



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет  
имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

---

ФАКУЛЬТЕТ

Радиоэлектроники и лазерной техники

КАФЕДРА

Лазерных и оптико-электронных систем (РЛ-2)

# РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

## *К КУРСОВОЙ РАБОТЕ*

### *НА ТЕМУ:*

*Зеркальный объектив с линзовым корректором*

Студент

РЛ2-62Б

\_\_\_\_\_

Иванченко А.М.

Руководитель курсовой работы

\_\_\_\_\_

Батшев В.И.

2022 г.

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

---

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(Индекс)  
\_\_\_\_\_  
(И.О.Фамилия)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**З А Д А Н И Е  
на выполнение курсовой работы**

по дисциплине                      Прикладная оптика

Студент группы                      РЛ2-62Б                      Иванченко Анна Михайловна

Тема курсовой работы: ***Зеркальный объектив с линзовым корректором***

Направленность КР – учебная. Источник тематики – кафедра.

График выполнения работы: 25% к \_\_\_\_ нед., 50% к \_\_\_\_ нед., 75% к \_\_\_\_ нед., 100% к \_\_\_\_ нед.

***Задание***

Рассчитать оптическую систему зеркально-линзового объектива, состоящего из:

а) двухзеркальной системы Кассегрена, б) двухлинзового афокального корректора комы (корректор Чуриловского), в) одиночной линзы для исправления кривизны поверхности изображения (линза Смита).

Исходными данными являются: диаметр главного зеркала  $D_1 = 150$  мм, эквивалентное фокусное расстояние объектива  $f^* = 850$  мм, расстояние между зеркалами -  $d = 170$  мм, вынос плоскости изображения за главное зеркало в зеркальной части системы  $\Delta = 36$  мм, расстояние от вершины главного зеркала до первой линзы корректора  $d_k = 6$  мм, модель приемника излучения e2v EV76C560.

Расстояние от последней поверхности оптической системы до плоскости приемника излучения не менее 3 мм. Материалы линз – стекло оптическое бесцветное ГОСТ 3514-94.

***Оформление курсовой работы:***

Расчетно-пояснительная записка на \_\_\_\_\_ листах формата А4.

Схема оптическая принципиальная (А2), схема оптическая с ходом лучей (А2), оптический выпуск (А1).

Дата выдачи задания «14 » февраля 2022 г.

**Руководитель курсовой работы**

\_\_\_\_\_

В.И. Батшев

**Студент**

\_\_\_\_\_

А.М. Иванченко

Примечание: Задание оформляется в двух экземплярах: один выдается студенту, второй хранится на кафедре.

## Содержание

1. Габаритный расчёт телескопической системы Кассегрена.....	4
2. Расчёт корректора Чуриловского.....	6
3. Расчёт линзы Смита.....	9
4. Оптимизация полученной системы.....	12
5. Список литературы.....	16

## 1. Габаритный расчёт телескопической системы Кассегрена

Дано:

$$D_1 = 150 \text{ мм}$$

$$f^* = 850 \text{ мм}$$

$$d = 170 \text{ мм}$$

$$\Delta = 36 \text{ мм}$$

$$d_k = 6 \text{ мм}$$

$$S'_2 = d + \Delta = 206 \text{ мм}$$

$$H = D_1 / 2 = 75 \text{ мм}$$

$$q = S'_2 / f^* = 0.242$$

$$\beta = (q - \Delta / f^*) / (1 - q) = 0.264$$

$$\beta = -S_2 / S'_2 = -f'_1 / f^*$$

$$f'_1 = -224.379 \text{ мм}$$

$$S_2 = -54.379 \text{ мм}$$

$$r_1 = -2 \beta f^* = -448.758 \text{ мм}$$

$$r_2 = (-2 \beta q f^*) / (1 - \beta) = -147.764 \text{ мм}$$

$$A_{\text{эКВ}} = D_1 / |f| = 0.176$$

$$h_0 = qH = 18.176$$

$$D_2 = 2h_0 = 36.353$$

$$S'_1 = S_2 + S'_2 - \Delta = -224.379 = f'_1$$

Система предфокальная

Гл. зеркало – параболоид вращения (стр.257):

$$e_1^2 = 1$$

$$e_2^2 = [(1 + \beta) / (1 - \beta)]^2 = 2.949$$

Вторичное зеркало – выпуклый гиперболоид

Коэффициент астигматизма в двухзеркальной системе

$$\Sigma \Pi a = (1 - \beta + q\beta) / q = 3.301$$

Приемник излучения e2v EV76C560

Sensor Active area: 6.9 x 5.5 mm diagonal 8.7 mm

Real Image height  $y' = 4.35 \text{ мм}$

Диаметр выходного зрачка зеркал

$$D' = 45,44124 \text{ мм} = D_{\text{л}} - \text{совпадает с диаметром входного зрачка линзового корректора}$$

Расстояние от выходного зрачка

$$S'_p = -257,5001 + 206 = -51,5 \text{ мм} = S_{p\_линз} - \text{совпадает с расстоянием до входного зрачка корректора}$$

Расстояние до корректора:

$$S_{\text{л}} = \Delta - d_k = 30 \text{ мм}$$

Меридиональная кома:

$$\Delta y'_k = (42.676981 + 8.450562) / 2 = 25.564 \text{ мм}$$

Также мы можем получить информацию о положении и размере выходного зрачка двухзеркального объектива:

Exit Pupil Diameter	:	45,44124
Exit Pupil Position	:	-257,5001

$$D'_3 = 45,44 \text{ мм}$$

$$S'_{p_l} = -257,5 \text{ мм}$$

$$S_{p_{\text{л}}} = S'_{p_l} + s'_2 = -51,5 \text{ мм}$$

$$S_{\text{л}} = \Delta - d_k = 30$$

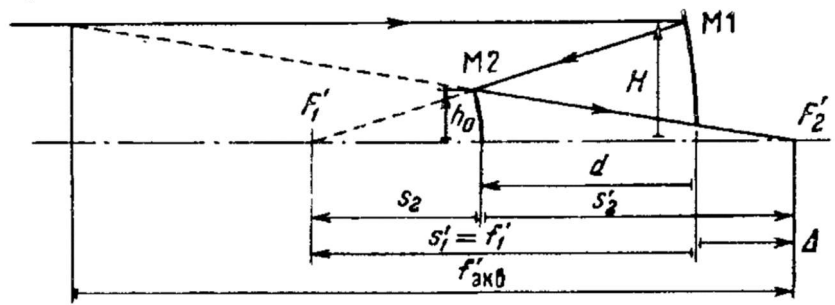
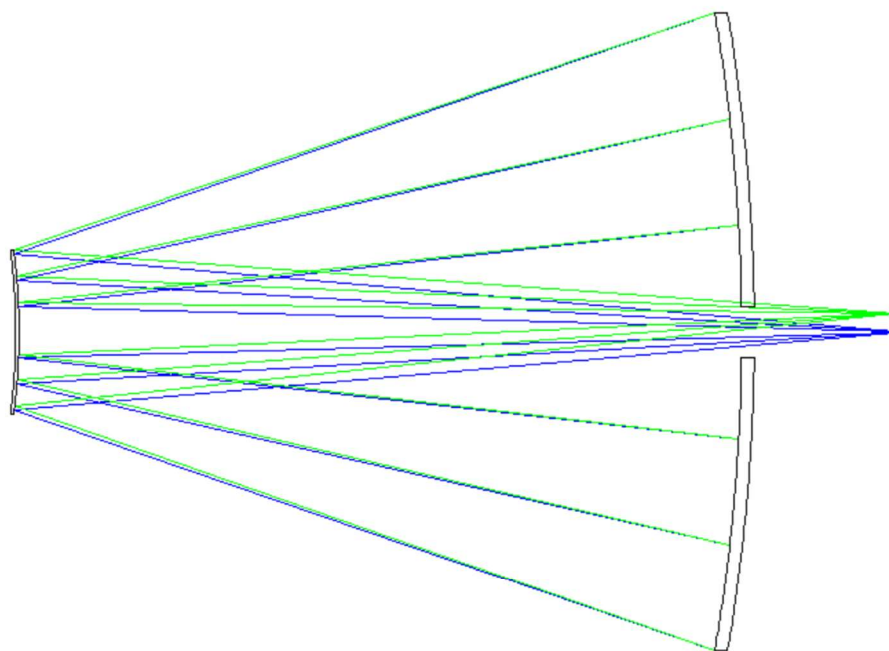


Рис. 6.4. Основные размеры двухзеркальной системы



Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
*	Standard		-448.758	-170.000	MIRROR	75.000	-1.000
2	Standard		-147.764	206.000	MIRROR	19.215	-2.949
IMA	Standard		Infinity	-		4.393	0.000

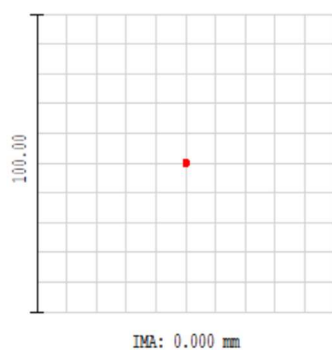


Layout

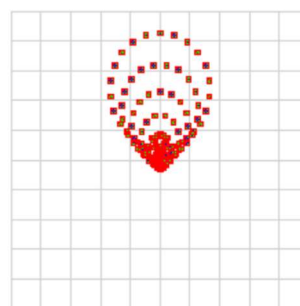
21.06.2022  
Total Axial Length: 206.00000 mm

KP Ivanchenko good spot diagram.zmx  
Configuration 1 of 1

+ 0.4800  
x 0.5461  
■ 0.6438



IMA: 0.000 mm



IMA: 4.350 mm

Surface: IMA

Spot Diagram

## 2. Расчёт корректора Чуриловского

Корректор такой конфигурации был предложен профессором В.Н. Чуриловским в 1934 году. Компенсатор состоит из двух бесконечно тонких линз, работающих в сходящихся пучках лучей. Данная вариация корректора не будет вносить в систему хроматических aberrаций (т.е. будет являться апохроматом) в том случае, если обе линзы будут изготовлены из стекла одной марки, а их оптические силы будут равны по модулю и противоположны по знаку.

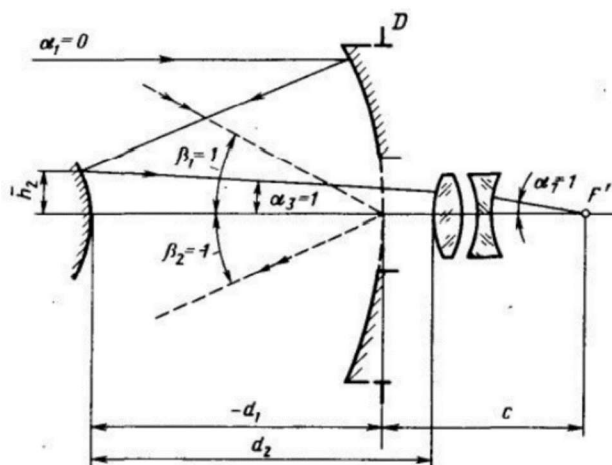


Рисунок 2

Условия нормировки при расчёте:

$$\alpha_1 = 0; \alpha_3 = \alpha_7 = 1; n_1 = 1; h_1 = 1; \beta_1 = 1; H_1 = 0;$$

$$h_2 = 1; \beta_2 = -1; I = -1; n_2 = -1.$$

Для параболического зеркала:  $S_I = P = 0$

$$S_{II} = -\Delta y'_k = -25,564$$

$$I = -n_3 \alpha_3 (S_{\text{л}} - S_{\text{пл}}) \beta_3 = -81,5$$

$$r_k = \frac{h_k(n_{k+1} - n_k)}{\alpha_{k+1}n_{k+1} - \alpha_k n_k} \quad d_k = \frac{h_k - h_{k+1}}{\alpha_{k+1}}$$

$$h_3 = S_{\text{л}} = 30 \text{ мм}$$

$$r_3 = \frac{h_3(n_4 - n_3)}{\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3} = 241,471 \text{ мм}$$

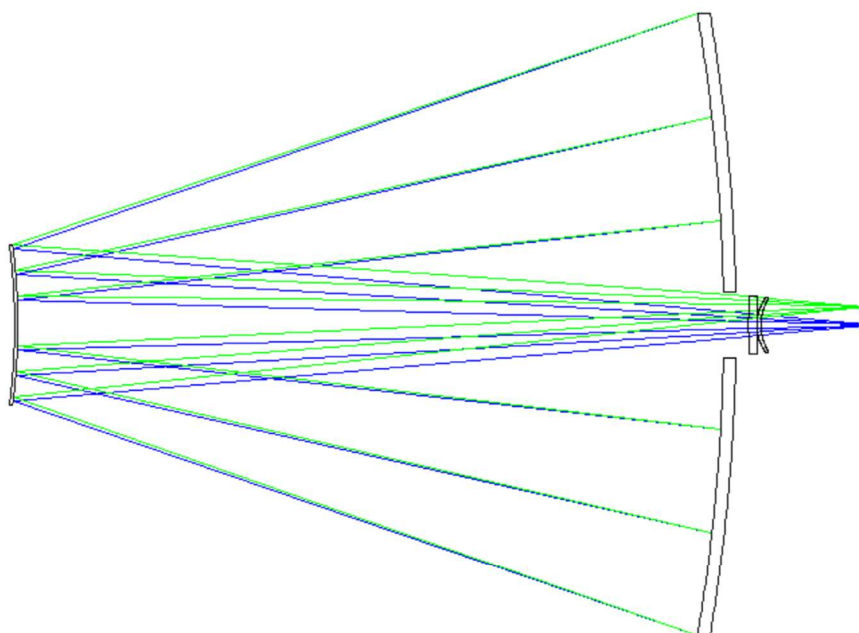
$$r_4 = \frac{h_3(n_5 - n_4)}{\alpha_5 n_5 - \alpha_4 n_4} = 107,154$$

$$r_5 = \frac{h_3(n_6 - n_5)}{\alpha_6 n_6 - \alpha_5 n_5} = 11,436 \text{ мм}$$

$$r_6 = \frac{h_3(n_7 - n_6)}{\alpha_7 n_7 - \alpha_6 n_6} = 12,158$$

При задании системы в Zemax добавим линзам толщину, выбранную из соображений сочетания ликвидации комы и минимального внесения новых aberrаций.

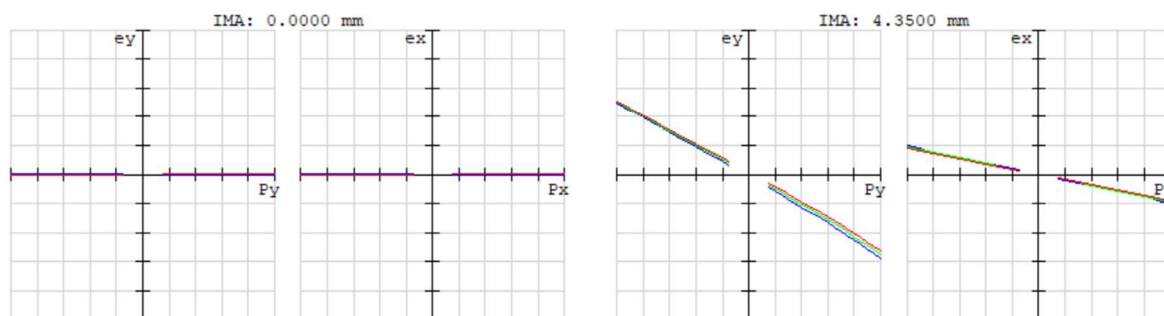
Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
*	Standard		-448.758	-170.000	MIRROR	75.000	-1.000
2	Standard		-147.764	176.000	MIRROR	19.288	-2.949
3	Standard		241.471	2.000	LZ_K8	6.815	0.000
4	Standard		107.154	0.000		6.697	0.000
5	Standard		11.436	1.000	LZ_K8	6.598	0.000
6	Standard		12.158	25.469	M	6.407	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		4.451	0.000



Layout

21.06.2022  
Total Axial Length: 204.46850 mm

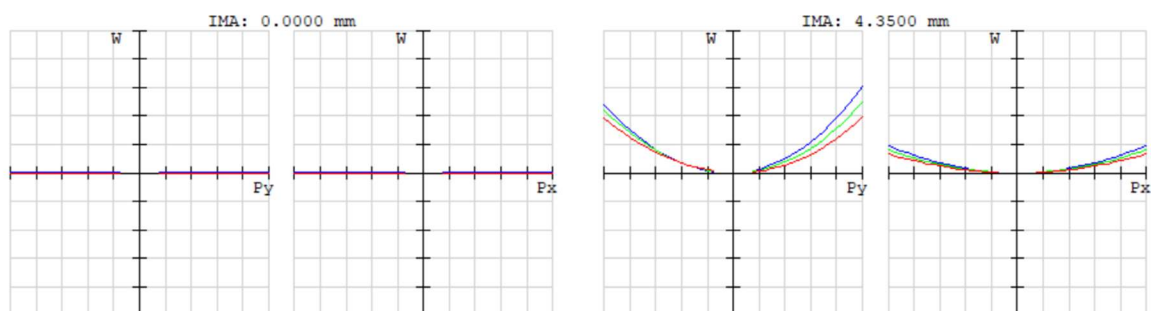
KP\_Ivanchenko\_corrector.zmx  
Configuration 1 of 1



Transverse Ray Fan Plot

21.06.2022  
Maximum Scale:  $\pm 200.000 \mu\text{m}$ .  
0.480 0.546 0.644  
Surface: Image

KP\_Ivanchenko\_corrector.zmx  
Configuration 1 of 1

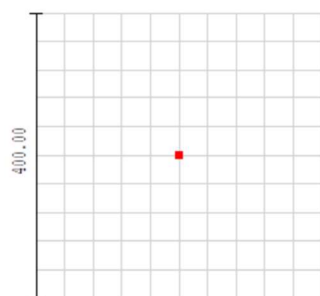


### Optical Path Difference

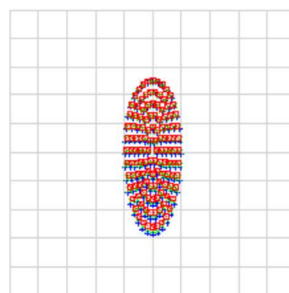
21.06.2022  
 Maximum Scale:  $\pm 20.000$  Waves.  
 0.480 0.546 0.644  
 Surface: Image

KP\_Ivanchenko\_corrector.zmx  
 Configuration 1 of 1

+ 0.4800  
 × 0.5461  
 ■ 0.6438



IMA: 0.000 mm



IMA: 4.350 mm

Surface: IMA

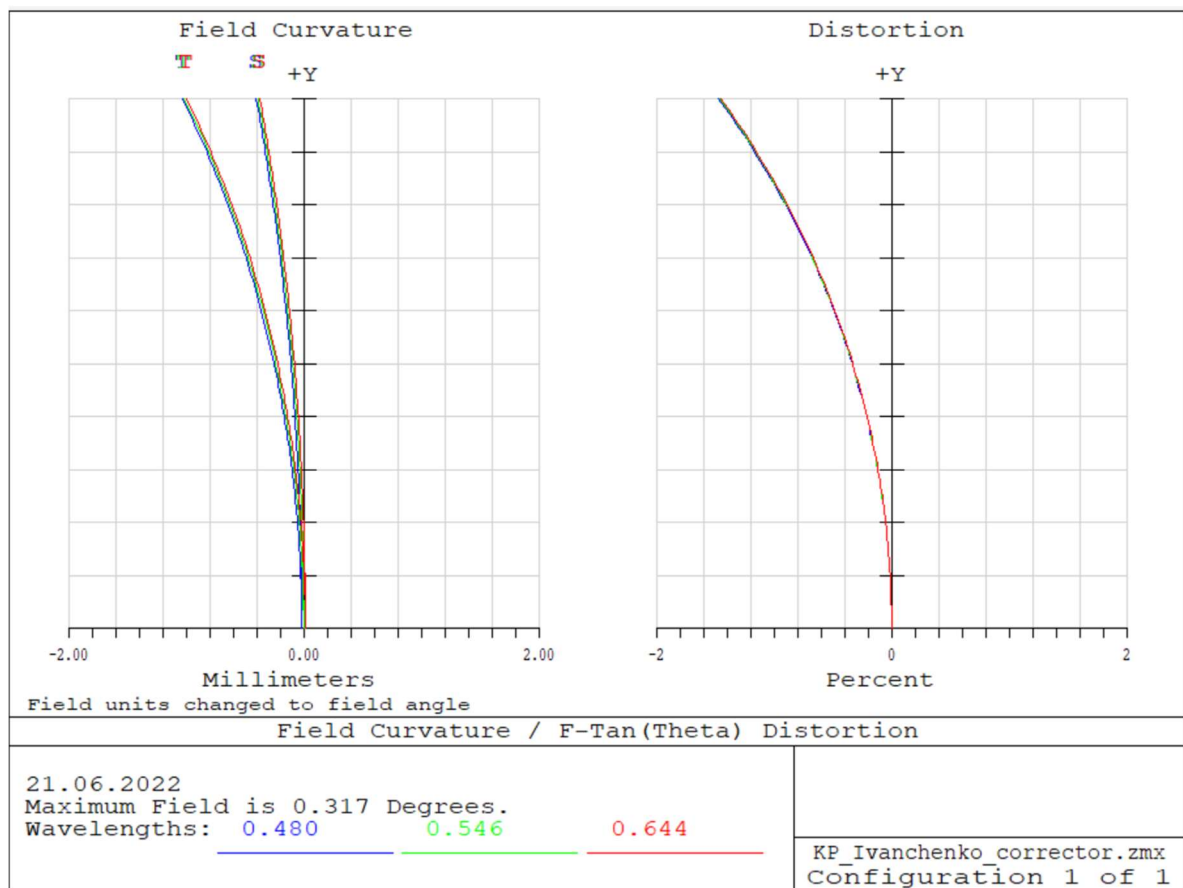
### Spot Diagram

21.06.2022 Units are  $\mu\text{m}$ .  
 Field : 1 2  
 RMS radius : 0.828 59.645  
 GEO radius : 1.385 114.953  
 Scale bar : 400

Reference : Chief Ray

KP\_Ivanchenko\_corrector.zmx  
 Configuration 1 of 1





$$y'_{\text{верх}} = 78,14878$$

$$y'_{\text{ниж}} = -78,099176$$

$$\Delta y'_{k2} = \frac{y'_{\text{верх}} + y'_{\text{ниж}}}{2} = 0,025 \text{ мкм}$$

Мы избавились от комы, но в системе появились кривизна поля, выраженная эллипсоидной формой рассеяния пятна, а также небольшой хроматизм (Field Curv). Для нахождения величины кривизны воспользуемся Analysis→Miscellaneous→Field Curvature & Distortion.

$$\Delta z'_{\text{кп1}} = -0,7635 \text{ мкм}$$

### 3. Расчёт линзы Смита

Линза Пиацци-Смита была изобретена в 1874 году Ч. Пиацци-Смитом. Устанавливается перед задней фокальной плоскостью системы, чтобы исправить кривизну поля в ней. Сама линза не вносит значительных aberrаций, а при округлении ее поверхности, обращенной к изображению, можно ликвидировать не только кривизну поля, но и дисторсию.

$$\Delta z'_{\text{кп1}} = \frac{(n-1)d_w}{n} \rightarrow d_w = \frac{\Delta z'_{\text{кп1}} n}{n-1}$$

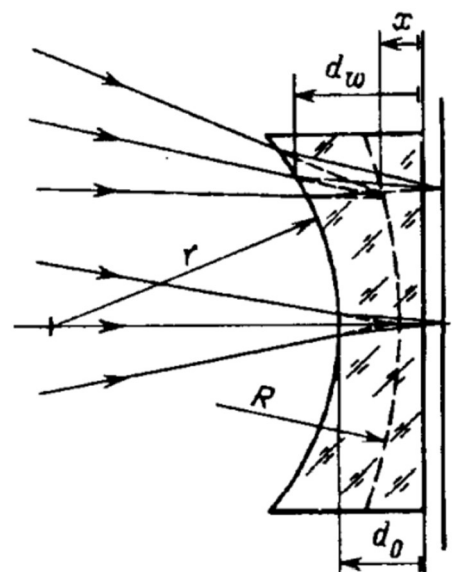
Пусть линза изготовлена из стекла СТК19;

$n = 1,744126$ . Тогда  $d_w = -1,789$

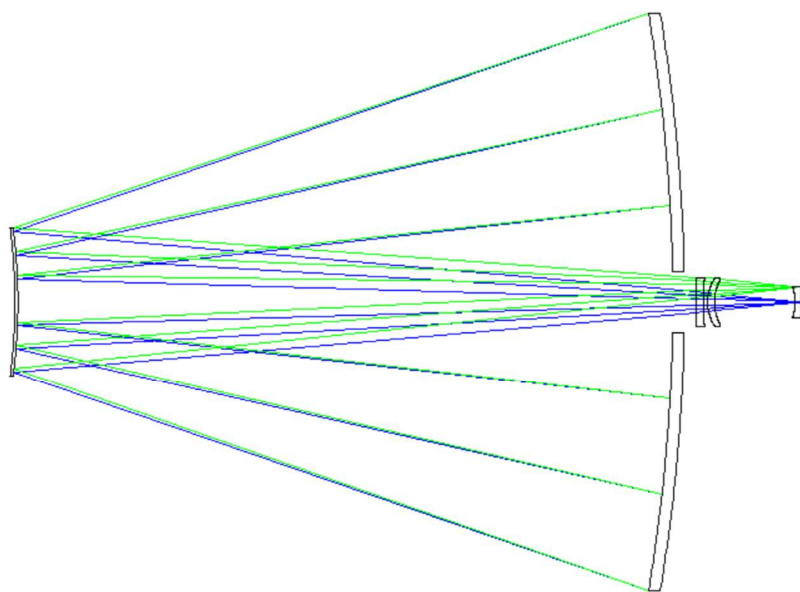
Полная диагональ матрицы:  $D = 2d_m = 2 * 4,35 = 8,7 \text{ мм}$

$$r = \frac{D^2}{8\Delta z'_{\text{кп1}}} = -12,392 \text{ мм}$$

$$R = \frac{(n-1)r}{n} = -5,287 \text{ мм}$$

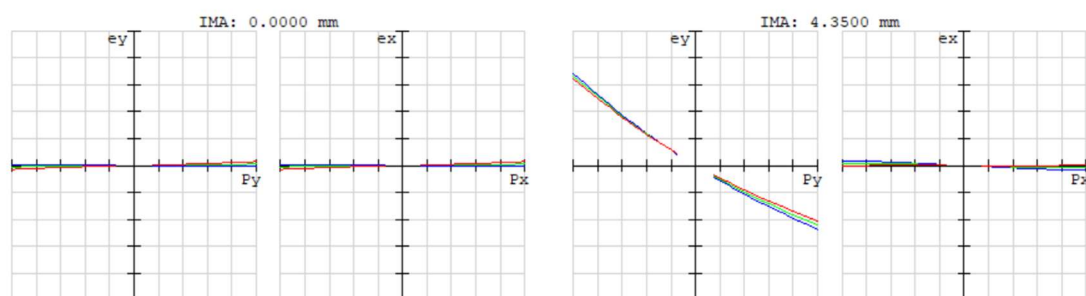


Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
*	Standard		-448.758	-170.000	MIRROR	75.000	-1.000
2	Standard		-147.764	176.000	MIRROR	19.208	-2.949
3	Standard		241.471	2.000	LZ_K8	6.475	0.000
4	Standard		107.154	1.000		6.356	0.000
5	Standard		11.436	1.800	LZ_K8	6.211	0.000
6	Standard		12.158	20.913		5.851	0.000
7	Standard		-12.615	1.500	LZ_CTK19	3.980	0.000
8	Standard		Infinity	1.000 M		4.161	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		4.418	0.000



#### Layout

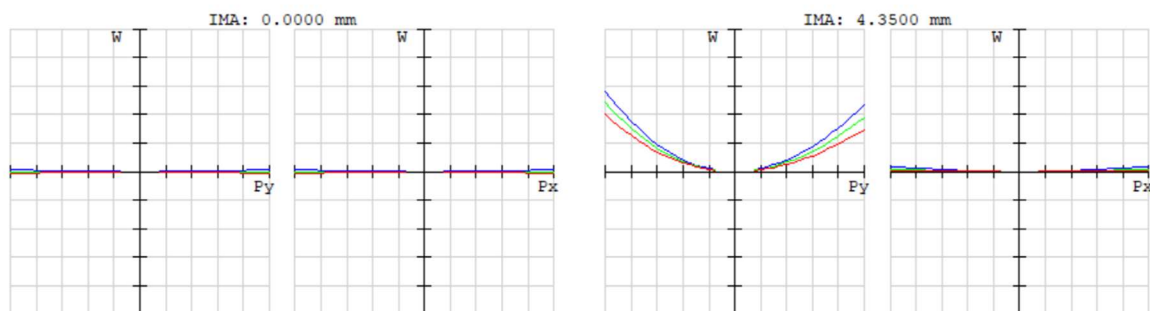
21.06.2022  
Total Axial Length: 204.21266 mm



#### Transverse Ray Fan Plot

21.06.2022  
Maximum Scale:  $\pm 100.000 \mu\text{m}$ .  
0.480 0.546 0.644  
Surface: Image

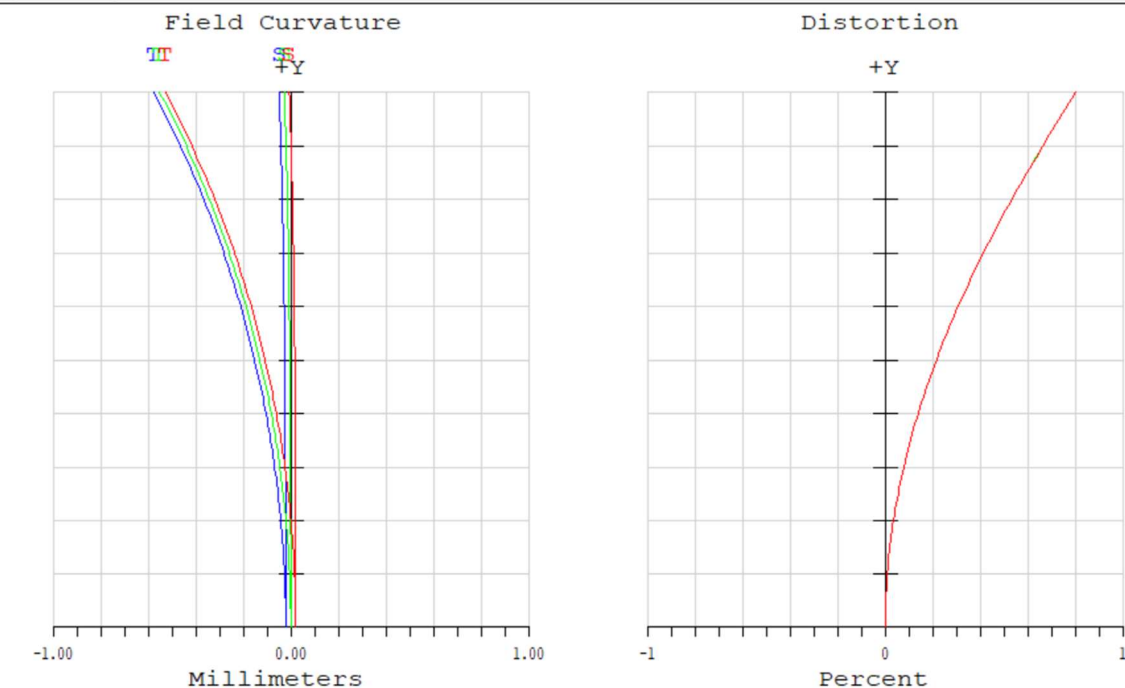
KP\_Ivanchenko\_lens\_Smith.zmx  
Configuration 1 of 1



### Optical Path Difference

21.06.2022  
 Maximum Scale:  $\pm 10.000$  Waves.  
 0.480 0.546 0.644  
 Surface: Image

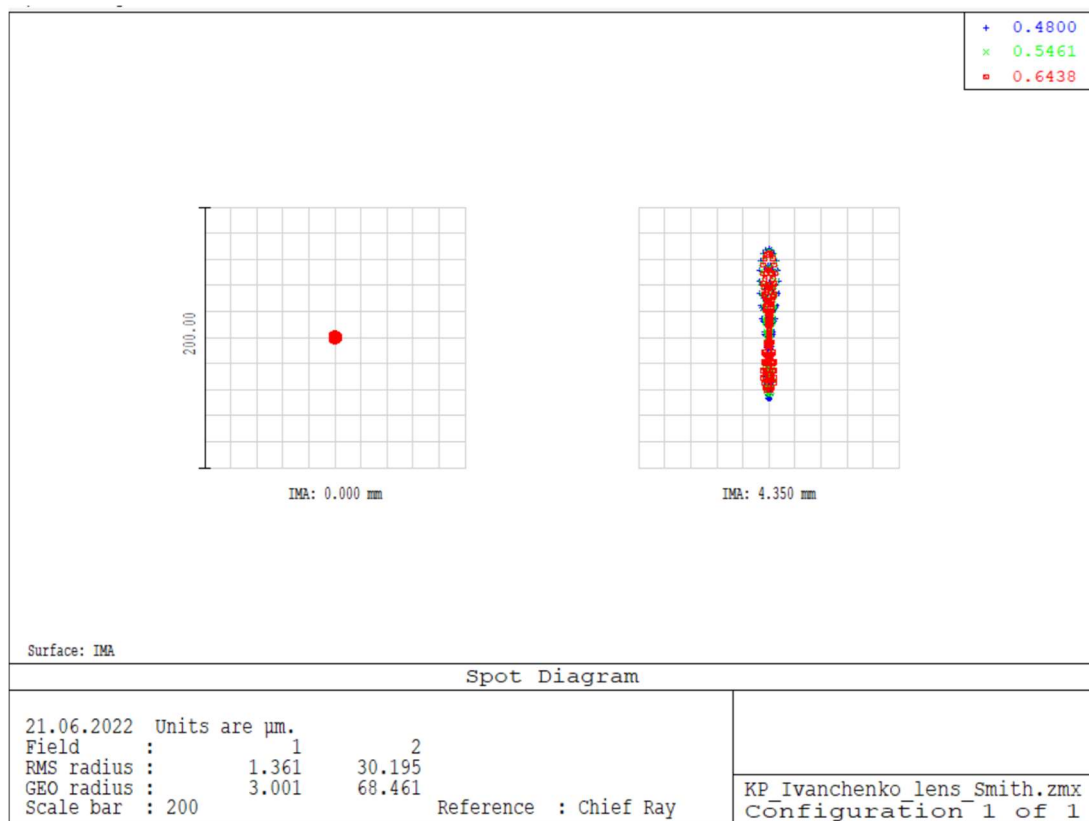
KP Ivanchenko lens\_Smith.zmx  
 Configuration 1 of 1



### Field Curvature / F-Tan(Theta) Distortion

21.06.2022  
 Maximum Field is 0.291 Degrees.  
 Wavelengths: 0.480 0.546 0.644

KP Ivanchenko lens\_Smith.zmx  
 Configuration 1 of 1



На данный момент в системе:

- присутствует небольшой хроматизм
- значение комы уменьшилось по сравнению с значением до коррекции, но незначительно увеличилось из-за линзы Смита
- кривизна поля была уменьшена в два раза

#### 4. Оптимизация полученной системы

Воспользуемся функцией Optimize для улучшения качества изображения. Оптимизируем по Spot Radius, Centroid.

Аргументы функции оптимизации:

- $\text{EFFL} = 850$  – для сохранения  $f' = 850$  мм
- $\text{CVVA} = 0$  – для уменьшения кривизны поля

Oper #					Target	Weight
1: EFFL					850.000	1.000
2: CVVA					0.000	1.000
3: ABSO					0.000	1.000
4: OPLT					0.100	1.000
5: DMFS						

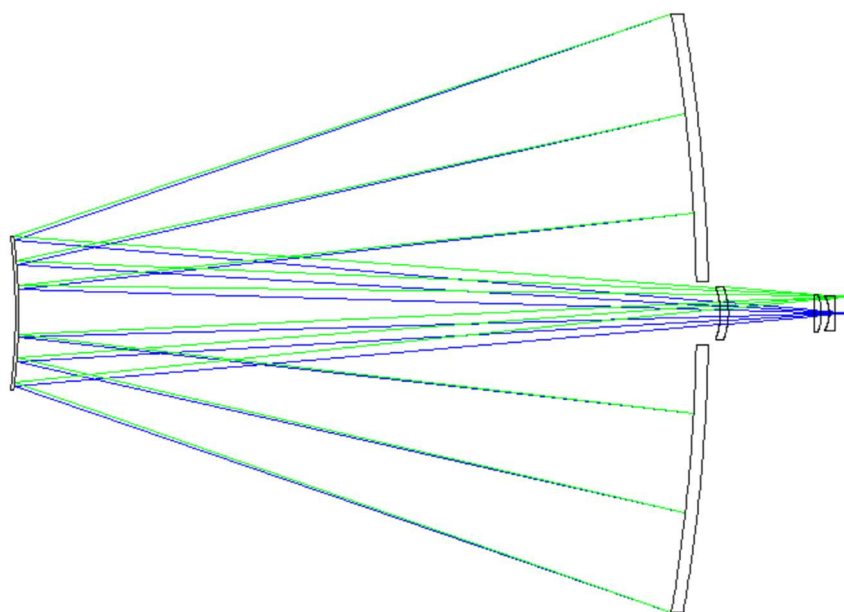
- Поставим ограничения на толщины

8: MXCA						-2.000	1.000
9: MNCA						-30.000	1.000
10: MXEA	0.000					-0.500	1.000
11: MNCA						2.000	1.000
12: MXCA						30.000	1.000
13: MNEA	0.000					0.500	1.000

- Радиусы поверхностей линз переменны

# Система после оптимизации Hammer:

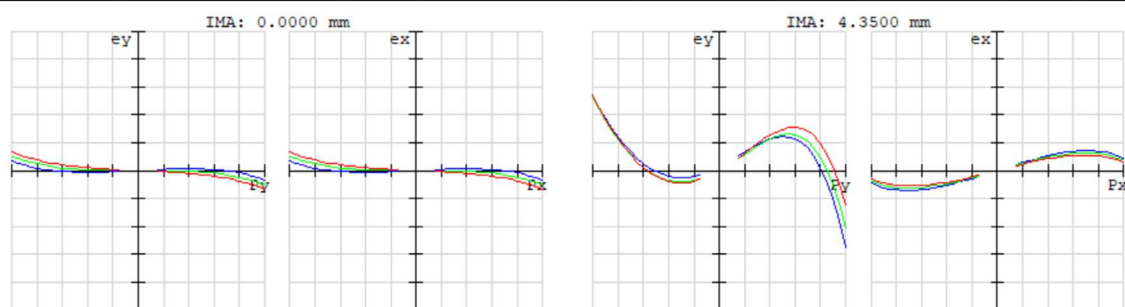
Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		Infinity	0.000
*	Standard		-448.758	-170.000	MIRROR	75.000	-1.000
2	Standard		-147.764	176.000	MIRROR	19.187	-2.949
3	Standard		-18.263 V	2.000	LZ_K8	6.475	0.000
4	Standard		-18.161 V	21.492 V		6.634	0.000
5	Standard		1.925E+004 V	1.800	LZ_K8	4.831	0.000
6	Standard		-13.811 V	2.000 V		4.782	0.000
7	Standard		-8.956 V	1.500	KF6 S	4.257	0.000
8	Standard		Infinity	3.624 M		4.286	0.000
IMA	Standard		Infinity	-		4.355	0.000



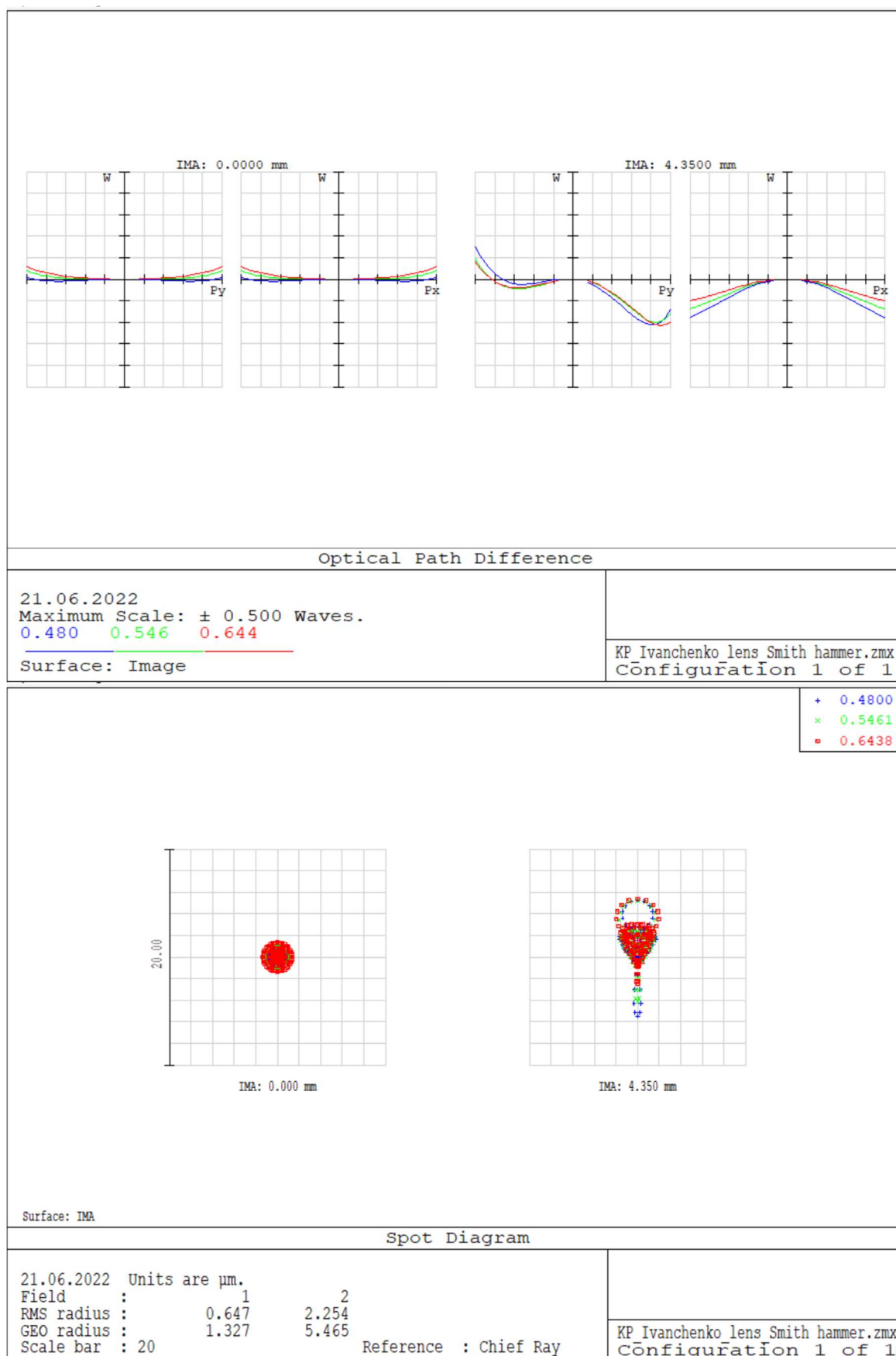
## Layout

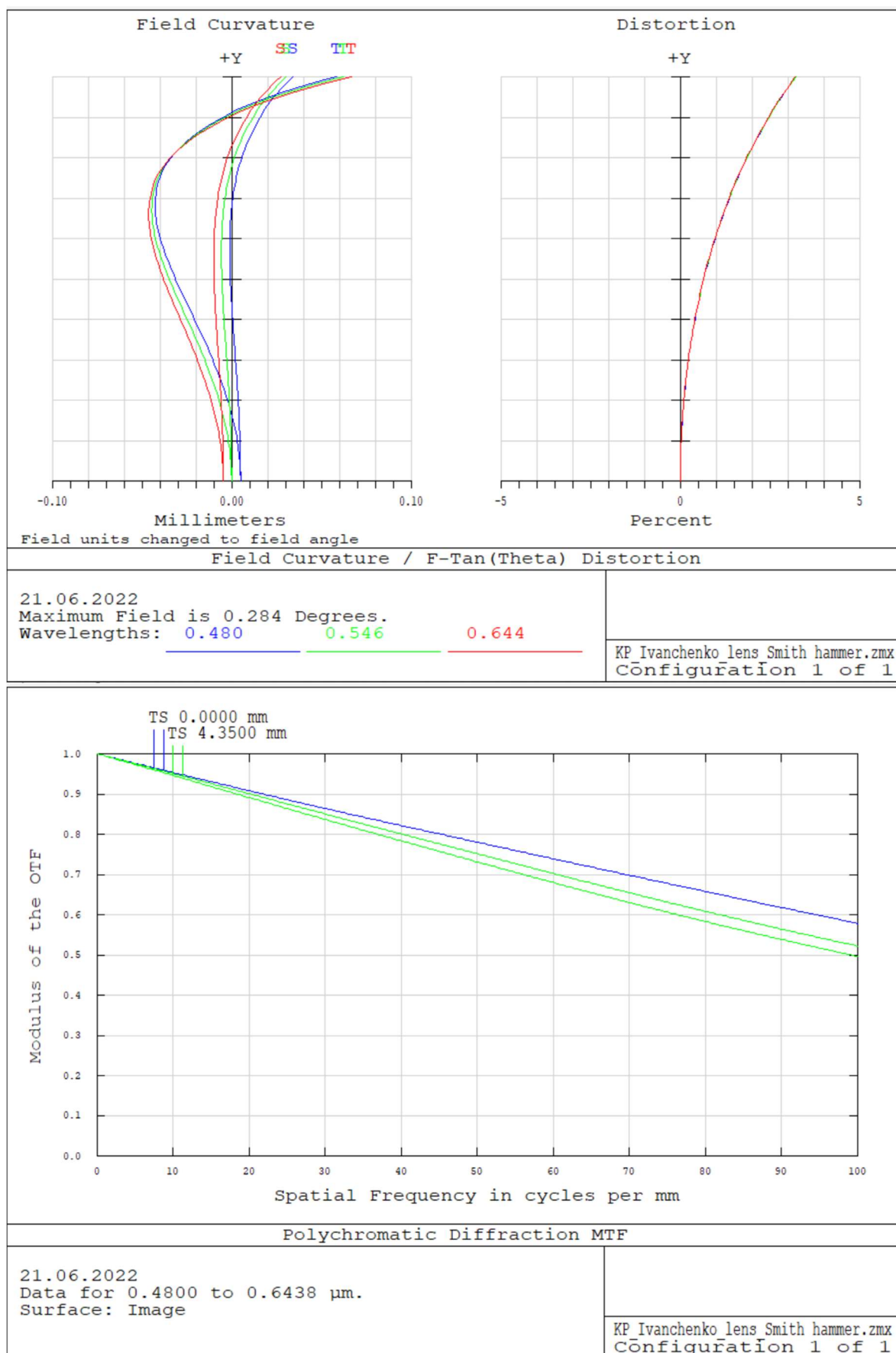
21.06.2022  
Total Axial Length: 208.41539 mm

KP Ivanchenko lens Smith hammer.zmx  
Configuration 1 of 1



## Transverse Ray Fan Plot





## **5. Список литературы:**

1. Н.П. Заказнов и др., Теория оптических система
2. Н.Н. Михельсон, Оптика астрономических телескопов и методика её расчета
3. Ю.Ю. Качурин, А.В. Крюков, А.А. Каратеева Оформление оптического выпуска на основании расчетов в программе ZEMAX