

文章编号: 0253-2239(2009)04-1112-05

光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖和孔径排列的研究

王海涛¹ 朱永凯¹ 蔡佳慧¹ 张雅静¹ 田贵云^{1,2}

(¹ 南京航空航天大学自动化学院, 南京 江苏 210016)
(² 英国纽卡斯尔大学电子计算机学院, Newcastle, UK)

摘要 介绍了光学综合孔径干涉成像技术中的 UV 覆盖技术的概念、即时 UV 覆盖和非即时 UV 覆盖的两种情况, 重点研究了光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖情况, 以一个实际观测目标为例研究了增加用四个小望远镜组成的光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖的方法, 并对增加 UV 覆盖的方法进行了优化, 提出了用旋转孔径的办法来增加 UV 覆盖和 UV 覆盖的优化方法, 给出了优化了的光学综合孔径望远镜的子孔径排列的方案, 得到了 UV 覆盖优化的结果, 并给出了一个综合孔径望远镜 UV 覆盖与孔径排列优化的仿真实例。

关键词 UV 覆盖; 光学综合孔径; 望远镜阵; 孔径排列与优化

中图分类号 TH751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092904.1112

Research on the UV Coverage and the Optimization Arrangement of the Optical Synthetic Aperture Telescope Array

Wang Haitao¹ Zhu Yongkai¹ Cai Jiahui¹ Zhang Yajing¹ Tian Guiyun^{1,2}

(¹ School of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)
(² School of Electronics, Computer Engineering, Newcastle University Upon Tyne, UK)

Abstract Focusing on the research of the UV coverage situation on the OAS telescope, this paper introduces the concept of UV coverage technology in the OAS imaging technology and the two statements of real-time UV coverage and none real-time UV coverage. It also researches the UV coverage approach with four small telescopes to compose an OAS telescope. It takes an actual observed object as an example to increase the optimization to the UV coverage method. Meanwhile, it also raises the method of revolving aperture to increase and optimize the UV coverage and proposes the project of the optimization for sub-aperture arrangement of the OAS telescope. The result of the UV coverage optimization is also acquired, and a living example is given, which is the simulation of an OAS telescope with UV coverage technology and sub-aperture arrangement optimization.

key words UV coverage; optical synthetic aperture; telescopes array; aperture arrangement and optimization

1 引 言

闭合相位技术、UV 覆盖技术和像重构技术是光学综合孔径干涉成像^[1~5]的三个关键技术。欲从一个光学综合孔径望远镜(阵)得到理想的干涉条纹, 再从干涉条纹中提取相位信息重构出观测目标的图像, 必须使用消除大气扰动影响的闭合相位技术、频域采样的 UV 覆盖技术和一个有效的图像重

构的方法。本文介绍光学综合孔径干涉成像技术中的 UV 覆盖技术的概念、即时 UV 覆盖和非即时 UV 覆盖的两种情况, 重点研究了光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖情况, 以一个实际观测目标为例研究了增加用四个小望远镜组成的光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖的方法, 并对增加 UV 覆盖的方法进行了优化, 给出了优化了的光学综合孔径望远镜的

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 南京航空航天大学创新基金(Y0803-033)资助课题。

作者简介: 王海涛(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学综合孔径高分辨率观测及计算机测控技术等方面的研究。

E-mail: htwang2002@126.com

子孔径排列的方案。

2 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖

2.1 UV 覆盖的概念^[1]

光学综合孔径成像中所涉及到的 UV 覆盖简单地讲就是该光干涉仪阵对观测源在光学波段上的

空间频率信息的抽样情况,光干涉仪阵中的基线愈长,探测到的频率愈高,基线愈短则探测到的频率就愈低。改善空间频率覆盖,在给定子望远镜数目的情况下,可改变子望远镜阵的几何排列,即望远镜阵中子望远镜相对位置的变化就可以得到不同的频率采样值。图 1 为三孔非冗余掩模的结构排列。

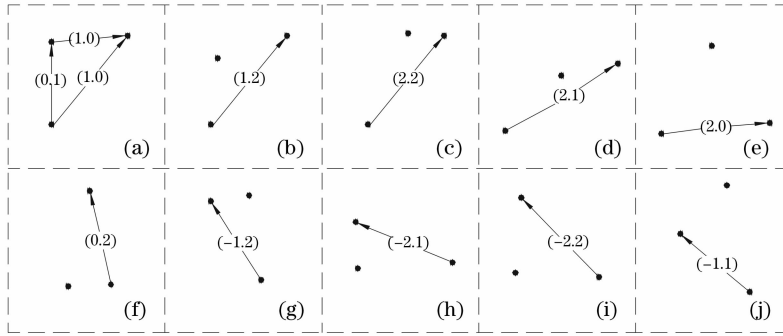


图 1 以三孔径为例的非冗余掩模的结构排列图示

Fig.1 Non-redundant masks in triple-interferometer sequence

从图 1 知,如果孔径掩模不一样,获得的 UV 覆盖情况也不一样。另外,根据条纹的空间频率公式^[6]

$$(\nu_u, \nu_v) = \frac{1}{\lambda Z_i} (\Delta x, \Delta y), \quad (1)$$

只要孔径数目增加,UV 覆盖就可以增加。当然,将各孔径所在的瞳面进行旋转也可以增加 UV 覆盖(地面上的光干涉阵在观测恒星时可以随地球一起自转而完成有效的 UV 覆盖)。UV 覆盖问题实际上是对目标源的空间频域信息的抽样问题,如图 2 所示。

孔径数目的光学综合孔径阵在 UV 平面上只是有限个点。在不满足图像重构的条件下,只有通过孔径位置的变化或基线旋转的方法来满足全覆盖或满足图像重构的 UV 抽样,它是以牺牲时间的代价来获得满足图像重构条件的。

对于时间分辨率要求较高的场合,这种通过基线旋转或孔径位置的变化来获得全覆盖办法就不能满足要求了,即时 UV 覆盖就是一种选择。为了满足成像分辨率的要求,使分隔的最大的子孔径间距保持与其(最长基线)相适应的距离,并且增加子孔径的个数(包含足够多的基线)或增大子孔径的办法以达到全覆盖的要求。这就是通常指的斐索干涉仪的综合孔径望远镜系统。它的 UV 平面覆盖由望远镜入瞳的自相关函数求出。全 UV 覆盖的斐索干涉仪要求所有的 UV 测量,必须同时进行,并在整个 UV 测量范围不允许存在间隙。斐索干涉仪 UV 覆盖与其工作波段有关,干涉仪阵列的 UV 覆盖在单频(或窄波段)时存在着一些洞,但是在采用宽频成像时,那些洞会被低频覆盖所充满。斐索干涉仪若是一个望远镜系统,就能获得对观测区域的快速成像,也就是说它可获得即时的全 UV 覆盖图像。

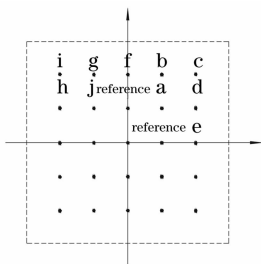


图 2 图 1 所示的非冗余三孔径排列的频率分布

Fig.2 Spatial-frequency diagram showing locations of Fourier components recorded with masks according to Fig.1

图 2 中字母表示的是与每一个分量相联系的掩模。应用抽样理论,容易得到合理的 UV 覆盖。有界限的物体亮度分布的傅里叶分量的离散测量值能恰当地描述这个分布和综合孔径成像。一条基线在 UV 平面上对应的是一个点,它有 ν_u 分量和 ν_v 分量。

2.2 UV 覆盖的两种情况

光学综合孔径干涉成像存在两种情况,即时 UV 覆盖和非即时 UV 覆盖。2.1 节中介绍的有限

3 光学综合孔径望远镜及其 UV 覆盖和优化

3.1 光学综合孔径望远镜方案的提出

假设欲观测 400~1000 km 轨道的卫星或空间

碎片,要求观测的分辨率达到 $0.1''$ 。若不考虑其它情况,那么 1.5 m 口径的望远镜可以达到这个分辨率。但由于大气扰动的原因,望远镜的分辨率与当地的视宁度有关,而一般典型的视宁度是 $0.5''$,也就是说当望远镜的口径大于 50 cm 时,它的理论分辨率是 $1.22\lambda/D$,可以超过典型视宁度值,但实际情况是如不采用特殊的方法,望远镜的真实分辨率就不可能超过当地的视宁度。用光学综合孔径干涉成像的办法进行处理是提高分辨率的一种方法。如果把光学综合孔径技术与望远镜技术结合起来,就可以消除大气扰动,达到 $0.1''$ 的观测分辨率的要求。这就是光学综合孔径望远镜的思想的由来。

为简单起见,初步考虑用将四个子望远镜组成的光干涉仪作为一个整体的镜筒安置于水平式的机架中,为达到 $0.1''$ 的角分辨率,其中一个最大的基线达到 1.5 m 。当然,也可以考虑多于 4 个子望远镜,但这样干涉仪系统将更为复杂。干涉仪的基线数目是 $n(n-1)/2$,此处 $n=4$,则干涉仪的基线有 6 条。根据计算,在 400 km 至 1000 km 轨道高度范围内,观测目标的星等约 $11^m \sim 12^m$,因此,四个子望远镜组成光干涉仪的等效孔径 $\Phi=700\text{ mm}$ 可满足集光能力的要求,换算到每个子望远镜的通光孔径为 $\Phi=350\text{ mm}$ 。

3.2 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖

考虑干涉仪必须满足分辨率 $0.1''$ 的要求,即其中一条基线长 1.5 m 就够了,同时考虑满足低频观测的要求,我们初步设计了一个孔径排列阵如图 3 所示。该孔径的 UV 分布图如图 4 所示。

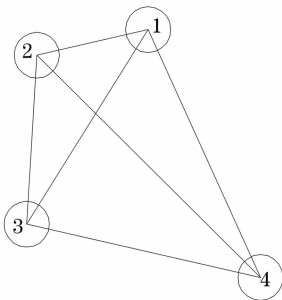


图 3 光学综合孔径望远镜的孔径排列示意图

Fig. 3 Aperture arrangement for the OSA telescope

用这六个点去重构图像是远远不够的,必须增加 UV 覆盖点。增加 UV 覆盖的几种方法,例如增大口径的办法或增多孔径数目、如图 1 所示的孔径的移动或者是孔径的旋转,其中前两种方法不成立。因为增大子望远镜的口径会使光学综合孔径望远镜总重量加大,同时由于口径会远大于 r_0 (光在大气

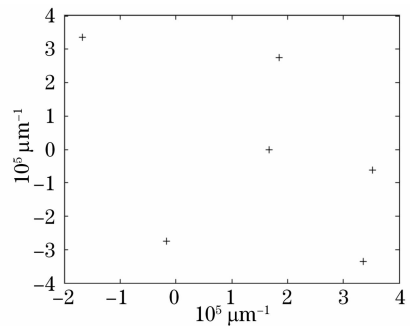


图 4 图 3 所示的孔径排列的 UV 覆盖情况

Fig. 4 UV coverage of the aperture arrangement shown in Fig. 3

中传播的横向相干长度^[7]使得锆钛酸铅(PZT)失去调节波面^[8]的功能,从而得不到有效的干涉条纹。另外,如图 1 那样在观测过程中移动子望远镜的位置以达到增加 UV 覆盖的情况。从原理上来说,这种方法最好,这样可以得到理想的 UV 间隔的数据采样。但在本光学综合孔径望远镜上不可行,因为从光路设计和机械设计方面来考虑,希望从子望远镜引光到组合器这个光学和机械系统最好能够固定,如果按照移动单个的各子望远镜位置势必导致各引光系统随之作相应的移动,这给本来需要的光路稳定增添了额外的诸多不稳定的因素,而且光程的调整以及相应的光路设计和机械设计将更为复杂。

因此,在这个光学综合孔径望远镜中,通过四个子望远镜作为一个整体组成的瞳面旋转的办法来增加 UV 覆盖的办法是唯一的选择。考虑 3.1 节中所述的观测目标出现在视野中的时间一般在 $10 \sim 20\text{ min}$ 之间,在这段时间里必须完成孔径的旋转过程中对 UV 点的测量。这里考虑以 10 min 为限,在观测目标出现在视野的 π 弧度里,望远镜的瞳面旋转的角速度是 $\omega=6\pi\text{ rad/h}$ 。按照图 3 的孔径排列,由(1)式可以得到子望远镜对 i, j 基线的 UV 点的轨迹是公式:

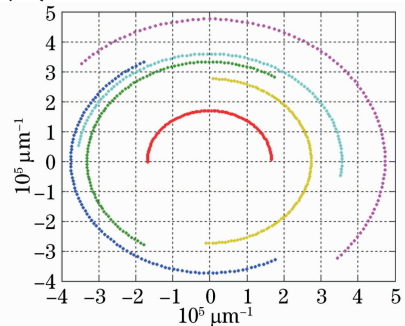


图 5 光学综合孔径望远镜的瞳面旋转的 UV 覆盖的情况

Fig. 5 Aperture array UV coverage during one time of the observed subject flying in the field of view

$$U_{ij} = \frac{\Delta x_{ij}}{\lambda Z}, \quad V_{ij} = \frac{\Delta y_{ij}}{\lambda Z}, \quad (2)$$

图 3 中,如最长基线为 1.5 m, $R=0.75$ m,子望远镜 1,2,3,4 的位置用极坐标表示,分别为: $R_1=0.9R$, $\alpha_1=\pi/2$; $R_2=R$, $\alpha_2=7\pi/4$; $R_3=0.9R$, $\alpha_3=7\pi/6$; $R_4=R$, $\alpha_4=3\pi/4$ 。则(2)式为

$$\begin{aligned} U_{ij} &= R_i \cos(\alpha_i + \omega t) - R_j \cos(\alpha_j + \omega t), \\ V_{ij} &= R_i \sin(\alpha_i + \omega t) - R_j \sin(\alpha_j + \omega t), \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\omega=6\pi$ rad/h, $t=0\sim 1/6$ h。假设(2)式瞳面到象面的距离是 $Z=5$ m, (3)式中, $i, j=1, 2, 3, 4$, 同时 $i \neq j$ 。这样总共有 6 条 UV 轨迹: $u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{23}, u_{24}, u_{34}$ 。按(3)式得到光学综合孔径望远镜的瞳面旋转的 UV 覆盖的情况如图 5 所示(图 5 中每 6 秒钟得到一个 UV 点)。

3.3 光学综合孔径望远镜的 UV 覆盖的优化

在设计一个瞳面旋转的光学综合孔径望远镜时,希望其 UV 覆盖达到最优。针对图 5 而言,希望这 6 条 UV 轨迹能均匀分布在 UV 图中,这样相当于该孔径阵能均匀地在 UV 空间进行采样。在本孔径阵中,图 3 所示的 2、4 的位置可以确定。因为 2、4 的位置决定了本综合孔径望远镜的最长基线,故将 2、4 放在最长基线的两头。再来考虑 1: 由于子望远镜的直径为 35 cm,那么子望远镜 1、2 的中心点之间的距离至少应该是 35 cm。若考虑子望远镜的安装和调整的方便,他们之间最好间距 10 cm。按照这两个数字,通过计算,第 1 个孔径安排在 2 和 4 的连线上,即 $R_1=53.64$ cm, $\alpha_1=3\pi/4$ 时,这样这三个孔径所组成的阵的 UV 覆盖达到最优(瞳面旋转的方式按图 5 的方式进行),如图 6 所示。

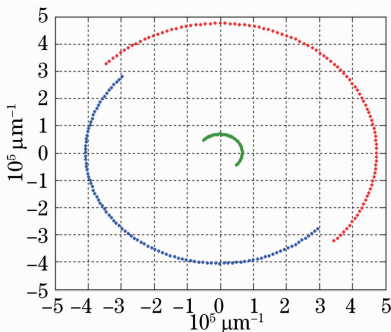


图 6 3 个孔径的优化后的 UV 覆盖情况

Fig. 6 Optimized UV coverage for the first 3 apertures

对于孔径 3 的位置排列,经过计算和优化,得到孔径 3 的参数为 $R_3=0.45R$, $\alpha_3=14\pi/13$ 时,本光学综合孔径阵的 UV 覆盖达到最佳,如图 7 所示。经过优化的孔径排列如图 8 所示。

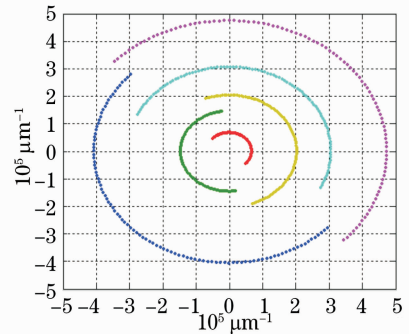


图 7 本光学综合孔径阵的 UV 覆盖达到最佳
Fig. 7 Optimized UV coverage for the OSA telescope with 4 apertures

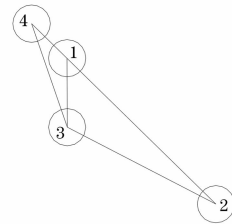


图 8 经过优化的孔径排列

Fig. 8 Optimized aperture arrangement for the OSA telescope

4 结 论

光学综合孔径干涉成像技术是一种全新的高分辨率成像观测的技术,要解决的问题很多。UV 覆盖技术和 UV 覆盖的优化是解决光学综合孔径干涉成像技术中用以重构图像所需要的足够多的信息。本文在介绍 UV 覆盖的概念的同时,用一个实例来研究光学综合孔径阵的 UV 覆盖和 UV 覆盖优化的方法,给出了该光学综合孔径阵的孔径排列的优化结果。为后续的研究打下了良好的基础。

参 考 文 献

- Monnier J D. An introduction to closure phases. Principle of Long Baseline Stellar Interferometry[C]. NASA Report, 2000, Edited by P. R. Lawson, 2000. 203~230
- Wang Haitao, Zhou Bifang. Beam combiner in optical aperture synthesis telescope array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(9): 1109~1115
王海涛,周必方. 光学综合孔径望远镜中的组合器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(9): 1109~1115
- He Yuntao, Jiang Yuesong, Wang Changwei. Application of electro-optic modulation in passive synthetic aperture imaging detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1021~1207
何云涛,江月松,王长伟. 电光调制在被动综合孔径成像探测中的应用[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1021~1207
- Wu Quanying, Qian Lin, Shen Weimin. Research on pupil configuration of dual three sub-apertures sparse-aperture system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 187~192
吴泉英,钱霖,沈为民. 复合三子镜稀疏孔径光瞳结构的研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2): 187~192

- 5 Long Weijun, Wang Zhile, Zhou Yanping. Imaging analysis and computer simulation of optical synthetic aperture telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1109~1114
龙伟军,王治乐,周彦平. 光学综合孔径望远镜成像分析及计算机仿真[J]. 光学学报, 2004, **24**(8): 1109~1114
- 6 Liang Quanting. Physical Optics[M]. Beijing: China Mechine Press, 1980
梁铨廷. 物理光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1980
- 7 Wang Zhengming, Xu Jiayan, Zhang Xiuzhong *et al.*. The Astronomical Interferometry[M]. Science Press, 1996
王正明,徐家言,张秀忠 等. 天文光干涉[M]. 北京: 科学出版社, 1996
- 8 Wang Haitao, Fan Weijun, Zhou Bifang *et al.*. Research on the active mirror system of the stellar interferometer[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(4): 334~336
王海涛,范伟军,周必方. 恒星光干涉仪的主动镜的研究[J]. 光学技术, 2002, **28**(4): 334~336