НА РУКИ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

На правах рукописи

СЕВРЮГИН Александр Сергеевич

МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОГО УВЕЛИЧЕНИЯ

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

МОСКВА 2005

Работа выполнена на кафедре "Лазерные и оптико-электронные системы" Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Пахомов И.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бездидько С.Н.,
кандидат технических наук, доцент
Поспехов В.Г.

Ведущая организация: **ОАО "НПО "Алмаз" им. А.А. Расплетина**

Защита состоится 2 марта 2005 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу:

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан 28 января 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор Власов И.Б.

Сл. в конце

735

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время лазерные системы переменного увеличения (ЛСПУ) находят применение в таких областях, как лазерная технология, лазерная локация и дальнометрия, оптические исследования и измерения, создание систем технического зрения и оптических систем записи и хранения информации. Особый интерес представляют лазерные панкратические системы, осуществляющие непрерывное изменение оптических параметров в заданном диапазоне. Эти системы наиболее универсальны, поскольку каждая из них позволяет получить параметры, свойственные в отдельности целому набору различных оптических систем.

Расширение области применения ЛСПУ, повышение требований к качеству и характеристикам таких систем, а также разработка систем нового типа часто не позволяет применять для их расчета уже существующие или узкоспециализированные методы. Следовательно, разработка методов расчета ЛСПУ представляется весьма актуальной.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методов расчета ЛСПУ, осуществление программной реализации предложенных методов и их практическое применение при расчете ЛСПУ.

Задачи исследования

1. Провести анализ преобразования лазерного пучка ЛСПУ при произвольных законах перемещения компонентов оптической системы.
2. Рассмотреть особенности ЛСПУ с оптической компенсаций (с линейными законами перемещения компонентов).
3. Получить систему уравнений, связывающую неизвестные параметры ЛСПУ с оптической компенсацией, с параметрами, задаваемыми разработчиком.
4. Провести анализ семейства оптических схем ЛСПУ с оптической компенсацией, являющихся решениями исходной системы, и разработать критерии отбора решений.
5. Рассмотреть возможность перехода от рассчитанной ЛСПУ к ЛСПУ с механической компенсацией (с нелинейными законами перемещения компонентов).
6. С использованием пп. 1-5 разработать методы и алгоритмы расчета ЛСПУ.
7. Провести анализ формирования распределения интенсивности излучения в выходном сечении лазерного пучка, формируемого ЛСПУ с учетом дифракции и аберраций.
8. Разработать количественные критерии оценки величины искажений лазерного пучка

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1708742
Севрюгин А.С. Методы расче

9. Разработать и осуществить компьютерную реализацию предложенных методов и провести экспериментальное исследование возможностей их практического применения при расчете ЛСПУ.

Методы исследования

1. Методы расчета пространственной структуры лазерных пучков в параксиальном приближении (метод сопряженных плоскостей, матричный метод, метод двух лучей)
2. Элементы теории многочленов, общие итерационные и специальные численные методы решения алгебраических уравнений (метод Лагерра, метод Лобачевского)
3. Аналитические и численные методы теории аберраций с использованием алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ) и применением аппарата ортогональных многочленов Цернике
4. Методы скалярной дифракционной теории формирования изображений в оптических системах при когерентном и некогерентном освещении

Научная новизна диссертации

1. Показано, что задача расчета параметров ЛСПУ с оптической компенсацией может быть сведена к решению системы нелинейных уравнений нескольких переменных, полученных с использованием метода сопряженных плоскостей. В свою очередь, решение указанной системы приводит к нахождению корней единственного алгебраического уравнения одной переменной V-ой или VIII-й степени, соответственно для ЛСПУ первого и второго вида из рассмотренных в данной диссертации. При решении указанных уравнений могут применяться общие итерационные и специальные численные методы. Каждый из корней этих уравнений соответствует одному из вариантов оптической схемы рассчитываемой ЛСПУ.
2. Предложен эффективный алгоритм расчета амплитудной и фазовой части аберрационной функции зрачка с использованием многочленов Цернике и специальной сетки узлов на каноническом зрачке.
3. На основе скалярной теории дифракции разработан алгоритм расчета двумерного распределения интенсивности излучения в выходном опорном сечении лазерного пучка, формируемого ЛСПУ, с учетом свойств лазерных пучков.
4. Предложены количественные критерии оценки качества ЛСПУ на основании аберрационных характеристик ЛСПУ и с учетом искажений лазерного пучка в выходном опорном сечении.
5. Разработана методика компьютерного моделирования ЛСПУ различного вида, охватывающая системы с оптической и механической компенсацией.

Практическая ценность

1. Разработаны методы расчета ЛСПУ, позволяющих реализовать большие перепады увеличений в компактных оптических схемах, при этом важной особенностью указанных методов является возможность рассчитывать большое число вариантов схем ЛСПУ в широкой области решений, что в дальнейшем позволяет выбирать наиболее компактные схемы ЛСПУ на основании ряда критериев, предложенных в данной диссертации.
2. Компьютерная реализация предложенных методов расчета, осуществленная в рамках данной диссертации, позволяет с использованием стандартных персональных компьютеров проводить быстрый и эффективный анализ различных вариантов схем ЛСПУ при произвольных законах перемещения компонентов, что позволяет значительно сократить время расчета указанных систем.
3. Показано, для ЛСПУ при наличии достаточных данных об используемом лазерном источнике нет необходимости использовать нелинейные законы перемещения компонентов ЛСПУ для компенсации смещения выходной опорной плоскости, что упрощает кинематику системы.
4. Разработанные алгоритмы визуализации преобразования лазерного пучка оптической системой облегчают контроль результатов расчета и выбор итогового варианта оптической схемы ЛСПУ.
5. Предложенные методы расчета ЛСПУ также могут использоваться при расчете классических оптических систем переменного увеличения с оптической и механической компенсацией.

Численные результаты и их достоверность

На основании предложенных методов расчета ЛСПУ разработана методика компьютерного моделирования ЛСПУ и соответствующая программная реализация, с использованием которой получены представленные в диссертации численные значения параметров и характеристик ЛСПУ. Для проверки полученных результатов использовались широко известные пакеты оптических программ анализа и оптимизации Zemax 9.1. ® (Focus Software, Inc) и Synopsis ® (Optical System Design, Inc). Достоверность результатов расчета следует из совпадения параксиальных и аберрационных характеристик оптических систем, рассчитанных с использованием разработанной программной реализации и с использованием указанных программ.

Внедрение результатов диссертационной работы

Разработанные соискателем методы расчета ЛСПУ использованы в ОКБ “Булат”, а также внедрены в учебный процесс кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждается соответствующими актами.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы представлялись на 51-ой Международной научно-технической конференции МИРЭА "Информационно-распознающие оптико-электронные системы" (Москва, 2001 г).

Публикации

По теме диссертации опубликованы работы [1-3].

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка из 63 наименований, содержит 202 страницы машинописного текста, 42 рисунка, 4 таблицы и 16 листов приложений.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. При расчете ЛСПУ определяющим является наличие информации о лазерном источнике, используемом совместно с рассчитываемой ЛСПУ. Неполнота информации приводит к неоправданному усложнению оптической схемы ЛСПУ.
2. Для ЛСПУ в силу особенностей лазерных пучков нет необходимости введения нелинейных законов перемещения компонентов для полной компенсации смещения выходной опорной плоскости формируемого лазерного пучка. При наличии информации о лазерном источнике полной неподвижности выходного опорного сечения можно добиться реверсированием рассчитанной исходной ЛСПУ с линейными законами перемещения компонентов.
3. Достоинством предложенных методов расчета ЛСПУ является большое число решений (вариантов оптических схем ЛСПУ), отвечающих заданному набору исходных данных (до 80-ти для первого метода и до 12-ти для второго метода), что позволяет повысить эффективность расчета за счет расширения области анализа и наличия решений, соответствующих компактным схемам ЛСПУ.
4. Предложенные критерии отбора оптических схем ЛСПУ облегчают выбор окончательного варианта оптической схемы рассчитанной ЛСПУ.
5. Переход от ЛСПУ с оптической компенсацией к ЛСПУ с механической компенсацией осуществляется введением нелинейного закона перемещения второго компонента ЛСПУ без соответствующего пересчета параметров ЛСПУ.
6. Оценка качества ЛСПУ может проводиться с использованием сформулированных критериев на основании аберрационных характеристик ЛСПУ и энергетических характеристик лазерного пятна, формируемого в выходном опорном сечении.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, изложены задачи и методы исследования. Приведен краткий обзор содержания глав диссертационной работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена анализу литературных источников по системам переменного увеличения и методам их расчета. Рассмотрены особенности оптических систем для изменения параметров лазерных пучков, предложена классификация ЛСПУ. Приведены исходные формулы для расчета преобразования лазерного пучка оптической системой, а также кратко описаны методы, которые могут быть использованы для проверки правильности результатов расчета.

Вопросы расчета оптических систем переменного увеличения нашли отражение в ряде работ Д. С. Волосова (1948), М. С. Стефанского (1962), монографии И. И. Пахомова (1976), а также в работах зарубежных авторов - Хопкинса (1951), Бергштейна (1958) и Кларка (1973). Кроме этого, вопросы расчета оптических схем лазерных приборов рассматривались в монографии Ю. М. Климкова (1985), а также И. И. Пахомовым и А. Б. Цыбулей (1986). Показано, что существующие методы расчета могут быть разделены на несколько групп с учетом их особенностей, кратко описаны основные положения, положенные в основу этих методов.

Очевидно, что ЛСПУ имеют много общего с оптическими системами переменного увеличения, но в то же время характерные особенности ЛСПУ обусловлены свойствами лазерного излучения - высокой когерентностью, монохроматичностью и направленностью. Волновой фронт лазерного пучка, с учетом некоторых допущений представляющий поверхность параболоида вращения, не является ни плоской, ни сферической волной, что не позволяет использовать при расчете преобразования такого пучка оптической системой формулы классической оптики, справедливые для параллельных и гомоцентрических пучков.

Приведенная в первой главе классификация ЛСПУ позволяет разделить эти системы по ряду характерных свойств (тип компонентов, число компонентов), а также виду решаемых задач (фокусировка, передача лазерного излучения). Основное внимание в данной работе уделено линзовым трехкомпонентным панкратическим ЛСПУ.

При расчете ЛСПУ в качестве основного взят метод сопряженных плоскостей. Кроме этого, в первой главе для оценки правильности результатов расчета, полученных согласно методу сопряженных плоскостей, предложено использовать два варианта проверки. В первом варианте для проверки использовался метод, являющийся комбинацией матричного метода и метода двух лучей. Согласно второму варианту, расчет комплексного параметра кривизны, введенного Когельником, с использованием матричного метода и правила ABCD позволяет определить параметры пучка, формируемого ЛСПУ.

Также в первой главе приведены примеры схем оптических систем переменного увеличения для изменения параметров лазерных пучков, используемых для решения различных задач.

Отмечено, что при расчете ЛСПУ определяющим фактором является полнота информации о лазерном источнике, используемом совместно с рассчитываемой ЛСПУ, или информации о параметрах исходного лазерного пучка, формируемого этим источником. Отсутствие необходимой информации приводит к неоправданному усложнению оптической схемы ЛСПУ.

Вторая глава посвящена описанию методов расчета ЛСПУ, позволяющих рассчитать параметры компонентов ЛСПУ, а также законы их перемещения как для систем с оптической, так и для систем с механической компенсацией.

В данной диссертации предложены два метода расчета оптических схем ЛСПУ. Эти методы применимы для расчета ЛСПУ двух видов: осуществляющих перемещение выходной опорной плоскости в заданном диапазоне относительно ее начального положения при сохранении постоянным линейного увеличения ЛСПУ, и обеспечивающих изменение линейного увеличения ЛСПУ между входным и неподвижным выходным опорными сечениями лазерного пучка.

В основу предложенных методов положены формулы, описывающие зависимости линейного увеличения β и величины смещения выходной опорной плоскости Δ от перемещения компонентов системы. Для трехкомпонентной ЛСПУ указанные зависимости имеют вид

$$\beta(s_1,s_2,s_3)=\frac{f1\cdot f2\cdot f3}{f1^2(d2-s_2+s_3)-(Z_0-s_1)(f2^2-(d1-s_1+s_2)(d2-s_2+s_3))},\quad (1)$$
$$\Delta(s_1,s_2,s_3)=Z'(s_1,s_2,s_3)-Z'_0+s_3$$

где Z_0 - расстояние от переднего фокуса первого компонента до входной опорной плоскости (в начальном положении компонентов системы), f1, f2 и f3 - соответственно заднее фокусное расстояние первого, второго и третьего компонентов, d1 и d2 - соответственно расстояние между задним фокусом первого компонента и передним фокусом второго компонента и расстояние между задним фокусом второго и передним фокусом третьего компонента, Z'_0 - расстояние от заднего фокуса третьего компонента до выходной опорной плоскости (в начальном положении компонентов системы), s_1, s_2 и s_3 - соответственно величина смещения первого, второго и третьего компонентов относительно начального положения, $Z'(s_1,s_2,s_3)$ - расстояние от заднего фокуса третьего компонента до выходной опорной плоскости при смещении компонентов на величину s_1, s_2 и s_3, определяемое по формуле

$$Z'(s_1,s_2,s_3)=\frac{f3^2\cdot((d1-s_1+s_2)\cdot(Z_0-s_1)+f1^2)}{f1^2(d2-s_2+s_3)-(Z_0-s_1)(f2^2-(d1-s_1+s_2)(d2-s_2+s_3))}.\quad (2)$$

Зависимости (1), (2) имеют нелинейный характер. Следовательно, в общем случае для обеспечения условия $\Delta \equiv 0$ (неподвижность выходной опорной плоскости) или $\beta \equiv \beta 0$ (неизменность линейного увеличения ЛСПУ, равного номинальному $\beta 0$) необходимо перемещать один или несколько компонентов по нелинейному закону. Однако эти условия можно выполнить и с помощью ЛСПУ с линейными законами перемещения компонентов (ЛСПУ с оптической компенсацией), что упрощает кинематику системы.

Для ЛСПУ с оптической компенсацией смещения компонентов равны:

$$s_1 = i1 \cdot m, s_2 = i2 \cdot m, s_3 = i3 \cdot m, \tag{3}$$

где i1, i2 и i3 - передаточные коэффициенты, $m_1 \le m \le m_2$ - переменный параметр, характеризующий величину смещения компонентов ЛСПУ.

Тогда формулы (1), (2) принимают вид зависимостей от параметра m:

$$\beta(m) = \frac{C}{B_3(m)} = \frac{C}{\sum\limits_{i=0}^{3} b_i m^i}, \quad \Delta(m) = \frac{D_4(m)}{B_3(m)} = \frac{\sum\limits_{i=0}^{4} d_i m^i}{\sum\limits_{i=0}^{3} b_i m^i}, \tag{4}$$

где $C = f1 \cdot f2 \cdot f3$, а коэффициенты $\{b_0 \ldots b_3\}$ и $\{d_0 \ldots d_4\}$ зависят от i1, i2, i3, f1, f2, f3, d1, d2, Z_0 и Z'_0:

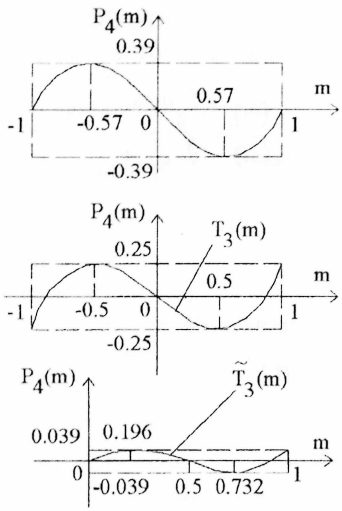
$$\begin{gathered}
\alpha = i3 - i2, \quad \beta = i2 - i1, \\
b_0 = f1^2 d2 - Z_0 (f2^2 - d1 \cdot d2), \\
b_1 = f1 \cdot \alpha + Z_0 (d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta) + i1(f2^2 - d1 \cdot d2), \\
b_2 = Z_0 \cdot \alpha \cdot \beta - i1(d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta), \\
b_3 = -i1 \cdot \alpha \cdot \beta,
\end{gathered} \tag{5}$$

$$\begin{gathered}
d_0 = f3^2 (d1 \cdot Z_0 + f1^2) - Z'_0 (f1^2 d2 - Z_0 (f2^2 - d1 \cdot d2)), \\
d_1 = f3^2 (\beta Z_0 - d1 \cdot i1) - Z'_0 (f1^2 \alpha + Z_0 (d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta) + i1(f2^2 - d1 \cdot d2)) + \\
+ i3(f1^2 d2 - Z_0 (f2^2 - d1 \cdot d2)), \\
d_2 = -i1 \cdot \beta \cdot f3^2 - Z'_0 (\alpha\beta Z_0 - i3(d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta)) + \\
+ i3(f1^2 \alpha + Z_0 (d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta) + i1(f2^2 - d1 \cdot d2)), \\
d_3 = \alpha \cdot \beta \cdot i1 \cdot Z'_0 + i3(\alpha \cdot \beta \cdot Z_0 - i3(d1 \cdot \alpha + d2 \cdot \beta)), \\
d_4 = -\alpha \cdot \beta \cdot i1 \cdot i3
\end{gathered} \tag{6}$$

Знаменатель первой и числитель второй из формул (4) являются многочленами соответственно III-ей и IV-ой степени относительно переменной m. Следовательно, можно потребовать, чтобы смещение выходной опорной плоскости Δ равнялось нулю не более чем в четырех точках ($m = x_1$, $m = x_2$, $m = x_3$ и $m = x_4$), являющимися корнями многочлена $D_4(m)$, или линейное увеличение ЛСПУ β равнялось номинальному $\beta 0$ не более чем

в трех точках ($m=x_1$, $m=x_2$ и $m=x_3$), являющимися корнями многочлена $B_3(m)$. В остальных точках характеристики ЛСПУ (положение плоскости изображения или линейное увеличение) отличаются от исходных при $m=0$.

Задавая точки x_i, можно рассчитать коэффициенты многочлена, обеспечивающего выполнение условия неподвижности выходного опорной плоскости или неизменности линейного увеличения (компенсационного многочлена), примеры которых представлены на рис. 1. Очевидно, что оптимальной является компенсация многочленом Чебышева, наименее отклоняющегося от нуля на заданном интервале.



Трехточечная компенсация:
$p_4=0,\ p_3=1,\ p_2=0,\ p_1=1,\ p_0=0$

Симметричный нормированный многочлен Чебышева:
$p_4=0,\ p_3=1,\ p_2=0,\ p_1=-0.75,\ p_0=0$

Смещенный нормированный многочлен Чебышева:
$p_4=0,\ p_3=1,\ p_2=-1.3943,\ p_1=0.4308,\ p_0=0$

Рис. 1. Примеры многочленов, используемых для компенсации

Подставив рассчитанные коэффициенты $\{d_0^* \ldots d_4^*\}$ компенсационного многочлена в левую часть уравнений (6), и дополнив ее условием получения заданного перепада увеличений $M=\beta(m_2)/\beta(m_1)$, получаем систему из шести нелинейных уравнений. В данной работе показано, что при известных i1, i3, Z_0, Z'_0, M и рассчитанных $\{d_0^* \ldots d_4^*\}$ решение данной системы сводится к нахождению корней единственного алгебраического уравнения V-ой степени, позволяющего рассчитать неизвестные параметры ЛСПУ - i2, d1, d2, f1, f2 и f3.

Компенсация отклонения линейного увеличения осуществляется аналогично: рассчитываются коэффициенты $\{b_0^* \ldots b_3^*\}$ компенсационного многочлена в левой части уравнений (5), задается величина номинального линейного увеличения $\beta 0$ и величина смещения выходной опорной

плоскости $L=\Delta(m_2)-\Delta(m_1)$. Полученная система из пяти нелинейных уравнений сводится к алгебраическому уравнению VIII-ой степени, решение которой при известных i1, i3, Z_0, β0, L и d1 позволяет определить неизвестные параметры ЛСПУ - i2, d2, f1, f2 и f3.

Семейство оптических схем ЛСПУ, являющееся решением этих систем уравнений, принадлежит к системам с оптической компенсацией. Для полной компенсации отклонения во всем диапазоне перемещения компонентов ЛСПУ возможно введение нелинейной траектории перемещения центрального компонента, то есть переход к ЛСПУ с механической компенсацией

Однако в данной работе показано, что важной особенностью ЛСПУ является возможность обеспечить неподвижность выходной опорной плоскости, не применяя механической компенсации, усложняющей кинематику ЛСПУ. Поскольку в рассчитанной ЛСПУ с оптической компенсацией входная опорная плоскость неподвижна, а выходная опорная плоскость перемещается, то в реверсированной (обращенной) ЛСПУ с теми же параметрами входная опорная плоскость ОП1 будет перемещаться, а оптически сопряженная выходная опорная плоскость ОП2 будет неподвижна (рис. 2). Так как радиус лазерного пучка во входном опорном сечении ОП1 изменяется, то перепад увеличений, реализуемый обращенной ЛСПУ, зависит не только от параметров исходной системы, но и от параметров входящего в обращенную ЛСПУ лазерного пучка и расстояния ΔW от его сечения перетяжки $СП_{вх}$ до входной опорной плоскости ОП1.

Ясно, что использование реверсирования ЛСПУ для обеспечения неподвижности выходной опорной плоскости возможно только при известных параметрах лазерного пучка на входе в систему.

Достоинством разработанных методов является большое число решений - схем ЛСПУ, удовлетворяющих набору исходных данных. С целью облегчения выбора окончательного варианта ЛСПУ проведен анализ семейства решений и сформулированы критерии отбора решений:

1) практическая реализуемость ЛСПУ: отбор систем с учетом минимально допустимого расстояния между совмещенными главными плоскостями соседних компонентов.

2) отбор систем с учетом соотношений между фокусным расстоянием k-го компонента, его световым диаметром и размером лазерного пучка на нем, обеспечивающее приемлемый уровень искажений лазерного пучка из-за дифракции на конечной апертуре компонента: $(D_{max}/f)_k \geq k_{min} \cdot K_{min}$, где k_{min} - отношение светового диаметра к максимальному диаметру лазерного пучка на k-том компоненте, K_{min} - минимальная величина относительного отверстия k-го компонента. Согласно исследованиям, проведенным в данной диссертации, величину k_{min} и K_{min} можно принять равной 2.

3) отсутствие промежуточной фокусировки лазерного пучка: фокусные расстояния компонентов ЛСПУ, по возможности, должны быть таковы,

чтобы сечения перетяжки располагались вне оптической системы.

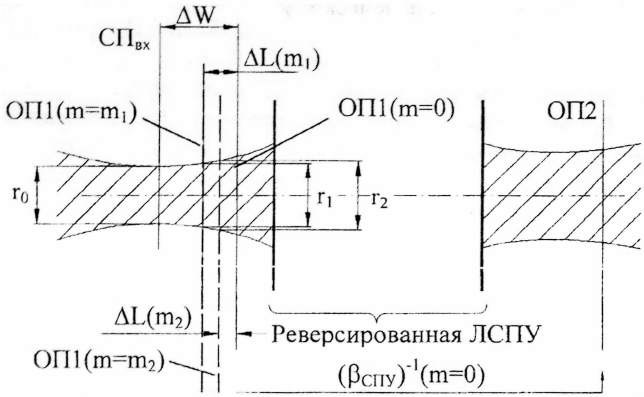


Рис. 2. Иллюстрация к обеспечению полной неподвижности выходной опорной плоскости ОП2 в реверсированной ЛСПУ с оптической компенсацией

В заключение во второй главе описан переход от системы с тонкими линзовыми компонентами к ЛСПУ конечной толщины для дальнейшего анализа ее характеристик и оценки искажений, вносимых в формируемый лазерный пучок.

Третья глава диссертационной работы посвящена оценке возможностей предложенных ранее методов расчета с учетом качества ЛСПУ, в ней предлагаются количественные критерии оценки величины искажений лазерного пучка, формируемого ЛСПУ, приводятся примеры расчета ЛСПУ.

Для лазерных систем качество системы определяется величиной искажений, вносимых оптической системой в формируемый лазерный пучок, которую естественно оценивать с помощью двумерной картины распределения интенсивности в выходном опорном сечении пучка.

Для анализа влияния дифракции и остаточных аберраций на искажения лазерного пучка в выходном опорном сечении рассмотрен процесс формирования изображения ЛСПУ (под изображением понималось распределение интенсивности излучения в выходном опорном сечении). Например, для пространственно-инвариантной некогерентной оптической системы процесс формирования изображения в канонических частотах (Nx,Ny) записывается в виде

$$\tilde{I}_{ВЫХ}(Nx, Ny) = \tilde{I}_{ВХ}(Nx, Ny) \cdot \tilde{H}(Nx, Ny), \qquad (7)$$

где $I_{вх}(X,Y)$ - двумерное распределение интенсивности во входной опорной плоскости, $\tilde{I}_{ВХ}(Nx, Ny) = F\{I_{ВХ}(X, Y)\}$ - ПЧС во входной опорной плоскости в

виде распределения интенсивности, $\tilde{H}(Nx, Ny)$ - оптическая передаточная функция системы, $\tilde{I}_{вых}(Nx, Ny)$ - ПЧС в выходной опорной плоскости в виде распределения интенсивности, символом F обозначен оператор двумерного преобразования Фурье.

Оптическая передаточная функция $\tilde{H}(Nx, Ny)$ связана с аберрационной функцией зрачка $P(\xi,\eta)$ оптической системы, которая имеет вид:

$$P(\xi,\eta) = \begin{cases} T^{1/2}(\xi,\eta)\exp(-2\pi j W(\xi,\eta)) & \forall(\xi,\eta) \in A \\ 0 \quad \forall(\xi,\eta) \notin A \end{cases},$$

где (ξ,η) - канонические зрачковые координаты, A - область зрачка, $T^{1/2}(\xi,\eta)$ - функция, описывающая зависимость амплитудного коэффициента пропускания зрачка от зрачковых координат (амплитудная часть функции зрачка), $W(\xi,\eta)$ – функция, описывающая зависимость волновой аберрации оптической системы от зрачковых координат (фазовая часть функции зрачка).

Таким образом, для расчета распределения интенсивности $I_{вых}(X,Y)$ в выходной опорной плоскости необходимо рассчитать ПЧС $\tilde{I}_{вх}(Nx, Ny)$ во входной опорной плоскости и определить вид функции зрачка $P(\xi,\eta)$.

В данной диссертации для аппроксимации амплитудной и фазовой части функции зрачка использован базис полиномов Цернике.

Для обеспечения лучшей обусловленности конструкционной матрицы, используемой при аппроксимации, предложено использовать специальную сетку узлов на каноническом зрачке, используемую при трассировке опорных лучей, представленную на рис. 3в. Кроме этого, разработан эффективный алгоритм вычисления многочленов Цернике с использованием свойств симметрии.

При известных коэффициентах аппроксимации для амплитудной и фазовой части функции зрачка $P(\xi,\eta)$ оптическая передаточная функция $\tilde{H}(Nx, Ny)$ может быть найдена согласно

$$\tilde{H}(Nx, Ny) = F\{H(X, Y)\},\ H(X, Y) = \left|F^{-1}\{P(\xi,\eta)\}\right|^2, \tag{8}$$

где $H(X,Y)$ – оптическая функция рассеяния.

В данной работе при расчете по формулам (7), (8) применяется алгоритм быстрого двумерного преобразования Фурье (БПФ) с формированием выборок отчетов функции $\tilde{I}_{вх}(Nx, Ny)$ и оптической передаточной функции $\tilde{H}(Nx, Ny)$ в канонических частотах (Nx,Ny).

Величину искажений лазерного пучка естественно оценивать путем сравнения параметров распределения интенсивности в выходном опорном сечении $I_{вых}(x', y')$ для реальной системы с параметрами аналогичного распределения для идеальной безаберрационной системы. Для оценки качества ЛСПУ предложено три критерия:

1) среднеквадратическая волновая аберрация $\sigma^2(r,N)$ в зависимости от

относительной координаты по полю r и номера N рассматриваемого положения компонентов ЛСПУ.

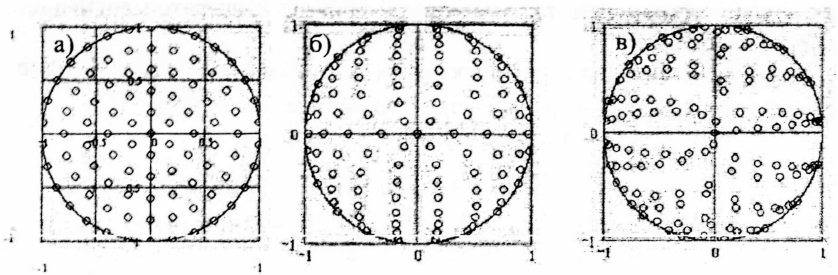


Рис. 3. а, б - два наиболее часто применяемых расположения узлов на каноническом зрачке; в - предлагаемое расположение узлов, обеспечивающее лучшую обусловленность конструкционной матрицы

2) доля энергии (мощности) в выходной опорной плоскости R(N), заключенная в круге с радиусом, равном радиусу неискаженного лазерного пучка в этой плоскости (по уровню $1/e^2$), формируемого идеальной системой при отсутствии дифракции и аберраций.
3) отношение K(N) максимальной плотности мощности в выходной опорной плоскости для реальной системы к максимальной плотности мощности излучения для идеальной системы.

Для иллюстрации предложенных методов расчета ЛСПУ в данной диссертации выполнен расчет нескольких ЛСПУ, качество которых оценивалось с использованием описанных критериев.

В лазерном панкратическом объективе (рис. 4) ЛСПУ формирует в плоскости промежуточного изображения ПИ′ лазерный пучок переменного радиуса, который фокусируется последним компонентом ЛСПУ в выходной опорной плоскости ПИ. Плоскость ПИ′ является плоскостью предмета для последнего неподвижного компонента объектива, имеющего постоянное линейное увеличение. При перемещении компонентов ЛСПУ меняется общее линейное увеличение системы, а значит и радиус лазерного пучка в выходной опорной плоскости (плоскости обработки), неподвижность которой необходимо обеспечить.

Первоначально рассчитанная ЛСПУ с трехточечной компенсацией смещения выходной опорной плоскости, реализующая заданный перепад увеличений M=100, была затем реверсирована таким образом, чтобы выходная опорная плоскость ПИ оставалась неподвижной, при этом входная опорная плоскость (оптически сопряженное сечение ПП входящего пучка) перемещается относительно своего начального положения $ПП_0$. Полученная система дополнена последним неподвижным компонентом объектива, чтобы обеспечить линейное увеличение системы $|\beta| \le 1^x$ во всем диапазоне

перемещения компонентов ЛСПУ. Линейное увеличение объектива меняется в пределах $-1^{x}\ldots-0.01^{x}$.

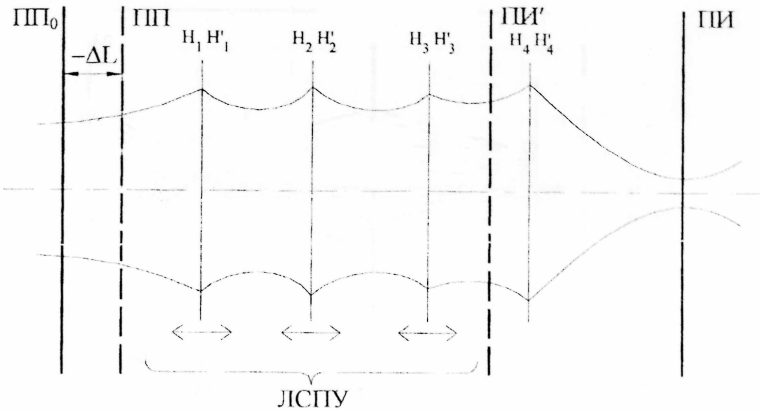


Рис. 4. Схема панкратического фокусирующего объектива

Ход лазерного пучка в панкратическом фокусирующем объективе с тонкими компонентами изображен на рис. 5 (на рисунке показан ход лазерного пучка с длиной волны λ=1.0641 мкм, имеющего на входе в систему параметр конфокальности Z_K=200 мм, сечение перетяжки которого расположено на расстоянии Sp=15.201 мм относительно первого компонента в начальном положении ЛСПУ).

Качество рассчитанного панкратического фокусирующего объектива с компонентами конечной толщины оценивалось с помощью предложенных ранее критериев, наглядно представленных на рис. 6. Представленные характеристики свидетельствуют о хорошем качестве ЛСПУ, рассчитанных с использованием методов, предложенных в данной работе.

В заключении дается краткая характеристика предложенных методов расчета ЛСПУ и подведены итоги по диссертации в целом.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Предложена классификация ЛСПУ, позволяющая разделить указанные системы по группам на основании ряда признаков.
2. Разработаны методы расчета ЛСПУ, важной особенностью которых является возможность получать большое число возможных вариантов оптических схем ЛСПУ, что позволяет повысить эффективность расчета за счет расширения области анализа и наличия решений, соответствующих компактным схемам ЛСПУ.
3. Использование комбинации матричного метода и метода двух лучей при расчете пространственной структуры лазерных пучков позволило разработать алгоритмы визуализации преобразования лазерного пучка в ЛСПУ, а также осуществлять контроль за правильности результатов расчета.

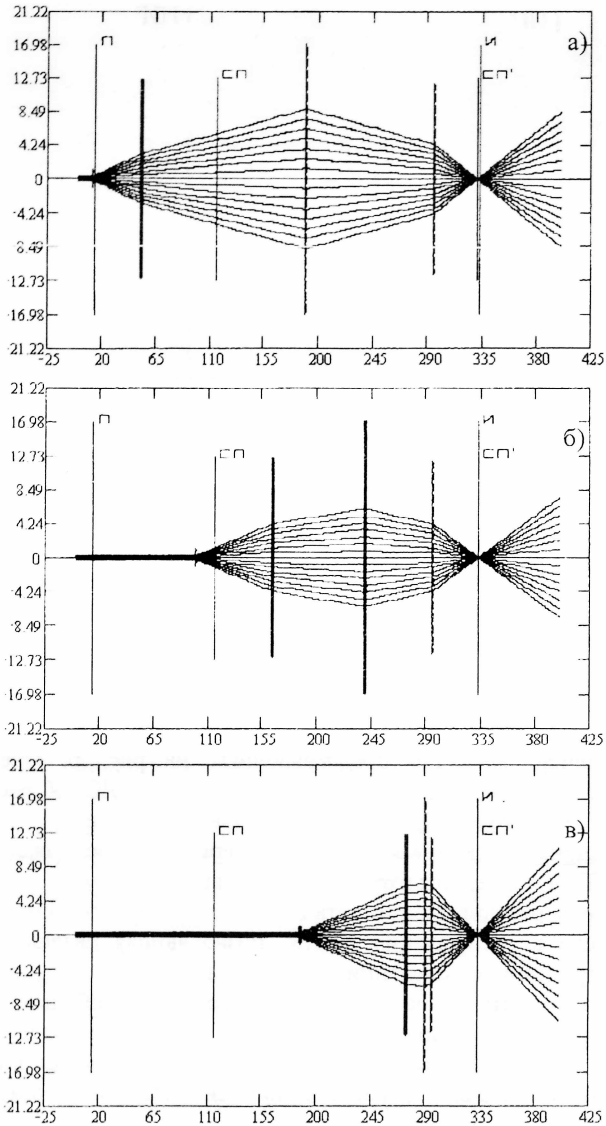


Рисунок 5. Лазерный панкратический фокусирующий объектив:
а - положение 1, $\beta = -1^{x}$; б - положение 2; в - положение 3, $\beta = -0.01^{x}$

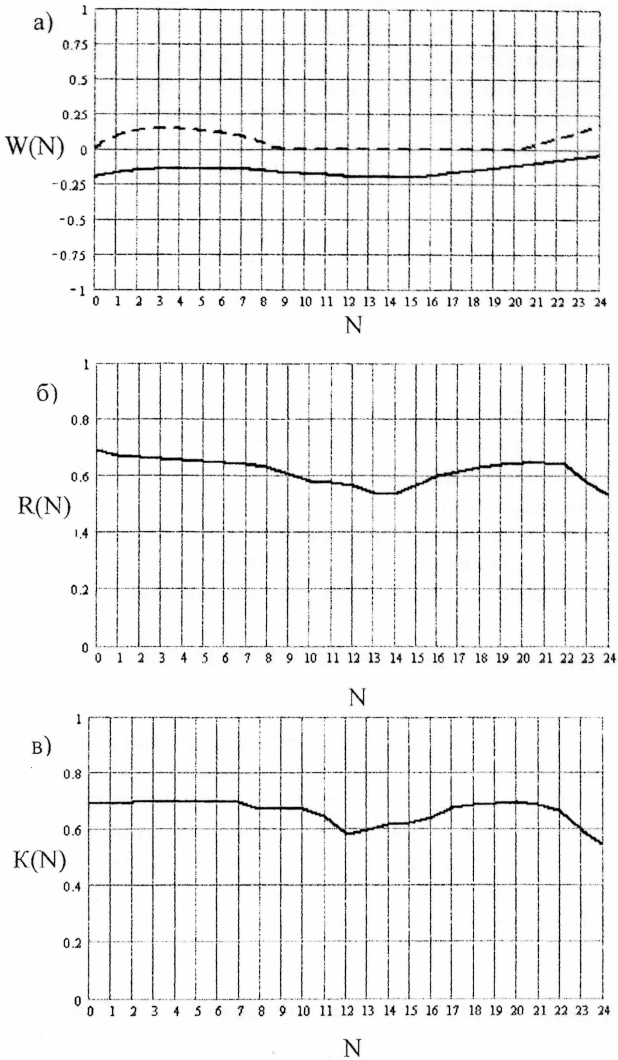


Рис. 6. Характеристики лазерного панкратического фокусирующего объектива после оптимизации: а – волновая аберрация W(N) для точки на оси (максимальное значение - штриховая линия, минимальное значение - сплошная линия); б – величина R(N) и в – величина K(N) в зависимости от номера N рассматриваемого положения

4. Показано, для ЛСПУ при наличии полных данных об используемом лазерном источнике нет необходимости использовать нелинейные законы перемещения компонентов ЛСПУ для компенсации смещения выходной опорной плоскости, что упрощает кинематику системы.
5. На основе анализа семейства решений - схем ЛСПУ, рассчитанных с использованием предложенных методов, разработаны критерии отбора итогового варианта оптической схемы рассчитываемой ЛСПУ.
6. Предложен эффективный алгоритм расчета амплитудной и фазовой части аберрационной функции зрачка с использованием многочленов Цернике и специальной сетки узлов на каноническом зрачке.
7. На основе скалярной теории дифракции разработан алгоритм расчета двумерного распределения интенсивности излучения в выходном опорном сечении лазерного пучка, формируемого ЛСПУ, с учетом свойств лазерных пучков.
8. Разработаны критерии оценки качества ЛСПУ, основанные на аберрационных характеристиках ЛСПУ и энергетических характеристиках формируемого лазерного пятна.
9. Возможности предложенных методов расчета ЛСПУ проиллюстрированы рядом примеров. В частности, выполнен расчет лазерного панкратического фокусирующего объектива, включающего ЛСПУ с оптической компенсацией, имеющую 100-ный перепад увеличений.

Список публикаций по теме диссертационной работы:

По теме диссертации опубликованы и доложены следующие работы:

1. Пахомов И.И., Севрюгин А.С. Оптические системы переменного увеличения для информационно-распознающих систем // Тез. докл. 51 Международной научн.-техн. конф. "Тепловидение". - Москва, 2001. - С. 157.
2. Пахомов И.И., Севрюгин А.С. К расчету оптических систем переменного увеличения для изменения параметров лазерных пучков // Тепловидение: Межотрасл. сб. научн. тр. МИРЭА. - 2002. - № 14. - С. 3-15.
3. Пахомов И.И., Севрюгин А.С. Расчет лазерных систем переменного увеличения // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2004. - № 1(54). - С. 3-19.

Подписано к печати 27.01.2005 Зак. 18 Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана