

doi: 10.3788/gzxb20164503.0322001

应用波像差理论计算鱼眼镜头调制传递函数

田林, 吕丽军, 曹一青

(上海大学 精密机械系, 上海 200072)

摘 要: 基于平面对称光学系统的波像差理论, 给出了鱼眼镜头各类像差的波像差计算表达式, 利用自相关积分法计算了它的调制传递函数, 采用 8 节点的高斯-勒让德数值积分方法求解了其自相关积分; 分析了鱼眼镜头倍率色差对确定空间频率光栅的相位改变量, 给出了 C(656.3 nm)、D(589.3 nm)、F(486.1 nm) 离散光谱的倍率色差的调制传递函数计算表达式. 利用本文方法和 Zemax 快速傅里叶变换法分别计算两个鱼眼镜头系统的调制传递函数, 并进行了对比. 结果表明, 对于中小孔径的鱼眼镜头成像系统, 本文方法和仿真得到的结果较好地吻合.

关键词: 调制传递函数; 倍率色差; 高斯-勒让德积分; 波像差; 鱼眼镜头

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)03-0322001-6

Calculation of Modulation Transfer Function of Fisheye Lens with the Wavefront Aberration Theory

TIAN Lin, LU Li-jun, CAO Yi-qing

(Department of Precision Mechanical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the aberration theory of plane symmetric optical systems, the expressions of each type of wave aberration of fisheye lens were formulated. The autocorrelation integral was used to calculate the modulation transfer function of the fisheye lens. The 8-node Gauss-Legendre integral was applied to solve the complicated integral. On the other hand, the phase change value of a grating of certain spatial frequency resulted from the lateral color aberration was analyzed, the expression of the modulation transfer function of the lateral color aberration with discrete spectral of C(656.3 nm), D(589.3 nm), F(486.1 nm) light was derived. Finally, the proposed method was used to calculate the modulation transfer function curves of two fisheye lens systems; and the results were compared with those obtained by Zemax program. The study results show that the proposed method is valid for calculation of a fisheye lens with a moderate/small pupil.

Key words: Modulation transfer function; Lateral chromatic; Gauss-Legendre Integral; Wave aberration; Fisheye lens

OCIS Codes: 220.1000; 220.1250; 120.5060; 070.4790; 070.7345; 080.1010

0 引言

光学传递函数 (Optical Transfer Function, OTF) 是光学镜头成像质量常用的评价指标之一, 反映了物体经过光学系统成像后对比度的损失程度^[1], 其模值为调制传递函数 (Modulation Transfer Function,

MTF). 光学传递函数一般分几何 OTF 和物理 OTF^[2], 几何 OTF 是通过光线追迹模拟点扩散函数^[3], 再对点扩散函数作傅里叶变换得到, 它适用于存在较大像差的光学系统; 物理 OTF 是先求出瞳处的光瞳函数, 再对其进行自相关积分得到.

对于像鱼眼镜头这样的超大视场光学系统 (视场

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11274223) 和上海市教委创新基金项目 (No. 12ZZ088) 资助

第一作者: 田林 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为鱼眼镜头调制传递函数. Email: hftianlin@126.com

导师 (通讯作者): 吕丽军 (1963-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为真空紫外、软 X 射线光学及超大视场光学系统. Email: lulijun@shu.edu.cn

收稿日期: 2015-10-13; **录用日期:** 2015-12-04

<http://www.photon.ac.cn>

角 180°甚至更大),当超大视场物点发出的光束入射在前组负弯月透镜上时,即非常斜入射光束成像,光束经过光学面后在子午和弧矢平面内的聚焦及波阵面参量可能完全不一致,光学系统的成像具有平面对称光学系统的特点,赛德尔像差理论不再适用于此类系统的像差计算^[7].关于鱼镜头光学系统的物理 OTF 一般通过抽样光线的光程差计算拟合出瞳面上波像差分布(即光瞳函数),然后应用自相关积分计算得到^[4-7],其计算准确度取决于抽样光线的数目.

近年来,Lu 研究了平面对称光学系统波像差理论,它可以应用于一般折、反射光学系统光束非常斜入射情况下的波像差分析^[8],为鱼镜头这类光学系统提供了一种波像差计算方法^[9],无需运用抽样光线计算方法就能得到出瞳面上的波像差分布.本文应用该像差理论和 OTF 的自相关计算方法,导出鱼镜头物理 OTF 的自相关积分表达式^[10],并采用 8 节点高斯-勒让德积分求解自相关积分;通过计算鱼镜头不同色光相对于参考光的倍率色差对确定空间频率光栅所产生的相位改变量,来计算其倍率色差的 OTF.

1 像差计算

1.1 彗差和球差波像差

对于像鱼镜头这样的超大视场光学系统,Lu 等采用的像差分析思路是在工作视场范围内取多个视场角,再应用平面对称光学系统像差理论研究每个视场物点经光学系统所产生的像差;并将各视场对像差贡献加权求和,就可以反映光学系统成像质量^[9].

对于包含 g 个光学面的光学系统,系统总的波像差是各个光学面的贡献之和^[9],即

$$W_{ij0} = \sum_{k=1}^g W_{(k)} = n_g \sum_{ij} \tau_{ij0} x^i y^j, (i+j \leq 4) \quad (1)$$

式中

$$\tau_{ij0} = \frac{1}{n_g} \left(\sum_{k=1}^{g-1} \omega_{ij0(k)} n_{k|g}^k A_{k|g}^i B_{k|g}^j + \tau_{ij0(g)} \right) \quad (2)$$

x, y 为光线在最后光学面上的投影坐标, $\omega_{ij0(k)}$ 和 τ_{ij0} 分别是第 k 个光学面和光学系统总的波像差系数^[9],

$$n_{k|g} = \left(\frac{n_k}{n_g} \right) \quad (3)$$

$$A_{k|g} = \frac{r'_{m(k)} r'_{m(k+1)} \cdots r'_{m(g-1)}}{r_{m(k+1)} r_{m(k+2)} \cdots r_{m(g)}} \cdot \frac{\cos \alpha_{k+1} \cos \alpha_{k+2} \cdots \cos \alpha_g}{\cos \beta_k \cos \beta_{k+1} \cdots \cos \beta_{g-1}} \quad (4)$$

$$B_{k|g} = \frac{r'_{s(k)} r'_{s(k+1)} \cdots r'_{s(g-1)}}{r_{s(k+1)} r_{s(k+2)} \cdots r_{s(g)}} \quad (5)$$

式中, n_g 和 n_k 分别为第 g 和第 k 个光学面的物方折射率; $r_{m(k)}$ 和 $r_{s(k)}$ 分别表示为第 k 个光学面物方空间子午焦距和弧矢焦距, $r'_{m(k)}$ 和 $r'_{s(k)}$ 分别表示第 k 个光学面像方空间的子午焦距和弧矢焦距; α_k 和 β_k 分别表示第 k

个光学面的入射角和折射角.

利用主光线追迹方程,可以得到某视场主光线在各光学面上的入射角和折射角,然后由二阶波像差系数 $W_{200}=0$ 和 $W_{020}=0$ 确定各光学面的子午和弧矢焦距^[9].由式(1)直接得出彗差和球差波像差的计算公式分别为

$$W_{\text{coma}}(x, y) = \omega_{300} x^3 + \omega_{120} x y^2 \quad (6)$$

$$W_{\text{sph}}(x, y) = \omega_{400} x^4 + \omega_{220} x^2 y^2 + \omega_{040} y^4 \quad (7)$$

式中, $\omega_{300}, \omega_{120}, \omega_{400}, \omega_{220}, \omega_{040}$ 为波像差系数,参见参考文献^[9]中的波像差系数的计算; (x, y) 为出瞳处的坐标.

1.2 离焦波像差

由 $W_{200}=0$ 和 $W_{020}=0$ 分别可以得到光束在子午和弧矢平面内的焦点位置^[9].不同视场或波长的焦平面位置会不同,场曲反映的是焦平面位置随视场角的变化;而轴向色差反映的是焦平面位置随波长的变化. OTF 曲线反映了随视场光学成像对比度的变化,通过对各色光的 OTF 加权求和来反映多色 OTF. 因此,只要研究任一视场角单色光的离焦波像差,就可以反映场曲和轴向色差对 OTF 的影响.

波像差表示出射波阵面与参考波阵面之间的光程差,它关于光线孔径坐标的二阶分量就是离焦波像差.图 1 中的 W_{20} 表示了子午平面的离焦波像(弧矢平面的离焦波像差 W_{02} 的几何示意与之类似).根据它的几何意义,有

$$W_{20}(x) = \frac{\cos^2 \beta_g}{2} \left(\frac{1}{r'_c} - \frac{1}{r_{m(g)}} \right) x^2 \quad (8)$$

$$W_{02}(y) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r'_c} - \frac{1}{r_{s(g)}} \right) y^2 \quad (9)$$

$$r'_c = |O_g P'| = \frac{r'_0 - \Gamma_g + \rho_g \cos(\omega_g - \beta_g)}{\cos \omega_g} \quad (10)$$

式中, ω_g 为像方视场角; r'_0 为最后光学面到像面的距离; β_g, Γ_g 和 ρ_g 分别为最后光学表面主光线的折射角、子午曲率半径和弧矢曲率半径^[9].

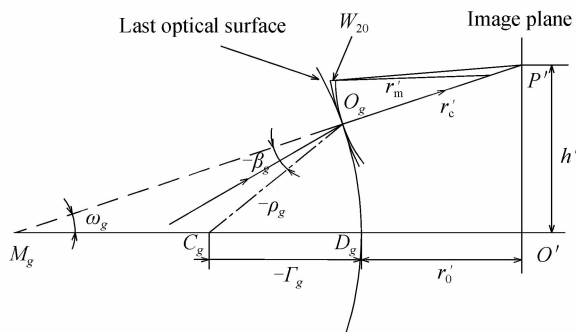


图 1 主光线经最后光学面相交于像面上示意
Fig. 1 Optical scheme of the chief ray passing the last optical surface and impinging the image plane

1.3 总的单色波像差

鱼镜头光学系统子午和弧矢方向的单色波像差

表达式分别为

$$W_m(x, y) = W_{\text{sph}}(x, y) + W_{\text{coma}}(x, y) + W_{20}(x) \quad (11)$$

$$W_s(x, y) = W_{\text{sph}}(x, y) + W_{\text{coma}}(x, y) + W_{02}(y) \quad (12)$$

1.4 色差

光学系统除了轴向色差,还需考虑倍率色差.它反映了不同波长的主光线在像上交点的分离程度.某一视场角的主光线和像面的交点到光轴的距离的计算式为

$$h' = \overline{M_g O'} \tan \omega_g = \tan \omega_g \left(\frac{\rho_g \sin \beta_g}{\sin \omega_g} - \Gamma_g + r'_0 \right) \quad (13)$$

应用式(13)可以计算任意两种色光的色差,第二节中计算倍率色差的 OTF,需要计算 C(656.3 nm)、D(589.3 nm)、F(486.1 nm)光相对于参考光的倍率色差.如果选取的参考色光为 D 光,C、F 光相对于 D 光的倍率色差为

$$\Delta h'_{\text{CD}} = |h_C - h_D| \quad (14)$$

$$\Delta h'_{\text{FD}} = |h_F - h_D| \quad (15)$$

2 光学传递函数计算

2.1 出瞳参量计算

假定孔径光线经各光学面是按线性传递的,孔径光阑位于第 $k-1$ 和第 k 个光学面之间,由于光学系统在子午和弧矢方向焦距不同,光束在各光学面上投影一般可近似成椭圆.按线性关系,第 k 个光学面光束投影的长短轴分别为

$$a_k = \frac{h \cos(\omega_k) r_{m(k)}}{2(d_{k-1} - r_{m(k)}) \cos(\alpha_k)} \quad (16)$$

$$b_k = \frac{h r_{s(k)}}{2(d_{k-1} - r_{s(k)})} \quad (17)$$

式中, a_k 和 b_k 是光束在第 k 个光学面上投影的长轴和短轴, h 为孔径光阑的直径, ω_k 第 k 个光学面的像方视场角; d_{k-1} 为孔径光阑到第 k 个面的距离.

光束在最后光学面上的投影椭圆的长、短轴计算表达式为

$$a = a_k \times A_{(g-k+1)|g} \quad (18)$$

$$b = b_k \times B_{(g-k+1)|g} \quad (19)$$

式中, $A_{(g-k+1)|g}$ 和 $B_{(g-k+1)|g}$ 由式(4)、(5)计算得到.

2.2 单色光学传递函数

采用自相关法来计算鱼眼镜头的光学传递函数^[11].对于光波长 λ ,子午方向和弧矢方向的像方空间频率为 ν_m 和 ν_s ,那么子午和弧矢方向的光学传递函数^[1, 12]分别为

$$T_m(\nu_m; \lambda) = \frac{1}{D} \iint_S \exp [ikW_m(x + \lambda r'_m/2, y)] \cdot \exp [-ikW_m(x - \lambda r'_m/2, y)] dx dy \quad (20)$$

$$T_s(\nu_s; \lambda) = \frac{1}{D} \iint_S \exp [ikW_s(x, y + \lambda r'_s/2)] \cdot \exp [-ikW_s(x, y - \lambda r'_s/2)] dx dy \quad (21)$$

式中, $k=2\pi/\lambda$, D 出瞳面积, S 为出瞳在子午和弧矢方向分别偏移了 $\pm \lambda r'_m/2$ 和 $\pm \lambda r'_s/2$ 之后的 $\lambda r'_m/2$ 重叠区域^[13],如图 2(a)和(b).

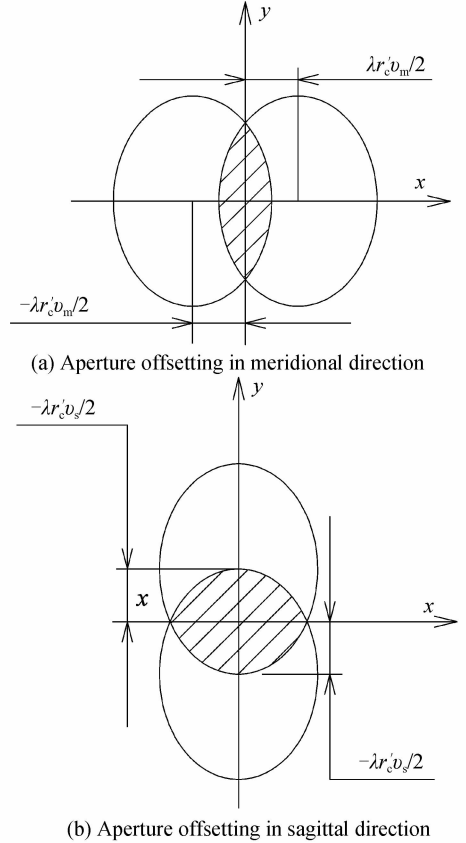


图 2 光学传递函数的积分区域

Fig. 2 Integration area of modulation transfer function

2.3 积分的数值处理

由于式(20)和式(21)的被积函数部分比较复杂,不易直接求得积分结果.采用计算准确度较高的高斯-勒让德数值积分法对其求解.高斯-勒让德求积公式^[14]为

$$\int_c^d f(x) dx \approx \frac{d-c}{2} \sum_{k=1}^N \omega_{N,k} f(x_{N,k}) \quad (22)$$

对于光学传递函数的自相关积分式(20)和式(21),积分上、下限 d 和 c 是二重积分的内外层积分的上、下限,需对自相关积分公式两次应用高斯勒让德求积公式;在式(22)中, N 是节点数, $\omega_{N,k}$ 是不同节点的权重系数,节点横坐标 $x_{N,k}$ 满足关系

$$x_{N,k} = \frac{d+c}{2} - \frac{d-c}{2} t_{N,k} \quad (23)$$

节点数 N 取的越大,求积越精确.取 $N=8$,各节点 $t_{8,k}$ 及相应的权值 $\omega_{8,k}$ 由表 1 给出^[14].

表 1 高斯-勒让德求积公式节点和权值

Table 1 The nodes and weights of Gauss-Legendre Integral				
k	1, 2	3, 4	5, 6	7, 8
$(-1)^{k+1} t_{8,k}$	0.960 3	0.796 7	0.525 5	0.183 4
$\omega_{8,k}$	0.101 2	0.222 4	0.313 7	0.362 7

2.4 多色光学传递函数

实际镜头成像的光源往往是白光,关于多色光学传递函数的计算,研究人员一般通过对 C、D、F 三色光的单色光学传递函数加权平均计算^[1],即

$$T_m(\nu_m) = [C_1 F_1 T_m(\nu_m; \lambda_1) + C_2 F_2 T_m(\nu_m; \lambda_2) + C_3 F_3 T_m(\nu_m; \lambda_3)] / (C_1 F_1 + C_2 F_2 + C_3 F_3) \quad (24)$$

$$T_s(\nu_s) = [C_1 F_1 T_s(\nu_s; \lambda_1) + C_2 F_2 T_s(\nu_s; \lambda_2) + C_3 F_3 T_s(\nu_s; \lambda_3)] / (C_1 F_1 + C_2 F_2 + C_3 F_3) \quad (25)$$

式中, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 分别是 C、D、F 光的波长, C_1 、 C_2 、 C_3 是对应于三色光谱线的权重因子, F_1 、 F_2 、 F_3 是考虑 C、D、F 光的光源辐射能量分布 (S_i)、光学系统透过率 (E_i) 以及探测器的光谱灵敏度 (V_i) 的因素产生的权重因子,即

$$F_i = S_i E_i V_i \quad (i=1, 2, 3) \quad (26)$$

权重因子的数值参考表 2^[1, 15-16].

表 2 C、D、F 光对应的权重因子

Table 2 Weighting factors of C, D, F light

	C_i	S_i	V_i	E_i
C light	0.076 6	275	0.526	1
D light	0.698 3	152	0.709	1
F light	0.225 1	100	0.939	1

式(24)、(25)仅包含轴向色差的影响,并未考虑倍率色差对 OTF 影响. 像面上多色光的点扩散函数是单色光点扩散函数和倍率色差的卷积结果,而光学传递函数是通过点扩散函数的傅里叶变换得到. 因此,多色光学传递函数是单色光学传递函数和倍率色差光学传递函数的乘积.

如果像面上不同色光的倍率色差为 $\Delta h'$, 那么它在像方空间频率为 ν_m 的光栅产生的相位偏移量 $e^{2\pi i \nu_m \Delta h'}$, 而 C、D、F 光相对于参考光(D光)的倍率色差由式(14)、(15)给出. 倍率色差对光学传递函数仅在子午方向有贡献. 离散的 C、D、F 光倍率色差对 OTF 的贡献为

$$T_{LC}(\nu_m) = \frac{C_1 F_1 e^{2\pi i \nu_m \Delta h_{c1}} + C_2 F_2 + C_3 F_3 e^{2\pi i \nu_m \Delta h_{c3}}}{c_1 F_1 + c_2 F_2 + c_3 F_3} \quad (27)$$

在子午方向多色光学传递函数是式(25)和式(27)的乘积,即

$$T(\nu_m) = T_m(\nu_m) T_{LC}(\nu_m) \quad (28)$$

对式(25)和式(28)求模,就可以分别得到光学系统弧矢方向和子午方向的多色光的调制传递函数.

3 数值验证

以 Nikon 16mm / F2.8 鱼镜头系统(鱼镜头 1)和文献[7]中的鱼镜头(鱼镜头 2)为例,计算其 MTF.

鱼镜头 1 的光学结构参量表 3.

表 3 鱼镜头 1 的光学系统参量

Table 3 The optical parameters of fisheye lens 1

Surface	Radius/mm	Distance/mm	Index	Glass
1	69.631	1.650	1.640 5	N-LAK21
2	15.002	10.260	-	-
3	123.323	1.600	1.620 41	N-SK16
4	15.003	4.011	-	-
5	32.657	8.020	1.625 9	F1
6	-15.306	8.890	1.794 6	N-LAF32
7	-39.042	5.545	-	-
STO	Infinity	5.500	-	-
8	-80.805	1.140	1.581 4	LF5
9	23.917	5.000	1.518 2	K3
10	-20.618	0.089	-	-
11	46.798	5.510	1.520 5	PK50
12	-19.203	1.280	1.784 70	SF56A
13	-40.716	0.566	-	-

图 3(a)和(b)分别表示在大孔径(F/# 3.8)和中等孔径(F/# 5.5)情况下,鱼镜头在空间频率为 10 l/mm和 30 l/mm时,应用式(25)~(28)计算得到的 MTF 分布曲线. 图 4(a)和(b)表示两种孔径情况下,应用 Zemax 中的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT)方法计算得到的 MTF 曲线(采样光线数目取 64×64). 通过两种方法的计算结果对比,验证本文的计算方法在不同孔径下 MTF 的计算准确度.

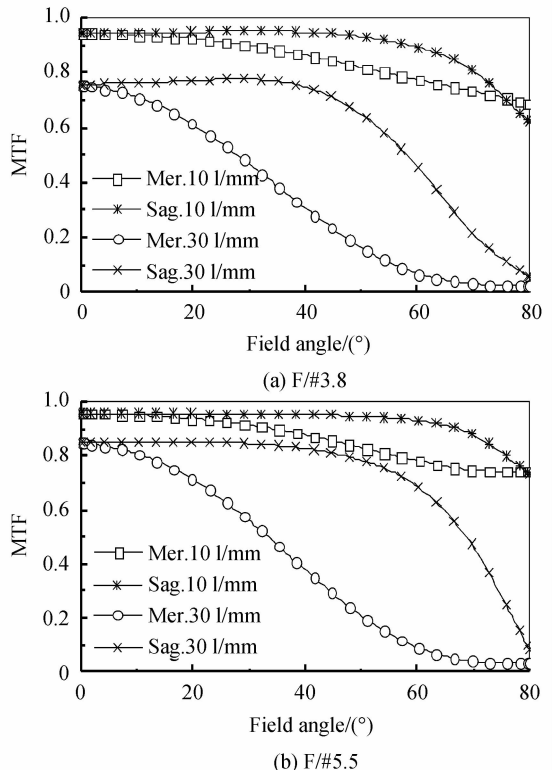
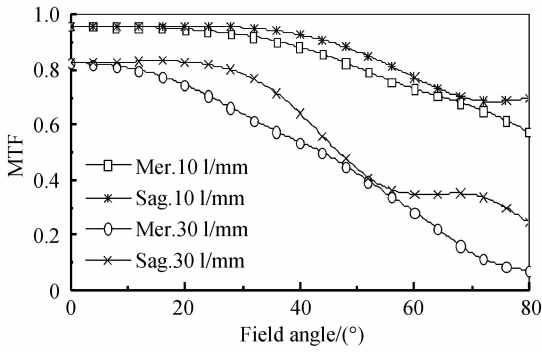
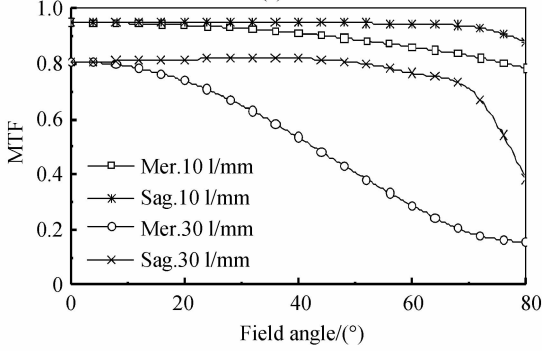


图 3 采用本文方法得到的鱼镜头 1 的 MTF 曲线
Fig. 3 MTF curve of fisheye lens 1 calculated by the proposed method



(a) F/#3.8



(b) F/#5.5

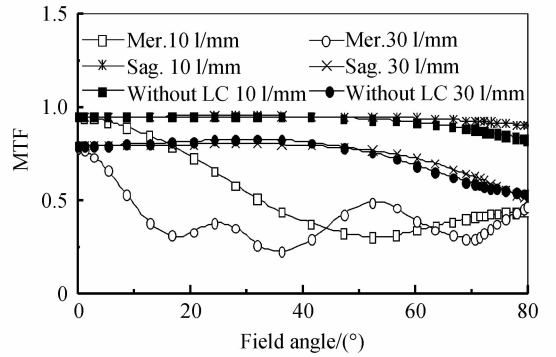
图4 采用 Zemax 中 FFT 法得到的鱼眼镜头 1 的 MTF 曲线
Fig. 4 MTF curve of fisheye lens 1 calculated by the FFT method of Zemax

由图 3 和图 4 可以看出,本文方法和 Zemax 中的 FFT 方法得到的 MTF 曲线基本一致,在 F 数较大、视场角较小情况下吻合得更好.因为在超大视场、大孔径情况下,高阶像差(包括衍生像差和本征高阶像差)的

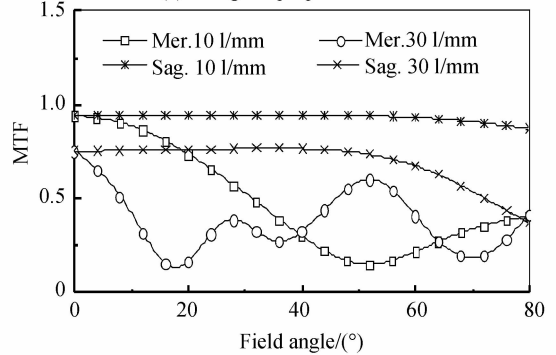
表 4 鱼眼镜头 2 的光学系统参量

Table 4 The optical parameters of fisheye lens 2

Surface	Radius/mm	Distance/mm	Index	Glass
1	162.235 9	7.676	1.516 3	BK7HT
2	69.168 4	28.975	-	-
3	98.314 1	4.186 2	1.612 7	SK4
4	42.474	13.054	-	-
5	64.483 9	4.210 2	1.614 8	SSK3
6	12.623	13.535 8	-	-
7	-105.027	1.297 4	1.487 5	N-FK5
8	18.953	4.534 9	1.784 7	SF56A
9	-232.713	1.175 3	1.755 5	P-LAF37
10	75.790 7	13.861 8	-	-
STO	Infinity	2.528 4	-	-
12	57 511.25	1.364 1	1.784 7	SF56A
13	15.425	8.586 3	1.743 3	N-LAF35
14	-46.059 4	0.142 1	-	-
15	-259.655	4.751	1.755 5	P-LAF37
16	-37.371 1	18.492 6	-	-
17	38.373 1	2.524 1	1.784 7	SF56A
18	24.438	19.820 5	1.620 4	N-SK16
19	-53.609	12.963	-	-



(a) Using the proposed method



(b) Using FFT method of Zemax

图5 鱼眼镜头 2 的 MTF 曲线(F/#5.5)

Fig. 5 MTF curve of fisheye lens 2

贡献已经不能忽略,需要应用高阶波像差理论才能得到更高准确度的结果.

鱼眼镜头 2 的系统具有较大的倍率色差,其光学结构参量见表 4,光栅空间频率为 10 l/mm 和 30 l/mm, F 数为 5.5.为了验证倍率色差 MTF 的计算表达式(27)的正确性,分别计算了式(24)~(25)(不包含倍率色差的贡献)的 MTF 分布曲线,如图 5(a)中实心方块和实心圆曲线;图 5(a)中的其余 MTF 曲线是应用表达式(25)~(28)计算得到,包含倍率色差的贡献.图 5(b)是应用 Zemax 中 FFT 方法计算得到的多色 MTF 曲线.

从图 5 可以看出,如果包含倍率色差的贡献,MTF 的计算结果与 Zemax 的计算结果能够较好地吻合;否则,它们之间相差很大.

4 结论

基于常规光学系统调制传递函数的自相关积分计算方法,应用平面对称光学系统 4 阶波像差理论计算鱼眼镜头光学系统的多色调制传递函数.该方法的波像差是由解析表达式直接计算,相比于通过计算抽样光线的光程差来拟合出瞳面上的波像差方法,其优点是能够反映光学系统结构参量对 OTF 的影响,并能计算各类像差的 OTF 分布.两个鱼眼镜头光学系统调制传递函数的计算结果表明,对于中、小孔径鱼眼镜头光学系统,本文方法可以得到较高的计算准确度,但对于

大孔径成像方面,还需进一步研究高阶像差及其对于OTF的贡献.

参考文献

- [1] 庄松林. 光学传递函数[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [2] DAI Jian-ning. The imaging theory and the optimization design of fisheye lens[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 1999: 27-30.
戴建宁. 鱼镜头的成像理论与优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 1999: 27-30.
- [3] MA Qing-li, TANG Shi-biao, WU Yan-hua. Point spread function of pinhole imaging system for deviating from center of incident γ -ray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 122-126.
马庆力, 唐世彪, 吴彦华. 偏离中心入射的 γ 针孔成像系统点扩展函数[J]. 光子学报, 2015, **44**(3): 122-126.
- [4] WU Hai-qing, ZHAO Xin-liang, LI Tong-hai, *et al.* Design of refractive/diffractive IR fish-eye optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(08): 1533-1536.
吴海清, 赵新亮, 李同海, 等. 折射/衍射红外鱼镜头光学系统设计[J]. 光子学报, 2010, **39**(08): 1533-1536.
- [5] SAMY A M, GAO Z. Simplified compact fisheye lens challenges and design[J]. *Journal of Optics*. 2015, **44**(4): 409-416.
- [6] LI Hong-zhuang, ZHANG Zhen-duo, LIU Xin-yue, *et al.* Optical design of a wide spectral fish-eye lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(11): 1312-1316.
李宏壮, 张振铎, 刘欣悦, 等. 一款宽光谱鱼镜头的设计[J]. 光子学报, 2012, **41**(11): 1312-1316.
- [7] 王永仲. 鱼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] LU Li-jun. Aberration theory of plane-symmetric grating systems[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2008, **15**(4): 399-410.
- [9] LU Li-jun, HU Xiao-yan, SHENG Cui-yuan. Optimization method for ultra-wide-angle and panoramic optical systems[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(17): 3776-3786.
- [10] WANG Wei, WANG Yan, ZHAO Kan-xing. The aberration and the modulation transfer function in LASEK and LASIK: Pupil size dependence[J]. *Optik- International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, **121**(6): 500-505.
- [11] SINGH R K, SENTHILKUMARAN P, SINGH K. Optical transfer function of an optical system with a vortex phase mask in the presence of primary aberrations[J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, **42**(1): 120-125.
- [12] KANG Ji-qiang, CHENG Xue-min, HAO Qun. Two dimensional modulation transfer function and its application in wavefront aberration detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 131-137.
康吉强, 程雪岷, 郝群. 二维调制传递函数及其在波前差检测方面的应用[J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 131-137.
- [13] KIDGER M J. Fundamental optical design[M]. Bellingham: SPIE Press, 2002.
- [14] 马萨, 约翰, 柯提思. 数值方法(MATLAB版)[M]. 周璐, 陈渝译. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [15] WANG Ya-ji. Measurement and application of solar radiation spectra [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & technology, 2011: 19-21.
王亚吉. 太阳辐射光谱的测量与应用研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2011: 19-21.
- [16] WU Wen-ming, YE Guan-rong. The auto measurement for CCD video camera's relative spectrum sensibility[J]. *Optical Instruments*, 1996, **2**(18): 13-16.
吴文明, 叶关荣. CCD摄像机相对光谱灵敏度的自动测试[J]. 光学仪器. 1996, **2**(18): 13-16.