

文章编号: 1002-2082(2004)05-0003-04

斐索型光学合成孔径系统近轴成像条件研究

王治乐, 张伟

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 从几何光学理论出发, 详细推导了斐索型光学合成孔径成像系统的近轴非相干成像条件, 即子望远系统的角放大率等于系统的线性缩放因子。对于焦平面上的像点而言, 合成孔径成像系统等效为一个带有特殊形状孔径光阑的望远系统, 这要求该孔径光阑的开口形状和位置分布与合成孔径成像系统各子系统孔径大小和位置分布相一致。我们由此得到了斐索型合成孔径成像系统的主要约束条件。

关键词: 合成孔径; 成像技术; 相位

中图分类号: O435-34

文献标识码: A

Study on Fizeau Optical Synthetic Aperture Paraxial Imaging

WANG Zhi-le, ZHANG Wei

(Research Centre for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Proceeding from the theory of geometric optics, the condition adaxial noncoherent imaging of Fizeau optical synthetic aperture imaging system is derived to achieve diffraction limited performance over a finite field of view, and the conclusion is that the angular magnification of the individual telescope must be equal to the linear demagnification factor. So far as a image point in the focal plane, Fizeau optical synthetic aperture imaging system can be treated as a single large telescope with a special aperture diaphragm so as to reproduce exactly the ensemble of a collecting telescope. Then, the constraint to Fizeau optical synthetic aperture imaging system is achieved.

Keywords: synthetic aperture; imaging technique; phase

引言

为了提高光学系统的角分辨率和信噪比, 20世纪70年代出现了一种新型光学系统——光学合成孔径系统。根据实现形式可分为两类: 迈克尔逊型和斐索型^[1], 如图1和图2所示。由图可以看出,

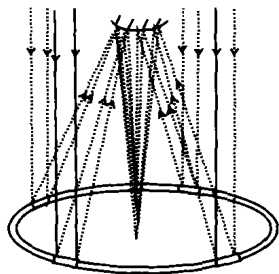


图1 迈克尔逊型合成孔径成像系统

Fig. 1 Michelson synthetic aperture imaging system

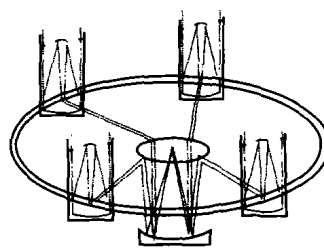


图2 斐索型合成孔径成像系统

Fig. 2 Fizeau synthetic aperture imaging system

单孔径离轴光学系统和星干涉仪均可看作是迈克尔逊型合成孔径系统的特殊形式。迈克尔逊型合成系统最大的优点是其体积近似按基线长度的平方变化, 而斐索型合成孔径系统按立方变化。

收稿日期: 2003-12-22 修回日期: 2004-02-18

作者简介: 王治乐, (1975), 男, 河南偃师市人, 博士研究生, 主要从事光学半实物仿真、光学合成孔径成像等信息获取技术方面的研究工作。

据有关资料显示,光学合成孔径成像系统是下一代天文望远镜等天基成像系统的主要技术途径。本文从几何光学理论出发,研究斐索型合成孔径系统的近轴非相干成像条件和成像特性。

1 近轴成像条件

在大多数传统的光学系统中,入射波面被光滑连续的反射面或折射面收集,而对于合成孔径望远系统,收集的是不连续的波面,即在一波面上对多个区域进行抽样收集。下面根据几何光学理论推导合成孔径系统完善成像的条件。

基于两个无焦望远系统合成光学系统的成像原理,进而研究出了由多个望远系统合成的光学系统,其光路如图3所示。系统中子望远系统主镜的焦距为 f_1 ,与其共焦点的次镜的焦距为 f_2 ,因此子系统的角放大率为

$$\Gamma = f_1 / f_2 \quad (1)$$

为了简化问题,假定子望远镜的光轴相互平行,并且它们的主瞳分布位于垂直于光轴的同一平面内。

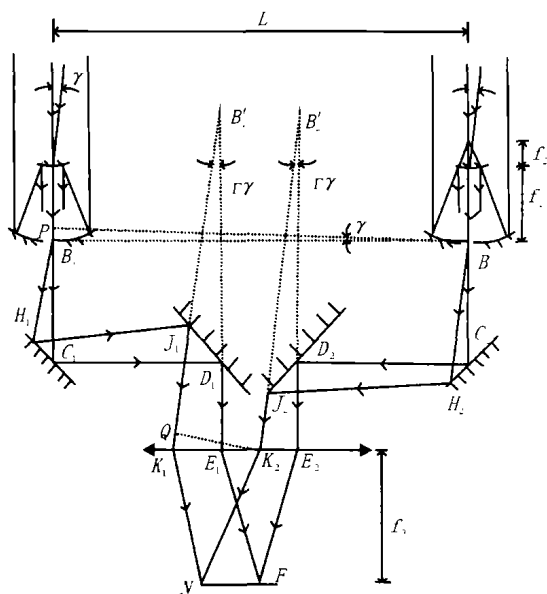


图3 合成孔径光学系统光路图

Fig. 3 Beam path of synthetic aperture imaging system

对于光轴上无限远处点光源情况,系统成像时,波前将同时到达子系统入瞳,经过各子系统后,同时从点 B_1 和 B_2 射出(不失一般性,在后面光束传播过程中,我们只考虑主光线)。光线分别通过路径 $B_1C_1D_1E_1$ 和 $B_2C_2D_2E_2$,其中要求 D_1E_1 和 D_2E_2 相

互平行,而 C_1D_1 和 C_2D_2 可以不平行。这些平行光线最后通过焦距为 f_3 的望远系统汇聚在焦平面的 F 点上。每个子望远系统的衍射图在点 F 处叠加,形成系统的最终像。如果调节光程 $B_1C_1D_1E_1F_1$ 和 $B_2C_2D_2E_2F_2$,使其相等,入射波前将等光程到达 F 点,则所有波长的光都将在该点形成干涉峰。 F 点的干涉模式由波长、点 E_1 和 E_2 处光束的相对位相、子光束直径、光束间距 E_1 和 E_2 的大小与焦距 f_3 共同确定。

下面考虑无限远离轴点光源的情况。入射光与光轴的夹角为 γ ,到达点 B_2 的波前将同时到达 P 点。光程延迟为

$$PB_1 = L \sin \gamma \quad (2)$$

经过延迟,点 P 的波前到达点 B_1 ,然后经过子望远系统出射,出射光线与光轴的夹角将变为 $\Gamma\gamma$ 。通过点 B_1 和 B_2 的光线分别经过光路 $B_1H_1J_1K_1$ 和 $B_2H_2J_2K_2$,并汇聚在点 N 上,如图4所示。

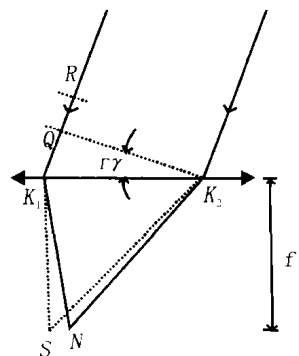


图4 光束合成示意图

Fig. 4 Schematic of beam synthetic way

图4给出了两束平行光以 $\Gamma\gamma$ 角入射到理想透镜上的情形。由于入射光束相互平行,在没有位相延迟的情况下它们将汇聚到焦平面的同一点 N 上。只有一束光入射时,该点的衍射斑取决于该光束的直径、透镜焦距和所用波长。从 K_2 点向光线 RK_1 作垂线,垂足为 Q ,则从光源发出的波面将同时到达点 K_2 和 Q 。根据几何光学成像原理,理想成像时,点 K_2 和 Q 到达点 N 的光程相等,即:

$$K_2N = QK_1 + K_1N \quad (3)$$

也可以认为当两束光的直径变大时,最终可以形成连续的波面 QK_2 。该波面可认为是从无限远处的点光源发出的连续波面。但是当左面光束存在延迟时,右面光束到达 K_2 点,左面光束到达点 R ,这时左右光束将等光程汇聚在焦平面的 S 点上,偏移量

为

$$SN = (RQ/K_2Q) \cdot f_3 \quad (4)$$

在实际成像过程中,我们将看到在焦平面上零级干涉条纹从点 N 移到了点 S ,但每束光的衍射条纹(假设两束光的相同)包络线的中心仍在 N 点,如图5所示(虚线为衍射条纹包络线)。为了使干涉峰发生在衍射条纹的中心,要求 $RQ=0$ 。

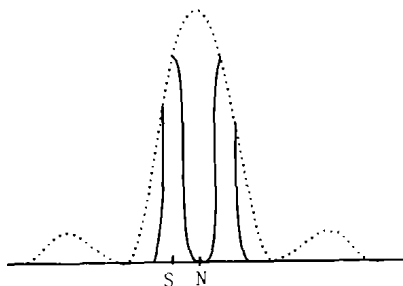


图5 像点光强分布示意图

Fig. 5 Schematic diagram of intensity distribution of image points

定义线性缩放因子 Γ_c 为子望远系统间距 L 和光束合成系统入射光束中心光线间距 K_1K_2 (或 E_1E_2) 的比值:

$$\Gamma_c = L/K_1K_2 \quad (5)$$

在图3中,为了使子望远系统的干涉峰处于其衍射条纹中心, QK_2 波面应具有相同的位相,即 PQ 两点间的光程应与 B_2K_2 两点间的光程相等,故:

$$PB_1 = QK_1 \quad (6)$$

将 $PB_1 = L\sin\gamma$ 和 $QK_1 = (L/\Gamma_c)\sin(\Gamma\gamma)$ 代入(6)式得:

$$\Gamma_c \sin\gamma = \sin(\Gamma\gamma) \quad (7)$$

在近轴近似条件下有:

$$\Gamma_c = \Gamma \quad (8)$$

即子望远系统的角放大率等于系统的线性缩放因子。对于单个望远系统来说,其角放大率和光束直径的缩放是完全相同的,但对于合成孔径成像系统,子系统出射光束在合成成像时,要求其光束直径和间距必须是各子系统入射光束直径和间距的等比缩放。从焦平面上的像点来看,将呈现重要性质,亦即合成孔径成像系统可等效为一个带有特殊形状孔径光阑的望远系统,但要求该孔径光阑的开口形状和位置分布与各子系统孔径大小和位置分布相一致,如图6所示,其中 $\Gamma = f_1/f_2$, $\Gamma_c = D_1/D_2$ 。这也适用于有更多子系统的合成孔径成像系

统(不管它们的子系统是一维分布还是二维分布)。

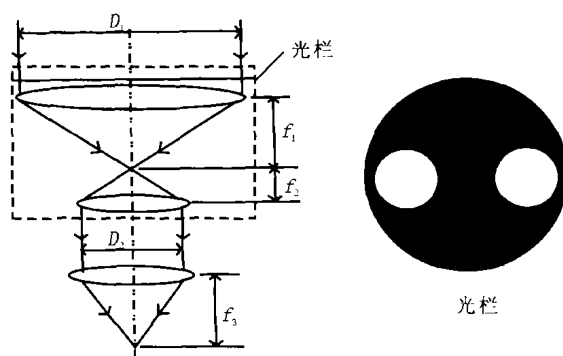


图6 等效光学系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of equivalent optical system

2 误差允限

根据光学系统的波像差理论,系统的最大波像差小于 $\lambda/4$ 时,认为系统是完善的,也就是所谓的瑞利判据,因此系统完善成像时需满足下式:

$$|L\sin\gamma - (L/\Gamma_c)\sin(\Gamma\gamma)| < \lambda/4 \quad (9)$$

化简后,得:

$$|1 - \Gamma_c/\Gamma| < \lambda/(4\gamma L) \quad (10)$$

系统的角分辨率 $\Psi \approx \lambda/L$, γ 的最大值为半视场角,即 $\gamma_{\max} = \omega$ 。对于采用填充因子为 0.5 的 $N \times N$ 像元探测器的成像系统,则有:

$$N/2 = 2\omega/\Psi = 2L\Psi_{\max}/\lambda \quad (11)$$

令(10)式中的 γ 取最大值,将(11)式代入并化简得:

$$|1 - \Gamma_c/\Gamma| < 1/N \quad (12)$$

(11)式就是斐索型光学合成孔径系统接近理想成像必须满足的条件。例如,对于 1024×1024 像元的 CCD 探测器,要求 $|1 - \Gamma_c/\Gamma| < 1/1024$,也就是子望远系统角放大率和系统线性缩放因子的数值误差应小于 $1/1024$ 。

3 讨论

3.1 有效焦距

由图3可知,在系统焦平面上,物体像的大小为 $Nf = \Gamma\gamma f_3$ 。由于系统入射光束与光轴的夹角为 γ ,根据系统焦距的定义,我们可得出该合成孔径系统的有效焦距为

$$EFL = \Gamma f_3 \quad (13)$$

3.2 线性缩放因子

系统线性缩放因子仅由系统出射光束入射到

合成系统时的中心间距 E_1E_2 决定,它可以通过调节图3中 D_1 和 D_2 点的反射镜来调节。在上面的例子中, $1/1024$ 的数值精度意味着子系统的指向精度应满足 $(\Delta L/\Gamma)/1024$ 。取 $\Delta L=1\text{ m}$, $\Gamma=10$, 则调整量为 $98\text{ }\mu\text{m}$ 。

3.3 视场

在近轴条件下,子望远系统的角放大率等于系统的线性缩放因子。对于一种新型全反射光学系统来说,由于受子系统口径和像差等因素的限制,目前系统的视场只能做到 0.5° 到 1° , 详细讨论参见参考文献[5]和[6]。

3.4 干涉特性

根据前面的论述,斐索型合成孔径系统是对连续波前进行离散收集然后干涉合成成像的。换句话说就是分波前干涉成像,因此它可被看作是一种可以成像的波面剪切干涉仪^[7],其完善成像的要求是系统的相对横向剪切量(即输入光束间距与输出光束间距之比)应等于其径向相对剪切量(即输入光束直径与输出光束直径之比)。

4 结论

本文从几何光学理论出发,详细推导了斐索型合成孔径成像系统近轴非相干成像条件,即 $\Gamma_c = \Gamma$, 其中 Γ 是子望远系统的角放大率, Γ_c 是系统的

线性缩放因子。根据波像差理论中的瑞利判据,得出了系统在接近完善成像时应满足的条件: $|1 - \Gamma_c/\Gamma| < 1/N$, 其中 N 为探测器像元数。

参考文献:

- [1] Janet S Fender. Synthetic apertures: an over-view [J]. SPIE, 1986, 628: 2-7.
- [2] Meinel A B. Aperture synthesis using independent telescope [J]. Applied Optics, 1970, (9): 2501 - 2504.
- [3] Ross Brian Hooker. The effects of aberrations in synthetic aperture systems [D]. Arizona: University of Arizona, 1974.
- [4] Gérard ROUSSET, Laurent M MUGNIER. Imaging with multi-aperture optical telescopes and an application [J]. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Series IV Physics, 2001, 2(1): 17-25.
- [5] James E Harvey, Christ Ftaclas. Field-of-view limitations of phased telescope arrays [J]. Applied Optics, 1995, 34(25): 5787-5798.
- [6] Cheng-His Miao, Robert R Shannon. Design of wide-field arrays [J]. SPIE, 1990, 1236: 372-378.
- [7] 苏大图. 光学测量 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988. 183-195.

(上接第2页)

秒)和皮秒脉冲激光以及飞秒激光有着本质区别。飞秒激光与物质发生作用时,已经不能用传统的导热方程来解释传热了。飞秒激光作用于物质表面的作用深度仅几百纳米,作用面积要比光斑小得多,达到亚微米量级,对于未来汽车工业的精密加工,无疑是绰绰有余。

3 结论

为了使我国的汽车工业能够赶上国外先进水平,化解当前的危机,必须努力提高汽车工业中激

光器使用水平以及使用规模,使我国的汽车工业早日由传统工业过渡到现代工业。这一目标需要不同学科专业人员的共同努力才能得以实现。

参考文献:

- [1] 刘要武,李雨田,谢冀江,等. 汽车缸套激光硬化处理后的组织与性能 [J]. 光学精密工程, 1999, 7(3): 43-47.
- [2] 陈文红,张发伟. 激光焊接在汽车工作中的应用 [J]. 汽车制造业, 2001, (8): 46-47.