

# 相位平移误差与子孔径自身像差对稀疏光学合成孔径系统成像质量的综合影响分析\*

刘政<sup>1)2)3)†</sup> 王胜千<sup>2)3)</sup> 黄林海<sup>2)3)</sup> 饶长辉<sup>2)3)</sup>

1) (国防科技大学光电科学与工程学院, 长沙 410073)

2) (中国科学院自适应光学重点实验室, 成都 610209)

3) (中国科学院光电技术研究所自适应光学实验室, 成都 610209)

(2011年5月4日收到; 2011年5月24日收到修改稿)

稀疏光学合成孔径系统成像质量的提高需要综合考虑子孔径间相位平移误差和子孔径自身像差的影响. 本文基于稀疏光学合成孔径系统的光瞳结构, 利用傅里叶光学基本原理对系统的斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR) 进行了理论推导, 得到了包含相位平移误差和子孔径自身像差分离形式的该类系统的 SR 指标的理论公式. 以两子孔径系统为例, 计算并分析了在相位平移误差校正后和未校正时, 系统 SR 指标在不同子孔径像差下的变化规律, 研究了相位平移误差与子孔径像差对系统 SR 指标的综合影响. 结果阐明了该类系统的成像质量受相位平移误差和子孔径自身像差双重制约的物理机理, 且表明只有将子孔径自身像差校正至某限度内时, 相位平移误差的校正才对系统 SR 指标的提高有明显意义.

**关键词:** 稀疏光学合成孔径, 相位平移误差, 像差, 成像质量

**PACS:** 07. 60. -j, 42. 30. kq, 42. 15. Fr, 87. 57. C -

## 1. 引言

稀疏光学合成孔径系统通过子孔径之间的共相干涉来完成对目标观测, 是目前高分辨力望远镜发展的重要方向之一<sup>[1-3]</sup>. 当我们研究稀疏光学合成孔径系统成像质量的各类影响因素时, 已有一些相关的思想和结论被学者们提出. James, Harvey 和 Ftaclas 研究了 MMT, GOLAY-6 等不同结构的系统中子孔径离焦像差与视场角变化对系统成像质量的影响<sup>[4]</sup>; Mahajan 对具有圆形光瞳和环状排布光瞳结构的系统的斯特列尔比 (Strehl Ratio, SR) 指标受某些像差的影响作了理论推导和数值分析<sup>[5, 6]</sup>; Butts 分析了相位平移误差 (也称 piston error) 和倾斜像差对合成孔径系统成像质量的影响<sup>[7]</sup>; 针对光学阵列望远镜系统的设计, Shack 从理论角度提出相应的像差容限<sup>[8]</sup>; Lucke 研究了低阶泽尼克模式对合成孔径系统中光束合成环节的影响<sup>[9]</sup>; Thompson 研究了在非对称系统中、按特征光场形式

求解离焦、像散、彗差以及球差的理论关系以及相应均方根误差的理论计算模式<sup>[10]</sup>. 此外, 一些学者对类似系统的填充因子、阵列布局等方面进行了研究<sup>[11-13]</sup>.

国内的科研人员曾针对具体光学系统中的像差特性及相关检测方法进行了研究<sup>[14-19]</sup>. Wang 等人针对四子孔径的稀疏光学合成孔径系统的成像性能进行了研究<sup>[20]</sup>, 推导了单独考虑相位平移误差、倾斜像差和离焦像差时该类系统的 SR 指标, 并对这些像差各自影响下系统 SR 指标的变化规律给予了数值分析.

迄今为止, 有关子孔径间相位平移误差和子孔径自身像差对系统成像质量综合影响的研究报道并不多见, 特别地, 针对如何权衡子孔径像差和相位平移误差二者的校正水平才能更有效地提高系统成像质量这一问题, 尚未有明确的研究结果. 因此, 我们研究相位平移误差和子孔径自身像差对稀疏光学合成孔径系统成像质量的综合影响仍具有重要的理论价值和工程指导意义.

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 61008038) 资助的课题.

† E-mail: liuzhengIOE@yeah.net

为着重研究稀疏光学合成孔径系统中的相位平移误差和子孔径自身像差对系统成像质量的综合影响,本文基于稀疏光学合成孔径系统的光瞳结构,利用傅里叶光学原理对系统的SR指标进行了详细的理论推导和分析,得到了包含相位平移误差和各子孔径自身像差的系统SR指标的理论公式,并通过与之前学者的研究对比验证了其正确性.基于这一理论结果,计算并分析了在相位平移误差校正后和未校正时,系统SR指标在不同子孔径像差下的变化规律,并针对两子孔径系统进行了数值上的具体分析.结果阐明了稀疏光学合成孔径系统成像质量(如SR指标)受相位平移误差和子孔径自身像差双重制约的物理机理,且表明只有将子孔径自身像差控制在特定范围内时,相位平移误差的校正才对系统SR指标的提高有明显意义.

## 2. 基本理论

如图1所示为综合孔径系统的光瞳结构,子孔径的口径均为 $2a$ , $(\varepsilon_n, \eta_n)$ 为第 $n$ 个子孔径中心在系统光瞳中的坐标,对应光瞳面上的极坐标为 $(\rho_n, \theta_n)$ .

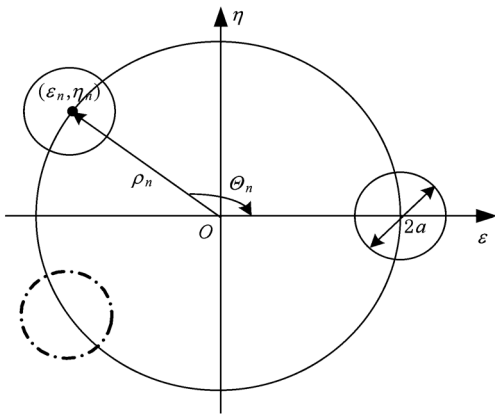


图1 综合孔径系统光瞳结构模型

系统的广义光瞳函数为<sup>[21]</sup>

$$P(\varepsilon, \eta) = \sum_{n=1}^N \Pi(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \times \exp[jkW_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)], \quad (1)$$

其中, $N$ 为子孔径数,波数 $k = 2\pi/\lambda$ , $W_n(\varepsilon, \eta)$ 表示第 $n$ 个子孔径的自身波前, $\Pi(\varepsilon, \eta)$ 为子孔径的孔径函数<sup>[22]</sup>

$$\Pi(\varepsilon, \eta) = \text{circ}(\rho/a) = \text{circ}\left(\frac{\sqrt{\varepsilon^2 + \eta^2}}{a}\right). \quad (2)$$

根据傅里叶光学原理<sup>[23]</sup>,系统的复振幅传递函数为

$$A(u, v) = \mathfrak{F}\{P(\varepsilon, \eta)\} = \mathfrak{F}\left\{\sum_{n=1}^N \Pi(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \times \exp[jkW_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)]\right\}, \quad (3)$$

其中, $\mathfrak{F}[\cdot]$ 为傅里叶变换算符, $(u, v)$ 表示综合孔径焦面上的空间频率坐标.而系统的远场强度(点扩散函数)为

$$I(x, y) = |A(u, v)|^2 \Big|_{u=\frac{x}{\lambda f}, v=\frac{y}{\lambda f}} = \left| \iint \left\{ \sum_{n=1}^N \Pi(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \times \exp[jkW_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)] \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f}\right)\right] \right\} d\varepsilon d\eta \right|^2. \quad (4)$$

为便于分析,将各子孔径的自身波前分为常数项 $\alpha_n$ 和由倾斜开始的泽尼克像差的组合 $\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)$ ,即

$$W_n = \alpha_n + \Phi_n = \alpha_n + \Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n), \quad (5)$$

则(4)式可写作

$$\begin{aligned} & \left| \iint \left\{ \sum_{n=1}^N \Pi(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) e^{jk\alpha_n} \times \exp[jk\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)] \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f}\right)\right] \right\} d\varepsilon d\eta \right|^2 \\ &= \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha_n} \iint \left\{ \Pi(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \times \exp[jk\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)] \times \exp\left[-j2\pi\left(\frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f}\right)\right] \right\} d\varepsilon d\eta \right|^2. \quad (6) \end{aligned}$$

根据泰勒展开公式<sup>[24]</sup>,当 $|z| < 0.82$ 时,函数 $e^z$ 主要决定于其泰勒展开式中的前三项(相对误差小于5%),即

$$\begin{aligned} e^z &= 1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \dots + \frac{z^n}{n!} + \dots \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} \approx 1 + z + \frac{z^2}{2} \quad \text{for } |z| < 0.82. \quad (7) \end{aligned}$$

利用上式对(6)式中的“ $\exp[jk\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)]$ ”进行近似,即

$$\begin{aligned} & \exp[jk\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)] \\ & \approx 1 + jk\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \\ & \quad - \frac{k^2}{2} [\Phi_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)]^2. \quad (8) \end{aligned}$$

将上式代入(6)式,可得到

$$\begin{aligned}
 I(x,y) &= \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha_n} \right. \\
 &\quad \times \mathfrak{F} \left\{ \left[ \Pi(\varepsilon, \eta) + jk\Pi(\varepsilon, \eta)\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}\Pi(\varepsilon, \eta)[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \right. \\
 &\quad \left. * \delta(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \right\}_{u,v=\frac{x,y}{\lambda f}} \Big|^2 \\
 &= \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha_n} \right. \\
 &\quad \times \mathfrak{F} \left\{ \Pi(\varepsilon, \eta) \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \right\}_{u,v=\frac{x,y}{\lambda f}} \\
 &\quad \times \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x\varepsilon_n}{\lambda f} + \frac{y\eta_n}{\lambda f} \right) \right] \Big|^2 \\
 &= \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha_n} \cdot \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x\varepsilon_n}{\lambda f} + \frac{y\eta_n}{\lambda f} \right) \right] \right. \\
 &\quad \times \mathfrak{F} \left\{ \Pi(\varepsilon, \eta) \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \right\}_{u,v=\frac{x,y}{\lambda f}} \Big|^2, \quad (9)
 \end{aligned}$$

上式中的 $\delta(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n)$ 为表示子孔径 $n$ 的中心位置的狄拉克函数. 对于(9)式, 其中的傅里叶积分项可以写为

$$\begin{aligned}
 &\mathfrak{F} \left\{ \Pi(\varepsilon, \eta) \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \right\}_{u,v=\frac{x,y}{\lambda f}} \\
 &= \iint \Pi(\varepsilon, \eta) \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \\
 &\quad \times \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f} \right) \right] d\varepsilon d\eta. \quad (10)
 \end{aligned}$$

由于各子孔径在结构上是一致的, 其孔径函数 $\Pi(\varepsilon, \eta)$ 对每个子孔径都仅在其光瞳范围内为1, 而在其光瞳范围外为0, 因此(10)式可写为

$$\begin{aligned}
 &\iint_{\phi(2a)} \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \\
 &\quad \times \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f} \right) \right] d\varepsilon d\eta, \quad (11)
 \end{aligned}$$

将(9)式中的傅里叶变换项替换为上式, 可以得到

$$I(x,y) = \left| \sum_{n=1}^N \exp \left[ jk \left( \alpha_n - \frac{x\varepsilon_n + y\eta_n}{f} \right) \right] \right.$$

$$\begin{aligned}
 &\times \iint_{\phi(2a)} \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] \\
 &\quad \times \exp \left[ -j2\pi \left( \frac{x\varepsilon}{\lambda f} + \frac{y\eta}{\lambda f} \right) \right] d\varepsilon d\eta \Big|^2. \quad (12)
 \end{aligned}$$

至此, 我们得到稀疏光学合成孔径系统远场分布的近似公式. 可以看出, 系统的远场强度与相位平移误差和子孔径残余波前都有关系, 但在理论上的表述较为复杂. 特别地, 对于理想情况, 即不考虑相位平移误差和子孔径自身像差时, 系统的远场强度分布可以由(12)式得到

$$\begin{aligned}
 I_{\text{ideal}}(x,y) &= \left| \frac{a\lambda f \cdot J_1 \left( \frac{2\pi a}{\lambda f} \sqrt{x^2 + y^2} \right)}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right|^2 \\
 &\quad \times \left| \sum_{n=1}^N \exp \left[ jk \left( \frac{x\varepsilon_n + y\eta_n}{f} \right) \right] \right|^2. \quad (13)
 \end{aligned}$$

为了研究相位平移误差和子孔径残余波前对系统成像性能的综合影响, 我们利用(12)和(13)式可以得到系统SR指标的理论公式. 首先, 对于实际系统, 由(12)式得到其中央像点的强度为

$$\begin{aligned}
 I(0,0) &= \left| \sum_{n=1}^N \exp[jk\alpha_n] \iint_{\phi(2a)} \left[ 1 + jk\Phi_n(\varepsilon, \eta) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2}[\Phi_n(\varepsilon, \eta)]^2 \right] d\varepsilon d\eta \right|^2. \quad (14)
 \end{aligned}$$

根据波前均值的定义<sup>[25]</sup>

$$\overline{\Phi_n^2} = \frac{1}{\pi a^2} \iint \Phi_n^2 d\varepsilon d\eta, \quad (15)$$

$$\overline{\Phi_n} = \frac{1}{\pi a^2} \iint \Phi_n d\varepsilon d\eta, \quad (16)$$

我们将(15)和(16)式代入(14)式, 得到

$$\begin{aligned}
 I(0,0) &= \left| \sum_{n=1}^N \exp(jk\alpha_n) \cdot [\pi a^2 + jk \cdot \pi a^2 \cdot \overline{\Phi_n} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{2\pi^2}{\lambda^2} \cdot \pi a^2 \cdot \overline{\Phi_n^2}] \right|^2 \\
 &= \pi^2 a^4 \left| \sum_{n=1}^N \exp(jk\alpha_n) \right. \\
 &\quad \left. \times \left[ 1 - \frac{k^2}{2} \overline{\Phi_n^2} + jk \overline{\Phi_n} \right] \right|^2. \quad (17)
 \end{aligned}$$

而由(13)式得到理想条件下的中央像点强度为

$$I_{\text{ideal}}(0,0) = \pi^2 N^2 a^4. \quad (18)$$

进一步, 我们可以得到描述合成孔径系统SR指标的理论公式

$$\begin{aligned}
 \text{SR} &= \frac{I(0,0)}{I_{\text{ideal}}(0,0)} \\
 &= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha_n} \right. \\
 &\quad \times \left. \left[ 1 - \frac{k^2(\sigma_n^2 + \overline{\Phi_n^2})}{2} + jk\overline{\Phi_n} \right] \right|^2, \quad (19)
 \end{aligned}$$

其中,  $\alpha_n$  表示系统中子孔径  $n$  波前中的常数项,  $\sigma_n$  表示子孔径  $n$  自身波前的均方根值,  $\overline{\Phi_n}$  表示相应的波前均值.

特别地,以四孔径系统为例,若只考虑子孔径间的相位平移误差(即  $\Phi_n = 0, n = 1, 2, 3, 4$ ) 时,由(19)式得到的系统 SR 为

$$\text{SR}_{\text{piston only}} = 1 - \frac{\pi^2}{4\lambda^2} \sum_{n=1}^4 \sum_{n>m}^4 (\alpha_m - \alpha_n)^2. \quad (20)$$

若仅考虑子孔径波前中的倾斜成分时(即  $\alpha_n = 0, \Phi_n = a_n \cdot \varepsilon + b_n \cdot \eta, \overline{\Phi_n} = 0, \sigma_n^2 = \frac{a_n^2}{4}(a_n + b_n), n = 1, 2, 3, 4$ ), 由(19)式得到的系统 SR 为

$$\text{SR}_{\text{tip/tilt only}} = 1 - \frac{\pi^2 a^2}{4\lambda^2} \sum_{n=1}^4 (a_n^2 + b_n^2). \quad (21)$$

若仅考虑子孔径波前中的离焦成分时(即  $\alpha_n = 0, \Phi_n = c_n(\varepsilon^2 + \eta^2), \overline{\Phi_n} = \frac{d^2}{8}c_n^2, \sigma_n^2 = \frac{d^4}{192}c_n, d = 2a, n = 1, 2, 3, 4$ ), 由(19)式得到的系统 SR 为

$$\begin{aligned}
 \text{SR}_{\text{defocus only}} &= 1 - \frac{\pi^2 d^4}{48\lambda^2} \sum_{n=1}^4 c_n^2 \\
 &\quad + \frac{\pi^2 d^4}{256\lambda^2} \left[ \sum_{n=1}^4 c_n \right]^2. \quad (22)
 \end{aligned}$$

在同样忽略有关像差高于四次项的部分时,(20),(21),(22)式与文献[20]中的结果是一致的(见附录中推导),说明(19)式在理论上是无误的.

(19)式具有明确的物理含义,它表明了在实际的稀疏光学合成孔径系统中,系统整体成像质量(SR比)由子孔径间的相位平移误差和各子孔径自身像差共同决定,且由该结果可以明确看出相位平移误差与子孔径像差分别对系统 SR 指标的作用机理.区别于文献[20]中的结果,(19)式不局限于四子孔径的情况,对于任意子孔径数目的合成孔径系统都是适用的,且将相位平移误差与子孔径自身像差对系统 SR 的影响因式分离开来,更便于实际系统中的分析和设计.

此外,对于子孔径(由倾斜开始的)波前均值  $\overline{\Phi_n}$  非零的情况,我们可以这样处理,令

$$\Phi_n = \overline{\Phi_n} + \Phi'_n, \quad (23)$$

其中  $\Phi'_n$  表示按均值为零进行归一化后的由倾斜开始的泽尼克像差的组合,即  $\overline{\Phi'_n} = 0$ . 这样既可保证  $\Phi_n$  的均值不变,也保证了其对应均方根  $\sigma_n$  不变.将(23)式代入(5)式中,得到

$$\begin{aligned}
 W_n &= \alpha_n + \Phi_n = (\alpha_n + \overline{\Phi_n}) + \Phi'_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n) \\
 &= \alpha'_n + \Phi'_n(\varepsilon - \varepsilon_n, \eta - \eta_n). \quad (24)
 \end{aligned}$$

可见,此时子孔径的波前均值  $\overline{\Phi_n}$  已归入原常数项  $\alpha_n$  中.将(5)式替换为(24)式,我们可以得到系统 SR 更为简洁的理论公式

$$\begin{aligned}
 \text{SR} &= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha'_n} \cdot \left[ 1 - \frac{k^2(\sigma_n^2 + \overline{\Phi_n'^2})}{2} + jk\overline{\Phi_n'} \right] \right|^2 \\
 &= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\alpha'_n} \cdot \left[ 1 - \frac{k^2\sigma_n^2}{2} \right] \right|^2. \quad (25)
 \end{aligned}$$

(25)与(19)式中的均方根  $\sigma_n$  是相同的,而其中的  $\alpha'_n$  为包含了子孔径波前均值的 piston 项,这在物理意义上也是成立的,即不同子孔径间波前均值的差异就是不同子孔径整体波面的差异,在物理含义上仍属于相位平移误差的范畴.相比(19),(25)式同样成立,且更为简洁地描述了系统的 SR 指标.

为便于实际系统中的分析,我们可以将某个子孔径作为参考孔径而相位平移误差为其他子孔径相对该子孔径的误差量,这样我们可以把(25)式重写为

$$\begin{aligned}
 \text{SR} &= \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\beta_n} \cdot \left[ 1 - \frac{k^2\sigma_n^2}{2} \right] \right|^2 \\
 &\approx \frac{1}{N^2} \left| \sum_{n=1}^N e^{jk\beta_n} \cdot [1 + \ln \sqrt{\text{SR}_n}] \right|^2 \\
 &\quad \text{for } \sigma_n < \frac{\lambda}{6}. \quad (26)
 \end{aligned}$$

其中,  $\beta_n$  表示子孔径  $n$  相对于子孔径 1 的相位平移误差,即  $\beta_n = \alpha'_n - \alpha'_1, \beta_1 = 0, \text{SR}_n$  为子孔径  $n$  自身的 SR 指标值<sup>[25]</sup>,其他参数与前文中一致.

### 3. 相位平移误差校正后子孔径像差对系统成像质量的影响

由(26)式可知,稀疏光学合成孔径系统的成像质量与各子孔径的波前特性之间并非单独对应,而是有着更为复杂的关系.因此,研究不同状态下的子孔径波前对整体系统成像质量(如 SR 指标)的影响,将有助于我们进行合成孔径系统性能的分析,对实际系统的设计也有明确的指向性.

首先,我们分析在相位平移误差已得到校正的

条件下,不同的子孔径像差对应的系统 SR 指标的变化,以着重研究子孔径像差对系统成像质量的影响.在分析中,我们以两子孔径构成的合成孔径系统为例(类似 LBT 的结构),在相位平移误差已得到校正时系统的 SR 可由(26)式得到

$$\begin{aligned}
 \text{SR} &= \frac{1}{N^2} \left[ N - \frac{k^2}{2} \sum_{n=1}^N \sigma_n \right]^2 \\
 &= 1 - \frac{k^2}{2} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) + \frac{k^4}{16} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2 \\
 &\quad \text{for } N = 2. \tag{27}
 \end{aligned}$$

(27)式中的  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别表示子孔径 1 和子孔径 2 各自波前的均方根值.由该式可知,在相位平移误差已得到校正的条件下,无论子孔径自身波前单独考虑某阶像差或是多阶像差的组合,当其均方根为相同数值时,对应的系统 SR 值都是一致的,即(27)式中的  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  与所考虑的子孔径像差的类型无关.例如图 2 和图 3,对应的子孔径像差分别为离焦像差与倾斜直至第 65 阶泽尼克像差的组合,可见,两图中相同的  $(\sigma_1, \sigma_2)$  对应的系统 SR 值是一致的.

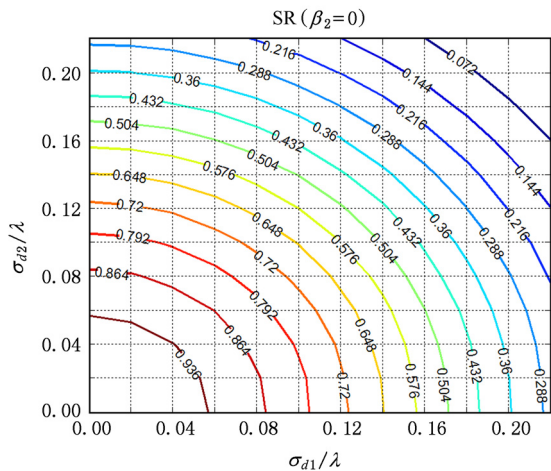


图 2 相位平移校正后系统 SR 随子孔径离焦像差的变化

(27)式可认为是相位平移误差得到校正的条件下系统 SR 指标的理论表述.更直观地,我们由图 3 可以得到系统 SR 随子孔径像差变化的几个具体规律:

1. 当某一个子孔径的波前均方根值固定时,系统 SR 随着另一个子孔径波前的均方根值的增大而逐渐减小,在另一个子孔径的均方根值为零时的系统 SR 获得相对的最大值.例如当  $\sigma_1 = 0.14\lambda$  时,系统 SR 在  $\sigma_2$  为零时获得相对的最大值 0.648,之后

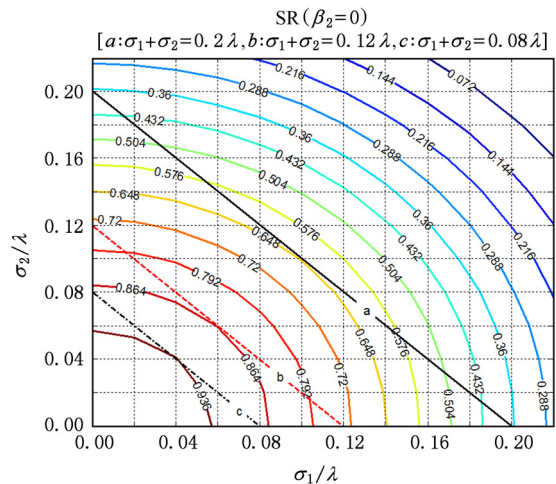


图 3 相位平移校正后系统 SR 随子孔径像差(包含倾斜至第 65 阶泽尼克像差)的变化

随  $\sigma_2$  的增大而逐渐减小.说明系统中单子孔径波前的最佳校正能有效提高系统的 SR 性能.

2. 两子孔径的波前均方根数值相互交换时,系统 SR 指标是一致的.例如  $(\sigma_1, \sigma_2)$  分别为  $(0.14\lambda, 0.1\lambda)$  和  $(0.1\lambda, 0.14\lambda)$  时,对应的系统 SR 值相同.

3. 在  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  之和为定值时,当且仅当  $\sigma_1 = \sigma_2$  时系统获得相对的最大 SR 指标.如图 3 中所示,  $(\sigma_1, \sigma_2)$  在直线 a, b 或 c 上变化时,当且仅当  $\sigma_1 = \sigma_2$  等于  $0.1\lambda, 0.06\lambda$  或  $0.04\lambda$  时,系统 SR 获得相对的最大值.说明提高不同子孔径间像差校正水平的一致性有助于提高系统的 SR 性能.

回到(27)式,我们发现上述三个规律都符合系统 SR 的理论表述.图 3 与(27)式都表明系统 SR 在整体上随着  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的增大而减小,且当  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  为确定数值时,无论  $(\sigma_1, \sigma_2)$  怎样变化,系统的 SR 指标保持不变.因此,我们可将图 3 中的结果按系统 SR 随  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的变化进行表述,相应的理论结果与拟合曲线如图 4 所示.

图 4 中的拟合函数与理论计算结果是一致的,对应的拟合函数为

$$y = 1 - \frac{k^2 x^2}{2} + \frac{k^4 x^4}{16}, \tag{28}$$

其中,  $y$  即为此时的系统 SR 值,  $x$  代表由两子孔径自身波前残差的均方根值构成的项  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$ . 上式可重写为

$$\text{SR} = 1 - \frac{k^2 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)}{2} + \frac{k^4 (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)^2}{16}. \tag{29}$$

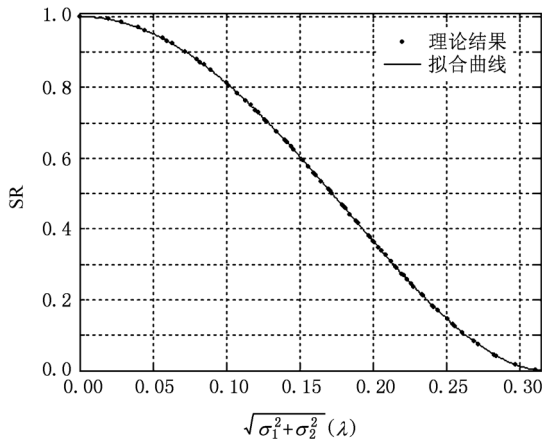


图4 相位平移校正后系统 SR 随子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值的变化及拟合曲线

拟合函数(29)与理论公式(27)完全一致,说明仿真结果是与理论结果相符的.此外,由图4可以看出,若要使系统 SR 值达到0.8,子孔径像差  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  应满足  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \leq 0.1\lambda$ ;而当  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \geq 0.2\lambda$  时,系统 SR 在相位平移误差得到校正时的数值已低于0.4,这说明系统 SR 明显受子孔径自身像差的制约.

综上所述,在相位平移误差已得到校正的情况下,对任意类型的子孔径像差,系统 SR 指标与像差之间均符合(27)式所述的函数关系.在同样的条件下,无论是(27)式的理论表征,还是前文所述的各项定性规律,对于稀疏光学合成孔径系统中的有关分析和设计都具有明确的指向意义.

#### 4. 相位平移误差非零时子孔径像差对系统成像质量的影响

以上分析主要针对相位平移误差得到理想校正的情况.然而,在目前的技术水平下,相位平移误差并非能稳定保持得到理想校正,因此对相位平移误差非零时子孔径像差与系统 SR 指标之间关系的研究具有重要意义.

为便于结合前文的研究,我们仍以两子孔径系统为例,研究不同相位平移误差条件下、系统 SR 指标在子孔径波前的均方根取不同数值时的变化规律.由(26)式,该情况下系统 SR 的理论公式为

$$SR = \frac{1}{4} \left| e^{i\beta_2} + 1 - \frac{k^2}{2} [(\sigma_1^2 + e^{i\beta_2} \sigma_2^2)] \right|^2, \quad (30)$$

$\beta_2$  为子孔径 2 相对于子孔径 1 的相位平移误差.我们

以  $0.1\lambda, 0.2\lambda, 0.3\lambda$  和  $0.4\lambda$  作为  $\beta_2$  的典型值,相应的系统 SR 随子孔径波前的均方根 ( $\sigma_1, \sigma_2$ ) 的变化情况如图5至图7所示(由(30)式可知,系统 SR 与子孔径像差的具体类型仍是无关的,故在计算中以包含倾斜至第65阶泽尼克像差的情况作为代表).

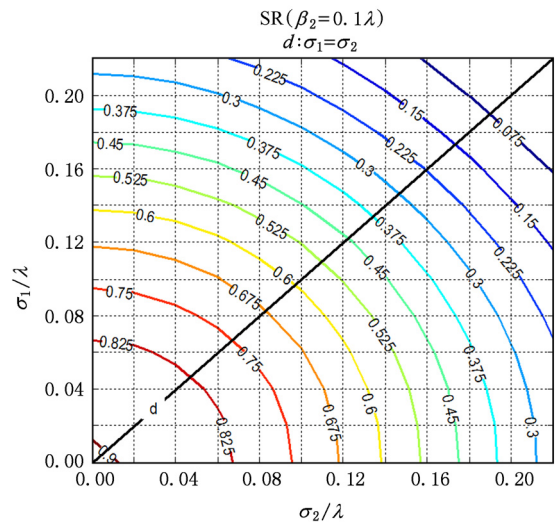


图5 相位平移 = 0.1 lambda 系统 SR 随子孔径像差均方根值的变化

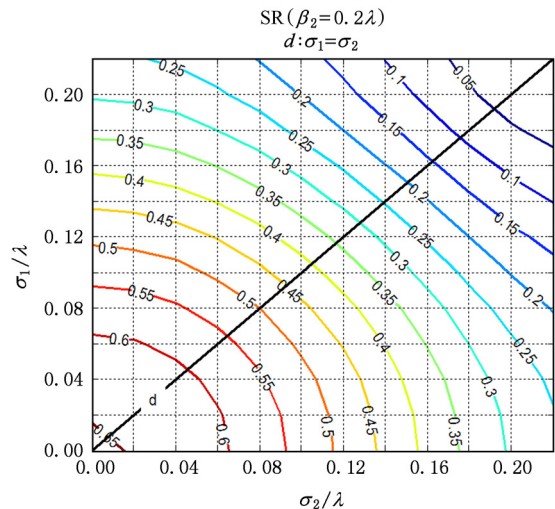


图6 相位平移 = 0.2 lambda 系统 SR 随子孔径像差均方根值的变化

将图3与图5至图7比较,可以得到这样几个规律:

1. 随着相位平移误差的增大,同样的子孔径像差 ( $\sigma_2, \sigma_1$ ) 对应的系统 SR 值逐渐减小.例如相位平移误差由零增大至  $0.3\lambda$  时,  $(\sigma_2, \sigma_1) = (0.14\lambda, 0.08\lambda)$  对应的系统 SR 值由高于0.5降低至约为0.2.说明相位平移误差对系统 SR 性能有着严重制约.

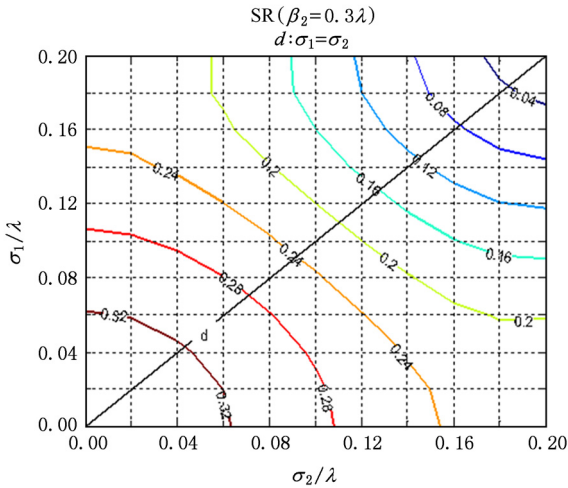


图7 相位平移=0.3λ 系统 SR 随子孔径像差均方根值的变化

2. 在任一相位平移误差水平下,两子孔径的波前均方根数值相互交换时,系统 SR 指标是一致的,在图 5 至图 7 中即表现为系统 SR 曲线关于直线  $\sigma_1 = \sigma_2$  对称.为了从理论上解释这一点,我们对(30)式作进一步的推导

$$\begin{aligned}
 SR &= \frac{1}{4} \left| e^{j k \beta_2} + 1 - \frac{k^2}{2} [(\sigma_1^2 + e^{j k \beta_2} \sigma_2^2)] \right|^2 \\
 &= \frac{1}{4} \left| \left( 1 - \frac{k^2 \sigma_1^2}{2} \right) + \cos(k \beta_2) \left( 1 - \frac{k^2 \sigma_2^2}{2} \right) \right. \\
 &\quad \left. + j \cdot \sin(k \beta_2) \left( 1 - \frac{k^2 \sigma_2^2}{2} \right) \right|^2 \\
 &= \frac{1}{8} \cos(k \beta_2) \cdot (2 - k^2 \sigma_1^2) \cdot (2 - k^2 \sigma_2^2) \\
 &\quad + \frac{(2 - k^2 \sigma_1^2)^2}{16} + \frac{(2 - k^2 \sigma_2^2)^2}{16}. \quad (31)
 \end{aligned}$$

由(31)式可知,两子孔径各自像差的均方根值相互交换时,系统 SR 不变,从而解释了图 5 至图 7 中 SR 曲线关于直线  $\sigma_1 = \sigma_2$  对称的现象,也说明了交换两子孔径自身像差的校正要求对系统最终的 SR 性能并无影响.

3. 当 piston 为  $0.1\lambda$  时,SR 随  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的变化趋势大致符合相位平移误差为零时的(27)式所述;而当相位平移误差增大至  $0.3\lambda$  时,明显看出此时系统 SR 与  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  之间已完全脱离(27)式所述的函数关系而变得更为复杂.这一点可以从(30)式中得到佐证.

综上所述,在相位平移误差未得到理想校正时,系统 SR 指标随子孔径像差的变化规律相比相位平移误差校正后的情况更为复杂,但仍具有上述

三项定性规律.为了获得更为具体的定量结果,可基于(26)式及(30)式进行进一步的计算.

虽然相位平移误差非零时系统 SR 与子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值之间不具有——对应的函数关系,我们仍可以得到不同  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  对应的系统 SR 指标.按照这一思路,我们将不同相位平移误差对应的系统 SR 随  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  的变化情况在一幅图像中表述(如图 8),以研究相位平移误差与子孔径像差对系统 SR 指标的综合影响.

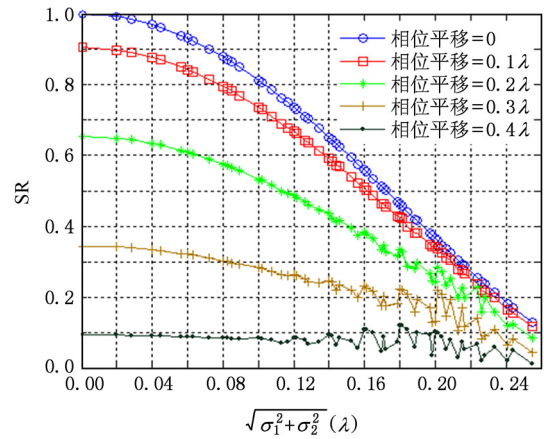


图8 不同相位平移误差对应的系统 SR 随子孔径像差  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值的变化曲线

根据图 8 中的结果,我们发现系统 SR 指标不单独与相位平移误差或子孔径像差的校正水平相关,而是受这两方面的双重制约:

1. 只有将子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值控制在一定范围内,校正相位平移误差对提高系统 SR 才有明显意义.例如当子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值为  $0.2\lambda$  时,即使相位平移误差由  $0.4\lambda$  校正至 0,系统 SR 的提高幅度也未超过 0.3,最后的系统 SR 值未超过 0.4;而当  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值为  $0.1\lambda$  时,若相位平移误差由  $0.4\lambda$  校正至 0,系统 SR 可以由小于 0.1 大幅提高至约 0.8.

2. 子孔径自身像差的校正也需结合相位平移误差的校正才能显著提高系统的成像质量.当相位平移误差为  $0.3\lambda$  时,若将子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值由  $0.2\lambda$  减小至  $0.1\lambda$ ,系统 SR 仅提高了约 0.1;而当相位平移误差为  $0.1\lambda$  时,同样条件下的系统 SR 却可由 0.35 提高至 0.74.

此外,对于相位平移大于等于  $0.3\lambda$  的情况,当子孔径像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值超过  $0.14\lambda$  时,对应的

系统 SR 指标已低于 0.25,在这样的情况下,由于系统远场图像的质量已变得较差,其 SR 值已不完全随着子孔径像差增大而较小,而是表现得更为复杂(如图 8 中的振荡形式).这也解释了在图 7 中为何  $\sigma_1$  为  $0.055\lambda$  时,  $\sigma_2$  等于 0.18 和  $0.2\lambda$  对应的系统 SR 值却是相同的.

综上所述,稀疏光学合成孔径系统成像质量的提高需要综合权衡子孔径自身像差和相位平移误差的校正水平来实现,而不是一味追求相位平移误差或是子孔径自身像差的校正效果.只有将子孔径的残余像差在一定范围内时,相位平移误差的校正对提高系统的成像质量才有显著意义.特别地,对于两子孔径的合成孔径系统,可主要考虑控制子孔径像差  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值的同时对相位平移误差进行校正,以切实提高系统的 SR 指标.此外,根据文中的推导,可知(26)式的结论不受子孔径数目和相应排布方式的限制,对于同类系统中包含更多子孔径的情况,可以根据(26)式作进一步的分析,鉴于文章篇幅,这里不作具体展开.

### 5. 结 论

本文基于稀疏光学合成孔径系统的光瞳结构和基本的光学原理对该类系统的 SR 指标进行了理论推导和分析,得到了包含相位平移误差和各子孔径自身像差的系统 SR 指标的理论公式.在验证这一理论公式的正确性的基础上,以两子孔径系统为例,我们推导了相位平移误差校正后和未校正时,系统 SR 指标与子孔径像差之间的理论公式,并从定性和定量角度研究了相位平移误差与子孔径像差对系统 SR 指标的综合影响.

文中分析阐明了稀疏光学合成孔径系统成像质量(SR 指标)受相位平移误差和子孔径自身像差双重制约的物理机理,且表明只有将子孔径自身像差控制在特定范围内时,相位平移误差的校正对系统 SR 指标的提高才有明显意义.为了切实提高系统的成像质量(如 SR 指标),我们不能一味追求相位平移误差或是子孔径自身像差的校正效果,而需要对这两方面综合改善来实现.特别地,对于两子孔径构成的系统而言,只有将子孔径自身像差的  $\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$  值控制在特定范围内时,相位平移误差的校正才有意义.此外,由于本文中的研究都基于目标光为单波长的情况,相关结果对激光合成领域

也有一定的参考意义.

### 附 录

对于四孔径系统,若只考虑子孔径间的相位平移误差(即  $\Phi_n = 0, n = 1, 2, 3, 4$ ) 时,由(19)式得到的系统 SR 比为

$$\begin{aligned} \text{SR}_{\text{piston only}} &= \frac{1}{16} \left| \sum_{n=1}^4 e^{jk\alpha_n} \right|^2 \\ &\approx \frac{1}{16} \left| \sum_{n=1}^4 \left[ 1 + jk\alpha_n + \frac{1}{2}(jk)^2\alpha_n^2 \right] \right|^2 \\ &= \frac{1}{16} \left| \sum_{n=1}^4 \left[ 1 - \frac{1}{2}k^2\alpha_n^2 + jk\alpha_n \right] \right|^2 \\ &= \frac{1}{16} \left| 4 - \frac{k^2}{2} \sum_{n=1}^4 \alpha_n^2 + jk \sum_{n=1}^4 \alpha_n \right|^2 \\ &= \frac{1}{16} \left[ 4 - \frac{k^2}{2} \sum_{n=1}^4 \alpha_n^2 \right]^2 + \frac{1}{16} k^2 \left[ \sum_{n=1}^4 \alpha_n \right]^2 \\ &= 1 - \frac{k^2}{4} \sum_{n=1}^4 \alpha_n^2 + \frac{k^4}{64} \left[ \sum_{n=1}^4 \alpha_n^2 \right]^2 + \frac{k^2}{16} \left[ \sum_{n=1}^4 \alpha_n \right]^2. \end{aligned}$$

忽略有关像差的四次项,我们得到

$$\begin{aligned} \text{SR}_{\text{piston only}} &= 1 - \frac{\pi^2}{4\lambda^2} \left\{ 4 \cdot \sum_{n=1}^4 \alpha_n^2 - \left[ \sum_{n=1}^4 \alpha_n \right]^2 \right\} \\ &= 1 - \frac{\pi^2}{4\lambda^2} \{ (\alpha_1 - \alpha_2)^2 + (\alpha_1 - \alpha_3)^2 \\ &\quad + (\alpha_1 - \alpha_4)^2 + (\alpha_2 - \alpha_3)^2 \\ &\quad + (\alpha_2 - \alpha_4)^2 + (\alpha_3 - \alpha_4)^2 \} \\ &= 1 - \frac{\pi^2}{4\lambda^2} \sum_{n=1}^4 \sum_{n>m}^4 (\alpha_n - \alpha_m)^2. \end{aligned}$$

若仅考虑子孔径自身像差中的倾斜成分时(即  $\alpha_n = 0$ ,

$\Phi_n = a_n \cdot \varepsilon + b_n \cdot \eta, \overline{\Phi_n} = 0, \sigma_n^2 = \frac{a^2}{4}(a_n^2 + b_n^2), n = 1, 2, 3, 4$ ),由(19)式得到的系统 SR 比为

$$\begin{aligned} \text{SR}_{\text{tip/tilt only}} &= \frac{1}{16} \left| \sum_{n=1}^4 1 - \frac{a^2 k^2}{8}(a_n^2 + b_n^2) \right|^2 \\ &= \frac{1}{16} \left[ 4 - \frac{a^2 \pi^2}{2\lambda^2} \sum_{n=1}^4 (a_n^2 + b_n^2) \right]^2 \\ &= 1 - \frac{\pi^2 a^2}{4\lambda^2} \sum_{n=1}^4 (a_n^2 + b_n^2) \\ &\quad + \frac{\pi^4 a^4}{64\lambda^4} \left[ \sum_{n=1}^4 (a_n^2 + b_n^2) \right]^2. \end{aligned}$$

忽略上式中有关像差的四次项,可得

$$\text{SR}_{\text{tip/tilt only}} = 1 - \frac{\pi^2 a^2}{4\lambda^2} \sum_{n=1}^4 (a_n^2 + b_n^2).$$

若仅考虑子孔径自身像差中的离焦成分时(即  $\alpha_n = 0$ ,

$\Phi_n = c_n(\varepsilon^2 + \eta^2), \overline{\Phi_n} = \frac{d^2}{8}c_n^2, \sigma_n^2 = \frac{d^4}{192}c_n^2, d = 2a, n = 1, 2, 3, 4$ ),则系统 SR 为



$$\begin{aligned}
 \text{SR}_{\text{defocus only}} &= \frac{1}{16} \left| \sum_{n=1}^4 \left[ 1 - \frac{k^2 d^2 c_n^2}{2} \cdot \left( \frac{1}{64} + \frac{1}{192} \right) + j \frac{k d^2 c_n}{8} \right] \right|^2 \\
 &= \frac{1}{16} \left[ 4 - \frac{2\pi^2 d^4}{\lambda^2} \cdot \left( \frac{1}{64} + \frac{1}{192} \right) \cdot \sum_{n=1}^4 c_n^2 \right]^2 \\
 &\quad + \frac{\pi^2 d^4}{256\lambda^2} \left[ \sum_{n=1}^4 c_n \right]^2 \\
 &= 1 - \frac{\pi^2 d^4}{\lambda^2} \left( \frac{1}{64} + \frac{1}{192} \right) \sum_{n=1}^4 c_n^2 \\
 &\quad + \frac{\pi^2 d^4}{256\lambda^2} \left[ \sum_{n=1}^4 c_n \right]^2 \\
 &\quad + \frac{\pi^4 d^8}{4\lambda^4} \cdot \left( \frac{1}{64} + \frac{1}{192} \right)^2 \cdot \left[ \sum_{n=1}^4 c_n^2 \right]^2.
 \end{aligned}$$

忽略上式中有关像差的四次项,得到

$$\text{SR}_{\text{defocus only}} = 1 - \frac{\pi^2 d^4}{48\lambda^2} \sum_{n=1}^4 c_n^2 + \frac{\pi^2 d^4}{256\lambda^2} \left[ \sum_{n=1}^4 c_n \right]^2.$$

- [1] Meinel A B 1970 *Appl. Opt.* **9** 2501
- [2] Davide Loreggia, Daniele Gardiol, Mario Gai 2004 *Appl. Opt.* **43** 721
- [3] Miller N J, Dierking M P, Duncan B D 2007 *Appl. Opt.* **46** 5933
- [4] Harvey J E, Ftacal C 1990 *Proc. SPIE* **1236** 390
- [5] Mahajan V N 1982 *J. Opt. Soc. Am. A* **72** 1258
- [6] Mahajan V N 1982 *J. Opt. Soc. Am. A* **73** 860
- [7] Butts R R 1981 *Proc. SPIE* **293** 85
- [8] Shack R V 1978 *J. Opt. Soc. Am. A* **68** 1361
- [9] Lucke R L 1999 *Appl. Opt.* **38** 4776
- [10] Thompson K 2005 *J. Opt. Soc. Am. A* **22** 1389
- [11] Shu K, Eisenberg S 1986 *Proc. SPIE* **628** 66
- [12] Stuhlinger T W 1990 *Proc. SPIE* **1354** 38
- [13] Sasian J M 1994 *Opt. Eng.* **33** 2045
- [14] Wang F, Zhu Q H, Jiang D B, Zhang Q Q, Deng W, Jing F 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 10 (in Chinese) [王方、朱启华、蒋东镔、张清泉、邓武、景峰 2006 物理学报 **55** 10]
- [15] Lin Z L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 10 (in Chinese) [林志立 2007 物理学报 **56** 10]
- [16] Jiang X G, Wu F Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4202 (in Chinese) [江新光、吴逢轶 2008 物理学报 **57** 4202]
- [17] Zhang Y J, Zhuang Y Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 2788
- [18] Yue J Y, Liu H, Lu Z W, Xu W B, Zhang H, Zhang H X, Liu Y 2010 *Chin. Phys. B* **19**
- [19] Bai F Z, Rao C H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4056 (in Chinese) [白福忠、饶长辉 2010 物理学报 **59** 4056]
- [20] Wang Q S, Rao C H, Jiang W H 2008 *Journal of Modern Optics* **55** 1771
- [21] Watson S M, Mills J P, Rogers S K 1988 *J. Opt. Soc. Am.* **5** 893
- [22] Born M, Wolf E 1957 *Principles Of Optics-Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light* (5<sup>th</sup> edition) (Pergamon Press) 517—520
- [23] Goodman J R 1968 *Introduction to Fourier Optics* (McGraw-Hill Press) 36—40
- [24] Ye Q X, Shen Y H 2006 *Practical Mathematic Manual* (2<sup>nd</sup> edition) (Science Press) 276—277 (in Chinese) [叶其孝、沈永欢等编 2006 实用数学手册(第二版)(科学出版社) 276—277]
- [25] John W Hardy 1998 *Adaptive Optics for Astronomical Telescopes* (Oxford University Press) 100—115

# Analysis of comprehensive effects of piston error and sub-aperture aberrations on the image quality of sparse-optical-synthetic-aperture system\*

Liu Zheng<sup>1)2)3)†</sup> Wang Sheng-Qian<sup>2)3)</sup> Huang Lin-Hai<sup>2)3)</sup> Rao Chang-Hui<sup>2)3)</sup>

1) (College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (The Key Laboratory on Adaptive Optics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

3) (The Laboratory on Adaptive Optics, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(Received 4 May 2011; revised manuscript received 24 May 2011)

## Abstract

To improve the image quality of sparse-optical-synthetic-aperture system, the effects of sub-aperture self aberrations and piston errors among different sub-apertures should be considered comprehensively. Based on the pupil of sparse-optical-synthetic-aperture system, the system Strehl Ratio (SR) is deduced using the principle of Fourier optics, which leads to the theoretical result of the systems SR metric with the form of separated sub-aperture aberration and piston error. As for the bi-aperture system, the variances of the system SR metric are calculated and analyzed with different sub-apertures' aberrations for conditions of corrected piston error and un-corrected piston error. Therefore, the comprehensive effects of sub-aperture aberrations and the piston errors among different sub-apertures on the system image quality are analyzed theoretically. From these analyses, the physical mechanism for the comprehensive effect of sub-aperture aberration and the piston error on the sparse-optical-synthetic-aperture system image quality is revealed, and it could be seen that the compensation of piston error is meaningful only if the sub-aperture self aberration is corrected to be in a certain limit.

**Keywords:** sparse-optical-synthetic-aperture, piston error, aberration, image quality

**PACS:** 07. 60. -j, 42. 30. kq, 42. 15. Fr, 87. 57. C -

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61008038).

† E-mail: liuzhengIOE@yeah.net