

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ РАДИОТЕЛЕСКОПА РТ-70 В ММ. ДИАПАЗОНЕ

*Дубаренко В.В.1, Городецкий А. Е.1, Кучмин А. Ю.1,  
Артеменко Ю.Н.2, Гиммельман В.Г.3*

1 Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, e-mail: [vvd@ss.ipme.ru](mailto:vvd@ss.ipme.ru)

2 Астрокосмический центр ФИАН, Москва, e-mail: [straut@asc.rssi.ru](mailto:straut@asc.rssi.ru)

3 ОАО Конструкторское бюро специального машиностроения, Санкт-Петербург, e-mail: [kbsm@mail.admiral.ru](mailto:kbsm@mail.admiral.ru)

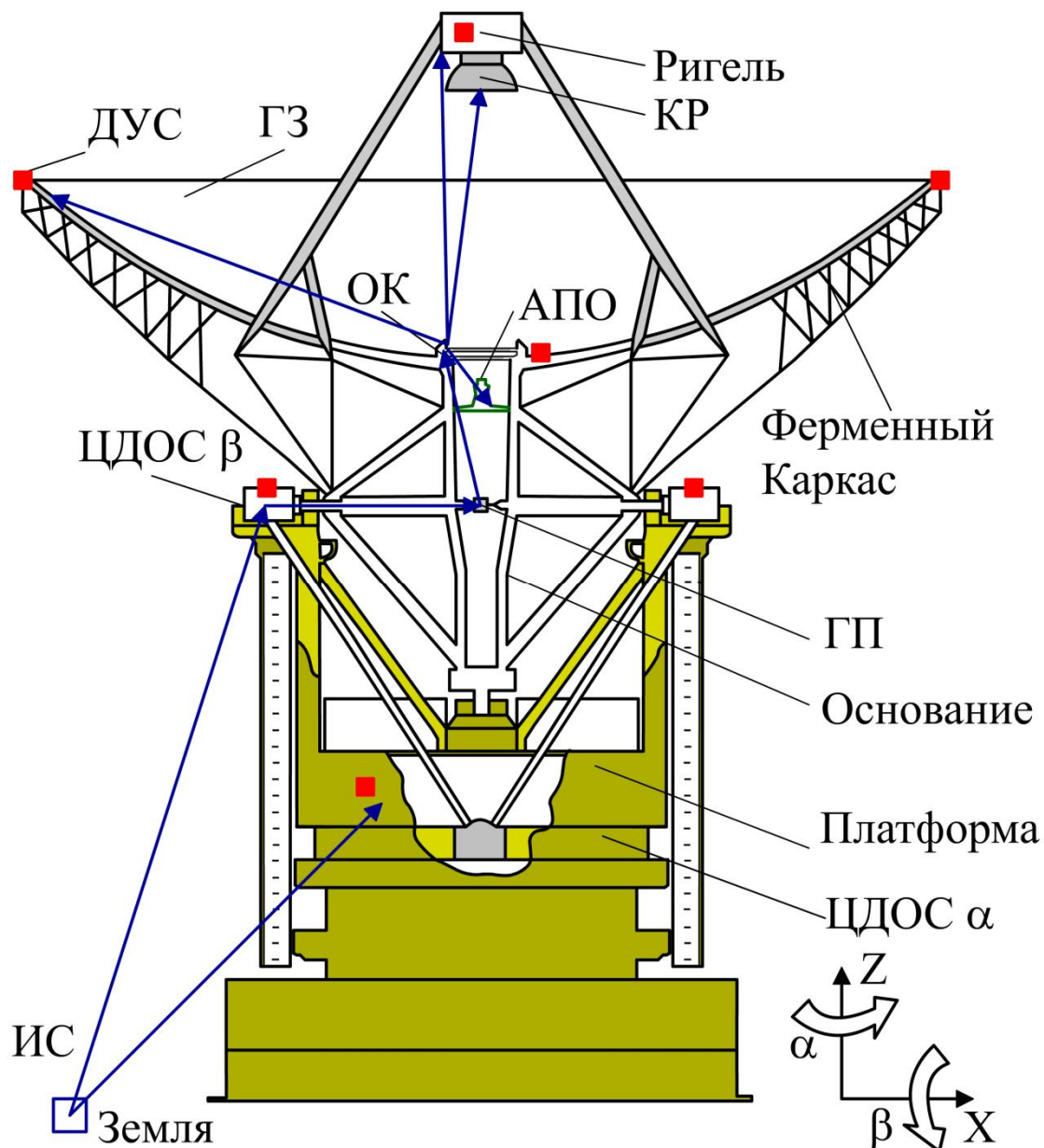
## **Цель :**

**Разработка методов управления и автофокусировки зеркальной системы радиотелескопа для компенсации влияния ошибок наведения и деформаций его конструкции на качество приёма радиосигнала.**

# **Задачи исследования:**

- 1. Разработать математическую модель радиотелескопа как идентификатор неизмеряемых координат его вектора состояния.**
- 2. Синтезировать систему управления главным зеркалом радиотелескопа.**
- 3. Синтезировать систему автофокусировки зеркальной системы радиотелескопа.**
- 4. Разработать методику оценки качества системы управления.**

# Концепция построения измерительной системы



КР – контррефлектор

ГЗ – главное зеркало

ОК – опорное кольцо

ДУС – датчик угловых скоростей

ИС – измерительная система

АПО – адаптивная платформа облучателя

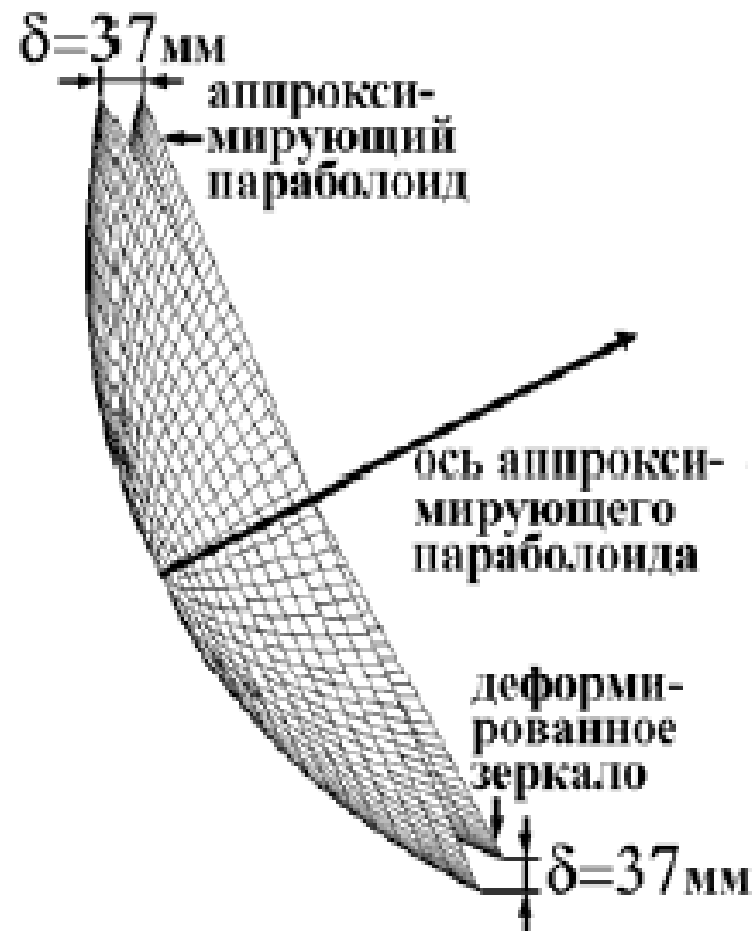
ЦДОС – цифровой датчик обратной связи

$\beta$  – угол места

$\alpha$  – угол азимута

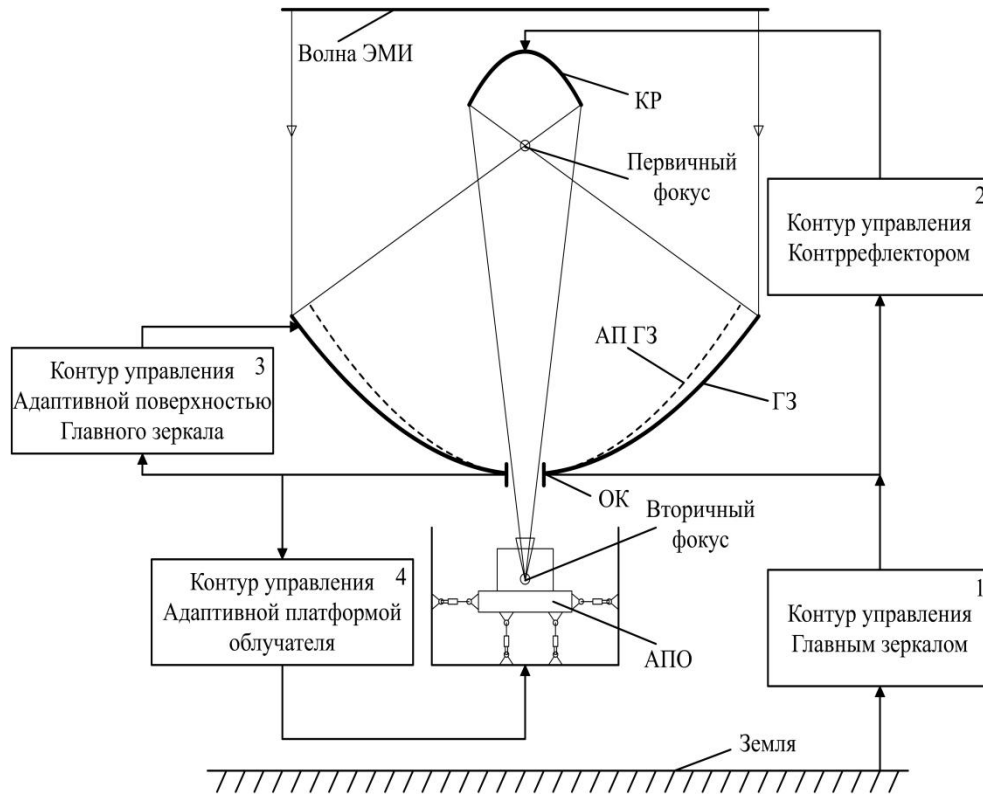


Сравнение недеформированного зеркала и аппроксимирующего параболоида (увеличено в 40 раз)



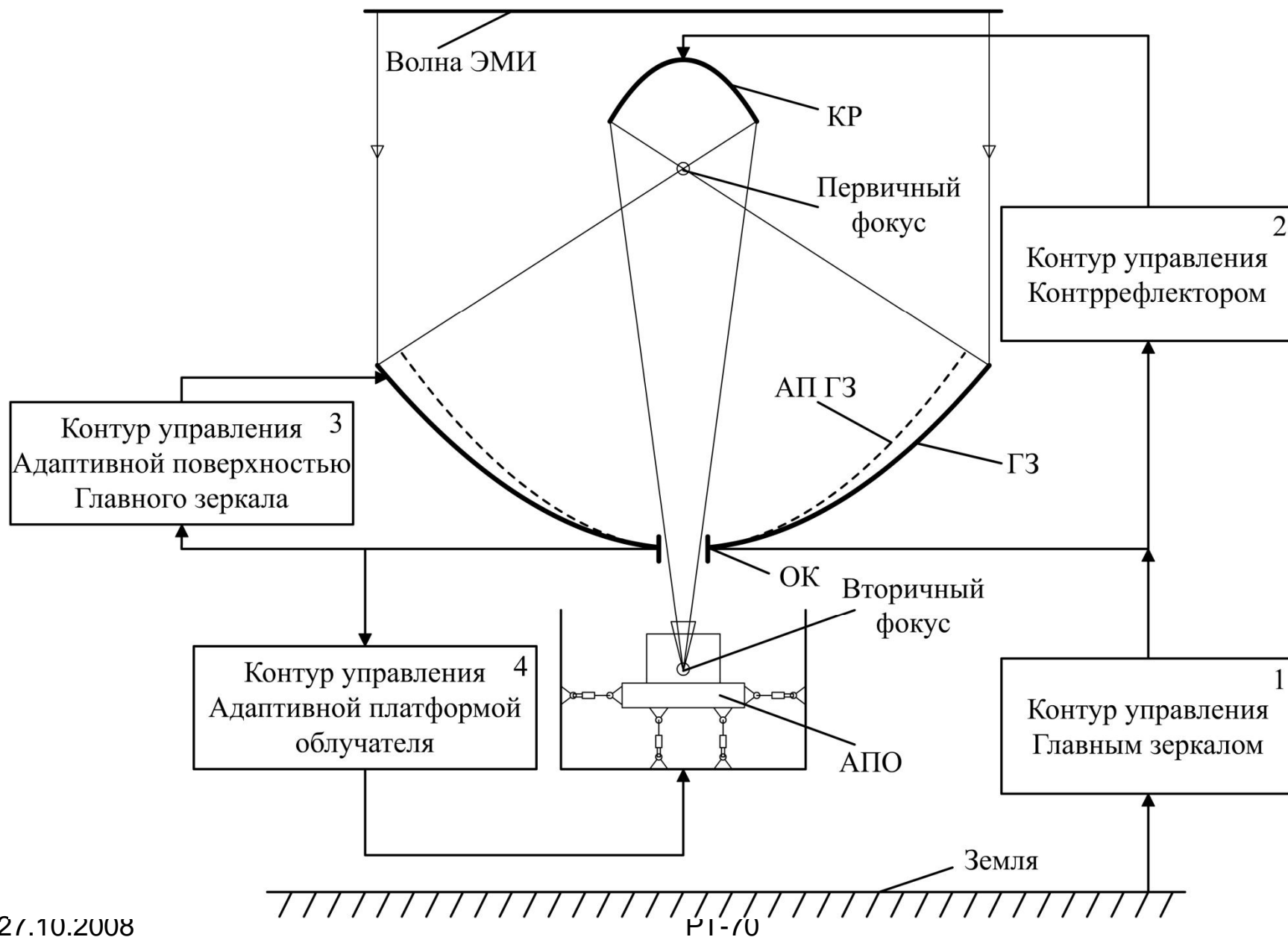
Сравнение деформированного зеркала и аппроксимирующего параболоида (увеличено в 75 раз)

# Концепция управления элементами зеркальной системы





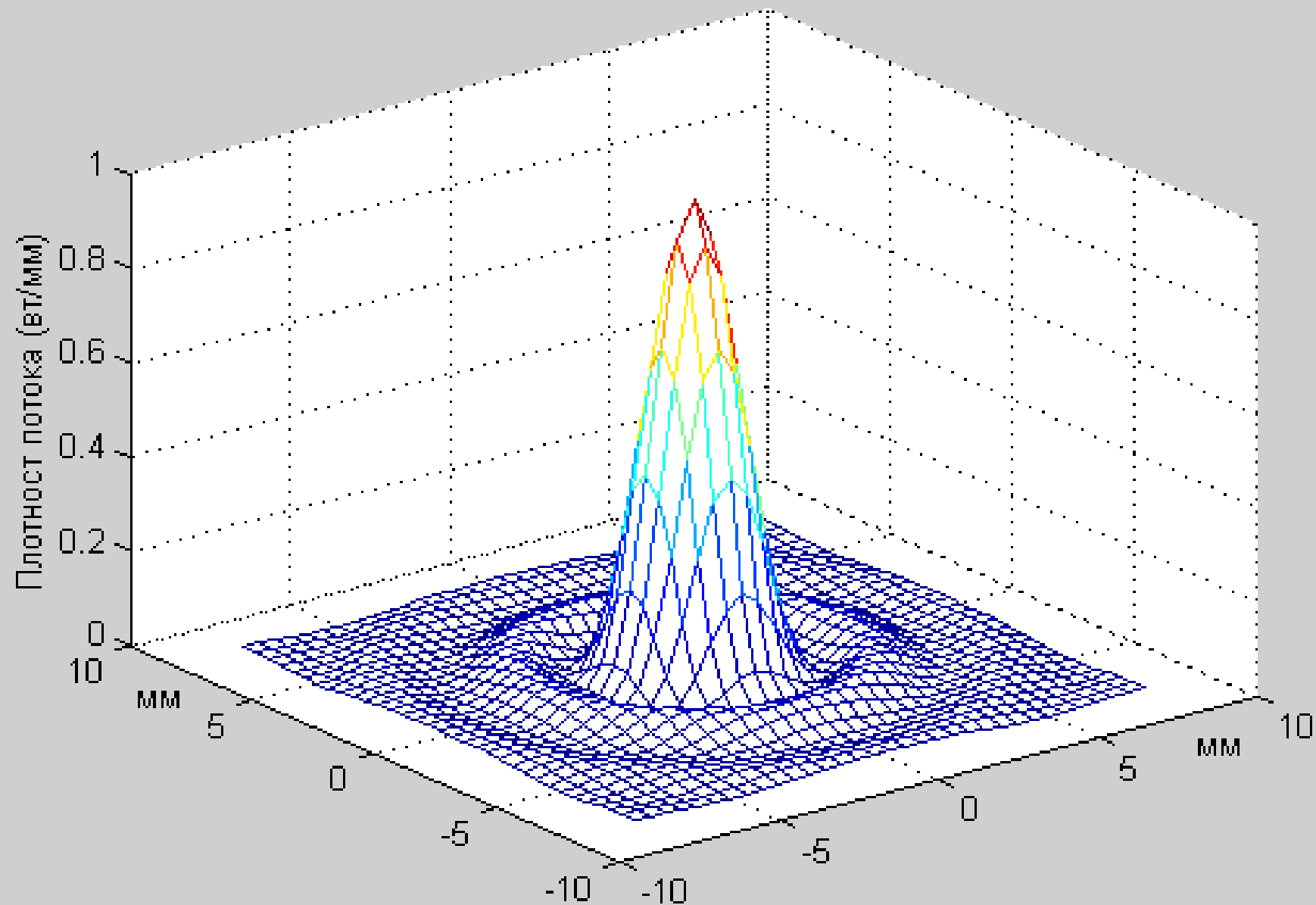
# Контуры управления РТ-70





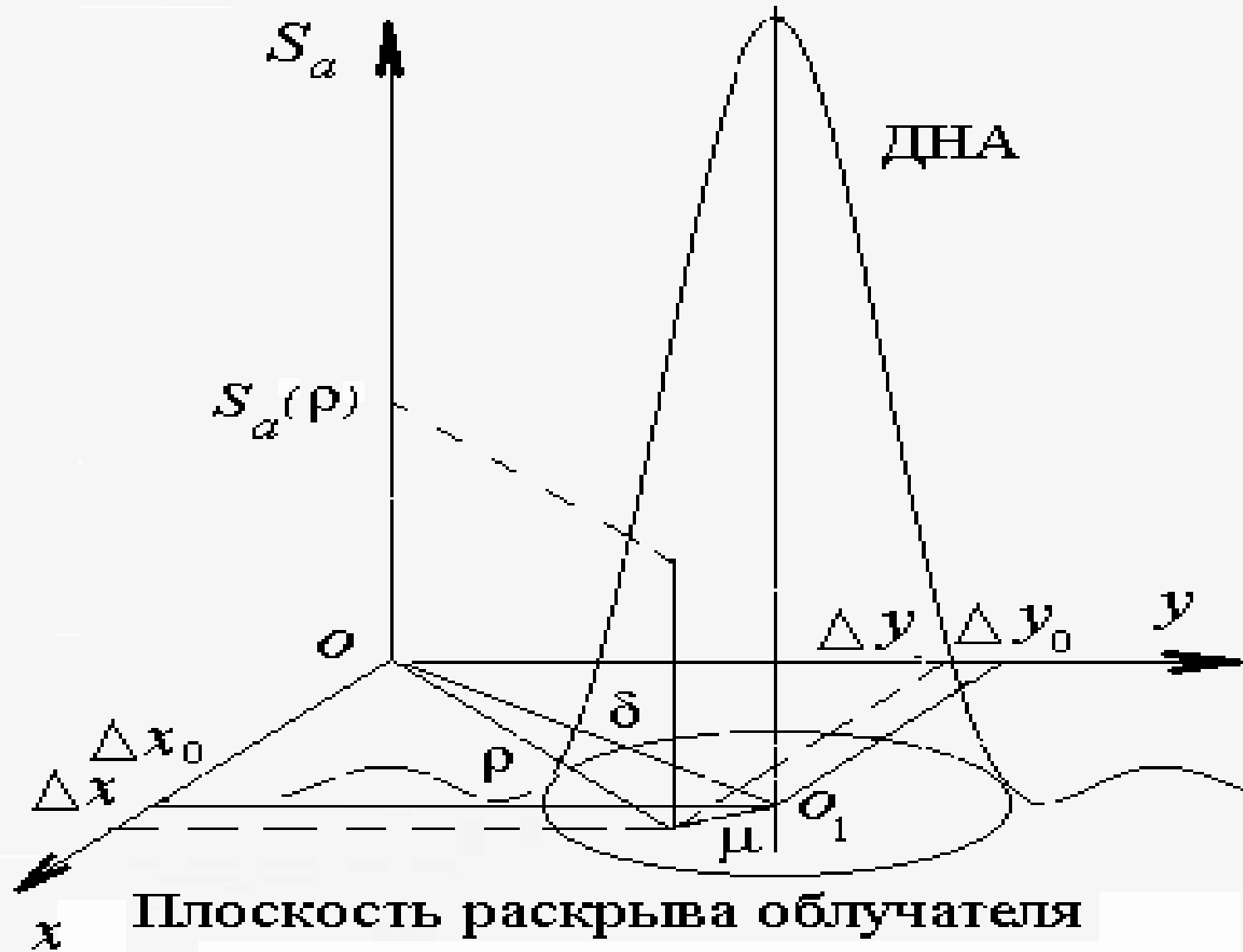
# Основная расчетная схема

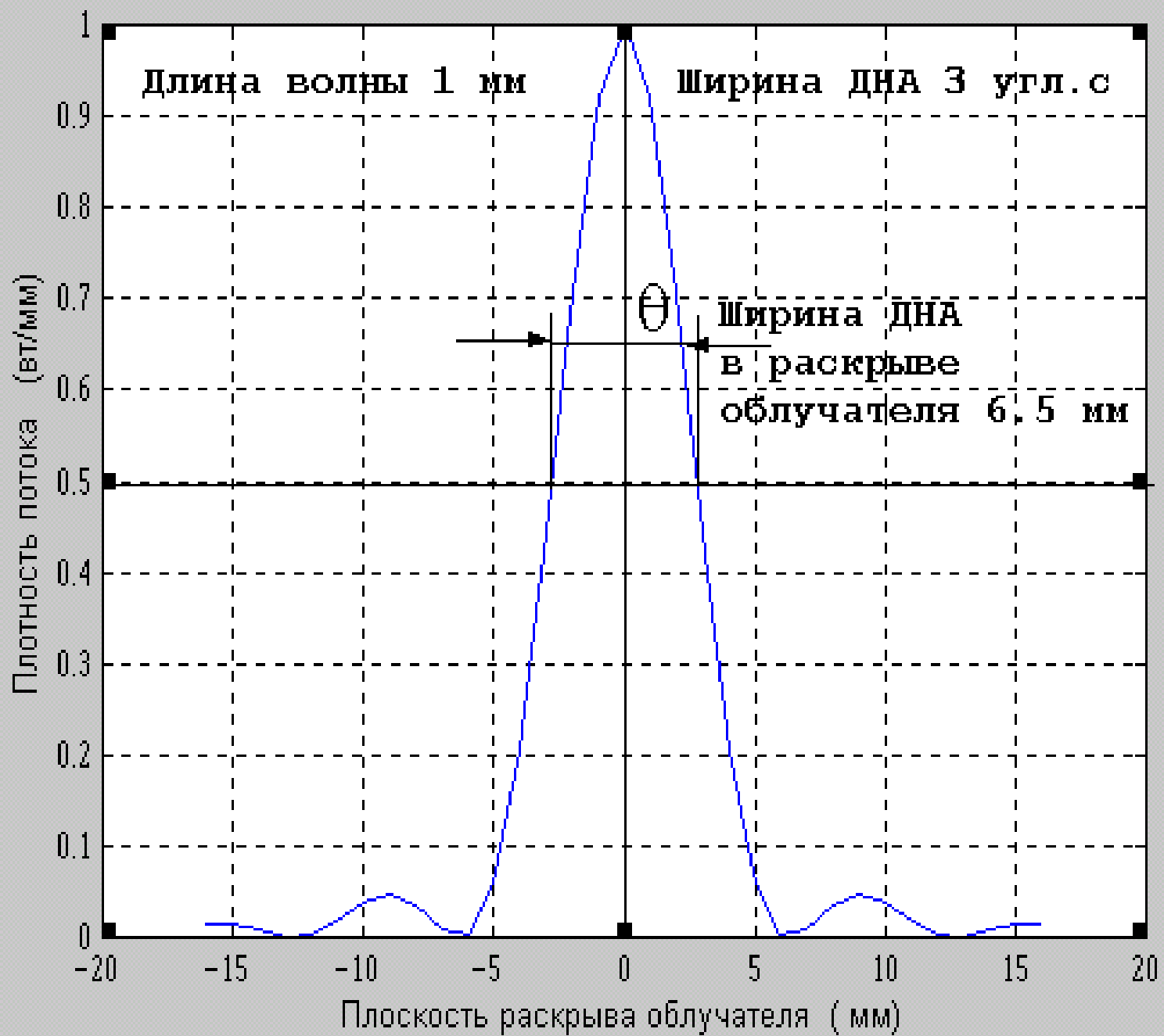




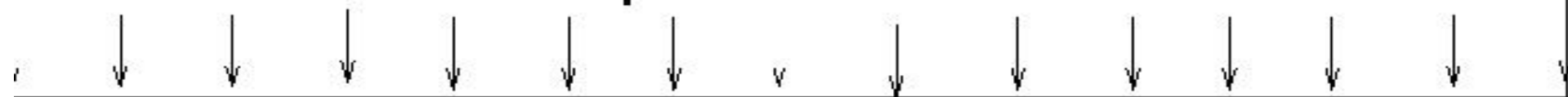
Плотность потока энергии от точечного источника в раскрые облучателя

# Плотность потока энергии КИР

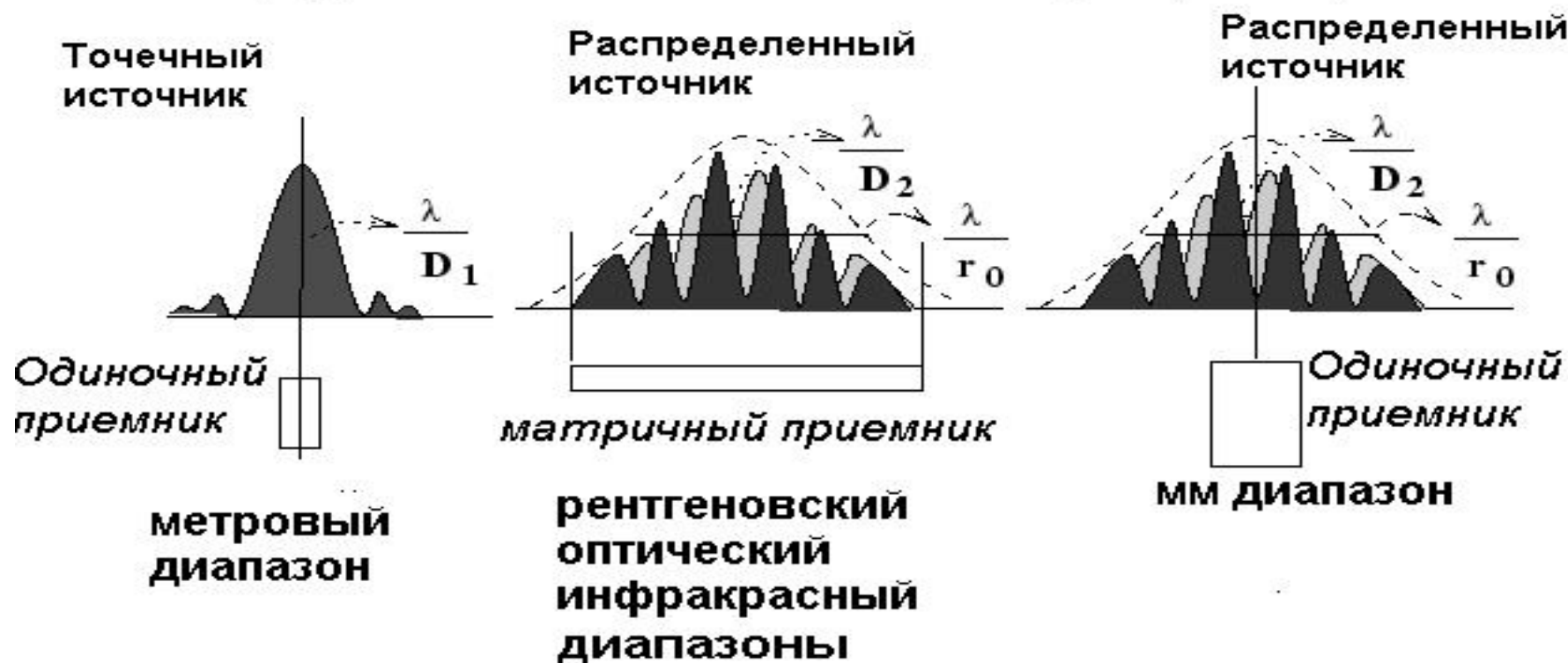




## Электромагнитная волна

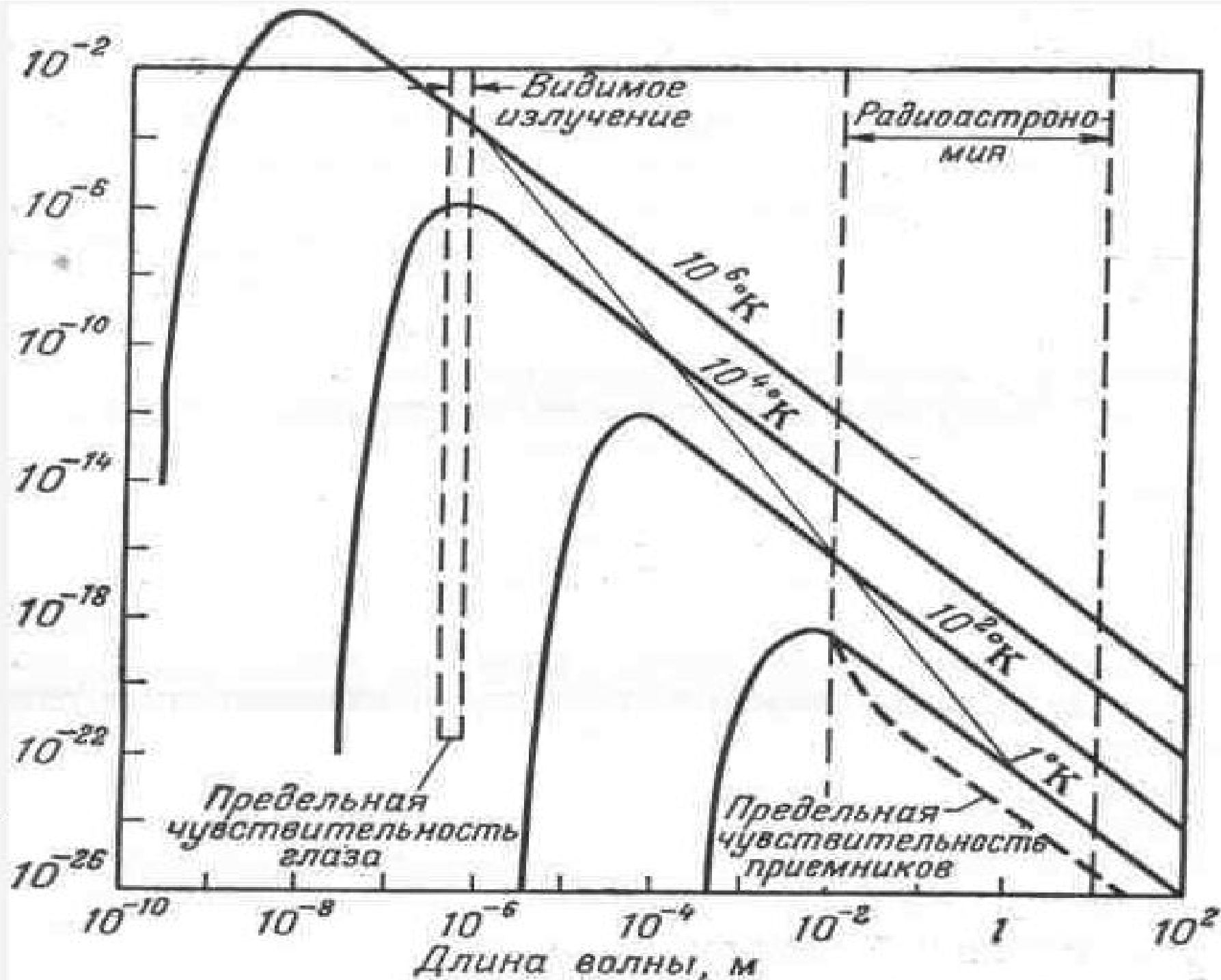


### Распределение интенсивности поля в раскрытии приемника



- В одиночный приемник мм диапазона могут попасть несколько источников излучения

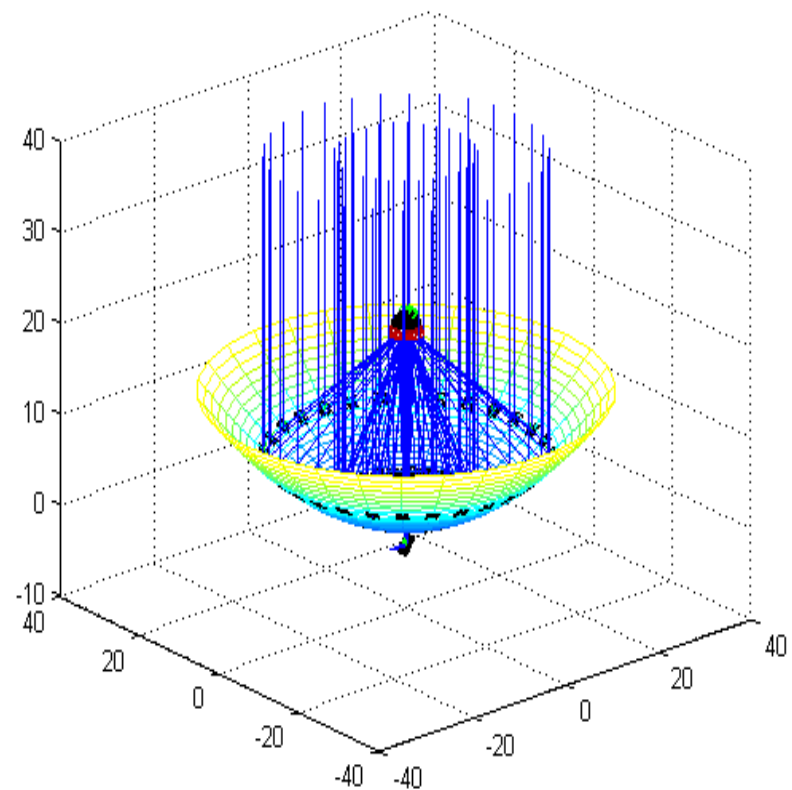
$S_0$  Плотность потока точечных источников (Вт/м<sup>2</sup>\*Гц)



## Моделирование прохождения лучей в ЗАС

Для плоской ЭМВ процессы в ЗАС описываются законами:

- отражения
- интерференции
- поляризации



# Фотонная модель зеркальной системы

## *Допущения:*

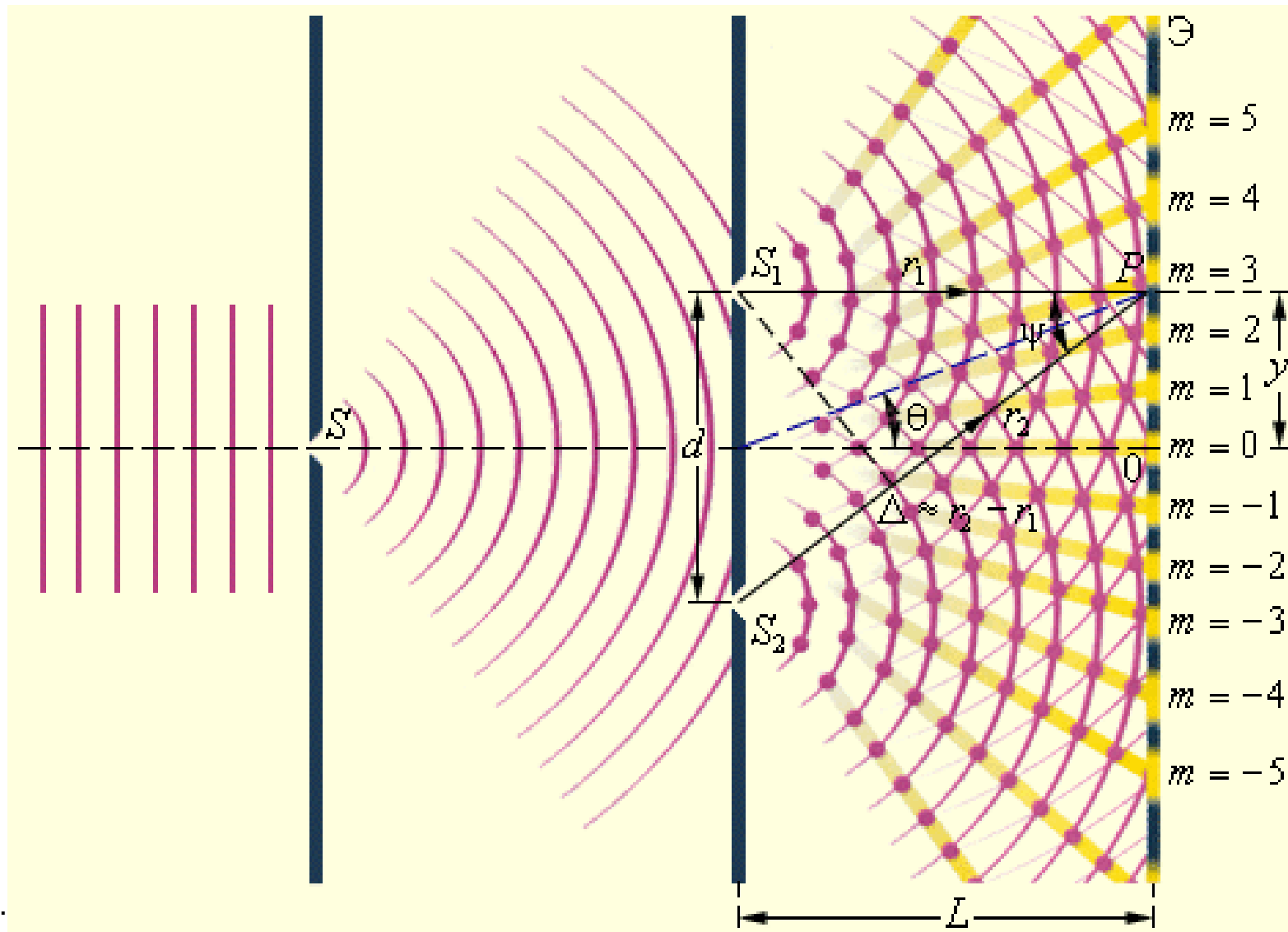
1. Рассматривался точечный радиоисточник.
2. Под радиоизлучениями будем понимать поток фотонов, излучаемых космическими источниками (КИР).
3. Поток фотонов от КИР падает на зеркальную систему (ЗС) радиотелескопа (РТ), которая перенаправляет этот поток в приемник (П).
4. Принципиальным отличием фотонной модели радиоизлучения от модели, принятой в электродинамике, является то, что носителями энергии здесь являются фотоны, которые не проявляют волновых свойств.
5. Волновые процессы проявляются в самом веществе, из которого состоит облучатель П, в результате взаимодействия с ним потока фотонов.
6. Распределение интенсивности в плоскости облучателя определяется методом интерференции, с учетом фазовых зависимостей, из-за различной длины траекторий фотонов от плоскости, перпендикулярной потоку, до плоскости облучателя.



## Фотонная модель зеркальной системы радиотелескопа

- $mc^2 = h\nu$
- $m$  – масса фотона
- $c$  – скорость света
- $h$  – постоянная Планка
- $\nu$  – число фотонов, падающих на чувствительный элемент в единицу времени.
- Кинетическая энергия одного фотона численно равна постоянной Планка  $h$

# Схема интерференционного опыта Юнга.



# Интерференция

$$x = A \cdot \cos(\omega t + \varphi_1) + A \cdot \cos(\omega t + \varphi_2)$$

$$x = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \cdot \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)$$

$$I_S = \left[2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right)\right]^2 = 2A^2 + 2A^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

$$I_S = 2I + 2I \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

# Электродинамическая модель зеркальной системы

## *Допущения:*

1. Рассматривался точечный радиоисточник.
2. Приходящий фронт волны считался плоским, монохроматическим, из-за больших расстояний от Земли до радиоисточника.
3. Электромагнитный поток представлен совокупностью отдельных электромагнитных лучей.
4. Так как длина волны во много раз меньше диаметров главного зеркала (ГЗ) и контррефлектора (КР), распространение электромагнитного поля в зеркальной системе описывались методами геометрической оптики.
5. Распределение поля в области облучателя рассчитывалось методами физической оптики.

## *Рассчитывалось:*

1. Падение лучей на ГЗ, отражение лучей от ГЗ;
2. Падение отраженных лучей на КР, отражение лучей от КР;
3. Распределение интенсивности в плоскости облучателя методами физической оптики, с учетом фазовых зависимостей, из-за различной длины оптических путей лучей.

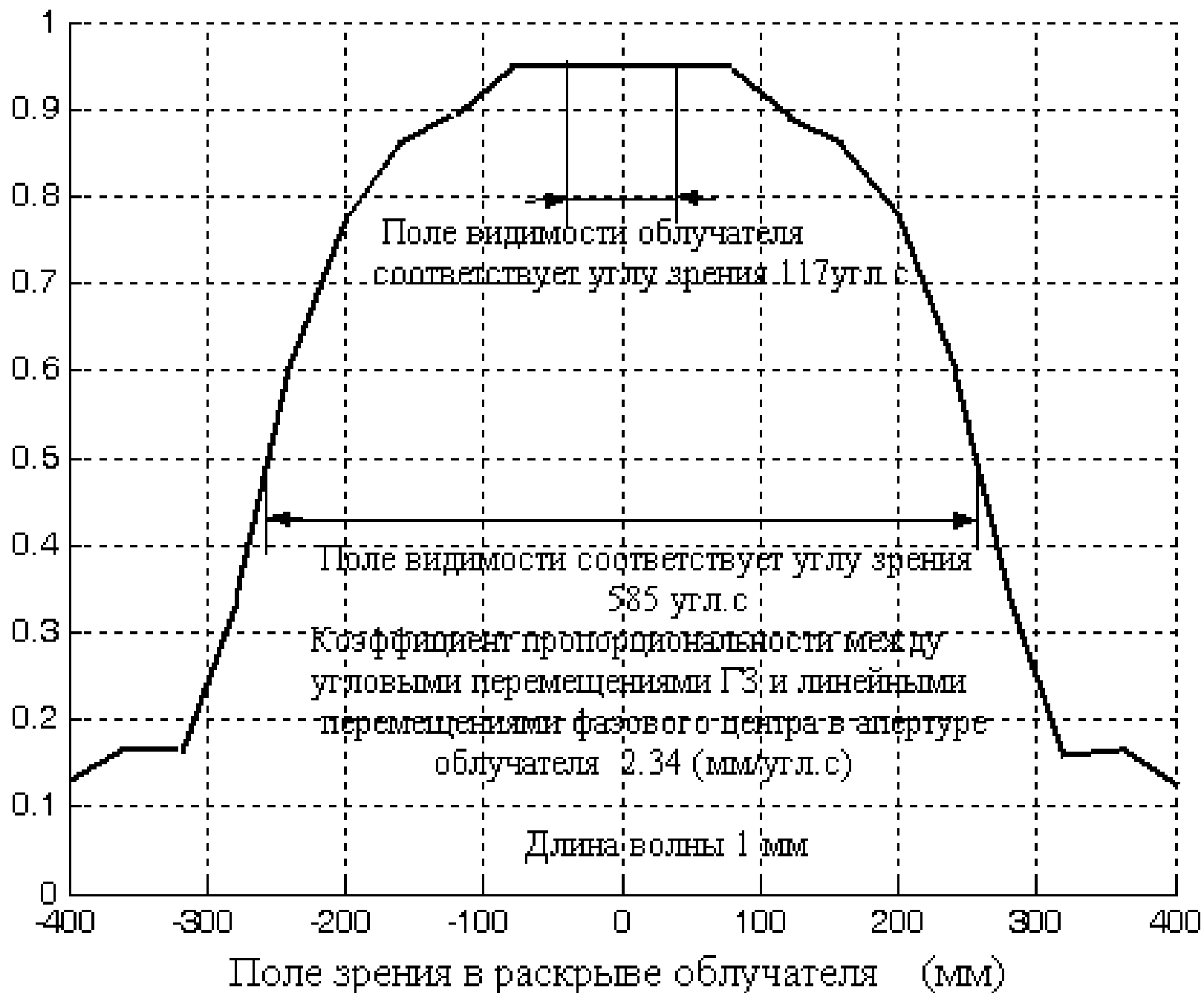
## Критерий качества управления зеркальной системой

$$J = \int_{S_{об}} I(e_{зс}, q_{об}, x, y) ds + a_2 - a_3 |q_{фц} - q_{об}|^2 + a_1 A(e_{зс}, q_{об}, x_{фц}, y_{фц}),$$

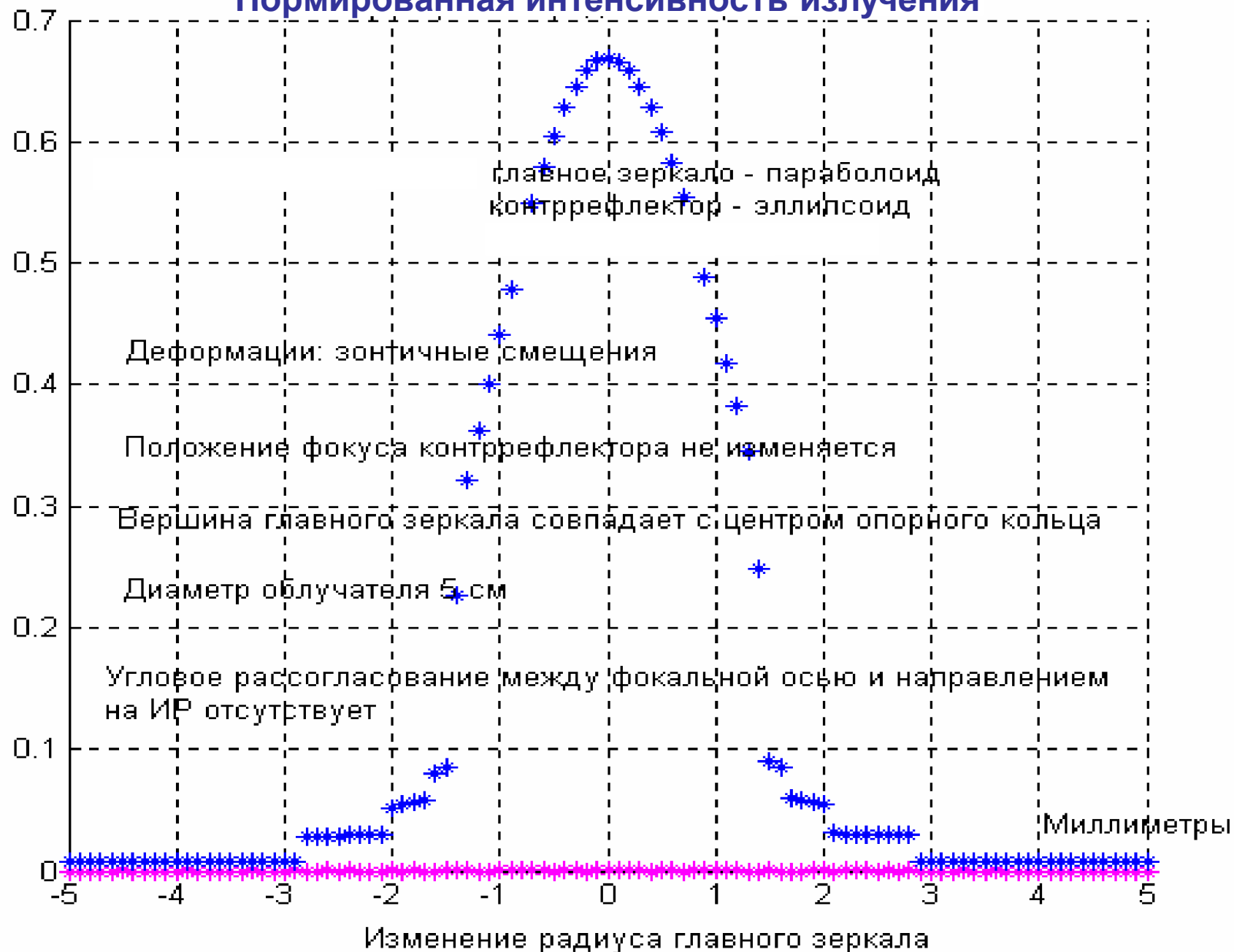
1.  $S_{об}$  – площадь облучателя;
2.  $q_{фц} = (x_{фц}, y_{фц}, z_{фц}, \beta_{фц}, \theta_{фц})^T$  – координаты точки с наибольшей интенсивностью электромагнитного поля (фазовый центр) и углы ориентации вектора направления распространения результирующей электромагнитной волны;
3.  $a_i$  – коэффициенты;  $q_{фц} = H_1 e_{зс} + H_2 (e_{зс}) e_{зс}$ ;
4.  $H_1, H_2$  – матрицы.

Для 70-метрового РТ на длине волны 1 мм были рассчитаны:

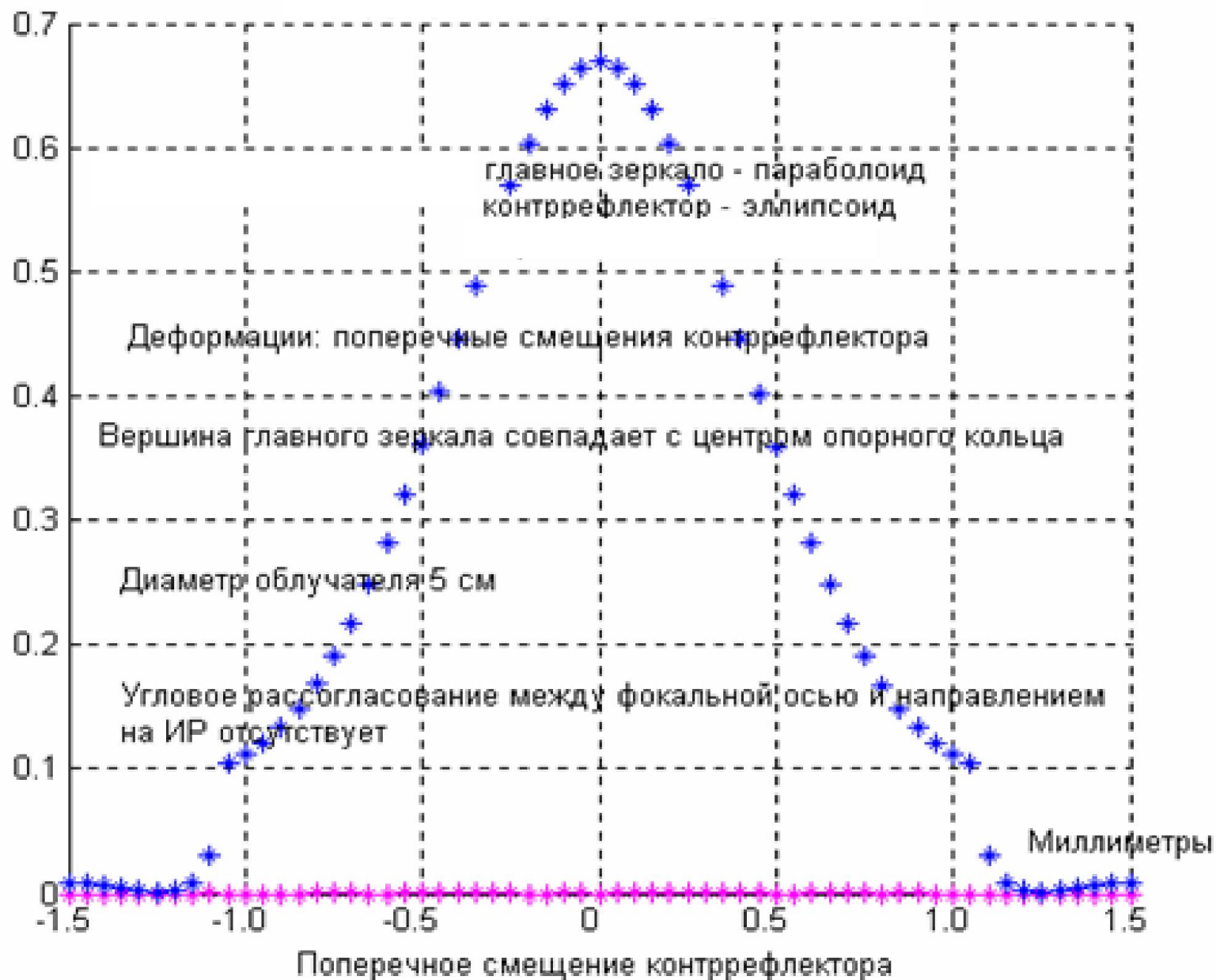
1. Угол зрения равный 600";
2. Поле зрения равное 900 мм;
3. Ширина ДНА для точечного приемника по половинной мощности равная 3 угл.с.



## Нормированная интенсивность излучения

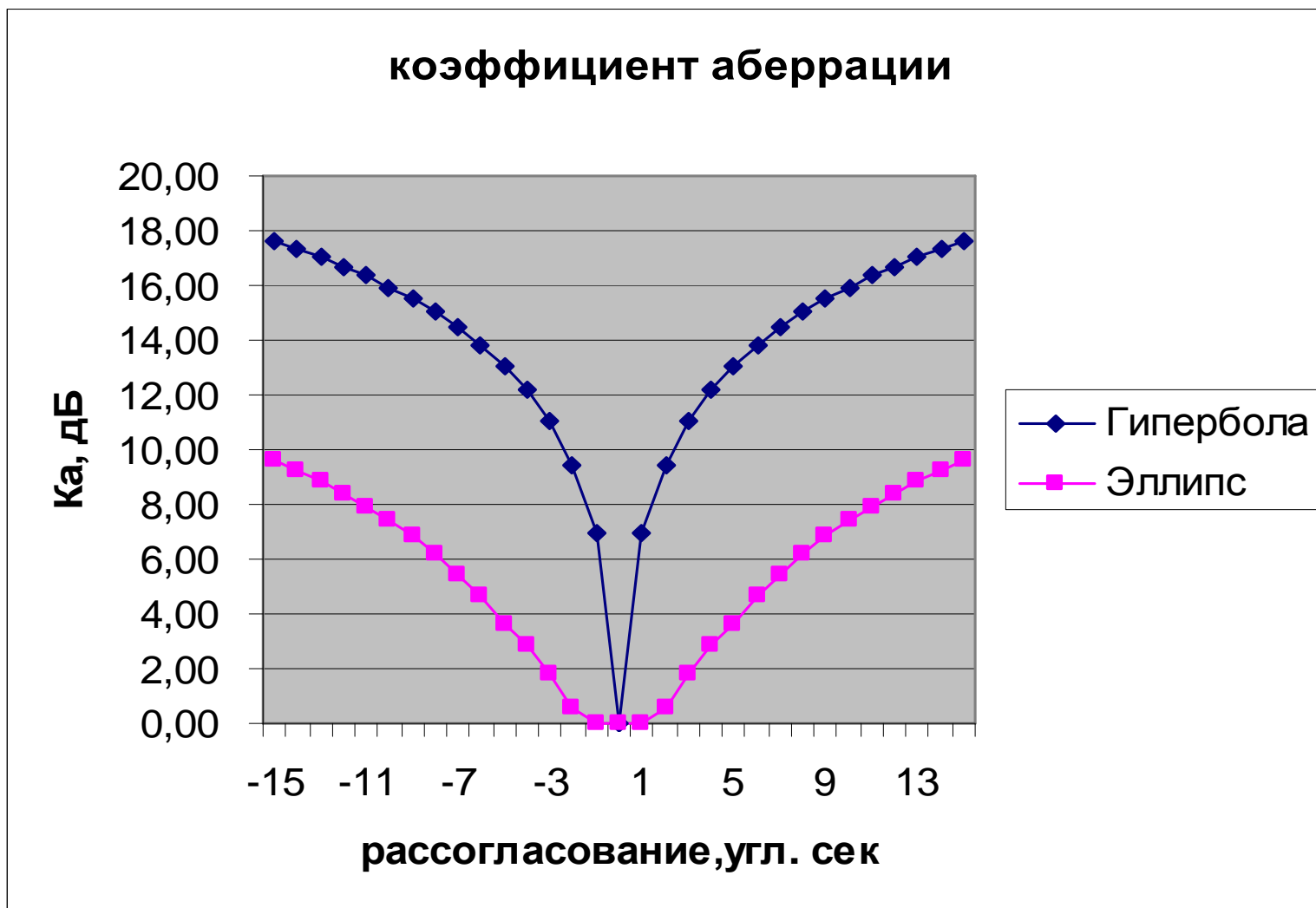


## Нормированная интенсивность излучения





Электромагнитное поле в срезе облучателя при разных углах между фокальной осью антенны и направлением на ИР

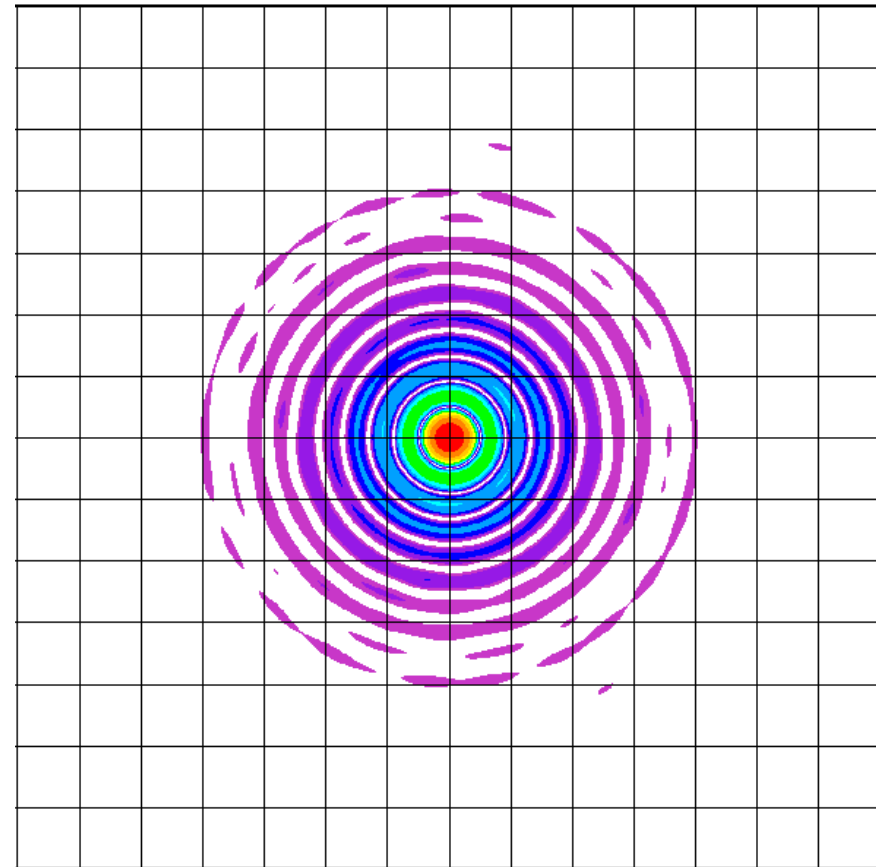
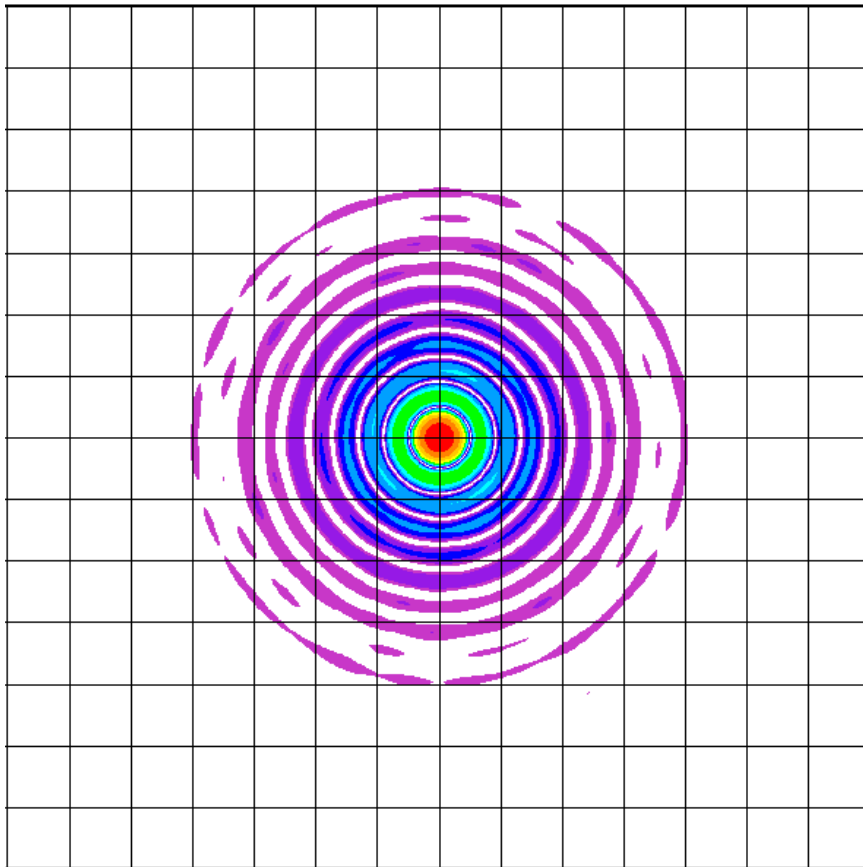


Электромагнитное поле в срезе облучателя при разных углах между фокальной осью антенны и направлением на ИР



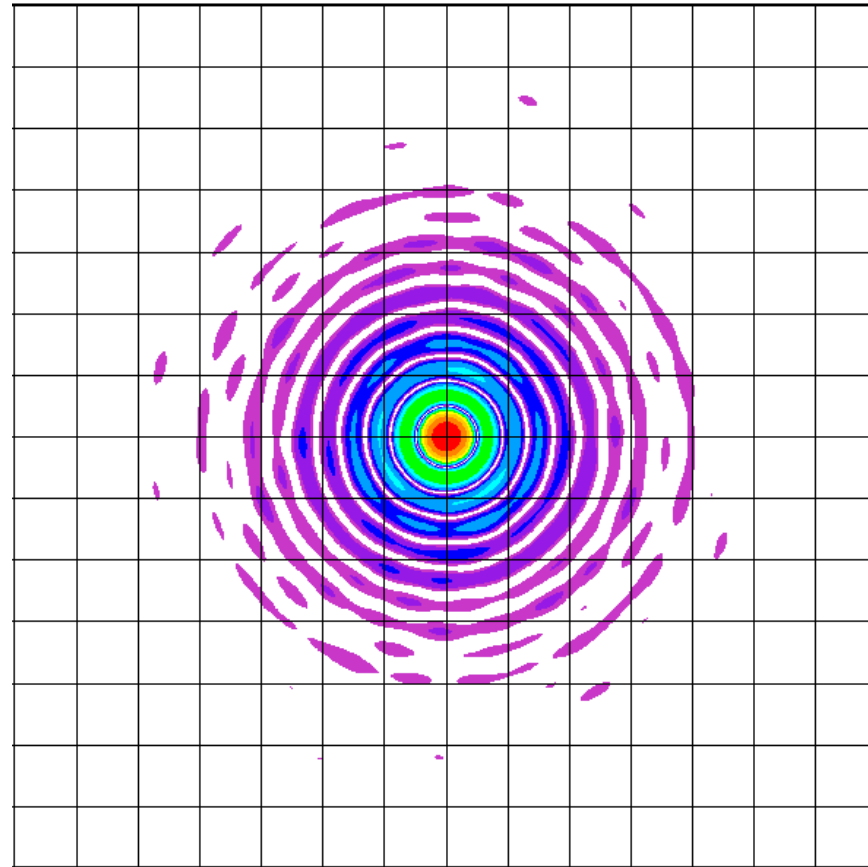
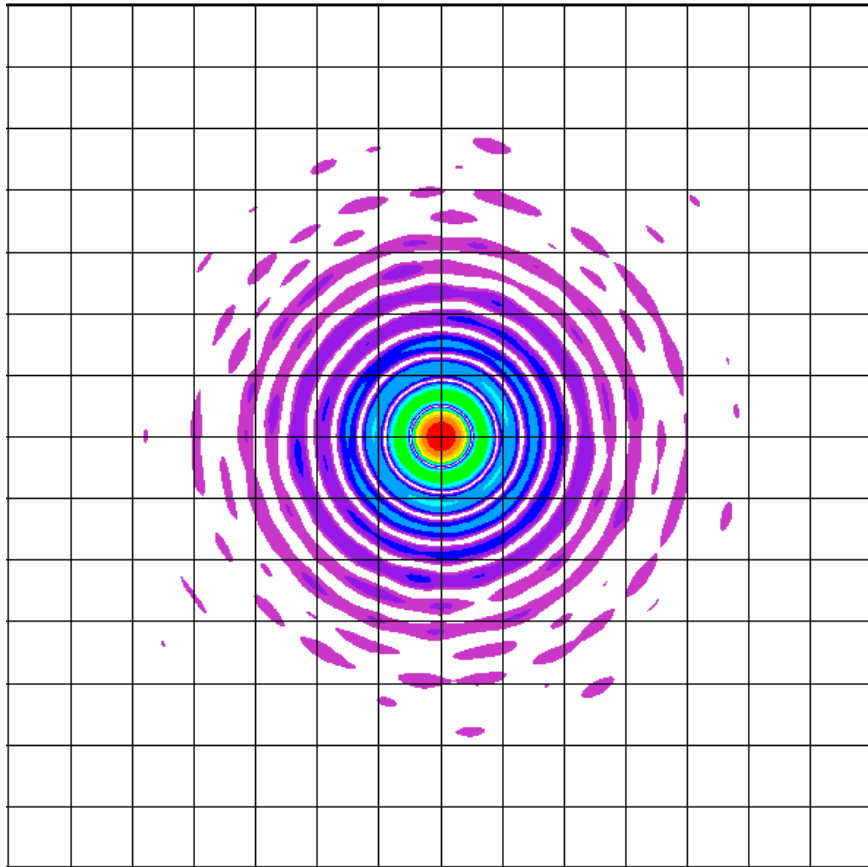
Равномерное распределение на отрезке [  $-s_{max}$  ,  $+s_{max}$  ]

***s*<sub>max</sub> = 0.01 мм**



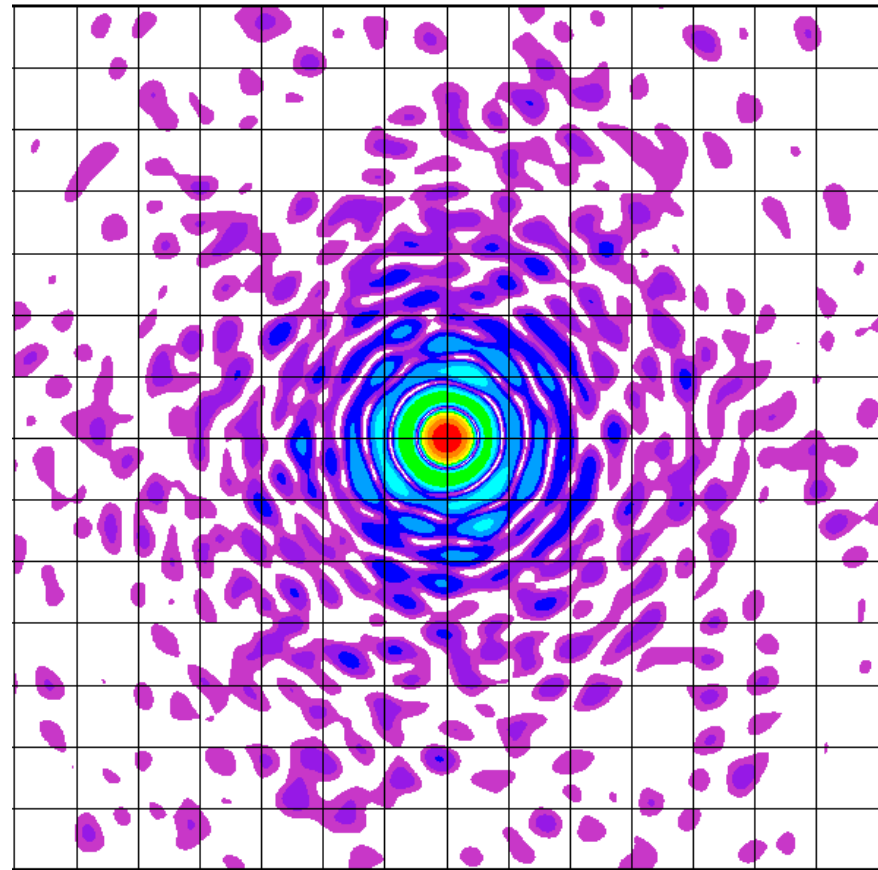
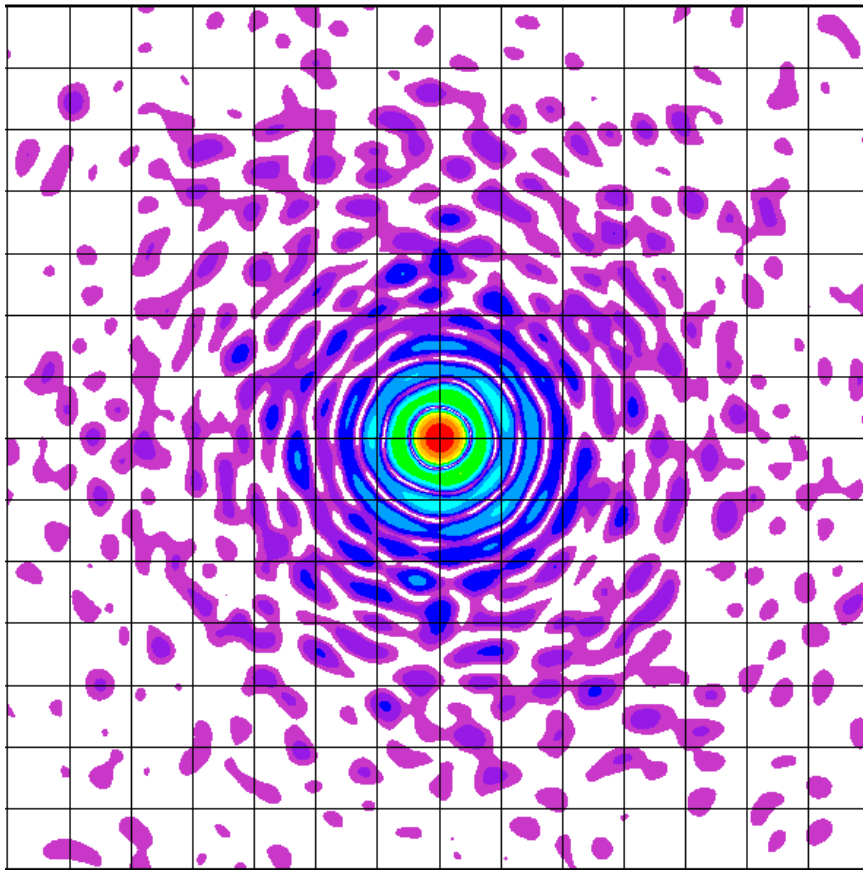
Равномерное распределение на отрезке [ -  $s_{max}$  , + $s_{max}$  ]

**$s_{max} = 0.02$  мм**



Равномерное распределение на отрезке [  $-s_{max}$  ,  $+s_{max}$  ]

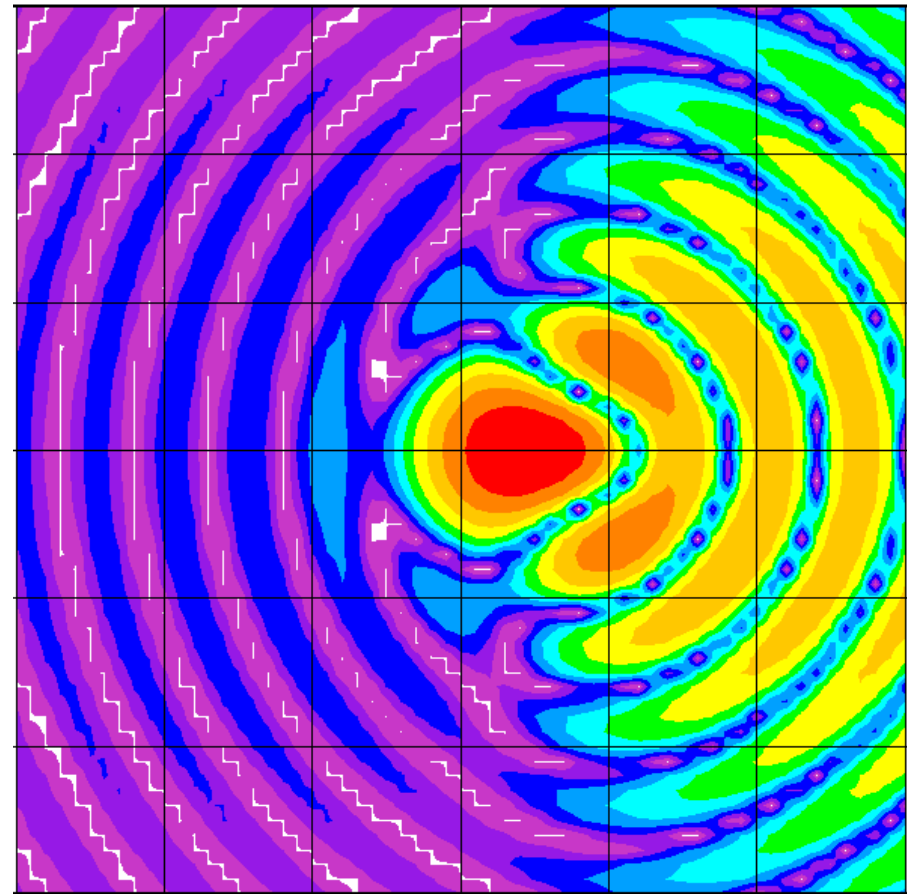
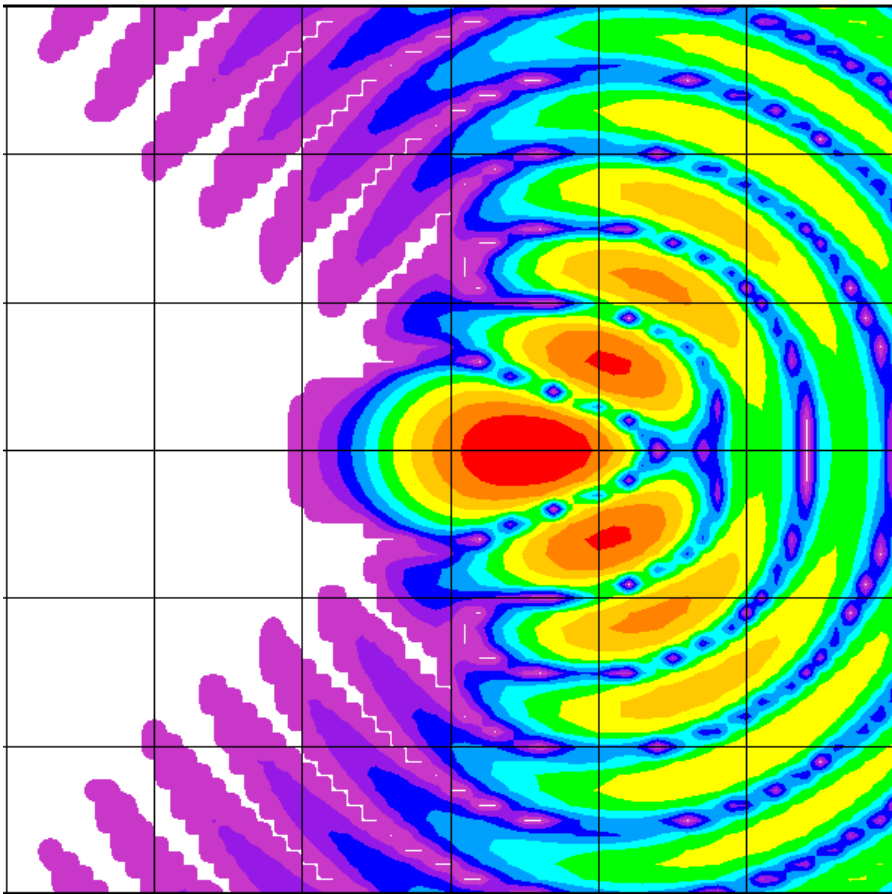
***s*max = 0.08 мм**



$$\rho_w = 2 \text{ мм} \leftrightarrow \theta_w \approx 20''$$

**x – поляризация**

**y – поляризация**



27.10.2008

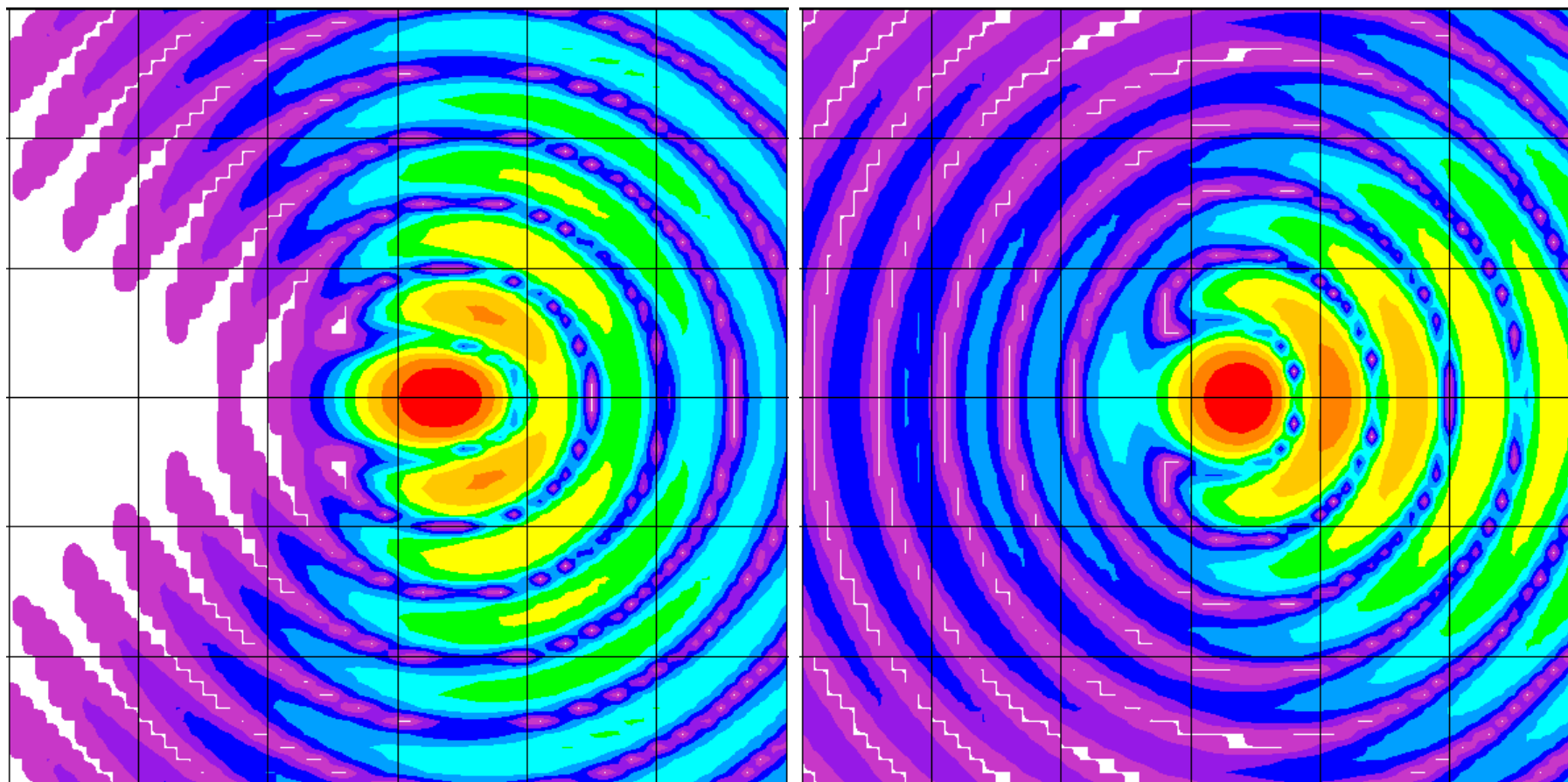
PT-70

30

$\rho_w = 1 \text{ мм} \leftrightarrow \theta_w \approx 10''$   
x – поляризация

y –

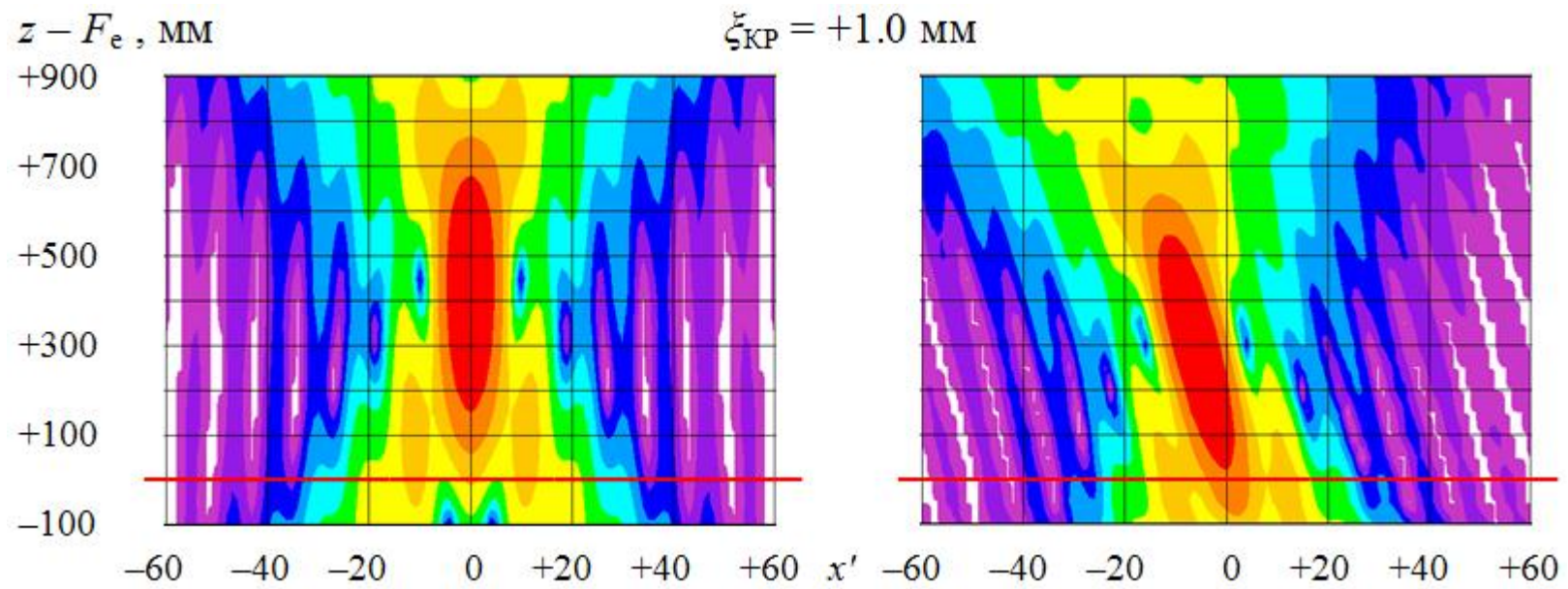
поляризация



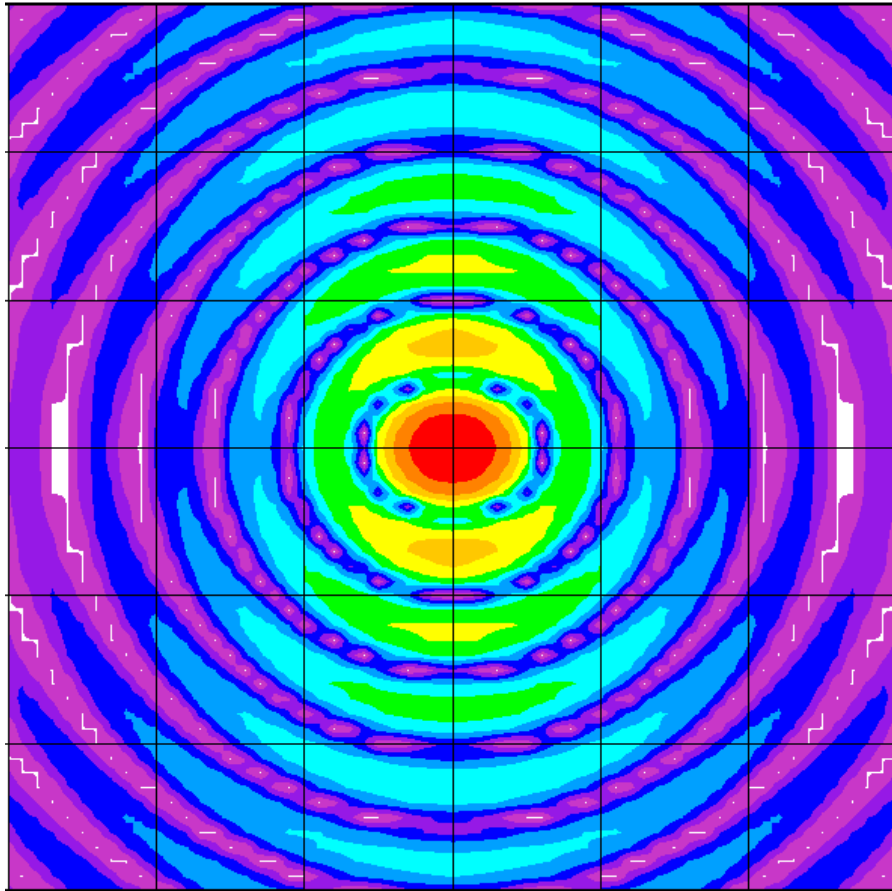
27.10.2008

PT-70

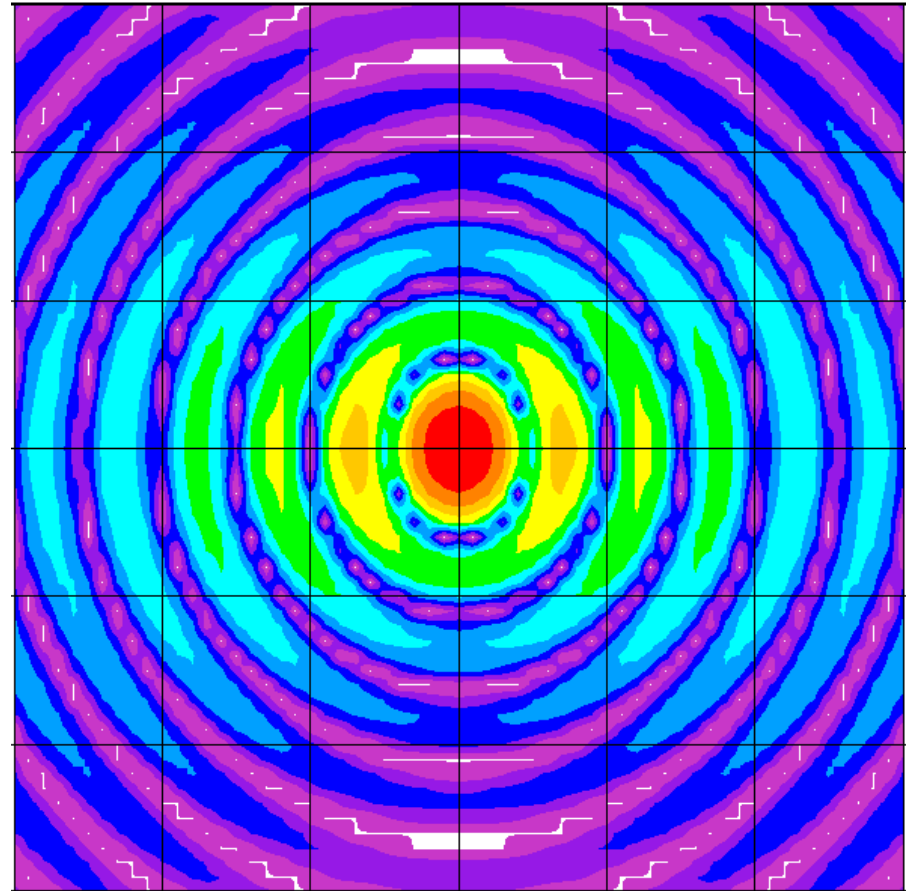
31





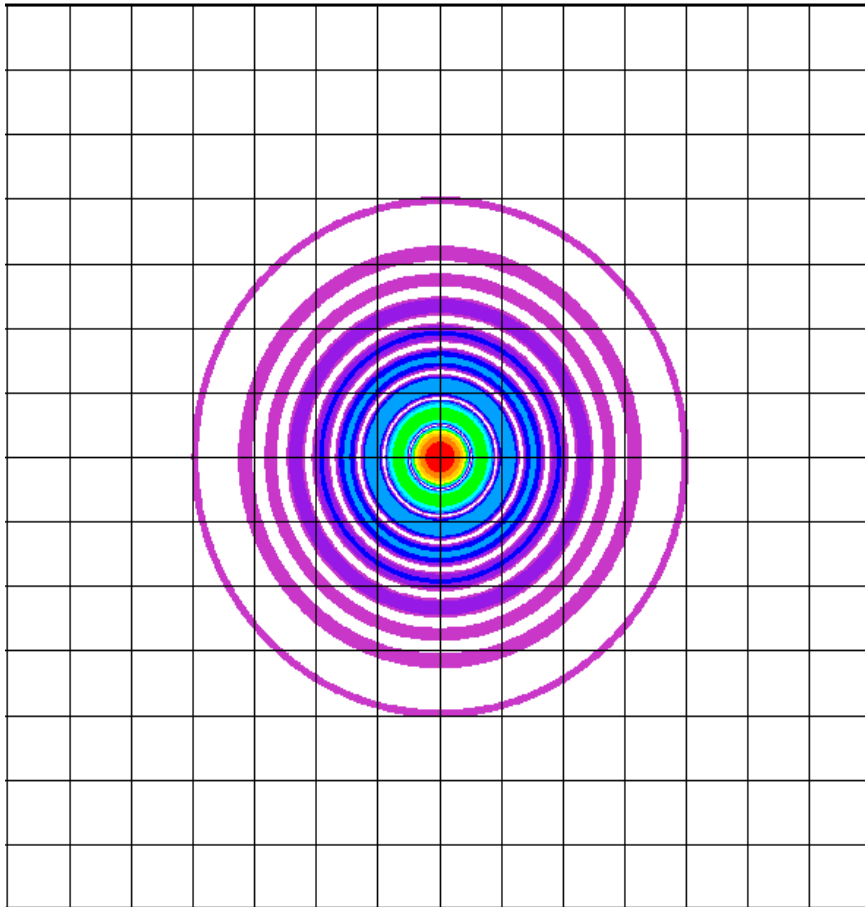


27.10.2008

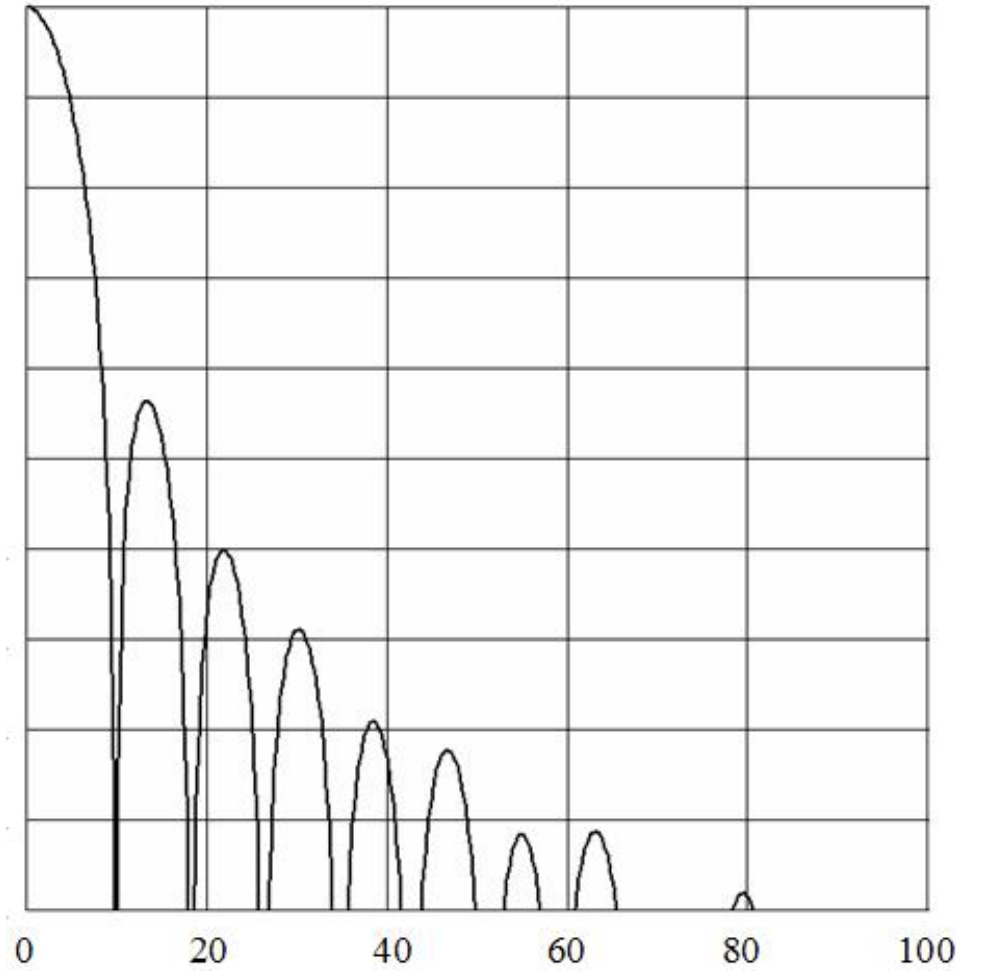


PT-70

33



27.10.2008



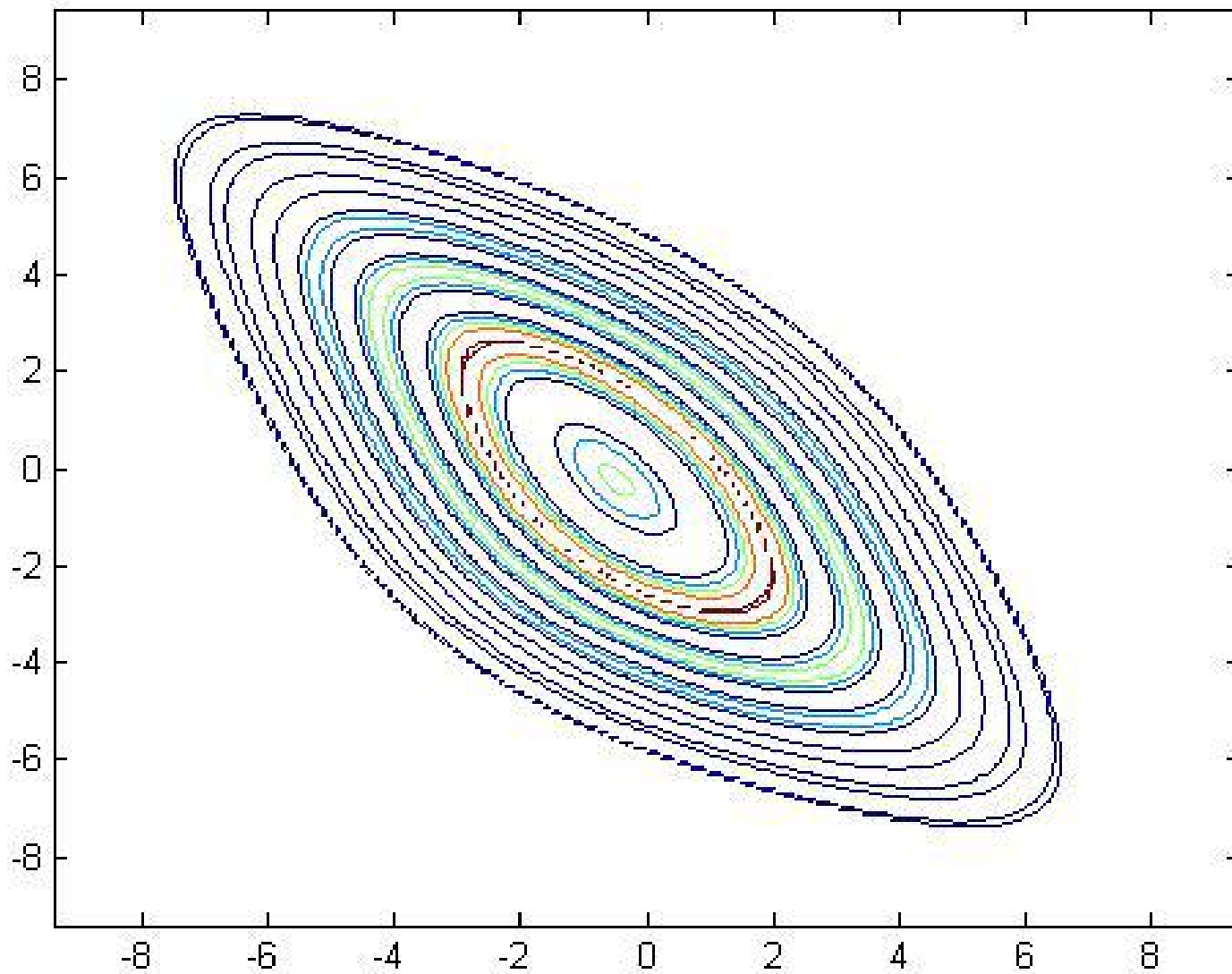
PT-70

34

## **Распределение интенсивности в плоскости облучателя аппроксимировано:**

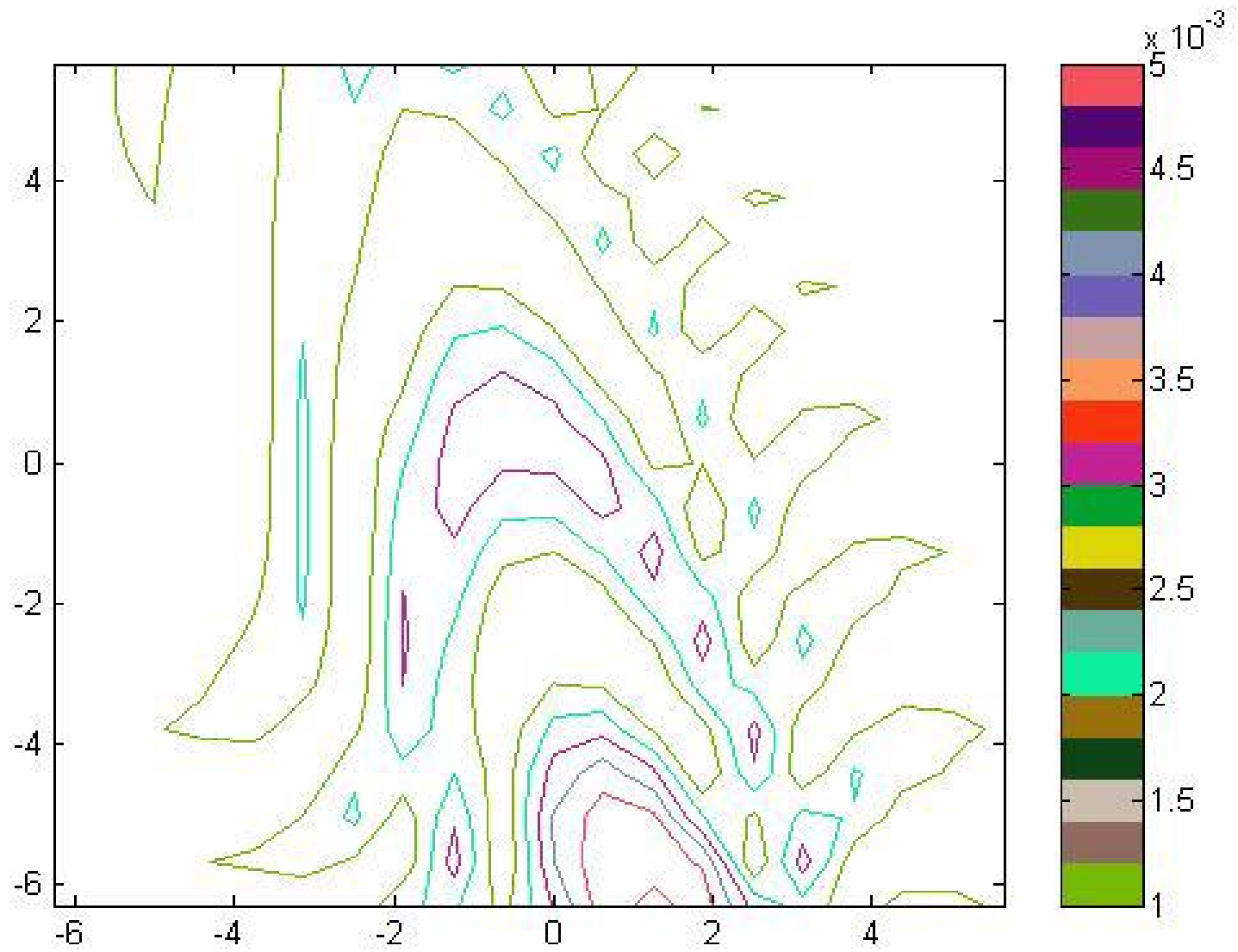
$$I(e_{zc}, q_{об}, x, y) = A(e_{zc}, q_{об}, x, y) \sin^2(\delta(e_{zc}, q_{об}) \rho(e_{zc}, q_{об}, x, y)) / (\delta(e_{zc}, q_{об}) \rho(e_{zc}, q_{об}, x, y))^2,$$

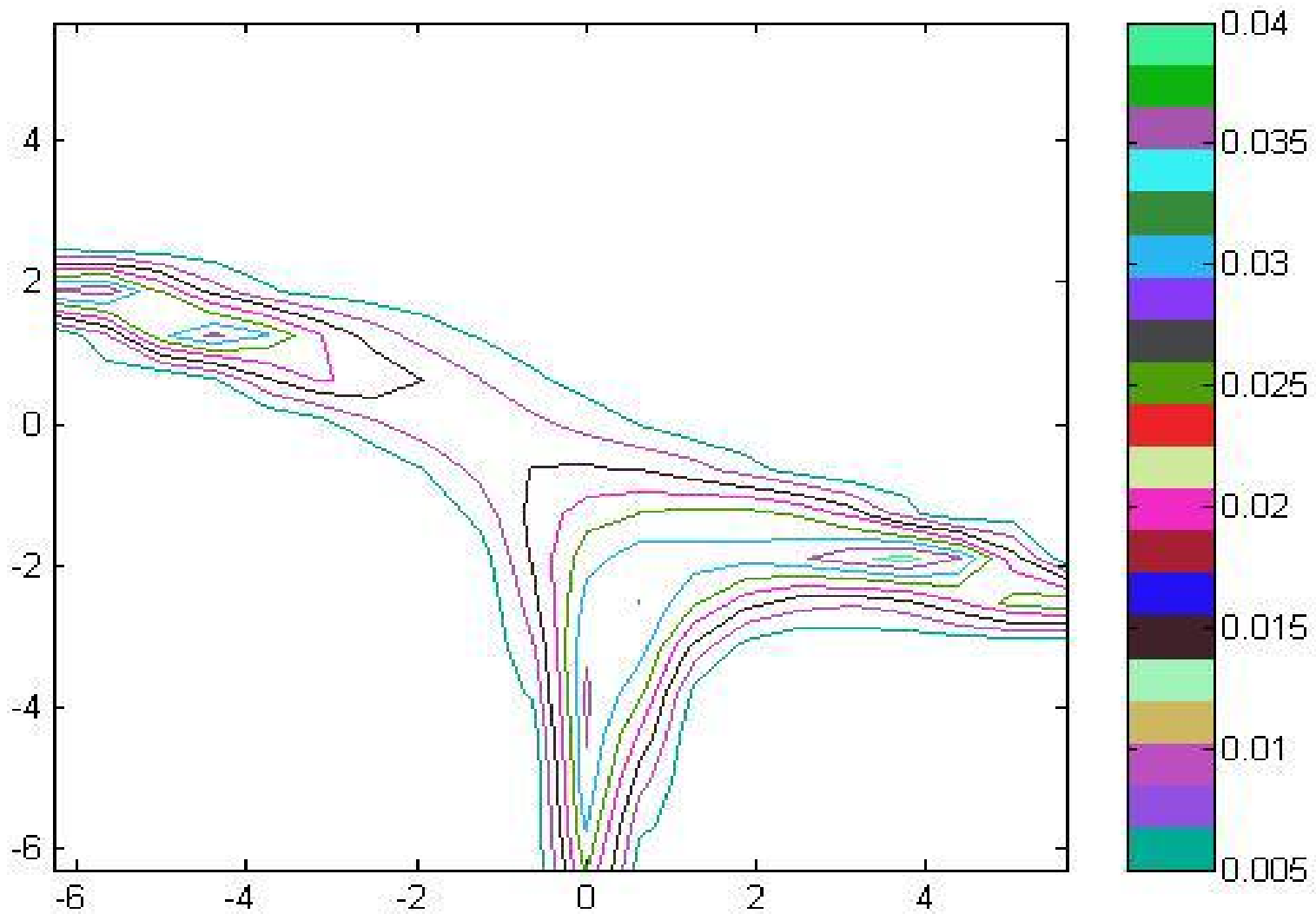
1.  $e_{zc} = (\Delta\alpha_{ГЗ}, \Delta\beta_{ГЗ}, \Delta x_{кр}, \Delta y_{кр}, \Delta z_{кр}, \Delta\beta_{кр}, \Delta\theta_{кр})^T$  – ошибки наведения
2.  $\Delta\alpha_{ГЗ}, \Delta\beta_{ГЗ}$  – ошибки наведения фокальной оси (ФО) ГЗ;
3.  $\Delta x_{кр}, \Delta y_{кр}, \Delta z_{кр}$  – линейные рассогласования фокусов КР и ГЗ;
4.  $\Delta\beta_{кр}, \Delta\theta_{кр}$  – угловые рассогласования между ФО ГЗ и ФО КР;
5.  $x, y$  - координаты задающие точку в плоскости облучателя;
6.  $q_{об} = (\Delta x_{об}, \Delta y_{об}, \Delta z_{об}, \Delta\beta_{об}, \Delta\theta_{об})^T$  – линейные и угловые отклонения облучателя от юстировочного положения;
7.  $\rho^2 = (x + \Delta x_{об} + \delta_1 \Delta\alpha_{ГЗ} + \delta_2 \Delta\beta_{кр} + \delta_3 \Delta x_{кр} + \delta_4 \Delta z_{кр} \Delta\theta_{кр})^2 + (y + \Delta y_{об} + \delta_1 \Delta\beta_{ГЗ} + \delta_2 \Delta\theta_{кр} + \delta_3 \Delta y_{кр} + \delta_4 \Delta z_{кр} \Delta\beta_{кр})^2$ ;
8.  $\delta = \delta_5 - \delta_6 (\Delta z_{об} + \delta_7 \Delta z_{кр} + \delta_8 \Delta\beta_{об} + \delta_8 \Delta\theta_{об} + \delta_9 \Delta\beta_{кр} \Delta y_{кр} + \delta_9 \Delta\theta_{кр} \Delta x_{кр})^2$ ;
9.  $A = \delta_{10} - \delta_{11} (\Delta y_{кр} (x - \Delta x_{об}) + \delta_{12} \Delta x_{кр} (y - \Delta y_{об}) + \delta_{13} \Delta x_{кр} (x - \Delta x_{об}) + \delta_{14} \Delta y_{кр} (y - \Delta y_{об}) + \delta_{15} \Delta z_{об})^2$ ;
10.  $\delta_i$  – весовые коэффициенты определяются при моделировании и верифицируются методами радиоголографии.

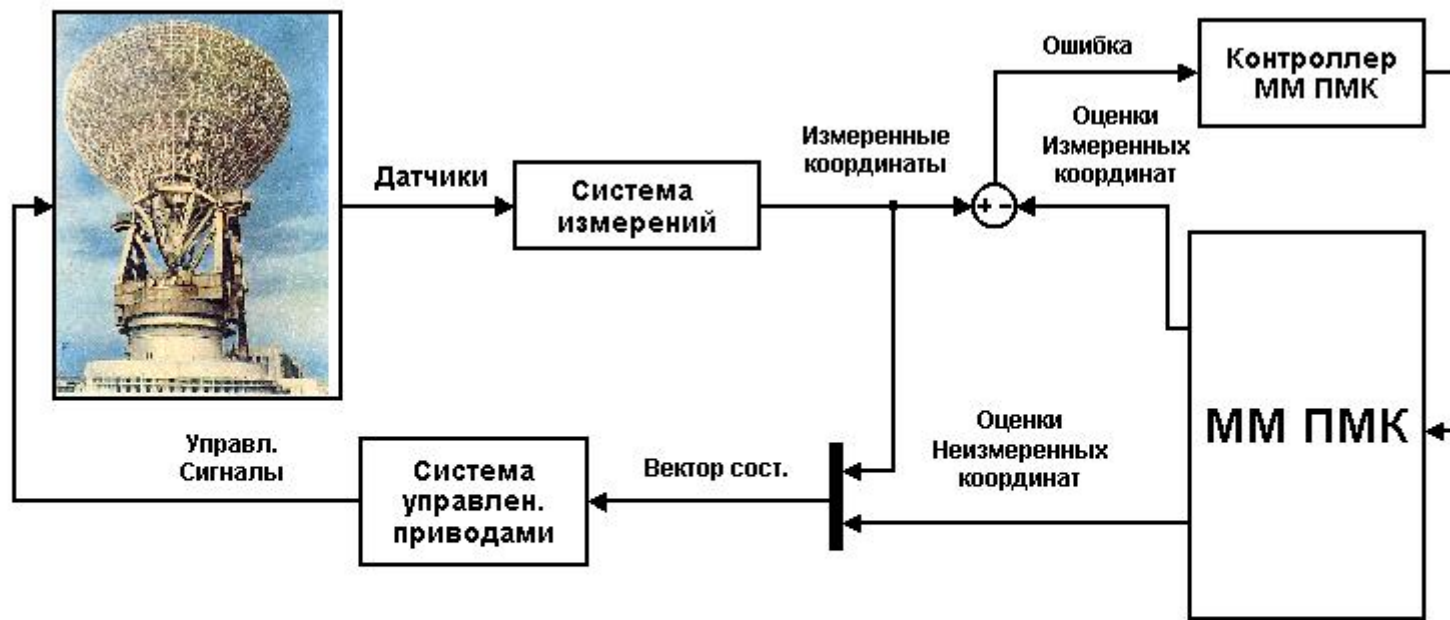


-----

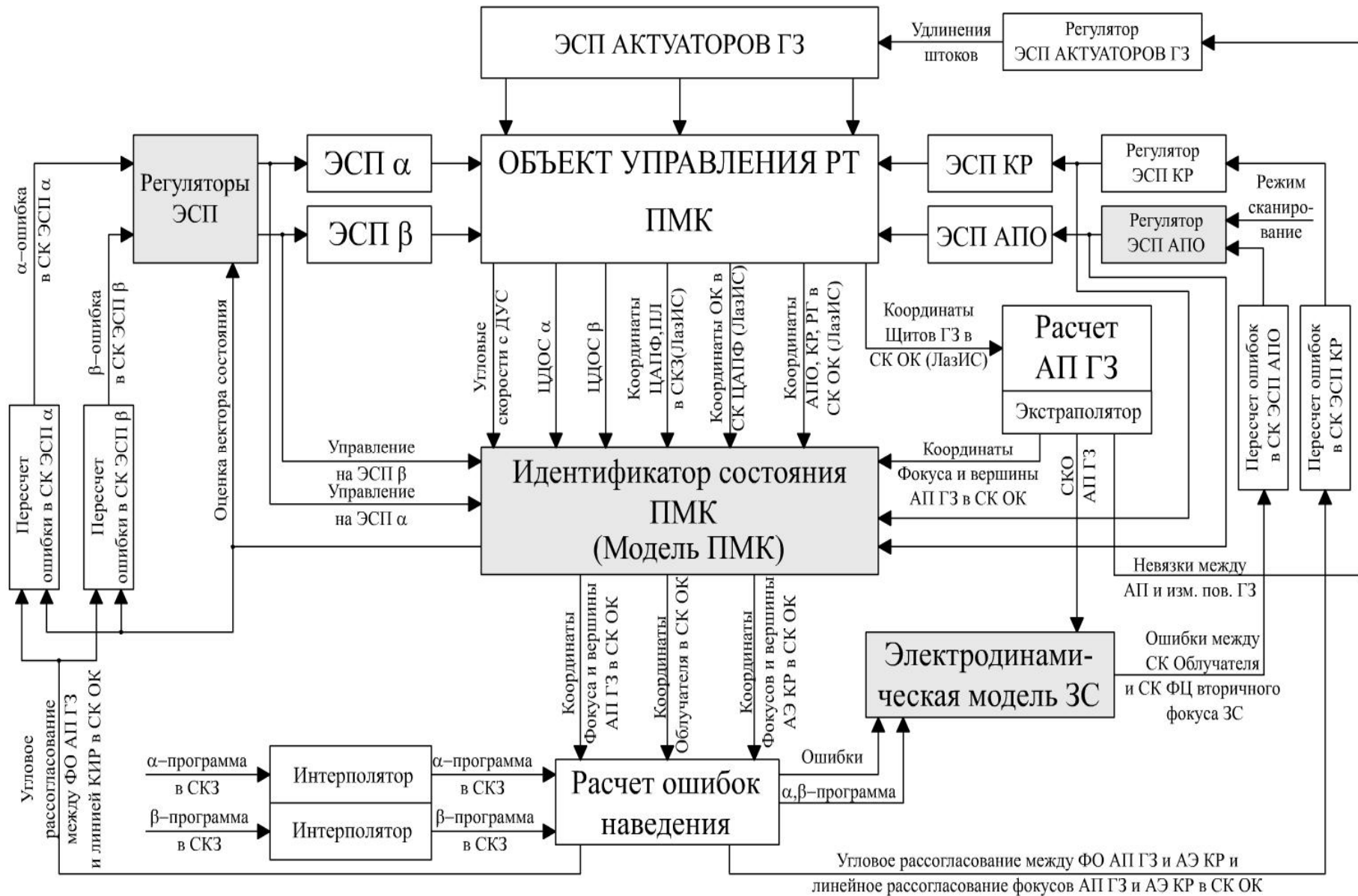
.....





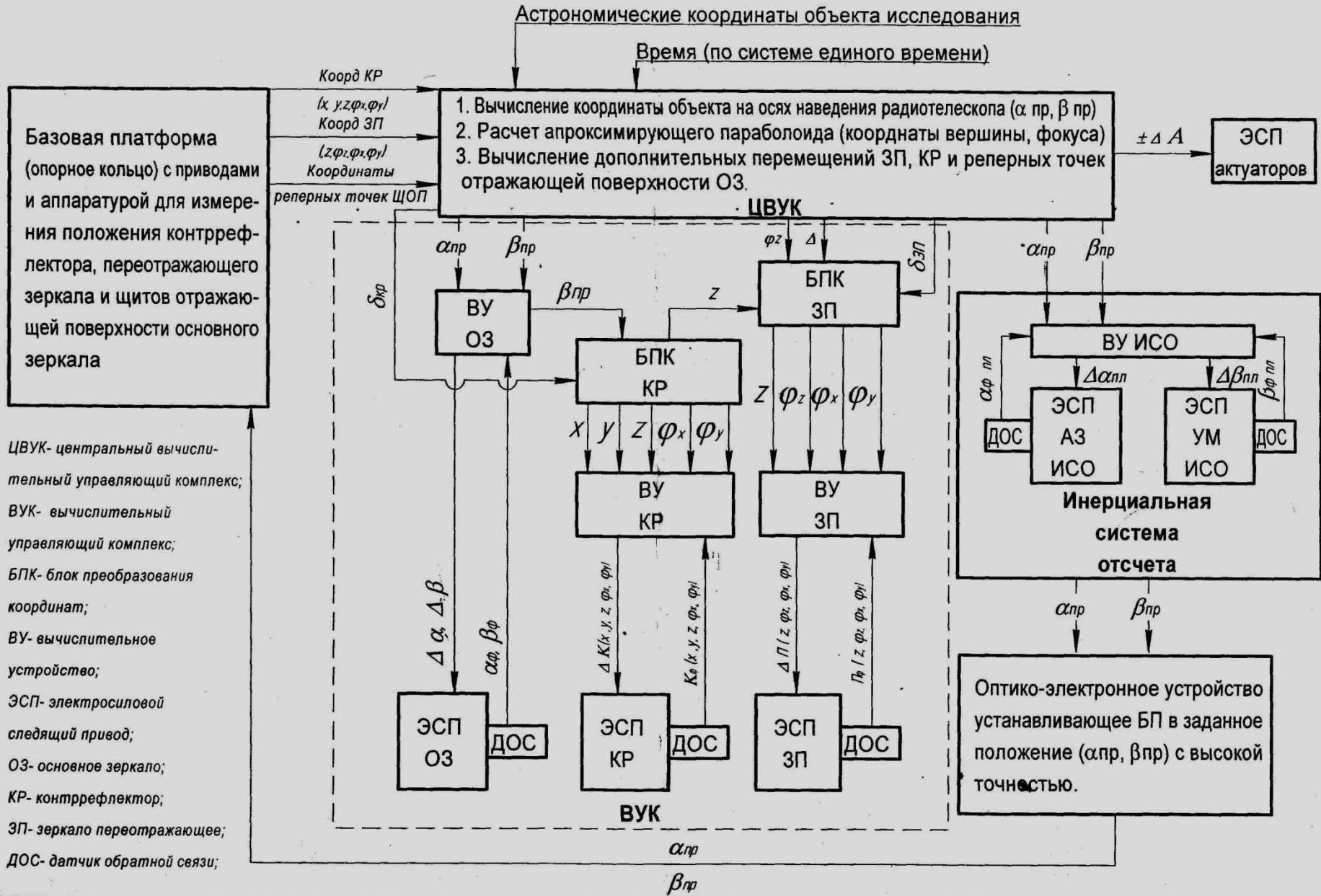


# Система управления радиотелескопом

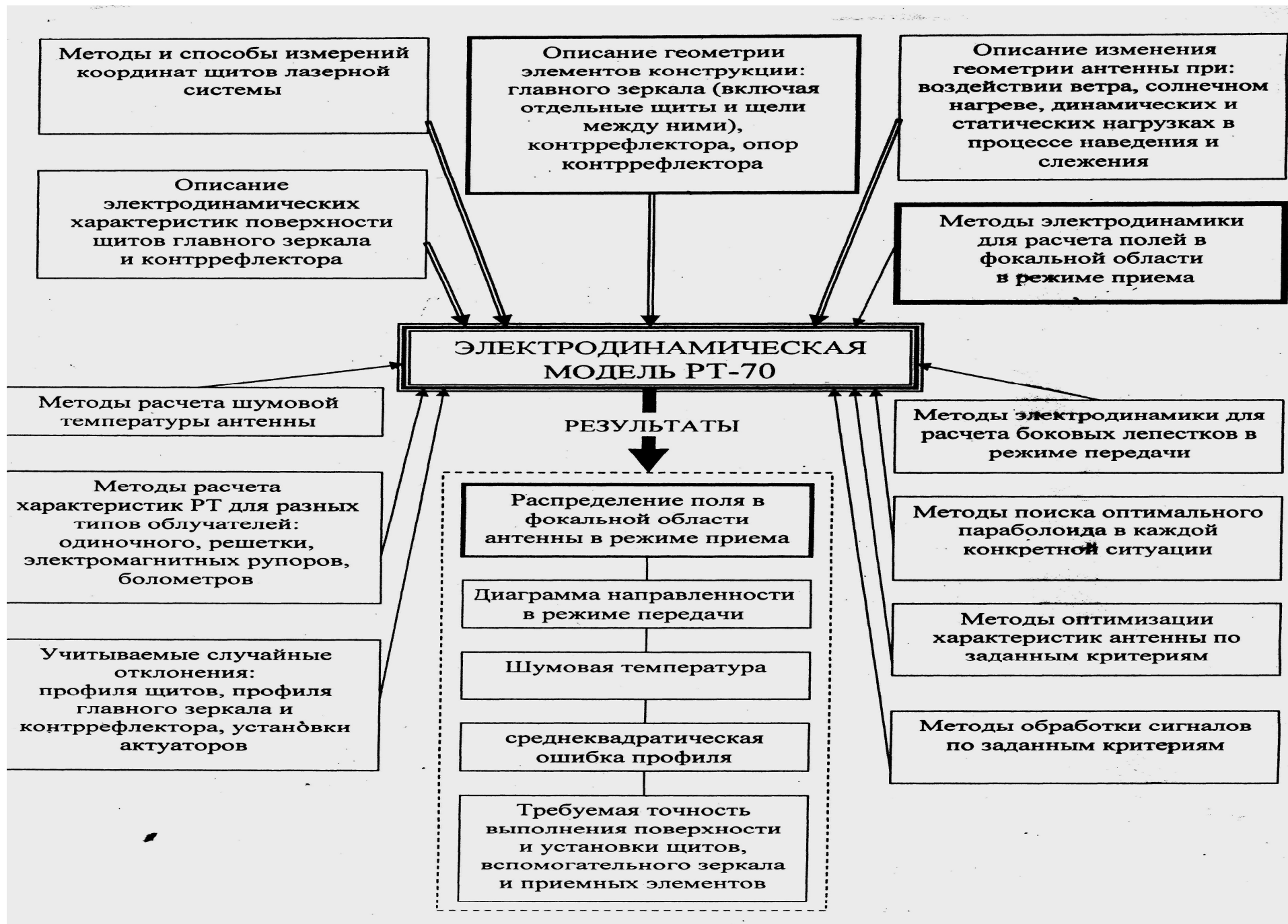




# БЛОК-СХЕМА СИСТЕМЫ НАВЕДЕНИЯ РТ-70



ЦВУК- центральный вычислительный управляющий комплекс;  
 ВУК- вычислительный управляющий комплекс;  
 БПК- блок преобразования координат;  
 ВУ- вычислительное устройство;  
 ЭСП- электросилового следящий привод;  
 ОЗ- основное зеркало;  
 КР- контррефлектор;  
 ЗП- зеркало переотражающее;  
 ДОС- датчик обратной связи;



## Критерий качества управления зеркальной системой

$$J = \int_{S_{об}} I(e_{зс}, q_{об}, x, y) ds + a_2 - a_3 |q_{фц} - q_{об}|^2 + a_1 A(e_{зс}, q_{об}, x_{фц}, y_{фц}),$$

1.  $S_{об}$  – площадь облучателя;
2.  $q_{фц} = (x_{фц}, y_{фц}, z_{фц}, \beta_{фц}, \theta_{фц})^T$  – координаты точки с наибольшей интенсивностью электромагнитного поля (фазовый центр) и углы ориентации вектора направления распространения результирующей электромагнитной волны;
3.  $a_i$  – коэффициенты;  $q_{фц} = H_1 e_{зс} + H_2 (e_{зс}) e_{зс}$ ;
4.  $H_1, H_2$  – матрицы.

Для 70-метрового РТ на длине волны 1 мм были рассчитаны:

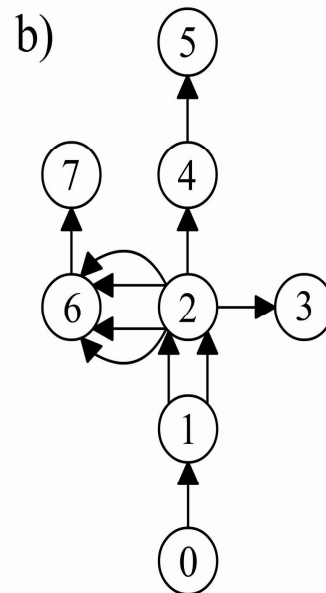
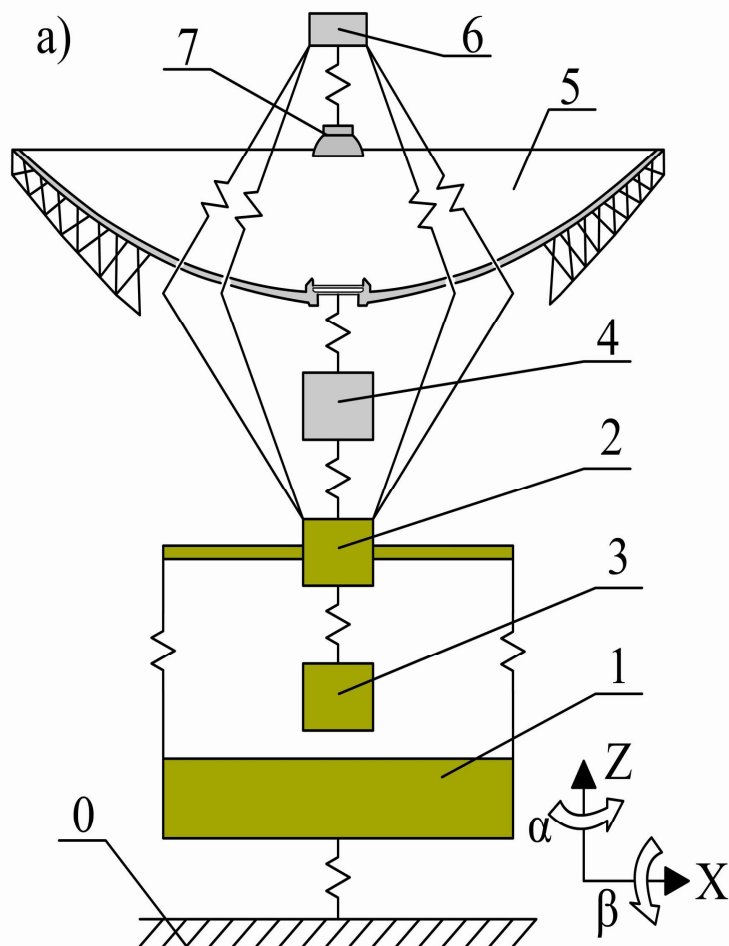
1. Угол зрения равный 600";
2. Поле зрения равное 900 мм;
3. Ширина ДНА для точечного приемника по половинной мощности равная 3 угл.с.

# Методика синтеза идентификатора состояния пространственной металлоконструкции РТ

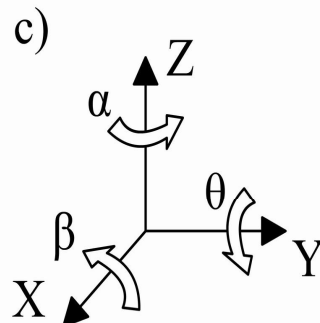
1. Определение по данным натуральных экспериментов и конечно-элементного моделирования собственных частот и форм колебаний ПМК;
2. Разработка нелинейной пространственной модели ПМК в виде системы из 7 твердых тел с упругими связями, на которую действуют гравитационные, ветровые, управляющие воздействиям и силы трения;
3. Редуцирование нелинейной модели;
4. Линеаризация редуцированной модели в стационарной точке;
5. Определение коэффициентов обратных связей наблюдателя с помощью оптимизационного метода «генетический алгоритм».

## Идентификатор состояния

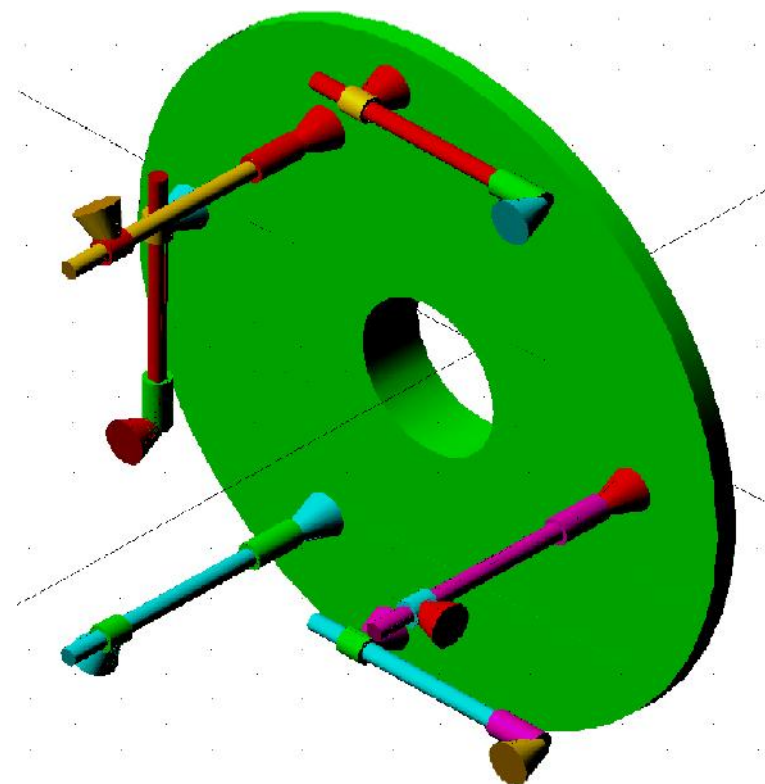
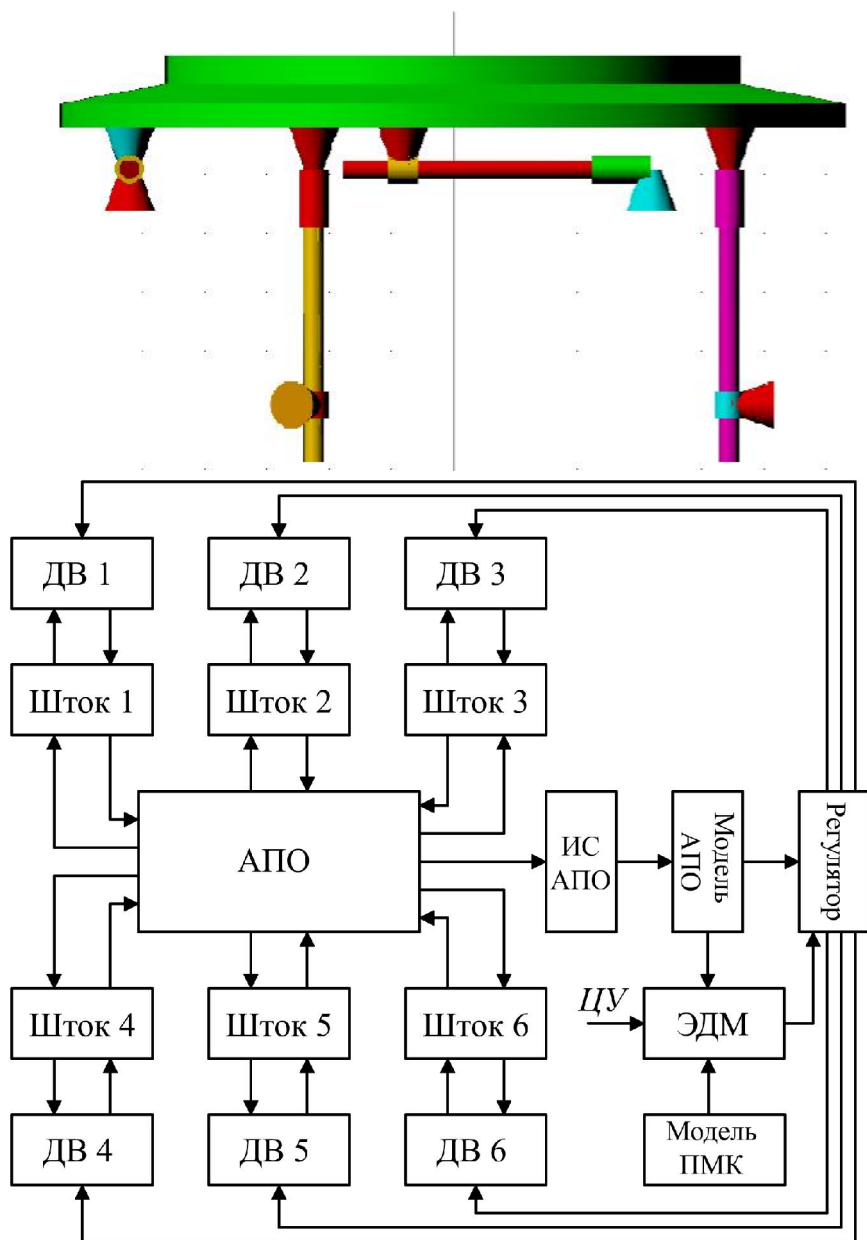
ПМК представлена в виде твердых тел, соединенных упругими связями. Каждое тело имеет 6 степеней свободы, его положение относительно СКЗ описывается тремя линейными координатами ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) и тремя углами ( $\beta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ).



- 0 – Земля
- 1 – Платформа
- 2 – Основание
- 3 – Противовес
- 4 – Основание зеркала
- 5 – Главное зеркало
- 6 – Ригель
- 7 – Контррефлектор
- $\alpha$  – угол азимута
- $\beta$  – угол места



# Адаптивная платформа облучателя



Требования к приводу АПО					
Частота колебаний, 2.5 Гц					
мм			угл. мин.		
x	y	z	$\beta$	$\theta$	$\alpha$
47	47	10	6,7	6,7	-

## **Методика синтеза системы управления адаптивной платформой облучателя (АПО)**

**1. Построение нелинейной математической модели адаптивной платформы.** Принята следующая расчетная схема: платформу с расположенным на ней облучателем будем считать абсолютно твердым телом, толкатели имеют массу намного меньшую, чем платформа и облучатель, поэтому будем считать их безмассовыми, а также упруго деформируемыми.

**2. Алгоритм управления адаптивной платформой облучателя в режиме позиционирования.**

**3. Линеаризация уравнений движения АПО.**

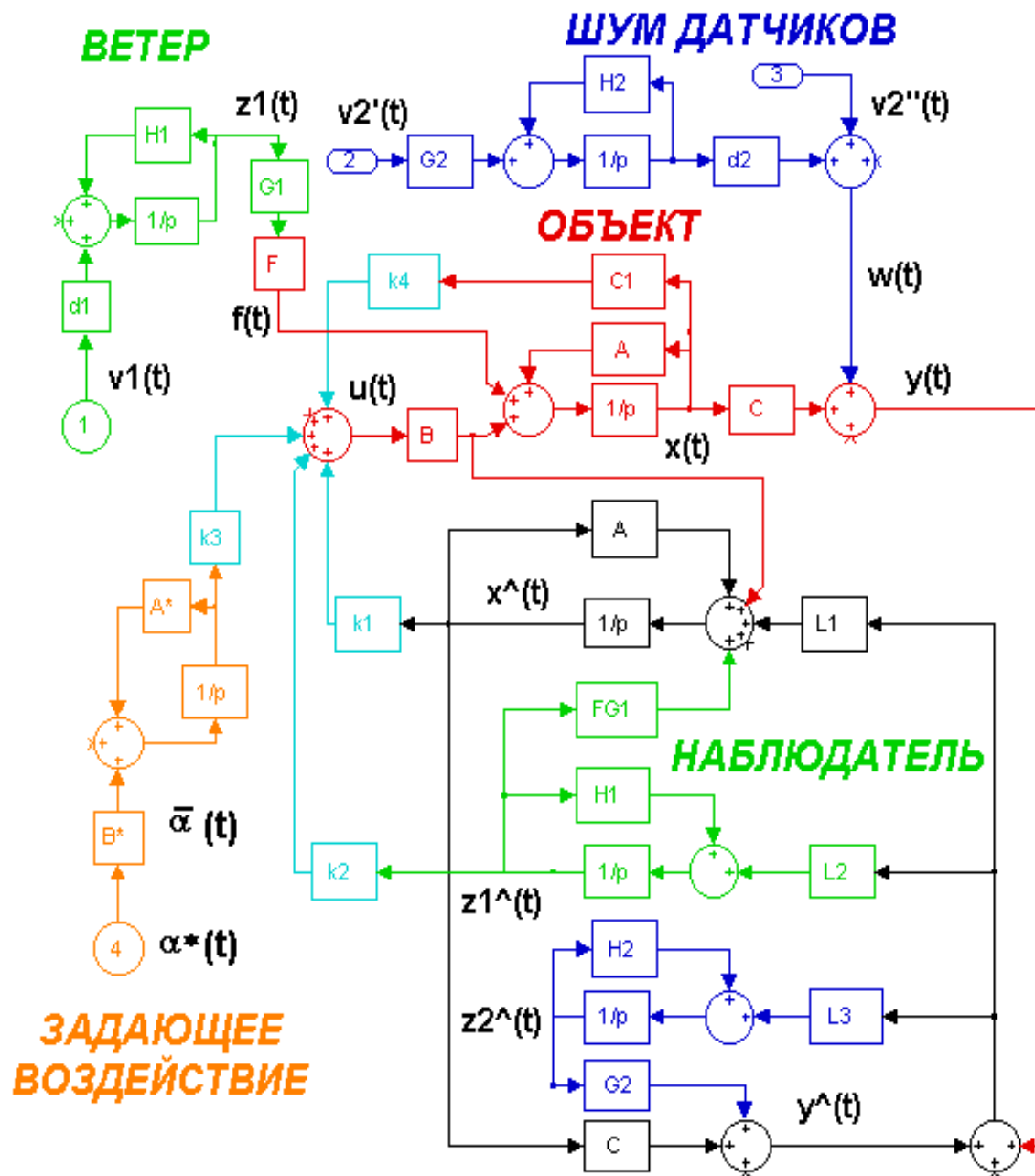
**4. Алгоритм управления АПО в режимах слежения и сканирования.** Для управления АПО был применен модифицированный релейный метод управления.

## Управление адаптивной платформой облучателя (АПО)

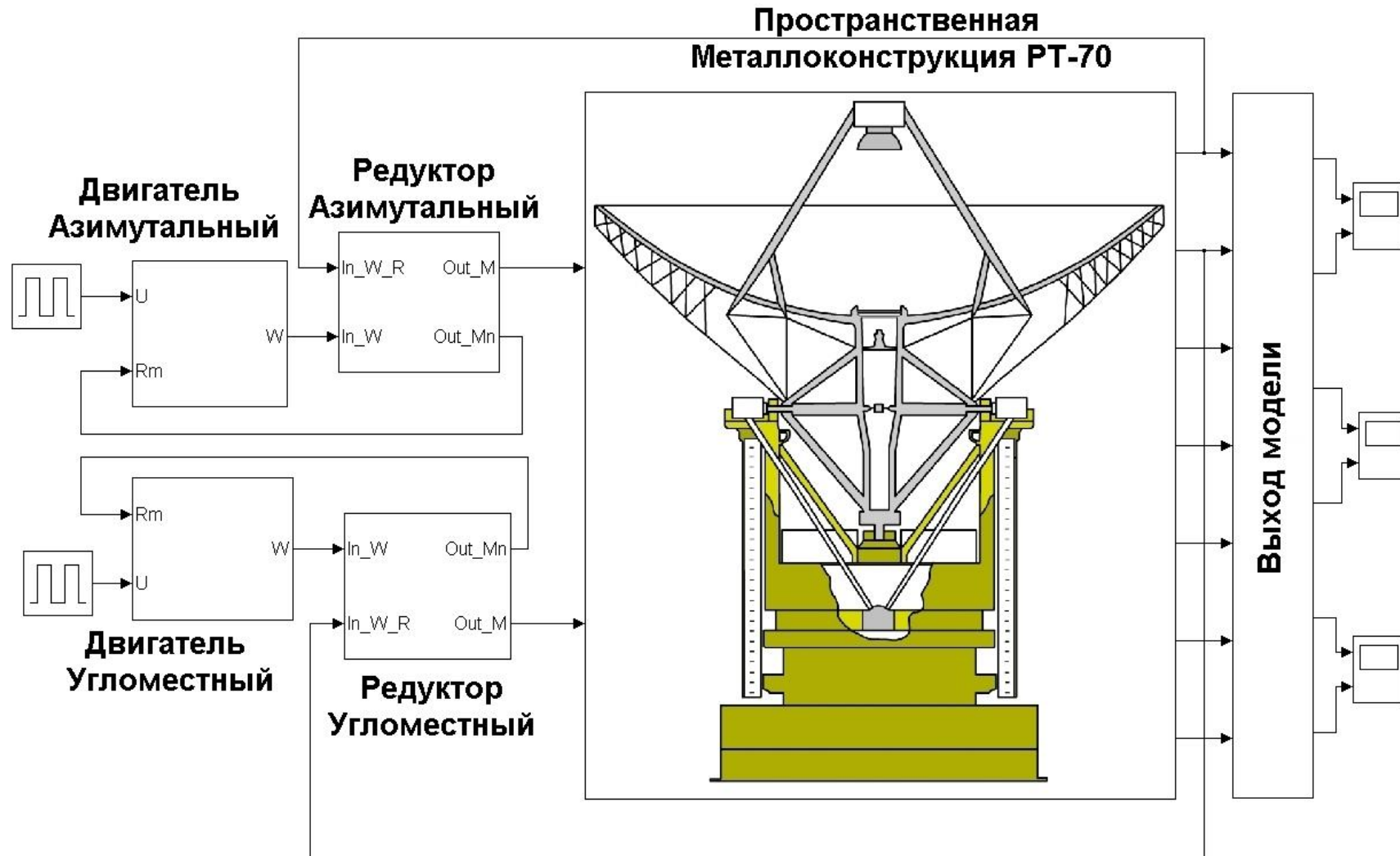
1. По данным о деформациях ЗС с измерительной системы и наблюдателя, с помощью электродинамической модели (ЭДМ) ЗС рассчитываются координаты точки с максимальной интенсивностью электромагнитного излучения.
2. С помощью ЭДМ рассчитывается положение системы координат (СК), образованной вектором Пойтинга в этой точке и векторами электрической и магнитной напряженности поля. Положение СК задается тремя углами и тремя линейными координатами.
3. Рассчитываются желаемые удлинения штоков актуаторов и подаются на отработку приводов, чтобы совместить систему координат приёмника с СК, полученной с помощью ЭДМ.

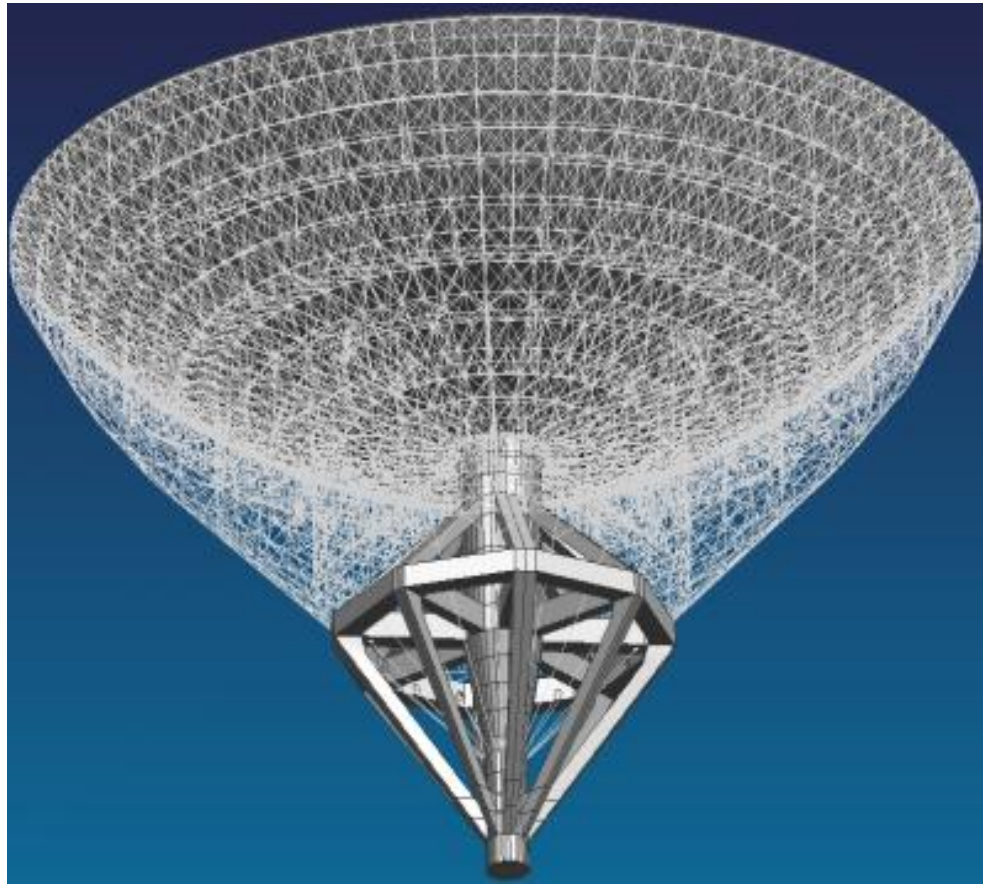


# Структурная схема системы управления АУ со стационарной обратной связью по состоянию



# Моделирование в MATLAB





## Эффективность системы управления

<b>Показатели эффективности системы управления</b>	<b>Идеальная антенна</b>	<b>РТ-70 до модернизации</b>	<b>РТ-70 после модернизации</b>
<b>1. Ошибка наведения фокальной оси ГЗ, угл. с.</b>	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>4</b>
<b>2. Угловое рассогласование между ФО ГЗ и ФО КР, угл. мин.</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0.18</b>
<b>3. Линейные рассогласования фокусов ГЗ и КР, мм</b>	<b>0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.13</b>
<b>4. Линейные рассогласования облучателя и ФЦ, мм</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>0.8</b>
<b>5. Угловые рассогласования облучателя и ФЦ, угл. мин</b>	<b>0</b>	<b>6.7</b>	<b>0.2</b>
<b>6. СКО поверхности ГЗ от идеальной, мм</b>	<b>0</b>	<b>0.7</b>	<b>0.15</b>
<b>Относительная мощность принимаемого сигнала</b>	<b>1</b>	<b>0.15</b>	<b>0.4</b>

- **Эффективность рассмотренной системы наведения может быть оценена по следующим показателям:**
- Линейная расфокусировка – линейное расстояние в мм от фокуса до ФЦ в результате деформаций ЗС (определяется для первичного и вторичного фокусов).
- Угловая расфокусировка – угловое смещение СК ФЦ деформированной ЗС относительно СК ФЦ недеформированной ЗС (определяется для первичного и вторичного фокусов).
- Коэффициент потери интенсивности излучения в ФЦ деформированной ЗС – отношение разности значения интенсивности в ФЦ недеформированной ЗС и значения интенсивности в ФЦ деформированной ЗС к значению интенсивности в ФЦ недеформированной ЗС.
- Интенсивность излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям.
- Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР деформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям.
- Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых имеют отклонения от теоретических, с заданными среднеквадратическими отклонениями.
- Интенсивности излучения в ФЦ при единичной интенсивности точечного КИР деформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых имеют отклонения от теоретических, с заданными

- Коэффициент использования поверхности (КИП) - отношение значения интенсивности излучения в ФЦ недеформированной ЗС с поверхностями зеркал, профили которых соответствуют теоретическим профилям к значению интенсивности излучения в ФЦ деформированной ЗС.
- Введенные в рассмотрение показатели эффективности могут быть положены в основу критерия качества наведения, минимизация целевой функции которого при заданных ограничениях, сводится к оптимизационной задаче отыскания параметров СН.
- Точность наведения, оцениваемая по рассогласованию между угловым положением КИР и угловым положением ФО АП ГЗ при рассматриваемой модели СН является частной

- **Заключение**
- **Основным выводом из исследований системы управления является то, что при наблюдении удаленных космических объектов РТ "видит" не один точечный объект, а целую картину объектов. Если оставить один облучатель и один приемник и не принять специальных мер, на выходе образуется неразделимая, бесполезная смесь сигналов. Выходом является создание пиксельных облучателей или сканирующих по апертуре облучателя окон прозрачности, позволяющих последовательно записывать сигналы с части раstra облучателя, соответствующей окну прозрачности с последующим восстановлением изображения, отнесенного на некоторый интервал в прошлом. При таком способе приема сигналов нет необходимости требовать от приводов наведения точности в пределах ширины ДНА. Требования к приводам наведения по точности должны быть снижены. В связи с особой значимостью этого вывода, дальнейшие исследования системы управления РТ в мм-диапазоне должны быть продолжены с применением средств конечно-элементного моделирования ANYS для расчета ДНА и энергетических характеристик потока энергии излучающих объектов в раскрыве облучателя.**

**Спасибо за внимание!**