

## 天基 6.5 m 衍射综合孔径红外射电望远镜

李道京<sup>1\*</sup>, 吴疆<sup>1,2</sup>, 周凯<sup>1,2</sup>, 高敬涵<sup>1,2</sup>, 崔岸婧<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院空天信息创新研究院微波成像技术国家级重点实验室, 北京 100190;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对天文观测和深空探测需求,提出了天基激光本振 6.5 m 衍射综合孔径红外射电望远镜的概念和形式,给出了激光本振阵列探测器形式,设计了基于衍射光学系统的综合孔径红外射电望远镜结构。该望远镜采用孔径渡越补偿信号处理方法扩大光谱范围,具有光学系统复杂度低、体积小和质量轻的特点。给出了系统主要参数和成像仿真结果,当中心波长为 1.55  $\mu\text{m}$  时,角分辨率约为 0.24  $\mu\text{rad}$ ,最大不模糊视场角度约为 1.55 mrad,光谱范围为 0.2  $\mu\text{m}$ ,其探测灵敏度要比传统 6.5 m 口径望远镜高 2 倍,可观测的极限星等优于 21。

**关键词** 成像系统; 红外光谱; 综合孔径; 激光本振; 衍射光学系统; 射电望远镜; 天文观测

中图分类号 P111.44

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212587

## Space-Based Infrared Radio Telescope with 6.5 m Diffractive Synthetic Aperture

Li Daojing<sup>1\*</sup>, Wu Jiang<sup>1,2</sup>, Zhou Kai<sup>1,2</sup>, Gao Jinghan<sup>1,2</sup>, Cui Anjing<sup>1,2</sup><sup>1</sup>National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The concept and form of a space-based laser local oscillator in an infrared radio telescope with a 6.5 m diffractive synthetic aperture are proposed to satisfy astronomical observation and deep space exploration requirements. The form of laser local oscillator array detector is established, and the structure of the synthetic aperture infrared radio telescope based on a diffractive optical system is designed. The telescope uses the signal processing method for aperture transition compensation to expand the spectral range, exhibiting low complexity, small size, and light weight in the optical system. The main parameters of the system and the imaging simulation results are presented. When the central wavelength is 1.55  $\mu\text{m}$ , the angular resolution is approximately 0.24  $\mu\text{rad}$ , the maximum unambiguous field of view angle is approximately 1.55 mrad, and the spectral range is 0.2  $\mu\text{m}$ . Its detection sensitivity is two times higher than that of the traditional 6.5-m-aperture telescope, and the observable limit magnitude is higher than 21.

**Key words** imaging systems; infrared spectrum; synthetic aperture; local oscillator laser; diffractive optical system; radio telescope; astronomical observations

## 1 引言

对于天文观测和深空探测,大口径红外望远镜是必不可少的,它可以实现高的成像分辨率以及远距离探测,但制造大口径望远镜难度较高。

目前世界上知名的地基望远镜<sup>[1]</sup>有 10 m 级的凯克望远镜和甚大望远镜等;天基望远镜则有 2.4 m 级的哈勃望远镜以及即将发射的 6.5 m 级的詹姆斯韦伯望远镜。此外,美国航天局设计论证了两套太空干

涉测量法任务和行星探测干涉仪天基干涉望远镜系统,并且欧洲航天局也曾提出了天基达尔文阵列望远镜。

近年来,我国的大口径天文望远镜技术也在快速发展,文献[2]介绍了“中国哈勃”空间站载 2 m 口径天文望远镜,近期对 10 m 口径在轨组装空间望远镜的规划也进行了公开报道。

长基线干涉成像是大口径望远镜的一种重要实现方式,新的红外波段干涉成像观测方法也一直在深入

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-09-25; 录用日期: 2022-01-27; 网络首发日期: 2022-02-07

基金项目: 中科院重点部署项目(E03701010F)

通信作者: lidj@mail.ie.ac.cn

研究,目前凯克望远镜和甚大望远镜都可在红外波段进行长基线干涉成像。2000年,加州大学伯克利分校 Hale 等<sup>[3]</sup>在长波红外频段利用激光本振相干探测,在射频完成长基线干涉处理。这种红外干涉成像方式已明确与射电望远镜成像方式类似,且其可用于恒星角直径测量。基于激光本振相干探测,文献<sup>[4]</sup>提出了红外光谱干涉成像方法,并且对其在平流层艇上的天文应用前景进行了展望。

根据相干探测红外干涉成像原理,通过不同空间位置的较小口径组合形成一个大的光学口径,可类似微波和毫米波频段综合孔径射电望远镜<sup>[5-7]</sup>,以红外射电望远镜形式实现红外频段高分辨率成像探测。此种成像方式可以有效降低目前红外成像系统的体积、质量和复杂度。

在文献<sup>[4]</sup>的基础上,本文对天基激光本振 6.5 m 衍射综合孔径红外射电望远镜进行了系统分析。

## 2 红外综合孔径射电成像原理

### 2.1 激光本振红外相干探测

文献<sup>[4]</sup>利用光纤耦合器实现激光本振信号与红外信号的相加,并形成新的红外干涉成像光纤结构。借助于激光本振和相干探测器,2个望远镜红外信号相位可实现正确传递,而且在电子学实施的窄带滤波还有利于红外信号的干涉成像,其系统结构和干涉型射电望远镜相同。与文献<sup>[3]</sup>工作的不同在于:文献<sup>[4]</sup>采用了光纤结构,其干涉成像在模数转换(AD)采样后用信号处理方法在计算机中完成。

与此同时,引入激光本振信号后,还可以去除宽带红外信号的频谱混叠,并有助于提高红外探测灵敏度<sup>[8]</sup>。在此基础上,基于光纤耦合的波长可调谐激光本振红外相干探测器原理结构可参考文献<sup>[8]</sup>。

该探测器的激光本振可选为中心波长可调谐的激光种子源,假定其可调谐的光谱宽度为 0.2  $\mu\text{m}$ ,通过激光本振的波长步进调整,对输入光谱范围为 0.2  $\mu\text{m}$  的宽波段红外信号可在电子学频域实现无混叠的范围选通,同时等效细分红外光谱。

### 2.2 探测器形式

2020年,美国 Point Cloud 公司制作了一款基于硅光芯片的 FMCW 激光雷达相干阵列探测器<sup>[9]</sup>,阵元规模为 512(32  $\times$  16),其结构可供波长可调谐激光本振红外阵列探测器参考。该探测器主要用于光学成像,其单元间距较小在几十微米量级,不太适合本研究有干涉基线长度的望远镜使用。为此,可考虑基于光纤阵列结构<sup>[10]</sup>的探测方式,该探测方式中光学系统接收的红外回波信号可导入多组带有微透镜的光纤阵列接收单元,每组接收单元都可进行激光本振相干探测。

### 2.3 宽波段本振信号形成

激光本振红外阵列探测器的核心特征为激光本振

可利用波长可调谐激光器实现,但这涉及波导和激光种子源(激光器)这2个器件的光谱范围以及偏振方向问题。

在短波红外中,目前光纤波导的光谱范围在 50~70 nm,为保证高的混频效率,通常使用单模保偏光纤。光纤激光器的可调谐光谱范围在 30~50 nm 量级,半导体激光器的可调谐光谱范围在 100 nm 量级。

为覆盖红外信号宽的光谱范围并考虑偏振问题,需考虑多波段(如3波段)并联方式。借鉴拜耳膜 RGB 分光思路,一个兼顾偏振和光谱范围的宽波段激光本振实现方案如图 1 所示。显然,尽管这种方式要求的光谱波段数和偏振通道数较多,但可使本振波长覆盖范围优于 0.2  $\mu\text{m}$ 。

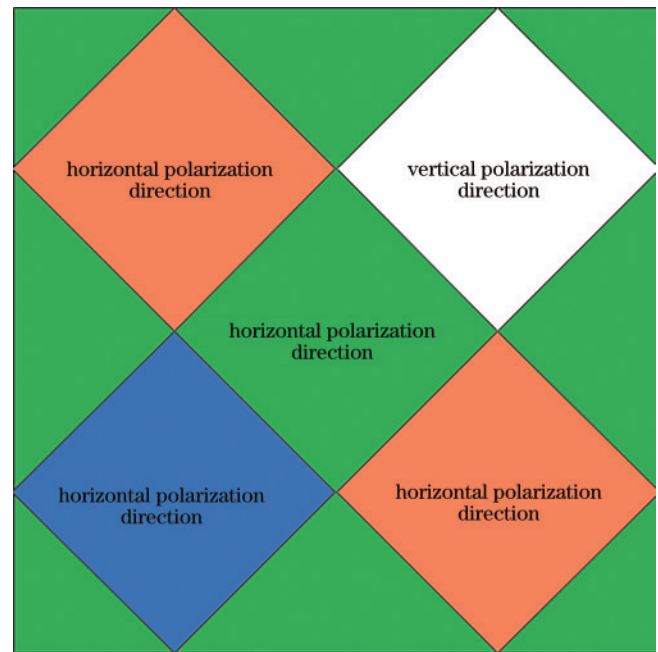


图 1 兼顾偏振和光谱范围的宽波段激光本振实现方案  
Fig. 1 Implementation scheme of laser local oscillator with wide spectrum considering polarization and spectral range

### 2.4 红外射电综合孔径成像

本研究红外射电综合孔径成像原理类似于综合孔径微波辐射计<sup>[5-6]</sup>,其接收红外信号是与物体分子热运动有关的热电磁发射。这种信号是一种宽带的随机噪声,通过对任意 2 个相干接收机信号的相关处理,经综合孔径处理可以在 UV 域<sup>[11]</sup>形成空间频率采样,进一步经过反演得到所测量信号源的亮温图像。图 2 为 2 个接收单元( $A_1$  和  $A_2$ )探测原理示意图。

根据参考文献<sup>[5]</sup>,由以下公式建立子镜中心阵列接收可视度函数  $V(\Delta r)$  模型:

$$V(\Delta r) = \iint_{d\sigma} \frac{\cos \theta}{r^2 \lambda^2} P(x, y, z) \tilde{r} \left( \frac{\Delta r}{c} \right) \exp(jk_0 \Delta r) dS, \quad (1)$$

式中: $V(\Delta r)$ 为可视度函数值; $\sigma$ 为任意一点辐射源; $\theta$

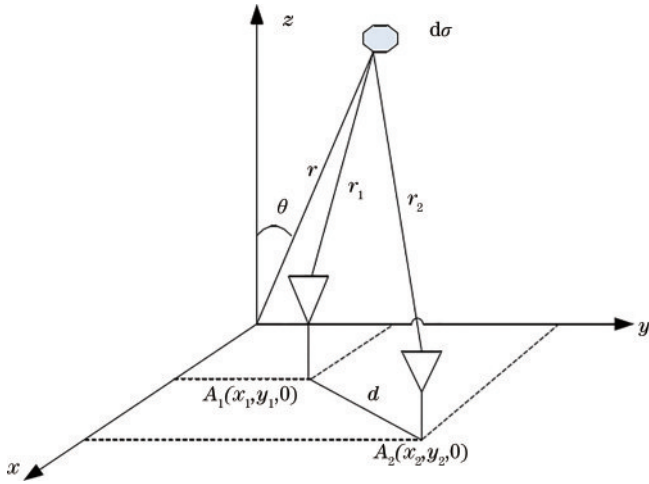


图 2 2 个接收单元探测原理示意图  
Fig. 2 Detection principle schematic diagram of two receiving units

表示点辐射源与  $z$  轴的夹角;  $r$  表示点辐射源到坐标轴原点的距离;  $r_1$  和  $r_2$  为任意两接收单元与点辐射源的距离;  $\lambda$  为接收中心波长;  $P(x, y, z)$  为此辐射面上的此坐标点的接收功率;  $\tilde{r}(\Delta r/c)$  为系统参数, 其经过理论计算可近似为一个常数;  $k_0$  为  $2\pi/\lambda$ ;  $S$  为所检测的整个温度分布曲面;  $\Delta r = r_1 - r_2$ , 当测试条件满足远场条件时, 有

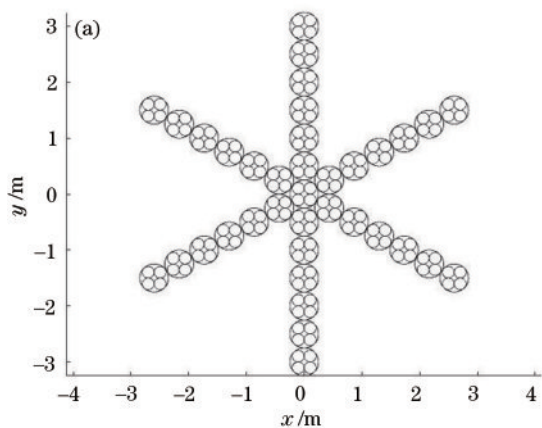
$$\Delta r = -[(x_2 - x_1)\xi + (y_2 - y_1)\eta], \quad (2)$$

式中:  $\xi = x/r$ ;  $\eta = y/r$ 。

当系统参数固定时, 可视度函数如下:

$$V(u, v) = \iint_{\xi^2 + \eta^2 \leq 1} T_{12}(\xi, \eta) \exp[-j2\pi(u\xi + v\eta)] d\xi d\eta, \quad (3)$$

$$T_{12}(\xi, \eta) = \frac{T(\xi, \eta)}{\sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2}} P_1(\xi, \eta) P_2^*(\xi, \eta), \quad (4)$$



式中:  $T(\xi, \eta)$  表示辐射面上点  $(x, y)$  对应的反演亮温值;  $V(u, v)$  表示在 UV 采样域<sup>[11]</sup> 上点  $(u, v)$  对应的可视度函数值;  $P_i(\xi, \eta)$  为第  $i$  号接收单元在点  $(x, y)$  功率方向图, 对可视度函数值进行傅里叶逆变换即可得到亮温分布图。

### 3 6.5 m 综合孔径红外射电望远镜结构

#### 3.1 结构形式

参考光学合成孔径成像原理<sup>[1]</sup>, 本研究 6.5 m 综合孔径望远镜由 37 个 0.5 m 口径的小望远镜组成, 每个 0.5 m 口径的小望远镜由 4 个 0.207 m 口径的子镜组成。为满足天基应用, 需具有发射前折叠在轨工作展开功能, 其主要结构如图 3 所示。

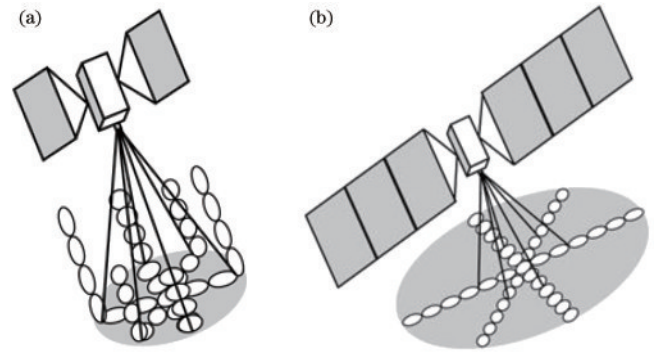


图 3 天基望远镜结构示意图。(a) 折叠形式; (b) 展开形式  
Fig. 3 Structure diagrams of space-based telescope schematic. (a) Folding form; (b) unfolding form

该综合孔径望远镜利用  $37 \times 4$  个子镜进行红外信号接收, 其成像处理在计算机完成, 是一种典型的计算成像<sup>[12-13]</sup> 载荷。

#### 3.2 子镜布局和 UV 域采样

本研究的综合孔径望远镜设计为米字型结构, 其子镜布局与其产生的 UV 域<sup>[11]</sup> 如图 4 所示。

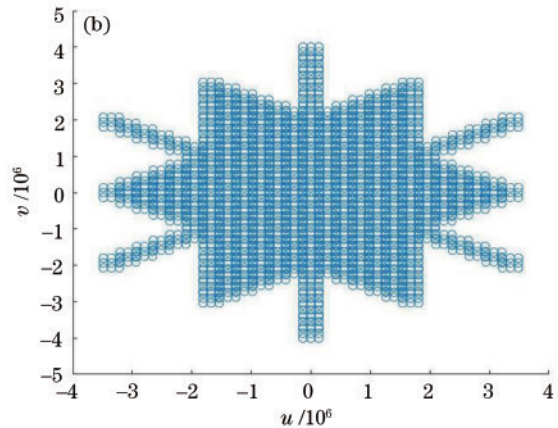


图 4 综合孔径望远镜结构布局。(a) 综合孔径望远镜布局图; (b) 形成的 UV 域接收采样点

Fig. 4 Structure layout of synthetic aperture telescope. (a) Layout of synthetic aperture telescope; (b) forming receiving sampling points in UV domain

由于综合孔径成像中的UV域覆盖代表着该望远镜阵列对于目标辐射源在光学波段上的空间频率采样信息,则由图4可知,此综合孔径望远镜的空间频率覆盖率较高。

上述子镜中心形成的最短基线为0.207 m,由此形成的红外波段最大不模糊视场较小。为扩大不模糊视场范围满足应用要求,需将最短基线长度设置在mm量级。最短基线的形成可有2种方式:1)子镜布设时设置小尺寸(如0.5~1 mm)错位;2)利用阵列探测

器单元间距形成。

假定每个子镜阵列探测器单元间距为1 mm,通道规模为 $3 \times 3$ ,形成的UV域接收采样点如图5所示。假定对子镜中心以方差为3 mm正态分布且以1 mm间隔取整进行错位排列,此时最短基线为1 mm,形成的UV域接收采样点如图6所示,其密度较于图4(b)有明显增大。增加错位后,mm量级基线长度的U值数量为310,V值数量为114。

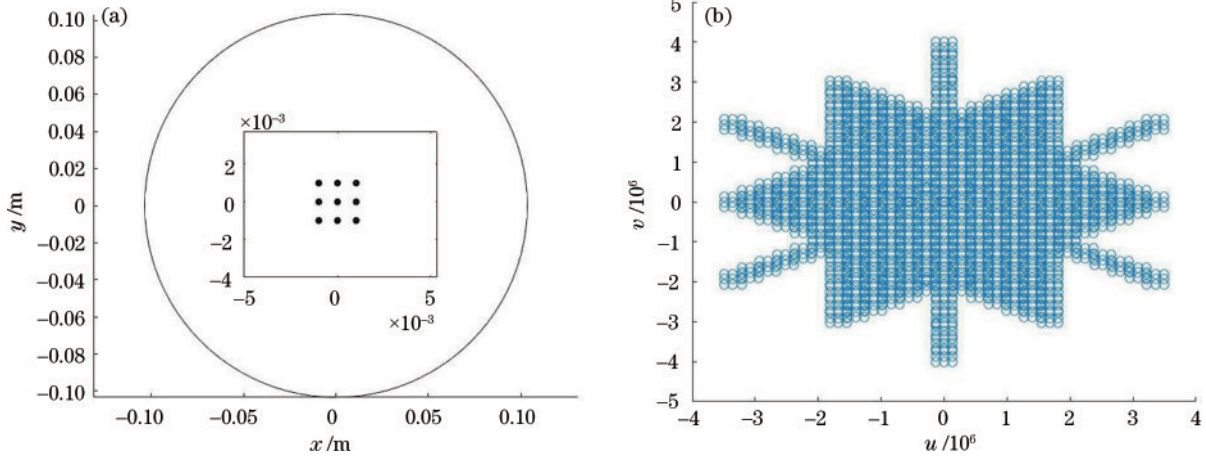


图5 子镜结构布局。(a)子镜探测器通道布局示意图;(b)探测器间距为1 mm形成的UV域接收采样点

Fig. 5 Submirror structure layout. (a) Schematic diagram of submirror detector channel layout; (b) receiving sampling points in UV domain formed by detectors spaced 1 mm apart

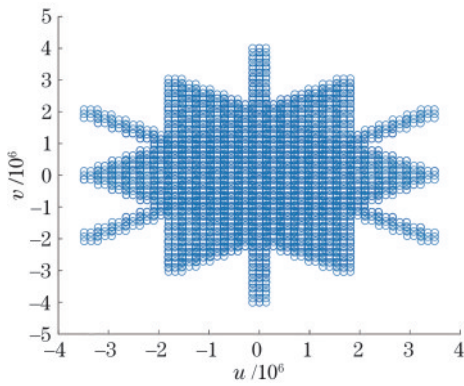


图6 子镜中心错位形成的UV域接收采样点

Fig. 6 Receiving sampling points in UV domain by array center misalignment

## 4 综合孔径衍射光学系统与色差校正

### 4.1 激光本振综合孔径衍射光学系统

近年来,大口径轻量化衍射光学系统如膜基透镜<sup>[14]</sup>得到了快速发展,其主镜可通过衍射器件引入较大的相位变化量实现波前控制、减小焦距,并有利于系统的轻量化。膜基透镜和非涅耳透镜阵列都属于衍射器件,从原理上讲,也可看作二元光学器件,其性能也可用微波相控阵天线理论和方法进行分析,文献[15-17]对其激光雷达应用进行了相关研究。

本研究望远镜拟采用轻量衍射薄膜镜,由于大口径的衍射薄膜镜制造比较困难,拟采用光学合成孔径技术实现大口径,进一步演变为激光本振综合孔径望远镜。

本研究0.5 m口径望远镜由4个口径为0.207 m的子镜拼接等效形成,如图7所示。

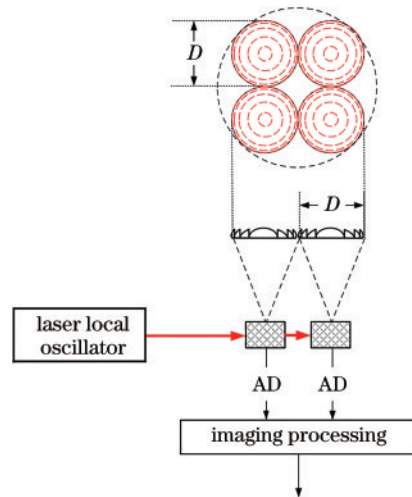


图7 综合孔径衍射望远镜

Fig. 7 Synthetic aperture diffractive mirror

图7中, $D$ 为望远镜子镜口径,4个子镜接收面积为 $0.1035 \times 0.1035 \times \pi \times 4$ ,约为 $0.125 \text{ m}^2$ ,小于0.5 m望远镜接收面积 $0.196 \text{ m}^2$ 。后文中计算综合孔径接收

面积时已考虑到此问题,实际基于  $0.125\text{ m}^2$  来计算其总接收面积。

基于激光本振阵列探测器,多个子镜接收信号的相位即可正确传递。由此,使得综合孔径成像可在 AD 采样后的计算机上利用软件通过计算成像实现,同时子口径结构焦距短的特点也可使光学系统的轴向尺寸和质量大幅减少。

#### 4.2 衍射光学系统色差校正

因为轻量化大口径衍射光学系统的光谱范围较窄,所以当其用于红外成像时,需要采用色差校正技术<sup>[4,18]</sup>。红外信号经过衍射主镜接收后,利用与衍射主镜具有相同色散、相反光焦度的衍射透镜进行色差校正,再由光电探测器成像,此方法称作 Schupmann 消色差方法,其光路示意结构可以参考文献<sup>[4]</sup>。

### 5 孔径渡越与光谱范围分析

#### 5.1 孔径渡越现象与光谱范围分析

衍射光学系统可对波前相位进行控制,但是对波前延时无法调整,由此会产生孔径渡越问题。

类似于微波系统,光学系统的聚焦需要对其相位和时延进行控制。对于入射到衍射主镜上的光信号,虽然有衍射器件引入折叠并量化后的移相量,但并未对包络进行时移,这将会使得从衍射主镜不同位置入射到焦点的光信号相加时包络无法对齐。于是,当衍射主镜口径较大、光信号的距离分辨率较高时,包络错位即会大于半个距离分辨单元,这会使得

距离向成像结果散焦,类似于微波相控阵的孔径渡越现象<sup>[15]</sup>。

设定望远镜口径为  $D$ ,  $f$  为焦距,  $F$  数为  $f/D$ , 系统接收信号带宽为  $B$ , 接收中心波长为  $\lambda$ , 光速为  $C$ 。定义衍射光学系统中从主镜不同位置处入射到焦点的信号波程差的变化范围,即孔径渡越范围为  $D^2/8f$ , 而系统的横向分辨率为  $C/2B$ , 又有光谱宽度  $\Delta\lambda$  与信号带宽  $B$  关系式如下:

$$B = \frac{C}{\lambda^2} \times \Delta\lambda. \quad (5)$$

根据已知,如要保证望远镜的正常聚焦,其孔径渡越范围  $D^2/8f$  要小于系统的横向分辨率  $C/2B$ , 又有  $F$  数为  $f/D$ , 则望远镜口径  $D$  需要满足以下条件:

$$D < \frac{4F\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (6)$$

根据式(6):当中心波长为  $1.55\text{ }\mu\text{m}$ 、光谱范围为  $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、对应信号带宽为  $25\text{ THz}$ 、 $F$  数为 2 时,子镜口径需小于  $0.1\text{ mm}$ ;  $F$  数为 4 时,子镜口径需要小于  $0.2\text{ mm}$ 。

近年来,国外提出分段式平面光电成像探测器 (SPIDER)<sup>[19]</sup>, 其利用微透镜干涉成像,结构类似于目前微波雷达的数字阵列天线,有可能同时解决相位和时延问题,相关思路值得关注和深入研究。

当子镜口径为  $0.207\text{ m}$ 、光谱范围为  $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 、 $F$  数为 2、焦距为  $0.4\text{ m}$  时,孔径渡越对成像的影响较大,具体情况如图 8 所示。

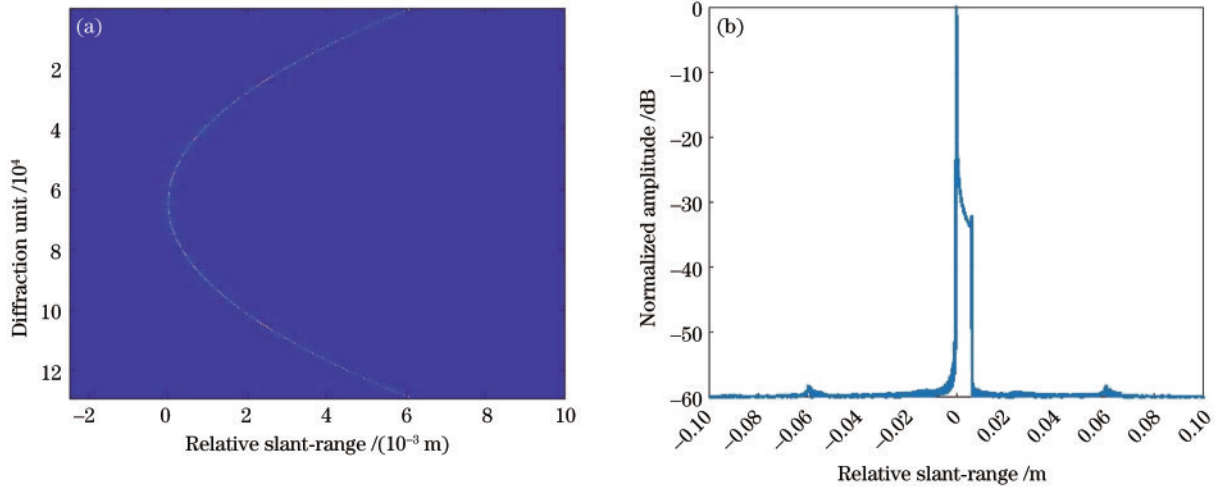


图 8 口径  $0.207\text{ m}$ 、 $F$  数为 2 时,孔径渡越展示。(a)孔径渡越情况;(b)孔径渡越投影情况

Fig. 8 Aperture traverse display when aperture is  $0.207\text{ m}$ ,  $F$  number is 2. (a) Aperture traverse; (b) aperture traverse projection

#### 5.2 孔径渡越补偿仿真

本研究采用文献<sup>[15]</sup>方法对孔径渡越进行补偿。由于衍射主镜上的衍射器件到焦点的距离确定且已知,可以构造孔径渡越补偿滤波器,其补偿效果如图 9

所示。

上述补偿效果已较好,该方法与后续色差校正方法结合后有可能在宽谱段范围取得更好的成像效果。

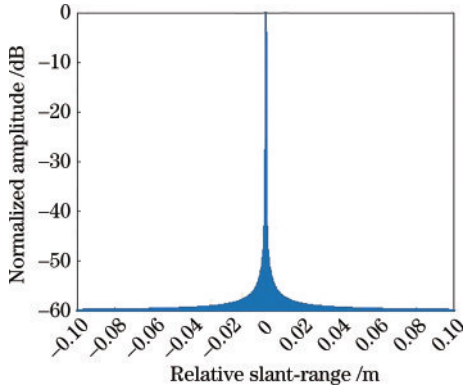


图9 口径0.207 m、 $F$ 数为2时,孔径渡越补偿后投影情况  
Fig. 9 Aperture traverse projection after compensation when aperture is 0.207 m,  $F$  number is 2

## 6 综合孔径红外射电成像性能分析与仿真

### 6.1 系统观测性能分析

设定  $L_{\max}$  表示此综合孔径望远镜的最长基线,  $L_{\min}$  表示望远镜子镜中心对应的最短基线,  $R_0$  为望远镜与点辐射源距离, 接收中心波长为  $\lambda$ 。因为此综合孔径望远镜系统的角度分辨率与同等尺寸的实孔径天线相当, 由其最长基线  $L_{\max}$  决定, 则其角分辨率  $\beta$  与横向分辨率  $\rho_c$  如下:

$$\beta = \frac{\lambda}{L_{\max}}, \quad (7)$$

$$\rho_c = \frac{\lambda R_0}{L_{\max}}. \quad (8)$$

其最大不模糊视场角度  $\gamma_{\max}$  与最大不模糊横向距离  $W_{\max}$  如下:

$$\gamma_{\max} = \frac{\lambda}{L_{\min}}, \quad (9)$$

$$W_{\max} = \frac{\lambda R_0}{L_{\min}}. \quad (10)$$

当接收红外辐射信号中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$  时, 此综合孔径望远镜等效口径即最长基线  $L_{\max}$  为  $6.5 \text{ m}$ , 对应的角度分辨率为  $0.24 \mu\text{rad}$ ; 望远镜子镜中心间距对应的最短基线  $L_{\min}$  为  $0.207 \text{ m}$  时, 对应的最大不模糊视场角度约为  $7.75 \mu\text{rad}$ 。当观测对象距离为  $3.6 \times 10^4 \text{ km}$  时, 其横向分辨率约为  $9 \text{ m}$ , 最大不模糊视场范围约为  $280 \text{ m}$ ; 当其与观测对象距离为  $4 \times 10^8 \text{ km}$  时, 其横向分辨率约为  $96 \text{ km}$ , 最大不模糊视场范围约为  $3100 \text{ km}$ 。

本研究最大不模糊视场角是由最短基线长度决定的, 为扩大不模糊视场范围满足应用要求, 需将最短基线长度设置在  $\text{mm}$  量级。最短基线的形成可有 2 种方式: 1) 子镜布设时设置小尺寸 (如  $0.5 \sim 1 \text{ mm}$ ) 错位; 2) 利用阵列探测器单元间距形成。当探测器像元尺寸为  $1 \text{ mm}$ 、焦距为  $0.4 \text{ m}$  时, 对应的探测器单元视场角为

$2.5 \text{ mrad}$ , 此时最短基线为  $1 \text{ mm}$ , 对应的最大不模糊视场角为  $1.55 \text{ mrad}$ ; 当探测器像元尺寸为  $0.5 \text{ mm}$ 、焦距为  $0.4 \text{ m}$  时, 对应的探测器单元视场角为  $1.25 \text{ mrad}$ , 此时最短基线为  $0.5 \text{ mm}$ , 对应的最大不模糊视场角为  $3.1 \text{ mrad}$ 。考虑到干涉所需的重叠视场, 实际的单元视场角要大于  $2.5 \text{ mrad}$ 。在这种情况下, 观测视场是由阵列探测器规模来决定的, 增加阵列探测器规模即可增大观测视场。当每个子镜的阵列探测器规模为  $3 \times 3$  或  $6 \times 6$  时, 对应的整个观测视场角约为  $7.5 \text{ mrad}$ 。

实际综合孔径阵列设置时, 需同时考虑子镜布设错位和阵列探测器两者结合方式, 以使形成的短基线具有足够的数量, 且要使最大不模糊视场角不小于探测器单元视场角。

为进一步扩大观测范围, 基于透射式衍射光学系统, 可以利用像方摆扫镜结合和压缩光路来进行视场的扩大, 具体实施方法可参考文献[4, 20]。

假定探测器电子学带宽为  $10 \text{ GHz}$ , 其对应的瞬时光谱范围约为  $0.08 \text{ nm}$ 。通过本振波长步进调谐要完成  $0.2 \mu\text{m}$  光谱范围覆盖, 需要本振波长步进调谐  $2500$  次。若在每个波长步进间隔用于观测的时间为  $0.4 \text{ ms}$ , 则总的观测时间为  $1 \text{ s}$ 。输入红外信号光谱范围为  $0.2 \mu\text{m}$  时, 激光本振波长调谐范围也应达到  $0.2 \mu\text{m}$ 。

本研究综合孔径望远镜  $37 \times 4$  个  $0.207 \text{ m}$  子镜等效的接收面积约为  $4.65 \text{ m}^2$ , 传统  $6.5 \text{ m}$  口径望远镜的接收面积约为  $33.18 \text{ m}^2$ , 两者接收面积相差约  $7.14$  倍。相对于传统光学系统  $1.1 \sim 2.4 \mu\text{m}$  的光谱范围, 采用红外光谱接收范围为  $0.2 \mu\text{m}$  的薄膜衍射光学系统时, 其接收的红外信号能量信号相差约  $6.5$  倍, 则可得本研究综合孔径望远镜较于传统  $6.5 \text{ m}$  望远镜的接收能量相差约  $46.14$  倍。

而传统望远镜通常采用直接探测体制, 本研究采用相干探测体制, 其探测灵敏度比传统的直接探测至少要高  $20 \text{ dB}$  即  $100$  倍<sup>[8]</sup>, 在此基础上, 同样口径与接收光谱范围下本研究望远镜获得的信噪比比传统望远镜要高  $100$  倍, 减少接收面积与光谱范围至  $46.16$  倍时, 其探测灵敏度在原理上可比传统  $6.5 \text{ m}$  口径望远镜的探测灵敏度高  $2$  倍, 其观测极限星等约为  $21$  星等。若引入文献[4]的红外光谱干涉成像信号处理流程和快时间信号自相关处理, 有可能进一步提高其探测性能。

显然, 该望远镜不仅可在天基平台用于火星等天文观测以及深空目标探测, 还可在高轨用于对地观测。

### 6.2 成像仿真结果

根据红外射电综合孔径成像方式进行点辐射源仿真, 当接收红外辐射信号中心波长为  $1.55 \mu\text{m}$ 、望远镜与点辐射源距离为  $3.6 \times 10^4 \text{ km}$  时, 接收阵列为  $6.5 \text{ m}$  综合孔径红外射电望远镜, 对接收信号进行亮温反演成像, 仿真结果如图 10 所示。

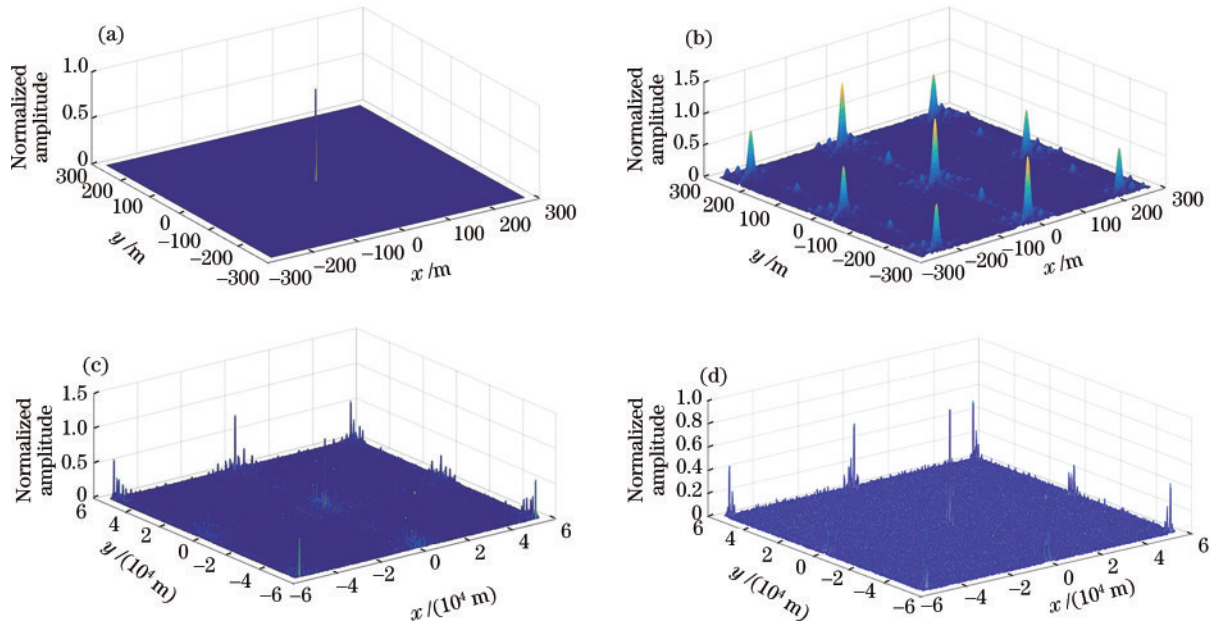


图 10 反演成像仿真结果。(a)点辐射源初始亮温图;(b)子镜中心最短基线为 0.207 m 时,点辐射源初始亮温图;(c)因  $3 \times 3$  阵列所形成的子镜中心最短基线为 1 mm 时,点辐射源反演亮温图;(d)因子镜中心错位所形成的最短基线为 1 mm 时,点辐射源反演亮温图

Fig. 10 Inverse imaging simulation results. (a) Initial brightness temperature diagram of point radiation source; (b) inversion of brightness temperature map by point radiation source, when minimum baseline of the submirror center is 0.207 m; (c) inversion of brightness temperature map by point radiation source, when minimum baseline of the submirror center is 1 mm by  $3 \times 3$  array; (d) inversion of brightness temperature map by point radiation source, when minimum baseline of the submirror center is 1 mm by array center misalignment

由图 10 可知:当子镜中心最短基线  $L_{\min}$  为 0.207 m 时,其横向分辨率为 9 m 量级,其最大不模糊视场范围约为 280 m 量级;当  $3 \times 3$  阵列所形成的子镜中心最短基线  $L_{\min}$  为 1 mm 时,其最大不模糊视场范围扩大为 56 km 量级,利用子镜中心错位也可形成 1 mm 的最短基线,其最大不模糊视场范围也可扩大为 56 km 量级。

## 7 结 论

基于激光本振的天基 6.5 m 衍射综合孔径红外射电望远镜相关概念和系统结构,相对于传统的大口径光学望远镜,其系统尺寸和重量可大幅减少,并具有良好的成像探测性能。

采用衍射薄膜镜会存在光谱范围窄的问题,目前在短波段本研究涉及的光谱范围仅为  $0.2 \mu\text{m}$ ,未来可考虑利用谐衍射增加光谱波段和范围,如短波和中波结合扩大光谱范围。

该望远镜在天文观测和深空探测领域具有较好的应用前景,其研制涉及的关键技术包括大尺寸天基平台展开机构技术、轻量宽谱段衍射薄膜镜技术、波长可调谐激光本振红外阵列探测器技术、多通道信号幅相校正技术、多子镜多探测器计算成像技术等,持续开展相关研究工作,具有重要意义。

致谢 感谢中科院国家空间科学中心张升伟和何宝宇

研究员,西安电子科技大学孙艳玲副教授对本研究工作的指导和帮助!

## 参 考 文 献

- [1] 周程灏,王治乐,朱峰. 大口径光学合成孔径成像技术发展现状[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 25-38.  
Zhou C H, Wang Z L, Zhu F. Review on optical synthetic aperture imaging technique[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 25-38.
- [2] 詹虎. “中国哈勃”诞生记[EB/OL]. [2020-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com>.  
Zhan H. The birth of "Chinese Hubble"[EB/OL]. [2020-07-30]. <https://mp.weixin.qq.com>.
- [3] Hale D D S, Bester M, Danchi W C, et al. The Berkeley infrared spatial interferometer: a heterodyne stellar interferometer for the mid-infrared[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2000, 537(2): 998-1012.
- [4] 李道京,周凯,郑浩,等. 激光本振红外光谱干涉成像及其艇载天文应用展望(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 0211001.  
Li D J, Zhou K, Zheng H, et al. Laser local oscillator infrared spectral interferometry imaging and its application prospect for shipborne astronomy(invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 0211001.
- [5] 薛永,苗俊刚,万国龙. 8 mm 波段二维综合孔径微波辐射计(BHU-2D)[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(9): 1020-1023.  
Xue Y, Miao J G, Wan G L. 8 mm band 2-dimensional

- synthetic aperture microwave radiometer(BHU-2D) [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(9): 1020-1023.
- [6] 何宝宇, 吴季. 二维综合孔径微波辐射计圆环结构天线阵及其稀疏方法[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1607-1610. He B Y, Wu J. Optimization on circular thinned array for two-dimensional synthetic aperture microwave radiometer [J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1607-1610.
- [7] 朱新颖, 李春来, 张洪波. 深空探测 VLBI 技术综述及我国的现状和发展[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 1893-1899. Zhu X Y, Li C L, Zhang H B. A survey of VLBI technique for deep space exploration and trend in China Current situation and development[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1893-1899.
- [8] 周凯, 李道京, 王烨菲, 等. 衍射光学系统红外光谱目标探测性能[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(8): 20200371. Zhou K, Li D J, Wang Y F, et al. Target detection performance of infrared spectrum with diffractive optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(8): 20200371.
- [9] Rogers C, Piggott A Y, Thomson D J, et al. A universal 3D imaging sensor on a silicon photonics platform[J]. Nature, 2021, 590(7845): 256-261.
- [10] 高敬涵, 李道京, 周凯, 等. 共形衍射光学系统机载激光雷达测深距离的分析[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(12): 1201001. Gao J H, Li D J, Zhou K, et al. Analysis of airborne lidar bathymetry distance based on conformal diffractive optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(12): 1201001.
- [11] 王海涛, 朱永凯, 蔡佳慧, 等. 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖和孔径排列的研究[J]. 光学学报, 2009, 29(4): 1112-1116. Wang H T, Zhu Y K, Cai J H, et al. Research on the UV coverage and the optimization arrangement of the optical synthetic aperture telescope array[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(4): 1112-1116.
- [12] 邵晓鹏, 苏云, 刘金鹏, 等. 计算成像内涵与体系(特邀)[J]. 光子学报, 2021, 50(5): 0511001. Shao X P, Su Y, Liu J P, et al. Connotation and system of computational imaging(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 0511001.
- [13] 张润南, 蔡泽伟, 孙佳嵩, 等. 光场相干测量及其在计算成像中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811003. Zhang R N, Cai Z W, Sun J S, et al. Optical-field coherence measurement and its applications in computational imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811003.
- [14] 焦建超, 苏云, 王保华, 等. 地球静止轨道膜基衍射光学成像系统的发展与应用[J]. 国际太空, 2016(6): 49-55. Jiao J C, Su Y, Wang B H, et al. Development and application of GEO membrane based diffraction optical imaging system[J]. Space International, 2016(6): 49-55.
- [15] 胡烜, 李道京. 10 m 衍射口径天基合成孔径激光雷达系统[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1210002. Hu X, Li D J. Space-based synthetic aperture LiDAR system with 10 m diffractive aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1210002.
- [16] 朱进一, 谢永军. 采用衍射主镜的大口径激光雷达接收光学系统[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0518001. Zhu J Y, Xie Y J. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 0518001.
- [17] 李道京, 高敬涵, 崔岸婧, 等. 2 m 衍射口径星载双波长陆海激光雷达系统研究[J]. 中国激光, 2022, 49(3): 0310001. Li D J, Gao J H, Cui A J, et al. Research on spaceborne dual-wavelength land-sea LiDAR system with 2 m diffractive aperture[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(3): 0310001.
- [18] 任智斌, 胡佳盛, 唐洪浪, 等. 10 m 大口径薄膜衍射主镜的色差校正技术研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0422004. Ren Z B, Hu J S, Tang H L, et al. Study on chromatic aberration correction of 10 meter large aperture membrane diffractive primary lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0422004.
- [19] 武冬梅, 于清华, 乐应波, 等. 分块式平面光电探测成像技术研究[J]. 红外, 2018, 39(4): 1-6. Wu D M, Yu Q H, Le Y B, et al. Study of segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance [J]. Infrared, 2018, 39(4): 1-6.
- [20] 李刚, 樊学武, 邹刚毅, 等. 基于像方摆扫的空间红外双波段光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 861-866. Li G, Fan X W, Zou G Y, et al. Design of space optical system with double infrared waveband based on image space scanning[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(3): 861-866.