



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103006177 B

(45) 授权公告日 2014. 11. 05

(21) 申请号 201210558520. 5

(22) 申请日 2012. 12. 20

(73) 专利权人 南京航空航天大学
地址 210016 江苏省南京市白下区御道街
29 号

(72) 发明人 沈建新 钮赛赛 梁春

(74) 专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 许方

(51) Int. Cl.
A61B 3/14 (2006. 01)

审查员 孙颖

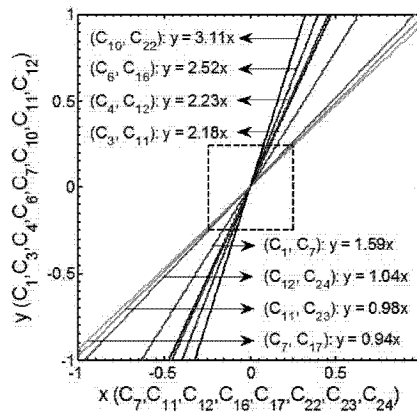
权利要求书1页 说明书5页 附图8页

(54) 发明名称

基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法,首先根据 Zernike 模式各项在单位圆以及同心光瞳圆域内的相关性矩阵构建了 Zernike 模式组合模型,再根据模式组合前后波前像差 RMS 值的降幅比参数确定了组合模型近似满足共轭条件的系数分配关系,即 Zernike 模式共轭组合模型,同时通过光学质量客观评价参数、MTF 函数、光学系统模拟成像等方法验证了 Zernike 模式共轭组合模型对光学质量的提升能力。



1. 一种基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法,其特征在于,包括以下步骤:
 步骤一、在单位圆的同心孔径圆域内,利用 Zernike 模式相关矩阵 P 确定 Zernike 模式共轭组合模型中的两个 Zernike 模式项,即 C_n^m 和 C_{n+2}^m ,其中 n 是阶数, $n \geq 1$, m 是方位角频率,满足 $|m| \leq n$,且 m+n 是偶数,其中 Zernike 模式相关矩阵 P 如下:

$$P_{i,j} = \frac{1}{\pi} \int_0^\omega \int_0^{2\pi} N_i \cdot Z_i(\rho, \theta) \cdot N_j \cdot Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta$$

式中, $P_{i,j}$ 是第 i 项和第 j 项 Zernike 模式的相关系数,当 $P_{i,j} = 0$ 时,表示模式间不相关, $P_{i,j} > 0$ 时,表示模式间正相关, $P_{i,j} < 0$ 时,表示模式间负相关; $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq \rho \leq \omega$, $0 \leq \omega < 1$, θ 为极角, ρ 为极半径, ω 为同心圆半径; N_i 和 $Z_i(\rho, \theta)$ 分别是第 i 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式, N_j 和 $Z_j(\rho, \theta)$ 分别是第 j 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式;

步骤二、确定 Zernike 模式共轭组合模型中两个 Zernike 模式项 C_n^m 和 C_{n+2}^m 之间的比例系数,具体为:

(2-1)、设置 Zernike 模式像差波前重建区域直径为 6mm,即同心光瞳直径 p 范围为 0-6mm;

(2-2) 结合 Zernike 模式项组合前单独作用时的波前像差 RMS 值和组合后的波前像差 RMS 值来确定在同心光瞳区域内的 RMS 值降幅比参数 R_{RMS}^p ,公式如下:

$$R_{RMS}^p = \begin{cases} 1 - \frac{RMS_{ij}^p}{\min\{RMS_i^p, RMS_j^p\}}, & \text{if } RMS_{ij}^p < \min\{RMS_i^p, RMS_j^p\} \\ 0, & \text{if other} \end{cases}$$

式中, p 是同心光瞳直径, RMS_i^p 、 RMS_j^p 分别是组合前两个 Zernike 模式项单独作用时的波前像差 RMS 值, RMS_{ij}^p 是组合后波前像差的 RMS 值, R_{RMS}^p 值越大表明像差组合后在直径为 p 的光瞳区域内像差改善程度越高;

(2-3) 构建相同同心瞳孔直径内的 RMS 值降幅比参数矩阵图,利用色块表示 R_{RMS}^p 值的大小,色块越暗表示 R_{RMS}^p 值越大,对应系数的组合模型共轭性越强;

步骤三、利用 Zernike 模式共轭组合模型对人眼像差进行补偿,具体如下:

(3-1)、根据待校正的人眼像差中的高阶像差选择其对应的共轭组合模型,确定组合模型中两项 Zernike 模式项之间满足共轭条件的系数;

(3-2)、通过变形镜产生一个共轭组合模型中的低阶像差,再与待校正的人眼像差中的高阶像差共同作用,达到像差补偿校正的效果。

2. 根据权利要求 1 所述的基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法,其特征在于,所述 (2-2) 中的同心光瞳直径 $p = 4\text{mm}$ 。

基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法

技术领域

[0001] 本发明属于像差校正技术领域,更具体的说是一种基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法。

背景技术

[0002] 人眼像差的存在不仅降低了人眼的视觉性能,同时也限制了对人眼内部组织结构的细微观察,自适应光学技术能很好地解决人眼像差的干扰问题。随着自适应光学技术、像差校正理论的快速发展,对人眼像差研究也日趋深入。当前描述人眼波前像差最常用的方法是归一化的 Zernike 多项式,它已成为表述人眼波前像差的标准,其优点是每个多项式的系数能表示波前像差的均方根值。

[0003] 像差在空间域内的完全补偿和在时间域内的实时补偿是自适应光学所要解决的主要问题。因此,对像差模式本身的研究,尤其是像差模式之间的相互作用,也将逐渐成为研究热点。Thibos 通过统计的方法确定了人眼 Zernike 模式像差间具有相关性,并认为这些相关性会影响光学质量。Applegate 等人通过基于视锐度实验测定的方法研究了第 2 阶与第 4 阶像差之间的相互作用,结果表明视锐度的变化与组合像差的类型和大小有关。方利华等人基于人眼光学质量客观评估的方法,分析了球差和离焦的补偿关系、总像差 RMS 值在一定条件下像差组合对光学质量的影响,表明组合的比例关系对光学质量影响差异较大。此外 McLellan 等人基于 MTF 对人眼高阶像差组合、对彩色和单色像差组合进行了研究。de Gracia 等人在像差控制条件下对受试者采用计算机模拟光学质量和视锐度测定的方法研究散光和彗差的相互作用,结果显示相互作用后的各评价参数都能得到提高。

[0004] 但是,国内外学者至今未给出比较全面的 Zernike 模式组合模型,在该方向的研究应当从 Zernike 模式相关性、模式波前像差、光学质量评价以及模拟光学成像等方面进行综合讨论,最终给出 Zernike 模式组合模型,包括模式类型和比例系数。充分利用该模型,使得校正能力有限的变形镜对高阶像差校正成为可能。

发明内容

[0005] 本发明解决的技术问题是提供可以在一定光瞳区域内达到提高系统光学质量的要求同时也提高变形镜的空间补偿能力的基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明一种基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一、在单位圆的同心孔径圆域内,利用 Zernike 模式相关矩阵 P 确定 Zernike 模式共轭组合模型中的两个 Zernike 模式项,即 C_n^m 和 C_{n+2}^m , $n \geq 1$, 其中 Zernike 模式相关矩阵 P 如下:

$$[0008] \quad P_{i,j} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} \int_0^{2\pi} N_i \cdot Z_i(\rho, \theta) \cdot N_j \cdot Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta$$

[0009] 式中, $P_{i,j}$ 是第 i 项和第 j 项 Zernike 模式的相关系数, 当 $P_{i,j}=0$ 时, 表示模式间不相关, $P_{i,j}>0$ 时, 表示模式间正相关, $P_{i,j}<0$ 时, 表示模式间负相关; $0 \leq \theta \leq 2\pi$, $0 \leq \rho \leq \omega$, $0 \leq \omega < 1$ θ 为极角, ρ 为极半径, ω 为同心圆半径; N_i 和 $Z_i(\rho, \theta)$ 分别是第 i 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式; N_j 和 $Z_j(\rho, \theta)$ 分别是第 j 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式;

[0010] 步骤二、确定 Zernike 模式共轭组合模型中两个 Zernike 模式项之间的比例系数;

[0011] 步骤三、利用 Zernike 模式共轭组合模型对人眼像差进行补偿, 具体如下:

[0012] (3-1)、根据待校正的人眼像差中的高阶像差选择其对应的共轭组合模型, 确定组合模型中两项 Zernike 模式项之间满足共轭条件的系数;

[0013] (3-2)、通过变形镜产生一个共轭组合模型中的低阶像差, 再与待校正的人眼像差中的高阶像差共同作用, 达到像差补偿校正的效果。

[0014] 本发明与现有技术相比具有以下显著的进步: 克服了传统的像差校正过程中, 由于高阶像差具有很高的空间复杂性, 普通的变形镜很难满足空间补偿要求, 甚至还会影响其他像差项的补偿校正的缺陷, 本发明利用共轭组合模型中的低阶像差与高阶像差的比例关系进行像差补偿, 可提高波前校正器的空间补偿能力, 从而为人眼像差校正理论开辟新的方法。

[0015] 下面结合附图和具体实施方式对本发明作进一步详细的描述;

附图说明

[0016] 图 1 (a)-图 1 (f) 分别为 Zernike 模式在 $\omega=1$ 、 $\omega=0.9$ 、 $\omega=0.7$ 、 $\omega=0.5$ 、 $\omega=0.3$ 、 $\omega=0.1$ 的同心孔径圆域内的矩阵图;

[0017] 图 2 (a) Zernike 模式项 C1 和 Zernike 模式项 C7 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0018] 图 2 (b) Zernike 模式项 C3 和 Zernike 模式项 C11 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0019] 图 2 (c) Zernike 模式项 C4 和 Zernike 模式项 C12 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0020] 图 2 (d) Zernike 模式项 C6 和 Zernike 模式项 C16 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0021] 图 2 (e) Zernike 模式项 C7 和 Zernike 模式项 C17 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0022] 图 2 (f) Zernike 模式项 C10 和 Zernike 模式项 C22 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0023] 图 2 (g) Zernike 模式项 C11 和 Zernike 模式项 C23 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0024] 图 2 (h) Zernike 模式项 C12 和 Zernike 模式项 C24 组合前后的像差 RMS 与光瞳直径之间的关系图;

[0025] 图 3 (a)-图 3 (h) 分别为在同心光瞳直径 $p=4\text{mm}$ 下, C1-C7 组合模型、C3-C11 组

合模型、C4-C12 组合模型、C6-C16 组合模型、C7-C17 组合模型、C10-C22 组合模型、C11-C23 组合模型、C12-C24 组合模型在不同组合系数下的 RMS 值降幅比矩阵图；

[0026] 图 4 为 Zernike 模式共轭组合模型组合系数的最优线性关系图；

[0027] 图 5 (a) - 图 5 (h) 分别为 C1-C7 组合模型、C3-C11 组合模型、C4-C12 组合模型、C6-C16 组合模型、C7-C17 组合模型、C10-C22 组合模型、C11-C23 组合模型、C12-C24 组合模型组合前后的光学质量评价参数 PFWc 值、SRX 值和 AreaMTF 值比较图；

[0028] 图 6 (a)、图 6 (b) 为光瞳直径分别为 6mm、4mm，C4-C12 组合模型组合前后像差在波前重建区域内的 MTF 值分布图；

[0029] 图 7 (a) - 图 7 (e) 为共轭组合模型中 Zernike 模式项单独作用和组合后光学系统对视标“E”的模拟成像结果图。

具体实施方式

[0030] 本发明一种基于 Zernike 共轭组合模型的人眼像差补偿方法，包括以下步骤：

[0031] 步骤一、在单位圆的同心孔径圆域内，利用 Zernike 模式相关矩阵 P 确定 Zernike 模式共轭组合模型中的两个 Zernike 模式项，即 C_n^m 和 C_{n+2}^m ， $n \geq 1$ ，其中 Zernike 模式相关矩阵 P 如下：

$$[0032] \quad P_{i,j} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega} \int_0^{2\pi} N_i \cdot Z_i(\rho, \theta) \cdot N_j \cdot Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta$$

[0033] 式中， $P_{i,j}$ 是第 i 项和第 j 项 Zernike 模式的相关系数，当 $P_{i,j}=0$ 时，表示模式间不相关， $P_{i,j}>0$ 时，表示模式间正相关， $P_{i,j}<0$ 时，表示模式间负相关； $0 \leq \theta \leq 2\pi$ ， $0 \leq \rho \leq \omega$ ， $0 \leq \omega < 1$ θ 为极角， ρ 为极半径， ω 为同心圆半径； N_i 和 $Z_i(\rho, \theta)$ 分别是第 i 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式， N_j 和 $Z_j(\rho, \theta)$ 分别是第 j 项标准化因子和 Zernike 多项式极坐标表达式；

[0034] 步骤二、确定 Zernike 模式共轭组合模型中两个 Zernike 模式项之间的比例系数，具体为：

[0035] (2-1)、设置 Zernike 模式像差波前重建区域直径为 6mm，即同心光瞳直径 p 范围为 0-6mm；

[0036] (2-2) 结合 Zernike 模式项组合前单独作用时的波前像差 RMS 值和组合后的波前像差 RMS 值来确定在同心光瞳区域内的 RMS 值降幅比参数 R_{RMS}^p ，公式如下：

$$[0037] \quad R_{RMS}^p = \begin{cases} 1 - \frac{RMS_{ij}^p}{\min\{RMS_i^p, RMS_j^p\}}, & \text{if } RMS_{ij}^p < \min\{RMS_i^p, RMS_j^p\} \\ 0, & \text{if other} \end{cases}$$

[0038] 式中，p 是同心光瞳直径， RMS_i^p 、 RMS_j^p 分别是组合前两个 Zernike 模式项单独作用时的波前像差 RMS 值， RMS_{ij}^p 是组合后波前像差的 RMS 值， R_{RMS}^p 值越大表明像差组合后在直径为 p 的光瞳区域内像差改善程度越高，其中 p=4mm；

[0039] (2-3) 构建相同同心瞳孔直径内的 RMS 值降幅比参数矩阵图，利用色块表示 R_{RMS}^p 值的大小，色块越暗表示 R_{RMS}^p 值越大，对应系数的组合模型共轭性越强。

[0040] 步骤三、利用 Zernike 模式共轭组合模型对人眼像差进行补偿，具体如下：

[0041] (3-1)、根据待校正的人眼像差中的高阶像差选择其对应的共轭组合模型，确定组

合模型中两项 Zernike 模式项之间满足共轭条件的系数；

[0042] (3-2)、通过变形镜产生一个共轭组合模型中的低阶像差,再与待校正的人眼像差中的高阶像差共同作用,达到像差补偿校正的效果。

[0043] 根据 Zernike 多项式的定义,带有标准化因子的 Zernike 多项式(除平移项)各项之间在单位圆域($0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \rho \leq 1$)内具有正交性,即:

$$[0044] \quad \frac{1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} N_i \cdot Z_i(\rho, \theta) \cdot N_j \cdot Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta = \begin{cases} 0, & \text{if } (i \neq j) \\ 1, & \text{if } (i = j) \end{cases}$$

[0045] 其中 N_i 和 $Z_i(\rho, \theta)$ 分别是第 i 项标准化因子和 Zernike 多项式表达式。但是在单位圆的同心孔径圆域($0 \leq \theta \leq 2\pi, 0 \leq \rho \leq \omega, 0 \leq \omega < 1$)内,各模式之间的正交性不再成立。为描述这种情况下 Zernike 各模式间的相关性,定义 Zernike 模式相关矩阵 P :

$$[0046] \quad P_{i,j} = \frac{1}{\pi} \int_0^\omega \int_0^{2\pi} N_i \cdot Z_i(\rho, \theta) \cdot N_j \cdot Z_j(\rho, \theta) \rho d\rho d\theta$$

[0047] 其中 $P_{i,j}$ 是第 i 项和第 j 项 Zernike 模式的相关系数,当 $P_{i,j}=0$ 时,表示模式间不相关, $P_{i,j}>0$ 时,表示模式间正相关, $P_{i,j}<0$ 时,表示模式间负相关,对应的相关矩阵图如图 1(a)-图 1(f)所示。根据描述的相关特性构建 Zernike 模式组合模型,即 C_n^m 和 $C_{n+2}^m, n \geq 1$ 。

[0048] 由于 Zernike 模式金字塔分布的对称性以及在下正常情况下,随着 Zernike 阶数增加,对应人眼像差占总像差的比例会越来越小,考虑 7 阶及以上的各种像差组合是没有必要的,因此只考虑 2~6 阶金字塔中心轴左侧的各种像差组合,例如 $C_2^0 (C_4)$ 和 $C_4^0 (C_{12})$ 、 $C_3^{-1} (C_7)$ 和 $C_5^{-1} (C_{17})$ 、 $C_4^{-2} (C_{11})$ 和 $C_6^{-2} (C_{23})$ 等。这些模型组合前后像差 RMS 值随同心光瞳直径变化的关系如图 2(a)-图 2(h)所示,其中 Zernike 模式像差波前重建区域直径为 6mm,评估组合特性的同心光瞳直径范围为 0-6mm。

[0049] 为进一步定量说明模式组合对像差 RMS 值的改善程度,定义 Zernike 模式组合在一定同心光瞳区域内的 RMS 值降幅比参数 R_{RMS}^p ,表达式为:

$$[0050] \quad R_{RMS}^p = \begin{cases} 1 - \frac{RMS_{ij}^p}{\min\{RMS_i^p, RMS_j^p\}}, & \text{if } RMS_{ij}^p < \min\{RMS_i^p, RMS_j^p\} \\ 0, & \text{if other} \end{cases}$$

[0051] 其中 p 是同心光瞳直径, RMS_i^p 、 RMS_j^p 分别是组合前 Zernike 模式单独作用时的波前像差 RMS 值, RMS_{ij}^p 是组合后波前像差的 RMS 值, R_{RMS}^p 值越大表明像差组合后在直径为 p 的光瞳区域内像差改善程度越高。Zernike 模式组合模型以不同系数线性组合后,在同心瞳孔直径 $p=4\text{mm}$ 内的 RMS 值降幅比参数矩阵图如图 3(a)-图 3(h)所示,图中色块越暗表明 R_{RMS}^p 值越大,对应系数的组合模型共轭特性越显著。以上结果表明了 Zernike 模式线性共轭组合模型不仅与组合像差项的类型有关,而且还和线性组合的系数符号、大小有关,即当两个像差模式项不同阶但角频率相同时,如果这两项模式组合系数符号相同而且系数大小满足一定线性分配关系,则该两项模式在一定光瞳区域内的波前像差能相互抵消,即 R_{RMS}^p 值增大。

[0052] 由此进一步可得到各组 Zernike 模式共轭组合模型组合系数的最优线性关系,如图 4 所示,当组合系数满足图中的比例关系时,模式像差的波前面形近似满足共轭条件, Zernike 模式共轭组合模型也由此得到确定。

[0053] 由于 Zernike 各项模式像差单独作用时与光学质量的关系,但是 Zernike 多项式

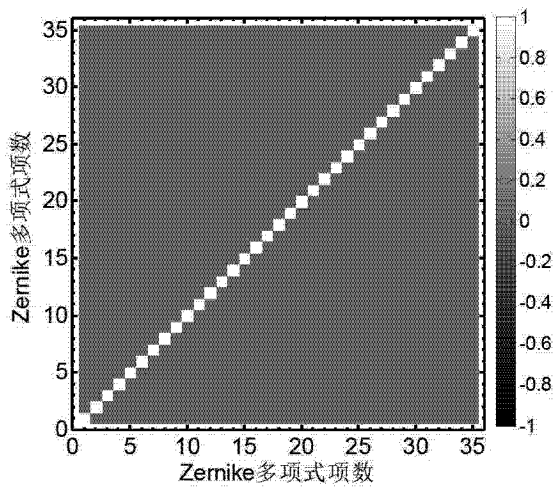
在数学意义上独立性,并不一定代表其对光学系统光学质量的影响也具有独立性。特别是对于实际情况下复杂的人眼像差,以及 Zernike 模式在不同光瞳区域内的耦合性作用,使得对光学质量的影响变得更加复杂。因此还需研究模式组合特别是 Zernike 模式共轭组合模型组合对光学质量的影响。

[0054] 根据图 4 中描述的 Zernike 模式共轭组合模型,在各组组合模型中选取一组模式系数,然后计算模式像差单独作用以及组合之后的人眼光学质量客观评价参数同心相对瞳孔平面(PFWc)值、斯特列尔比(SRX)值和调制传递函数(AreaMTF)值,其比较结果如图 5(a)–图 5(h)所示。结果表明模式像差组合后的各类光学质量评价参数都优于单独模式作用时的结果,这意味着充分利用 Zernike 模式共轭模型能改善光学系统的光学质量,但其改善程度在不同共轭模型中存在差异性,这与对波前像差的改善程度基本一致。

[0055] 同时通过光学传统函数中 MTF 函数和光学系统模拟成像进一步检验 Zernike 模式共轭组合模型对光学质量的影响。以模型中离焦 C_4 和球差 C_{12} 的组合为例,分别选择组合系数为 0.7λ 和 0.3λ ,组合前后的 MTF 值分别如图 6(a)、图 6(b)所示。其中图 6(a)图是像差组合前后在波前重建区域内(光瞳直径为 6mm)的 MTF 值分布,当空间频率为低频时,模式像差组合后的 MTF 值略低于单独模式像差作用时的 MTF 值,其主要原因是组合后整体像差变大($RMS = \sqrt{0.7^2 + 0.3^2} = 0.76\lambda$),从而削弱了对低频信息的传递能力;而空间频率为高频时,特别是在 $10\sim 30c/\text{deg}$ 频段内,像差组合后的 MTF 值明显高于单独作用时的 MTF 值,其原因是组合后同心光瞳区域内像差减小(光瞳直径为 4mm 时, $RMS=0.06\lambda$),因此会增强对高频信息传递的能力。图 6(b)图是像差组合前后在同心光瞳直径为 4mm 区域内的 MTF 值分布,可以发现组合后 MTF 值的改善状况更加明显,已十分接近衍射受限的 MTF 值,这意味着在该光束区域内具有更好的光学成像质量。

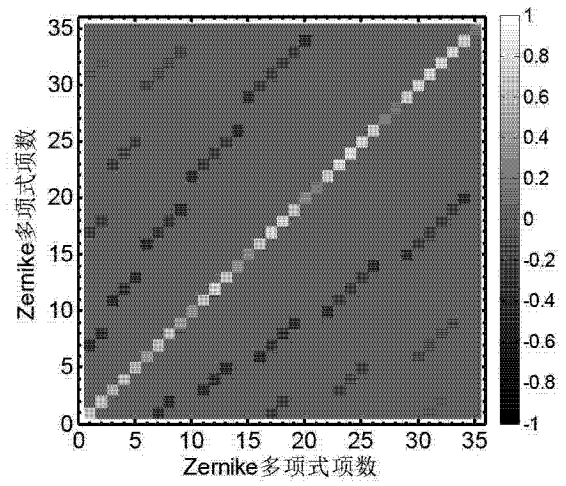
[0056] 图 7(a)–图 7(e)是共轭模型中 Zernike 模式单独作用和组合后光学系统对视标“E”的模拟成像结果,其中图 7(a)和图 7(b)是单独作用时的模拟成像,图 7(c)和图 7(d)分别是模式组合后利用光瞳直径为 6mm 和 4mm 区域内光束成像的结果,从图中可以直观地看到,模式像差组合后视标的成像质量得到明显提高,特别是光瞳直径为 4mm 的成像(图 7(d)),图中视标的边界分辨能力进一步提高,已接近衍射受限时的成像结果(图 7(e)),这与图 6(a)、图 6(b)中共轭模型组合前后 MTF 值变化所反映的结论一致。采用以上方法对其他共轭模式进行分析,能得到一致的结论。以上讨论结果同时也说明了 Zernike 模式像差对光学质量影响不具备叠加性,对于 Zernike 模式共轭模型,像差组合后对光学质量的影响表现为补偿关系。

[0057] Zernike 模式共轭组合模型在自适应光学中具有很好的应用前景,比如在基于 Zernike 模式的人眼像差校正过程中,由于高阶像差具有很高的空间复杂性,普通的变形镜很难满足空间补偿要求,往往会使补偿校正陷入病态迭代,甚至还会影响对其它像差的校正。在这种校正高阶像差的问题上,充分引入本发明实施例,比传统的补偿方法更具优势,比如先由变形镜产生一个相对阶数较低即空间复杂度不高的共轭模式像差,再与待校正像差共同作用;再比如对人眼像差中的共轭模型像差进行区别对待,“剔除”满足共轭条件的模式后再确定待校正像差,通过这些方法同样能在一定光瞳区域内达到提高系统光学质量的要求,同时也提高了变形镜的空间补偿能力。



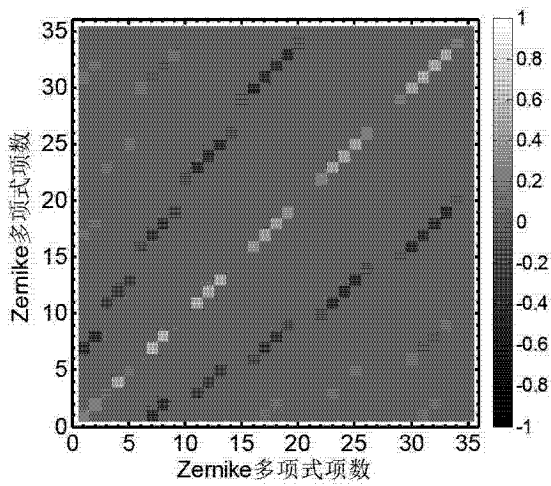
$$\omega = 1$$

图 1(a)



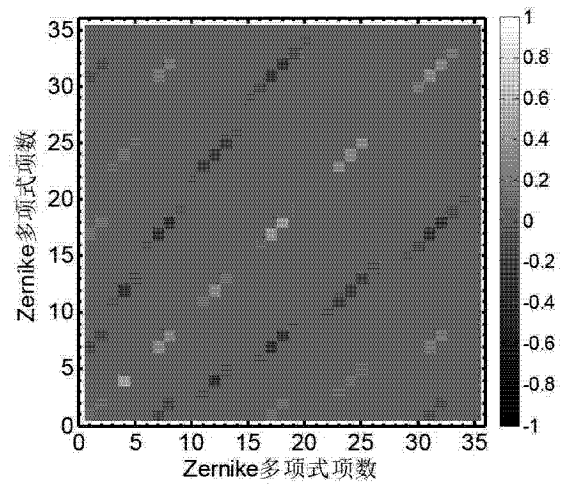
$$\omega = 0.9$$

图 1(b)



$$\omega = 0.7$$

图 1(c)



$$\omega = 0.5$$

图 1(d)

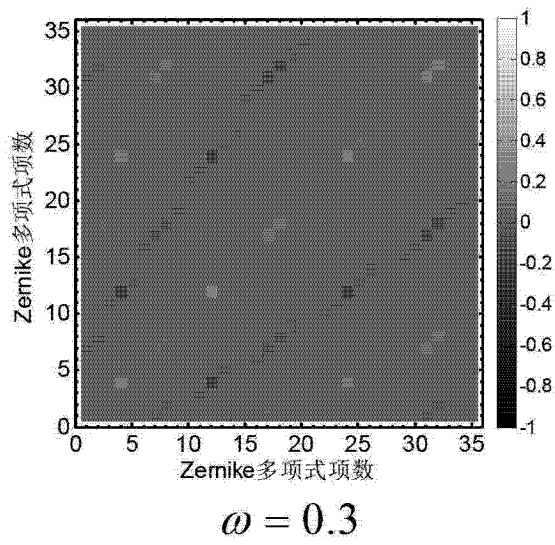


图 (e)

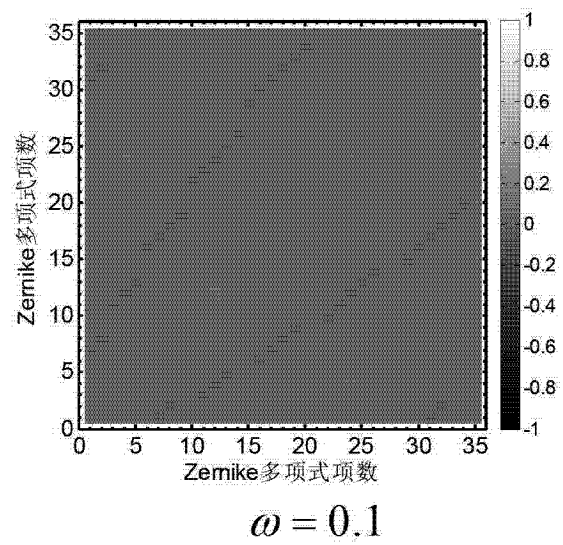


图 1(f)

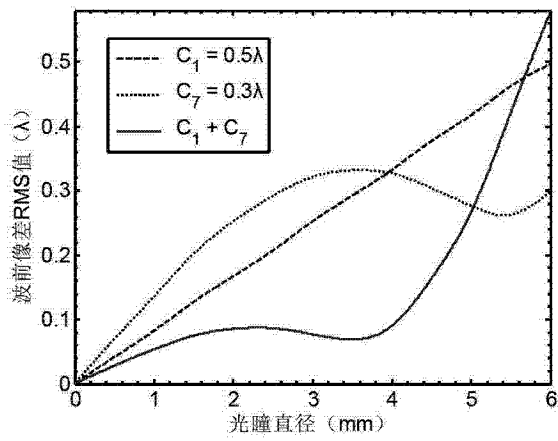


图 2(a)

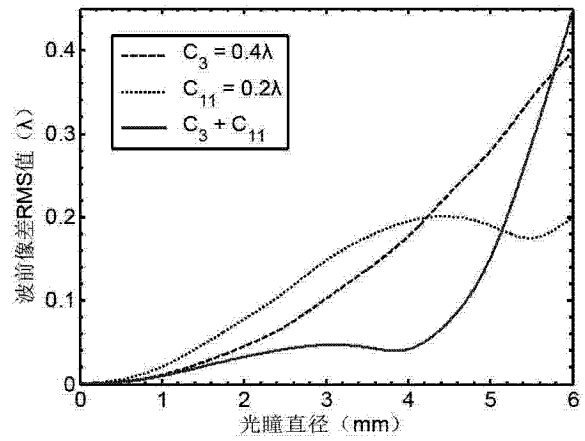


图 2(b)

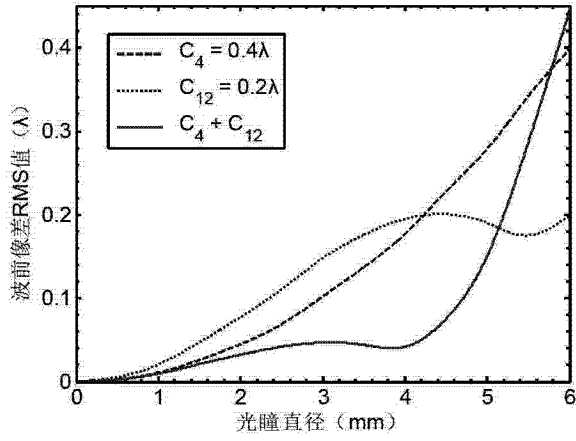


图 2(c)

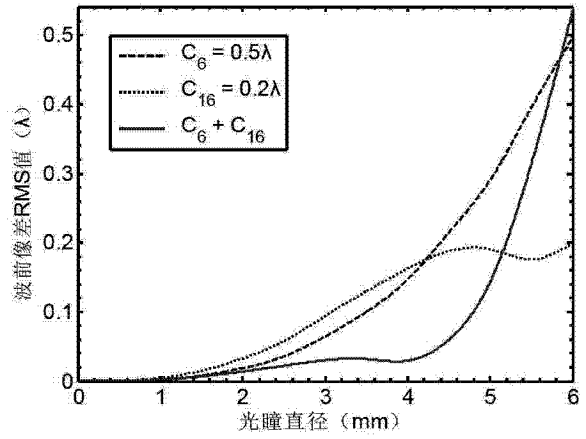


图 2(d)

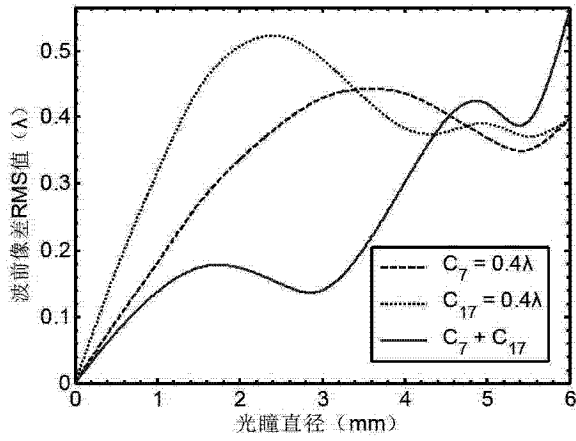


图 2(e)

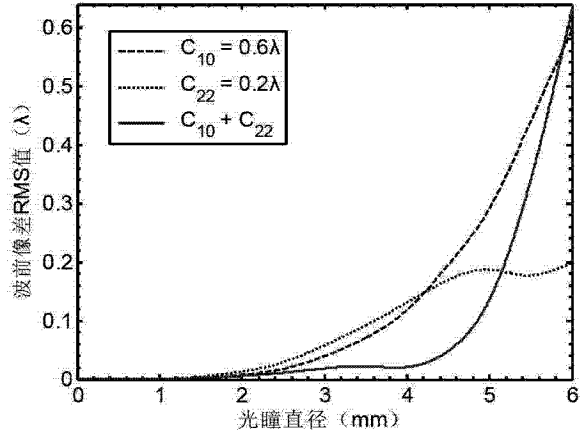


图 2(f)

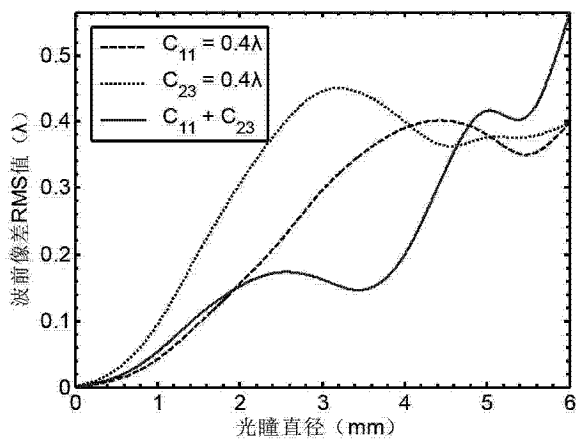


图 2(g)

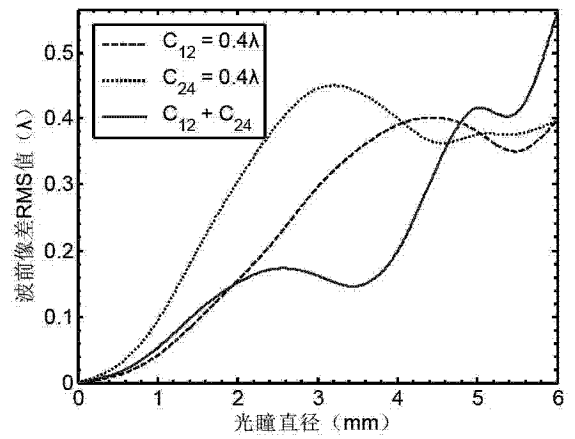


图 2(h)

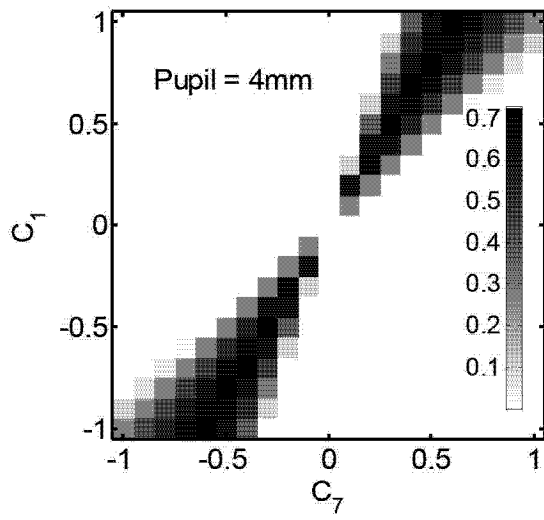


图 3(a)

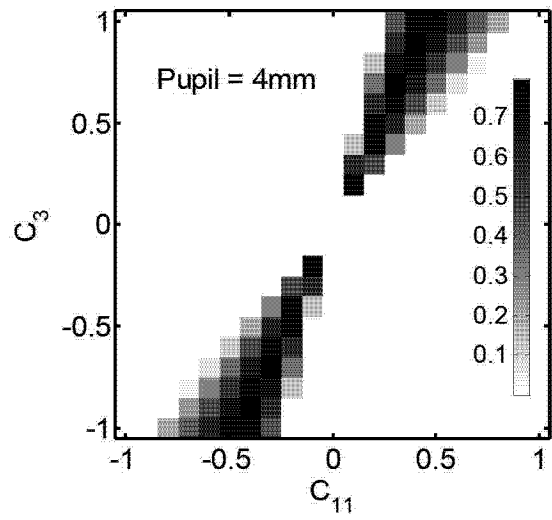


图 3(b)

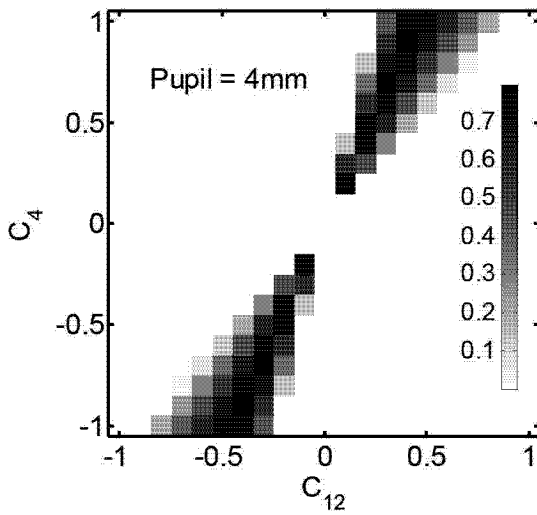


图 3(c)

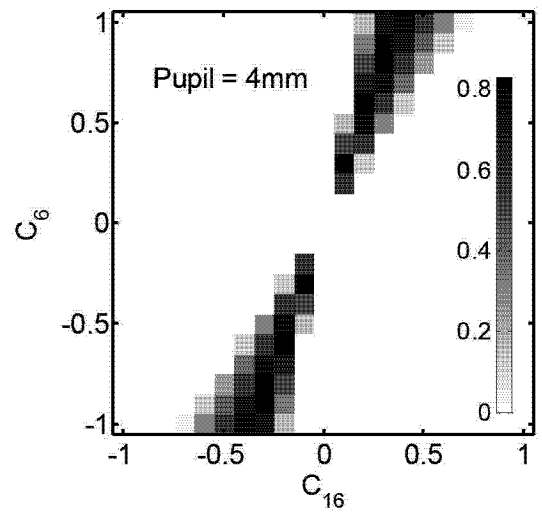


图 3(d)

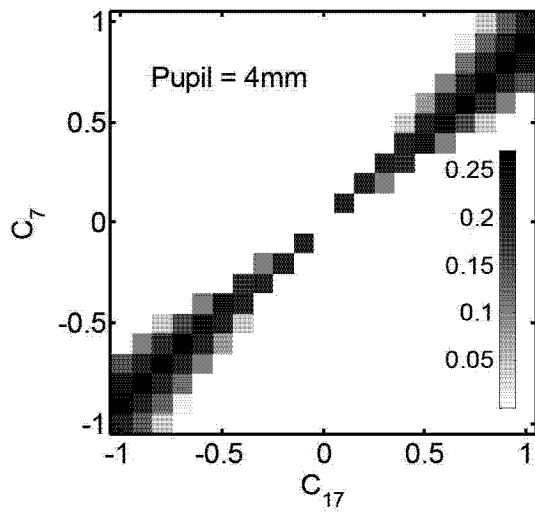


图 3(e)

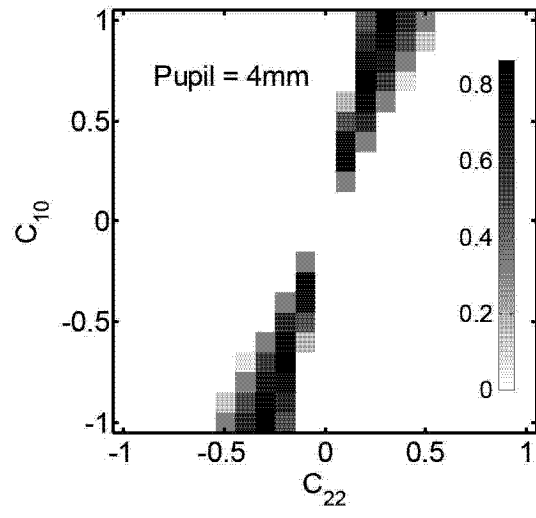


图 3(f)

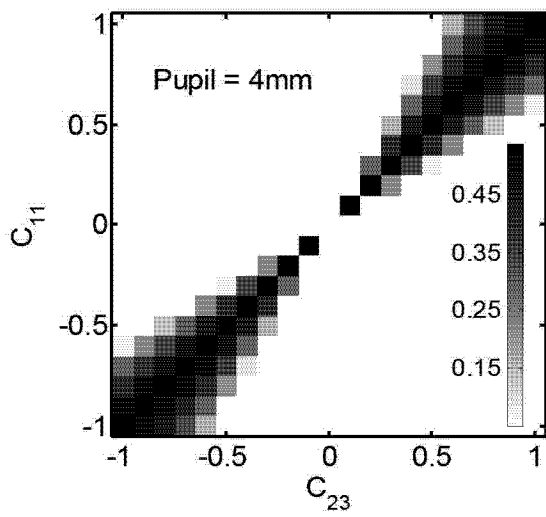


图 3(g)

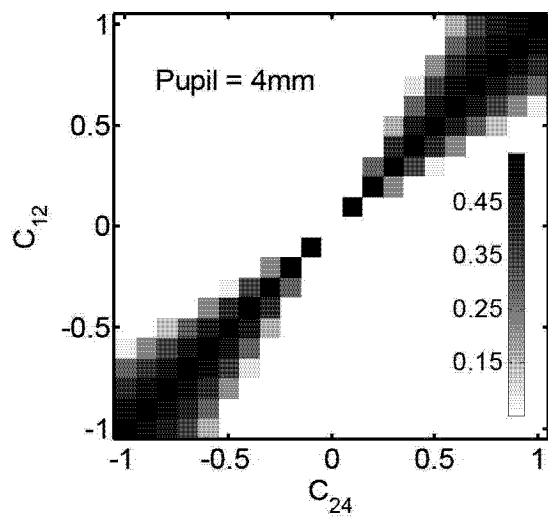


图 3(h)

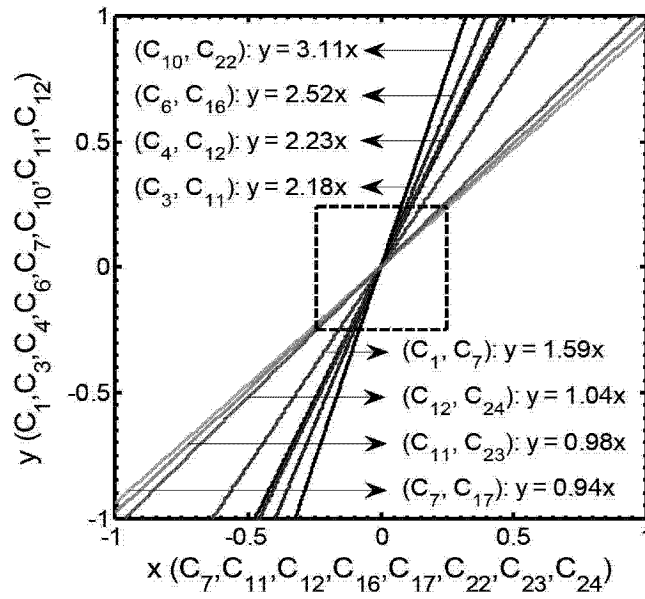


图 4

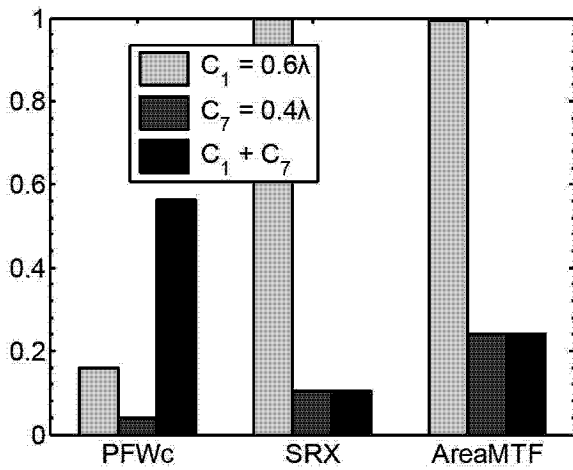


图 5(a)

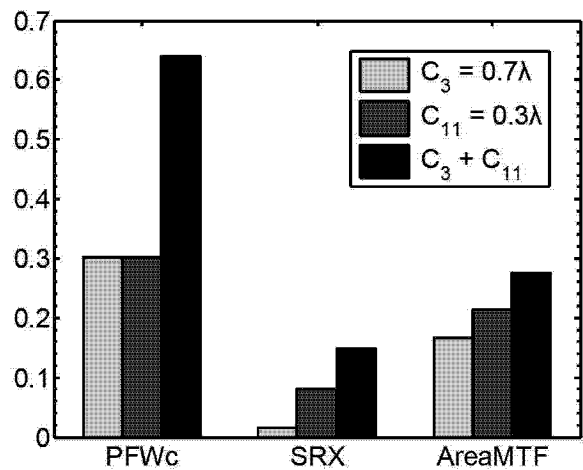


图 5(b)

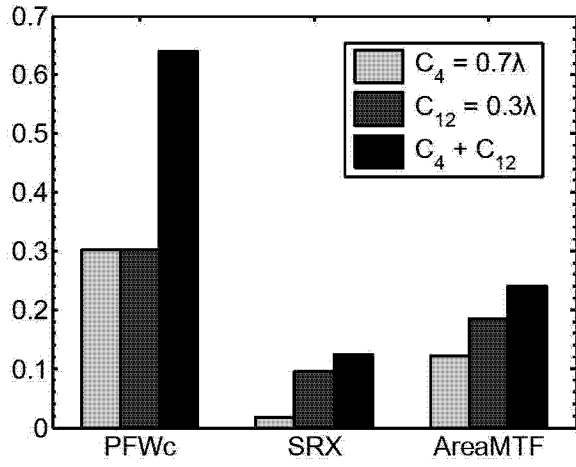


图 5(c)

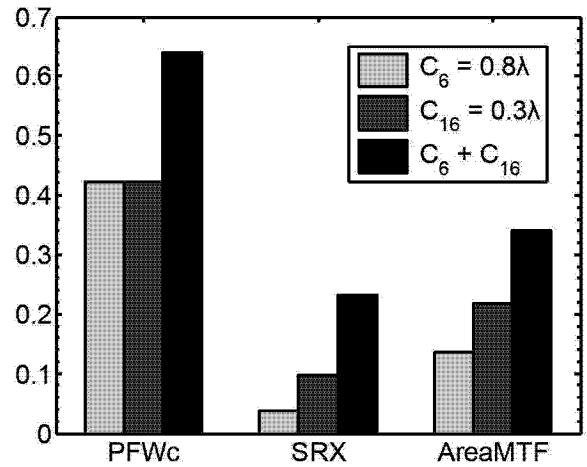


图 5(d)

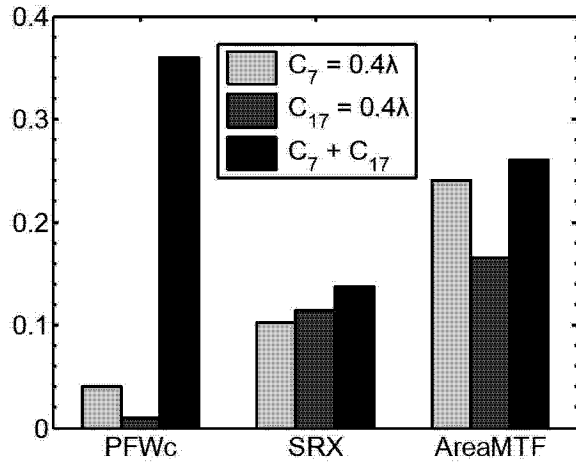


图 5(e)

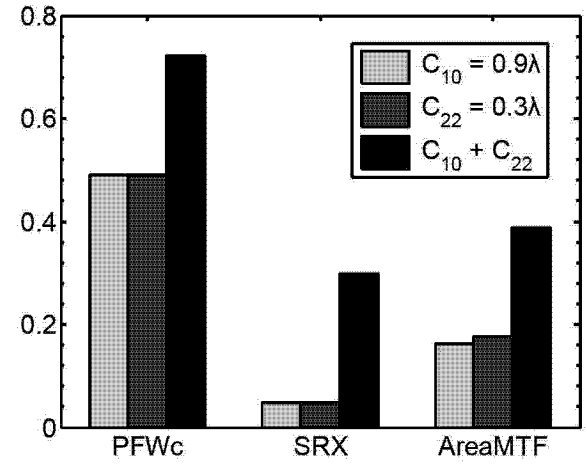


图 5(f)

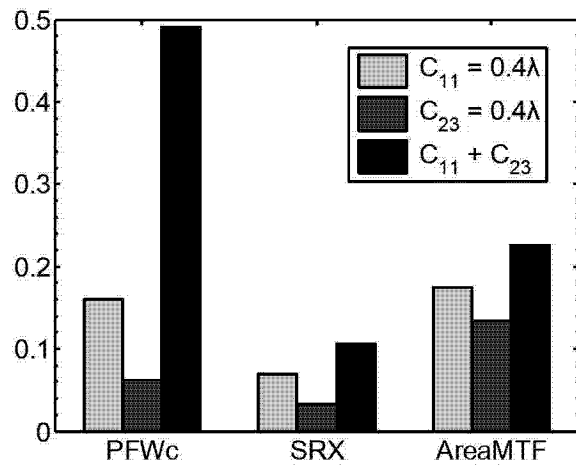


图 5(g)

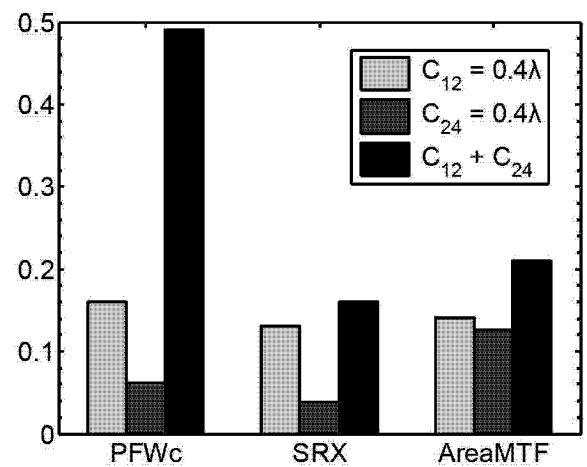


图 5(h)

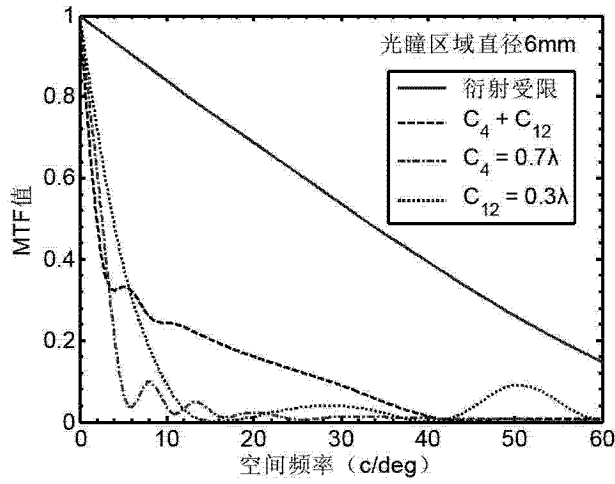


图 6(a)

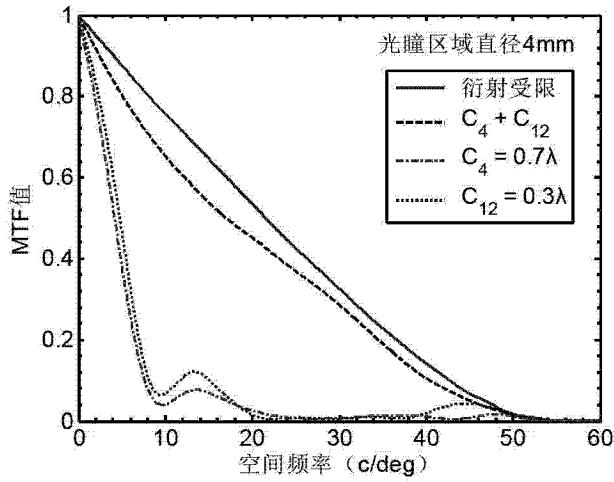


图 6(b)

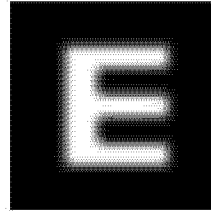


图 7(a)

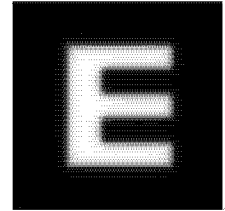


图 7(b)

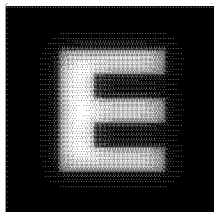


图 7(c)

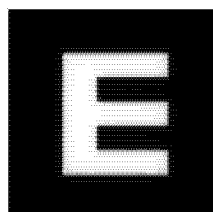


图 7(d)

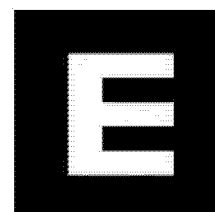


图 7(e)