



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 37 за 2010 г.



Басов И.В., Краснобаев А.А.

Методы увеличения
глубины резкости оптико-
цифровых регистраторов
изображения

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Басов И.В., Краснобаев А.А. Методы увеличения глубины резкости оптико-цифровых регистраторов изображения // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2010. № 37. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-37>

ISSN 2071-2901



**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

И.В.Басов А.А.Краснобаев

**Методы увеличения
глубины резкости
оптико-цифровых
регистраторов изображения**

Препринт №

Москва

Р о с с и й с к о й А к а д е м и и н а у к
Ордена Ленина Институт прикладной математики имени
М.В.Келдыша

И.В.Басов А.А.Краснобаев

**Методы увеличения глубины резкости
оптико-цифровых регистраторов изображения**

Москва, 2010

Методы увеличения глубины резкости оптико-цифровых регистраторов изображения

И.В.Басов, А.А.Краснобаев

В работе рассмотрены следующие методы увеличения глубины резкости при регистрации изображений: метод с применением кубической фазовой маски, метод с применением кодированной апертуры и метод с переносом резкости по цветовым каналам. Все эти методы могут быть охарактеризованы тем, что специальным образом размытое изображение оцифровывается, затем осуществляется восстановление резкого изображения с помощью применения цифровой обработки. Размытие достигается модификацией уже существующих объективов и не требует наличия в конструкции подвижных частей. Сравнение трёх предложенных методов между собой осуществляется с использованием характеристик, удобных для оценки оптических систем.

Работа поддержана грантом РФФИ № 08-01-00908-а

Methods of depth-of-field extending of optical-digital image detectors

I.V.Basov, A.A.Krasnobaev

(monnom@rambler.ru, <http://library.keldysh.ru/preprints/>)

In this paper these methods of depth of field extending while imaging are examined: method with applying of cubic-phase mask, method with applying of coded aperture and method with sharpness transportation through color channels. All of these methods can be characterized that specially blurred image been digitized than restored to sharpness image using digital image processing. Blurring is due to modification of already existed lenses and do not needed in moving construction parts. Comparison of proposed methods between themselves is to realized using characteristics that convenient for optical systems estimation.

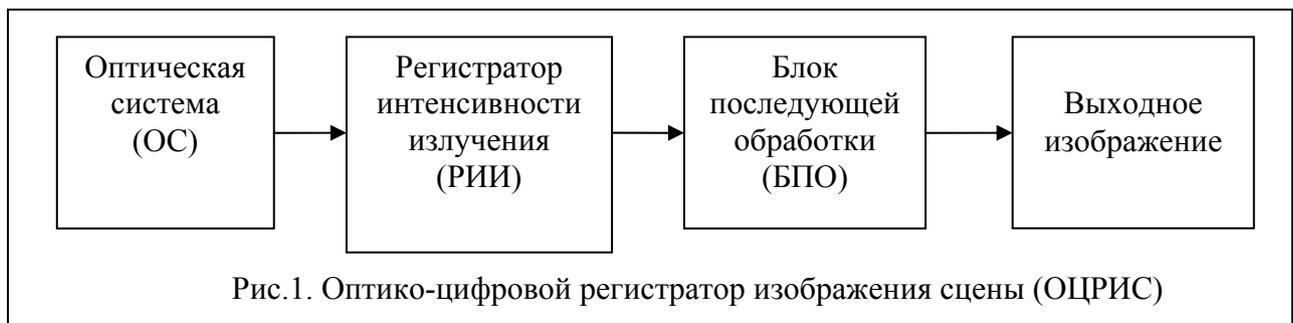
The work was supported by RFFI grant # 08-01-00908-a

Содержание

Введение.....	3
Характеристики оптических систем.....	4
Способы увеличения глубины резкости ОС без применения цифровой обработки..	12
Оптико-цифровые способы увеличения глубины резкости.....	13
Кодированная апертура	14
Кубическая фазовая маска.....	18
Перенос резкости по цветовым каналам	24
Заключение	28
Использованная литература:	29
Приложение А	30

Введение

Для получения в оптическом диапазоне двумерного изображения трёхмерной сцены используются **оптические регистраторы сцены (ОРС)** (см. рис. 1), состоящие из **оптической системы (ОС)**, осуществляющей проекцию трёхмерного мира на двумерную поверхность, и **регистратора интенсивности излучения (РИИ)**, осуществляющего преобразование энергии электромагнитного излучения, спроецированного ОС, в удобные для последующего сохранения или обработки величины. Также, с развитием цифровой техники, появилась возможность использовать **блок последующей обработки (БПО)**, который позволяет улучшать качество полученного изображения.



Значительная глубина резкости получаемого изображения желательна во многих приложениях. Например, в робототехнике резкое изображение в широком диапазоне глубин позволит увеличить скорость анализа видеоданных и избежать перефокусировки, для сканеров штриховых кодов значительная глубина резкости – это удобство работы пользователя, допускающее считывания штриховых кодов, расположенных в значительном диапазоне расстояний, в микроскопии значительная глубина резкости необходима для наблюдения протяженных объектов и т.д.. Увеличение глубины резкости достигается не просто, и, по большей части, связано с “ухудшением” остальных параметров ОС (например, увеличение стоимости изготовления, увеличение времени экспонирования).

К ОЦРИС обычно предъявляются требования, ограничивающие время экспозиции кадра и глубину резкости получаемого изображения. В классических ОС¹ эти величины взаимосвязаны и “улучшение” (при помощи изменения диаметра диафрагмы) одной из

¹ Под классической оптической системой в данной статье будем понимать оптическую систему с применением сферических и асферических линз, а также призм различного вида для изменения направления оптической оси.

них ведёт к “ухудшению” другой. Так, например, для увеличения глубины резкости необходимо уменьшать диаметр диафрагмы и, как следствие, увеличивать время выдержки. Или же, из-за требований к уменьшению выдержки, необходимо повышать светосилу ОС (увеличивая диаметр диафрагмы), что приводит к уменьшению глубины резкости.

Другой проблемой, уменьшающей глубину резкости при регистрации изображений, является качество изготовления оптических деталей. Так, объективы, формирующие изображение на РИИ с диагональю телевизионного формата $\frac{1}{2}$ дюйма с разрешающей способностью ~ 30 линий/мм на краю поля, и 50 линий/мм по центру поля имеют следующие порядки допусков на изготовление оптических и механических деталей:

- 0.05мм – на отклонение толщины от номинального размера,
- 0.02мм – на децентрировку оптического элемента в системе,
- 0.01° - на наклон относительно оптической оси,
- 1% - на отклонение коэффициента преломления,
- 2мкм – на отклонение радиуса кривизны поверхности линзы от номинального,
- 0.5мкм – на местную неровность радиуса кривизны поверхности.

Из приведенных значений видно, что допуски на изготовление механических деталей нередко достигают сотых долей миллиметра. Для изготовления микрооптики предъявляемые допуски ещё более жесткие.

Применение специальным образом модифицированных оптических схем в сочетании с алгоритмами цифровой обработки двумерных сигналов позволяет увеличить глубину резкости, снизить допуски на изготовление механических и оптических деталей, получать значения времени экспозиции меньше, чем в традиционных системах. Тем не менее, это приводит к проигрышу по другим характеристикам полученного изображения (например, уменьшение динамического диапазона яркостей).

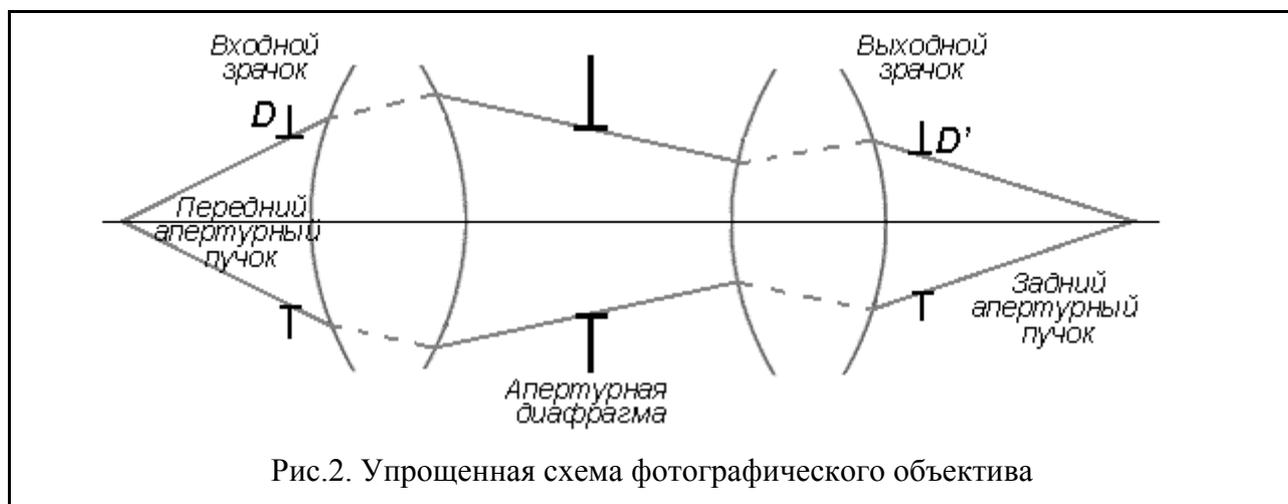
Характеристики оптических систем

Рассмотрим ОС типа фотографический объектив (см. рис. 1). Эта ОС используется фотографами на протяжении нескольких веков и позволяет сфокусировать изображение сцены на плоскость РИИ. Основными характеристиками оптической системы являются фокусное расстояние и относительное отверстие.

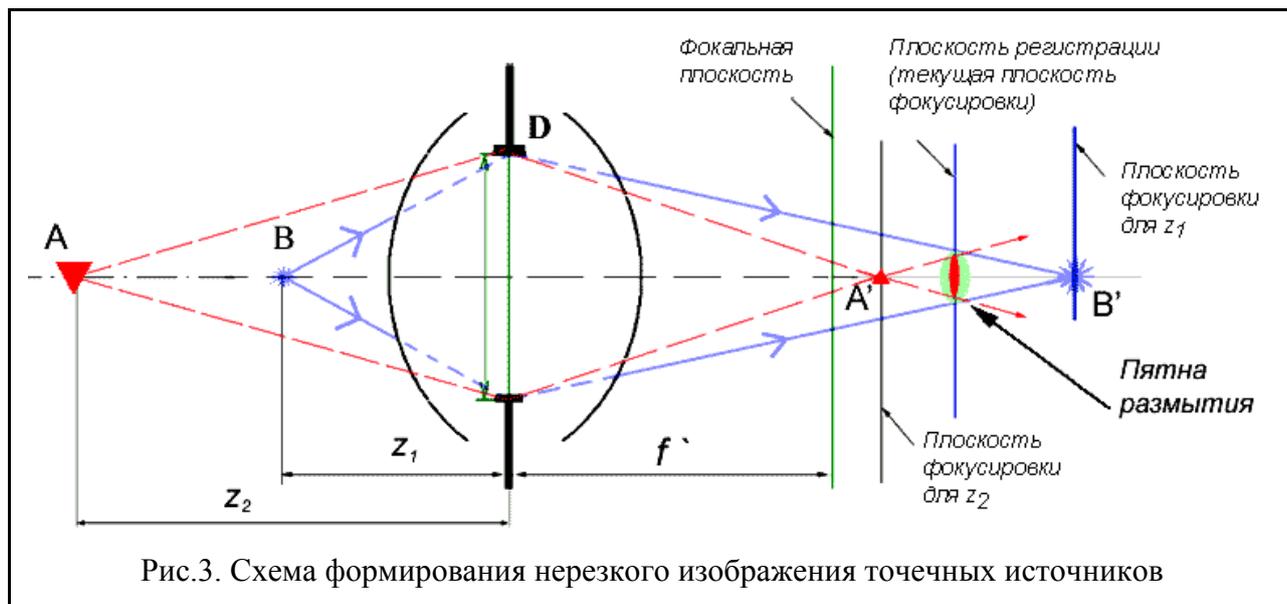
Лучи от бесконечно удаленного предмета фокусируются в **фокальной плоскости**. **Фокусное расстояние f** характеризует положение фокальной плоскости в оптической системе и фактически определяет масштаб изображаемых предметов.

Поток излучения, проходящий через оптическую систему из осевой точки изображения, ограничивается **апертурной диафрагмой** (например, это может быть оправа одной из линз, ирисовая диафрагма или специальный механический транспарант).

Для детального описания характеристик оптической системы пользуются понятиями **входного и выходного зрачка**. Это изображения апертурной диафрагмы, сформированные линзами оптической системы, стоящими перед и после апертурной диафрагмы, соответственно. Входной и выходной зрачки не являются материальными диафрагмами. В плоскости выходного зрачка удобно сравнивать оптические системы между собой по фазовым соотношениям лучей пучка. Диаметр входного зрачка, отнесенный к фокусному расстоянию D/f (называется **относительным отверстием**), определяет энергетическую характеристику объектива и позволяет сравнивать объективы между собой по светосиле.

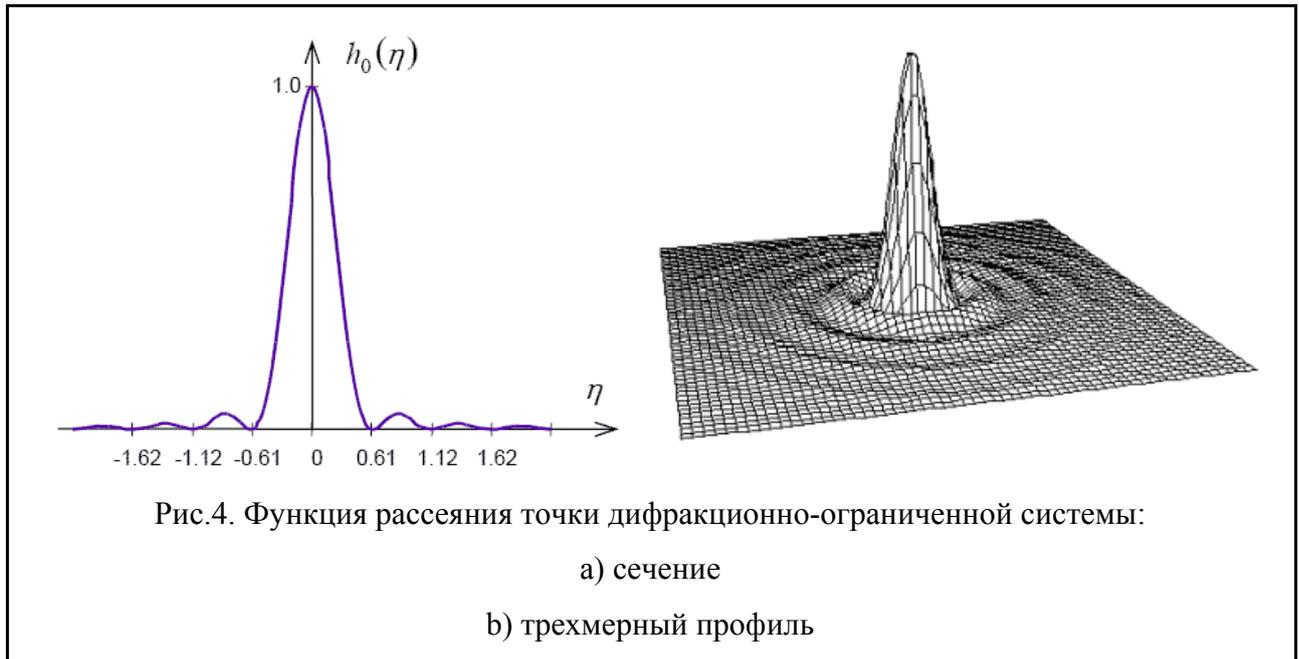


Рассмотрим ситуацию, когда точечные источники наблюдаемой сцены находятся на конечном расстоянии, и плоскость регистрации изображения не совпадает с плоскостями фокусировки лучей идущих от этих точечных источников (см. рис. 2). В результате возникшей **дефокусировки** (смещения плоскости регистрации относительно плоскостей фокусировки лучей от объектов), в плоскости регистрации будет наблюдаться пятно размытия. Очевидно, что большей дефокусировке соответствует пятно размытия более крупного масштаба.



Глубиной резкости ОС принято называть тот диапазон отклонений от плоскости фокусировки при котором размеры пятна размытия не будут влиять на пространственное разрешение получаемого изображения. При использовании пространственно-дискретных РИИ (например, ПЗС или КМОП матриц) это обозначает, что в пределах глубины резкости регистрируемое изображение изменится незначительно. Т.е. размеры пятна размытия должны быть того же порядка, что и размер минимального элемента РИИ. Заметим, что совсем не требуется размер пятна меньше минимального размера элемента – малое пятно не будет различено РИИ. На рис.3 приведена схема формирования пятен нерезкости, где z_2 , z_1 – расстояния от ОС до точечных источников излучения А и В, изображаемых ОС как А' и В'.

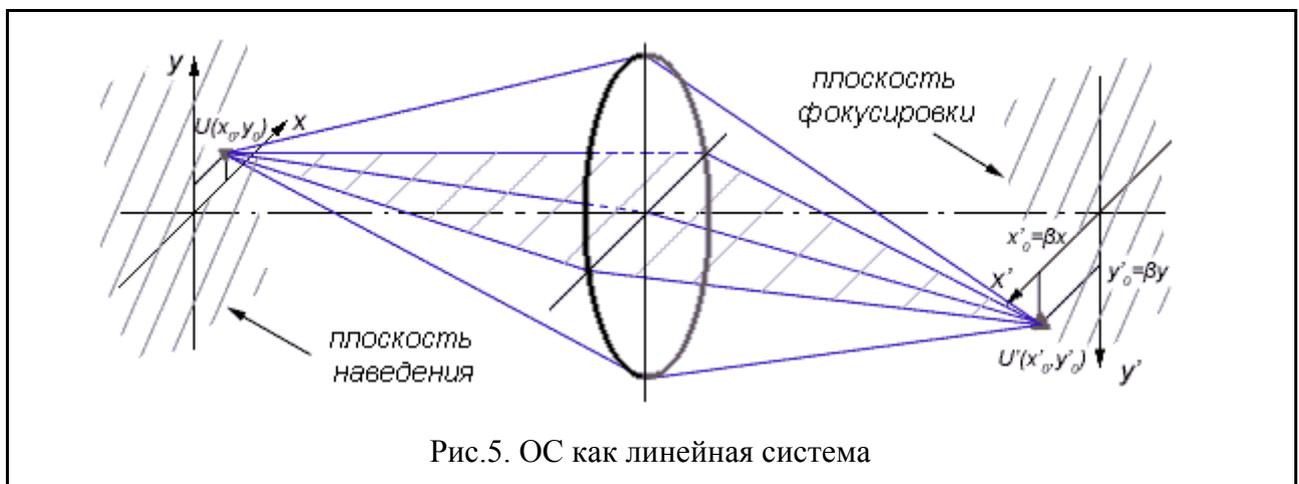
Изменение яркости в пятне размытия точечного источника определяется при помощи **функции рассеяния точки** (ФРТ, рис.4). **ФРТ** - это импульсная характеристика ОС, то, как ОС изобразит в плоскости регистрации точечный источник света. Размытое процессом дефокусировки изображение может быть смоделировано с использованием ФРТ.



ОС можно представить как линейную систему. При работе с некогерентным излучением принцип суперпозиции выполняется относительно интенсивностей наблюдаемых источников: общая интенсивность формируемого изображения есть сумма интенсивностей изображения каждого источника. Для выполнения условия линейности требуется чтобы ОС была изопланатичной. Это означает что масштаб изображения, формируемого ОС, не изменяется по полю зрения:

$$y' = \beta y \quad (1)$$

где β – линейное увеличение ОС, y – координата точки сцены, измеренная от оптической оси, y' – координата изображаемой точки в плоскости фокусировки.



Так, если $u(x,y)$ – значения яркости объекта в плоскости наведения (см. рис. 5), соответствующей плоскости фокусировки, где x и y – линейные координаты в плоскости наведения и $h(x,y;x',y')$ – ФРТ, где x' и y' – линейные координаты в плоскости регистрации (плоскость регистрации совпадает с плоскостью фокусировки), то значения яркости в плоскости регистрации определяются следующим выражением:

$$u'(x',y') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x,y;x',y')u(x,y)dx dy = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x'-\beta x, y'-\beta y)u(x,y)dx dy \quad (2)$$

или в дискретном виде:

$$u'(m',n') = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(m'-\beta m, n'-\beta n)u(m,n) = h(m,n)*u(m,n) \quad (3)$$

где m, n, m', n' – дискретные пространственные координаты в предметной плоскости и соответствующей ей плоскости изображения, и $*$ – оператор свертки, причем u и u' – есть интегральные значения реальных яркостей взятых в дискретных ячейках.

Как и прочие линейные системы ОС можно охарактеризовать с помощью передаточной функций в домене пространственных частот, называемой **оптической передаточной функцией (ОПФ, OTF – Optical Transfer Function)**. ОПФ позволяет оценить частотные и фазовые характеристики ОС, и определяется как преобразование Фурье от ФРТ:

$$OTF(v_x', v_y') = F\{h(x', y')\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(x', y') \exp(-2\pi j(v_x' x' + v_y' y')) dx' dy', \quad (4)$$

или в канонических координатах² (более удобных для сравнения ОС между собой):

$$OTF(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} h(\eta_x, \eta_y) \exp(-2\pi j(\omega_x \eta_x + \omega_y \eta_y)) d\eta_x d\eta_y, \quad (5)$$

где $\omega_x = v_x' \frac{\lambda}{A'_x}, \omega_y = v_y' \frac{\lambda}{A'_y}$ – канонические пространственные частоты,

$\eta_x = x' \frac{A'_x}{\lambda}, \eta_y = y' \frac{A'_y}{\lambda}$ – канонические линейные координаты выходного

зрачка, A'_x, A'_y – задние апертурные числа оптической системы по направлениям осей x и y , λ – длина волны оптического излучения, для фотографических объективов задняя апертура осевого пучка $A'_0 = D / f'$.

² Координаты, нормализованные относительно апертуры системы и длины волны.

Функция передачи модуляции (ФПМ, MTF - Modulation Transfer Function)

показывает величину контраста, с которым используемая ОС способна передавать пространственные частоты наблюдаемого объекта. ФПМ определяется как модуль ОПФ:

$$MTF(\omega_x, \omega_y) = |OTF(\omega_x, \omega_y)| \quad (6)$$

Для ее измерения перед оптической системой устанавливают специальный тест-объект – линейную штриховую миру (рис.6). Мира состоит из чередующихся черных и белых полос, постепенно уменьшающейся ширины. Изображение миры (рис.6), спроецированное оптической системой на плоскость регистрации, будет размытым. По мере увеличения пространственной частоты следования штрихов и пробелов контраст между их изображениями будет падать. Ширина элементов миры, при которых изображения черных и белых штрихов становятся неразличимыми, позволяют оценить диаметр пятна размытия.

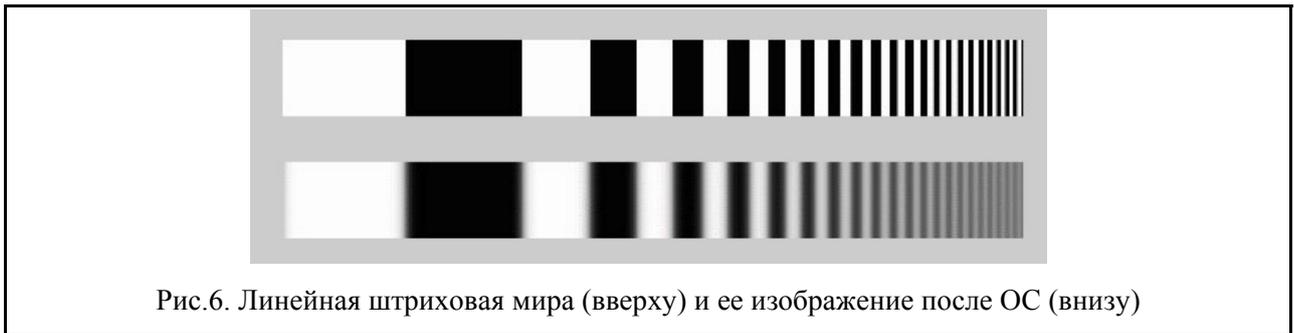


Рис.6. Линейная штриховая мира (вверху) и ее изображение после ОС (внизу)

Размытие изображения в плоскости фокусировки в зависимости от наиболее искажающего фактора характеризуются с помощью одного из приближений:

- *дифракционного*, когда на качество формируемого изображения влияет явление, обусловленное волновой природой света - дифракцией света на краях диафрагм и оптических элементов;
- *геометрического или абберационного*, когда лучи, формирующие изображение точки не сходятся в одной точке. В данном случае причиной искажений является различное поведение лучей в зависимости от их смещения от оптической оси системы. Данный вид искажений возможно минимизировать используя асферические оптические элементы.

В работе [1] показано, что ФРТ некогерентной оптической системы (практически все фотографические системы являются некогерентными) есть квадрат преобразования Фурье от функции Р пропускания выходного зрачка:

$$h(\eta_x, \eta_y) = |F^{-1}\{P(p_x, p_y)\}|^2 \quad (7)$$

p_x, p_y - зрачковые координаты,

$$p_x = x / x_{\max} = \eta_x / \eta_{x\max}, \quad p_y = y / y_{\max} = \eta_y / \eta_{y\max}. \quad (8)$$

Лучам, проходящим через края диафрагмы соответствуют зрачковые координаты $p_{x,y} = \pm 1$. Функция пропускания выходного зрачка дифракционно-ограниченной ОС равняется единице внутри и нулю вне диаметра зрачка.

Отметим, что преобразование Фурье в выражении (7) обусловлено волновой природой света, и не связано с пространственными частотами наблюдаемой сцены.

Таким образом, имеем выражение для ОПФ:

$$\begin{aligned} OTF(\omega_x, \omega_y) &= F[|F^{-1}\{P(p_x, p_y)\}|^2] = \\ &= \int_{p_x, p_y = -\infty}^{+\infty} \int P(p_x + \frac{\omega_x}{2}, p_y + \frac{\omega_y}{2}) P^*(p_x - \frac{\omega_x}{2}, p_y - \frac{\omega_y}{2}) dp_x dp_y \end{aligned} \quad (9)$$

Т.е. ОПФ есть автокорреляция функции пропускания зрачка.

Наилучшими частотными характеристиками обладает дифракционно-ограниченная оптическая система. Предел передаваемой пространственной частоты некогерентной дифракционно-ограниченной системы $\nu = \frac{2A}{\lambda} = \frac{2(D/f')}{\lambda}$ [1] (ему соответствует каноническая частота $\omega=2$, рис.7). Как видно из предыдущего соотношения, дифракционные искажения становятся тем больше, чем меньше диаметр апертурной диафрагмы.

Так для оптической системы с относительным отверстием $D/f' = 1/2$ и объекта синего цвета (длина волны 0.38 мкм) предельная передаваемая частота соответствует периоду волны: $\nu = \frac{2(D/f')}{\lambda} = \frac{2(1/2)}{\lambda} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.38 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 2632 \text{ линий/мм}$, для этой же

оптической системы но при изображении объекта красного цвета (длина волны 0.76 мкм)

предельно передаваемой частотой будет $\nu = \frac{1}{0.76 \cdot 10^{-3} \text{ м}} = 1816 \text{ линий/мм}$.

На рис. 6 показаны ФПМ для дифракционно-ограниченной системы когда РИИ установлен в фокальной плоскости (рис.7а), и когда РИИ смещен на величину $\Delta S'$ относительно фокально плоскости.

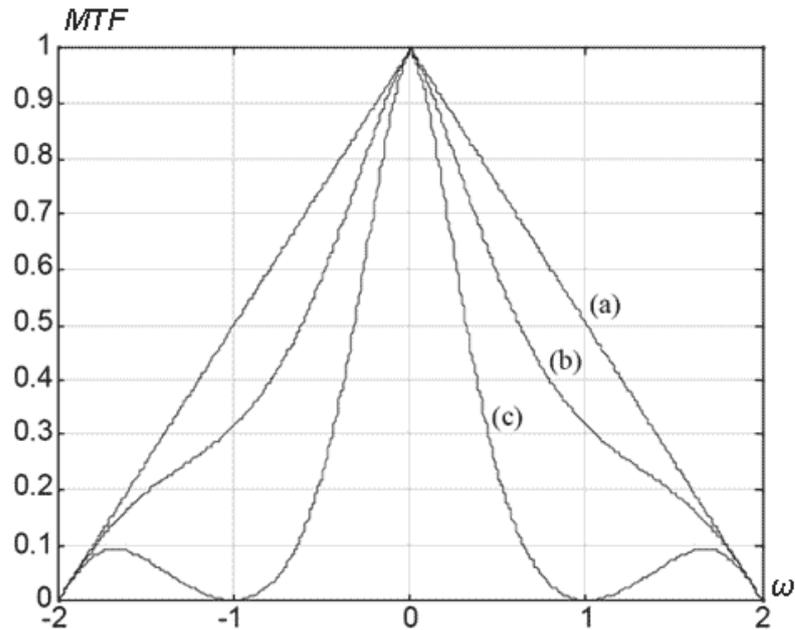


Рис.7. График ФПМ дифракционно-ограниченной ОС:

a) – для регистрации в плоскости фокусировки $\Delta S' = 0$,

b) - для смещения относительно плоскости фокусировки на $\Delta S' = \frac{\lambda}{(D/f')^2} \cdot \frac{1}{4}$,

c) - для смещения относительно плоскости фокусировки на $\Delta S' = \frac{\lambda}{(D/f')^2} \cdot \frac{1}{2}$.

С учетом продольной дефокусировки $\Delta S'$ ОПФ некогерентной дифракционно-ограниченной оптической системы определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}
 OTF(\omega_x, \omega_y, \Delta S') &= F[|F^{-1}\{P(p_x, p_y) \exp(2\pi j \cdot \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S')\}|^2] = \\
 &= \int_{p_x, p_y = -\infty}^{+\infty} \int [P(p_x + \frac{\omega_x}{2}, p_y + \frac{\omega_y}{2}) \exp(j \cdot \langle (p_x + \frac{\omega_x}{2})^2 + (p_y + \frac{\omega_y}{2})^2 \rangle \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S')] \\
 &[P^*(p_x - \frac{\omega_x}{2}, p_y - \frac{\omega_y}{2}) \exp(-j \cdot \langle (p_x - \frac{\omega_x}{2})^2 + (p_y - \frac{\omega_y}{2})^2 \rangle \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S')] dp_x dp_y, \quad (10)
 \end{aligned}$$

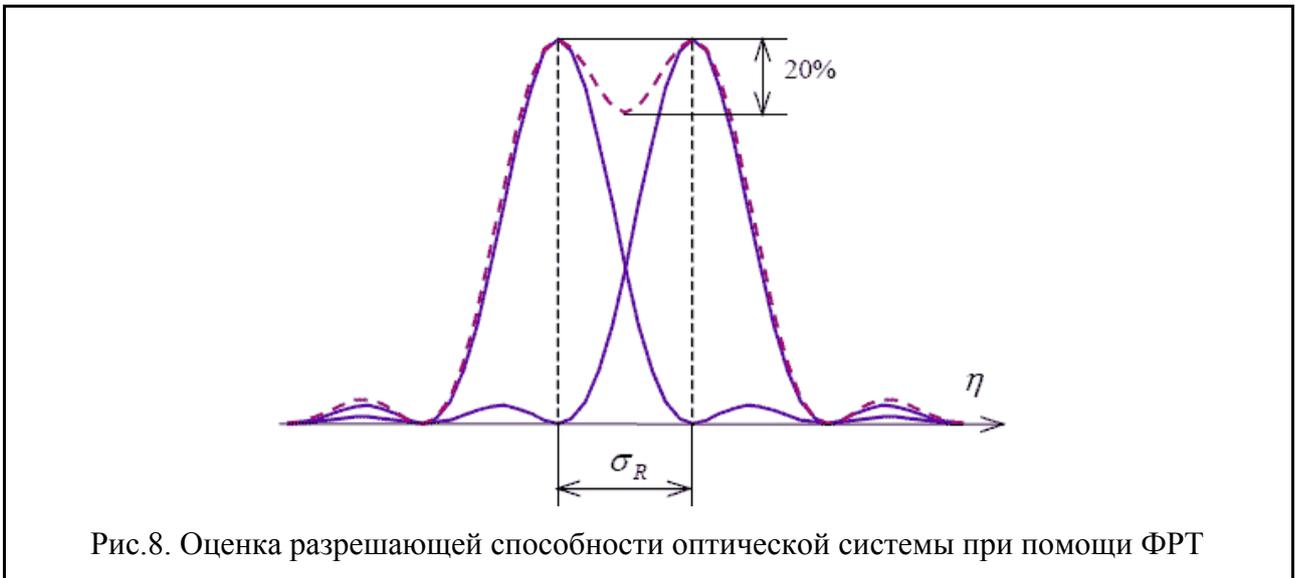
В простых светосильных объективах (когда $f'/D=1.4..2.8$), как правило, наибольший вклад в искажение изображения вносится геометрическими aberrациями, а не дифракцией.

Для количественной и более простой, чем ФПМ оценки качества формируемого объективом изображения пользуются термином «разрешающая способность».

Разрешающая способность ОС N обратно пропорциональна диаметру пятна размытия δ , формируемого объективом на плоскости регистрации, и для дифракционно-ограниченно с использованием критерия Релея[1] определяется как:

$$N = \frac{1}{\sigma_R} = \frac{(f'/D)}{1.22\lambda} \approx \nu|_{MTF=0.2} \quad (11)$$

Т.е. разрешающая способность – это та пространственная частота, для которой контраст равняется 0.2. Причем все более низкие частоты имеют больший или равный 0.2 контраст. Она характеризует способность ОС давать отдельные изображения двух соседних точек наблюдаемого объекта (рис.8). Т.е. получается, что при меньшем диаметре диафрагмы ОС большей будет разрешающая способность, т.к. уменьшится пятно размытия в плоскости наблюдения (см. рис.3).



Рассмотренные характеристики позволят понять принципы построения приведенных ниже методов и сравнивать эти методы между собой.

Способы увеличения глубины резкости ОС без применения цифровой обработки

Как правило, для увеличения глубины резкости, уменьшают диаметр диафрагмы. Однако, энергия светового потока, проходящего через оптическую систему, прямо пропорциональна площади диафрагмы: $W \sim \pi D^2/4$. Уменьшение пропускаемой ОС энергии приводит к необходимости увеличения времени регистрации изображения и увеличения чувствительности РИИ. Следствием является появление смазов и увеличение уровня шума на изображении.

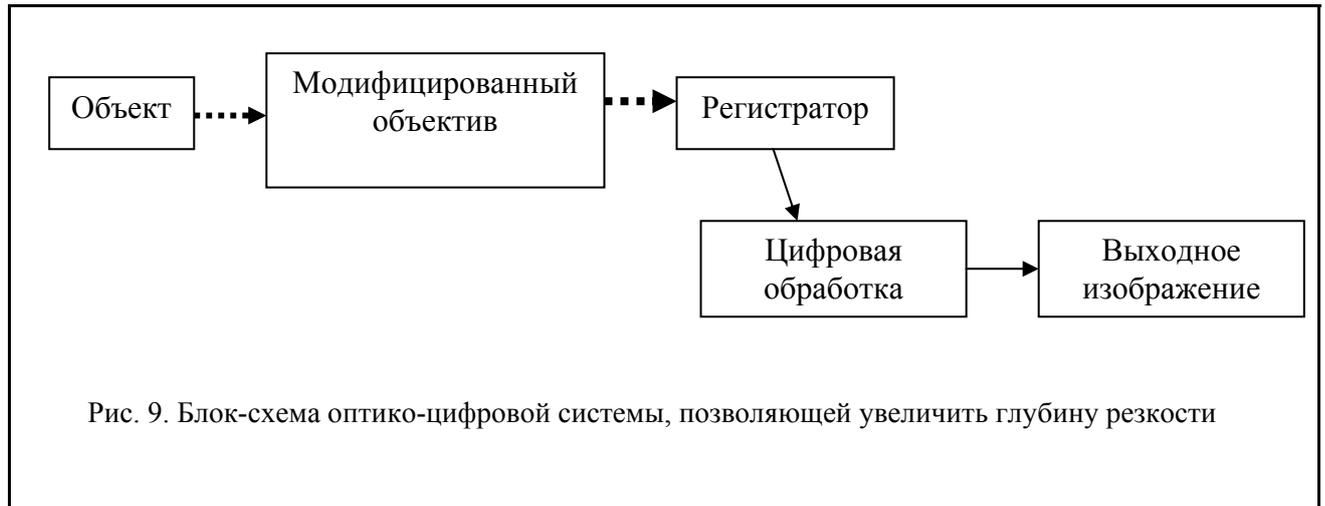
Другим способом увеличения глубины резкости является пересчёт параметров ОС. На практике зависимость глубины резкости от диаметра диафрагмы, как и зависимость диаметра пятна размытия от расстояния до объекта, затруднительно описать сколько-нибудь строгим математическим выражением. Поэтому прибегают к математическому моделированию хода лучей через оптическую систему.

До появления цифровой вычислительной техники проектировщики стремились улучшить качество изображения, уменьшая размер пятна размытия. Сейчас появилась возможность методами цифровой обработки изображений по известной искажающей функции восстанавливать размытые изображения. Таким образом, если раньше получение качественного изображения достигалось только за счёт уменьшения размера диафрагмы и борьбы с aberrациями оптики, то теперь появляется ещё одна возможность. Это проектирование оптики с заранее predetermined (пусть даже не малым) размытием изображения. Если вводится размытие, независимое от величины дефокусировки и угла по полю зрения, то восстановление изображения достигается методами инверсной фильтрации, так как система является линейной с постоянными параметрами. Иначе необходим более сложный математический аппарат восстановления размытого изображения.

Оптико-цифровые способы увеличения глубины резкости

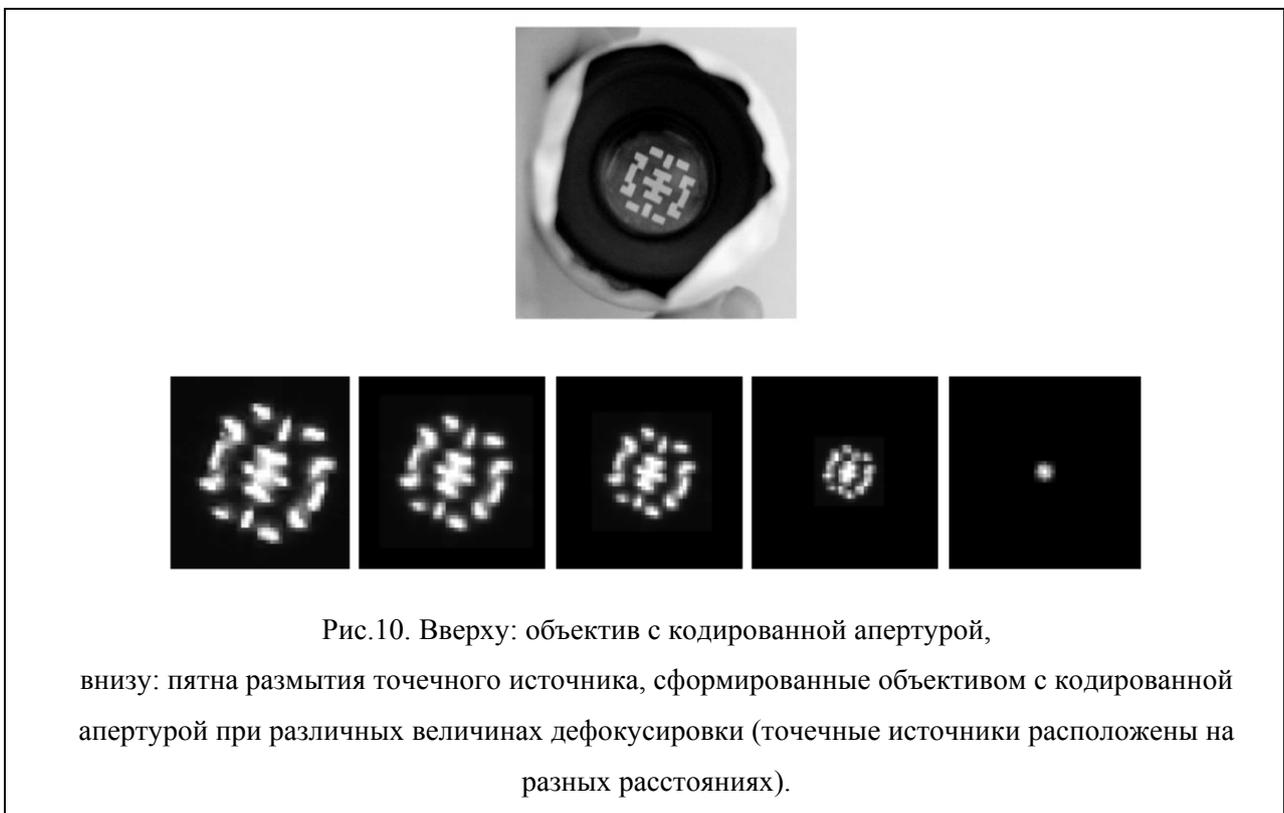
Для формирования специального характера размытия необходимо модифицировать оптическую систему. Из-за вносимого размытия изображение, которое фиксируется с помощью РИИ, не является резким. Резкое изображение восстанавливается с помощью цифровых методов обработки изображений. Т.о. все рассматриваемые ниже системы обладают двумя отличительными особенностями (рис.9):

- в них используется модифицированная для каждого конкретного метода ОС,
- присутствует цифровая обработка зафиксированного изображения, использующая особенности ОС.



Кодированная апертура

В данном методе в ОС устанавливается специальная диафрагма, которая «кодирует» в регистрируемом РИИ изображении информацию о расстоянии до изображаемого объекта. При декодировании для участков изображения определяются дальности до объектов, с помощью которых в последствии восстанавливается резкое изображение[3, 4].



Рассмотрим процесс формирования изображения в методе с кодированной апертурой. Регистрируемое изображение представляется суперпозицией изображений элементов сцены (точек). Каждой точке, в зависимости от расстояния до неё, соответствует своё пятно размытия (см. рис.10). Эти пятна представляют собой масштабированные изображения апертурной диафрагмы. Таким образом, процесс формирования изображения группы соседних элементов сцены, расположенных на одинаковом расстоянии, можно описать с помощью операции линейной фильтрации с пятном заданного масштаба (ядром фильтрации). Что при переходе к дискретному представлению изображения будет иметь следующий вид:

$$u' = h_k * u \quad (12)$$

где u' – размытое изображение,

u – резкое изображение сцены,

h_k – пространственный фильтр масштаба k ,

* - операция свертки.

При переходе в частотную область:

$$U' = H_k \cdot U \quad (13)$$

где U' – преобразование Фурье зафиксированного изображения,

U – преобразование Фурье входного изображения,

H_k – преобразование Фурье ядра фильтра масштаба k .

Таким образом, для того, чтобы восстановить резкое изображение частей сцены необходимо знать частотную характеристику ядра размытия H_k :

$$U = \frac{U'}{H_k} \quad (14)$$

Выражение (14) описывает простейший способ инверсной фильтрации [2]. Проблема заключается в том, что, как правило, частотная характеристика ядра размытия не известна.

Для определения H_k используется свойство кодированной апертуры, заключающееся в том, что её частотная характеристика имеет нулевые значения, соответствующие разным масштабам пятна размытия. Так на рис.11 показан одномерный пример кодирующих ядер и соответствующие им спектральные характеристики. Видно, что чем больше масштаб ядра, тем меньше расстояние между нулевыми значениями частотных характеристик. Также наблюдается сохранение пропорций между

положениями нулевых значений. Расположение нулей фактически определяет ядро фильтрации.

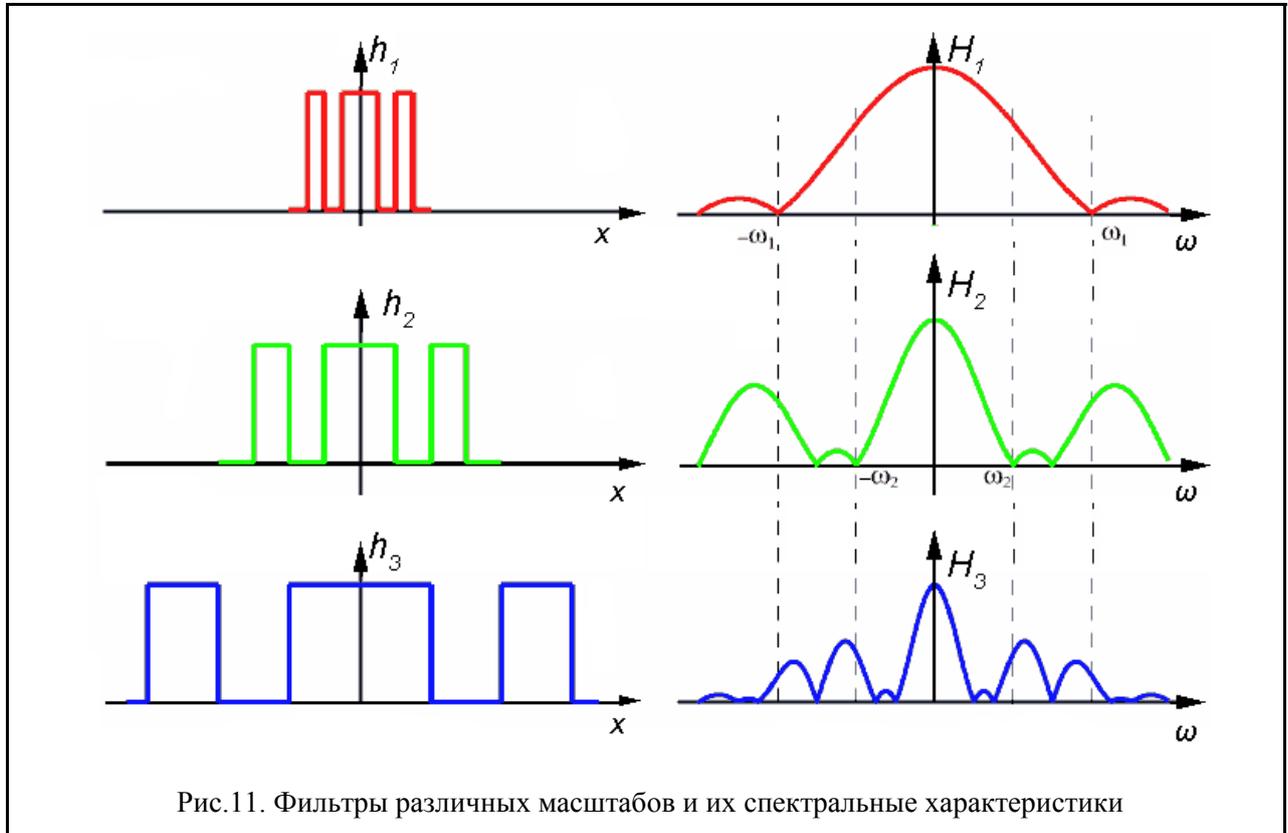


Рис.11. Фильтры различных масштабов и их спектральные характеристики

Заметим, что если в спектре искажающей функции присутствуют нули, то инверсная фильтрация (14) не даст корректных результатов. Простым способом выхода из такой ситуации является замена нулями значения функции U , когда H_k имеет значение по модулю меньше некоторого предельного, близкого к нулю.

Важно отметить, что инверсная фильтрация неустойчива к шуму. Модель размытия изображения в присутствии шума имеет вид:

$$\tilde{u} = h_k * u + \eta, \quad (15)$$

где η - аддитивный шум, тогда в спектральной области выражение восстановления изображения примет вид:

$$\tilde{U} = \frac{U'}{H_k} - \frac{N}{H_k}, \quad (16)$$

где N - преобразование Фурье от неизвестного пространственного распределения шума η .

Из выражения видно, что при малых значениях H_k даже незначительный шум может привести к существенным отклонениям U от \tilde{U} (14 и 16). При восстановлении изображений, искажённым шумом, эффективнее применять более сложные фильтры, например, фильтр Винера.

Фильтр Винера [2] имеет следующий вид:

$$G = \frac{H_k^* S_{uu}}{|H_k|^2 S_{uu} + S_{\eta\eta}} \quad (17)$$

Где

H_k^* - комплексно-сопряженная к $H_k(\omega_m, \omega_n)$ функция,

S_{uu} - предполагаемая спектральная плотность входного изображения,

$S_{\eta\eta}$ - предполагаемая спектральная плотность мощности шума.

Восстановленное изображение находится (в частотной области) в виде:

$$\hat{U} = G \cdot U' \quad (18)$$

Фильтр Винера объединяет в себе свойства НЧ-фильтра, сглаживающего шум, и высокочастотные свойства, похожие на свойства инверсного фильтра.

При восстановлении изображений, полученных с помощью кодированной апертуры сначала локально, по положению нулей спектра, определяются возможные масштабы ядра фильтра. Затем, для этих масштабов ядра восстанавливаются изображения, и оцениваются близость каждого из них к натуральному изображению [5], для этого вычисляют значение градиентного фильтра:

$$e = \sum grad(\hat{u}) \quad (19)$$

где \hat{u} - восстановленное с помощью Винеровского фильтра изображение (обратное преобразование Фурье от \hat{U}).

То изображение, для которого значение e является минимальным, считается наиболее реалистичным. В некорректно восстановленных изображениях (у которых большое значение e) имеется большее, чем в натуральных изображениях количество перепадов яркости.

Отметим, что дополнительным плюсом метода является то, что может быть получена карта глубин сцены. Однако существует методическая неоднозначность определения дистанции до объекта, т.к. пятно размытия является одинаковым при

симметричном положении объекта относительно плоскости наведения – перед плоскостью и за плоскостью.

На практике кодированная апертура представляет собой транспарант с отверстиями, образующие рисунок специальной формы. Изготавливается из тонкой металлической пластины и монтируется на место апертурной диафрагмы.

Кубическая фазовая маска

Данный способ увеличения глубины резкости предложил профессор Эдвард Довски (Edward Dowski, University of Colorado). В основе проектирования оптической части лежит идея, что пятно размытия и функция передачи модуляции не должны зависеть от величины дефокусировки в расширенном диапазоне фокусировок. Причем ОС должна передавать все пространственные частоты вплоть до предельного значения, соответствующего разрешающей способности регистратора изображения [6, 7].

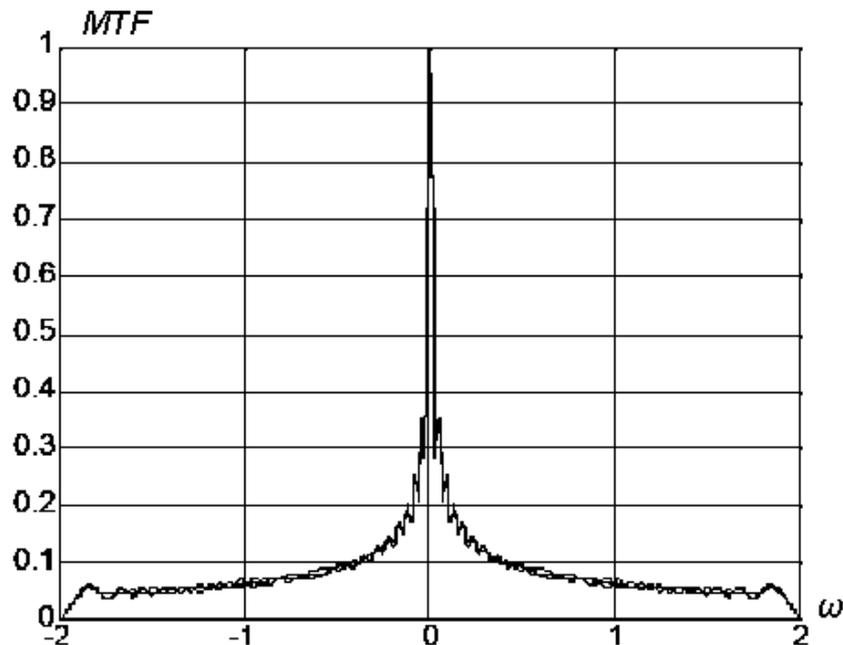


Рис.12. Постоянство функции передачи модуляции системы с кубической фазовой маской при дефокусировке

В результате поиска решения поставленной задачи было получено, что независимость функции передачи модуляции от величины дефокусировки (см. рис.12) может быть обеспечена с помощью специального оптического элемента, размещаемого в

оптической системе - кубической фазовой маски, расположенной вблизи апертурной диафрагмы ОС.

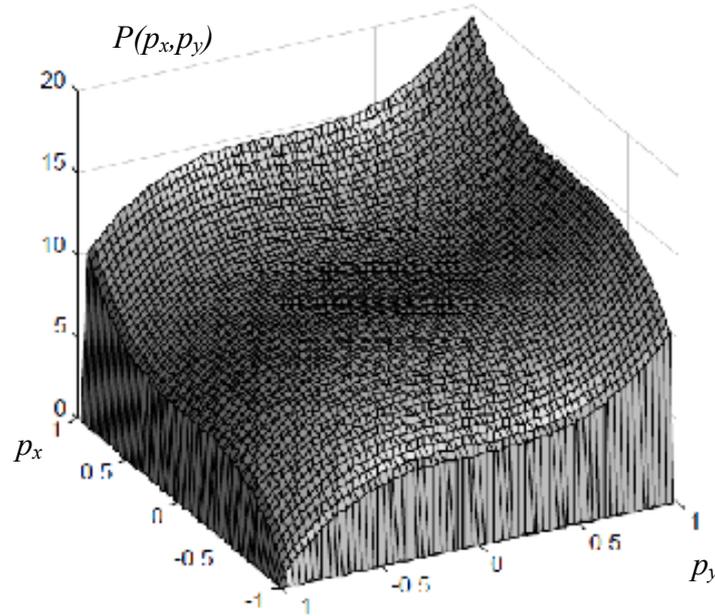


Рис. 13. Изменения, вносимые в функцию пропускания зрачка ОС кубической фазовой маской

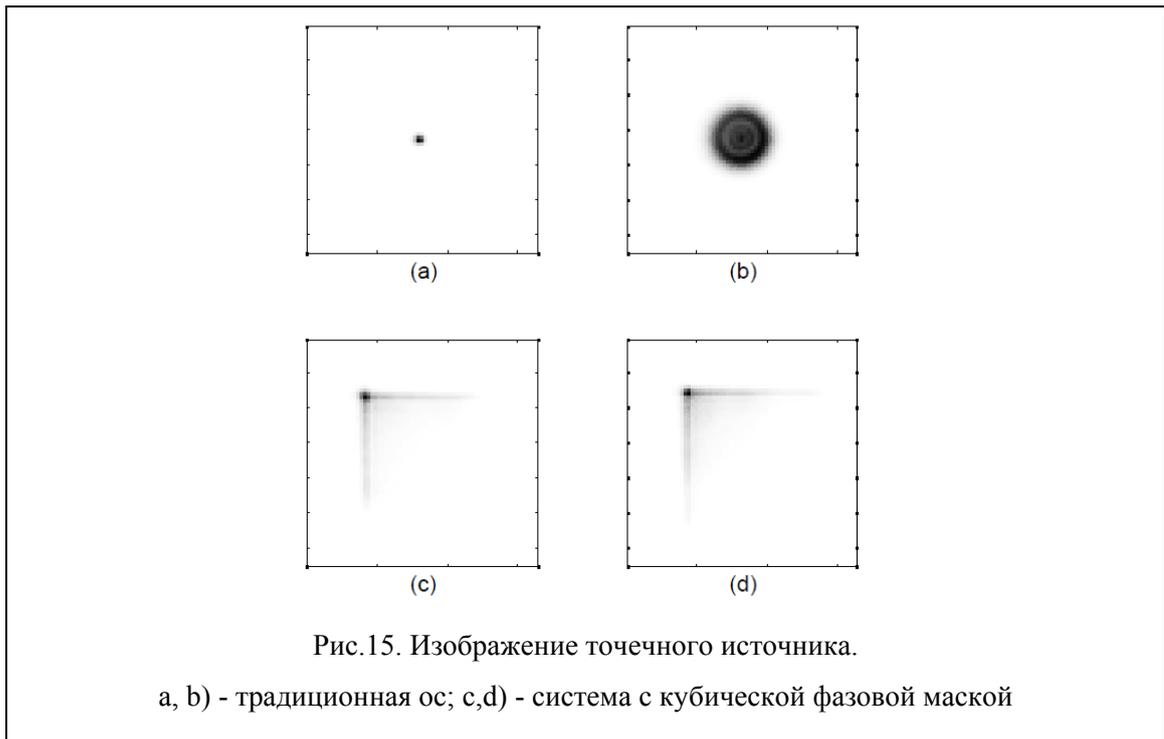
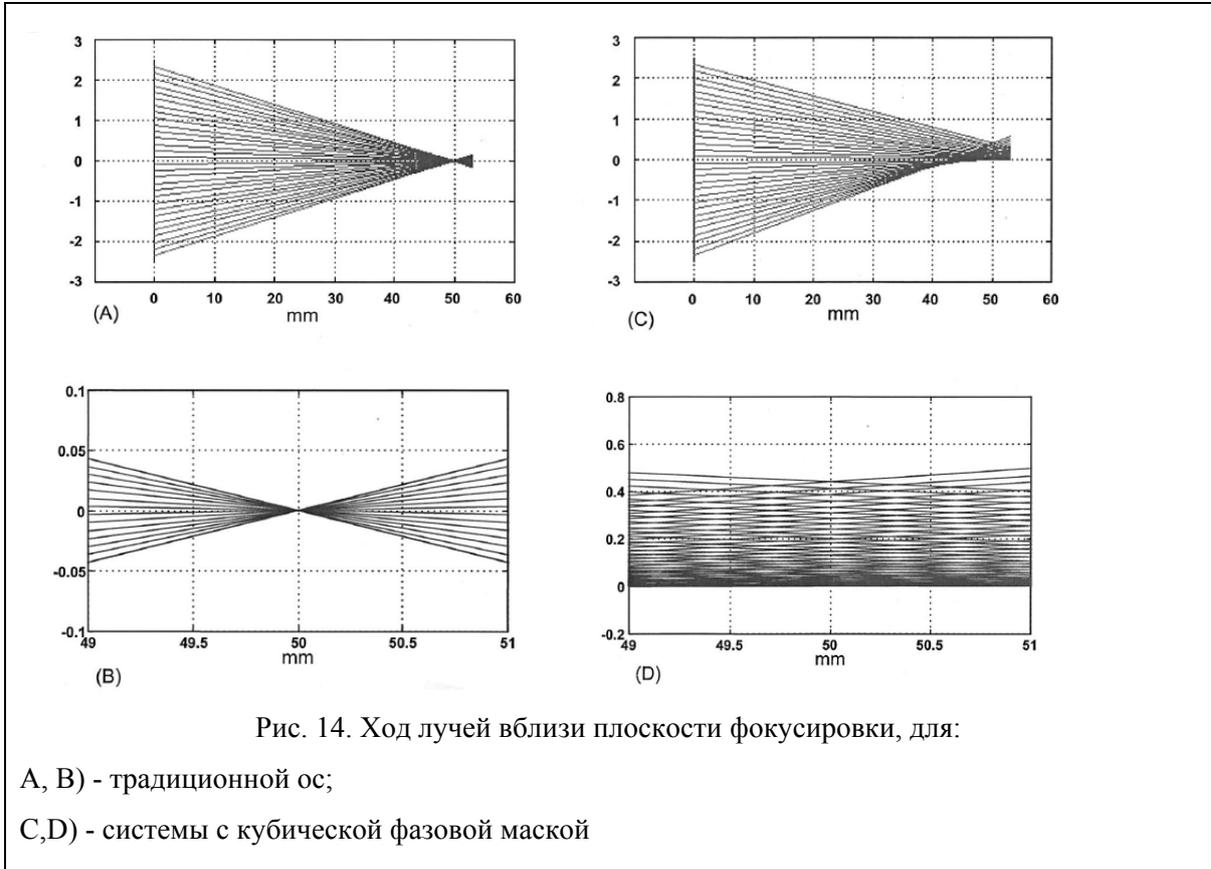
Кубическая фазовая маска представляет собой оптический элемент с кубическим профилем поверхности, который приводит к функции выходного зрачка следующего вида (рис.9):

$$\tilde{P}(p_x, p_y) = P(p_x, p_y) \exp(j\alpha(p_x^3 + p_y^3)) \quad (20)$$

где p_x, p_y – координаты по перпендикулярным направлениям, $\alpha = 2\pi/\xi$ и $\xi \sim 0.1$ характеризует материал маски.

Для облегчения понимания принципа работы кубической фазовой маски рассмотрим ход лучей в модифицированной оптической системе в сравнении с ходом лучей в традиционной оптической системе (см. рис.14). Лучи в осесимметричных оптических системах пересекают оптическую ось практически в одной точке. Сечения пучка лучей с различными величинами дефокусировки представляют собой набор концентрических окружностей. В системе с кубической фазовой маской крайние лучи отклоняются специальным образом, формируя незначительно зависящую от

дефокусировки картину. Изображения точечного источника этими ОС представлены на рис.15.



С учетом кубической фазовой маски ОПФ примет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & OTF(\omega_x, \omega_y, \Delta S') = \\
 & = \int_{p_x, p_y = -\infty}^{+\infty} \int \left[P\left(p_x + \frac{\omega_x}{2}, p_y + \frac{\omega_y}{2}\right) \exp\left(j \cdot \left\langle \left(p_x + \frac{\omega_x}{2}\right)^2 + \left(p_y + \frac{\omega_y}{2}\right)^2 \right\rangle \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S'\right) \right] \\
 & \quad \left[P^*\left(p_x - \frac{\omega_x}{2}, p_y - \frac{\omega_y}{2}\right) \exp\left(-j \cdot \left\langle \left(p_x - \frac{\omega_x}{2}\right)^2 + \left(p_y - \frac{\omega_y}{2}\right)^2 \right\rangle \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S'\right) \right] \\
 & \quad \exp\left(j\alpha \left\{ \left(p_x + \frac{\omega_x}{2}\right)^3 + \left(p_y + \frac{\omega_y}{2}\right)^3 \right\} - j\alpha \left\{ \left(p_x - \frac{\omega_x}{2}\right)^3 + \left(p_y - \frac{\omega_y}{2}\right)^3 \right\}\right) dp_x dp_y \quad (21)
 \end{aligned}$$

ФПМ, как и ОПФ дают характеристику ОС только для одного смещения плоскости регистрации относительно плоскости фокусировки. Для оценки поведения системы при дефокусировке более удобно пользоваться функцией неопределенности (Ambiguity Function, Woodward Function³) [8]. Выражение для функции неопределенности дифракционно-ограниченной оптической системы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 AF(\omega_x, \omega_y, \Delta S') &= F\left[\left| F^{-1}\left\{P(p_x, p_y) \exp\left(2j \cdot \frac{(D/f')^2}{\lambda} \Delta S'(\omega_x + \omega_y)\right)\right\}\right|^2\right] = \\
 &= OTF\left(\omega_x, \omega_y, \frac{\Delta S'(\omega_x + \omega_y)}{\pi}\right) \quad (22)
 \end{aligned}$$

Функция неопределенности в оптике – это представление ОПФ в зависимости от величины дефокусировки в полярных координатах. На рисунке 16 представлены функции неопределенности

³ - изначально эта функция использовалась в радиолокации и была введена Джоном Вудвардом.

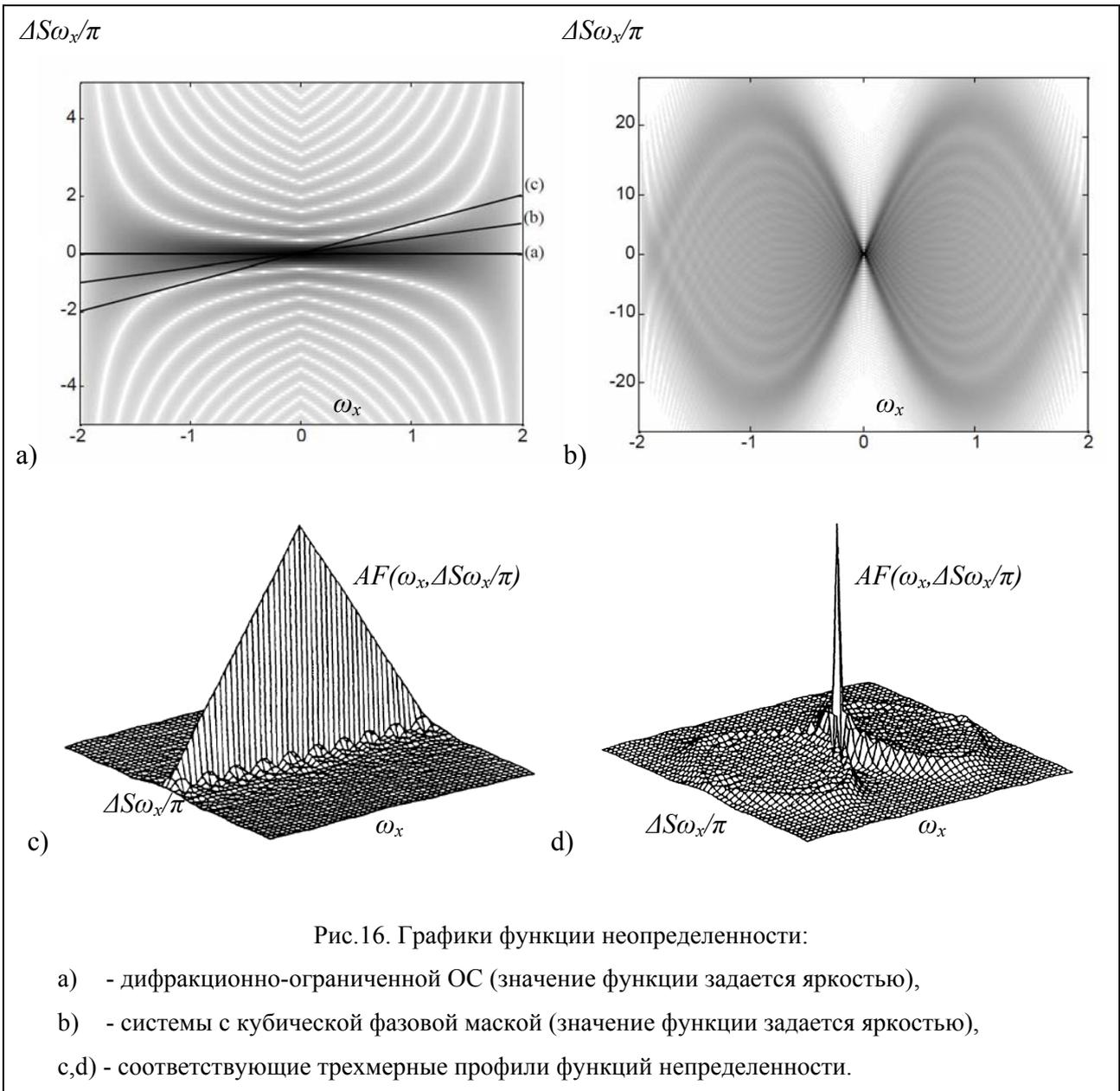


Рис.16. Графики функции неопределенности:

- a) - дифракционно-ограниченной ОС (значение функции задается яркостью),
- b) - системы с кубической фазовой маской (значение функции задается яркостью),
- c,d) - соответствующие трехмерные профили функций неопределенности.

ОС с кубической фазовой маской не дает резкого изображения предмета ни в фокальной плоскости, ни вблизи нее. Изображение предмета получается размытым. Для восстановления резкого изображения из зафиксированного используется инверсная фильтрация или её аналоги.

Упрощение задачи восстановления достигается благодаря следующим особенностям модифицированной системы:

- размытие изображения инвариантно к величине дефокусировки,
- кубическая фазовая маска вносит искажения, которые можно представить в виде искажения с разделяемыми относительно x и y переменными

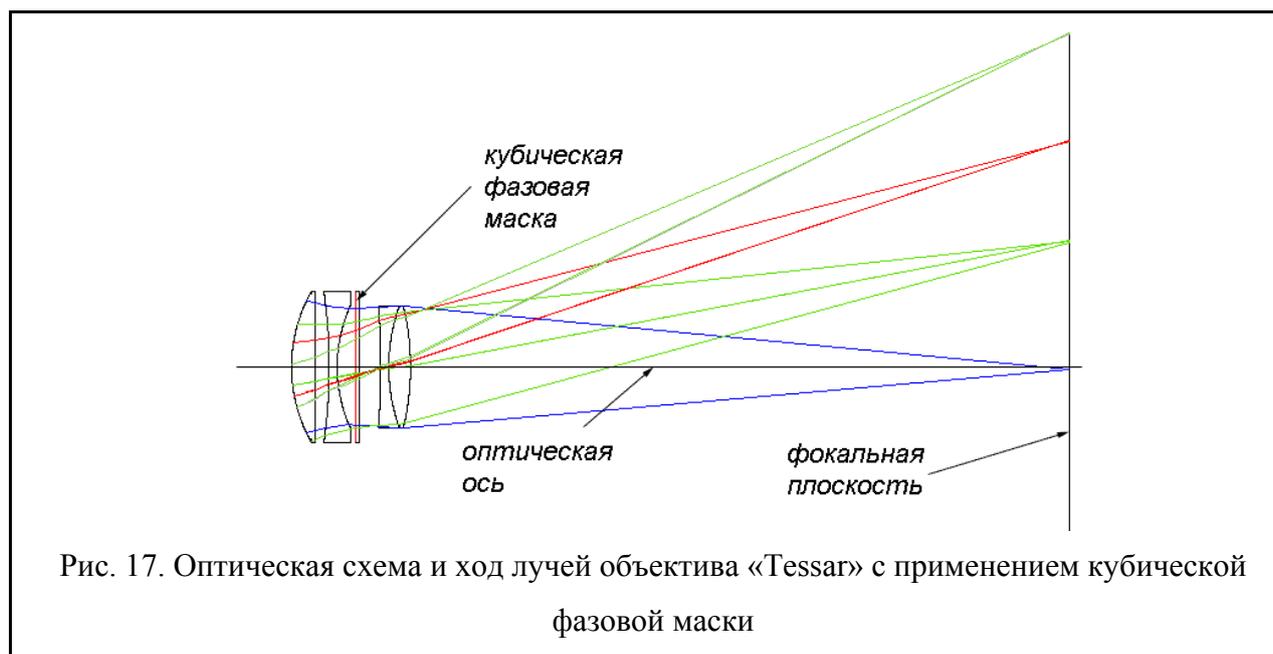
- функция передачи модуляции не имеет нулей в частотной области

Кубическая фазовая маска может эффективно применяться как для улучшения качества изображения предмета вне зоны фокусировки камеры, так и для повышения качества изображения, создаваемого оптической системой со значительными aberrациями дефокусировки: сферическая aberrация, хроматическая aberrация, астигматизм. Можно уменьшить aberrации, вызванные изменением температуры и давления.[9]

Нужно отметить, что изготовление кубической фазовой маски требует новых технологий изготовления оптических элементов. Все методы изготовления такой маски предполагают использование лазера для формирования кубического профиля. Один из последних, предлагаемых в публикациях способов изготовления фазовых масок – это способ формирования дифракционной поверхности, состоящей из субдлинноволновых бинарных элементов [10].

Технология была запатентована 5 мая 1998 года (патент США №5,748,371) и в последующее время дополнялась и уточнялась.

Было проведено моделирование применения кубической фазовой маски в конструкции широко известного трехлинзового объектива оптическая компоновка которого называется «Тессар» (рис.17). Моделирование проводилось с использованием программного комплекса Zemax.



Сразу позади второй линзы была помещена кубическая фазовая маска, форма которой может быть описана с помощью выражения

$$z'' = 200x''^3 + 200y''^3 \quad (23)$$

Маска дает следующий вид смещения фаз световых волн в выходном зрачке:

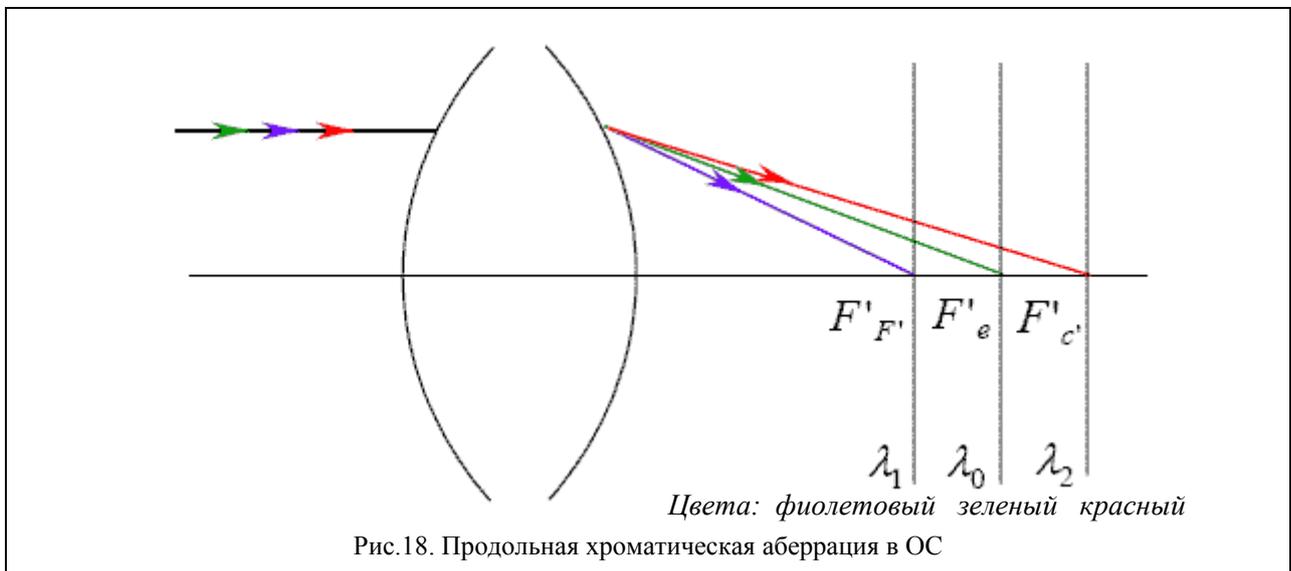
$$\tilde{P}(p_x, p_y) = \exp(j \cdot 25\pi(p_x^3 + p_y^3)) \quad (24)$$

Отклонение фазы такого порядка (порядка +/-15 длин волн на краях зрачка) приводится в большинстве работ по кодированной апертуре как оптимальное.

В приложении А приведены графики изменения ФПМ, измеренной при пространственной частоте в 15 линий/мм, и графики ФРТ в зависимости от дефокусировки для углов поля зрения 0°, 12.5° и 25°. Как видно, введение фазовой маски позволяет ввести в систему инвариантность не только относительно фокусировки, но и относительно углов поля зрения оптической системы. Заметим, что величина допустимой дефокусировки для разрешающей способности 15 линий/мм увеличилась в $k = 1.6\text{мм} / 0.7\text{мм} = 2.3$ раза (как было указано выше (11), различимыми принято считать те пространственные частоты, для которых величина ФПМ превышает уровень порядка 0.2).

Перенос резкости по цветовым каналам

В работе [11] представлен метод проектирования оптических систем в котором предлагается намеренно увеличивать продольную хроматическую aberrацию ОС (longitudinal chromatic aberration). То есть когда лучи различного цвета преднамеренно фокусируются ОС в различных положениях (рис.18)



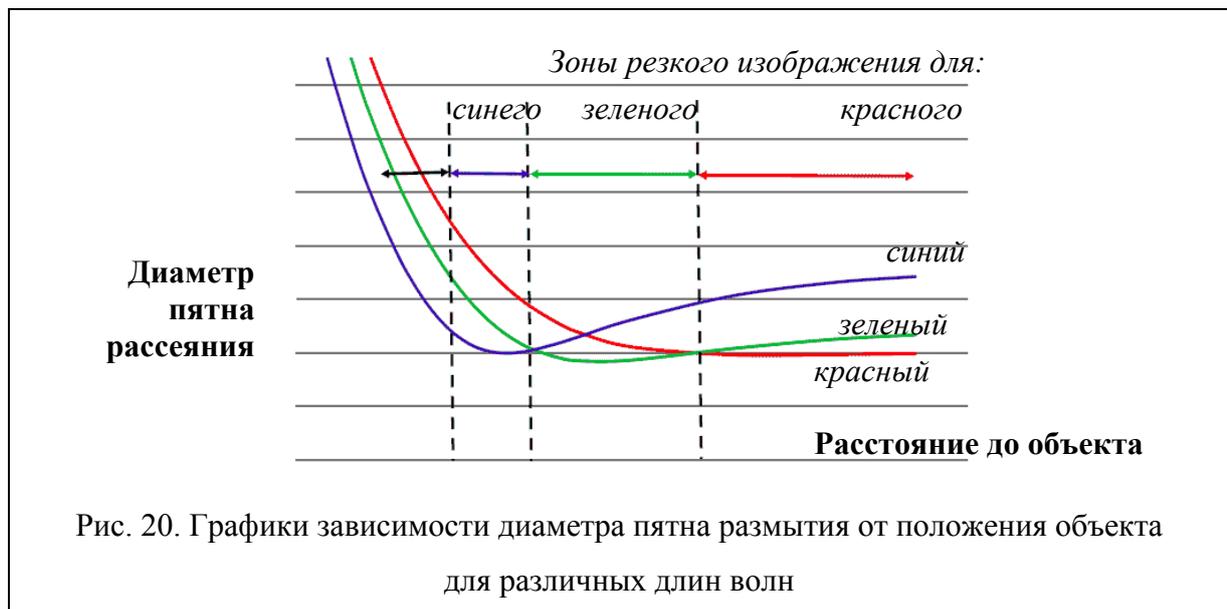
Благодаря этому для определенного расстояния до объекта хотя бы один из каналов изображения, фиксируемого цветным РИИ, содержит резко сфокусированное изображение рассматриваемой части объекта. Дальнейшее улучшение зафиксированного изображения осуществляется при помощи цифровой обработки. Сравнивая резкость изображения для различных цветовых каналов получают информацию о том какой слой наиболее резкий. Затем, высокочастотная составляющая слоя с более резкими контурами объекта переносится в слои с размытым изображением. Эта технология запатентована фирмой “DxO”[12].

Хроматическая aberrация в ОС вызвана различием показателей преломления оптических элементов системы для различных длин волн. Хроматическая aberrация от белого точечного источника выглядит как набор концентрических колец различного цвета. В классических оптических системах стремятся компенсировать хроматическую aberrацию, усложняя при этом оптическую систему.

Допустим, имеется оптическая система в которой присутствует значительная хроматическая aberrация. Фиксируя изображение с помощью РИИ с цветным фильтром Байера, получаем трехканальное изображение, содержащее в себе красный, зеленый и синий каналы. На первый взгляд с помощью алгоритмов обработки изображений можно минимизировать хроматическую aberrацию, присутствующую в изображении (рис. 19). По данному пути идет большинство современных разработчиков систем обработки изображений. С помощью предлагаемого метода можно еще и значительно улучшить резкость выходного изображения в большем диапазоне глубины пространства сцены.



Рассмотрим процесс улучшения изображения подробнее. Для начала обратимся к рис. 20. Он позволяет проще представить распределение зон фокусировок. В одной из трех зон фокусировки диаметр пятна размытия минимален для каждого отдельно взятого цвета. При проектировании оптики систем, подобных “DxO Digital Optics”, зоны фокусировки располагают в следующем порядке: красному спектру соответствует фокусировка объектива на бесконечность, зеленому спектру – промежуточное расстояние, синему – ближнюю зону фокусировки.



Для цифрового улучшения изображения необходимо выполнить следующие процедуры:

1. Получить карту резкости изображения (в источнике – «карту глубины сцены»).

Для этого находят нормированную относительную резкость между каналами изображения

$$M_{i=R,G,B}(x_0, y_0) = \frac{|\nabla I_i(x, y) - \overline{\nabla I_i}(x_0, y_0)|}{\overline{\nabla I_i}(x_0, y_0)}, \quad (25)$$

где (x_0, y_0) – точка изображения для которой оценивается относительная резкость, ∇I_i – величина градиента для каждого отдельно взятого цветового канала ($i=R, G, B$), $\overline{\nabla I_i}$ – средняя для трех каналов величина градиента.

2. Перенести резкие зоны между каналами в соответствии с полученной картой.

Перенос осуществляется по следующему алгоритму: к нерезкому изображению добавляются части высокочастотных составляющих из других каналов. Этот процесс можно описать следующим выражением:

$$C_{i=R,G,B} out = C_{i=R,G,B} in + a_{i,R} HP_{i,R}(C_R) + a_{i,G} HP_{i,G}(C_G) + a_{i,B} HP_{i,B}(C_B). \quad (26)$$

Где $C_{i,out}$ – яркость выходного изображения одного из каналов,

$HP_{i,j}(C_j)$ – высокочастотные фильтры(High Pass) примененные к изображению j-ого канала, $a_{i,j}$ - весовые коэффициенты.

Отметим, что характеристики высокочастотных восстанавливающих фильтров зависят от передаточной функции ОС для каждого цветового слоя.

Заключение

Рассмотрены три метода увеличения глубины резкости, в которых преднамеренно осуществляется размытие изображений специальным образом. В зависимости от примененного типа размытия используются соответствующие способы восстановления резкого изображения.

В методе с применением кодированной апертуры используется специальная диафрагма. Пятно размытия точечного источника, повторяющее по форме диафрагму, изменяется в масштабе в зависимости от величины дефокусировки. Задача восстановления состоит в определении масштаба пятна для каждой области размытого изображения и локальном применении инверсной фильтрации.

В ОС с применением кубической фазовой маски неосесимметричная оптически прозрачная маска изменяет ход лучей в системе таким образом, что форма пятна размытия не зависит от угла поля зрения и дефокусировки в значительном диапазоне. ФПМ такой системы не имеет нулей. Восстановление осуществляется по известной функции размытия с постоянными параметрами.

В методе с переносом резкости по цветовым каналам оптическая система формирует резкое изображение для различных цветов сцены в различных плоскостях фокусировки. При восстановлении, контуры резкого изображения формируются из наиболее резких участков каждого цветового канала РИИ.

При восстановлении резкого изображения необходимо иметь информацию об особенностях наблюдаемой сцены. Так, в методе с кодированной апертурой опираются на оценку реалистичности восстанавливаемого изображения; при восстановлении изображения в системе с кубической фазовой маской с помощью фильтра Винера пользуются предполагаемой спектральной плотностью резкого изображения сцены; метод с переносом резкости по цветовым каналам эффективно применяется при условии, что наблюдаемые объекты имеют несколько цветов излучения в своем спектре.

Использованная литература:

1. М.Борн, Э.Вольф “Основы оптики” под редакцией Г.П.Мотулевич; Москва, «Наука», 1973г.
2. Anil K.Jain “Fundamentals of digital Image Processing”, Prentice Hall, NJ, 1989, ISBN 0-13-336165-9
3. A.Levin, R.Fergus, F. Durand, W. T. Freeman «Image and Depth from a Conventional Camera with a Coded Aperture», Massachusetts Institute of Technology, Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory
4. M. Grosse, O. Bimber «Coded Aperture Projection» Bauhaus-University Weimar, Los Angeles, California, ACM August 9–10, 2008. 978-1-60558-211-5/08/0008
5. A.Levin, R.Fergus, F. Durand, W. T. Freeman «Deconvolution using natural image priors» Massachusetts Institute of Technology, Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory
6. R. Dowski, Jr., W. T. Cathey and J. van der Gracht “Aberration Invariant Optical-Digital Incoherent Optical Systems” Imaging Systems Laboratory, Department of Electrical Engineering, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309
7. R. Dowski, Jr. and W. T. Cathey, “Extended Depth of Field Through Wavefront Coding”, Applied Optics 34, 1859-1866 (1995)
8. K. Brenner, A. Lohmann, and J. Ojeda-Castañeda, “The Ambiguity Function as a Polar Display of the OTF”, Optics Communications 44, 323-326 (1983).
9. Hans B. Wach, W. Thomas Cathey and Edward R. Dowski, Jr. “Control of chromatic focal shift through wavefront coding”
10. Mark S. Mirotznik, Joseph van der Gracht, David Pustai and Scott Mathews “Design of cubic-phase optical elements using subwavelength microstructures”; Optics Express, vol.16, No.2, 21 January 2008
11. F. Guichard, Hoang Phi Nguyen, R. Tessières, M. Pyanet, I. Tarchouna, F. Cao ”Extended depth-of-field using sharpness transport across color channels” DxO Labs, 3 Rue Nationale, 92100 Boulogne, France
12. Chanas, L., Tarchouna, I., Guichard, F. and Liege, B., “Method of Controlling and action, such as a sharpness modification, using a color digital image”, WO 2006/095110 patent (2005).

Приложение А

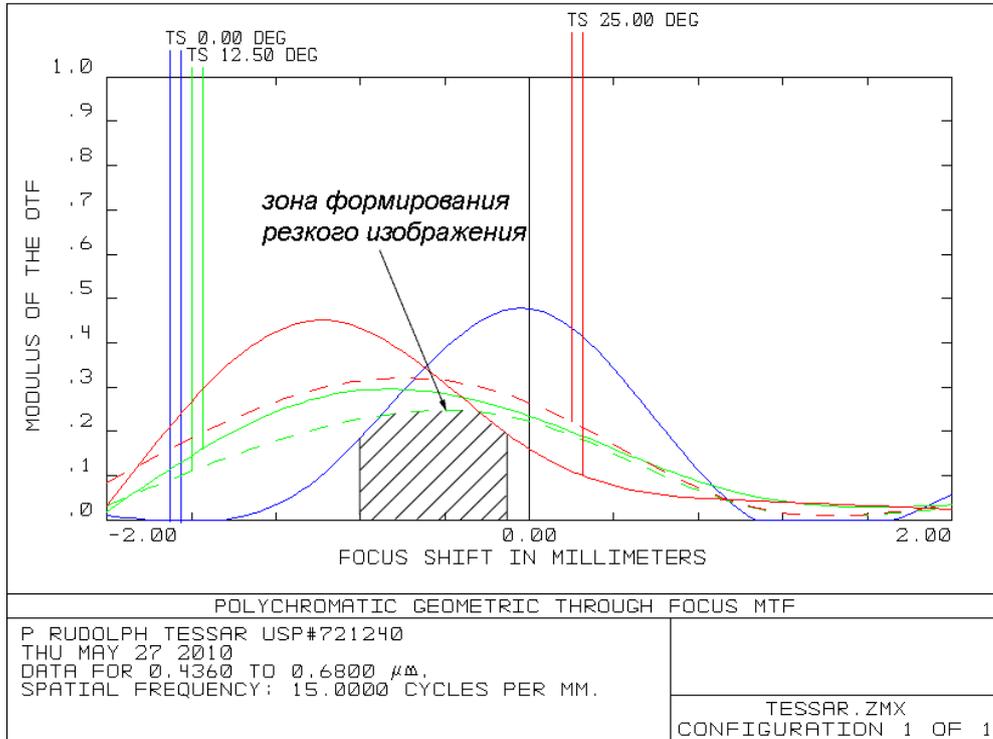


Рис.21 Зависимость передаточной функции пространственной частоты 15 линий/мм в немодифицированном объективе конструкции «Tessar»

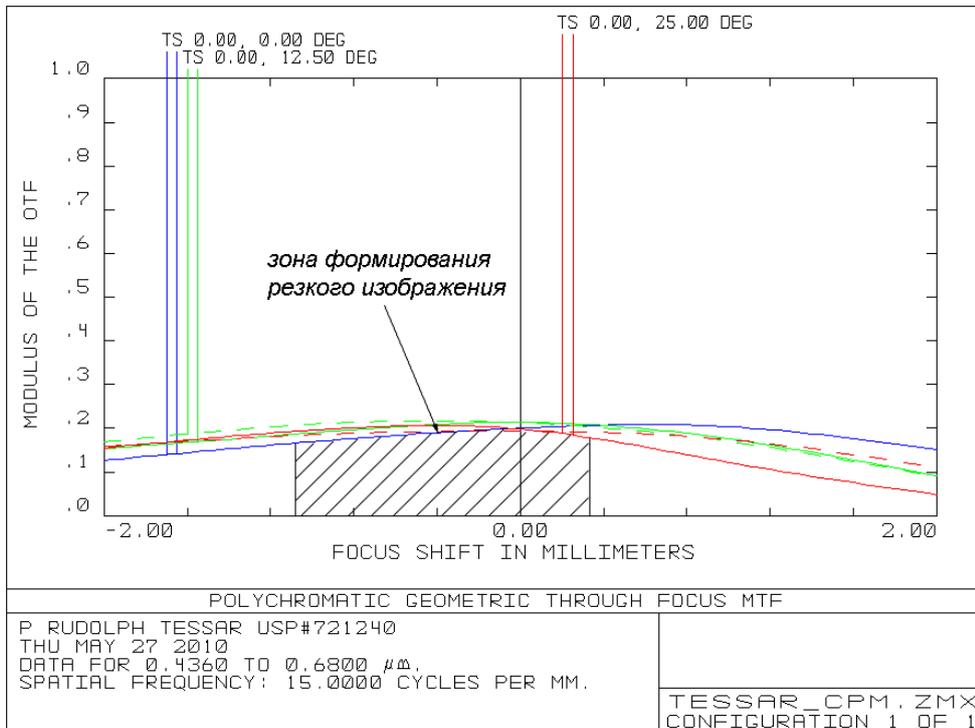


Рис.22 Зависимость передаточной функции пространственной частоты 15 линий/мм в объективе конструкции «Tessar» с кубической фазовой маской

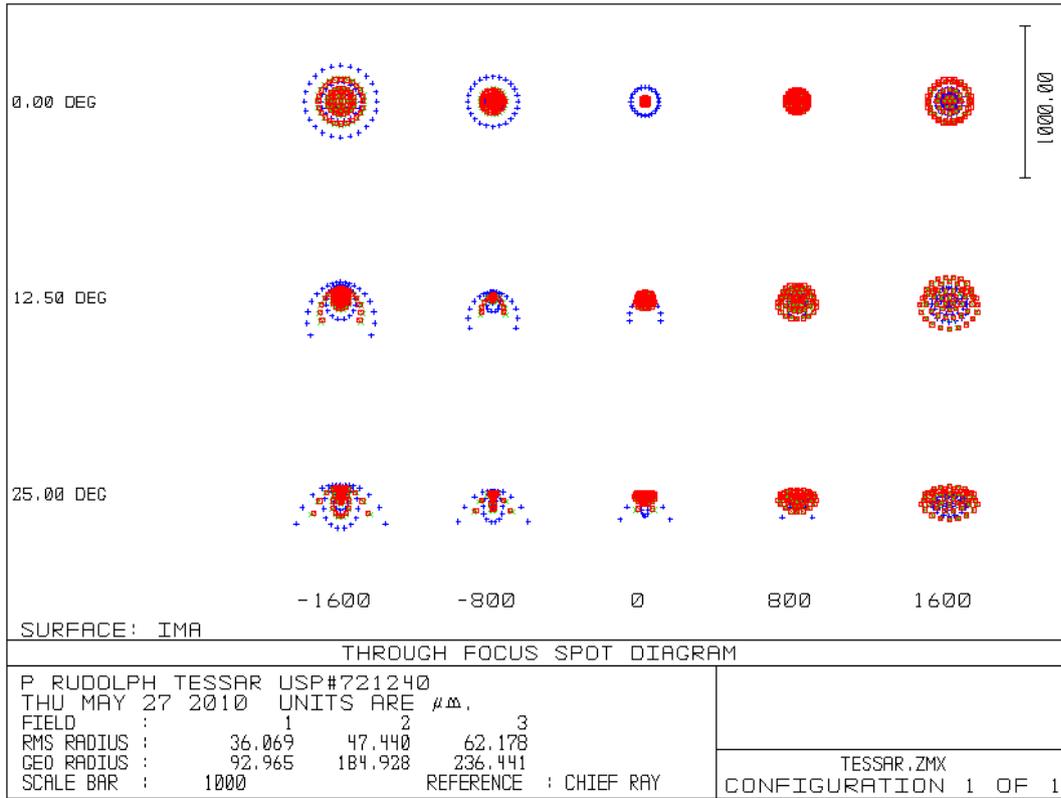


Рис.23 Зависимость пятна размытия в немодифицированном объективе конструкции «Tessar» от величины дефокусировки и положения по полю.

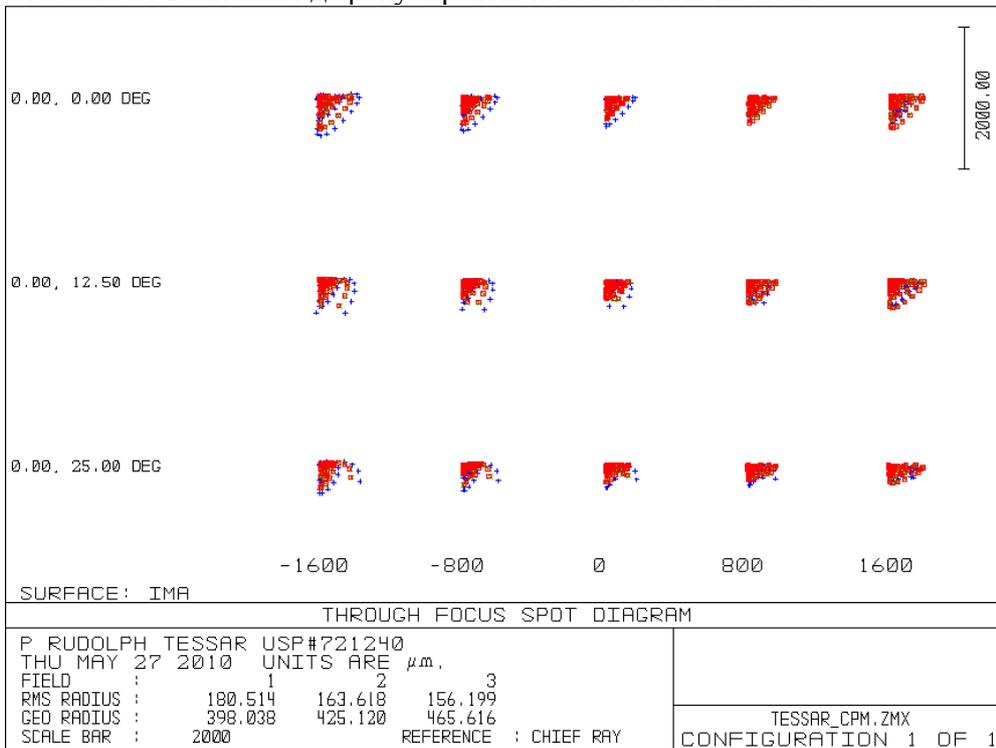


Рис.24 Зависимость пятна размытия в объективе конструкции «Tessar» с кубической фазовой маской от величины дефокусировки и положения по полю