

多色光光学传递函数的实验研究

武晓东 吴长发 韩昌元

(国家光学机械产品质量监督检验测试中心)

摘要 通过实验的手段来求得实际光学系统的多色光传递函数, 研究用多色光传递函数代替白光传递函数的近似程度, 并研究权因子的实验确定方法。

一、引 言

实际光学系统大多是对多色光成像的, 由于光学玻璃色散的影响使在成像面形成色差, 色差和单色像差一样会引起像的对比的降低, 因此对在白光下使用的光学仪器, 应该用白光传递函数来评价它的像质。白光传递函数应该说能反映实际使用下的光学系统性能, 但光学系统的计算只能计算单色光的光线追迹以及传递函数, 白光传递函数的计算还做不到, 现在只能计算多色光的传递函数, 其方法是从单色光的传递函数出发, 考虑到光源的辐射能量分布及接收器的光谱灵敏度, 对各种波长的传递函数加权平均而得到多色光的传递函数。

二、实验原理和计算公式

经过折射的光学系统除单色像差外, 通常都带有色差, 有色差的光学系统如果采用多色光照明, 由于系统有彗差。像散等像差因素的影响, 各个波长光线在成像面的交点各不一样, 这样就形成一个亮斑, 而不是一个点, 我们先求出多色光的点扩散函数。

设多色光点扩散函数为 $P_{\Sigma}(x, y)$, 则:

$$P_{\Sigma}(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) P_{\lambda}(x, y) d\lambda$$

式中: $P_{\lambda}(x, y)$ 是波长为 λ 的单色光点扩散函数。各个波长的点扩散函数 $P_{\lambda}(x, y)$ 都是以一个公共像面接收来计算的。 $C(\lambda)$ 是由使用条件来确定的光谱加权系数, 它由下式构成:

$$C(\lambda) = S(\lambda) E(\lambda) V(\lambda)$$

其中: $S(\lambda)$ 是照明光源的光谱分布, $E(\lambda)$ 是滤光镜的光谱透过率, $V(\lambda)$ 是接收器的光谱感光度。对目视仪器这是人眼的光谱响应, 对摄影装置这是感光乳剂的光谱感光度, 对光电子仪器这是光电阴极的光谱特性。 $E(\lambda)$ 中包括滤光片和光学系统的分光透过率决定的滤光特性。

根据多色光传递函数 $K_{\Sigma}(f_x, f_y)$ 为多色光点扩散函数的傅立叶变换。得:

$$K_{\Sigma}(f_x, f_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} P_{\Sigma}(x, y) \exp[2\pi j(f_x x + f_y y)] dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} P_{\Sigma}(x, y) dx dy}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) P_{\lambda}(x, y) d\lambda \right] \exp[2\pi j(f_x x + f_y y)] dx dy}{\iint_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) P_{\lambda}(x, y) d\lambda \right] dx dy} \\
 &= \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \left[\iint_{-\infty}^{\infty} P_{\lambda}(x, y) \exp[2\pi j(f_x x + f_y y)] dx dy \right] d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \left[\iint_{-\infty}^{\infty} P_{\lambda}(x, y) dx dy \right] d\lambda}
 \end{aligned}$$

设: $\bar{K}_{\lambda}(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_{\lambda}(x, y) \exp[2\pi j(f_x x + f_y y)] dx dy$

$$\bar{K}_{\lambda}(0, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} P_{\lambda}(x, y) dx dy$$

则:

$$K(f_x, f_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \bar{K}_{\lambda}(f_x, f_y) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \bar{K}_{\lambda}(0, 0) d\lambda}$$

设: $K_{\lambda}(f_x, f_y) = \bar{K}_{\lambda}(f_x, f_y) / \bar{K}_{\lambda}(0, 0)$

表示归一化的波长为 λ 的传递函数, 则

$$K_{\lambda}(f_x, f_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \bar{K}_{\lambda}(0, 0) K_{\lambda}(f_x, f_y) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} C(\lambda) \bar{K}_{\lambda}(0, 0) d\lambda}$$

设: $N(\lambda) = C(\lambda) \cdot \bar{K}_{\lambda}(0, 0)$

则: $K_{\lambda}(f_x, f_y) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} N(\lambda) \cdot K_{\lambda}(f_x, f_y) d\lambda}{\int_{-\infty}^{\infty} N(\lambda) d\lambda}$

其中: $N(\lambda)$ 是光谱加权系数, 它由 $C(\lambda)$ 和 $\bar{K}_{\lambda}(0, 0)$ 组成。

$C(\lambda)$ 是使用条件决定的光谱加权系数。

$\bar{K}_{\lambda}(0, 0)$ 是波长为 λ 的点扩散函数的总光通量。

在实际计算时上式的积分由求和表示,

$$K_{\lambda}(f_x, f_y) = \frac{\sum_{i=1}^n N(\lambda_i) K_{\lambda_i}(f_x, f_y) \Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^n N(\lambda_i) \Delta\lambda_i}$$

三、实验仪器和实验方法

实验的光学传递函数数据是在长春光机所的EROSIV型光学传递函数测定仪上测得的。这台仪器的性能和精度：

准确性：空间频率在 $0 \sim 100\text{c/mm}$ 时，轴上点的MIF在 ± 0.03 以内PTF为 $\pm 5^\circ$ ，轴外点适当降低。

重复性：MIF为 ± 0.01 ，PTF为 $\pm 1^\circ$ 。

我们在实验中选择一些和特征波长相近的窄带滤光片，在长春光机所的EROSIV型光学传递函数测定仪上测出几个光学系统的白光传递函数和各单色光的传递函数，考虑到光源和接收器的影响，我们通过实测光学系统未归化的各单色光零频响应值，再考虑光路中滤光片的透过率和光学系统的分光透过率的影响，得到这台仪器的光谱响应曲线。我们再以这些特征波长作为中心波长划分出波段，通过积分光谱响应曲线下各波段的面积而得到各波长的权重系数，用它加权平均各单色光的传递函数得到多色光的传递函数。

四、实验结果和数据分析

1. 滤光片

我们在可见光的范围内选择了八块大致间隔均匀的窄带干涉滤光片，直径50mm，滤光片的半波宽低于10nm，各滤光片的光分透过率曲线见图1。

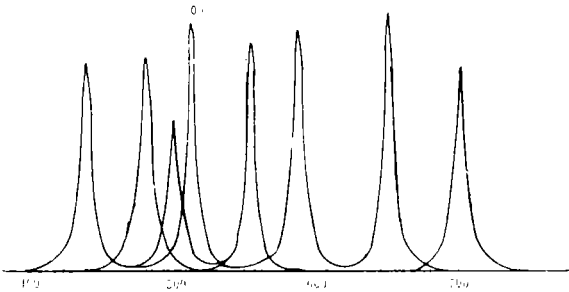


图1 各滤光片透过率曲线

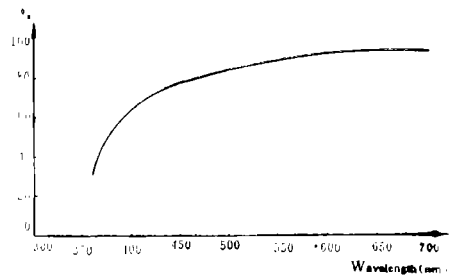


图2 春光放大机镜头分光透过率曲线

由于各块滤光片的峰值透过率与半波宽不同，会造成它们透过光通量的不一，因此必须的对测得的值按各滤光片的光谱曲线下的面积加以规化。

2. 光谱加权系数

光学传递函数的数据是在长春光机所的EROSIV型光学传递函数测定仪上测得的，考虑到光源和接收器的影响，需要测出这台仪器的光谱响应曲线。光谱响应曲线是通过实测光学系统未归化的各单色光传递函数的零频响应值而得到的。

实验中测零频响应值我们选用放大机镜头作为被测系统，因为它的片数少，透过率高，它的透过率曲线见图2。

在仪器的照明光路中分别插入各波长的干涉滤光片，并同时把像面调整到各色光自己的像面位置，在同一条件下分别测出狭缝像的中央信号值。它表征了仪器中光源、光电探测

器、光学系统以及各辅助光学元件的总的光谱响应效果。此总响应值中包括了滤光片透过率和所选用的光学系统的分光透过率，为求光谱加权系数 $N(\lambda)$ ，应在总响应值中分别除去这两项值。把测得的值规化作为纵座标，以滤光片的中心波长为横座标可得到仪器的光谱响应曲线。数据和曲线见图3和图4。

表 1 放大机镜头零频响应值数据结果

色光 (nm)		438	478	496	507	548	579	648	694
零频响应值	T	0.31	0.68	0.56	0.91	1.00	0.99	0.68	0.24
	R	0.33	0.67	0.56	0.89	1.00	0.97	0.67	0.22
	平均	0.34	0.67	0.56	0.90	1.00	0.98	0.68	0.23
像面位置		12.815	12.806	12.795	12.786	12.757	12.731	12.681	12.641
滤光片光谱透过率		0.37	0.38	0.27	0.40	0.40	0.43	0.46	0.36
镜头分光透过率		0.76	0.82	0.84	0.87	0.89	0.91	0.92	0.92
$N(\lambda)$		1.21	2.15	2.47	2.59	2.81	2.50	1.61	0.69
$N(\lambda)$ 规化值		0.43	0.77	0.88	0.92	1.00	0.89	0.57	0.25

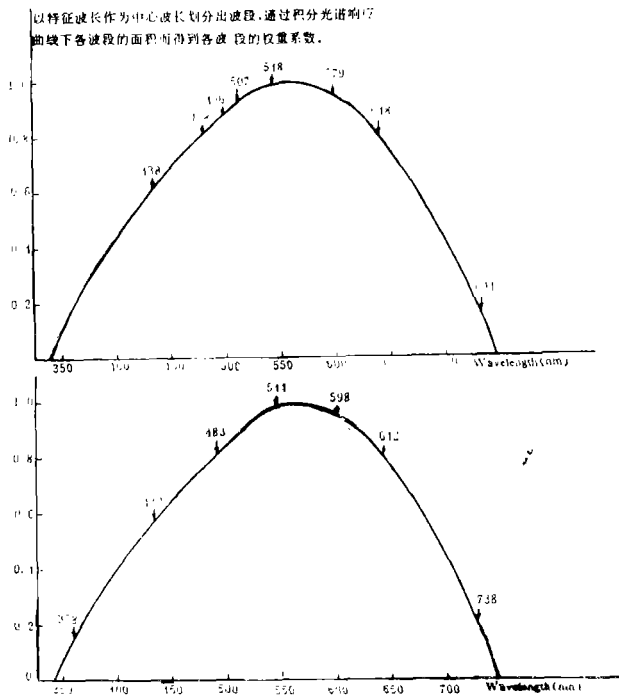


图3 EROS IV型光学传递函数测定仪光谱响应曲线

3. 光学传递函数

我们选用一个二十倍变焦镜头分别测了焦距为500mm, 400mm, 300mm, 180mm, 100mm的各单色光和白光的光学传递函数，单色光的传递函数测量时都以E光的像面作为接收像面。同时也测量了自准像面的传递函数和各色光的像面，数据见表2。

表 2 20倍变焦距镜头白光和各色光传递函数测试结果(f/4.25mm~500mm)

c/mm 焦距f	白光		I 光		G 光		F 光		E 光		D 光		C 光		A 光													
	YTE		E 准		E 准		E 准		E 准		E 准		E 准		E 准													
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T												
500mm	100.50	0.52	.18	.19	.72	.72	.36	.30	.25	.26	.55	.48	.53	.55	.85	.81	.60	.46	.79	.76	.06	.18	.84	.80	.10	.14	.64	.60
	200.22	0.30	.15	.18	.46	.70	.25	.18	.11	.10	.40	.28	.23	.34	.69	.55	.28	.30	.56	.53	.07	.04	.63	.55	.10	.12	.44	.40
	300.10	0.19	.12	.17	.28	.63	.16	.12	.09	.10	.29	.20	.10	.22	.51	.83	.19	.18	.35	.36	.03	.04	.43	.38	.09	.12	.32	.30
	400.07	0.12	.12	.15	.18	.60	.13	.10	.08	.07	.21	.16	.05	.14	.37	.29	.18	.11	.21	.24	.03	.03	.27	.29	.09	.11	.24	.21
像面(mm)	15.526mm		13.785mm		15.087mm		15.525mm		15.818mm		15.443mm		14.966mm		13.831mm													
400mm	100.59	0.60	.21	.23	.78	.73	.40	.37	.40	.40	.57	.54	.64	.64	.89	.83	.68	.58	.83	.82	.14	.18	.88	.85	.14	.17	.74	.72
	200.29	0.34	.18	.20	.52	.53	.26	.26	.19	.19	.40	.37	.31	.36	.70	.67	.40	.34	.67	.66	.08	.03	.73	.70	.14	.15	.54	.05
	300.10	0.18	.18	.19	.40	.40	.20	.18	.16	.12	.27	.28	.11	.16	.50	.50	.27	.25	.48	.50	.03	.04	.55	.55	.14	.15	.41	.34
	400.07	0.13	.17	.11	.36	.34	.12	.12	.14	.10	.17	.21	.05	.08	.31	.38	.23	.18	.32	.39	.03	.03	.40	.42	.12	.14	.31	.28
像面(mm)	16.010mm		14.721mm		15.655mm		16.024mm		16.221mm		16.003mm		15.622mm		14.736mm													
300mm	100.66	0.66	.12	.12	.82	.85	.46	.42	.56	.56	.59	.59	.68	.69	.87	.89	.72	.67	.84	.85	.30	.24	.91	.91	.11	.12	.80	.76
	200.35	0.40	.10	.12	.63	.67	.31	.28	.24	.30	.36	.36	.34	.38	.70	.75	.48	.37	.71	.73	.02	.06	.78	.80	.11	.11	.62	.60
	300.16	0.20	.10	.11	.46	.49	.20	.18	.16	.18	.24	.26	.14	.17	.52	.63	.33	.29	.51	.62	.02	.03	.67	.68	.10	.09	.50	.42
	400.09	0.12	.10	.11	.34	.36	.16	.15	.16	.16	.13	.18	.08	.08	.35	.50	.24	.18	.43	.51	.02	.02	.55	.59	.10	.09	.41	.31
像面(mm)	16.208mm		15.253mm		16.071mm		16.220mm		16.390mm		16.199mm		15.924mm		15.831mm													

續表

c/mm 焦距f	白 光			I 光			G 光			F 光			E 光			D 光			C 光			A 光					
	YTE		R	E 准		R	自 准		R	E 准		R	自 准		R	E 准		R	自 准		R	E 准		R	自 准		R
	T	R		T	R		T	R		T	R		T	R		T	R		T	R		T	R		T	R	
100.740.74	.13	.17	.90	.89	.58	.55	.67	.66	.69	.65	.76	.76	.91	.91	.79	.74	.90	.90	.47	.39	.94	.94	.06	.07	.83	.83	
200.410.45	.06	.06	.71	.75	.40	.37	.41	.39	.38	.43	.44	.80	.79	.57	.45	.78	.80	.04	.11	.85	.87	.07	.07	.70	.67		
180mm 300.200.26	.06	.06	.56	.57	.30	.29	.19	.24	.25	.26	.19	.21	.67	.69	.40	.24	.67	.73	.09	.06	.75	.79	.06	.06	.55	.50	
400.120.15	.06	.06	.43	.45	.23	.23	.14	.17	.15	.18	.10	.10	.55	.60	.26	.10	.55	.64	.02	.03	.65	.71	.04	.04	.45	.38	
500.110.11	.04	.06	.34	.35	.17	.17	.12	.14	.07	.11	.10	.07	.43	.52	.18	.06	.47	.56	.03	.02	.48	.64	.03	.04	.37	.26	
像面(mm)	16.408mm			15.784mm			16.376mm			16.444mm			16.577mm			16.420mm			16.235mm			15.831mm					
100.920.92	.47	.41	.94	.95	.83	.81	.90	.89	.91	.92	.92	.94	.97	.97	.94	.91	.95	.96	.85	.83	.96	.96	.54	.51	.94	.92	
200.780.78	.11	.16	.89	.91	.64	.61	.73	.73	.75	.74	.80	.81	.93	.91	.83	.81	.89	.91	.59	.53	.93	.93	.03	.06	.84	.84	
100mm 300.600.63	.08	.07	.81	.87	.52	.49	.55	.58	.58	.59	.64	.66	.87	.91	.73	.69	.81	.87	.28	.20	.89	.92	.04	.03	.77	.79	
400.440.50	.05	.07	.72	.81	.43	.44	.40	.46	.45	.48	.47	.52	.81	.89	.63	.59	.73	.84	.06	.08	.83	.91	.09	.10	.70	.72	
500.310.39	.03	.06	.63	.78	.38	.40	.29	.37	.35	.41	.33	.36	.75	.89	.54	.49	.64	.81	.09	.18	.78	.93	.06	.07	.62	.69	
像面(mm)	16.603mm			16.133mm			16.554mm			15.634mm			16.739mm			16.52mm			16.481mm			16.203mm					

另外我们选用一个AF傻瓜镜头测出了各单色光和白光的传递函数，数据见表3。

用所测得的光谱加权系数 $N(\lambda)$ 加权平均各单色光的光学传递函数，所得数据如图4所示。

表3 AF傻瓜相机镜头白光和各单色光传递函数

色光 空间频率 c/mm	白光		多色光		438		481		406		507		548		570		648		694		
	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	R	T	
	5	0.96	0.97	0.98	0.95	0.93	0.98	0.97	0.99	0.98	0.98	0.97	0.99	0.97	0.99	0.98	0.98	0.97	0.98	0.97	0.98
10	0.91	0.93	0.92	0.88	0.85	0.94	0.93	0.95	0.94	0.93	0.92	0.95	0.93	0.96	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.89	
15	0.85	0.86	0.88	0.82	0.76	0.90	0.88	0.91	0.88	0.89	0.88	0.90	0.87	0.92	0.87	0.83	0.83	0.80	0.78		
20	0.78	0.74	0.79	0.74	0.78	0.84	0.83	0.84	0.82	0.83	0.82	0.82	0.80	0.81	0.79	0.76	0.74	0.71	0.64		
25	0.72	0.72	0.71	0.69	0.62	0.80	0.77	0.79	0.77	0.77	0.76	0.73	0.76	0.74	0.71	0.67	0.64	0.59	0.58		
30	0.63	0.64	0.64	0.64	0.56	0.74	0.70	0.73	0.70	0.71	0.69	0.65	0.67	0.65	0.62	0.58	0.54	0.48	0.42		
35	0.57	0.58	0.58	0.59	0.59	0.69	0.65	0.66	0.64	0.63	0.62	0.58	0.59	0.57	0.54	0.48	0.44	0.38	0.32		
40	0.50	0.49	0.51	0.55	0.45	0.63	0.60	0.59	0.59	0.57	0.56	0.51	0.52	0.49	0.46	0.40	0.37	0.30	0.24		
45	0.44	0.45	0.45	0.50	0.49	0.57	0.54	0.54	0.53	0.50	0.50	0.44	0.44	0.41	0.39	0.33	0.30	0.25	0.20		
50	0.39	0.36	0.30	0.45	0.34	0.52	0.48	0.47	0.46	0.44	0.41	0.38	0.38	0.34	0.32	0.27	0.26	0.19	0.17		

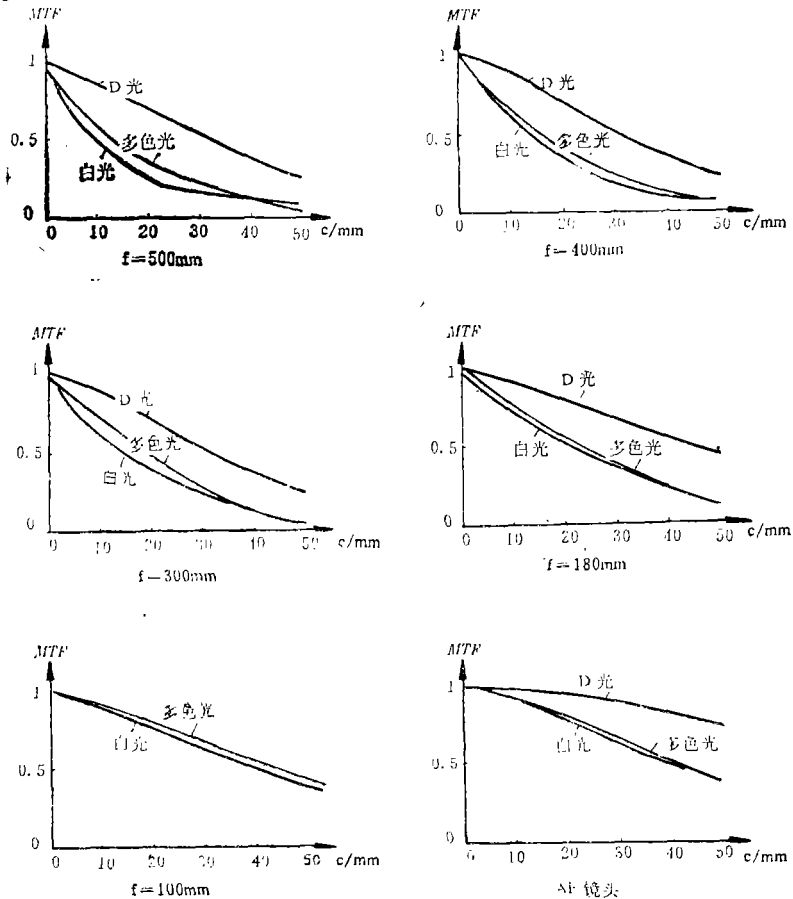


图4 白光和多色光的光学传递函数曲线

实线——为多色光；虚线……为白光；点划线— · — · —为D光

五、结 论

从图 4 中可以看出, 实测的白光传递函数和加权平均求出的多色光传递函数的曲线比较接近。

另外, 我们把测得的各波长的权重系数提供给光学设计者, 查到这些波长的光学材料的折射率, 采用同一个成像基准面算出各波长的离焦光学传递函数, 用权重系数加权平均算出多色光传递函数, 结果与实际测得的白光传递函数有很好的近似。此外, 我们从光学设计实用角度出发, 选择了常用的几个特征谱线, 例如 C 、 d 、 f 线三个波长, 并修改各波长的权重系数而得到的多色光传递函数和实际测得的白光学传递函数也比较近似。

通过以上实验可以得出下列结论:

1. 用这种方法基本上可以准确地求出多色光的光学传递函数。2. 基本上可以用多色光传递函数估计白光的光学传递函数。3. 有了上述结论, 对于长焦距摄影物镜二级光谱允差的评价提供了较科学的手段

参 考 文 献

- [1] 韩昌元编著,《信息光学基础理论及应用》,长春出版社,1989年12月
- [2] 苏大图编著,《光学测量》,机械工业出版社,1988年6月
- [3] S. Bosch, I. Juvells, and J. R. DEF. Moneo; *Opt. Acta*, 32. 1397-1405 (1985)
- [4] Harbans S. Dhadwal, Jeffrey Hantgan; *Opt. Eng.*, Nov. 1989/28No. 11/1237-1240
- [5] Muralidhara Subbarao; *Appl. Opt.*, 29, No., 4/1 Feb., (1990)

An Experimental Research of the Polychromatic Optical Transfer Function

Wu Xiaodong, Wu Changfa and Han Changyuan

Abstract

In this paper the polychromatic optical transfer function of a real optical system is obtained by experimental methods, and the approximation degree is given when substituting for the white light transfer function, and the certification method of the weight factors by using experiment is also examined.