

*На правах рукописи*

ШАТОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ  
СИСТЕМ КРУГОВОГО ОБЗОРА С ДИСКРЕТНЫМ  
ФАСЕТОЧНЫМ УГЛОВЫМ ПОЛЕМ**

Специальность 05.11.07 –

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Москва 2010**

Диссертационная работа выполнена на кафедре оптико-электронных приборов Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Соломатин В.А.**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Можаров Г.А.**  
кандидат технических наук  
**Хаджиева Я.Я.**

**Ведущая организация:** **ОАО Лыткаринский завод  
оптического стекла**

Защита состоится « 2 » декабря 2010 г. в \_10\_ часов на заседании диссертационного совета Д.212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д.4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии (105064, Москва К-64, Гороховский переулок, д.4).

Автореферат разослан « 1 » \_\_ноября\_ 2010г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

**Ю.М. Климков**

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность исследований**

Расширение углового поля оптических и оптико-электронных систем – задача, постоянно находящаяся в центре внимания разработчиков таких систем. Усилия в этом направлении привели к созданию в середине 20-го века высококачественных широкоугольных и сверхширокоугольных объективов с угловым полем, достигающим  $120^\circ$ .

Актуальной по сей день остается задача обзора пространства в полной сфере, полусфере или в сравнительно широкой кольцевой зоне, то есть в пределах азимутального угла  $360^\circ$ . Эта задача возникает применительно к системам видеонаблюдения, обнаружения угроз, целеуказания, слежения, ориентации в пространстве, при контроле полостей и в ряде других случаев.

В последние годы появились сведения о разработках и практическом применении фасеточных панорамных оптико-электронных систем кругового обзора (ФПОЭСКО), отличающихся разнообразием способов технической реализации. Однако, в настоящее время, отсутствует методика расчета ФПОЭСКО, не сформулированы практические рекомендации по их проектированию, не определены возможные технические параметры и характеристики таких систем, чему и посвящена данная диссертация.

### **Цели и задачи исследований**

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности и перспективности создания панорамных оптико-электронных систем кругового обзора с составным (фасеточным) угловым полем с заданными параметрами и

характеристиками. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть принципы построения и области применения панорамных систем кругового обзора различного типа, классифицировать их и определить место фасеточных систем в этой классификации.
2. Разработать теорию преобразования сигналов в ФПОЭСКО.
3. Разработать схемотехнические решения ФПОЭСКО, реализуемые на современном технологическом уровне применительно к задаче обнаружения импульсных целей.
4. Разработать методику расчета ФПОЭСКО.
5. Подтвердить правильность разработанной методики расчета макетированием и проведением экспериментальных исследований макета.

### **Методы исследований**

- программное обеспечение ZEMAX, OSLO, Code V, Solid Works;
- Фурье-анализ;
- теория информации.

### **Научная новизна**

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Сформулирован и описан новый принцип пространственной выборки поля излучения с перекрытием угловых полей каналов фасеточных оптико-электронных систем, позволяющий увеличить пространственное и энергетическое разрешение таких систем.

2. Разработаны алгоритмы суммирования сигналов смежных каналов ФПОЭСКО, позволяющие увеличить эффективную площадь входного зрачка оптических каналов системы.
3. Предложены оригинальные схемотехнические решения ФПОЭСКО, реализующие пространственную выборку с перекрытием угловых полей и алгоритмы суммирования сигналов при выборке.
4. Разработана методика расчета ФПОЭСКО, позволяющая выбрать схемотехнический вариант построения системы и определить ее конструктивные параметры.

### **Практическая ценность работы**

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Методика расчета ФПОЭСКО доведена до практических рекомендаций по проектированию системы.
2. Определены области возможных и допустимых значений входных и выходных параметров ФПОЭСКО, предназначенных для обнаружения импульсных целей.
3. Показана техническая реализуемость разработанной схемы ФПОЭСКО с клиновыми секторными объективами, предназначенной для обнаружения импульсных целей.

### **Личный вклад автора**

Автор принимал непосредственное участие в проведении аналитического обзора панорамных оптико-электронных систем кругового обзора, в разработке математической модели преобразования сигналов в фасеточных системах, в разработке вариантов схем построения фасеточных систем различного типа и

методики расчета таких систем, в проведении анализа экспериментальных данных.

### **Апробация работы**

Основные результаты представлены на трех международных научно-технических конференциях: «Прикладная оптика-2008», «Оптика-2009», «Геодезия, картография и кадастр – XXI век».

### **Публикации**

По теме работы имеется 6 публикаций, из них 1 патент РФ на изобретение, 3 доклада на конференциях, 2 статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений, изложена на 161 странице машинописного текста, содержит 45 рисунков, 14 таблиц.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Фасеточные панорамные оптико-электронные системы кругового обзора с секторными объективами перспективны для решения задач обнаружения и определения углового положения точечных импульсных целей.

2. Разработанный метод описания преобразований сигналов в фасеточных оптико-электронных системах позволяет указать рациональные пути построения таких систем, а именно использование перекрытия угловых полей смежных каналов, включение в конструкцию дополнительного кольца секторов, суммирование отсчетов смежных каналов.

3. Разработанная методика расчета ФПОЭСКО может явиться научно-методической основой для проектирования систем такого типа.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование актуальности темы диссертации, выполнен анализ рассматриваемой в диссертации задачи, сформулированы наиболее важные научные результаты и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** рассмотрены основные принципы построения панорамных оптико-электронных систем. На основе анализа физических принципов построения и конструкторско-технологических особенностей панорамных оптико-электронных систем кругового обзора была составлена классификация таких систем и определены целесообразные направления использования систем определенного типа, их достоинства и недостатки.

Типы панорамных оптико-электронных систем кругового обзора:

- Системы с механическим сканированием,
- Системы с PAL-объективами,
- Системы с объективами типа fish-eye,
- Системы с составным (фасеточным) угловым полем:
  - Микрооптические купольные,
  - Макрооптические с многоэлементными ПИ,
  - Макрооптические с одноэлементными ПИ.

Панорамные системы с дискретным (фасеточным) угловым полем наименее исследованы. Такие системы имеют аналоги в живой

природе в виде фасеточного глаза, присущего некоторым видам насекомых. Фасеточные оптические системы состоят из многочисленных оптических каналов, каждый из которых воспринимает поток излучения в сравнительно узком угловом поле. Оптические оси каналов развернуты по отношению друг к другу на определенный угол и в совокупности перекрывают широкое угловое поле.

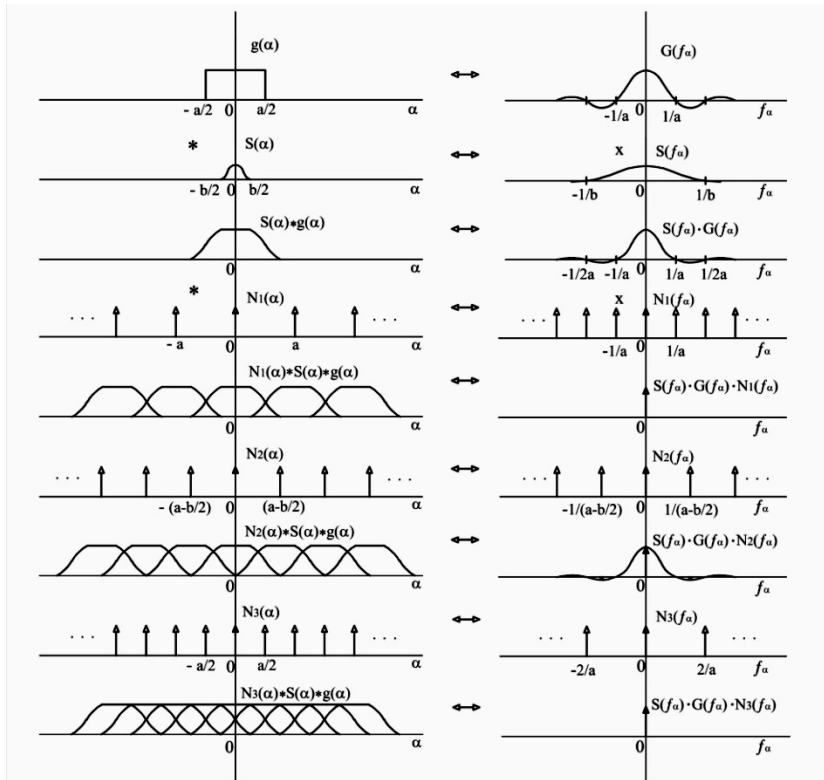
Фасеточные панорамные оптико-электронные системы кругового обзора с дискретным угловым полем при использовании в них одноэлементных приемников излучения представляются перспективными для применения в быстродействующих комплексах, предназначенных для обнаружения импульсных целей, измерения азимутальных координат целей, обнаружения движения и факта подсветки импульсным лазерным излучением.

**Вторая глава** посвящена анализу преобразований сигналов в ФПОЭСКО.

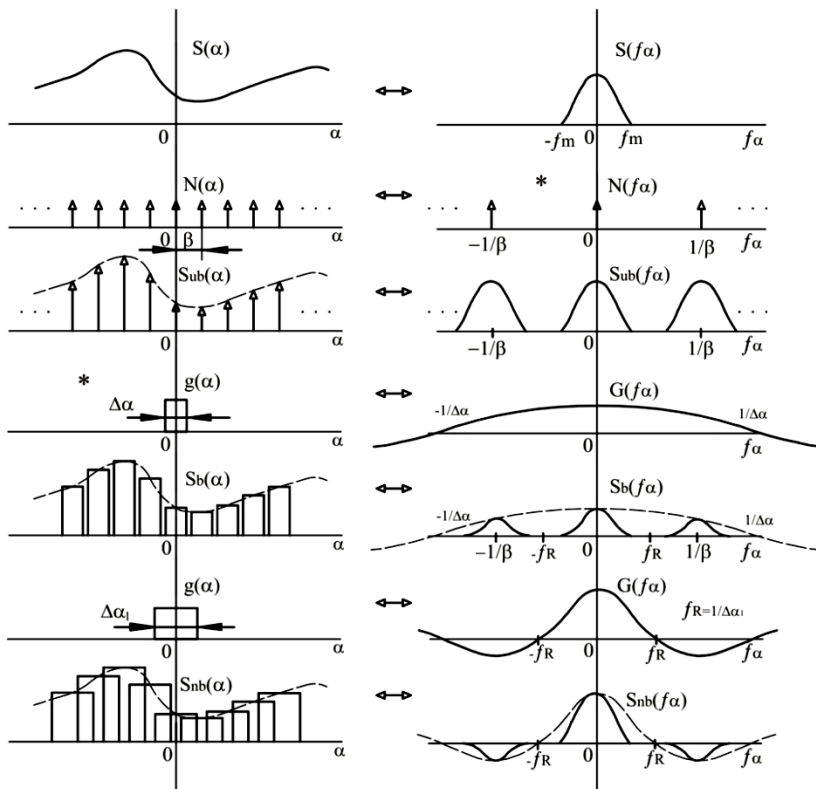
ФПОЭСКО можно разделить на энергетические и информационные системы. К *энергетическим* относятся системы, в которых микроструктура изображения не воспроизводится, например системы обнаружения импульсных целей. Если же структура изображения воспроизводится и анализируется, то такие системы относятся к *информационным* системам. Способы преобразования сигналов и требования к качеству изображения в энергетических и информационных системах различны.

На рисунке 1 представлены преобразования сигналов в энергетических и информационных ФПОЭСКО.





a)



б)

Рисунок 1. Преобразование сигналов а) в энергетических системах, б) в информационных системах

Введены обозначения:  $s(\alpha)$ - импульсная характеристика объектива оптического канала (функция рассеяния точки - ФРТ) ,  $g(\alpha)$  - распределение чувствительности системы в угловом поле канала,  $a$  - размер полевой диафрагмы,  $b$  - размер пятна рассеяния.

Поток излучения, попадающий при текущем значении входного угла  $\alpha$  в угловое поле канала, описывается сверткой  $s(\alpha)*g(\alpha)$ . При прохождении цели через все каналы системы по кругу угловые поля приемных каналов чередуются с периодом  $T_\alpha = a$ , тогда совокупное угловое поле оптической системы описывается сверткой  $s(\alpha)*g(\alpha)$  с решетчатой функцией  $N_1(\alpha)$ , имеющей период  $T_\alpha = a$ .

Анализ преобразований сигналов показывает, что в энергетических системах в случаях, когда перекрытие угловых полей отсутствует ( $T_\alpha = a$ ) и когда величина перекрытия равна половине углового поля ( $T_\alpha = a/2$ ), в спектре сигнала содержится только постоянная составляющая. Это означает, что суммарный сигнал не модулируется при перемещении источника излучения по угловому полю, или сумма отсчетов сигналов от контролируемого источника излучения определяется только значением потока, а не угловой координатой  $\alpha$ . Суммирование сигналов смежных каналов позволяет избежать энергетических потерь. Так, при  $T_\alpha = a$  потери потока отсутствуют, если выборка представляется суммами:

$$(S_1 + S_2), (S_2 + S_3), \dots, (S_{n-1} + S_n), (S_n + S_1)$$

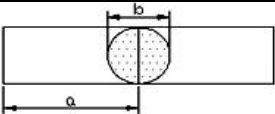
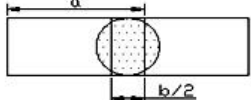
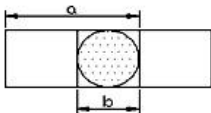
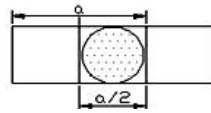
Если выборку представить суммами:

$$(S_1 + S_2 + S_3), (S_2 + S_3 + S_4), \dots, (S_n + S_1 + S_2)$$

то эффективный входной зрачок оптического канала увеличивается вдвое.

Варианты перекрытия угловых полей в энергетических системах представлены в таблице 1.

Таблица 1. Варианты перекрытия полей в энергетических ФПОЭСКО

Вариант	Перекрытие угловых полей	Структура углового поля	Максимальные потери потока
1	0 $T_{\alpha} = a$		50%
2	b/2 $T_{\alpha} = a - \frac{b}{2}$		15-20%
3	b $T_{\alpha} = a - b$		0%
4	a/2 $T_{\alpha} = \frac{a}{2}$		0%

Важной проблемой, возникающей в информационных системах, является редуция частот при наложении соседних боковых полос в спектре сигнала (рисунок 1(б)). Редуция уменьшается при увеличении частоты выборки. При ограничении числа фасеток требуемый (в соответствии с теоремой Котельникова) интервал выборки может оказаться нереализуемым. В этом случае может быть поставлена задача минимизации последствий редуции. Из рисунка 1(б) видно, что возможная редуция будет в области пространственной частоты  $f_R = \frac{1}{2f}$ . Функция  $G(f_{\alpha})$  обращается в нуль

на частоте  $f_R = \frac{1}{\Delta\alpha}$ , где  $\Delta\alpha$  – ширина углового поля фasetки. Если  $f_R = \frac{1}{2\beta} = \frac{1}{\Delta\alpha}$ , то есть  $\Delta\alpha = 2\beta$ , тогда частоты спектра в области редукции подавляются фильтром  $G(f_\alpha)$ . Соотношение  $\Delta\alpha = 2\beta$  означает, что угловые поля смежных каналов должны перекрываться наполовину. Данный вариант дает улучшение пространственного разрешения за счет уменьшения редукции и энергетический выигрыш за счет накопления полезного сигнала.

Далее во второй главе диссертации рассматриваются рациональные варианты построения ФПОЭСКО, реализующие полученные теоретические выводы.

В МИИГАиК на кафедре оптико-электронных приборов была предложена концепция построения макрооптических фасеточных панорамных систем кругового обзора в виде обзорно-панорамной системы с клиновыми секторным объективами (рисунок 2). Оптическая схема системы состоит из множества секторных объективов, пространство объектов делится секторами на  $n$  равных частей, каждая из которых соответствует азимутальному углу  $360^\circ / n$  градусов.

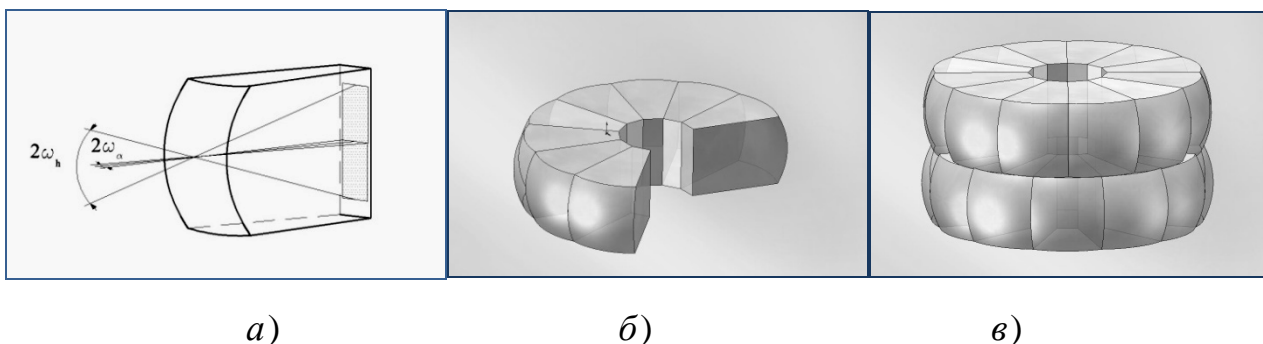


Рисунок 2. а) секторный объектив с приемником излучения, б) схема ФПОЭСКО, в) схема ФПОЭСКО с двумя кольцами объективов

Секторы образуют кольцо, что обеспечивает круговой обзор пространства. Внешняя (входная) поверхность каждого сектора (фасетки) обладает оптической силой, а выходная поверхность (торец) – плоская. Изображение объекта строится в плоскости торца, оптически сопряженного с входным зрачком и совпадающего с чувствительной площадкой приемника излучения. Угловое поле фасетки формируется полевой диафрагмой, расположенной в плоскости изображения. В качестве полевой диафрагмы может быть использована чувствительная поверхность одноэлементного приемника излучения или торец оптоволоконного жгута.

Для систем такого типа существует проблема увеличения площади входного зрачка и требуемого углового разрешения. Решением данной проблемы является использование второго кольца секторов, аналогичного первому, но со смещением секторов на угол  $\alpha/2$ . Наличие второго кольца секторных объективов дает определенную возможность варьировать параметрами системы. Угловые поля можно сузить вдвое при том же перекрытии, что и в варианте с одним кольцом, тогда угловое разрешение вдвое увеличится за счет увеличения общего числа секторов и уменьшения шага дискретизации пространства. Но если вдвое уменьшить число секторов в каждом кольце (общее их число будет таким же, как в системе с одним кольцом при заданном угловом разрешении), то в два раза увеличатся входной зрачок и ширина торца клинового секторного объектива.

Нами также предложена зеркальная схема ФПОЭСКО (рисунок 3). Оптическая схема зеркальной ФПОЭСКО содержит  $N$  приемных оптических каналов, оси которых расположены в азимутальной плоскости через угол  $360^\circ / N$  и состоит из

примыкающих друг к другу внеосевых зеркальных параболоидов, образующих кольцо. В фокальных плоскостях параболоидов установлены приемники излучения. Излучение от цели, расположенной в угловом поле одного из каналов ФПОЭСКО, попадает на зеркальную поверхность параболоида и фокусируется им на приемник излучения соответствующего канала. Как и в ФПОЭСКО с клиновыми секторными объективами, азимутальная координата цели определяется по номеру оптического канала.

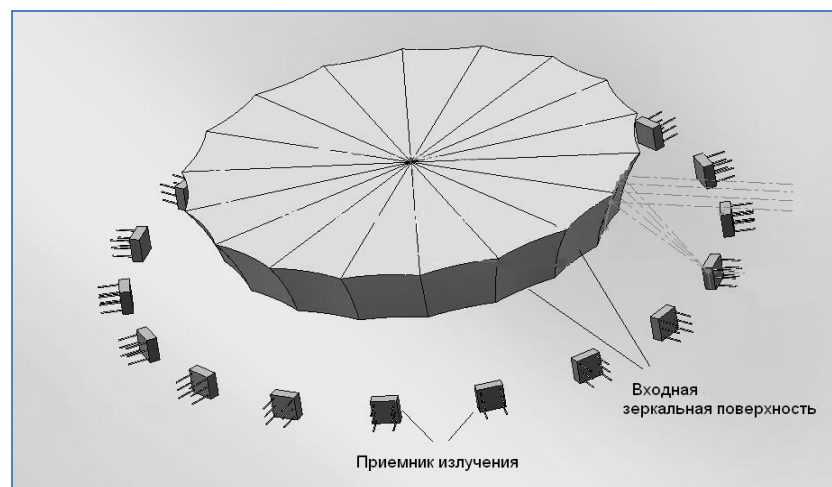


Рисунок 3. ФПОЭСКО с зеркальными компонентами

В **третьей главе** рассмотрена разработанная методика расчета ФПОЭСКО и приведены результаты экспериментальных исследований.

Методика расчета включает в себя следующие этапы:

1) Расчет площади входного зрачка, определение спектрального диапазона работы системы, типа спектральной характеристики приемника излучения, числа секторов (фасеток) в кольце.

2) Выбор ряда марок стекол для требуемого спектрального диапазона.

3) Расчет габаритных параметров ФПОЭСКО, внутреннего и внешнего диаметров кольца секторных объективов.

4) Расчет конструктивных параметров секторной линзы.

5) Выполнение расчета по п. 3) и 4) для выбранных марок стекол и определение марки стекла (оптического материала), при которой радиус первой поверхности объектива будет наибольшим, а габариты системы наименьшими.

6) Аберрационный анализ секторного объектива, на основании которого определяется величина перекрытия угловых полей и целесообразность использования второго кольца секторных объективов.

Площадь входного зрачка может быть вычислена на основании энергетических уравнений, полученных для различных типов ФПОЭСКО. Эти уравнения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Энергетические уравнения для различных типов ФПОЭСКО

Тип ФПОЭСКО	Вид энергетического уравнения
Система обнаружения импульсной точечной цели	$\mu = \frac{2I_{\text{ем}} \tau A_{\text{вх}} \Delta t}{S_{\text{в}}^2 A_{\text{пш}} \Phi_{\text{п}}^2 l^2}$
Информационная система широкого спектрального диапазона	$\Delta L = \frac{\mu \Phi_{\text{п}}^* f^{1/2} \sqrt{\Delta f A_{\text{пш}}}}{A_{\text{вх}} \tau q}$
Информационная система узкого спектрального диапазона при работе в области собственного теплового излучения (пассивный метод работы)	$\left[ \frac{\Delta \varepsilon_{\lambda}}{\varepsilon_{\lambda}} + \frac{C_2}{\lambda T} \left( \frac{\Delta T}{T} \right) \right] L_{\varepsilon \lambda} \tau_{\lambda} \frac{A_{\text{вх}} q}{f^{1/2}} = \mu \Phi_{\text{п}}^* \sqrt{A_{\text{пш}} \Delta f}$
Информационная система узкого спектрального диапазона при работе в области отраженного излучения (активный метод работы)	$\left( \frac{\Delta r_{\lambda}}{r_{\lambda}} \right) L_{\varepsilon \lambda} \tau_{\lambda} \frac{A_{\text{вх}} q}{f^{1/2}} = \mu \Phi_{\text{п}}^* \sqrt{A_{\text{пш}} \Delta f}$

Далее выбирается ряд марок стекол, соответствующих заданному спектральному диапазону.

В соответствии с методикой расчета, после выбора марки стекла необходимо рассчитать значения конструктивных параметров объективов для различных комбинаций входных параметров  $A_{вх}$ ,  $\Delta\alpha$ ,  $N$  при выбранном показателе преломления. Для каждого такого варианта производится абберационный анализ, необходимый для того, чтобы оценить влияние конструктивных параметров на качество изображения, определить целесообразность суммирования сигналов и рассчитать величину перекрытия угловых полей оптических каналов.

В результате абберационного анализа более ста вариантов системы выяснилось, что при различных значениях площади входного зрачка угловой размер пятна по азимуту остается одинаковым для конкретного значения азимутального угла, а отношение углового размера пятна по азимуту к азимутальному углу является величиной постоянной при любых значениях площади входного зрачка и азимутального угла. Расчеты показали, что пятно рассеяния по азимуту всегда занимает определенную часть углового поля, составляющую 19% от его величины. Это обстоятельство представляется весьма важным при разработке конструкции системы.

В диссертационной работе рассмотрен анализ экспериментальных данных, полученных при исследовании макета «Панорама». Макет состоит из 128 секторных линз из стекла К8, радиус первой поверхности 14,2 мм, фокусное расстояние каждой линзы 27,8мм, толщина 41,6мм, внешний диаметр кольца секторов 155мм. В качестве приемника излучения использован кремниевый



фотодиод. Экспериментальные исследования проводились с целью получения данных о распределении чувствительности каналов (фасеток) системы, о величине перекрытия угловых полей фасеток, а также о разбросе чувствительности каналов системы. В результате экспериментальных исследований получены функции распределения чувствительности каналов (апертурные характеристики), приведенные на рисунке 4.

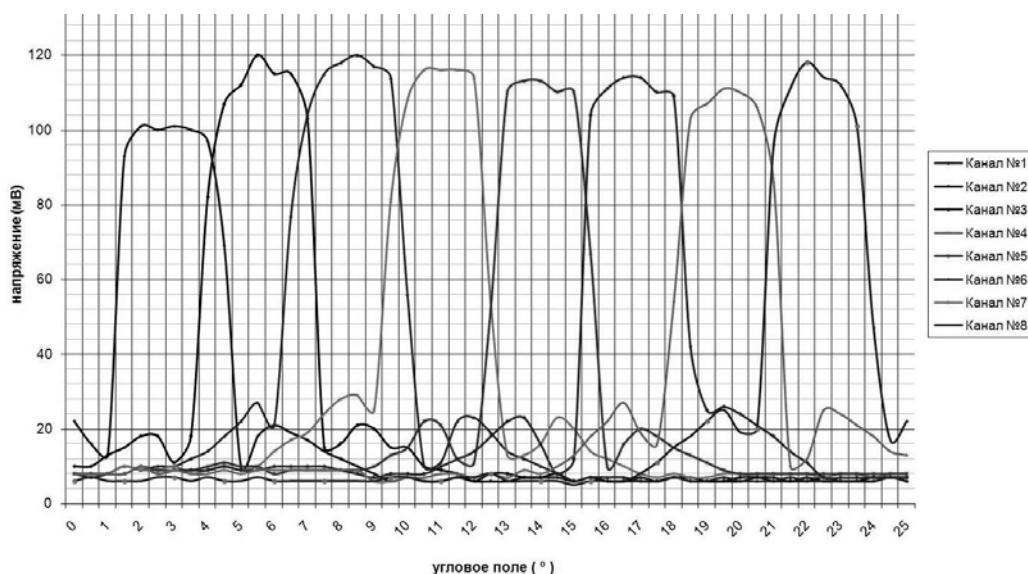


Рисунок 4. Апертурные характеристики каналов системы «Панорама»

Результатом анализа экспериментальных данных стало подтверждение теоретических выводов в отношении преобразований сигналов в фасеточных оптико-электронных системах при сравнении расчетной апертурной характеристики каналов системы с экспериментально полученной.

Апертурная характеристика канала системы определяется сверткой функции  $g(x,y)$ , описывающей распределения чувствительности канала (фасетки) по угловому полю, с импульсной характеристикой  $S(x,y)$  объектива канала (функцией рассеяния точки – ФРТ). Из-за малости угловых полей каналов ФРТ можно считать

постоянной в пределах углового поля, тогда возрастание и спад апертурной характеристики могут быть представлены краевой функцией объектива канала. Это упрощает расчеты, поскольку вычисление краевой функции обеспечивается современными программами расчета оптических систем, а вычисление свертки  $S(x,y)*g(x,y)$  требует дополнительных ресурсов.

Краевая функция секторного объектива макета «Панорама» показана на рис.5.

Параметры апертурной характеристики, полученной экспериментально усреднением апертурных характеристик восьми смежных каналов, приведены в таблице 3.

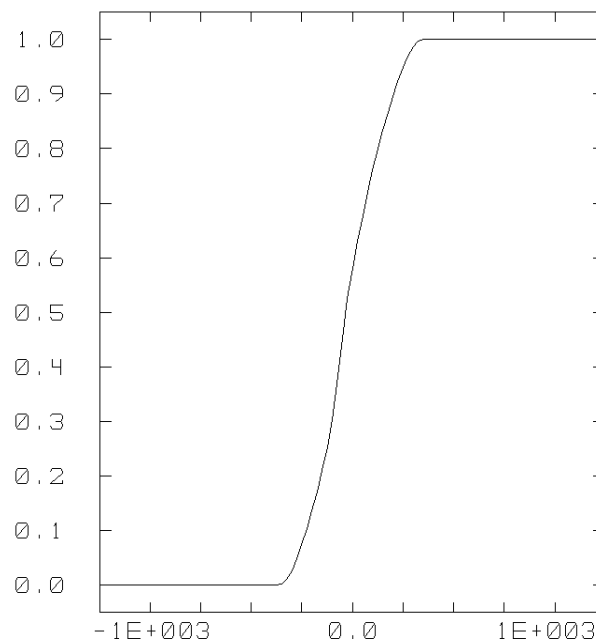


Рисунок 5. Краевая функция фасеточной линзы макета «Панорама»

Таблица 3. Экспериментальные и теоретические значения параметров апертурной характеристики

	Ширина апертурной характеристики по уровню 0,2	Ширина апертурной характеристики по уровню 0,5	Нарастание апертурной характеристики	Спад апертурной характеристики
Экспериментальное значение	4,5°	3,4°	1,1°	0,95°
Теоретическое значение	4,32°	3,4°		1,03°

Расхождение теоретических и экспериментально полученных значений не превышает 3%, что соответствует погрешности измерений.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Фасеточные панорамные оптико-электронные системы кругового обзора перспективны при создании быстродействующих комплексов, предназначенных для обнаружения импульсных целей, измерения азимутальных координат целей, обнаружения подсветки лазерным излучением.

2. В фасеточных оптико-электронных системах возможна реализация пространственной выборки сигнала с перекрытием отсчетов. Такая выборка позволяет повысить эффективность фильтрации сигнала, улучшить энергетическое и пространственное разрешение системы.

3. Предложенные схемотехнические решения фасеточных панорамных оптико-электронных систем кругового обзора позволяют реализовать выборку с пространственным перекрытием отсчетов при одновременном использовании алгоритмов суммирования сигналов, что увеличивает эффективную площадь входного зрачка фасетки и пространственное разрешение системы.

4. Полученные энергетические уравнения фасеточных оптико-электронных систем позволяют определить условия, обеспечивающие работоспособность системы в соответствии с заданными энергетическими критериями.

5. Разработанная методика расчета фасеточных панорамных оптико-электронных систем может быть полезна для анализа исходных данных, определения возможности создания ФПОЭСКО с заданными параметрами, позволяет рассчитать рациональные конструктивные параметры таких систем.

6. Теоретические выводы, полученные в диссертации, и методика расчета ФПОЭСКО экспериментально подтверждены, предлагаемые схемотехнические решения конструктивно реализуемы. Результаты диссертации могут быть использованы при выполнении опытно-конструкторских работ по созданию макрооптических ФПОЭСКО.

## **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Соломатин В.А., Шатова Е.А., Методика расчета секторного объектива. //Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка».– 2008, №5.- С. 63-65.

2. Соломатин В.А., Шатова Е.А., Объективы с пространственной дискретизацией поля обзора //Сборник докладов международного оптического конгресса «Оптика XXI век».- 2008.-С. 41-45.
3. Устройство для обнаружения и измерения азимутальных координат светоизлучающих объектов. Патент RU №2384820,GO1C 3/08,публ. 20.03.2010/Соломатин В.А., Шатова Е.А.
4. Шатова Е.А., Требования к качеству изображения в фасеточных оптико-электронных системах обнаружения точечных объектов.// Изв. вузов. «Геодезия и аэрофотосъемка». – 2010, №3.- С. 86-91.
5. Соломатин В.А., Шатова Е.А., О возможностях совершенствования панорамных секторных объективов. //Сборник докладов международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика 2009».-2009.-С.313-314.
6. Соломатин В.А., Шатова Е.А., Влияние конструктивных параметров оптической системы с составным угловым полем на качество изображения. //Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Геодезия, картография и кадастр – XXI век», посвященной 230-летию основания МИИГАиК.-2009.-С.246.