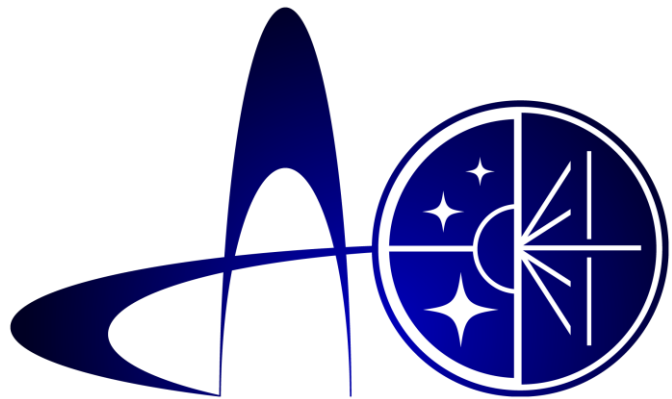




ИТМО

Проектирование оптической системы 6-метрового телескопа БТА с ТГц-детектором

Кукушкин Д.Е., Сазоненко Д.А.

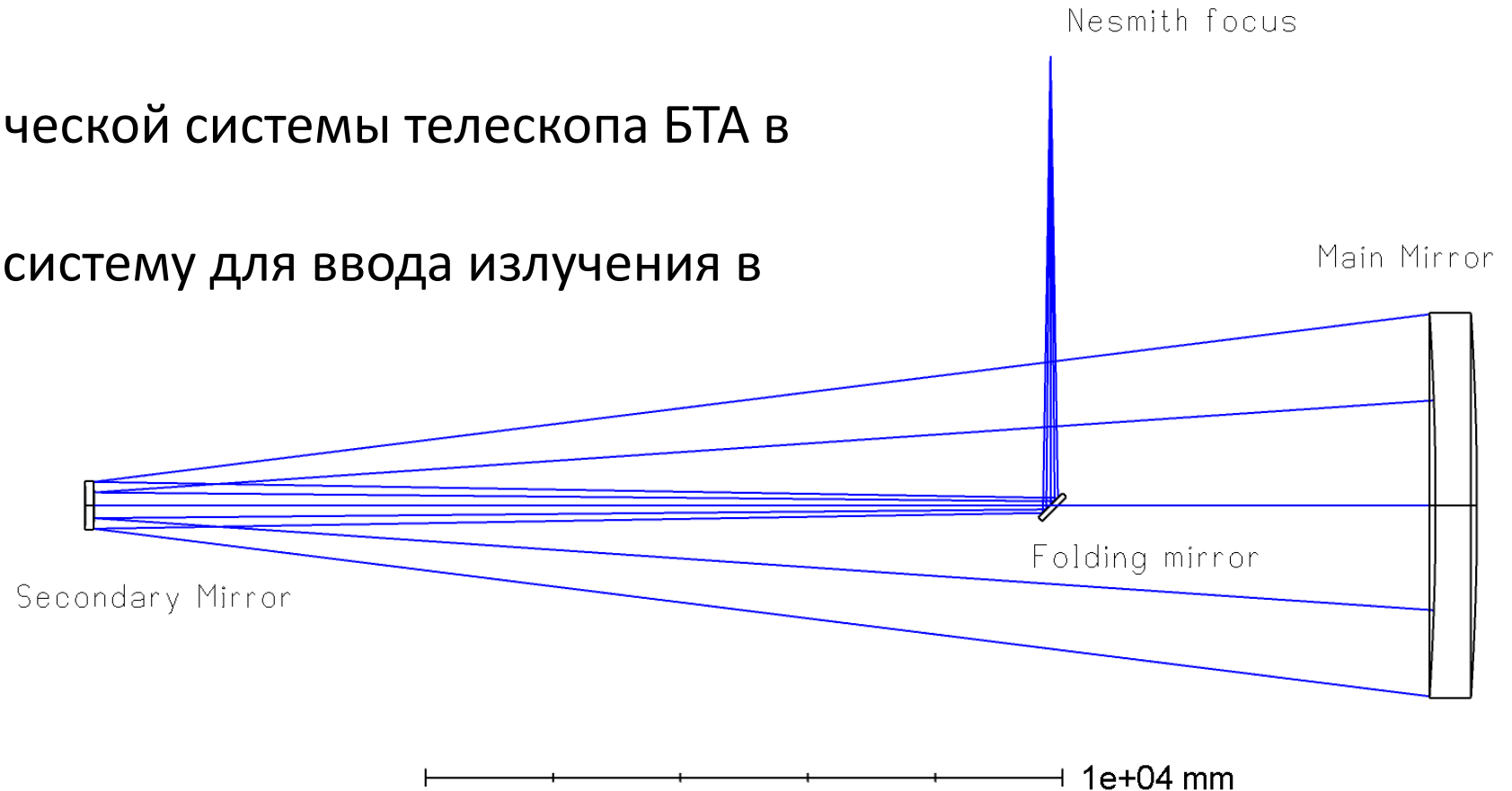
dekukushkin@itmo.ru

Фокус Несмита Н1

Цель – спроектировать оптическую систему для согласования сигнала, собираемого телескопом БТА с приемной системой субТГц диапазона.

Задачи:

- Исследовать работу оптической системы телескопа БТА в субТГц диапазоне
- Разработать оптическую систему для ввода излучения в приемное устройство



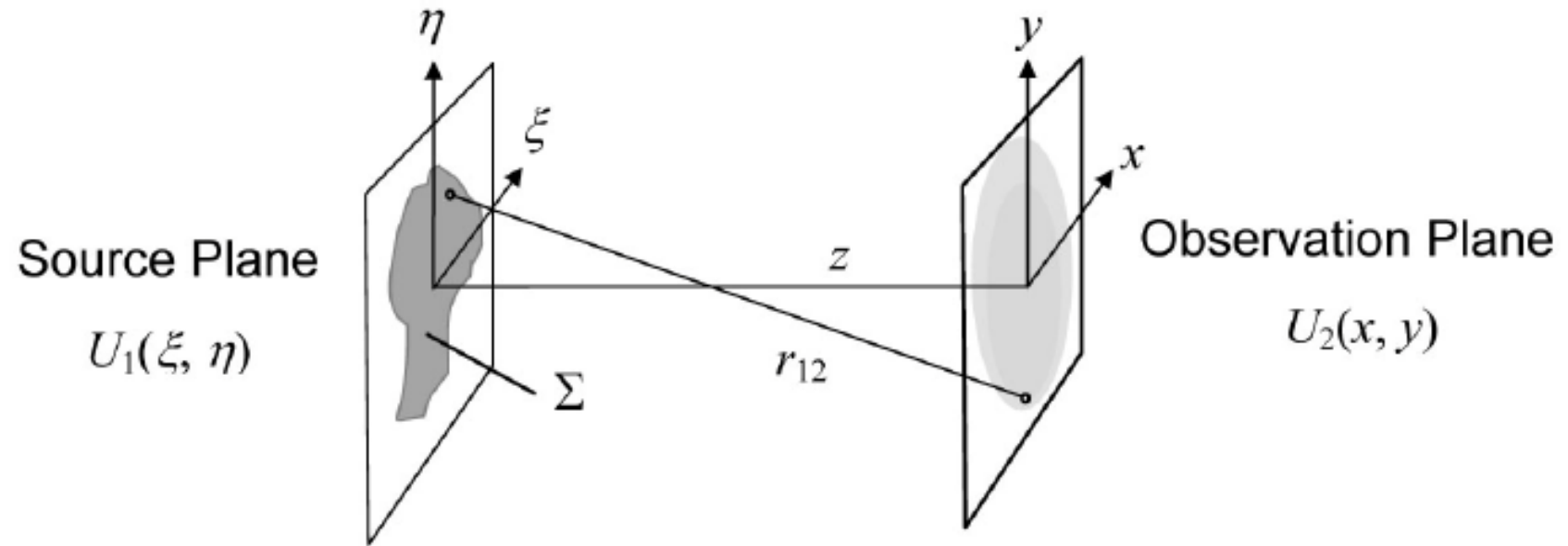
Оптическая система телескопа БТА в ТГц диапазоне

Расчетные длины волн $\lambda=1303$ мкм (0,23ТГц), $\lambda=2998$ мкм (0,1 ТГц), диаметр главного зеркала $D=6$ м, фокусное расстояние $f'=24$ м.

Способы оценки ФРТ с учетом дифракционных явлений:

- FDTD – $NA>0,5$, формирование каустики пучка вблизи поверхности оптического элемента;
- **Скалярная теория дифракции, основанная на дифракционных интегралах Кирхгофа, Френеля и Фраунгофера.**

Дифракция на входном зрачке БТА



приближения теории дифракции
Френеля

$$z^3 \gg \left(\frac{\pi}{4\lambda} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^2 \right)_{max}$$

приближения теории дифракции
Фраунгофера

$$z \gg \left(\frac{k(\xi^2 + \eta^2)}{2} \right)_{max}$$

Дифракция на входном зрачке БТА

Число Френеля $N_F = \frac{r^2}{\lambda z}$

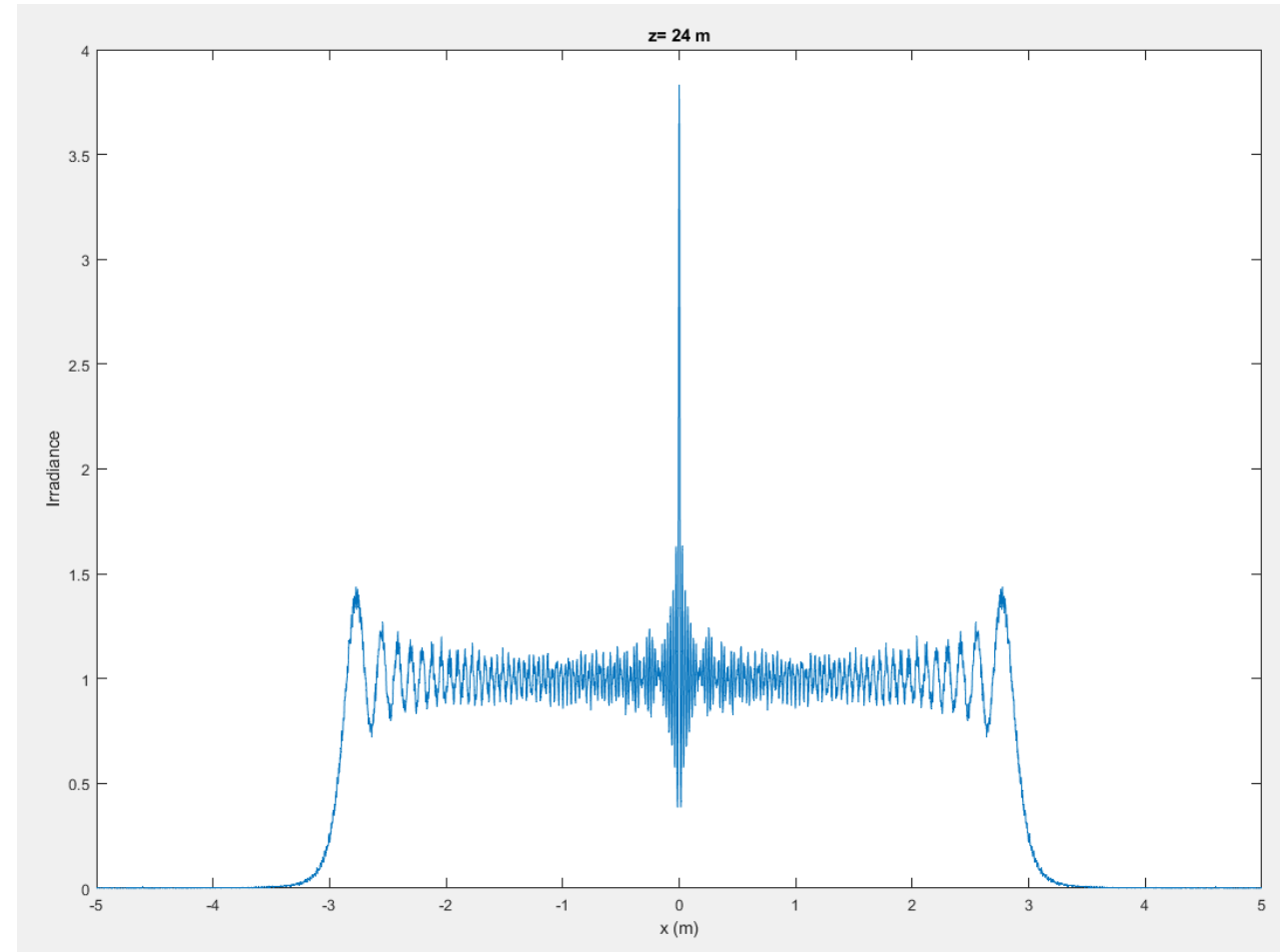
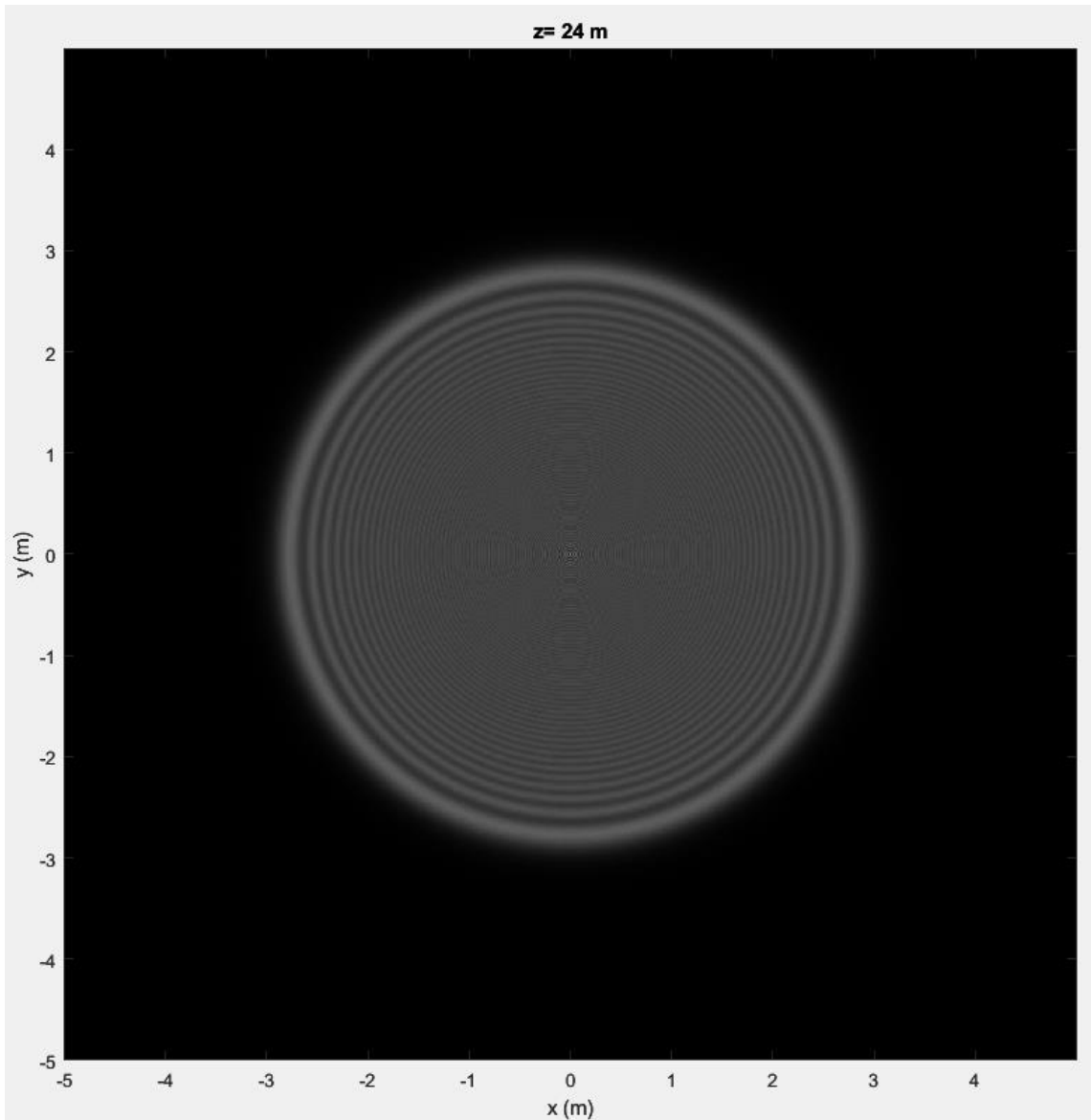
Теория дифракции Френеля/ Фраунгофера

$N_F \approx 1$ $N_F \ll 1$

$D_{main\ mirror} = 6\text{ м}$ ($r=3000\text{ мм}$), $z = 24\text{ м}$, $NA_{primary\ mirror}=0.125$, $NA_{Nesmith}=0.0167$.

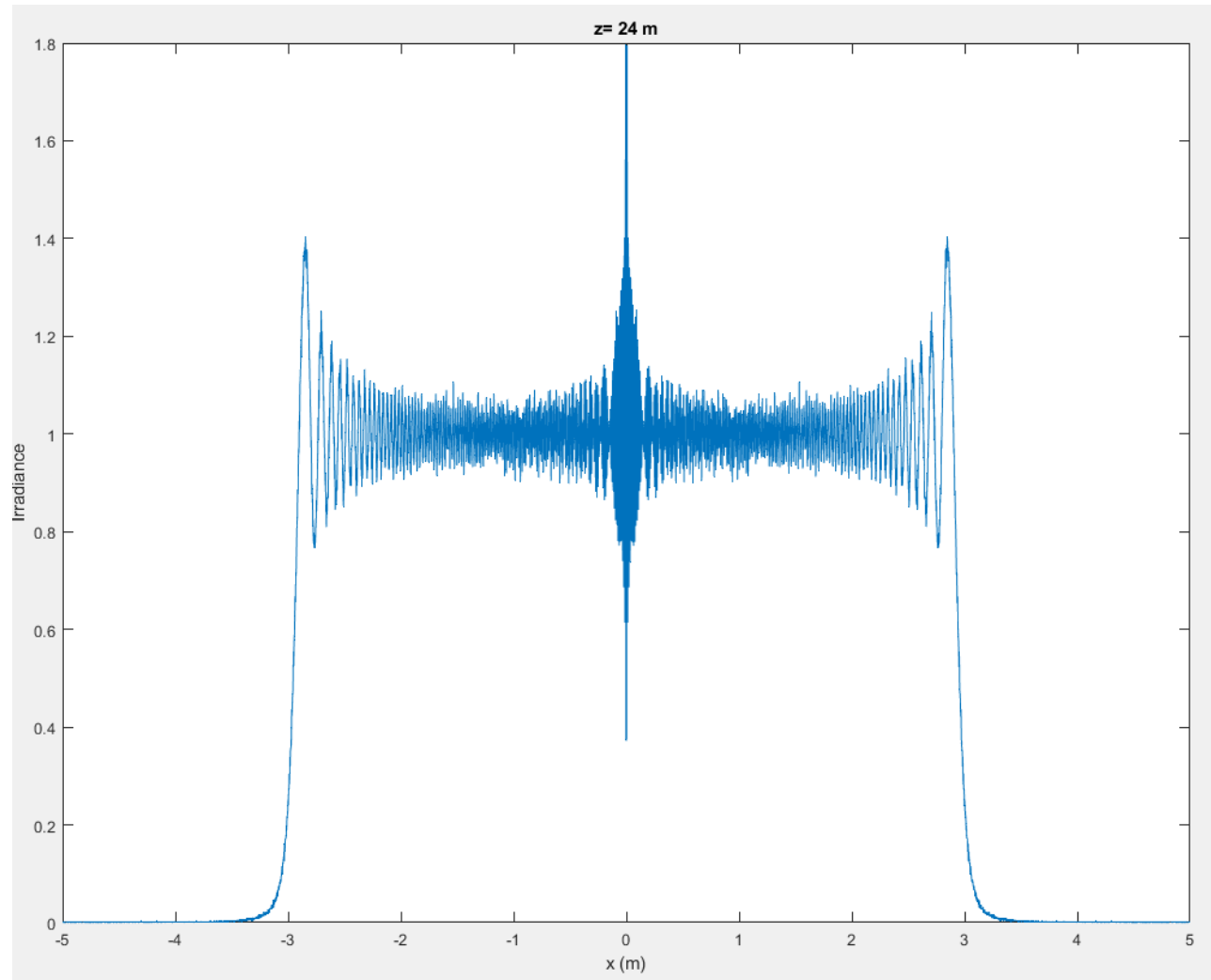
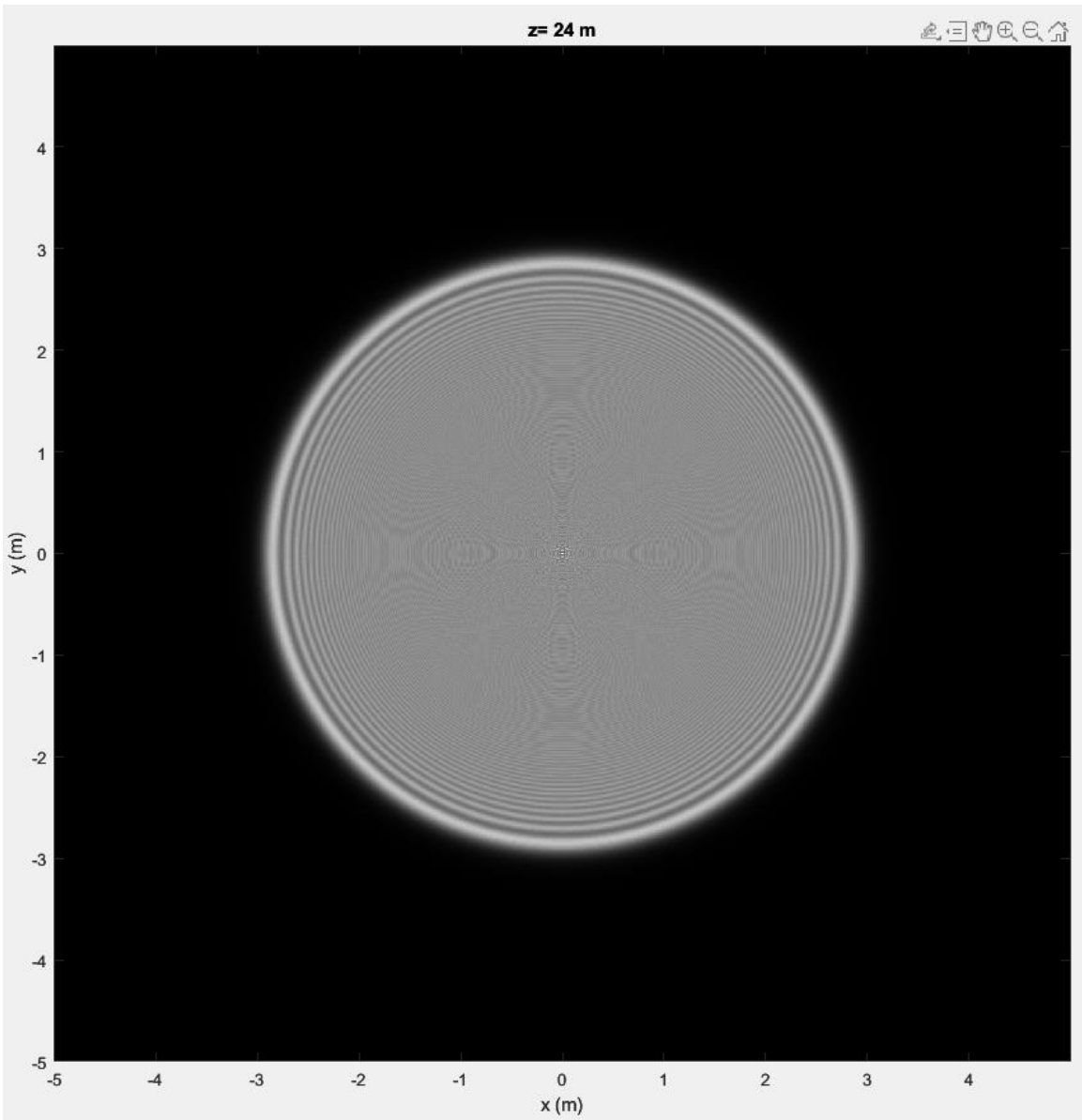
	Размер регистрирующей площадки, м	$\lambda=1303\text{ мкм}$ $N_F=288$	$\lambda=2998\text{ мкм}$ $N_F=125$	z главного зеркала =24 м
Теория дифракции Фраунгофера	-	$z_{max}=43399\text{ м}$	$z_{max}=18862\text{ м}$	$z \ll z_{max}$
Теория дифракции Френеля	0,3	$z_{max}=1198\text{ м}$	$z_{max}=521\text{ м}$	$z^3 \gg z_{max}$
	0,03	$z_{max}=13,4\text{ м}$	$z_{max}=5,8\text{ м}$	$z^3 \gg z_{max}$

Дифракция (Френеля) на входном зрачке БТА



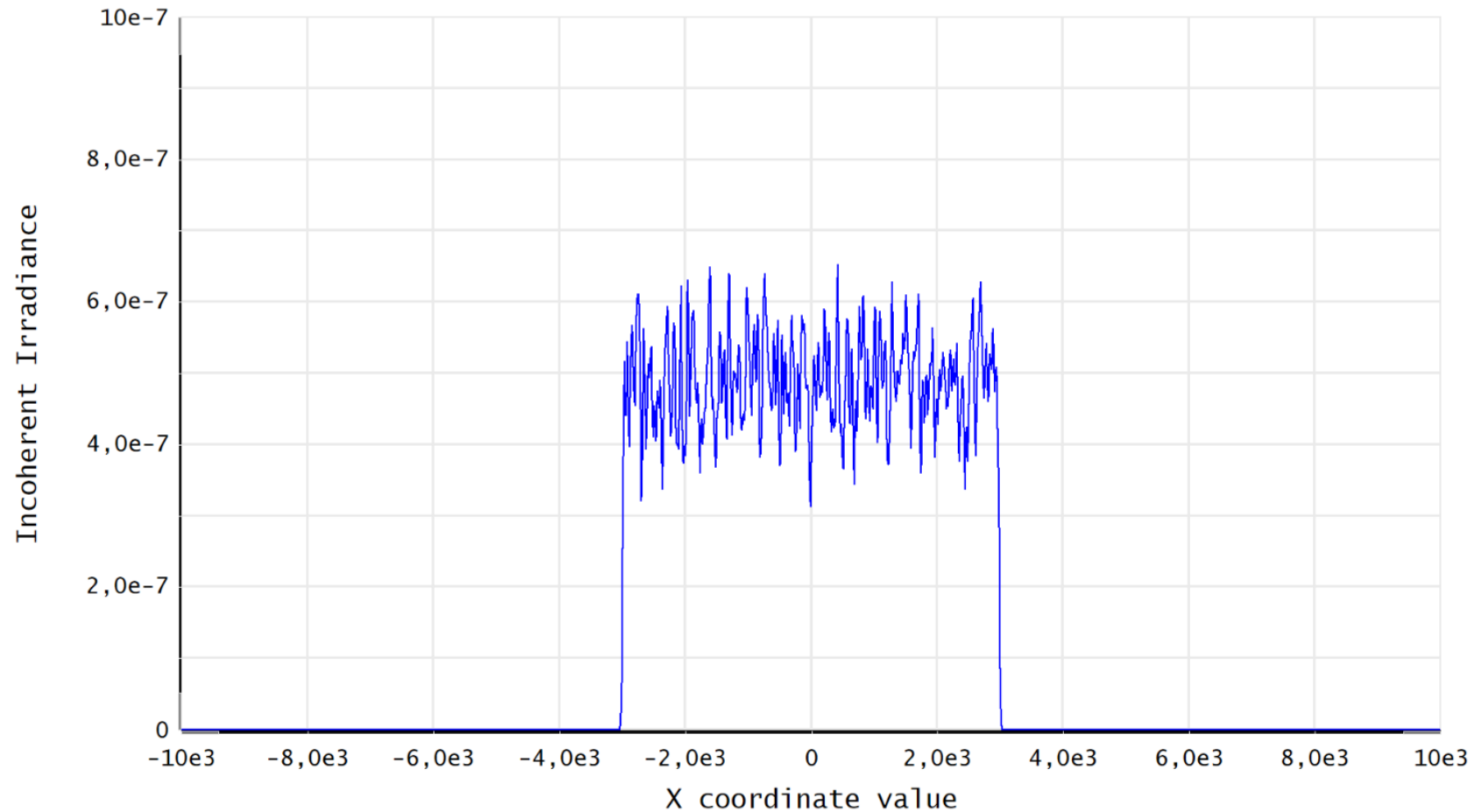
($D_{\text{отв}} = 6$ м, $z = 24$ м) $\lambda = 2998$ мкм

Дифракция (Френеля) на входном зрачке БТА



($D_{\text{отв}} = 6$ м, $z = 24$ м) $\lambda = 1303$ мкм

Дифракция (Фраунгофера) на входном зрачке БТА в Zemax OpticStudio

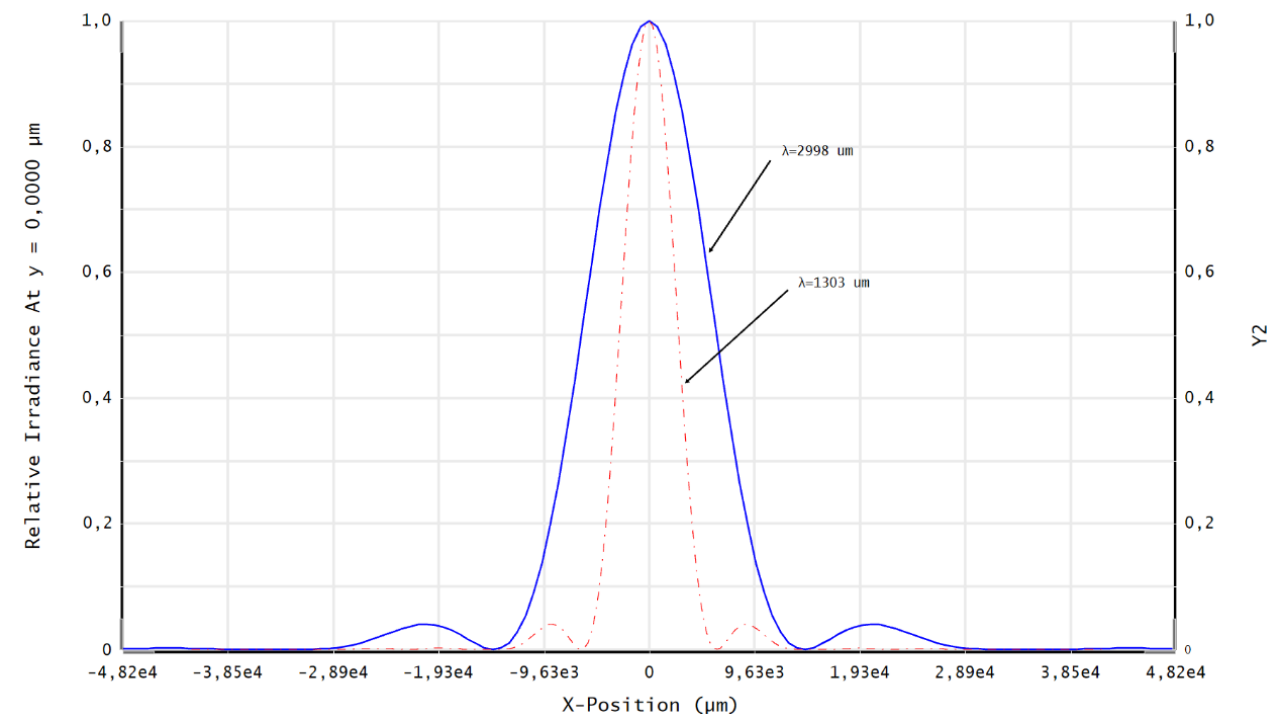


Освещённость на экране при дифракции на круглом отверстии ($D_{\text{отв}}=6$ м, $z=24$ м)
 $\lambda=2998$ мкм в Zemax OpticStudio.

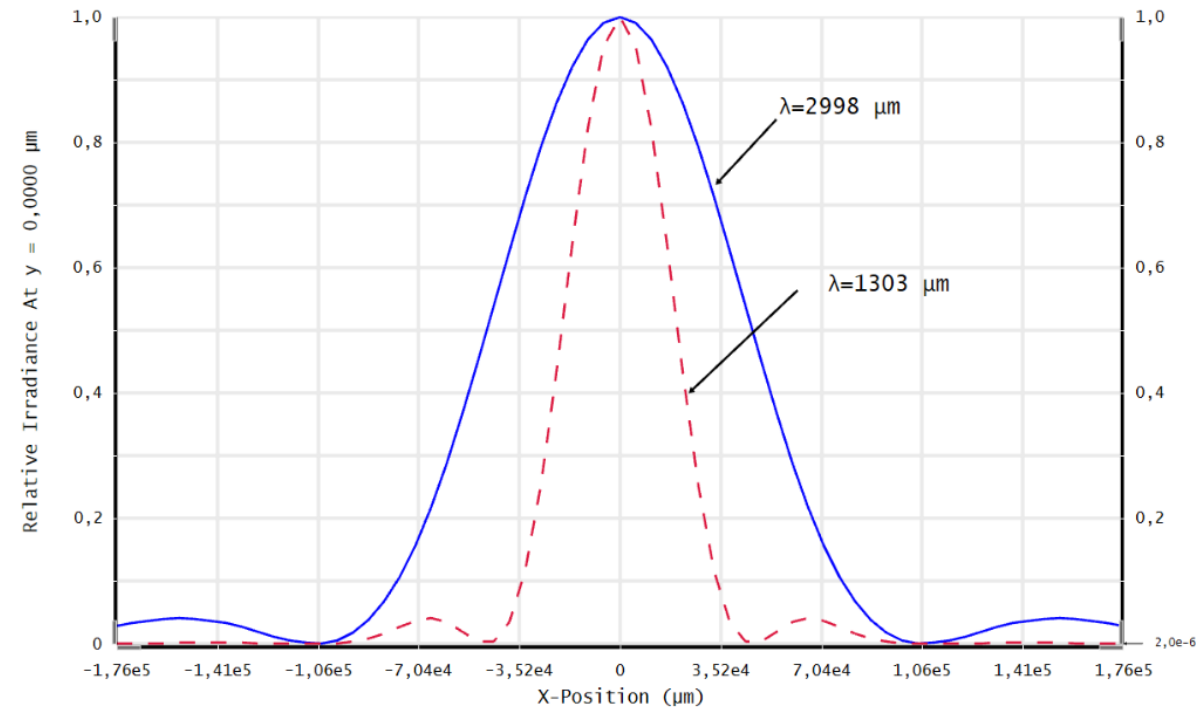
Оценка ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio – последовательный режим

В фокусе главного зеркала БТА

В фокусе Несмита

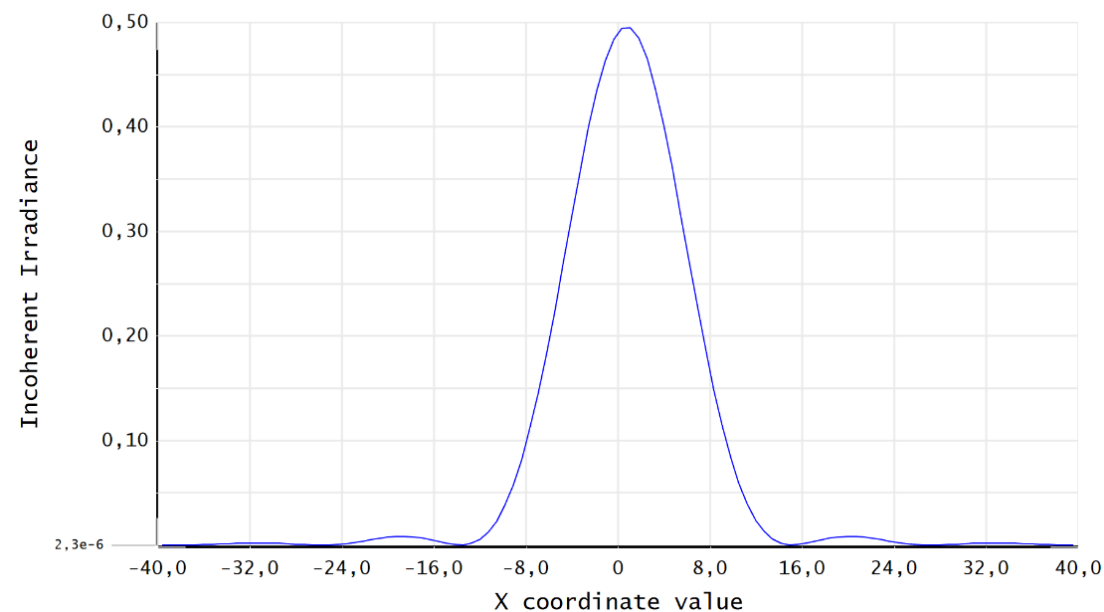
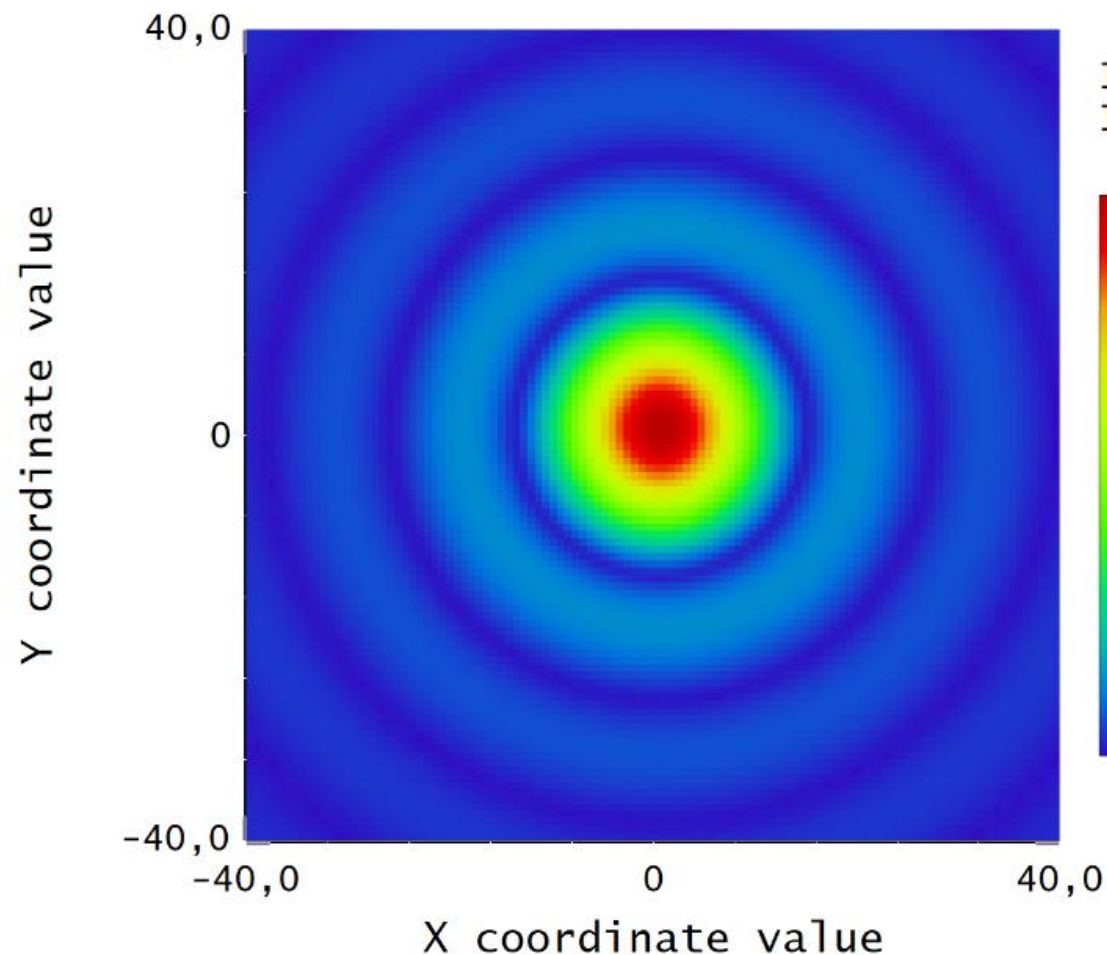


$$D(\lambda = 1303 \text{ мкм})_{1-st \text{ dif. max.}} \approx 10,4 \text{ мм},$$
$$D(\lambda = 2998 \text{ мкм})_{1-st \text{ dif. max.}} \approx 22,6 \text{ мм}.$$



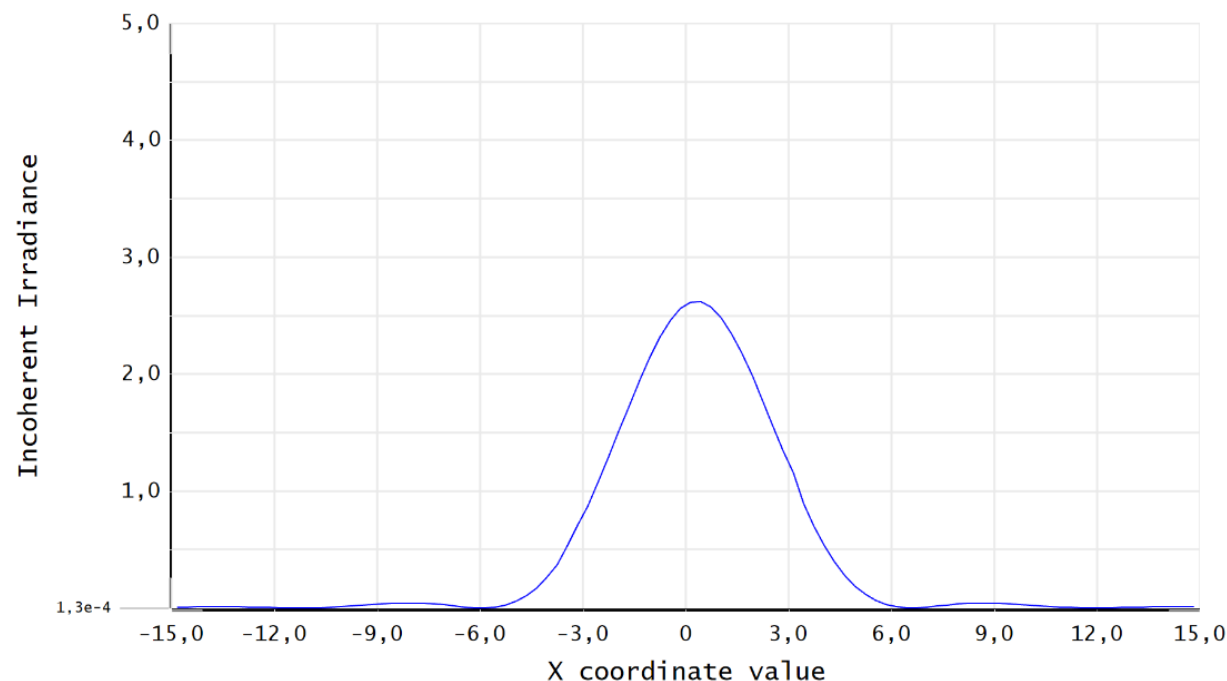
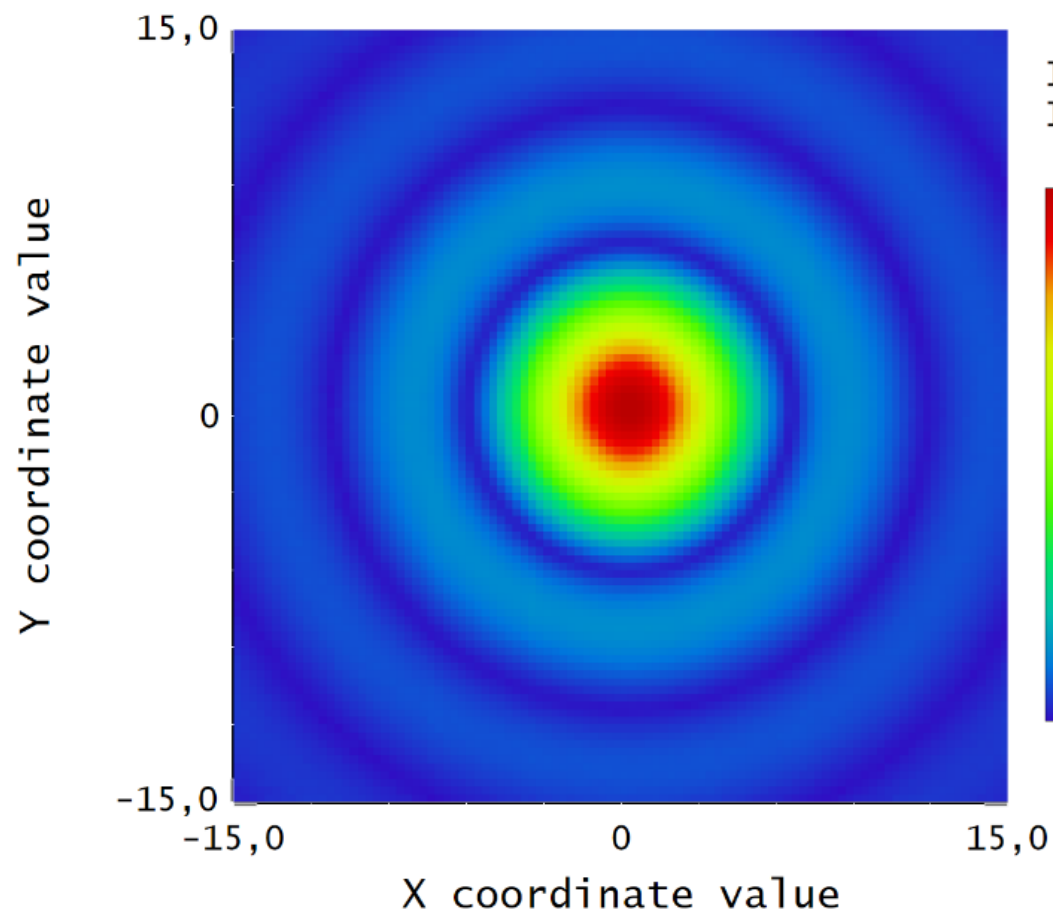
$$D(\lambda = 1303 \text{ мкм})_{1-st \text{ dif. max.}} \approx 88 \text{ мм},$$
$$D(\lambda = 2998 \text{ мкм})_{1-st \text{ dif. max.}} \approx 200 \text{ мм}.$$

Оценка ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio – непоследовательный режим



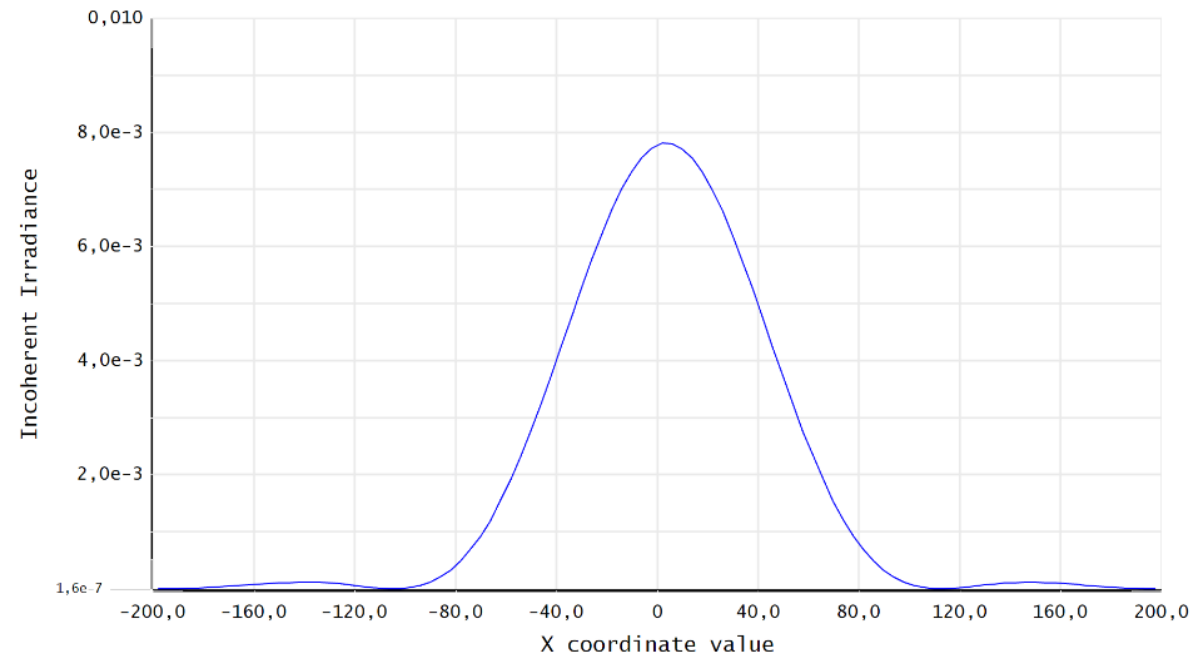
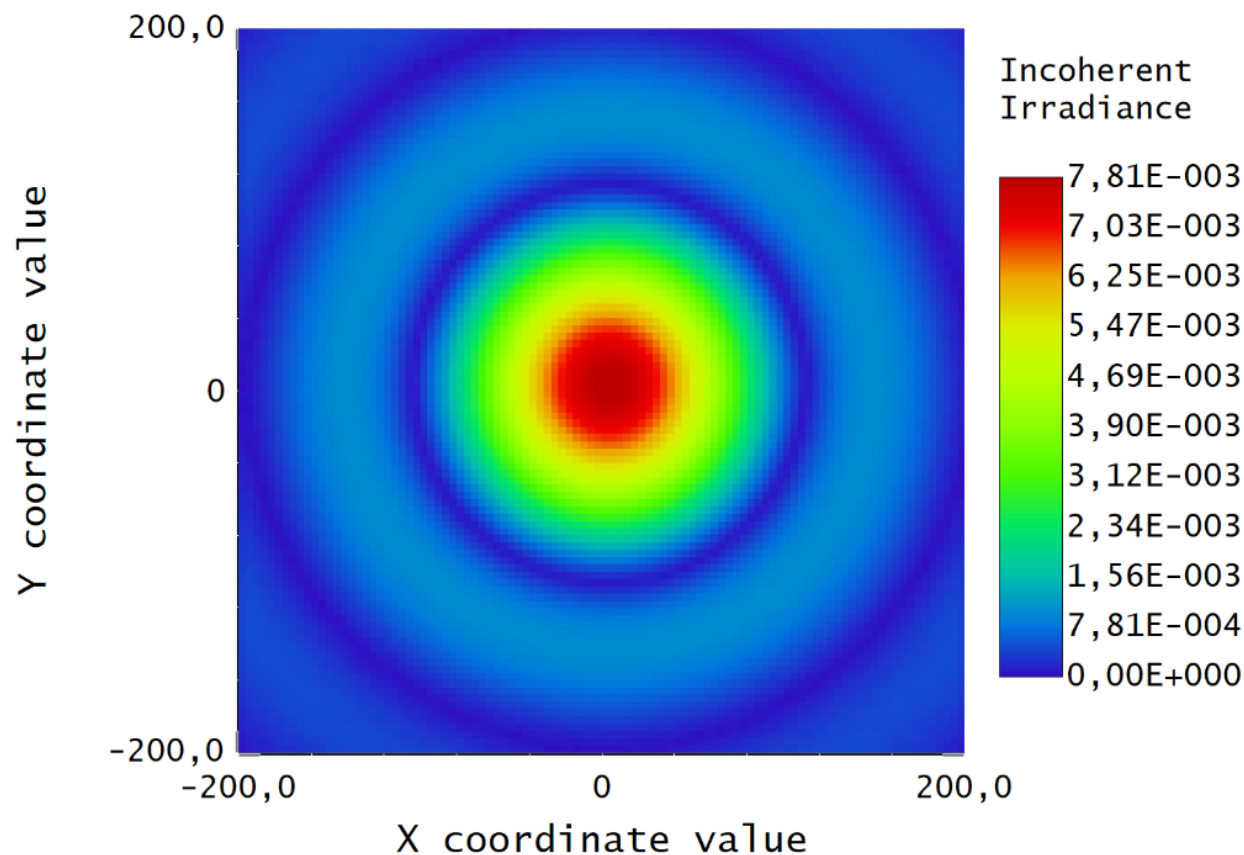
Освещенность в фокальной плоскости главного зеркала БТА при $\lambda=2998 \mu\text{m}$ (100 GHz).

Оценка ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio – непоследовательный режим



Освещенность в фокальной плоскости главного зеркала БТА при $\lambda=1303 \mu\text{m}$ (230 GHz).

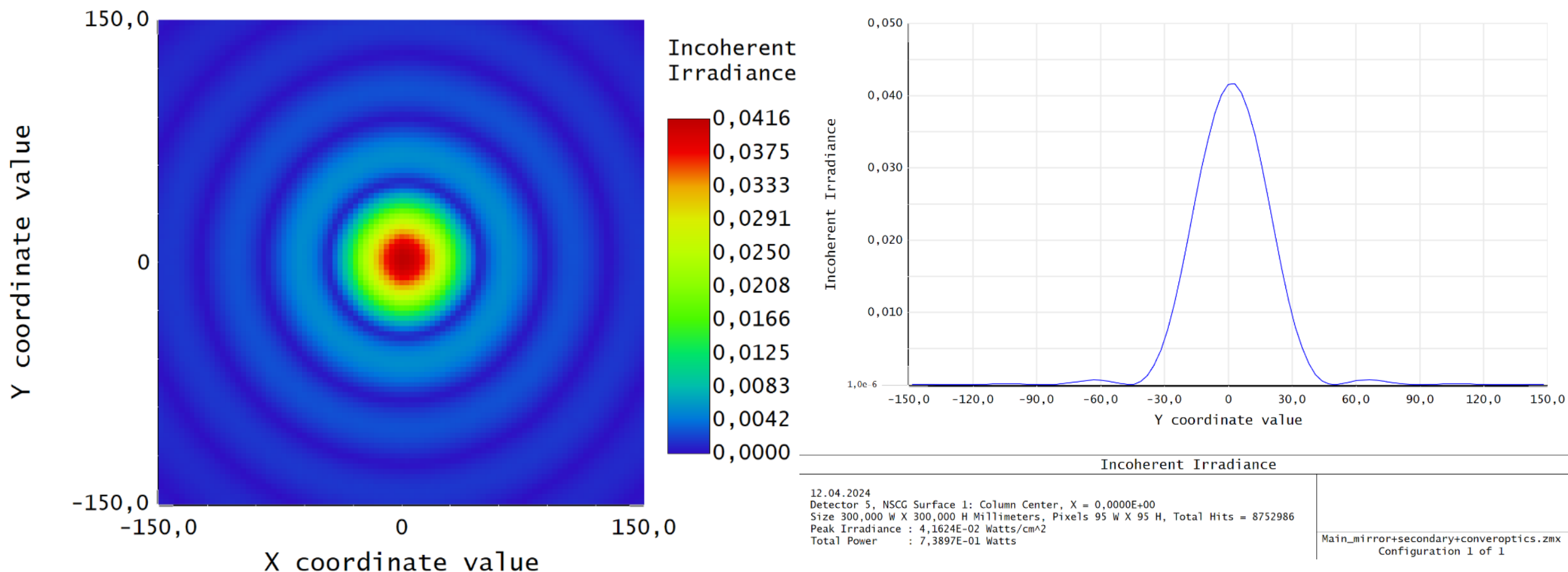
Оценка ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio – непоследовательный режим



Incoherent Irradiance	
12.04.2024	Main_mirror+secondary+converoptics.zmx Configuration 1 of 1
Detector 5, NSCG Surface 1: Row Center, Y = 0,0000E+00	
Size 400,000 W X 400,000 H Millimeters, Pixels 100 W X 100 H, Total Hits = 8176244	
Peak Irradiance : 7,8093E-03 Watts/cm^2	
Total Power : 6,9025E-01 Watts	

Освещенность в фокусе Несмита при $\lambda=2998$
 μm (100 GHz)

Оценка ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio – непоследовательный режим



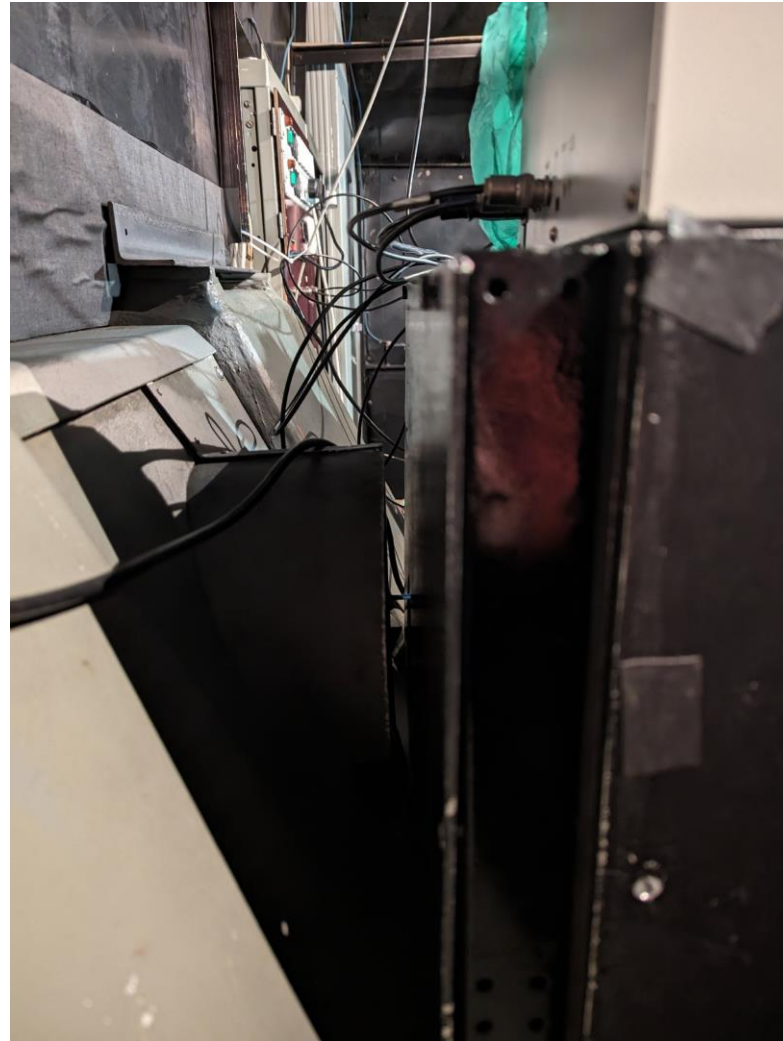
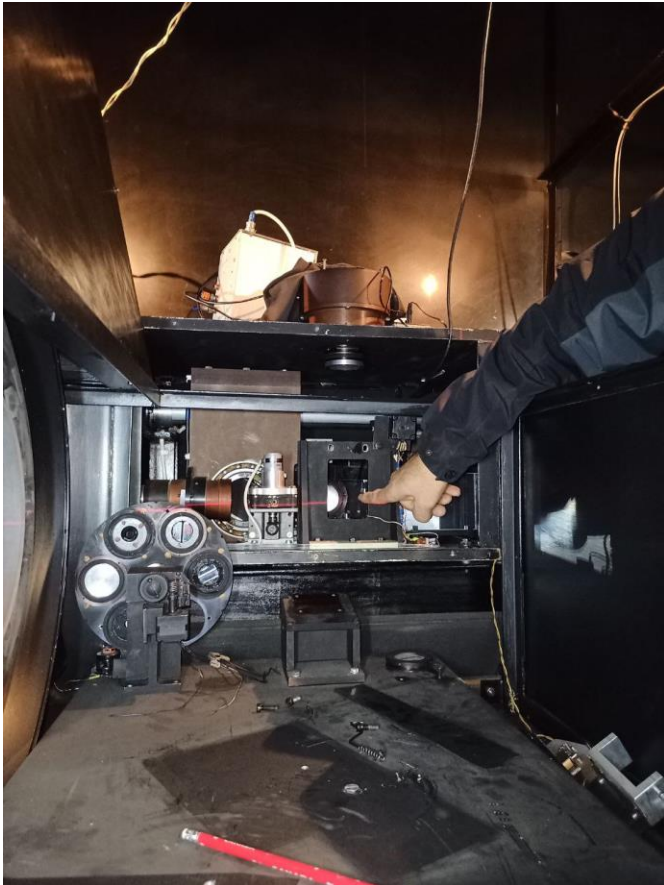
Освещенность в фокусе Несмита при $\lambda=1303 \mu\text{m}$
(230 GHz)

Сравнение ФРТ с учетом дифракционных эффектов в Zemax OpticStudio

ФРТ в фокусе главного зеркала БТА	Диаметр дифракционного пятна (Huygens PSF), мм	Диаметр дифракционного пятна (Source Diffractive), мм
$\lambda=1303 \text{ }\mu\text{m}$ (230 GHz)	10,4	12,3
$\lambda=2998 \text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz).	22,6	28,15

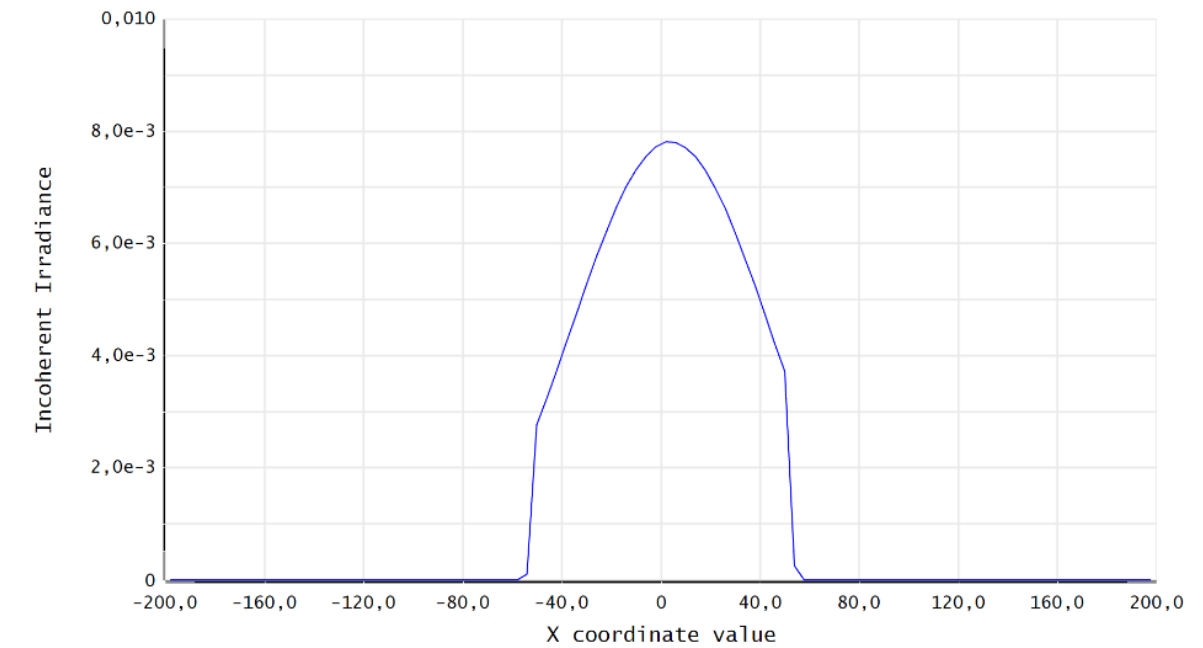
ФРТ в фокусе Несмита	Диаметр дифракционного пятна (Huygens PSF), мм	Диаметр дифракционного пятна (Source Diffractive), мм
$\lambda=1303 \text{ }\mu\text{m}$ (230 GHz)	88	93,5
$\lambda=2998 \text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz).	200	210

Площадка Несмита (Н1) на БТА



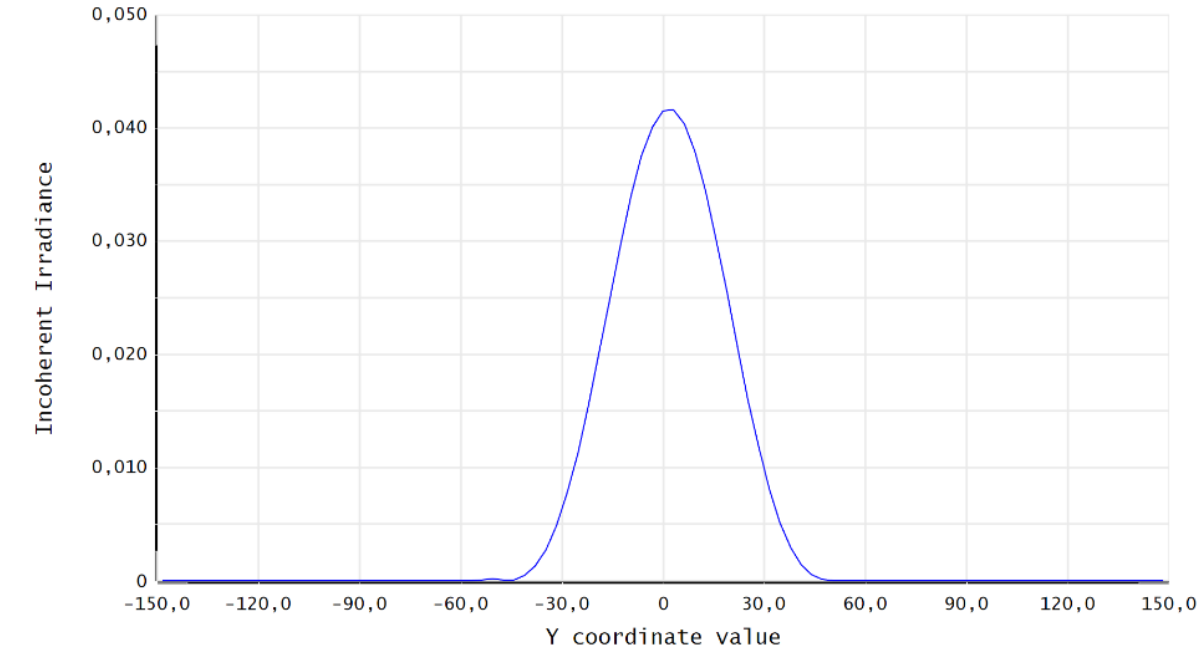
Диаметр окна фокуса Несмита на
площадке $105 \text{ мм} < \text{диаметра ФРТ}$
для $\lambda = 2998 \text{ мкм}$

Освещенность в фокусе Несмита с диаметром окна 105 мм



Incoherent Irradiance	
12.04.2024 Detector 5, NSCG Surface 1: Row Center, Y = 0,0000E+00 Size 400,000 W X 400,000 H Millimeters, Pixels 100 W X 100 H, Total Hits = 5217846 Peak Irradiance : 7,8088E-03 Watts/cm^2 Total Power : 4,4051E-01 Watts	Main_mirror+secondary+converoptics.zmx Configuration 1 of 1

$\lambda=2998\text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz), потери 36%

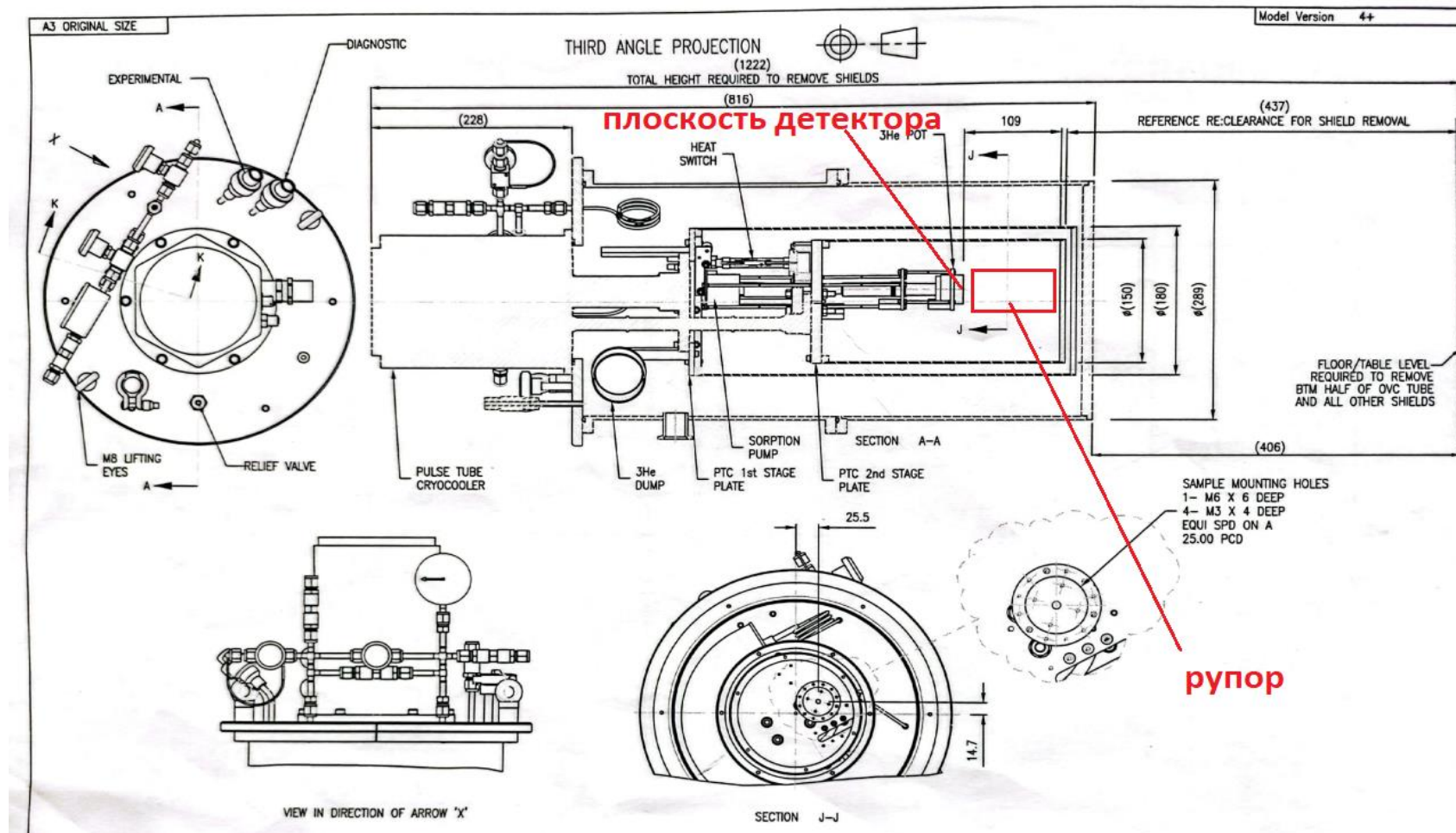


Incoherent Irradiance	
12.04.2024 Detector 5, NSCG Surface 1: Column Center, X = 0,0000E+00 Size 300,000 W X 300,000 H Millimeters, Pixels 95 W X 95 H, Total Hits = 7796148 Peak Irradiance : 4,1623E-02 Watts/cm^2 Total Power : 6,5819E-01 Watts	Main_mirror+secondary+converoptics.zmx Configuration 1 of 1

$\lambda=1303\text{ }\mu\text{m}$ (230 GHz), потери 11%

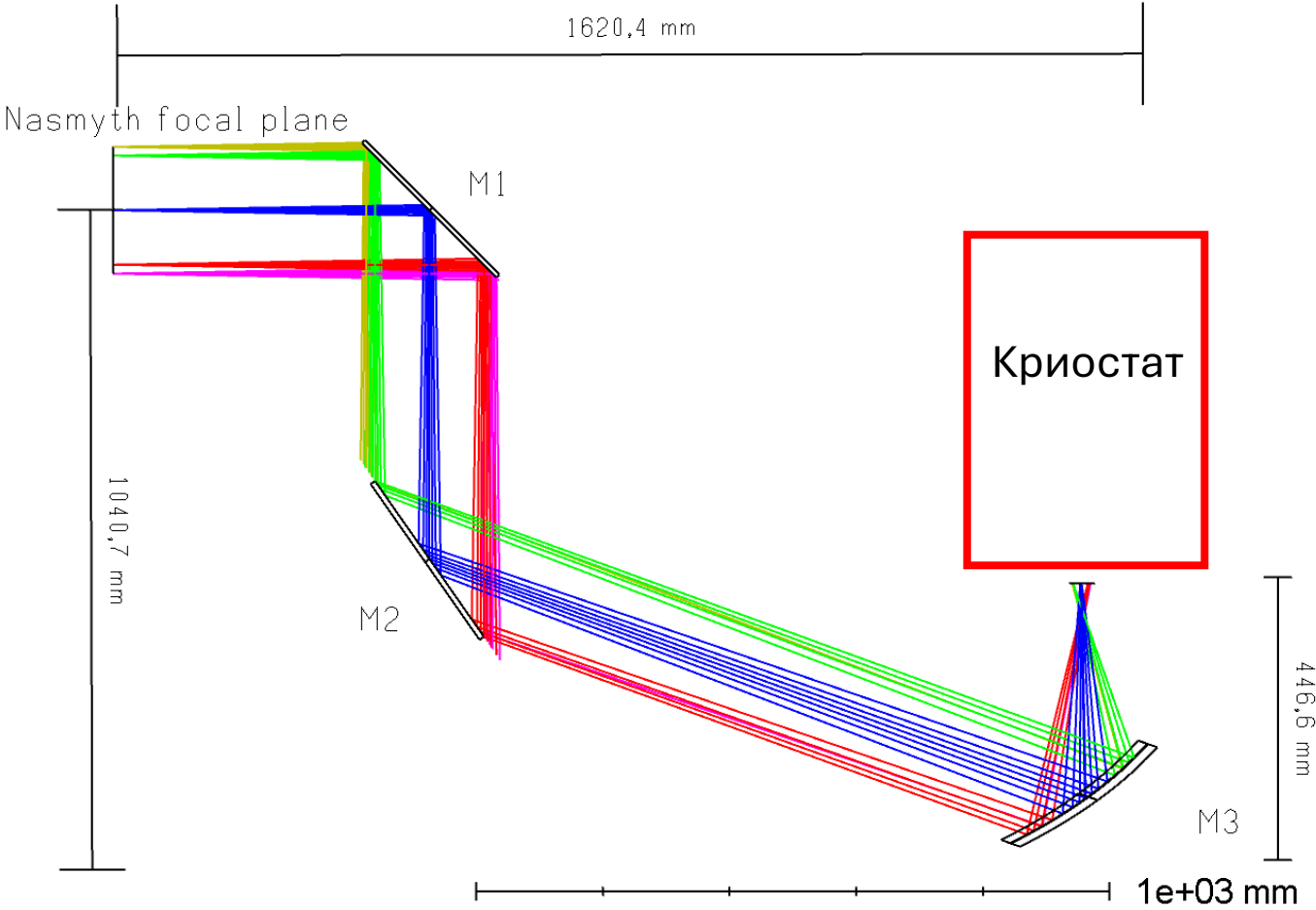
Согласующая оптика для БТА на основе внеосевого параболоида

Задача – достичь диаметра первого дифракционного максимума $D(\lambda = 2998 \text{ мкм}) \approx 30 \text{ мм}$



Согласующая оптика для БТА на основе внеосевого параболоида

$f'_3=200\text{ мм}, NA'=0.1767, F\#4.8, V=-0.093^\times$

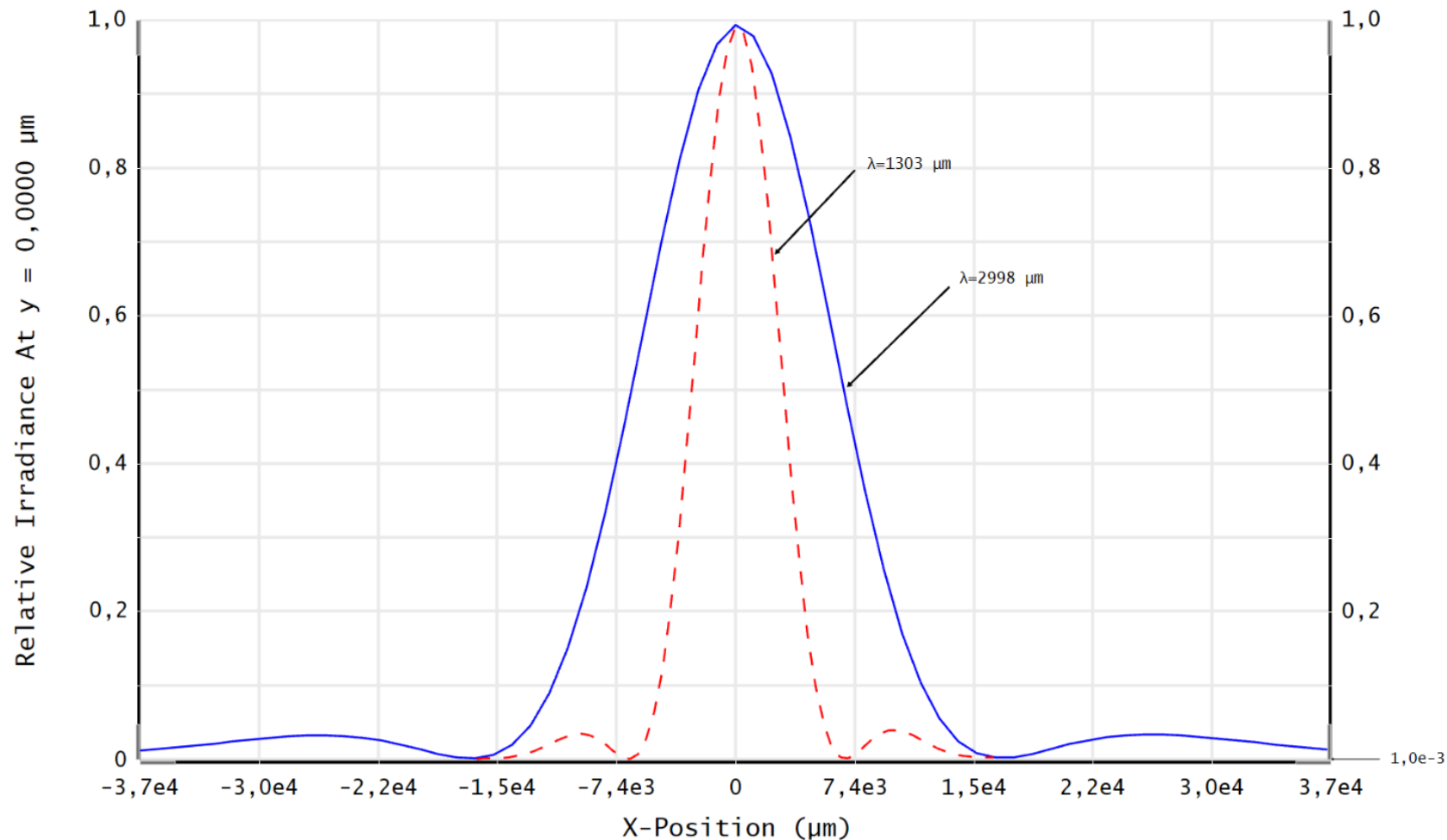


Диаметр дифракционного пятна для осевой точки (Huygens PSF), мм	
$\lambda=1303\text{ }\mu\text{m}$ (230 GHz)	14
$\lambda=2998\text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz).	32

Световой диаметр M1 300 мм, M2 – 300 мм, M3 – 220 мм

Согласующая оптика для БТА на основе внеосевого параболоида

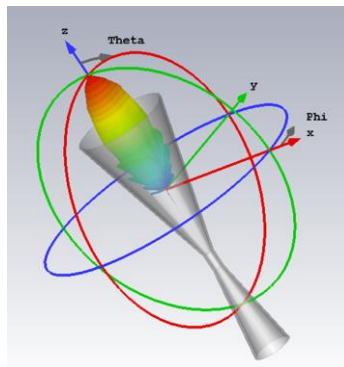
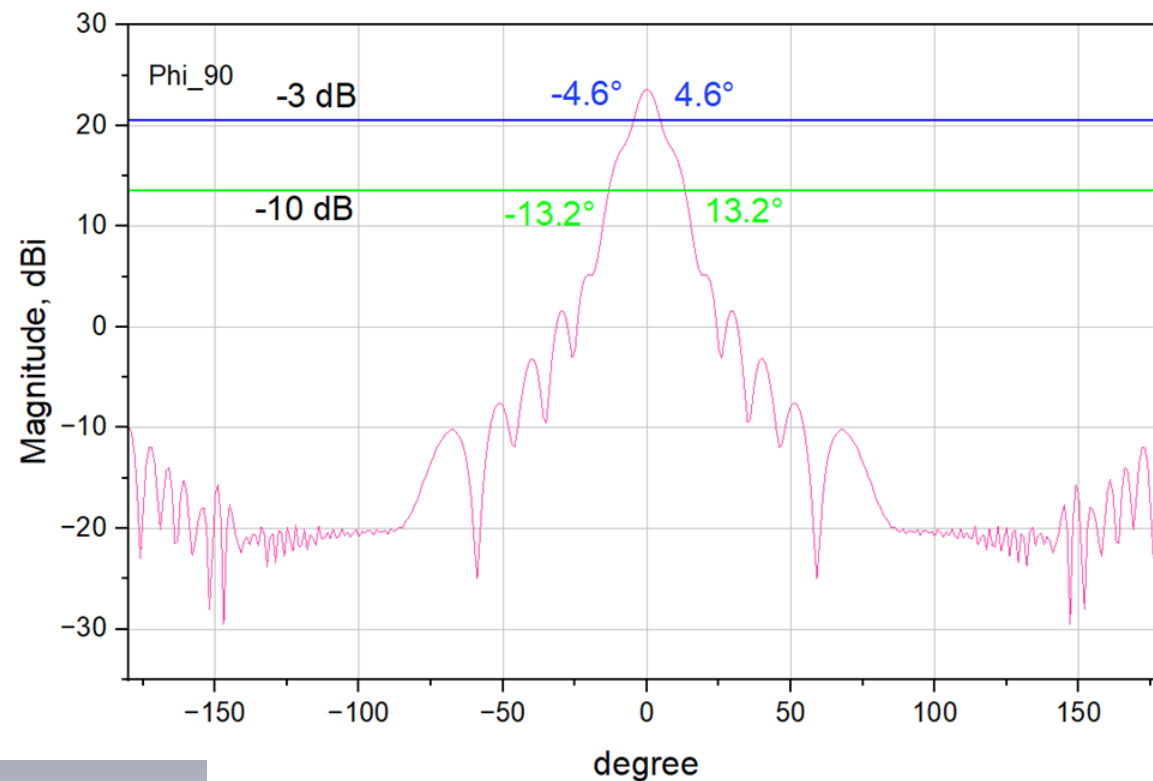
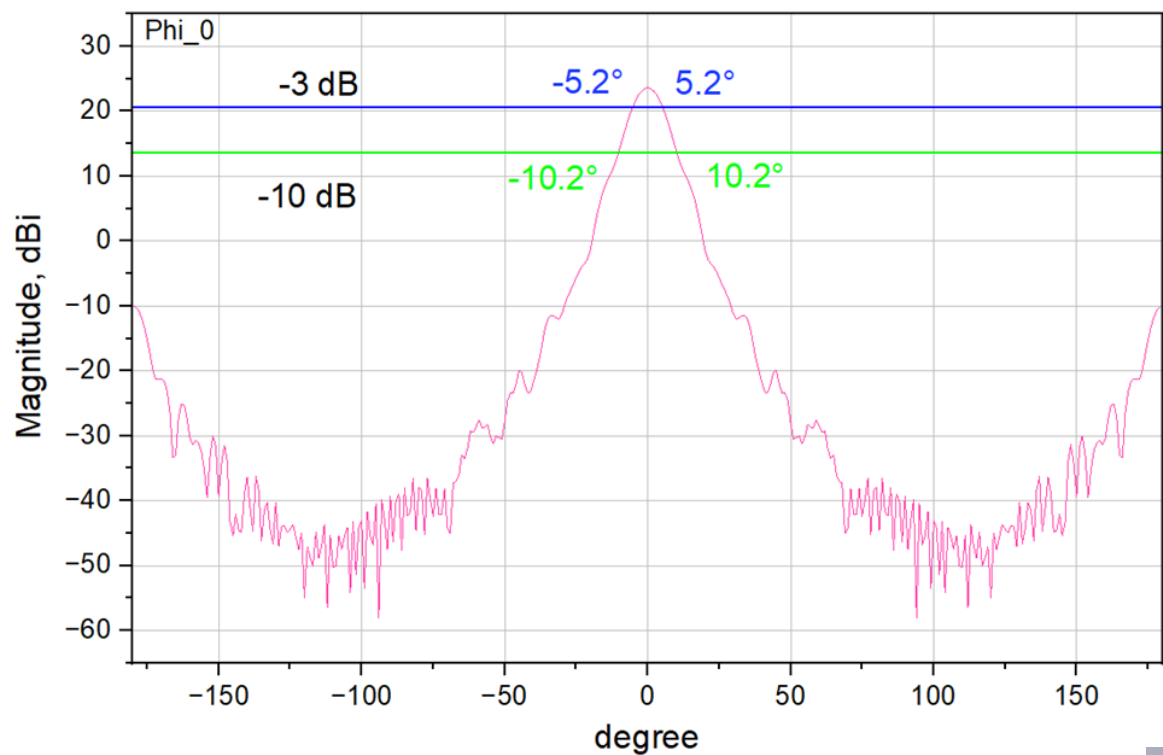
ФРТ с учетом дифракционных эффектов для осевой точки предмета



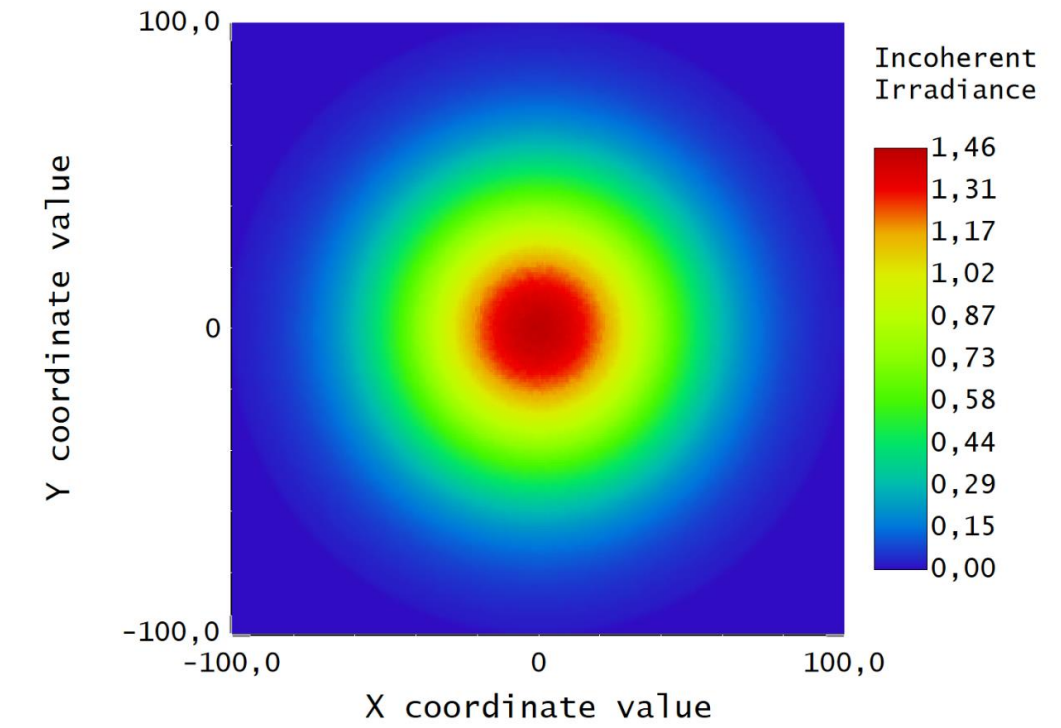
$\lambda = 2998 \mu\text{m}$ (100 GHz)

$\lambda = 1303 \mu\text{m}$ (230 GHz)

Приемник ТГц излучения

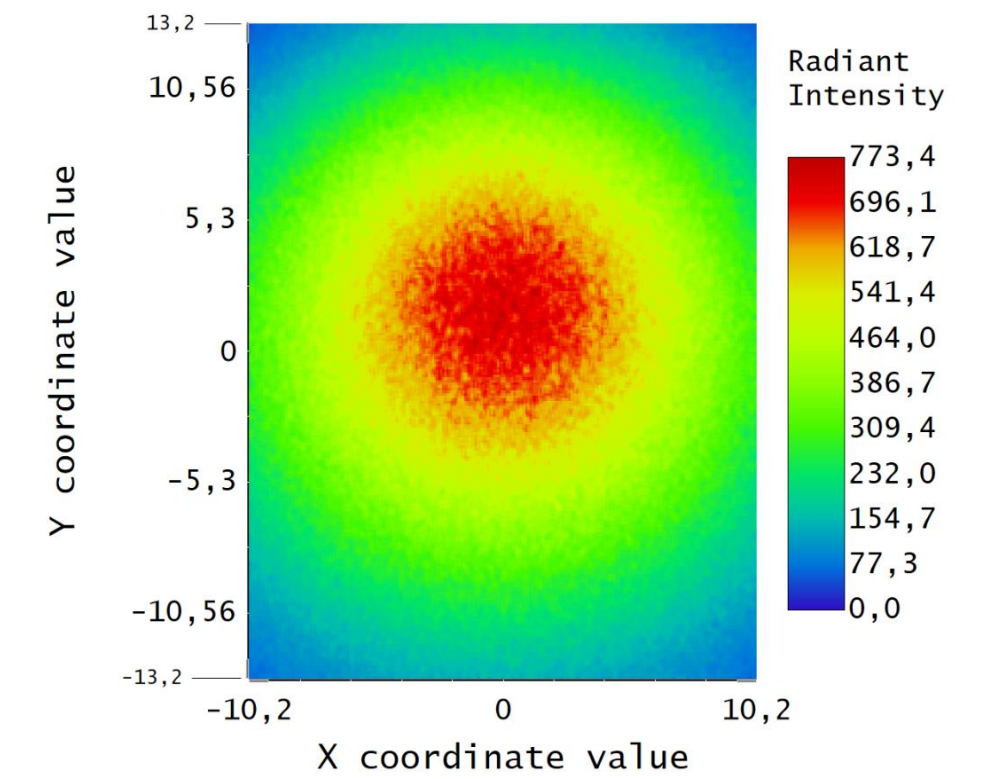


Согласующая оптика для БТА на основе внеосевого параболоида



Detector Image: Incoherent Irradiance	
12.04.2025 Detector 21, NSCG Surface 1: Ref Size 200,000 W X 200,000 H Millimeters, Pixels 250 W X 250 H, Total Hits = 19954121 Peak Irradiance : 1,4564E+00 Watts/cm^2 Total Power : 1,0009E+02 Watts	correction c Config

Освещенность в фокальной плоскости Несмита имитирующая Гауссов пучок при $\lambda=2998\text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz)



Detector Image: Radiant Intensity	
12.04.2025 Detector 19, NSCG Surface 1: Fin Size X: -10,200 to 10,200, Y: -13,200 to 13,200 deg, Pixels 250 W X 250 H, Total Hits = 9097797 Peak Intensity : 7,7341E+02 Watts/Steradian Total Power : 5,9614E+01 Watts	C

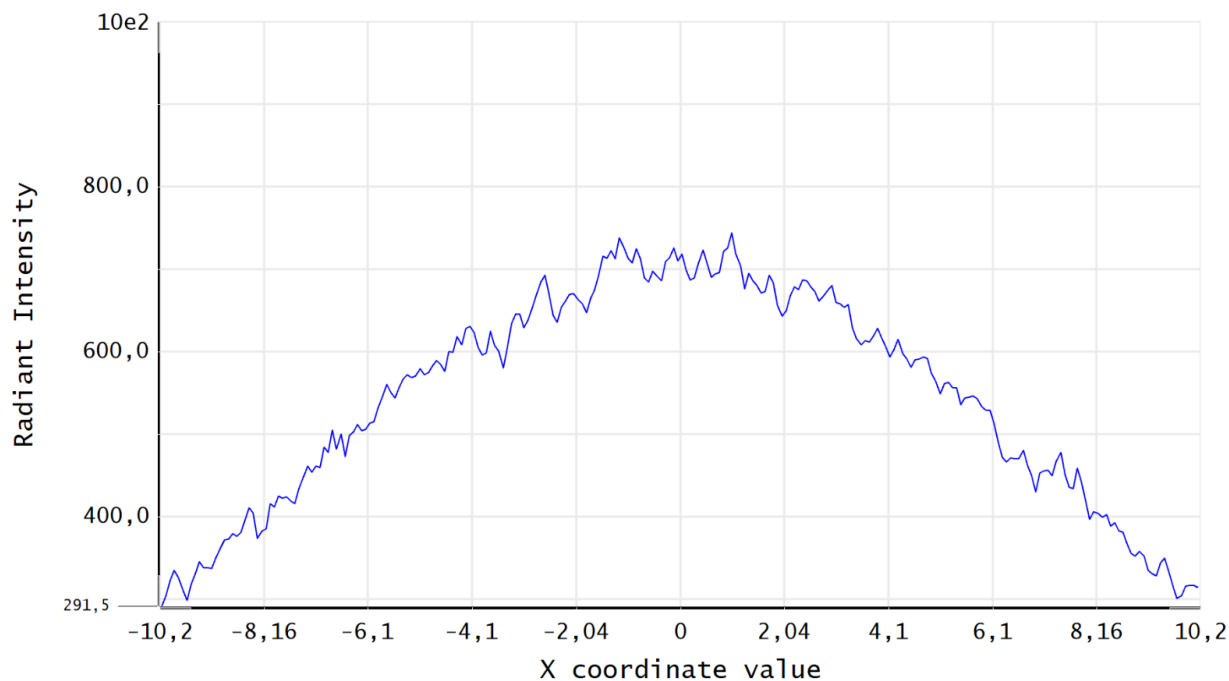
Освещенность в телесном угле плоскости рупора после корректирующей оптики при $\lambda=2998\text{ }\mu\text{m}$ (100 GHz)

Согласующая оптика для БТА на основе внеосевого параболоида

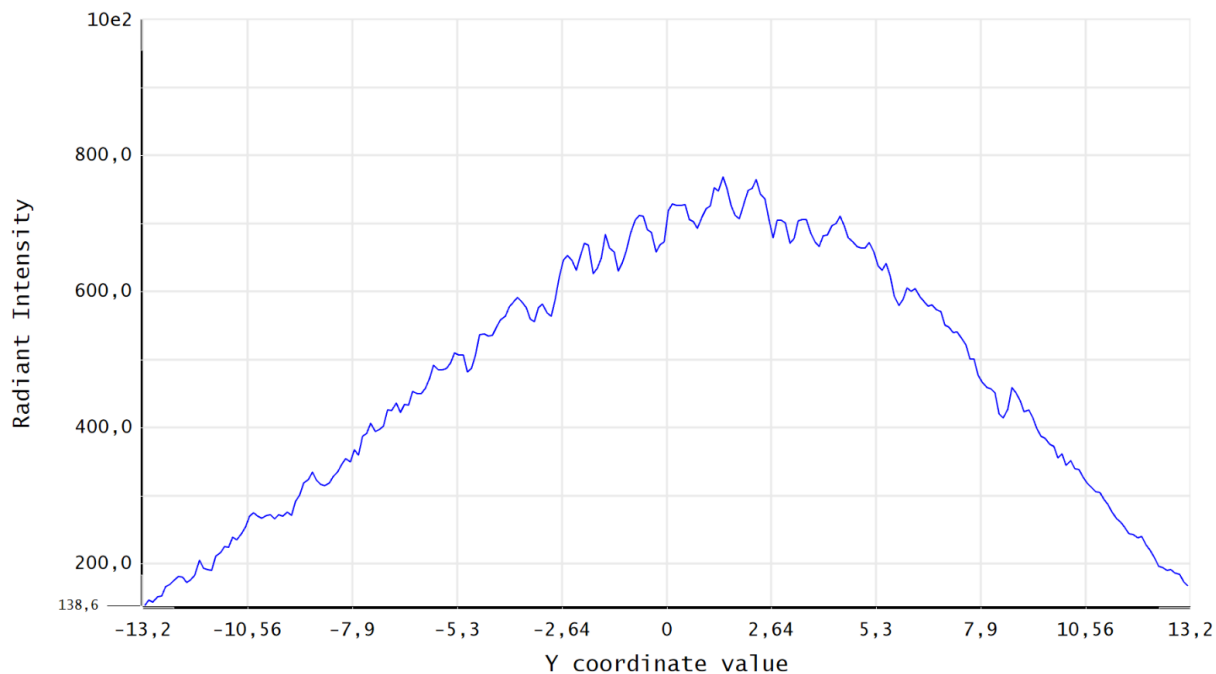
Освещенность в телесном угле в плоскости рупора после корректирующей оптики при $\lambda=2998 \mu\text{m}$ (100 GHz).

Мощность составляет 59,6% от мощности пучка на входе

Сечение по X



Сечение по Y



Заключение

- Выполнено согласование с габаритными параметрами и ДН приемного устройства
- Возможна реализация оптического канала для наведения
- Сканирование изображения в фокусе Несмита будет осуществляться качанием плоского зеркала M2 в диапазоне углов ± 2 градуса
- Уточнение габаритов площадки Н1 для размещения согласующей оптики

Спасибо за внимание!