, 相位历程

中图分类号 TN958 文献标识码 A

Synthetic-Aperture Ladar (Ⅱ): Spatial Phase Biased Telescope for Transmitting Antenna

Liu Liren

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

Abstract A kind of phase-biased telescope used as the laser transmitting antenna for a synthetic-aperture laser imaging radar is reported. An additional quadratic phase can be produced onto the wavefront of laser illumination by using a spatial phase plate together with a defocusing in the telescope. Such an arrangement is flexible to generate a quadratic phase history necessary for the synthetic-aperture imaging along the azimuth-direction, particularly a phase history for a required imaging resolution.

Key words synthetic-aperture laser imaging radar; transmitting telescope; defocusing; phase plate; quadratic phase; phase history

1 引 言

合成孔径激光成像雷达的光学天线采用光学望远镜结构, 因为光学望远镜主镜的尺度大于波长 3~6 个数量级, 其发射和接收特性与射频天线有很大差别。在我的前文中解决了望远镜作为接收天线时的关键问题^[1], 即目标散射点衍射在接收面产生的波面像差可以采用望远镜的离焦工作方式补偿, 或者等效地采用附加相位调制平板补偿。在合成孔径激光成像雷达运动方向上产生目标的相位二次项历程是保证雷达运动方向上的目标的孔径合成成像的必要条件, 这种相位历程由接收过程的时序相位二次项历程和发射过程中的照明光斑的空间相位二

次项所组成。接收过程的相位二次项历程的等效焦距是固定的, 因此改变整个相位二次项历程的可能性只存在于发射波面的控制。

本文中首先研究了发射光束中固有的相位二次项, 进而提出了一种空间二次项相位偏置结构的发射望远镜, 在望远镜内放置空间相位调制平板, 控制望远镜目镜后焦面的离焦量和相位调制平板的相位函数, 能够在激光发射望远镜的照明区对于原衍射波面产生附加的和可控制的空间相位二次项, 从而改变激光照明波前, 并在目标接收信号中产生雷达运动方向上的所需的和可改变的相位历程, 保证雷达运动方向上的目标孔径合成成像并达到所需的特

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.shcnc.ac.cn

定的成像分辨率(见附录 A),本方法具有改变波前的灵活性,是实现合成孔径激光成像的具有光学特点的关键技术。

合成孔径激光成像首先在国外实验室实现实验^[2,3],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^[4],但是没有考虑利用光学望远镜变化发射波前的特性。

2 激光发射光束

用于合成孔径激光成像雷达的典型发射激光光束有两种:平面波和高斯光束。高斯光束衍射传播有解析解,并带有二次项相位因子。而平面波衍射只有在远场有解析解,此时也带有二次项因子。

发射望远镜主镜直径 d ,物体尺度 L 和传播距离 z 满足 $|z|^3 \gg \frac{\pi(d+L)^4}{4\lambda}$ 时孔径函数为 $\text{cyl}(r/d_2)$ 的平面波的非涅耳衍射为

$$u(x, y; z) = E \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \iint_{-\infty}^{\infty} \text{cyl}\left(\frac{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{d}, \beta\right) \exp\left(j\pi \frac{(x-\alpha)^2 + (y-\beta)^2}{\lambda z}\right) d\alpha d\beta, \quad (1)$$

该式没有解析结果,但是可以采用波带片原理进行半定量分析^[6]。进一步当 $|z| \gg \frac{\pi(d^2 + L^2)}{\lambda}$ 时其夫琅禾费衍射为傅里叶变换解析解:

$$u(x, y; z) = E \frac{\exp(jkz)}{j\lambda z} \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \frac{\pi d^2}{4} \frac{2J_1(\pi d \sqrt{x^2 + y^2}/(\lambda z))}{\pi d \sqrt{x^2 + y^2}/(\lambda z)}, \quad (2)$$

其带有二次项相位因子。

波腰为 w_0 的高斯光束在距离 z 上的衍射场强为

$$u(r) = A_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \exp[jkz + \Phi(z)] \exp\left[j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda R(z)}\right], \quad (3)$$

其中:

$$\begin{aligned} w(z) &= w_0 \left[1 + \left(\frac{2z}{kw_0^2}\right)^2\right]^{1/2}, \\ R(z) &= z \left[1 + \left(\frac{kw_0^2}{2z}\right)^2\right], \\ \xi(z) &= \arctan\left(\frac{2z}{kw_0^2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

应当注意 $R(z)$ 为照明光斑的本身存在的二次项相位的曲率半径。

当 $z \gg \pi w_0^2/\lambda$ 时,有

$$\begin{aligned} w(z) &\approx \frac{\lambda}{\pi w_0} z, \\ R(z) &\approx z, \\ \xi(z) &\approx \pm \pi/2. \end{aligned} \quad (5)$$

实际系统设计时,高斯发射光束的波腰 w_0 和孔径光阑直径 d 取如下关系:

$$w_0 = d/4, \quad (6)$$

此时,高斯光束波腰定义的主瓣能量占 86.5%,远场全发散角为 $0.64(\lambda/w_0)$ 。而孔径为 d 的平面光束的主瓣能量占 83.8%,远场全发散角为 $2.44(\lambda/d)$ 。由于 $2.44(\lambda/d) = 0.607 \frac{\lambda}{d/4} \approx 0.64 \frac{\lambda}{w_0}$,因此 $w_0 = \frac{d}{4}$ 下的高斯光束和平面波光束的远场衍射特性可以认

为是相同的。

3 菲涅耳衍射区域的离焦相位偏置望远镜

对于在菲涅耳衍射区域中的目标,可以采用图 1 所示的离焦和相位偏置发射望远镜产生照明光斑所需的附加相位二次项。

设望远镜目镜的焦距为 f_1 和物镜的焦距为 f_2 ,则望远镜的放大倍数为 $M = f_2/f_1$ 。望远镜入瞳平面位于目镜的前焦面,望远镜出瞳位于物镜的后焦面。目镜后焦面 4 和物镜前焦面之间的距离为 Δl ,表示望远镜的离焦量,当 $\Delta l = 0$ 时望远镜无离焦即处于对焦状态。物镜前焦面上放置相位调制平板,其相位调制函数为:

$$\exp[j\varphi(x, y)] = \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda f}\right), \quad (7)$$

其中 f 为等效焦距。

望远镜的发射激光光束在望远镜入瞳面上的波前为 $e_0(x, y)$,则目标照明波前为菲涅耳衍射:

$$e_s(x, y) = A \left[e_0\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right) \otimes \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \right]. \quad (8)$$

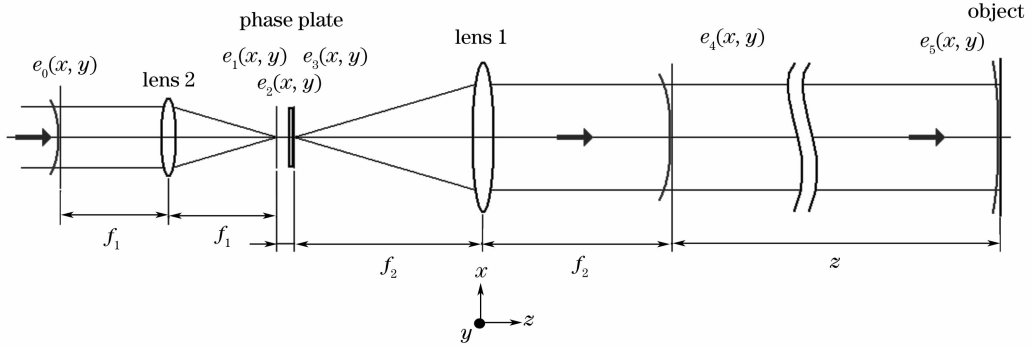


图 1 离焦和相位偏置发射望远镜

Fig. 1 Defocused and phase-biased transmitting telescope

要求衍射照明光场附加偏置一个空间相位二次项 $\exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right)$, 则相对于的望远镜出瞳波前则要求为:

$$e_3(x, y) = B \left\{ \left[e_0\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right) \otimes \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \right] \times \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right) \otimes \exp\left(-j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \right\}. \quad (9)$$

为了实现这一波前偏置, 采用线性衍射光学的分析方法^[6]和已知的离焦望远镜的特性^[1], 可以得到望远镜的离焦量为:

$$\Delta l = -\frac{f_2^2}{z + F_{\text{add}}}, \quad (10)$$

而空间相位二次项偏置的等效焦距应当为:

$$f = \frac{f_2^2}{2z}. \quad (11)$$

4 夫琅禾费衍射区域的相位偏置望远镜

当目标处于夫琅禾费衍射区域, 达到空间相位二次项 $\exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right)$ 偏置的要求离焦量为

$$\Delta l = 0, \quad (12)$$

而空间相位二次项偏置的等效焦距应当为:

$$F = \frac{f_2^2}{z^2} F_{\text{add}}. \quad (13)$$

这时照明光场波前为:

$$e_z(x, y) = C \mathcal{F}_z \left\{ e_0\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right) \right\} \times \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda z}\right) \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda F_{\text{add}}}\right), \quad (14)$$

式中 $\mathcal{F}_z\{\cdot\}$ 代表在距离 z 上的傅里叶变换。

上述表达式中 A, B 和 C 为复常数。

5 焦点投影相位偏置望远镜

在较短距离的菲涅耳传播区域, 如图 2 所示可以采用望远镜大离焦的焦点投影方法产生附加照明相位二次项。图中光源通过目镜的聚焦点离物镜前焦面的距离为 Δl_1 , 因此其成像于物镜后焦面的 Δl_2 距离上, 有 $\Delta l_1 \Delta l_2 = f_2^2$ 。所以物体照明光斑的相位二次项曲率半径为:

$$F_{\text{add}} = z - \frac{f_2^2}{\Delta l_1}. \quad (15)$$

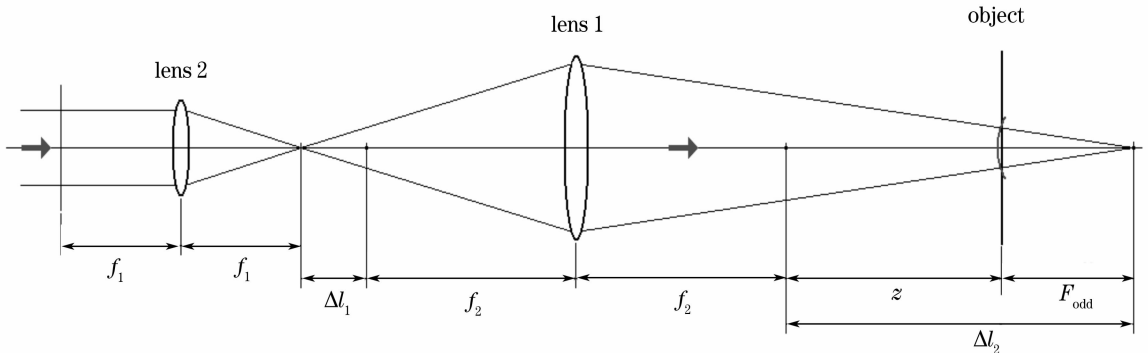


图 2 焦点投影照明波前偏置望远镜

Fig. 2 Wavefront-biased illuminating telescope by focus projection

其特点是可以产生正负号的二次项相位。

6 结 论

分析可知:目标处于菲涅耳衍射区域时可以采用相位调制板加望远镜离焦的方法产生所需的照明波前附加相位二次项,在夫琅和费衍射区域可以只采用相位调制板,而在几何光学范围可以采用焦点投影设计。光源光束应当根据情况不同采用高斯光束或平面波。

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目镜后焦面的位置上。望远镜在不离焦和不附加相位调制平板的状态下也可以在望远镜之外采用光学附件达到等效的离焦和相位偏置,其方法是联接一个 $4-f$ 转像光学系统,并在其中间焦面上进行离焦和相位偏置。关于空间应用的一些具体问题和检验方法可参见参考文献[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 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
- 3 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
- 4 J. Ricklin, M. Dierking, S. Fuhrer *et al.*. Synthetic aperture lidar for tactical imaging [C]. *DARPA Strategic Technology Office*
- 5 A. Ghatak. *Optics* [M]. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Co. Ltd., 1977
- 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: 合成孔径激光成像雷达方位方向的孔径合成成像分辨率

具有口径为 d_r 的合成孔径激光成像雷达接收望远镜的光学外差接收全视场角为 $\Delta\theta_r = 2.44 \frac{\lambda}{d_r}$, 相当于距离 z 上物体的能够被探测的直径为

$$D_r = 2.44 \frac{\lambda z}{d_r}. \quad (\text{A1})$$

接收过程可能产生二次项相位历程,其等效曲率半径假设为 F_r 。合成孔径激光成像雷达发射光束在物体面上的照明光斑直径为 D_t ,其具有本身可能存在的照明二次项相位(曲率半径 F_t)和附加二次项相位(曲率半径 F_{add})。设定发射光斑直径与接收直径比:

$$K = \begin{cases} 1, & (D_t \geq D_r) \\ D_t/D_r, & (D_t < D_r) \end{cases}, \quad (\text{A2})$$

因此物体有效的能被照明和探测的面积直径为

$$D = KD_r. \quad (\text{A3})$$

总的二次项相位曲率半径为:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{F_r} + \frac{1}{F_t} + \frac{1}{F_{\text{add}}}. \quad (\text{A4})$$

合成口径激光成像雷达的方位分析分辨率等效于一个直径为 D 而焦距为 F 的透镜的分辨率,即 $2.44 \frac{\lambda}{D} F$, 或者最终写为

$$\Delta d = \frac{d_r}{Kz} F. \quad (\text{A5})$$

上述成像分辨率可以简化为射频合成孔径雷达的传统定义分辨率 $\Delta d = \frac{d}{2}$, 即取 $D_r = D_t, F_r = z, F_t = z, F_{\text{add}} = \infty$ 。