

Анализ зависимости характеристик одного объектива от расстояний между элементами

Описание задачи

Объектив состоит из четырех крупных блоков, разделенных тремя воздушными зазорами разной толщины. Каждый зазор имеет некоторый расчетный («идеальный») размер. Исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на оптические характеристики объектива.

1.1. Зависимость ФПМ от длин воздушных зазоров в объективе

Цель эксперимента

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на функцию передачи модуляции объектива.

Получение данных

Для каждого набора толщин зазоров снимается ФПМ (тангенциальная и сагитальная) на рабочей частоте (61 штрих на мм) при четырех разных длинах волн (400, 550, 700, 850 нм) и трех углах (0, 3, 6 градусов). Из полученной таким образом серии измерений выбирается значение с наименьшим значением ФПМ. Этот худший показатель и будет целевой функцией. Таблица с данными - приложение 1.

Обработка данных

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - худший ФПМ. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

$$y = b_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$
$$b_0 = 1.66$$

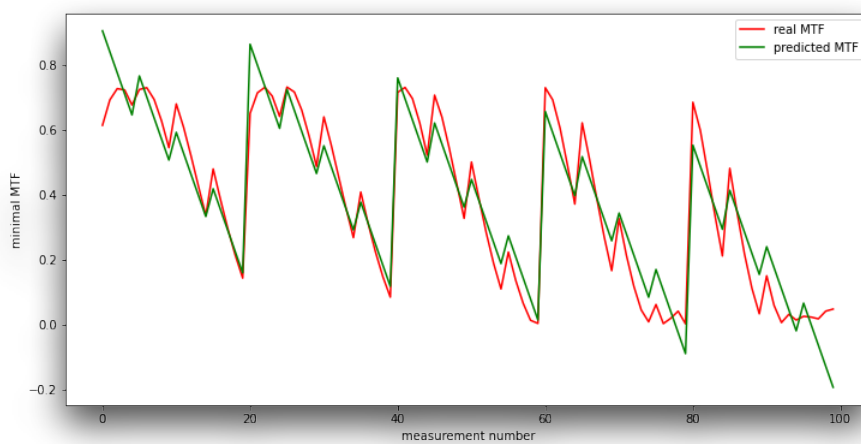
$$b_1 = -0.05$$

$$b_2 = -0.17$$

$$b_3 = -0.65$$

Визуализация и анализ результатов

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).



Оценка качества регрессии:

$$R^2 = 0.91$$

1.2.Зависимость радиуса RMS от длин воздушных зазоров в объективе

Цель эксперимента

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на радиус RMS.

Получение данных

Измерения проводятся аналогично пункту 1. Из серии измерений при разных длинах волн и углах лучей выбираем наибольший (то есть худший) радиус RMS. Таблица с данными представлена в приложении 1

Обработка данных

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - худший радиус RMS. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

$$y = x_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$

$$b_0 = - 12.5$$

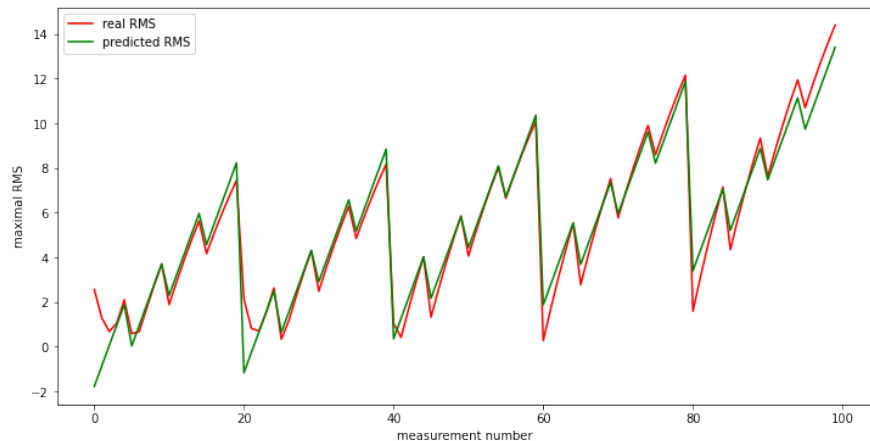
$$b_1 = 0.76$$

$$b_2 = 2.26$$

$$b_3 = 9.17$$

Визуализация и анализ результатов

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).



Оценка качества регрессии:

$$R^2 = 0.95$$

1.3. Зависимость длины рабочего отрезка (?) от длин воздушных зазоров в объективе

Цель эксперимента

В данном разделе исследуется влияние неточностей в исполнении зазоров на фокусное расстояние.

Получение данных

Для каждой комбинации толщин воздушных зазоров проводится фокусировка системы путем изменения величины рабочего отрезка.

Обработка данных

К полученным данным была применена модель линейной регрессии, где входные переменные - это толщины воздушных зазоров, а выходные данные - длина рабочего отрезка. Итоговое уравнение выглядит следующим образом

```
(5.67416503921765, array([-0.02729377, -0.38417294, -1.9967003 ]))
```

$$y = x_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3$$

$$b_0 = 5.67$$

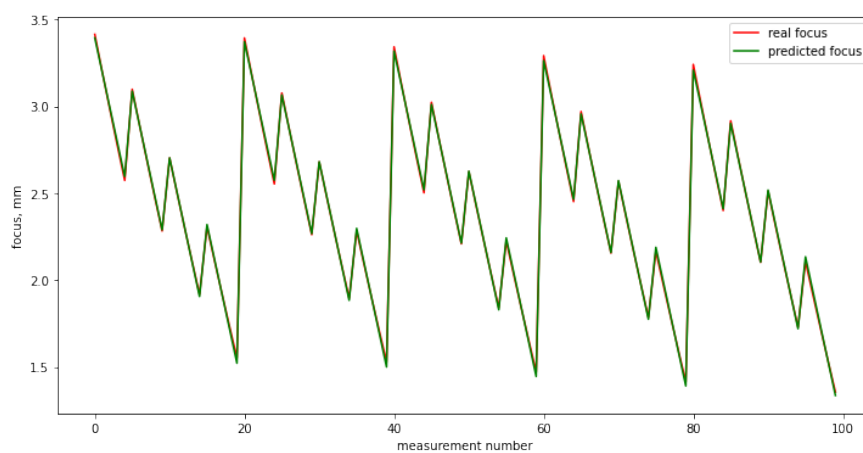
$$b_1 = -0.03$$

$$b_2 = -0.38$$

$$b_3 = -2.00$$

Визуализация и анализ результатов

На графике ниже представлено сравнение аналитических результатов, которые дает модель линейной регрессии (зеленый график) и экспериментально полученных данных (красный график).



Оценка качества регрессии:

$$R^2 = 0.9993$$

Из графика и оценки видно, что модель предсказывает фокус с крайне высокой точностью.

Вывод

Наибольшее влияние на оптические характеристики системы оказывает точность, с которой выдержан зазор между третьим и четвертым блоком.

2.1. Исследование изменения характеристик при децентровке составных частей объектива (черновой)

Получение данных

Для трех основных блоков, из которых состоит объектив происходит смещение перпендикулярно оси системы по двум осям (X и Y). Из-за сравнительно большого количества степеней свободы (6) просканировать весь диапазон за разумное время не представляется возможным, поэтому исследуются смещения отдельно по одной оси для каждого модуля, попарные смещения по одной и двум осям и частично смещения трех модулей одновременно.

Обработка данных

Приложение 1. Таблица экспериментальных и предсказанных данных зависимости ФПМ от толщины воздушных зазоров

1 зазор, мм	2 зазор, мм	3 зазор, мм	Худший ФПМ (измеренный)	Худший ФПМ (предсказанный)
0.2	0.2	1.1	0.61	0.9
0.2	0.2	1.2	0.69	0.84
0.2	0.2	1.3	0.73	0.77
0.2	0.2	1.4	0.72	0.71
0.2	0.2	1.5	0.68	0.64
0.2	1	1.1	0.72	0.77
0.2	1	1.2	0.73	0.7
0.2	1	1.3	0.69	0.64
0.2	1	1.4	0.63	0.57
0.2	1	1.5	0.54	0.51
0.2	2	1.1	0.68	0.59
0.2	2	1.2	0.61	0.53
0.2	2	1.3	0.52	0.46
0.2	2	1.4	0.43	0.4

0.2	2	1.5	0.34	0.33
0.2	3	1.1	0.48	0.42
0.2	3	1.2	0.38	0.35
0.2	3	1.3	0.29	0.29
0.2	3	1.4	0.21	0.22
0.2	3	1.5	0.14	0.16
1	0.2	1.1	0.65	0.86
1	0.2	1.2	0.71	0.8
1	0.2	1.3	0.73	0.73
1	0.2	1.4	0.7	0.67
1	0.2	1.5	0.64	0.6
1	1	1.1	0.73	0.72
1	1	1.2	0.72	0.66
1	1	1.3	0.66	0.59
1	1	1.4	0.58	0.53
1	1	1.5	0.49	0.46
1	2	1.1	0.64	0.55
1	2	1.2	0.55	0.49
1	2	1.3	0.45	0.42
1	2	1.4	0.36	0.36
1	2	1.5	0.27	0.29
1	3	1.1	0.41	0.38
1	3	1.2	0.31	0.31
1	3	1.3	0.22	0.25
1	3	1.4	0.15	0.18
1	3	1.5	0.08	0.12
3	0.2	1.1	0.71	0.76

3	0.2	1.2	0.73	0.69
3	0.2	1.3	0.7	0.63
3	0.2	1.4	0.62	0.56
3	0.2	1.5	0.52	0.5
3	1	1.1	0.71	0.62
3	1	1.2	0.64	0.56
3	1	1.3	0.54	0.49
3	1	1.4	0.43	0.43
3	1	1.5	0.33	0.36
3	2	1.1	0.5	0.45
3	2	1.2	0.39	0.38
3	2	1.3	0.28	0.32
3	2	1.4	0.19	0.25
3	2	1.5	0.11	0.19
3	3	1.1	0.22	0.27
3	3	1.2	0.14	0.21
3	3	1.3	0.07	0.14
3	3	1.4	0.01	0.08
3	3	1.5	0.0	0.01
5	0.2	1.1	0.73	0.66
5	0.2	1.2	0.69	0.59
5	0.2	1.3	0.6	0.53
5	0.2	1.4	0.49	0.46
5	0.2	1.5	0.37	0.4
5	1	1.1	0.62	0.52
5	1	1.2	0.51	0.45
5	1	1.3	0.38	0.39

5	1	1.4	0.27	0.32
5	1	1.5	0.17	0.26
5	2	1.1	0.33	0.34
5	2	1.2	0.21	0.28
5	2	1.3	0.12	0.21
5	2	1.4	0.04	0.15
5	2	1.5	0.01	0.08
5	3	1.1	0.06	0.17
5	3	1.2	0.0	0.1
5	3	1.3	0.02	0.04
5	3	1.4	0.04	-0.03
5	3	1.5	0.0	-0.09
7	0.2	1.1	0.68	0.55
7	0.2	1.2	0.6	0.49
7	0.2	1.3	0.47	0.42
7	0.2	1.4	0.33	0.36
7	0.2	1.5	0.21	0.29
7	1	1.1	0.48	0.41
7	1	1.2	0.34	0.35
7	1	1.3	0.22	0.28
7	1	1.4	0.11	0.22
7	1	1.5	0.03	0.15
7	2	1.1	0.15	0.24
7	2	1.2	0.06	0.17
7	2	1.3	0.01	0.11
7	2	1.4	0.03	0.04
7	2	1.5	0.01	-0.02

7	3	1.1	0.02	0.07
7	3	1.2	0.02	0.0
7	3	1.3	0.02	-0.06
7	3	1.4	0.04	-0.13
7	3	1.5	0.05	-0.19

**Приложение 2. Таблица экспериментальных и
предсказанных данных зависимости радиуса RMS
от толщины воздушных зазоров**

1 зазор, мм	2 зазор, мм	3 зазор, мм	Худший RMS радиус(измеренный)	Худший RMS радиус(предсказанный)
0.2	0.2	1.1	2.56	-1.78
0.2	0.2	1.2	1.28	-0.86
0.2	0.2	1.3	0.68	0.05
0.2	0.2	1.4	1.05	0.97
0.2	0.2	1.5	2.1	1.89
0.2	1	1.1	0.58	0.03
0.2	1	1.2	0.67	0.95
0.2	1	1.3	1.72	1.87
0.2	1	1.4	2.75	2.78
0.2	1	1.5	3.71	3.7
0.2	2	1.1	1.88	2.3
0.2	2	1.2	2.91	3.22
0.2	2	1.3	3.88	4.13
0.2	2	1.4	4.78	5.05
0.2	2	1.5	5.63	5.97
0.2	3	1.1	4.16	4.57
0.2	3	1.2	5.07	5.48
0.2	3	1.3	5.92	6.4
0.2	3	1.4	6.71	7.32
0.2	3	1.5	7.45	8.23
1	0.2	1.1	2.12	-1.17
1	0.2	1.2	0.82	-0.25
1	0.2	1.3	0.7	0.66
1	0.2	1.4	1.55	1.58
1	0.2	1.5	2.63	2.5

1	1	1.1	0.34	0.64
1	1	1.2	1.16	1.56
1	1	1.3	2.28	2.48
1	1	1.4	3.32	3.39
1	1	1.5	4.3	4.31
1	2	1.1	2.48	2.91
1	2	1.2	3.53	3.83
1	2	1.3	4.51	4.74
1	2	1.4	5.43	5.66
1	2	1.5	6.29	6.58
1	3	1.1	4.85	5.18
1	3	1.2	5.76	6.09
1	3	1.3	6.62	7.01
1	3	1.4	7.42	7.93
1	3	1.5	8.17	8.84
3	0.2	1.1	1.03	0.35
3	0.2	1.2	0.42	1.27
3	0.2	1.3	1.68	2.19
3	0.2	1.4	2.89	3.1
3	0.2	1.5	4.02	4.02
3	1	1.1	1.33	2.17
3	1	1.2	2.57	3.08
3	1	1.3	3.73	4.0
3	1	1.4	4.83	4.92
3	1	1.5	5.85	5.83
3	2	1.1	4.06	4.43
3	2	1.2	5.15	5.35

3	2	1.3	6.18	6.27
3	2	1.4	7.13	7.18
3	2	1.5	8.03	8.1
3	3	1.1	6.65	6.7
3	3	1.2	7.6	7.62
3	3	1.3	8.48	8.53
3	3	1.4	9.31	9.45
3	3	1.5	10.09	10.37
5	0.2	1.1	0.27	1.87
5	0.2	1.2	1.7	2.79
5	0.2	1.3	3.06	3.71
5	0.2	1.4	4.33	4.63
5	0.2	1.5	5.52	5.54
5	1	1.1	2.78	3.69
5	1	1.2	4.08	4.6
5	1	1.3	5.31	5.52
5	1	1.4	6.45	6.44
5	1	1.5	7.53	7.36
5	2	1.1	5.77	5.95
5	2	1.2	6.91	6.87
5	2	1.3	7.98	7.79
5	2	1.4	8.98	8.71
5	2	1.5	9.91	9.62
5	3	1.1	8.59	8.22
5	3	1.2	9.58	9.14
5	3	1.3	10.5	10.05
5	3	1.4	11.36	10.97

5	3	1.5	12.16	11.89
7	0.2	1.1	1.59	3.4
7	0.2	1.2	3.11	4.31
7	0.2	1.3	4.55	5.23
7	0.2	1.4	5.89	6.15
7	0.2	1.5	7.15	7.06
7	1	1.1	4.34	5.21
7	1	1.2	5.72	6.13
7	1	1.3	7.01	7.04
7	1	1.4	8.21	7.96
7	1	1.5	9.34	8.88
7	2	1.1	7.62	7.48
7	2	1.2	8.81	8.39
7	2	1.3	9.93	9.31
7	2	1.4	10.97	10.23
7	2	1.5	11.95	11.14
7	3	1.1	10.7	9.74
7	3	1.2	11.73	10.66
7	3	1.3	12.68	11.58
7	3	1.4	13.57	12.49
7	3	1.5	14.4	13.41

Приложение 3. Таблица экспериментальных и предсказанных данных зависимости фокуса от толщины воздушных зазоров

1 зазор, мм	2 зазор, мм	3 зазор, мм	Фокус(измеренный)	Фокус(предсказанный)
0.2	0.2	1.1	3.42	3.4

0.2	0.2	1.2	3.2	3.2
0.2	0.2	1.3	2.99	3.0
0.2	0.2	1.4	2.78	2.8
0.2	0.2	1.5	2.57	2.6
0.2	1	1.1	3.1	3.09
0.2	1	1.2	2.89	2.89
0.2	1	1.3	2.68	2.69
0.2	1	1.4	2.48	2.49
0.2	1	1.5	2.28	2.29
0.2	2	1.1	2.7	2.7
0.2	2	1.2	2.5	2.5
0.2	2	1.3	2.3	2.3
0.2	2	1.4	2.11	2.1
0.2	2	1.5	1.92	1.91
0.2	3	1.1	2.31	2.32
0.2	3	1.2	2.11	2.12
0.2	3	1.3	1.92	1.92
0.2	3	1.4	1.73	1.72
0.2	3	1.5	1.55	1.52
1	0.2	1.1	3.39	3.37
1	0.2	1.2	3.18	3.17
1	0.2	1.3	2.97	2.97
1	0.2	1.4	2.76	2.77
1	0.2	1.5	2.55	2.57
1	1	1.1	3.08	3.07
1	1	1.2	2.87	2.87
1	1	1.3	2.66	2.67

1	1	1.4	2.46	2.47
1	1	1.5	2.26	2.27
1	2	1.1	2.68	2.68
1	2	1.2	2.48	2.48
1	2	1.3	2.28	2.28
1	2	1.4	2.09	2.08
1	2	1.5	1.9	1.88
1	3	1.1	2.28	2.3
1	3	1.2	2.09	2.1
1	3	1.3	1.9	1.9
1	3	1.4	1.71	1.7
1	3	1.5	1.53	1.5
3	0.2	1.1	3.34	3.32
3	0.2	1.2	3.13	3.12
3	0.2	1.3	2.91	2.92
3	0.2	1.4	2.71	2.72
3	0.2	1.5	2.5	2.52
3	1	1.1	3.02	3.01
3	1	1.2	2.81	2.81
3	1	1.3	2.61	2.61
3	1	1.4	2.41	2.41
3	1	1.5	2.21	2.21
3	2	1.1	2.62	2.63
3	2	1.2	2.42	2.43
3	2	1.3	2.22	2.23
3	2	1.4	2.03	2.03
3	2	1.5	1.84	1.83

3	3	1.1	2.23	2.24
3	3	1.2	2.03	2.04
3	3	1.3	1.84	1.84
3	3	1.4	1.65	1.64
3	3	1.5	1.47	1.44
5	0.2	1.1	3.29	3.26
5	0.2	1.2	3.08	3.06
5	0.2	1.3	2.86	2.87
5	0.2	1.4	2.66	2.67
5	0.2	1.5	2.45	2.47
5	1	1.1	2.97	2.96
5	1	1.2	2.76	2.76
5	1	1.3	2.56	2.56
5	1	1.4	2.35	2.36
5	1	1.5	2.16	2.16
5	2	1.1	2.57	2.57
5	2	1.2	2.37	2.37
5	2	1.3	2.17	2.17
5	2	1.4	1.98	1.97
5	2	1.5	1.79	1.77
5	3	1.1	2.17	2.19
5	3	1.2	1.97	1.99
5	3	1.3	1.78	1.79
5	3	1.4	1.6	1.59
5	3	1.5	1.41	1.39
7	0.2	1.1	3.24	3.21
7	0.2	1.2	3.03	3.01

7	0.2	1.3	2.81	2.81
7	0.2	1.4	2.6	2.61
7	0.2	1.5	2.4	2.41
7	1	1.1	2.92	2.9
7	1	1.2	2.71	2.7
7	1	1.3	2.5	2.5
7	1	1.4	2.3	2.3
7	1	1.5	2.1	2.1
7	2	1.1	2.51	2.52
7	2	1.2	2.31	2.32
7	2	1.3	2.11	2.12
7	2	1.4	1.92	1.92
7	2	1.5	1.73	1.72
7	3	1.1	2.11	2.13
7	3	1.2	1.91	1.93
7	3	1.3	1.72	1.73
7	3	1.4	1.54	1.54
7	3	1.5	1.36	1.34