

文章编号:1007-2780(2020)11-1185-10

新型 SAR 实时成像光学系统设计

蔡志鹏, 张星祥*, 陈 哲, 毕国玲, 王洪钧

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了实现对合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 数据实时成像处理的目的, 在利用空间光调制器 (SLM) 的基础上, 设计了 SAR 数据实时成像斜平面光学处理器, 并调整光路, 在保证像质的情况下减少系统所占体积。首先, 利用 SLM 代替传统斜平面处理器中的胶片, 提高 SAR 数据光电转换的速率。然后, 根据已知的 SAR 相关数据设置光学处理器的结构参数。根据 SAR 的纵横缩尺比设计满足要求放大率的柱透镜, 根据柱透镜的总体长度设计球面镜, 以保证柱透镜有足够的工作空间, 球面镜部分设计为 4 组元全对称结构形式。设计完成后, 再调整光路以减少系统所占体积, 紧凑轻便以便于星载或机载使用。设计结果表明, 系统 MTF 在截止频率内均大于 0.4, 满足成像要求。光路优化调整后, 由总长 1 400 mm 左右变为 700 mm 左右, 满足设计要求和实际使用要求。

关 键 词: 合成孔径雷达; 光学处理器; 实时成像; 紧凑型结构

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/YJYXS20203511.1185

New SAR real-time imaging optical system design

CAI Zhi-peng, ZHANG Xing-xiang*, CHEN Zhe, BI Guo-ling, WANG Hong-jun

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

Abstract: In order to achieve the purpose of real-time imaging processing of synthetic aperture radar (SAR) data, based on the use of spatial light modulator (SLM), a SAR data real-time imaging oblique plane optical processor is designed, and the optical path is adjusted to ensure image quality and reduce the volume occupied by the system. First, SLM is used to replace the film in the traditional oblique plane processor to reduce the photoelectric conversion rate of SAR data. Then, the structural parameters of the optical processor are set according to the known SAR related data. According to the horizontal and vertical reduction ratio of SAR, a cylindrical lens that meet the required magnification is designed, and a spherical lens is designed according to the overall length of the cylindrical lens to ensure that the cylindrical lens has sufficient working space. After the design is completed, the optical path is adjusted to reduce the volume occupied by the system, which is compact and lightweight for

收稿日期:2020-04-14; 修订日期:2020-06-30.

基金项目:国家自然科学基金(No.61801455)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.61801455)

* 通信联系人, E-mail: jan-zxx@163.com

easy use on spaceborne or on board. The design results show that the system MTF is greater than 0.4 in the cut-off frequency, which meets the imaging requirements. After the optical path is optimized and adjusted, the total length is changed from 1 400 mm to about 700 mm. The results meet the design requirements and actual use requirements.

Key words: synthetic aperture radar; optical processor; real-time imaging; compact structure

1 引言

合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候以及适应各种复杂恶劣天气工作的能力,是非常重要的遥感成像技术,可以用于目标识别、跟踪等任务。星载 SAR 数据实时成像是星载 SAR 系统在许多先进应用中的关键技术。图像的机载分析可以提供有效的特征识别线索,选择适当的图像进行传输,可以降低对数据传输系统的要求。光学系统由于其并行的处理能力,使得 SAR 数据实时成像成为可能^[1-2]。

SAR 第一个光学处理器由球形、圆柱形和锥形透镜串联组成,称为锥形透镜光学处理器,该系统从 1957 年至 1964 年被广泛使用。然后开发出斜平面光学处理器,其在多功能性和灵活性方面得到显著改进,并且还生成了像质较好的图像^[3-5]。锥形透镜的光学处理器可以从信号处理的角度解释,作用效果为互相关或匹配滤波,而斜平面处理器通常用全息术来理解,利用了菲涅尔近似。

传统的光学处理器系统庞大,很难适用于小型载机或者无人机。但光学处理器的优势随着空间光调制器(SLM)和 CCD 等器件的发展应运而生,就新一代 SAR 光学处理器而言,加拿大国家光学研究所(INO)的研究人员在该领域做了大量的研究,并且已经有样机投入使用,有效证明了 SAR 光学处理器的可行性和发展前景,该样机使用了先进的光学元件 SLM 转换 SAR 原始数据,被用于实时处理 ENVISAT 卫星上的 ASAR 产生的 SAR 原始数据,但不能进行其他提高分辨率的复杂处理,比如距离多普勒算法(Range Doppler Algorithm, RDA)中的距离徙动校正(Range Cell Migration Correction, RCMC)和二次相位压缩(Secondary Range Compression, SRC)^[6-8]。上海交通大学对 SAR 光学处理器也进行了研究,提出了一种区别于加拿大光学实验

室提出的光学处理器,该处理器采用 4f 光学结构进行傅里叶变换处理,利用频谱面上的 SLM 完成 SAR 相关成像算法^[9]。目前,国内使用的 SAR 实时成像方法在功耗、体积、处理速度和稳定性方面都不能很好地满足 SAR 在轨实时成像需求,也没有适用于星载使用的 SAR 数据实时成像光学处理器模型。

本文在利用 SLM 的基础上,以斜平面处理器为依托,设计系统长度更小的 SAR 数据实时成像光学系统。有效缩短了系统的长度、口径和重量,从而可以实现星载或无人机等探测的实时成像。

2 SAR 成像光学处理器原理模型

2.1 SAR 数据记录

SLM 本质上是二维透射(或反射)的波前调制器件。SLM 由很多小液晶盒组成,它们在空间上排列成二维阵列^[9-10]。每个小液晶盒由各自的电信号或光信号控制,由于液晶的电学性质,这些信号的变化会影响盒内液晶的排列,从而改变小盒的光学性质。这样照射在小盒表面的激光就受到相应的幅度或相位调制。利用该特性转化 SAR 原始信号后,代替传统光学处理器中的胶片。但是不能在同一块 SLM 上同时实现相位和幅度的调制,因此需要两块共同作用。现将 SAR 数据的幅度信息调制到第一块 SLM 上,第二块在相位模式下运行,利用平行光将第一块 SLM 上的幅度信息调制到第二块 SLM 上,使其具有完整的 SAR 数据,作用和胶片的作用此时完全相同,但调制时间为 SLM 光电转化的时间,可视为实时转化,以此作为 SAR 数据实时成像光学系统的输入。利用 CCD 或 CMOS 相机作为 SAR 图像的接收装置。

星载 SAR 的工作原理如图 1 所示,载机的飞行方向称为距离向,与飞行方向正交的测量方向称为方位向。

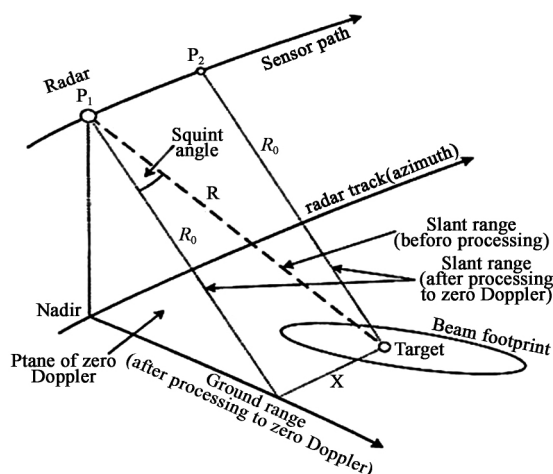


图 1 SAR 系统的几何关系图

Fig.1 Geometric relationship of SAR system

SLM 经过调制携带完整的 SAR 数据,即地面上的点目标散射的回波生成的二维线性调频信号,其作用相当于一个全息干板。经过平行光照射时会发生聚焦作用。对于距离向信号,聚焦焦距 f_r :

$$f_r = \frac{\pi c^2}{2\lambda_l K_r q^2} \quad (1)$$

对于方位向信号,聚焦焦距 f_a :

$$f_a = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_r}{\lambda_l} \right) \frac{R}{p^2} \quad (2)$$

式中, λ_l 为光波波长, K_r 为发射信号的调频率, q 为 SLM 距离向缩尺比, λ_r 为光波波长, R 为测量点和接收点之间的距离, p 为方位向缩尺比。

2.2 SAR 数据光学处理

由式(1)和式(2)可知,两个方向的聚焦情况有很大的不同,其中距离向聚焦焦距为一常数,即距离焦平面为一垂直平面,方位向聚焦焦距和 R 成正比,并且 R 随着载机的运动是不断变化的,因此方位焦平面是一倾斜平面。一般来说,这两个平面的位置是不重合的。同时,原始数据是来自多个目标的信号在 SLM 上重叠得到的,为了区分这些目标,提高分辨率并生成最终的图像,需要对距离向和方位向压缩原始数据,在光学处理器中为傅里叶变化。针对以上问题,提出了 SAR 数据光学处理器的理论结构。SAR 数据实时成像光学处理器原理模型如图 2 所示。主要解决的问题是:

(1)对不重合的距离焦平面和方位焦平面成像位置的校正;

(2)对方位焦平面倾斜角的校正;

(3)能够校正记录数据的纵横比,即在处理器中,斜距的放大率为 1,而方位维的放大率应为 $\frac{1}{k}$, $k = \frac{q}{p}$,使最后的图像具有相同的缩放比例;

(4)实现距离向信号压缩,即对信号执行傅里叶变化。

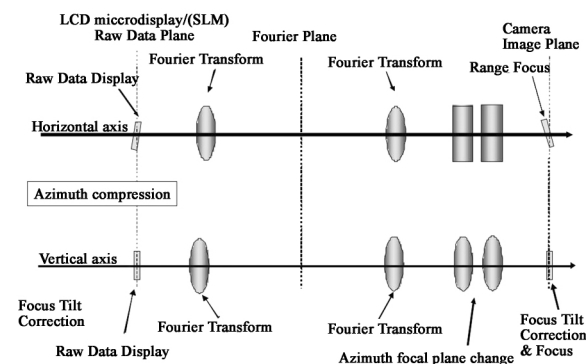


图 2 SAR 数据实时成像光学系统原理图

Fig.2 Principle of SAR data real-time imaging optical system

在光学处理中,两个球面镜为焦距相等的球面镜,用来对距离向信号进行压缩,成像的同时还需要具有傅里叶变换功能。柱透镜部分和球面镜共同作用,对方位向进行压缩。两个方向的作用效果不同,将不重合焦平面校正到同一位置的同时,利用望远系统横向放大率和纵向放大率不同的能力,校正方位焦平面的倾斜角。两个焦平面同时进行互不干扰的处理过程,像平面对应相机,即 CCD 或 CMOS。又由于望远镜校正倾角的能力有限,不能将倾斜平面校正到完全直立的状态,需要将 SLM 引入一个较小的倾斜角度,使得两个焦平面成像后的像面完全重合。

3 新型 SAR 数据实时成像光学处理器

3.1 球面镜设计

球面镜部分处理距离焦平面时,由于距离焦平面为一垂直的平面,不需要对其进行倾角的校正,因此选择焦距相同的双镜望远系统,又因为想对距离向进行信号压缩和空间滤波,提高成像质量,因此球面镜还具有傅里叶变换的功能。由于傅里叶透镜与传统的成像透镜不同^[11-12],设计时需要注意以下几点:

(1)傅里叶变换透镜必须对两对共轭位置校正除畸变以外的全部像差,一对是以输入面处衍射后的平行光作为物方(相当于物在无穷远),对应的像方是频谱面;另一对是以输入面作为物体,对应的像方为无穷远处。

(2)傅里叶透镜必须满足正弦条件,即在设计时需要令平行入射后经过傅里叶透镜折射后输出光线的主光线平行于光轴。

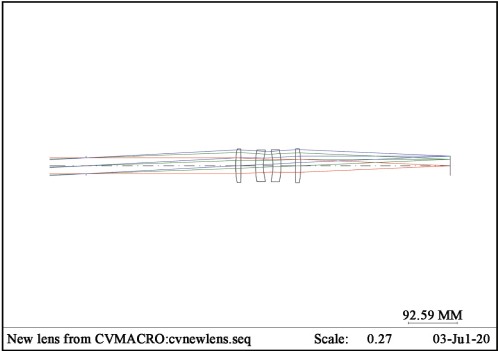
(3)为了避免相干噪声,在设计时应该尽量减少镜片的数量,结构紧凑。

本文在设计时采用了四组元全对称的设计方法,设计时要注意入瞳的直径要略大于 SLM 的斜直径,否则方位向由于方位焦距过大,光束较为发散,容易造成口径不够的情况。在反复多次的尝试后,选择入瞳直径为 30 mm,焦距为 350 mm,视场角为 $2\omega = 6^\circ$ 的傅里叶透镜结构,设计结构参数见表 1,光学系统结构和成像质量如图 3 所示。

表 1 傅里叶透镜结构参数

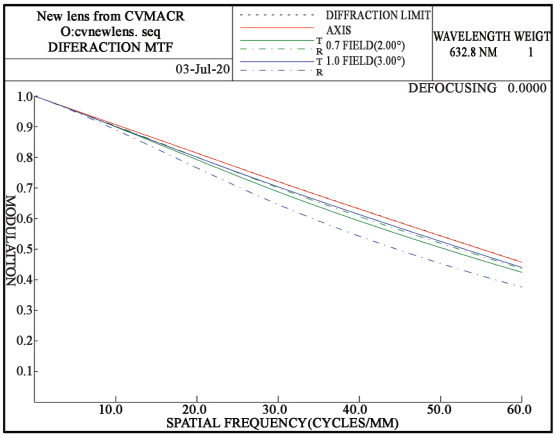
Tab.1 Structure parameters of Fourier lens

<i>R</i> /mm	<i>d</i> /mm	Glass
271.228 9	17.000 0	K9_CHINA
−1 347.660 2	27.834 2	
167.762 7	25.000 0	ZF1_CDGM
130.774 6	22.000 0	
−130.774 6	25.000 0	ZF1_CDGM
−167.762 7	27.8342	
1 347.660 2	17.000 0	K9_CHINA
−271.228 9	284.032 0	



(a)傅里叶透镜结构

(a)Structure of Fourier lens

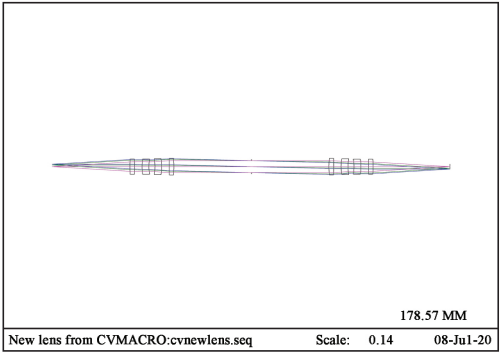


(b)傅里叶透镜 MTF

(b)MTF of Fourier lens

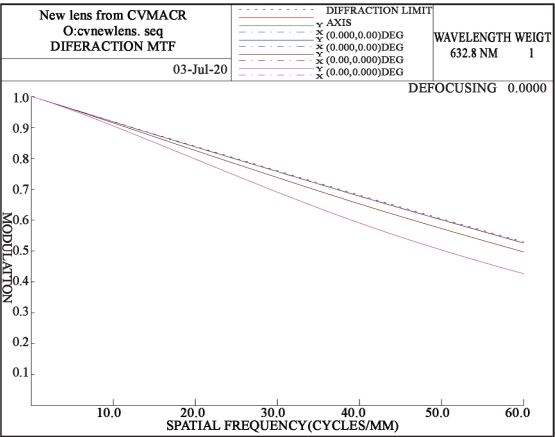
图 3 傅里叶透镜结构和 MTF

Fig.3 Structure and MTF of Fourier lens



(a)球面镜结构

(a)Structure of spherical mirror



(b)球面镜 MTF

(b)MTF of spherical mirror

图 4 球面镜结构和 MTF

Fig.4 Structure and MTF of spherical mirror

设计结果满足使用要求,因为需要焦距相等的望远系统,为了设计和制造简单,球面镜部分使用设计好的四组元全对称结构,此时光阑放置在频谱面。球面镜部分设计结果和成像质量如图 4 所示。

3.2 柱透镜设计

在方位向,球面镜和柱透镜共同作用,对方位焦平面位置校正的同时,还要校正方位焦平面的倾斜角度。在选择放大率时需要考虑方位向和距离向缩尺比的比值,即 $k = \frac{q}{p}$ 值,还可以校正由于缩

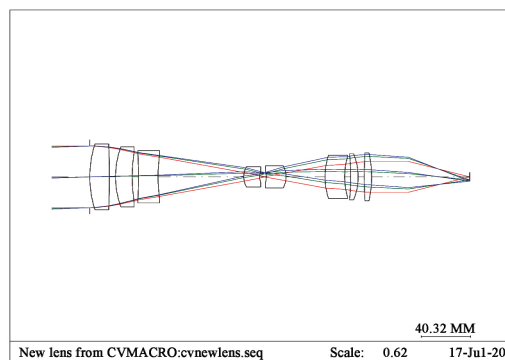
尺比不同造成的成像比例不同的问题。在方位向,相当于四透镜组成的望远系统,也可以看做是 $k = 1$ 的球面望远系统和柱透镜望远系统共同作用的

结果。本文设计是针对 $k = \frac{q}{p} = 2$ 的 SAR 设计的。因此只要保证 $f_1 = 2f_2$ 即可,同时还要保证柱透镜望远系统的口径和球面镜接近。本文在设计时选择口径为 30 mm,焦距分别为 100 mm 和 50 mm 的两部分,分别设计后合成优化,合成后结构参数见表 2,光学系统结构和 MTF 如图 5 所示。

表 2 柱透镜结构参数

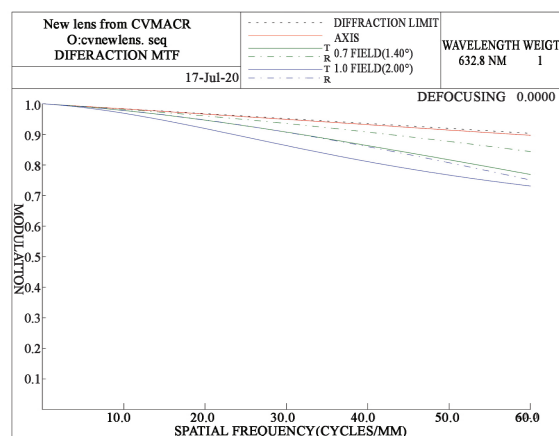
Tab.2 Structure parameters of cylindrical lens

R/mm	d/mm	Glass
88.071 0	16.000 0	K9_CHINA
-558.727 0	5.000 0	
70.541 0	13.677 0	K9_CHINA
143.112 6	5.000 0	
-450.520 4	16.000 0	K9_CHINA
-12.597 9	16.000 0	K9_CHINA
123.752 4	70.000 0	
16.264 1	13.028 0	K9_CHINA
14.719 6	4.000 0	
无限	1.446 3	
-19.023 4	31.941 6	
56.559 7	16.000 0	K9_CHINA
59.093 5	5.000 0	
-156.276 9	6.000 0	K9_CHINA
-48.287 6	5.000 0	
302.042 2	6.000 0	K9_CHINA
-85.908 2	—	



(a)柱透镜结构

(a)Structure of cylindrical lens



(b)柱透镜 MTF

(b)MTF of cylindrical lens

图 5 柱透镜结构和 MTF

Fig.5 Structure and MTF of cylindrical lens

3.3 合成优化

该系统相对于传统的成像系统略有不同。该系统是对一个二维分开的物体成像,因此在合成后的成像质量要分成两个方向分别优化评价。其中,距离向可以看作是球面镜和平行平板作用共同成像,平行平板只会造成成像位置的偏移,不会对像质造成大的影响,也不会因为平行平板位置的改变而改变像质和成像位置。所以距离向不需要太多的调整就可以达到较好的成像质量。因此先考虑方位向成像优化。

对于方位向成像优化,我们将 SLM 放置在球面镜的前焦距上,且经过处理,可以令距离向焦距 $f_r = 0$,方位向焦距 $f_a = 457 \text{ mm}$,即聚焦后的方位向焦平面距离球面镜的前焦平面(即 SLM 前)457 mm 处,聚焦后的距离焦平面与 SLM 重合,优化结果如图 6 所示。

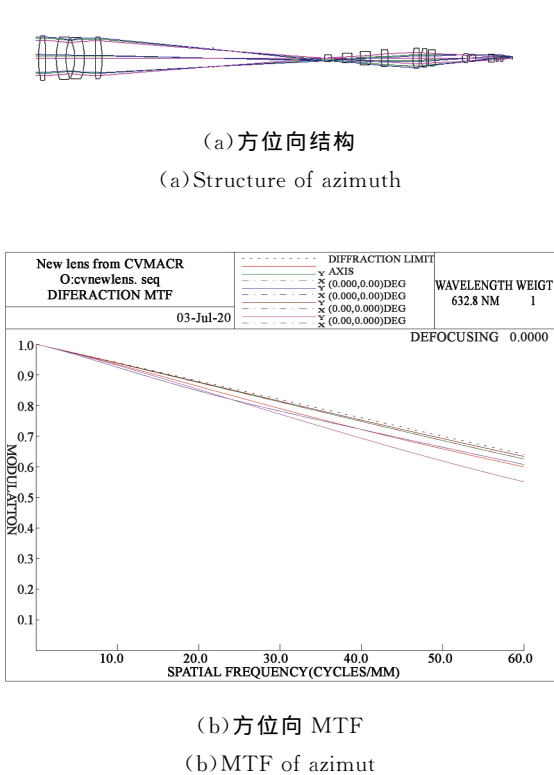


图 6 方位向结构和 MTF
Fig.6 Structure and MTF of azimuth

在此,为了获得较好的成像质量,采用两块非球面进行辅助优化。优化时选择第四块柱透镜的第一个面和第五块柱透镜的第二个面作为非球面。且优化后,球面镜和柱面镜之间的间隔为 63.682 4 mm,该间隔在方位向成像质量优化好的基础上不可以再改动。非球面系数见表 3。

距离向即相当于物在球面镜的前焦平面上,球面镜和平行平板共同作用成像,只需要将方位向结构中柱透镜部分曲率半径设置为无限,非球面变为球面即可,其结果和 MTF 如图 7 所示。

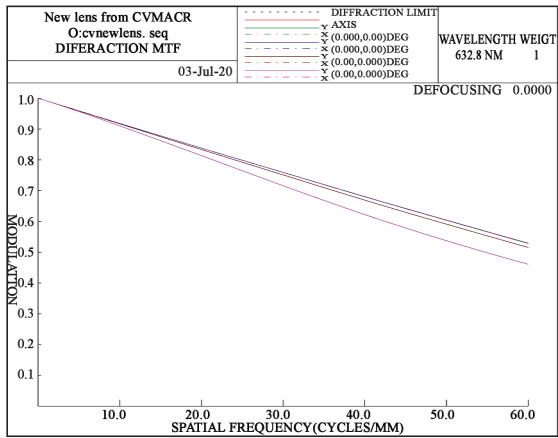
经过优化设计,已经得到较好的成像系统,该系统在不加光源的情况下总长约为 1 400 mm,需要较大空间,不便于使用和机载,因此在空间上应该对其进行光路偏折,减少空间占用体积。反射镜选择放置在球面镜关于光阑对称位置。因为球面镜之间的光线相对其他位置而言,主光线入射角度小,可以更好地控制反射镜的角度。另外,球面镜之间的距离较长,除了在

表 3 非球面系数

Tab.3 Coefficient of aspheric

	K	A	B	C	D
非球面 1	-0.258 5	$-1.064\ 7\times10^{-5}$	$-7.501\ 4\times10^{-7}$	$4.192\ 5\times10^{-9}$	$-4.683\ 7\times10^{-10}$
非球面 2	0.505 1	$-3.838\ 3\times10^{-5}$	$-5.836\ 1\times10^{-7}$	$-1.295\ 7\times10^{-8}$	$-3.482\ 7\times10^{-10}$

光阑处进行滤波外,不进行任何操作,这一部分空间利用率不高,且占据大部分系统长度。综合以上两点,偏折光路的反射镜以光阑为中心对称放置,放置距离以透镜之间上下不重叠为设置依据。本文设置为平面反射镜距离光阑 50 mm 对称放置,偏心角度均为 45°。由傅里叶透镜设计可知,主光线经过傅里叶透镜作用后主光线平行于光轴,因此偏心角度设置为 45°即可。但是对于方位焦平面,这样偏折会影响成像质量,需要对方位向进一步优化,以提高成像

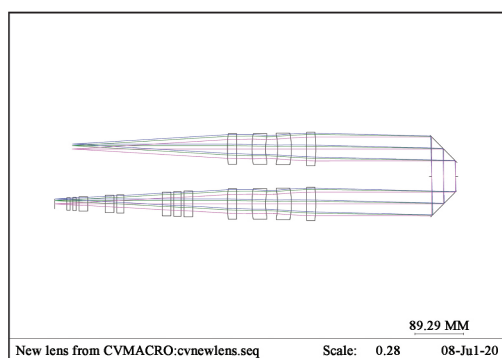


(b)距离向 MTF
(b)MTF of range

图 7 距离向结构和 MTF
Fig.7 Structure and MTF of range

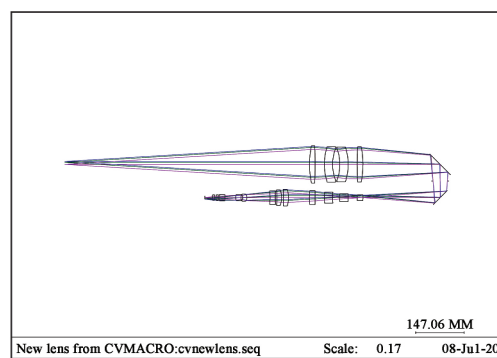
质量。优化时还是只将原来的两个非球面的非球面系数作为变量进行优化,但优化不能达到成像要求。因此考虑再加一片非球面进行优化。经过考虑,选择第七块柱透镜的第二个表面作为

非球面参与优化,优化约束条件仍然是球面镜第一个面到像面之间的总长,优化后系统满足成像要求。设计优化结果如图 8 所示。3 个面二次曲线系数见表 4。



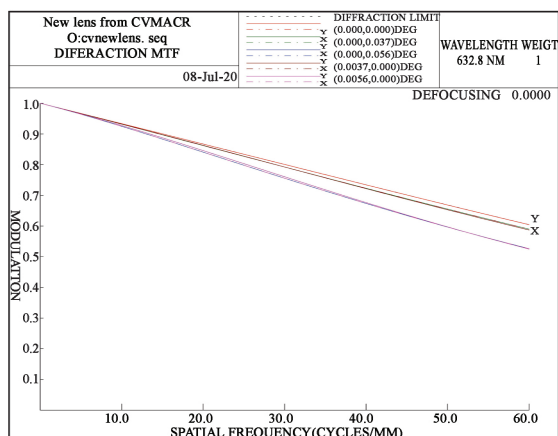
(a) 距离向结构

(a) Structure of range



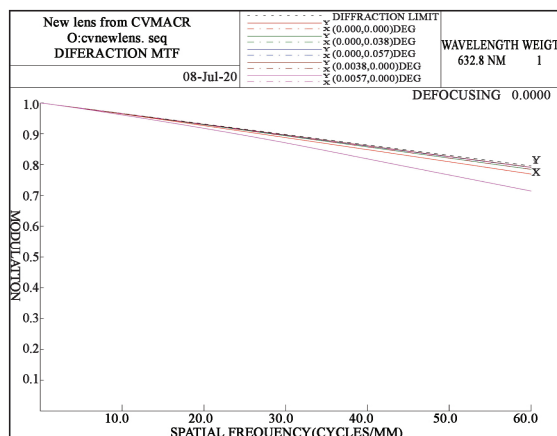
(b) 方位向结构

(b) Structure of azimuthal



(c) 距离向 MTF

(c) MTF of range



(d) 方位向 MTF

(d) MTF of azimuthal

图 8 规划后结构和 MTF

Fig.8 Post-planning structure and MTF

表 4 非球面系数

Tab.4 Coefficient of aspheric

	K	A	B	C	D
非球面 1	-0.004 8	$2.971\ 4 \times 10^{-6}$	$6.677\ 9 \times 10^{-8}$	$-3.160\ 8 \times 10^{-10}$	$4.186\ 6 \times 10^{-12}$
非球面 2	0.610 6	$2.461\ 5 \times 10^{-6}$	$5.235\ 1 \times 10^{-7}$	$-9.452\ 2 \times 10^{-9}$	$2.262\ 5 \times 10^{-10}$
非球面 3	-0.147 6	$4.319\ 3 \times 10^{-6}$	$-8.178\ 6 \times 10^{-9}$	$1.899\ 7 \times 10^{-10}$	$-1.920\ 9 \times 10^{-12}$

优化后,系统的长度由规划前的 1 400 mm,变为 700 mm 左右,大大缩短了系统所占长度,有利于 SAR 成像系统机载使用。

3.4 倾角校正

令方位焦平面和 SLM 之间的夹角为 β ,由于望远系统横向和纵向放大率不同,具有校正倾斜平面的能力,但校正能力有限,不能将倾斜的平面完全校正到直立状态,因此将 SLM 倾斜 α° ,此时,方位焦平面与垂直方向的夹角为 β_a ,如图 9 所示。



图 9 SLM 倾斜示意图

Fig.9 Diagram of SLM

由于在方位向,望远系统的横向放大率为 -1 ,纵向放大率为 $-1/k^2$,所以经过该望远系统后,倾斜角会有改变,想要校正倾斜角重合,则应该使具有 β_a 倾斜角的方位焦平面和具有 α' 倾角的 SLM 的像面重合,且由于球面镜部分放大率为 1,则 $\alpha = \alpha'$ 。由图 8 的几何关系可知 β_a 和 α' 的关系为:

$$\tan \alpha' = \frac{1}{k^2} \tan \beta_a, \quad (3)$$

$$\tan \beta = \frac{f_a}{R}. \quad (4)$$

根据式(3)、(4)、(5)可知:

$$\tan \alpha = \frac{1}{k^2 - 1} \tan \beta = \frac{1}{k^2 - 1} \frac{f_a}{R}. \quad (5)$$

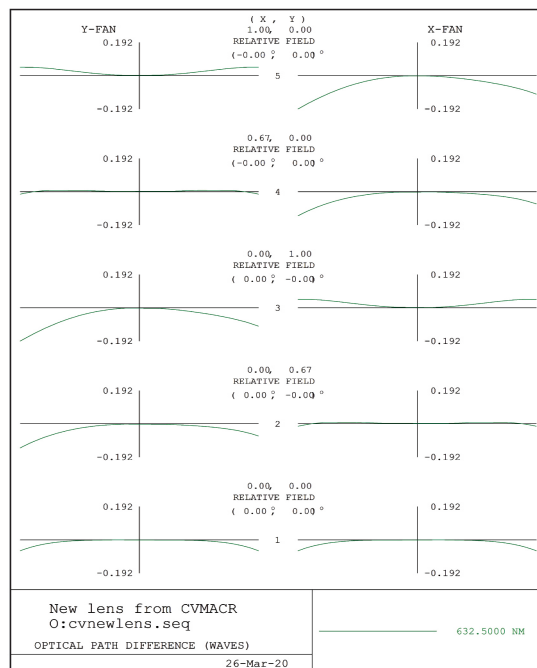
带入 SAR 相关参数,求得 $\alpha = 0.011\ 37''$,此时倾角非常小,对像质不会产生很大影响。

4 像质分析

4.1 波像差

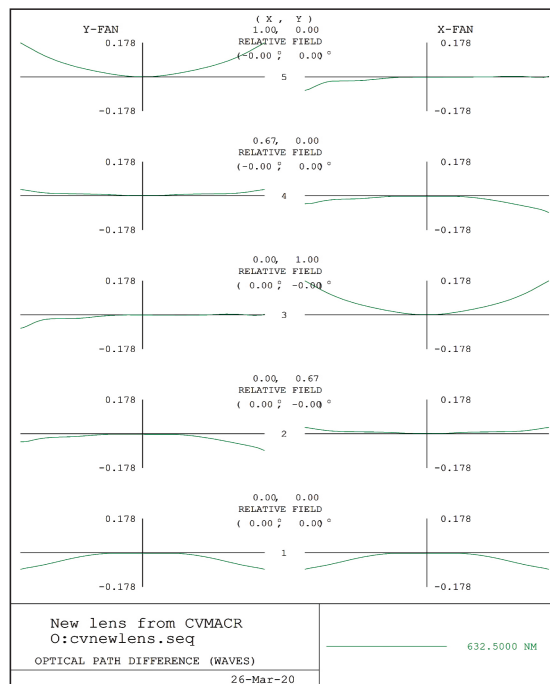
一个完善成像的光学系统可以实现点物成点像,物像对应的均为球面波。而一个有像差的系统的实际波面和理想球面波之间存在差异,这个差异就是波像差。当光学系统最大波像差低于 $1/4$ 波长时,就可以说该系统是完善成像系统。在系统设计中,波像差(系统设计的残差)会直接

影响系统的装调和测试,因此一个好的光学系统还必须要对波像差严格控制。优化后系统波像差如图 10 所示。



(a)距离向波像差

(a)Wave aberration of range



(b)方位向波像差

(b)Wave aberration of azimuthal

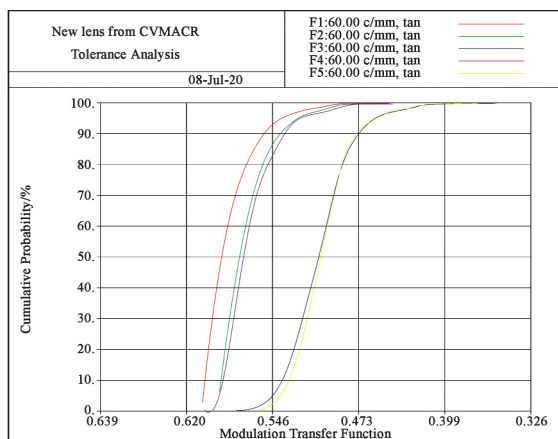
图 10 波像差

Fig.10 Wave aberration

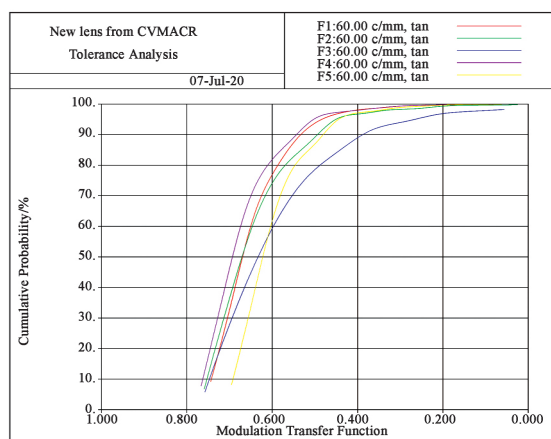
由图 10 可以看出,距离向和方位向波像差均小于 $1/4$ 波长,其中距离向波像差小于 0.192 波长,方位向小于 0.175 波长,则可视该系统成完善像,满足设计使用要求。

4.2 公差分析

SAR 数据实时成像光学处理器公差主要考虑技术指标要求以及现加工能力,选择在 60 lp/mm 空间频率处,以允许的 MTF 下降量为准则来制定光学



(a) 距离向公差
(a) Tolerance of distance



(b) 方位向公差
(b) Tolerance of azimuth

图 11 公差分析图

Fig.11 Chart of tolerance analysis

系统公差。系统公差分析图如图 11 所示。

由公差分析图的结果可知,距离向和方位向在截止频率处,都有超过 90% 的概率装调到 MTF 大于 0.4 以上,满足装调要求。

4.3 非球面加工可行性分析

非球面相对于球面镜来说,加工难度相对较大,而非球面度可以较为直接地体现非球面

加工的可行性。在 code V 中利用加工数据表设置非球面最大高度计算非球面的非球面度。系统中 3 个非球面的非球面度部分结果见表 5 所示。

由表 5 的非球面度可知,3 个非球面的非球面度均小于 $9 \mu\text{m}$,且非球面系数也较小,具有实际加工的可行性。

表 5 非球面度

Tab.5 Results of asphericity

球面 1		球面 2		球面 3	
Y/mm	SAG/mm	Y/mm	SAG/mm	Y/mm	SAG/mm
0	-0.009 531	0	0.005384	0	0.007126
2	-0.008 987	2	0.003923	2	0.005816
4	-0.007 073	4	0.008348	4	0.002693
6	-0.003 541	6	0.000014	6	0.000100
8	-0.000 076	8	0.003885	8	0.002590
10	-0.009 532	8.3	0.005384	9	0.007126

5 结 论

针对现在 SAR 实时成像的需求,在利用先进光学元件的基础上,设计了 SAR 数据实时成像光学处理器。本文在倾斜面光学处理器中应用 SLM 作为 SAR 数据的输入,真正意义上实现了光学处

理器并行处理和实时处理的能力。由于 SLM 的体积也小于传统的胶片,系统在一定程度上变得轻巧。成像速度近似等于 SLM 的转化信息的速度。同时对系统进行了规划,将系统的长度从 1 400 mm 缩减到 700 mm 左右,有利于实现星载或机载使用,且系统成像质量较好,系统 MTF 在截止频率内大于 0.4,波像差小于 $1/4$ 波长。

参 考 文 献:

- [1] LEITH E N. Optical processing techniques for simultaneous pulse compression and beam sharpening[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1968, AES-4(6): 879-885.
- [2] PARKES S M, CLIFTON H L. The compression of raw SAR and SAR image data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(18): 3563-3581.
- [3] CUTRONA L J, LEITH E N, PORCELLO L J, *et al.* On the application of coherent optical processing techniques to synthetic-aperture radar [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, 54(8): 1026-1032.
- [4] AUSERMAN D A. Digital versus optical techniques in synthetic aperture radar (SAR) data processing [J]. *Optical Engineering*, 1980, 19(2): 192157.
- [5] MARCHESE L, BOURQUI P, TURGEON S, *et al.* A SAR multilook optronic processor for operational earth monitoring applications [C]//*Proceedings of SPIE 7829, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques X*. Toulouse, France: SPIE, 2010: 782904.
- [6] MARCHESE L, DOUCET M, HARNISCH B, *et al.* Real-time optical processor prototype for remote SAR applications [C]//*Proceedings of SPIE 7477, Image and Signal Processing for Remote Sensing XV*. Berlin, Germany: SPIE, 2009: 74771H.
- [7] BOURQUI P, HARNISCH B, MARCHESE L, *et al.* Optical SAR processor for space applications [C]//*Proceedings of SPIE 6958, Sensors and Systems for Space Applications II*. Orlando, USA: SPIE, 2008: 69580J.
- [8] MARCHESE L, DOUCET M, HARNISCH B, *et al.* A real-time high-resolution optical SAR processor [C]//*Proceedings of SPIE 7669, Radar Sensor Technology XIV*. Orlando, USA: SPIE, 2010: 76690M.
- [9] 周琦,陆俊发,印建平.空间光调制器对入射光场调制特性的实验研究[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 349-353.
ZHOU Q, LU J F, YIN J P. Experimental study of modulation characteristics of spatial light modulator [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 349-353. (in Chinese)
- [10] 刘洪顺,王喆,胡琪,等.基于空间光调制器的层析成像技术[J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1338-1347.
LIU H S, WANG Z, HU Q, *et al.* Tomography technology based on spatial light modulator [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1338-1347. (in Chinese)
- [11] 夏春秋,钟兴,刘春雨,等.高分辨率 4f 传像系统分辨率的影响因素分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1573-1581.
XIA C Q, ZHONG X, LIU C Y, *et al.* Analysis of influence factors of resolution in high-resolution 4f imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1573-1581. (in Chinese)
- [12] 王刚,孙杰,郭俊,等.光全息中傅里叶变换透镜设计[J]. *光电工程*, 2011, 38(11): 141-145.
WANG G, SUN J, GUO J, *et al.* Design of Fourier transform lens in optical holography [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(11): 141-145. (in Chinese)

作者简介:



蔡志鹏(1993—),女,吉林公主岭人,硕士研究生,2017 年于东北师范大学获得学士学位,主要从事 SAR 数据实时成像光学处理器等光学成像方面的研究。E-mail:1021285050@qq.com



张星祥(1977—),男,云南大理人,博士,研究员,2006 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间宽幅成像技术、精密装调与拼接技术、在轨测试与处理技术方面的研究。E-mail:jan_zxx@163.com