

# 斯特雷尔比近似方法应用极限研究

谭碧涛<sup>1,2,3</sup> 陈力子<sup>1</sup> 陈洪斌<sup>2</sup>

<sup>1</sup>西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; <sup>2</sup>中国科学院 光电技术研究所, 四川 成都 610209

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 评估光电系统点目标成像性能或激光远场效果时,通常采用斯特雷尔比作为评估基准,且在工程应用通常采用其近似方法作为分析手段。为更好地分析近似方法的应用范围,有效地指导工程应用,开展了斯特雷尔比近似方法应用极限研究。对常用三种斯特雷尔比近似方法进行了理论推导,给出了其理论基础;依据斯特雷尔比理论,建立了实际像差条件下的斯特雷尔比理论分析方法;从成像评价角度对斯特雷尔比近似方法及其与实际像差斯特雷尔比方法进行了仿真对比分析。结果表明:在波前相位误差小于  $0.1\lambda$  下,近似方法一和近似方法二与近似方法三的误差在 10% 以内;在遮拦比为 0.3、实际像差为球差及相对实际像差斯特雷尔比相对误差优于 10% 条件下,应用近似方法一时波前相位误差方差需小于  $0.13\lambda$ ,应用近似方法二时波前相位误差方差约小于  $0.1\lambda$ ,应用近似方法三时波前相位误差方差需小于  $0.17\lambda$ 。结果可以给出一定斯特雷尔比相对误差条件下的近似方法应用极限,可为点目标成像性能或激光远场效果评估提供技术参考。

**关键词** 成像系统; 斯特雷尔比; 近似方法; 评估; 波前; 相位误差

**中图分类号** TN248.1; TP391.41

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.s111004

## Application Limits of the Strehl Ratio Approximations

Tan Bitao<sup>1,2,3</sup> Chen Lizhi<sup>1</sup> Chen Hongbin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, Shaanxi 710024, China

<sup>2</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** When imaging performance of optoelectronic systems to observe point targets or laser far-field effects is evaluated, Strehl ratio is usually used as evaluation criteria, and Strehl ratio is often applied in engineering applications. In order to understand the limits of application field and engineering feasibility, study on the approximate application limits is done. The three approximation ways are deduced, which can supply theoretical basis for the approximations. According to Strehl ratio theory, its accurate analysis method under actual aberration condition is obtained as well. The comparison is done between the approximations and accurate method from the view of imaging. Results show that when the wavefront phase error is smaller than  $0.1$  wavelength, the error between first approximation and second approximation with third approximation is smaller than 10%. When the obscuration ratio is 0.3 and relative error of Strehl ratio is less than 10%, the wavefront phase error variance must be less than  $0.13$  wavelength for the first approximation method, the wavefront phase error variance must be less than  $0.1$  wavelength for the second approximation method, and the wavefront phase error variance must be less than  $0.17$  wavelength for the third approximation method. The research can apply Strehl ratio approximations under certain relative error conditions, which can provide technical reference for imaging performance or far-field laser effects assessment.

**Key words** image systems; Strehl ratio; approximation; evaluation; wavefront; phase error

**OCIS codes** 110.2960; 140.3295; 120.1880

**收稿日期:** 2015-01-14; **收到修改稿日期:** 2015-03-10

**基金项目:** 国家 863 计划(2012AA8083027)

**作者简介:** 谭碧涛(1983—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事光电探测跟踪技术方面的研究。

E-mail: tanbitao@aliyun.com

**导师简介:** 陈洪斌(1953—),男,研究员,博士生导师,主要从事光学和光束控制技术等方面的研究。

E-mail: chbin@ioe.ac.cn

## 1 引 言

当不存在大气影响时,成像光束到达光电系统入瞳处(或激光束到达远场预定位置处)的波前分布将是一平面。理想平面波经过光电系统后,将在焦平面得到衍射极限点扩展函数。但在实际工作条件下,传播过程中存在的大气湍流将导致折射率的起伏,进而改变每一区域的波前。光电系统所成的像(激光远场光斑)将不会是一个理想的衍射点像,将是一个干涉的像。当光电系统的口径不大时,目标距离较远,其所成像为点目标像,激光远场光斑也为一个弥散的点光斑。对于类似点像条件下的成像性能与激光远场效果评估时,通常可以采用斯特雷尔比来进行,且在工程应用中,常常采用其近似方法来进行分析<sup>[1-10]</sup>。常用斯特雷尔比近似方法有三种,三种近似方法在工程应用中较多,但对其理论基础及应用极限的理论研究还较少<sup>[11-14]</sup>,为此,本文开展了斯特雷尔比近似方法应用极限研究。对常用三种斯特雷尔比近似方法进行了理论推导,给出了其理论基础;依据斯特雷尔比理论,建立实际像差条件下的斯特雷尔比理论分析方法;从成像角度对斯特雷尔比近似方法及其与实际斯特雷尔比方法进行了仿真比对分析。

## 2 斯特雷尔比理论

一个完美的光波波前光束在像焦平面上的强度分布为其衍射极限,当口径为圆孔时,其衍射极限强度分布为 $[2J_1(x)/x]^2$ ,其中 $J_1$ 为第一类贝塞尔函数。当存在一定的像差,即波前误差时,相应焦平面上的强度分布将发生变化。像差较小时,峰值强度减小,光能扩散范围增大;像差较大时,焦平面上的强度分布结构将发生变化,成一弥散严重像。

假设某球面波在 $A$ 点存在波前误差 $\Phi(\rho)$ ,则存在波前误差的光波可表示为<sup>[5]</sup>

$$U(\rho) = A(\rho) \exp[i\Phi(\rho)], \quad (1)$$

假设 $U(\rho)$ 代表入瞳处的光波振幅,光束波长为 $\lambda$ ,光束传输过程为夫琅禾费衍射近似,在距离入瞳 $z$ 处平面的光为

$$U(r; z) = \frac{\exp[ik(\rho^2 + r^2)/(2z)]}{i\lambda z} \int U(\rho) \exp(-ik\rho \cdot r/z) d\rho, \quad (2)$$

式中 $k$ 为光波波数, $k = 2\pi/\lambda$ 。

光强分布为振幅分布的平方,则在 $z = R$ 焦平面处,其光强分布为

$$I(r; R) = |U(r; R)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| \int A(\rho) \exp[i\Phi(\rho)] \exp[-ikr \cdot \rho/R] d\rho \right|^2. \quad (3)$$

相应光轴上的强度分布为

$$I(0; R) = |U(0; R)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| \int A(\rho) \exp[i\Phi(\rho)] d\rho \right|^2, \quad (4)$$

如果光束不存在波前误差,则

$$I_0(r; R) = |U_0(r; R)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| \int A(\rho) \exp[-ikr \cdot \rho/R] d\rho \right|^2, \quad (5)$$

相应光轴上的强度分布为

$$I_0(0; R) = |U_0(0; R)|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| \int A(\rho) d\rho \right|^2. \quad (6)$$

定义斯特雷尔比为实际峰值强度与衍射极限峰值强度之比,即

$$S = \frac{I(0, R)}{I_0(0, R)} = \left| \int A(\rho) \exp[i\Phi(\rho)] d\rho \right| / \left| \int A(\rho) d\rho \right|^2. \quad (7)$$

## 3 斯特雷尔比近似方法理论

对于斯特雷尔比的工程应用,通常存在三种近似分析方法,分别为<sup>[12]</sup>

$$S_1 = (1 - \sigma_\Phi^2/2)^2, \quad (8)$$

$$S_2 = 1 - \sigma_\Phi^2, \quad (9)$$

$$S_3 = \exp(-\sigma_\Phi^2), \quad (10)$$

式中  $\sigma_{\Phi}^2$  为波前相位误差的方差。

### 3.1 近似方法-理论

根据斯特雷尔比的定义(7)式,可将其转换为

$$S = |\langle \exp(i\Phi) \rangle|^2, \quad (11)$$

式中  $\langle f \rangle = \int A(\rho) f(\rho) d\rho / \int A(\rho) d\rho$ .

考虑平均位相像差  $\langle \Phi \rangle$  独立于积分因子  $\rho$ , (11) 式也可写为

$$S = |\langle \exp[i(\Phi - \langle \Phi \rangle)] \rangle|^2. \quad (12)$$

对(12)式复数做余弦与正弦展开,可得

$$S = \langle \cos(\Phi - \langle \Phi \rangle) \rangle^2 + \langle \sin(\Phi - \langle \Phi \rangle) \rangle^2. \quad (13)$$

忽略正弦项,可得

$$S \geq \langle \cos(\Phi - \langle \Phi \rangle) \rangle^2. \quad (14)$$

对(14)式余弦进行麦克劳林级数展开,保留前两项,可得

$$\begin{aligned} S &\approx \langle 1 - \frac{1}{2}[(\Phi - \langle \Phi \rangle)]^2 + \dots \rangle^2 \approx \langle 1 - \frac{1}{2}[\Phi^2 - 2\Phi\langle \Phi \rangle + \langle \Phi \rangle^2] \rangle^2 \approx \\ &\langle 1 - \frac{1}{2}[\bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_1^2] \rangle^2 \approx (1 - \frac{1}{2}\sigma_{\Phi}^2)^2. \end{aligned} \quad (15)$$

### 3.2 近似方法二理论

在斯特雷尔比定义(7)式中,假定焦面上的波前振幅为恒定的,即为点目标与圆孔径条件下。远距离成像条件下,点目标通过圆孔径后其振幅为恒定,为此(7)式可改为

$$S = \left| \frac{\int A(\rho) \exp[i\Phi(\rho)] d\rho}{\int A(\rho) d\rho} \right|^2 = \left| \frac{1}{A} \int \exp[i\Phi(\rho)] d\rho \right|^2. \quad (16)$$

对(16)式中的波前误差函数用麦克劳林级数进行展开,可以得到

$$S = \left| \frac{1}{A} \int \left\{ 1 + i\Phi(\rho) + \frac{1}{2}[i\Phi(\rho)]^2 + \dots \right\} d\rho \right|^2. \quad (17)$$

考虑波前误差较小,在(17)式中的展开项的三次方及以上可以忽略。

定义函数

$$\bar{\Phi}_n = \int \Phi^n(\rho) d\rho / \left( \int d\rho \right). \quad (18)$$

将(18)式代入(17)式中,可得

$$\begin{aligned} S &= \left| \frac{1}{A} \int \left\{ 1 + i\Phi(\rho) + \frac{1}{2}[i\Phi(\rho)]^2 + \dots \right\} d\rho \right|^2 = \left| 1 + i\bar{\Phi}_1 - \frac{1}{2}\bar{\Phi}_2 \right|^2 = \\ &\bar{\Phi}_1^2 + \left( 1 - \frac{1}{2}\bar{\Phi}_2 \right)^2 \approx \bar{\Phi}_1^2 + 1 - \bar{\Phi}_2 + \dots \approx 1 - (\bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_1^2) + \dots. \end{aligned} \quad (19)$$

(19)式中的最后项即为波前误差的均方差为

$$\Delta\Phi_{\text{RMS}}^2 = \sigma^2 = \frac{1}{A} \int (\Phi - \bar{\Phi}_1)^2 dA = \frac{1}{A} \left( \int \Phi^2 dA - 2\bar{\Phi}_1 \int \Phi dA + \bar{\Phi}_1^2 \int dA \right) = \bar{\Phi}_2 - 2\bar{\Phi}_1^2 + \bar{\Phi}_1^2 = \bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_1^2. \quad (20)$$

将(20)式代入(19)式中即可得到第二种近似计算方法的表达式为

$$S \approx 1 - (\bar{\Phi}_2 - \bar{\Phi}_1^2) = 1 - \Delta\Phi_{\text{RMS}}^2 = 1 - \sigma_{\Phi}^2. \quad (21)$$

### 3.3 近似方法三理论

从斯特雷尔比定义(9)式可以看出,在对斯特雷尔比函数进行理论推导时,不需假定一定的口径或分布模式。只需定义波前相位误差可以通过概率密度分布函数  $P_{\text{df}}$  来表达,存在一个均方值与一个期望值。对于具有随机量  $\xi$  的函数  $g[f(\xi)]$  的期望值可表达为

$$E\{g[f(\xi)]\} = \int_{-\infty}^{\infty} g(\xi) P_{\text{df}}(\xi) d\xi. \quad (22)$$

定义在直角坐标系中任意光束分布为  $E(x, y) = U(x, y)\exp[-2\pi i\Phi(x, y)]$ , 则波前相位误差  $\exp[-2\pi i\Phi(x, y)]$  的期望值为

$$E\{\exp[-2\pi i\Phi(x, y)]\} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi i\xi) P_{df}(\xi) d\xi. \quad (23)$$

结合(7)式与(23)式可以看出,分母为 1,分子可看成傅里叶积分,则(7)式可转换为

$$S = |E\{\exp[-2\pi i\Phi(x, y)]\}|^2. \quad (24)$$

对  $P_{df}(\xi)$  以均方根(RMS)值进行缩放,如  $P_{df}(\xi) \rightarrow P_{df}(\xi/\sigma) \rightarrow P_{df}(\hat{\xi})$ ,对(23)式与(24)式可转换为

$$S(\sigma) = \sigma^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-2\pi i\hat{\xi}\sigma) P_{df}(\hat{\xi}) d\hat{\xi} \right|^2 = \sigma^2 |F[P_{df}(\hat{\xi})]|^2. \quad (25)$$

从(25)式中可以看出,斯特雷尔比与  $P_{df}$  的傅里叶变换的平方成正比。 $P_{df}$  的表现形式为其归一化参数  $\hat{\xi} = \xi/\sigma$ , 并且  $P_{df}$  总的面积为 1。

假设  $P_{df}$  为高斯分布时,分布形式为  $a\exp(-b\xi^2)$ , 要求  $P_{df}$  下所围面积为 1, 可以确定其分布形式, 即

$$P_{df,gs}(\xi) = \sqrt{b/\pi} \exp(-b\xi^2). \quad (26)$$

可得相应均方根值为

$$\sigma^2 = \int \sqrt{b/\pi} \exp(-bx\xi^2) dx = \frac{1}{2b}. \quad (27)$$

归一化后的  $P_{df}(\hat{\xi})$  为

$$P_{df}(\hat{\xi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{1}{2}\hat{\xi}^2\right). \quad (28)$$

将(28)式代入(25)式中,即可得到高斯分布下的斯特雷尔比为

$$S(\sigma)_{gs} = \exp(-4\pi^2\sigma^2) = \exp(-\sigma_\Phi^2). \quad (29)$$

#### 4 实际像差条件下斯特雷尔比

以光电系统成像为例,对于存在遮拦比的光电系统来说,定义其成像遮拦比为  $\epsilon$ , 考虑光电系统对空间目标成像探测,其光束可看成均匀分布,则其振幅<sup>[13]</sup>

$$A(\rho) = \begin{cases} 1, & \epsilon \leq \rho \leq 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (30)$$

根据(7)式可以得到一定遮拦比下的斯特雷尔比为

$$S = \frac{1}{\pi^2(1-\epsilon^2)^2} \left| \int_{\epsilon}^1 \int_0^{2\pi} \exp[i\Phi(\rho, \theta)] \rho d\rho d\theta \right|^2. \quad (31)$$

存在遮拦比跟踪发射望远镜在一定像差  $\Phi(\rho, \theta)$  下的方差为

$$\sigma_\Phi^2 = \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)} \int_{\epsilon}^1 \int_0^{2\pi} \Phi^2(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta - \left[ \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)} \int_{\epsilon}^1 \int_0^{2\pi} \Phi(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta \right]^2. \quad (32)$$

不同像差  $\Phi(\rho, \theta)$  的表现形式为已知的,将  $\Phi(\rho, \theta)$  代入(32)式中即可得到具体像差下的实际斯特雷尔比。以球差为例,当存在球差时,球差可表示为

$$\Phi(\rho, \theta) = A_s \rho^4, \quad (33)$$

式中  $\epsilon \leq \rho \leq 1, 0 < \theta \leq 2\pi$ 。

跟踪发射望远镜只存在球差时,其斯特雷尔比为

$$S_s = \frac{1}{\pi^2(1-\epsilon^2)^2} \left| \int_{\epsilon}^1 \int_0^{2\pi} \exp(iA_s \rho^4) \rho d\rho d\theta \right|^2. \quad (34)$$

利用欧拉公式对  $\exp(iA_s \rho^4)$  展开,同时完成对  $\theta$  求定积分,可得

$$S_s = \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)^2} \left| \int_{\epsilon}^1 [\cos(A_s \rho^4) + i\sin(A_s \rho^4)] d\rho \right|^2. \quad (35)$$

可得

$$S_s = \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)^2} \left| \int_0^1 \cos(A_s \rho^4) d\rho^2 - \int_0^\epsilon \cos(A_s \rho^4) d\rho^2 + i \left[ \int_0^1 \sin(A_s \rho^4) d\rho^2 - \int_0^\epsilon \sin(A_s \rho^4) d\rho^2 \right] \right|^2. \quad (36)$$

对(36)式进行变换,可得

$$S_s = [\pi/2A_s(1-\epsilon^2)^2] \times \{C[(2A_s/\pi)^{1/2}] - C[(2A_s/\pi)^{1/2}\epsilon^2]\}^2 + \{S[(2A_s/\pi)^{1/2}] - S[(2A_s/\pi)^{1/2}\epsilon^2]\}^2, \quad (37)$$

式中  $C(a) = \int_0^a \cos(\pi x^2/2) dx$ ,  $S(a) = \int_0^a \sin(\pi x^2/2) dx$ .

跟踪发射望远镜存在球差时,其对应的像差方差为

$$\sigma_{\Phi_s}^2 = \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)^2} \left[ \int_{\epsilon^2}^1 A_s^2 \rho^9 d\rho d\theta - \left[ \frac{1}{\pi(1-\epsilon^2)^2} \int_{\epsilon^2}^1 A_s \rho^5 d\rho d\theta \right]^2 \right]. \quad (38)$$

对(38)式进行定积分求解,可得

$$\sigma_{\Phi_s}^2 = A_s^2 \frac{1-\epsilon^{10}}{5(1-\epsilon^2)} - \left[ A_s \frac{1-\epsilon^6}{3(1-\epsilon^2)} \right]^2. \quad (39)$$

对(39)式进行分解,可得

$$\sigma_{\Phi_s}^2 = (1/2\sqrt{5})(4-\epsilon^2-6\epsilon^4-\epsilon^6+4\epsilon^8)^{1/2} A_s. \quad (40)$$

如对球差进行补偿,可提高其成像性能。对于球差的补偿,可直接采用增加一定的离焦量进行补偿,根据理论分析,在一定的遮拦比下球差补偿形式为<sup>[13]</sup>

$$\Phi(\rho, \theta)_{bc} = A_s [\rho^4 - (1+\epsilon^2)\rho^2]. \quad (41)$$

可以得到相应球差补偿条件下的斯特雷尔比为

$$S_s = [2\pi/A_s(1-\epsilon^2)^2] \times \{C^2\{[A_s/(2\pi)]^{1/2}(1-\epsilon^2)\} + S\{[A_s/(2\pi)]^{1/2}(1-\epsilon^2)\}\}. \quad (42)$$

相应的像差方差为

$$\sigma_{\Phi_s}^2 = (1/6\sqrt{5})(1-\epsilon^2)^2 A_s. \quad (43)$$

## 5 仿真比对分析

### 5.1 三种近似方法比对分析

不同波前相位误差下的三种近似方法下的斯特雷尔比如图 1 所示,图 1(a)分别给出了三种近似方法在不同相位误差下的斯特雷尔比,图 1(b)给出了三种近似方法的比对误差,分别为近似方法一和近似方法二与近似方法三之间的比对,给出了不同相位误差分布下的斯特雷尔比相对误差。可以看出,三种方法在波前相位差较小时,基本相同,随着波前相位误差的增大,近似方法二偏离较大,其次为近似方法一。从图 1(b)

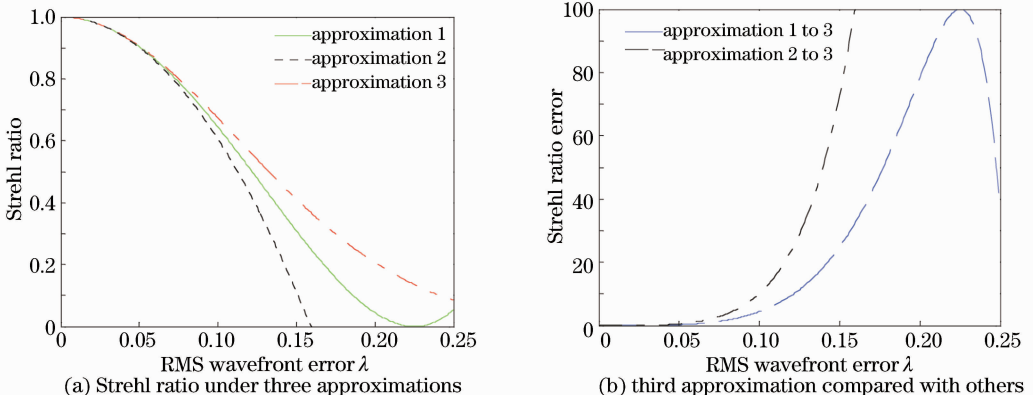


图 1 三种近似方法斯特雷尔比

Fig. 1 Strehl ratio under three approximations

可以看出,在波前相位误差小于  $0.1\lambda$  下,近似方法一和近似方法二与近似方法三的误差在 10% 以内。

### 5.2 三种近似方法与实际像差方法比对分析

在对实际像差条件下的斯特雷尔比推导时,同时推导给出了相应波前相位误差下的方差,结合方差可以实现对三种近似条件下斯特雷尔比的分析。为此,对三种近似条件下以及实际球差与球差补偿条件下的斯特雷尔比进行了仿真分析,分析结果见图 2。从图 2 可以看出,三种近似方法与实际球差下的斯特雷尔比还是存在较大误差,尤其是近似方法二,在波前相位误差的方差超过  $0.15\lambda$  后,其所计算得到的系统斯特雷尔比趋于负值;近似方法一在波前相位误差约  $0.22\lambda$  处为 0,然后再反弹向上;近似方法三在波前相位误差方差超过  $0.25\lambda$  后开始偏离实际误差斯特雷尔比值。

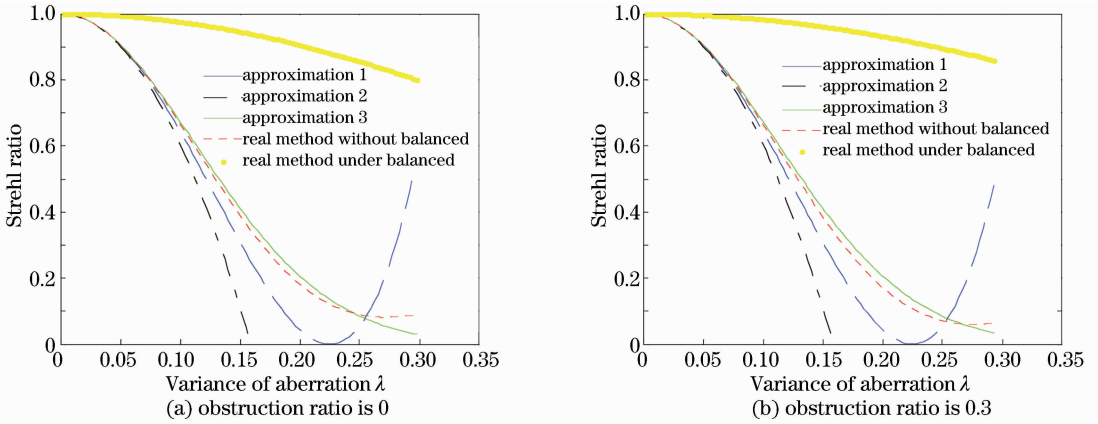


图 2 三种近似条件及实际条件下斯特雷尔比

Fig. 2 Strehl ratio under three approximations and actual conditions

三种近似方法与实际球差相对误差见图 3。图 3(a)、(c)为无遮拦比条件下的比对结果,图 3(b)、(d)为遮拦比为 0.3 条件下的比对结果。从图 3(a)、(b)可以看出,以斯特雷尔比相对误差 10% 为例,在存在球差条件下,无遮拦条件下,近似方法一斯特雷尔比约大于 0.5,其误差小于 10%;近似方法二斯特雷尔比约大于

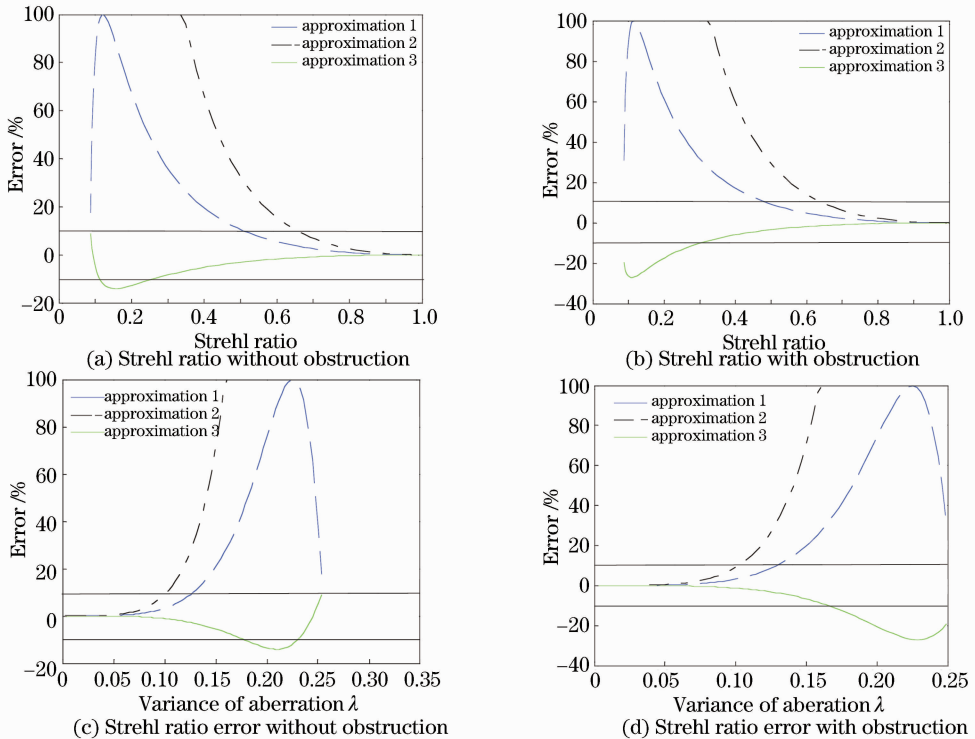


图 3 三种近似方法与实际条件下比对

Fig. 3 Strehl ratio compared three approximations with actual conditions

0.65,其误差小于10%;近似方法三斯特雷尔比约大于0.25,其误差小于10%。遮拦比为0.3条件下,近似方法一斯特雷尔比约大于0.45,其误差小于10%;近似方法二斯特雷尔比约大于0.65,其误差小于10%;近似方法三斯特雷尔比约大于0.3,其误差小于10%。从图3(c)、图3(d)可以看出,以斯特雷尔比相对误差10%为例,在存在球差条件下,无遮拦条件下,近似方法一在波前相位误差方差约小于 $0.13\lambda$ ,其误差小于10%;近似方法二在波前相位误差方差约小于 $0.1\lambda$ ,其误差小于10%;近似方法三在波前相位误差方差约小于 $0.18\lambda$ ,其误差小于10%。遮拦比为0.3条件下,近似方法一在波前相位误差方差约小于 $0.13\lambda$ ,其误差小于10%;近似方法二在波前相位误差方差约小于 $0.1\lambda$ ,其误差小于10%;近似方法三在波前相位误差方差约小于 $0.17\lambda$ ,其误差小于10%。

## 6 结 论

针对工程应用常用三种斯特雷尔比近似方法的应用极限开展了研究,给出了三种近似方法的理论基础,并建立了实际像差条件下的斯特雷尔比理论分析方法;从成像角度对斯特雷尔比近似方法及其与实际斯特雷尔比方法进行了仿真对比分析,结果表明,三种近似方法只适用于波前相位误差方差较小条件下,当波前相位误差较大时,三种近似方法与实际球差下的斯特雷尔比存在较大误差,尤其是近似方法二,在波前相位误差的方差超过 $0.15\lambda$ 后,其所得到的系统斯特雷尔比趋于负值。在波前相位误差小于 $0.1\lambda$ ,近似方法一和近似方法二与近似方法三的误差在10%以内;遮拦比为0.3条件下,近似方法一斯特雷尔比约大于0.45时,其误差小于10%;近似方法二斯特雷尔比约大于0.65时,其误差小于10%;近似方法三斯特雷尔比约大于0.3时,其误差小于10%;当波前相位误差方差小于 $0.13\lambda$ 时,近似方法一斯特雷尔比相对误差优于10%;当波前相位误差方差小于 $0.1\lambda$ 时,近似方法二斯特雷尔比相对误差优于10%;当波前相位误差方差小于 $0.17\lambda$ 时,近似方法三斯特雷尔比相对误差优于10%。研究成果可以给出一定斯特雷尔比相对误差条件下的近似方法应用极限,可为成像性能或激光远场效果评估提供技术参考。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643—1653.
- 2 冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643—1653.
- 3 Zhang Yu, Luo Xiujuan, Xia Aili, *et al.*. Image quality evaluation and analysis in Fourier telescope for laboratory demonstration[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(3): 0311001.
- 4 张 羽, 罗秀娟, 夏爱利, 等. 傅里叶望远镜成像质量分析与评价[J]. 光子学报, 2013, 43(3): 0311001.
- 5 Zhou Renzhong, Yan Jixiang. Theory of Adaptive Optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996.
- 6 周仁忠, 阎吉祥. 自适应光学理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- 7 Tyson R. Principles of Adaptive Optics[M]. CRC Press, 2010.
- 8 Roberts Jr L C, Perrin M D, Marchis F, *et al.*. Is that really your Strehl ratio? [C]. Astronomical Telescopes and Instrumentation, International Society for Optics and Photonics, 2004: 504—515.
- 9 Andrews L C, Phillips R L, Sasiela R J, *et al.*. Strehl ratio and scintillation theory for uplink Gaussian-beam waves: beam wander effects [J]. Opt Eng, 2006, 45(7): 076001.
- 10 Sasiela R J. Strehl ratios with various types of anisoplanatism[J]. J Opt Soc Am A, 1992, 9(8): 1398—1405.
- 11 Rousset G, Fontanella J C, Kern P, *et al.*. First diffraction-limited astronomical images with adaptive optics [J]. Astronomy and Astrophysics, 1990, 230(2): L29—L32.
- 12 Sheppard C J R. Maréchal condition and the effect of aberrations on Strehl intensity[J]. Opt Lett, 2014, 39(8): 2354—2357.
- 13 Perrin M D, Sivaramakrishnan A, Makidon R B, *et al.*. The structure of high Strehl ratio point-spread functions[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 596(1): 702—712.
- 14 Herrmann J. Phase variance and Strehl ratio in adaptive optics[J]. J Opt Soc Am A, 1992, 9(12): 2257—2258.
- 15 Ross T S. Limitations and applicability of the Maréchal approximation[J]. Appl Opt, 2009, 48(10): 1812—1818.
- 16 Mahajan V N. Strehl ratio for primary aberrations in terms of their aberration variance[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73(6): 860—861.
- 17 Mahajan V N. Strehl ratio for primary aberrations: some analytical results for circular and annular pupils[J]. J Opt Soc Am, 1982, 72(9): 1258—1266.