

直视合成孔径激光成像雷达内发射场波前 像差对成像的影响

卢智勇 孙建锋* 职亚楠 周煜 栾竹 张宁 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信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 直视合成孔径激光成像雷达采用内发射场直接波面变换平动扫描发射,通过自差接收实现高分辨率成像。由于远场目标位置的光场分布取决于内发射光场,因此内发射场的波前像差会对激光雷达图像质量产生影响。采用 Zernike 多项式描述波前像差,对初级像差造成直视合成孔径激光成像雷达的成像影响进行了研究,理论分析和仿真结果表明:离焦、象散、彗差和球差对成像的影响最为严重,像差越大,其对成像分辨率的影响也越大。当像差的均方根值小于 0.05λ 时,对成像分辨率的影响很小,当像差的均方根值为 0.25λ 时,其象散和彗差引起成像分辨率近似增大到原来的 3 倍。彗差和球差还造成不同目标位置的成像分辨率不同,离中心位置越远,成像分辨率增加越快。

关键词 遥感;直视合成孔径激光成像雷达;波前像差;内发射场;Zernike 多项式

中图分类号 TN958 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0728001

Influence of Inner Wave-front Aberration on Down-Looking Synthetic Aperture Imaging Ladar Imaging

Lu Zhiyong Sun Jianfeng Zhi Yanan Zhou Yu Luan Zhu
Zhang Ning Liu Liren

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

Abstract Down-looking synthetic aperture imaging ladar (SAIL), with a transmitter of direct wave-front transformation in inner optical fields by parallel scanning, makes use of self-heterodyne detection to improve the resolution of images. Wave-front aberration in inner optical fields has effects on the imaging quality of the down-looking SAIL because the optical fields on the target plane depend on the inner optical fields at the focal plane of main lens. Zernike polynomials are proposed to represent wave-front aberrations. The influence of primary aberrations on down-looking SAIL imaging is investigated. The results show that focus, astigmatism, coma and spherical aberrations have significant influence on imaging, and the deeper the aberrations are, the more significant the influence on the resolution of images is. When the root mean square (RMS) value of primary aberrations is less than 0.05λ , the influence on resolution of images is very small. When the RMS value is up to 0.25λ , the resolution of images is up to 3 times in the condition of astigmatism and coma aberrations. Meanwhile, the target pointing at different positions has different resolutions with coma and spherical aberrations. The further the imaging targets from the center position are, the more significant the influence on the resolution of images is.

收稿日期: 2014-02-19; 收到修改稿日期: 2014-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61275110, 61377004, 61108069)

作者简介: 卢智勇(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事空间信息光学和晶体光学方面的研究。

E-mail: luzhiyong15@126.com

导师简介: 刘立人(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光通信和空间信息光学方面的研究。

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

* 通信联系人。E-mail: sunjianfeng@163.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

Key words remote sensing; down-looking synthetic aperture imaging lidar; wave-front aberration; inner optical fields; Zernike polynomials

OCIS codes 280.6730; 280.340; 110.1080; 110.3175

1 引 言

合成孔径激光成像雷达(SAIL)可以实现远距离厘米量级的高分辨率光学成像,近年来,国内外关于SAIL的理论及实验研究取得了快速的发展^[1-17]。国外方面,2002年,美国海军实验室Bashkanshy等^[1]采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 的半导体可调谐激光器,在距离向采用波长啁啾,在方位向采用合成孔径实现了固定孔径对移动目标的二维成像。2005年,美国宇航公司实验室Beck等^[4]采用长度不匹配的数字参考通道,实现了移动孔径对固定目标的二维成像。2006年,美国雷声公司和诺斯罗普·格鲁门公司宣称成功研制了合成孔径激光成像雷达装置系统,但并没有具体的公开报道^[3]。2009年,Buck等^[5]采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的脉冲光纤激光,实现了700 m距离的室外双点目标成像;而后,2011年,Krause等^[6]以正侧视方式对室外1.6 km斜距上的目标实现了SAIL成像。国内方面,2009年,周煜等^[7]实现了缩小尺度的实验室二维SAIL目标成像。2011年,刘立人等^[8]报道了14 m目标距离上的自由空间结构SAIL成像实验结果,实验在目标面安排了一个反射镜,用于对方位向的相位进行补偿。2013年,吴谨等^[17]采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光纤激光在2.4 m距离下实现了单程远场衍射照明的合成孔径激光成像雷达实验室成像。上述SAIL都是在侧视条件下通过对发射光束的频率扫描实现距离向的距离分辨成像,对发射光束产生二次波面相位实现方位向的孔径合成。这种侧视SAIL采用光学外差接收,受大气扰动、运动平台振动、目标散斑和激光雷达系统本身相位变化等的影响很大^[3,11],还要求拍频信号的初始相位严格同步并且需要长距离延时来控制相位的变化,在实际的应用中控制相位变化的技术相当复杂^[4,9]等,这些因素严重影响了侧视SAIL的实用化。

2012年,刘立人^[14]基于抛物波前差动扫描和自差探测复数化接收的方法,提出了一种直视SAIL,基本原理是采用双光束的对向扫描和波前变换原理对目标投射两个同轴同心、偏振正交的光束并且自差接收,这两个波前的合成相位差随扫描时间成抛物等位线分布。目标回波通过望远镜接收,然后由偏振分束器分束进入 2×4 光学桥接器^[15],输出的4

路光经过两个平衡探测器和模数转换器转换成两路具有 90° 相移的数字时间信号,通过复数化处理,最终通过傅里叶变换实现交轨向聚焦成像,通过共轭相位二次项匹配滤波实现顺轨向聚焦成像。由于采用了同轴光束自差接收,降低了大气、平台运动、散斑等相位变化和干扰的影响,可以采用低质量的光学系统,来获得高分辨率图像,但是这种采用距离衍射的办法间接在内发射场产生二次波面相位的结构容易产生较大的波面像差,而且文章也没有分析内发射场波面像差对目标成像的影响。

直视SAIL的关键技术是在内发射场产生随时间变化的抛物波前相位差,其可间接产生或者直接相位板平动产生,但是,由于直视SAIL采用将内发射场放大投射到远场目标位置,所以内发射场位置的光场分布(包括畸变像差)同时投射到目标位置,内发射场的波前像差会严重影响目标的成像,对内发射场精度提出了很高的要求。而引起内发射场的波前像差的因素主要由光学器件的加工、仪器的装配、温度的不均匀、固有的像差等组成,由于Zernike多项式几乎可以描述所有的波前像差,因此本文采用Zernike多项式来描述内发射场位置的不同像差,研究了不同波前像差对直视SAIL造成的目标成像影响,并讨论了在离焦像差情况时的补偿措施,直接形象地认识了内发射场波前像差对成像的影响,为实际直视SAIL系统中内发射场的设计提供了依据和参考。

2 直视SAIL内发射场直接波面变换平动扫描原理

直视SAIL的几何模型如图1所示,基本原理是:采用波前变换原理在雷达机内设计产生两个偏振正交可扫描的二次波面相位,即存在一个内发射光场,位于发射望远镜主镜的前焦面,该内发射光场在快时间的扫描下产生随快时间变化的抛物波面相位,最后该内发射光场通过发射主镜放大成像至远场目标位置,设内发射场为 $e^{in}(x,y)$,发射望远镜主镜的焦距为 f_1 ,目标中心距离为 Z ,这时可以在远场目标处产生内发射光场的放大像,放大的倍数为 $M=Z/f_1$,因此远场目标的衍射场可以写为

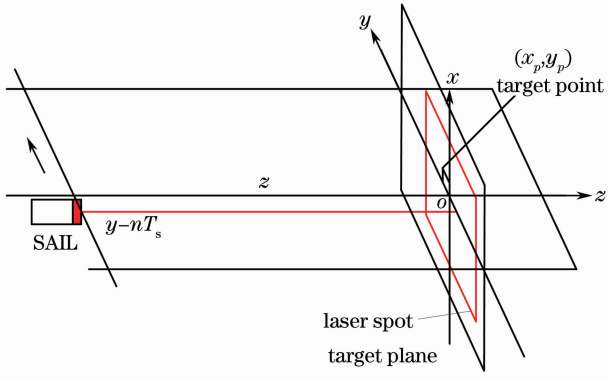


图1 直视 SAIL 的几何模型

Fig. 1 Geometry for down-looking SAIL imaging

$$e_z(x, y) = \frac{\exp[jk(Z + 2f_1)]}{M} e^{\text{in}}\left(-\frac{x}{M}, -\frac{y}{M}\right) \times \exp\left(j\pi \frac{x^2 + y^2}{\lambda Z}\right). \quad (1)$$

由于远场目标位置的光场分布主要由内发射光场分布决定,直接在内发射场位置放置 4 块柱面镜进行直接波面变换,具有结构简单可靠、体积小、

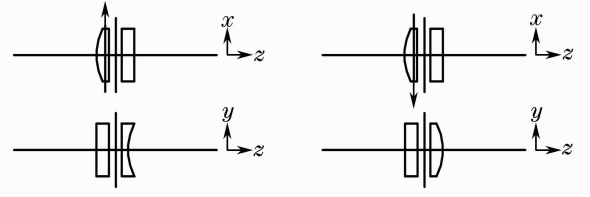


图2 直视 SAIL 的内发射场结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of down-looking SAIL

in inner optical fields

传输损失小、抗振动等优点,图 2 为 4 块柱面镜构成的内发射场,当单模单频激光器经过 $1/2$ 波片后,通过偏振分束器分为偏振正交的 H 和 V 两光束,在内发射场位置产生所需的空相二次项,再由偏振正交合束器合为同轴同心偏振正交的光束,由发射望远镜主镜发射至远处目标处^[14],其中,两交轨向柱面镜的焦距相同,顺轨向柱面镜的焦距符号相反,并且在交轨向对两柱面镜相对平动的扫描方案实现线性相位调制,柱面镜与光阑孔径紧靠一起,假设发射主镜为理想的成像透镜,则两偏振正交 H、V 光束的内发射场为

$$e_{\text{H}}^{\text{in}}(x, y; t_{n,f}, nT_s) = E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}}\right) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x - v_x^{\text{in}} t_{n,f})^2}{R_1^{\text{in}}} + \frac{y^2}{R_1^{\text{in}}} \right]\right\}, \quad (2a)$$

$$e_{\text{V}}^{\text{in}}(x, y; t_{n,f}, nT_s) = E_0 \text{rect}\left(\frac{x}{L_x^{\text{in}}}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{L_y^{\text{in}}}\right) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x + v_x^{\text{in}} t_{n,f})^2}{R_1^{\text{in}}} - \frac{y^2}{R_2^{\text{in}}} \right]\right\}, \quad (2b)$$

式中 R_1^{in} 和 R_2^{in} 为柱面镜焦距。这时,在内发射场位置的波前相位差为

$$\Delta\varphi^{\text{in}}(x, y; t_{n,f}, nT_s) = -\frac{2\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}/2} x v_x^{\text{in}} t_{n,f} + \frac{\pi}{\lambda R_3^{\text{in}}} y^2, \quad (3)$$

该内发射场经过发射望远镜主镜放大发射后,在目标面上产生内发射场的放大倍数为 M 的光场,二维正交扫描目标点,则对点目标 (x_p, y_p) ,其接收天线上的回波信号分别为

$$e_{\text{H}}^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) = C \text{rect}\left(\frac{x_p}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - v_y nT_s}{L_y}\right) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p - v_x t_{n,f})^2}{R_1} + \frac{(y_p - v_y nT_s)^2}{R_1} \right]\right\} \times \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - v_y nT_s)^2]\right\} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - v_y nT_s)]^2]\right\}, \quad (4a)$$

$$e_{\text{V}}^{\text{TR}}(x, y; x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) = C \text{rect}\left(\frac{x_p}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - v_y nT_s}{L_y}\right) \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{(x_p + v_x t_{n,f})^2}{R_1} - \frac{(y_p - v_y nT_s)^2}{R_2} \right]\right\} \times \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [x_p^2 + (y_p - v_y nT_s)^2]\right\} \exp\left\{j \frac{\pi}{\lambda Z} [(x - x_p)^2 + [y - (y_p - v_y nT_s)]^2]\right\}, \quad (4b)$$

式中光强等常数用 C 表示,且这两正交光束的点目标回波相位差为

$$\Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; t_{n,f}, v_y nT_s) = \left[-\frac{2\pi}{\lambda R_1/2} x_p v_x t_{n,f} + \frac{\pi}{\lambda R_3} (y_p - v_y nT_s)^2 \right], \quad (5)$$

式中 $R_1 = M^2 R_1^{\text{in}}, R_2 = M^2 R_2^{\text{in}}, v_x = M v_x^{\text{in}}, T_s$ 为慢时间,目标面上的照明光斑尺寸为 $L_x = M L_x^{\text{in}}, L_y = M L_y^{\text{in}}, 1/R_3 = 1/R_1 + 1/R_2$ 。这里采用 $R_1 = R_2$,这时 $R_3 = R_1/2$ 。

最后这两偏振正交光束通过自差接收进入 2×4 光学桥接器,复数化后得到的光电流信号为

$$i_{\text{ID}}(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) = A(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) \exp[-j\Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; t_{n,f}, v_y nT_s)], \quad (6)$$

其中

$$A(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) = \text{Crect}\left(\frac{x_p}{L_x}\right) \text{rect}\left(\frac{y_p - v_y nT_s}{L_y}\right),$$

最后,二维数据的收集方程为

$$i_{2D}(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) = \sum_n i_{1D}(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s). \quad (7)$$

在数据收集后,通过对交轨向进行线性相位项调制的一维傅里叶变换聚焦成像,在顺轨向进行二次项相位历程的共轭二次项相位匹配滤波聚焦成像,或者通过先对顺轨向的二次相位时间历程共轭二次相位补偿后再进行二维傅里叶变换^[16]。对于目标点 (x_p, y_p) ,采用第二种处理方式,最终的处理成像为

$$I(\xi, \eta) = CF_{v_x t_{n,f} \rightarrow \xi} F_{v_y nT_s \rightarrow \eta} \left\{ A(x_p, y_p; t_{n,f}, nT_s) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda R_1/2} x_p v_x t_{n,f} + j \frac{\pi}{\lambda R_3} (y_p - v_y nT_s)^2\right] \times \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda R_3} (v_y nT_s)^2\right] \right\}, \quad (8a)$$

式中 C 考虑了傅里叶变换参数,(8a)式可以近似为

$$I(\xi, \eta) \approx C \text{sinc}(\xi) \otimes \delta\left(\xi + \frac{x_p}{\lambda R_1/2}\right) \text{sinc}(\eta) \otimes \delta\left(\eta - \frac{y_p}{\lambda R_3}\right), \quad (8b)$$

显然目标点成像中心位置在 $(-x_p, y_p)$ 上,最终可以实现目标点的成像。对一个二维目标面上的所有点成像为

$$I(x, y) \approx \sum_p C_p \text{sinc}(x) \otimes \delta(x + x_p) \text{sinc}(y) \otimes \delta(y - y_p). \quad (9)$$

式中符号 \otimes 表示卷积积分。

3 内发射场波前像差对点目标成像的影响

3.1 内发射场的像差模型

内发射场通过柱面镜直接波面变换扫描产生所需的交轨向的线性相位调制和顺轨向的相位二次项调制,但实际由于加工、装配误差等均使得每个柱面镜都可能存在像差,如图 3 所示,为了更符合实际且便于讨论,假定三个相同焦距柱面镜完全一样,其像差也相同,另一个顺轨向不同焦距柱面镜像差不同。设定 $\Phi_1(x, y)$ 、 $\Phi_2(x, y)$ 分别表示两种焦距柱面镜的波前像差相位,并且 H 偏振光束顺轨向的波前像差 $\Phi_1(y, -x)$ 为像差 $\Phi_1(x, y)$ 旋转 90° 的情况,则

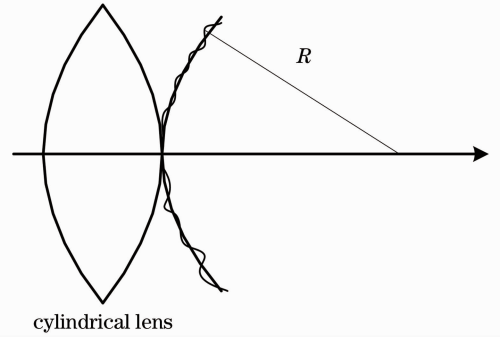


图 3 柱面镜的像差

Fig. 3 Aberrations of cylindrical lens

两偏振正交光束内发射场的波前相位差为

$$\Delta\varphi^{\text{in}}(x, y; t_{n,f}) = -\frac{2\pi}{\lambda R_1^{\text{in}}/2} x v_x t_{n,f} + \frac{2\pi}{\lambda R_2^{\text{in}}} y^2 + \Phi_1(x - v_x t_{n,f}, y) - \Phi_1(x + v_x t_{n,f}, y) + \Phi_1(y, -x) - \Phi_2(x, y). \quad (10)$$

直视合成孔径激光成像雷达通过两光束内发射场的相位随时间调制并放大到远场目标位置,同时转化为对目标的扫描,对于其中的单个目标点 (x_p, y_p) ,其回波的相位差可写为

$$\Delta\varphi^{\text{TR}}(x_p, y_p; t_{n,f}, v_y nT_s) = \left[-\frac{2\pi}{\lambda R_1/2} x_p v_x t_{n,f} + \frac{\pi}{\lambda R_3} (y_p - v_y nT_s)^2 \right] + \Delta\Phi(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y nT_s), \quad (11)$$

式中

$$\Delta\Phi(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y nT_s) = \Phi_1(x_p - v_x t_{n,f}, y_p - v_y nT_s) - \Phi_1(x_p + v_x t_{n,f}, y_p - v_y nT_s) + \Phi_1(y_p - v_y nT_s, -x_p) - \Phi_2(x_p, y_p - v_y nT_s).$$

因此,带有像差相位的时间流数据 $(v_x t_{n,f} \rightarrow \xi, v_y nT_s \rightarrow \eta)$ 处理后的成像信号为

$$I(\xi, \eta) \approx C \text{sinc}(\xi) \otimes \delta\left(\xi + \frac{x_p}{\lambda R_1/2}\right) \text{sinc}(\eta) \otimes \delta\left(\eta - \frac{y_p}{\lambda R_3}\right) \otimes F_{v_x t_{n,f} \rightarrow \xi} F_{v_y n T_s \rightarrow \eta} [\Delta\Phi(v_x t_{n,f}, v_y n T_s)], \quad (12)$$

上式为无像差情况下的理想点扩散函数,卷积一项是由像差产生的频谱项,由于像差的存在,当柱面镜运动扫描后,使得顺交轨向引入附加的误差相位,该附加的误差相位经过分离的快时间与慢时间一维傅里叶变换,影响到直视合成孔径激光成像雷达的频率特性,进而对成像产生影响。针对波前像差进行讨论,由于Zernike多项式可以表示各种波前像差,且孔径光阑为矩形孔径,因此将内发射场处的柱面镜的波面像差展成直角坐标系下的Zernike正交多项式

$$\Phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda} W(x, y), \quad (13)$$

$$W(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n Z_n(x, y) = a_1 x + a_2 y + a_3(x^2 + y^2) + a_4(y^2 - x^2) + a_5(xy) + a_6[-2x + 3x(x^2 + y^2)] + a_7[-2y + 3y(x^2 + y^2)] + a_8[1 - 6(x^2 + y^2) + 6(x^2 + y^2)^2] + \dots, \quad (14)$$

式中 a_n 为Zernike多项式展开系数, $Z_n(x, y)$ 为Zernike多项式。由于内发射场位置放置矩形孔径光阑限制光束在小孔径范围,这种情况下的Zernike高阶像差很小,对成像的影响也很小,因此主要讨论Zernike的前8项像差,即对其初级像差进行讨论研究。

对于理想的波面相位获得的目标点信号近似为辛格(sinc)函数,一般以其点扩散函数的最小值全宽度来表示其成像分辨率,但对于像差波面获得的目标点,其中心产生了移动,同时光强分布也呈现畸变分布,为了合理地分析成像中心位置及其对成像分辨率的影响,定义中心位置为光强的一阶矩,成像分辨率为光强的二阶矩,有

$$\bar{x} = \frac{\iint x I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (15a)$$

$$\bar{y} = \frac{\iint y I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}, \quad (15b)$$

因此,成像的目标点位置位于 (\bar{x}, \bar{y}) 处。目标点的成像分辨率表示为

$$d_x = 4 \sqrt{\frac{\iint (x - \bar{x})^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}}, \quad (16a)$$

$$d_y = 4 \sqrt{\frac{\iint (y - \bar{y})^2 I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}}. \quad (16b)$$

3.2 波前像差的影响分析

对于Zernike多项式像差下的交轨向倾斜像差 Z_1 有

$$\Delta\Phi_1(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) = -\frac{2\pi}{\lambda} [2a_1 v_x t_{n,f} + (a_1 - a_2) v_y n T_s], \quad (17)$$

其傅里叶变换为

$$F_{v_x t_{n,f} \rightarrow \xi} F_{v_y n T_s \rightarrow \eta} [\Delta\Phi_1(v_x t_{n,f}, v_y n T_s)] = \delta\left(\xi + \frac{2a_1}{\lambda}\right) \delta\left[\eta + \frac{(a_1 - a_2)}{\lambda}\right], \quad (18)$$

式中 a_1 为第一种柱面镜的倾斜像差系数, a_2 为第二种柱面镜的倾斜像差系数,最终的成像点扩散函数为

$$I(\xi, \eta) \approx C \text{sinc}\left(\xi + \frac{2a_1}{\lambda} + \frac{x_p}{\lambda R_1/2}\right) \text{sinc}\left[\eta - \frac{y_p}{\lambda R_3} + \frac{(a_1 - a_2)}{\lambda}\right], \quad (19)$$

由(19)式可知,倾斜像差 Z_1 、 Z_2 引起顺交轨向向中心点的平移,对目标的分辨率没有影响,显然目标点成像中心位置在 $[-x_p - a_1 R_1, y_p - (a_1 - a_2) R_3]$,因此可以通过测出 a_1 、 a_2 系数,频谱移动将图像校正到中心位置。

对于Zernike多项式下的离焦像差 Z_3 ,其两光束的内发射场像差为

$$\Delta\Phi_3(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) = -\frac{2\pi}{\lambda} 4a_{31} x_p v_x t_{n,f} + \frac{2\pi}{\lambda} (a_{31} - a_{32}) (y_p - v_y n T_s)^2, \quad (20)$$

其傅里叶变换为

$$F_{v_x t_{n,f} \rightarrow \xi} F_{v_y n T_s \rightarrow \eta} [\Delta \Phi(v_x t_{n,f}, v_y n T_s)] = \delta(\xi + \frac{4a_{31} x_p}{\lambda}) \left\{ \exp(-j2\pi\eta y_p) \exp\left\{-\pi \left\{ \frac{\lambda^2 \eta^2}{[2(a_{31} - a_{32})]^2} \right\} \right\} \right\}, \quad (21)$$

式中 a_{31} 、 a_{32} 为第一、二种柱面镜的离焦像差系数,且忽略了部分常数项,最后数据处理后有

$$I(\xi, \eta) \approx C \text{sinc}\left(\xi + \frac{4a_{31} x_p}{\lambda} + \frac{x_p}{\lambda R_1/2}\right) \text{sinc}\left(\eta - \frac{y_p}{\lambda R_3}\right) \otimes \left\{ \exp(-j2\pi\eta y_p) \exp\left\{-\pi \left\{ \frac{\lambda^2 \eta^2}{[2(a_{31} - a_{32})]^2} \right\} \right\} \right\}, \quad (22)$$

从(22)式可以看出,以 $\xi = \frac{x}{\lambda R_1/2}$ 为交轨向的空间频率时,目标点发生平移,不同的目标点平移大小不同,对面目标将产生目标面的伸缩,此时可以采用空间频率的比例缩放获取准确的二维面目标,将频率化为 $\xi = \left(\frac{4a_{31}}{\lambda} + \frac{1}{\lambda R_1/2}\right)x$,此时点扩展函数的全宽度变为 $d_x = \frac{\lambda R_1}{(2a_{31} R_1 + 1)L_x}$;但顺轨向的点扩散函数卷积了一个二次相位因子,造成目标频谱的展宽和频移,最终将会降低成像分辨率,这里的二次相位因子同样可以通过测量并补偿,获得较为理想的目标点。

对于 Zernike 多项式的象散像差 Z_4 、 Z_5 ,其中 Z_4 与离焦像差 Z_3 对相位的影响相同,对于象散 Z_5 ,两光束像差为

$$\Delta \Phi_5(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) = -\frac{2\pi}{\lambda} 2a_{51} v_x t_{n,f} (y_p - v_y n T_s) + \frac{2\pi}{\lambda} (a_{51} - a_{52}) x_p (y_p - v_y n T_s), \quad (23)$$

由(23)式可知,像差 Z_5 产生点目标顺轨向位置的平移,平移大小与像差系数和交轨向位置有关,同时存在顺交轨向的频谱交叉项,使得频谱产生重叠,将造成图像的模糊,导致分辨率下降。

对于 Zernike 多项式的彗差 Z_6 、 Z_7 ,有

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_6(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) &= \frac{2\pi}{\lambda} a_{61} [(4 - 6x_p^2) v_x t_{n,f} - 6(v_x t_{n,f})^3 - 6v_x t_{n,f} (y_p - v_y n T_s)^2] + \\ &\quad \frac{2\pi}{\lambda} (a_{61} - a_{62}) [(2 - 3x_p^2) v_y n T_s + 3(y_p - v_y n T_s)^3], \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_7(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) &= \frac{2\pi}{\lambda} a_{71} [-12x_p y_p v_x t_{n,f} + 12x_p (v_x t_{n,f}) (v_y n T_s)] + \\ &\quad \frac{2\pi}{\lambda} (a_{71} - a_{72}) 3x_p (y_p - v_y n T_s)^2, \end{aligned} \quad (25)$$

其中(24)式和(25)式略去了部分常数项,其像差引入了目标点随时间非线性变化的情况和快慢时间交叉的情况,傅里叶变换的频谱将展宽,这会降低目标的成像分辨率,劣化图像质量。

对于 Zernike 的球差像差 Z_8 ,相位差为

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_8(x_p, y_p; v_x t_{n,f}, v_y n T_s) &= \frac{2\pi}{\lambda} a_{81} [(24x_p - 48x_p^3) v_x t_{n,f} - 48x_p (v_x t_{n,f})^3 - 48x_p (v_x t_{n,f}) (y_p - v_y n T_s)^2] + \\ &\quad \frac{2\pi}{\lambda} (a_{81} - a_{82}) [(12x_p^2 - 6) (y_p - v_y n T_s)^2 + 6(y_p - v_y n T_s)^4], \end{aligned} \quad (26)$$

(26)式忽略了部分常数项,由于球差产生快慢时间的像差包含一次项、二次项、三次项和四次项,其中的非线性项使得目标成散焦像。

通过对内发射场的 Zernike 各项像差的分析,这些像差对相位的影响主要表现在产生了随慢时间和快时间变化的线性项、二次项、高次项和交叉项,其中线性项仅影响目标点的中心成像位置,二次项和高次项影响目标的聚焦程度,进而影响成像质量。而交叉项引起频谱混叠交叉,严重影响成像质量,同

时,部分像差项还与目标点位置相关,导致目标图像的图形畸变、失真。

4 系统仿真

4.1 仿真模型

以机载平台下的条带扫描工作模式为例:平台速度为 40 m/s,观察高度 $Z = 3$ km,要求激光照明条幅宽度为 $D_x \times D_y = 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,分辨率全宽度为 $d_x \times d_y = 8 \text{ cm}^2$ 。发射激光波长采用 $1 \mu\text{m}$,光阑

孔径为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} (x \times y)$, 发射主镜的焦距设计为 $f_1 = 1.5\text{ m}$, 因此距离放大倍数为 $M = 2 \times 10^3$, 这样, 在目标面上照明光斑的尺寸为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$, 设计内发射场的柱面镜焦距为 $R_1^m = R_2^m = 200\text{ mm}$, 激光脉冲重复频率为 800 Hz , 光脉冲宽度为 $700\text{ }\mu\text{s}$, 交轨向柱面镜平动的重复频率为 800 Hz , 平动速度为 1 m/s . 选取 3 个目标点作为仿真目标, 其坐标分别为 $(0, 0, 0), (0.5, 0.5, 0), (-0.3, -0.3, 0)$.

4.2 仿真结果与分析

各初级像差的均方根值为 0.25λ 时, 三个点目

标的等高线图如图 4 所示。从图中可以直观清楚地看出: 离焦 Z_3 引起方位向的散焦, 象散 Z_5 造成目标点的等高线为更大的矩形方块, 彗差 Z_6 形成扇形的旁瓣, 球差 Z_8 引起目标点旁瓣的增加, 使最终的成像分辨率严重下降。图 5 为均方根值为 0.25λ 时彗差 Z_6 下的内发射场波前干涉场分布, 图 5(a) 为两光束完全重合的干涉场, 图 5(b) 为两柱面镜对向移动 0.1 mm 的干涉场。由于像差存在, 干涉场偏离理想的干涉条纹, 这是造成成像分辨率下降的直接原因。

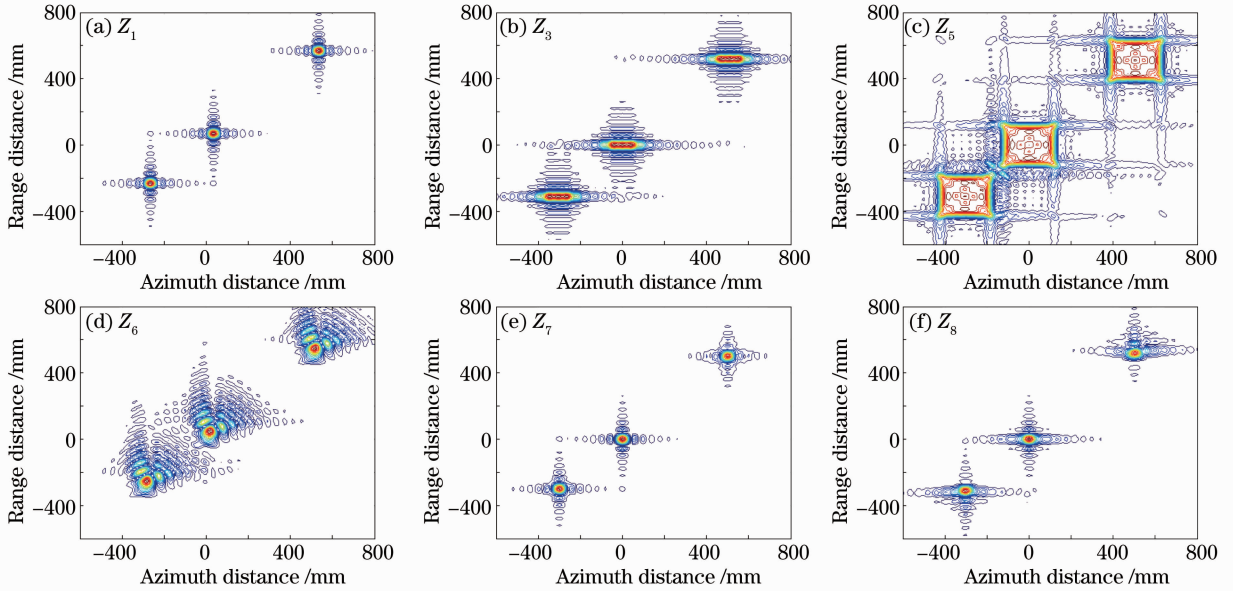


图 4 初级像差下的点目标等高线图

Fig. 4 Contour of the points with primary aberrations

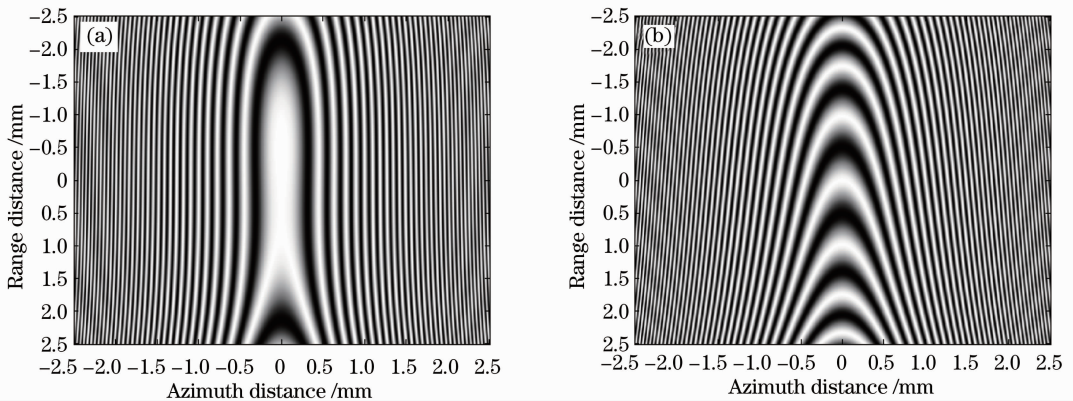


图 5 彗差像差 Z_6 下的内发射场干涉图。柱面镜偏离中心距离: (a) $\Delta x = 0$; (b) $\Delta x = 0.1\text{ mm}$

Fig. 5 Interferograms with coma Z_6 in inner optical fields. Cylindrical lens off-center distance: (a) $\Delta x = 0$; (b) $\Delta x = 0.1\text{ mm}$

从图 4(e) 还可以发现不同点在相同像差情况下目标等高线图的旁瓣是不同的, 为了进一步说明像差对不同目标点成像分辨率的影响情况, 对每种初级像差的不同目标点光强二阶矩成像分辨率进行仿真计算, 分别取 $(0, 0, 0), (0.5, 0.5, 0), (1, 1, 0)$ 进

行计算仿真, 如图 6~9 所示。结果表明: 不同目标点, 象散 Z_5 引起的成像分辨率变化相同; 随着目标点远离中心位置, 彗差 Z_6 仅顺轨向分辨率逐渐增大, 彗差 Z_7 仅交轨向分辨率逐渐增大; 而球差 Z_8 对成像分辨率的影响最为明显, 越远离中心位置, 成像

分辨率增加越快,且交轨向对成像分辨率的影响比顺轨向的影响大。造成这些影响的主要原因是由于目标相位的产生是通过内发射场控制的,其发射到

目标面的波面发生畸变,必然使得不同的目标点存在不同的畸变,影响到最终的成像结果。

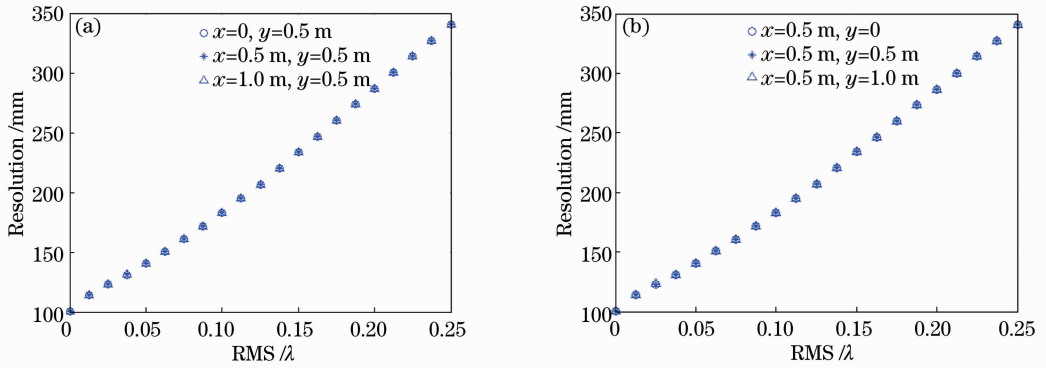


图 6 不同位置目标点下,象散像差 Z_5 对成像分辨率的影响比较。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 6 Effects of astigmatism Z_5 on imaging resolution for different locations. (a) x direction; (b) y direction

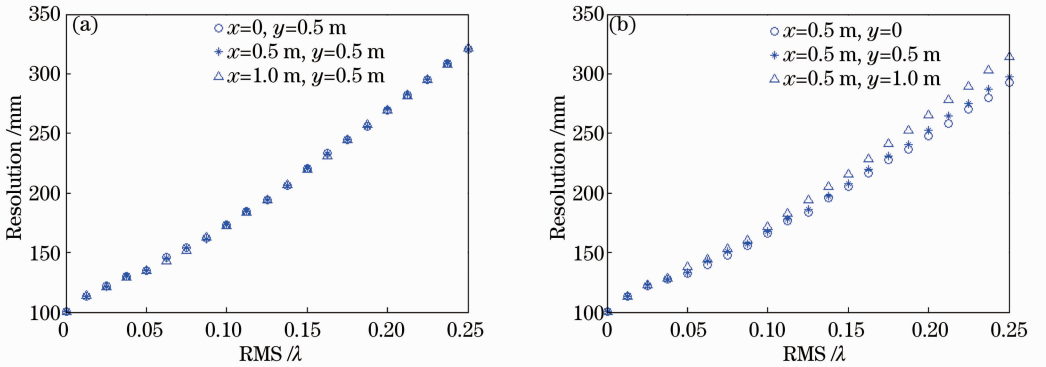


图 7 不同位置目标点下,彗差像差 Z_6 对成像分辨率的影响比较。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 7 Effects of coma Z_6 on imaging resolution for different locations. (a) x direction; (b) y direction

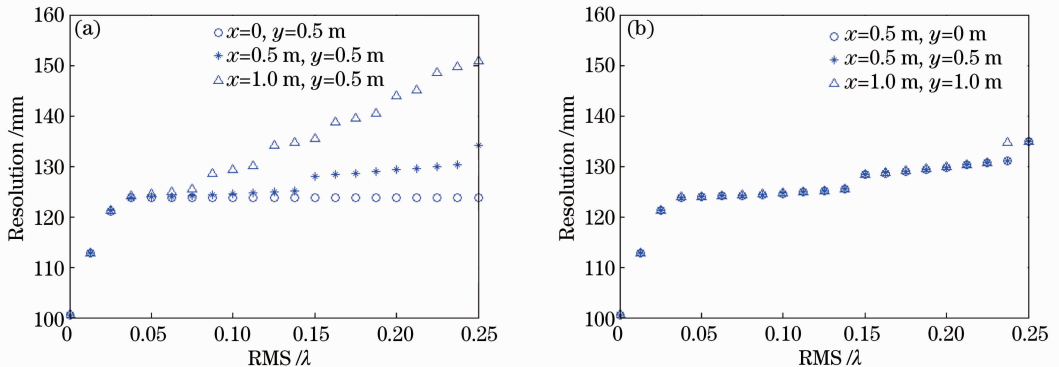


图 8 不同位置目标点下,彗差像差 Z_7 对成像分辨率的影响比较。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 8 Effects of coma Z_7 on imaging resolution for different locations. (a) x direction; (b) y direction

为了进一步分析各初级像差对目标点成像分辨率的影响,图 10 给出了点目标 $(0.5, 0.5, 0)$ 的光强二阶矩成像分辨率随各初级像差均方根值的变化曲线。图 10 表明内发射场平动扫描系统中离焦 Z_3 、象散 Z_5 、彗差 Z_6 和球差 Z_8 像差对成像分辨率产生较大的影响,而离焦像差 Z_3 仅对顺轨向的分辨率产

生影响,其他的初级像差对成像分辨率的影响较小;当像差畸变均方根值小于 0.25λ 时,所有像差引起成像分辨率变化与倾斜像差的影响相同,基本无影响;随着像差均方根值的增大,交轨向象散 Z_5 、彗差 Z_6 导致成像分辨率迅速增大,顺轨向离焦 Z_3 、象散 Z_5 、彗差 Z_6 和球差 Z_8 像差同样导致成像分辨率迅

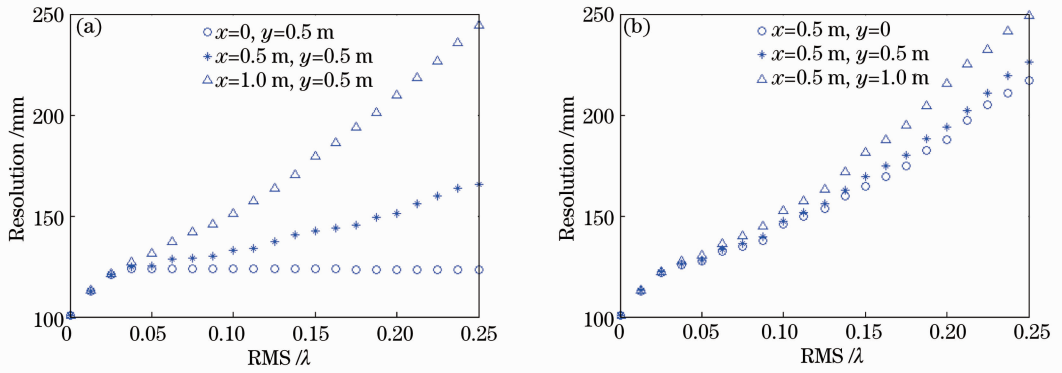


图 9 不同位置目标点下,球差像差 Z_8 对成像分辨率的影响比较。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 9 Effects of spherical Z_8 on imaging resolution for different locations. (a) x direction; (b) y direction

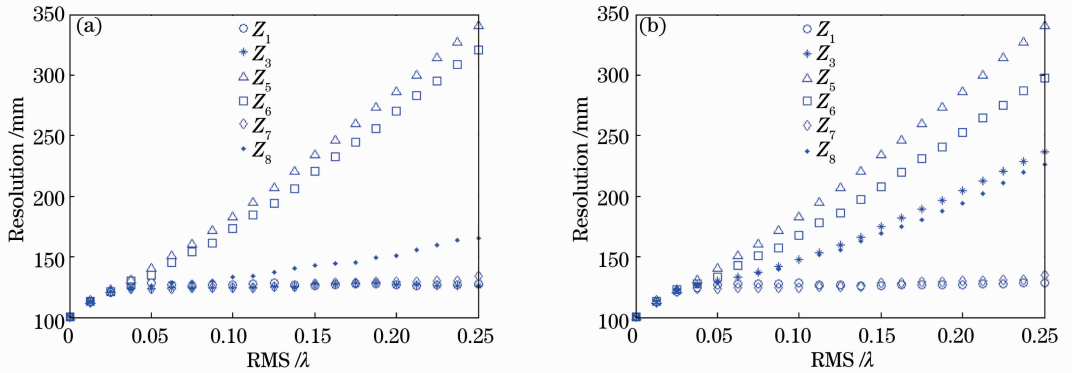


图 10 不同初级像差对目标点成像分辨率的影响。(a) x 方向;(b) y 方向

Fig. 10 Influence of primary aberrations on resolution of point imaging. (a) x direction; (b) y direction

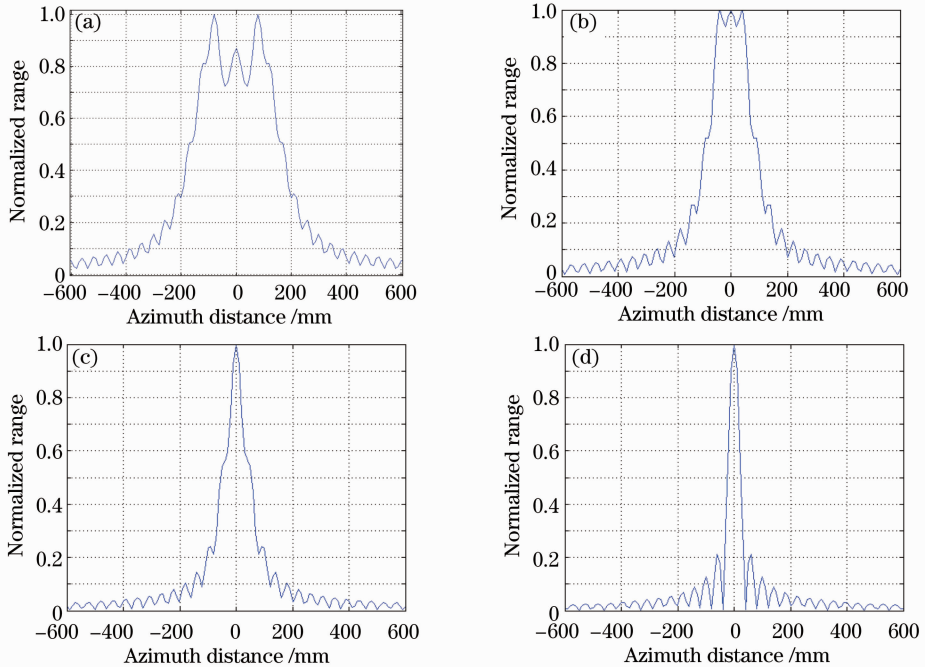


图 11 不同像差系数补偿的目标点。补偿的均方根值分别为(a) 0;(b) $\lambda/4$;(c) $\lambda/3$;(d) $\lambda/2$

Fig. 11 Target points of different compensated aberration coefficients. Compensated RMS is (a) 0; (b) $\lambda/4$; (c) $\lambda/3$; (d) $\lambda/2$

速增大,当像差畸变均方根值为 0.25λ 时,象散 Z_5 和彗差 Z_6 引起成像分辨率近似增大到原来的 3 倍。

结合图 4 可知,内发射场的波前像差对成像分辨率的影响主要是由于旁瓣的增强、旋转造成的。

4.3 离焦像差补偿

离焦像差在透镜的加工,系统的装配过程中是非常常见的,该像差会使得目标成像的分辨率严重下降,影响成像质量,主要原因是由于离焦产生了随时间变化的二次项相位,造成频谱的展宽,但由于二次项相位仅仅与像差系数和扫描的时间项有关,与成像的目标位置无关,因此,只要测得离焦系数,便可以通过与时间项的乘积产生共轭的二次波面相位,对目标信号进行补偿,实现目标的聚焦,如图 11(a)为离焦均方根值 0.5λ 情况下的顺轨向图像,图 11(b)~(d)为不同像差系数下的补偿结果,研究表明:当补偿系数在 $\lambda/3$ 和 $2\lambda/3$ 之间时,可以恢复得到相同成像分辨率的聚焦像(这里的成像分辨率以点扩散函数的最小值半宽度计算)。

5 结 论

直视合成孔径激光成像雷达通过在内发射场位置直接波面变换平动扫描产生目标位置的交轨向线性相位调制和顺轨向二次项相位调制,对目标进行快时间和慢时间的二维扫描后,收集自差的时间流数据信号,该信号的相位与内发射场波面相位有关。采用 Zernike 多项式描述内发射场的波前像差,分析研究了内发射场的波前像差对目标成像的影响,引入了光斑二阶矩宽度成像分辨率随像差的变化关系。结果表明,内发射场平动扫描系统中离焦 Z_3 、象散 Z_5 、彗差 Z_6 和球差 Z_8 像差对成像分辨率产生较大的影响,其中离焦像差 Z_3 仅对顺轨向的分辨率产生影响并可以通过二次项补偿消除。当像差畸变均方根值小于 0.05λ 时,所有像差引起成像分辨率变化较小;随着像差均方根值的增大,像差对成像分辨率影响增大,当像差畸变均方根值为 0.25λ 时,象散 Z_5 和彗差 Z_6 引起成像分辨率近似增大到原来的 3 倍。彗差 Z_6 、彗差 Z_7 和球差 Z_8 对不同目标点成像分辨率的影响不同,目标点离中心位置越远,成像分辨率增加越快。内发射场的波前像差对成像分辨率的影响主要是由于旁瓣的增强、旋转造成的。因此在实际应用中要充分考虑内发射场的波前畸变,采用具有较小象散、彗差和球差的波前畸变的柱面透镜,才能获得良好的目标图像,这些结论为直视合成孔径激光成像雷达的实际设计提供了参考依据。

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 Liren Liu. Optical antenna of telescope for synthetic aperture radar [C]. SPIE, 2008. 7094: 70940F.
- 3 J Ricklin, M Dierking, S Fuhrer, *et al.*. Synthetic aperture radar for tactical imaging [C]. DARPA Strategic Technology Office, 2007.
- 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 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, OSA Technical Digest (CD), 2009. PThB3.
- 6 B Krause, J Buck, C Ryan, *et al.*. Synthetic aperture lidar flight demonstration [C]. CLEO:2011-Laser Applications to Photonic Applications, OSA Technical Digest (CD), 2011. PDPB7.
- 7 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.
- 8 Liu Liren, Zhou Yu, Zhi Ya'nan, *et al.*. A large-aperture synthetic aperture imaging lidar demonstrator and its verification in laboratory space [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(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, 31(9): 0900112.
- 9 R L Lucke, M Bashkansky, J Reintjes, *et al.*. Synthetic aperture radar (SAL): Fundamental theory, design equations for a satellite system, and laboratory demonstration [R]. Naval Research Laboratory Report NRL/FR/7218-02-10, 2002.
- 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. Structure and operating mode of synthetic aperture laser imaging lidar for speckle reduction [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1028001.
- 刘立人. 基于散斑抑制的合成孔径激光成像雷达的结构和工作模式[J]. 光学学报, 2011, 31(10): 1028001.
- 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. Coherent and incoherent synthetic-aperture imaging ladars and laboratory-space experimental demonstrations [J]. Appl Opt, 2013, 52(4): 579—599.
- 14 Liu Liren. Principle of down-looking synthetic aperture imaging lidar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0928002.
- 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): 0928002.
- 15 R Garreis Carl Zeiss. 90° optical hybrid for coherent receivers [C]. SPIE, 1991, 1522: 210—219.
- 16 Liu Liren. 2D Fourier-transform imaging algorithm for synthetic aperture imaging ladars [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0128001.
- 刘立人. 合成孔径激光成像雷达的二维傅里叶变换成像算法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0128001.
- 17 Wu Jin, Yang Zhaosheng, Zhao Zhilong, *et al.*. Synthetic aperture lidar imaging with one-way far-field diffraction [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(6): 514—519.
- 吴 谨, 杨兆省, 赵志龙, 等. 单程远场衍射合成孔径激光雷达成像实验室演示[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(6): 514—519.