НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Исследование влияния угловых аберраций объектива оптикоэлектронного координатора на погрешности измерения взаимного углового рассогласования осей лазерных пучков # 11, ноябрь 2012

DOI: 10.7463/1112.0479575

Барышников Н. В., Животовский И. В., Пискунов Т. С. УДК 681.7.014.3

> Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана <u>thedistorted@yandex.ru</u> <u>baryshnikov@bmstu.ru</u> <u>ilja@rl2.bmstu.ru</u>

При проектировании, эксплуатации и юстировках сложных лазерных оптикоэлектронных систем (ОЭС) достаточно часто требуется проводить измерения взаимного углового положения осей лазерных пучков. В частности, такие измерения проводятся в системе автоюстировки (САЮ) высокоточных лазерных ОЭС. (Барышников Н.В., 2011; Барышников Н.В., Пискунов Т.С., 2011; Барышников Н.В., Карачунский В.В., Свигач О.А., 2011).

Такая САЮ должна обеспечивать взаимную угловую юстировку оптических осей приёмного и передающего каналов ОЭС в реальном времени и с высокой точностью, составляющей в некоторых случаях нескольких угловых секунд. Это достигается измерением с последующей отработкой взаимного углового рассогласования осей двух пучков лазерного излучения: рабочего лазера (РЛ) и дополнительного маломощного маркерного лазера (МЛ). МЛ является в системе репером пространственного положения оси пучка излучения РЛ и используется в приемном канале для согласования осей (Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В., 2011). Для измерения угловых координат пучков излучений обоих лазеров используется единый зеркальный объектив.

Поскольку РЛ, как правило, работает в дальнем ИК диапазоне, а МЛ – это маломощный лазер видимого диапазона, то зеркальная оптика – это единственный вариант построения объектива, позволяющий уверенно осуществлять измерение угловых координат пучков с одинаковыми систематическими погрешностями, возникающими при его разъюстировках. Пучки излучений могут быть пространственно разделены после

объектива с помощью спектрального светоделителя и направлены на разные многоплощадочные приёмники излучения (МПИ) соответствующего спектрального диапазона. С помощью такого оптико-электронного координатора определяются координаты *x*, *y* центра пятна лазерного излучения, регистрируемого на МПИ (В.М. Орлов, В.Е. Карасик, 2000).

1. Методика определения координат осей лазерных пучков

Конструктивно объектив состоит из двух зеркал – рефлектора с отверстием и контррефлектора. Для случая кольцевого сечения пучка РЛ пучок излучения МЛ оптимально располагается по его оси. Чтобы завести пучок излучения МЛ в объектив используется ромб-призма (Рисунок 1).





1 – рефлектор, 2 – контррефлектор, 3 – спектральный светоделитель, 4 – ромб-призма

Искомые угловые координаты осей лазерных пучков можно получить, пересчитывая измеренные координаты *x*, *y* по следующему выражению:

$$\tan \gamma_x = \frac{x}{f'};$$

$$\tan \gamma_y = \frac{y}{f'};$$
 (1)

где γ_x , γ_y – искомые угловые координаты, f' – фокусное расстояние объектива.

Погрешности измерения угловых координат зависят от способа измерения линейных координат центра пятна излучения. В общем случае существует несколько методов таких измерений:

1. Вычисление геометрического центра пятна с пиксельной точностью – определение номера строки и столбца по следующему выражению:

$$x = round \left[\frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij} \cdot j}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij}} \right]$$

$$y = round \left[\frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij} \cdot i}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij}} \right]$$
(2)

где: m, n – число пикселей в строке и столбце, $I_{порij}$ – уровень сигнала в пикселе в i-й строке и j-м столбце. Уровень сигнала I_{ij} принимается равным единице, если сигнал выше порогового значения $I_{пор}$, и нулю, если ниже:

$$I_{\pi \text{op}ij} = \begin{cases} 1, I_{ij} > I_{\pi \text{op}}; \\ 0, I_{ij} \le I_{\pi \text{op}}; \end{cases}$$
(3)

Полученные значения координат х, у округляются до целого (оператор *round*). Достоинствами этого метода является простота и скорость исполнения, а также малый объём памяти для проведения обработки. Недостатком этого метода является ограничение по точности.

2. Вычисление геометрического центра пятна с субпиксельной точностью – координаты центра пятна определяются по формуле (4), без окончательного округления измеренных координат *x*, *y* по выражению:

$$\begin{aligned} x &= \frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij} \cdot j}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij}} \\ y &= \frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij} \cdot i}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{\text{nop}ij}} \end{aligned}$$
(4)

Уровень сигнала также определяется по выражению (3). По сравнению с первым методом точность увеличивается, однако появляется необходимость проводить операции с числами с дробными частями.

3. Вычисление энергетического центра пятна с субпиксельной точностью – определение координат центра пятна осуществляется без окончательного округления измеренных координат x, y, а уровень сигнала I_{ij} принимает своё истинное значение, полученное при считывании с МПИ:

$$x = \frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{ij} \cdot j}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{ij}}$$

$$y = \frac{\sum_{i=0}^{m} \sum_{j=0}^{n} I_{ij} \cdot i}{\sum_{i=0}^{m} \sum_{i=0}^{n} I_{ij}}$$
(5)

Для обеспечения высокой точности определения угловых координат осей излучений РЛ и МЛ целесообразно использовать именно третий способ измерения координат центра, поскольку он учитывает неравномерность распределения энергии излучения по пятну. Опыт разработки и использования этого алгоритма показывает, что достигаемые в этом случае погрешности измерения координат составляют десятые доли размера одного пикселя.

3. Методика исследования влияния угловых аберраций объектива на погрешности измерения взаимного углового рассогласования осей пучков

Рассмотрим возможности использования рассматриваемых оптико-электронных координаторов для измерения угловых координат осей пучков излучения МЛ и РЛ с погрешностью на уровне единиц угловых секунд.

Требуемое фокусное расстояние f' объектива можно определить следующим образом. Оценим предварительное значение погрешности измерения угловых координат осей пучков МЛ и РЛ по угловому размеру $2\omega_{пp}$ одного элемента МПИ:

$$2\omega_{\rm np} = \frac{d_3}{f'} \tag{6}$$

где *d*_э- размер одного элемента МПИ.

Как известно, в настоящее время размеры матричных приёмников излучения, работающих в видимом и инфракрасном диапазонах значительно различаются. Например, размер элемента ПЗС матрицы видимого диапазона составляет 6 мкм, а размер микроболометрической матрицы ИК диапазона - 25-30 мкм (Гейхман И.Л., Волков В.Г., 2009).

Учитывая, что метод вычисления энергетического центра пятна обеспечивает погрешность измерения на уровне десятых долей пикселя, нетрудно показать, что секундным погрешностям измерений соответствуют значения фокусного расстояния объектива порядка *f*'=1000 мм.

Понятно, что в такой системе аберрационные параметры объектива могут внести свои погрешности в измерения. Поэтому исследуем влияние степени аберрационной коррекции объектива на погрешности измерения угловых координат осей лазерных пучков.

Будем рассматривать оптическую систему объектива, состоящую в одном случае только из сферических поверхностей, а в другом – с асферической поверхностью рефлектора. Общая методика проведения исследования заключается в следующем.

На первом этапе проводим оптимизацию оптической системы объектива на минимум аберраций. Далее, проводим анализ по следующей последовательности:

- Подаём на вход модели объектива (см. рисунок 1) параллельные пучки излучения РЛ и МЛ под одинаковыми углами наклона *σ_x*, *σ_y* в пределах поля зрения;
- 2. Измеряем по выбранному алгоритму координаты энергетического центра *x*, *y*;
- Пересчитываем линейные координаты энергетического центра в угловые по выражению (1);
- 4. Сравниваем измеренные угловые координаты энергетического центра с заданными углами наклона пучков для определения погрешности измерения δ_x , δ_y .

Такая задача может быть успешно решена с помощью компьютерного моделирования в САПР «Zemax».

В качестве переменных для оптимизации такого объектива целесообразно задавать радиуса зеркал и расстояние между ними, а целью оптимизации можно задать стандартные параметры для минимизации искажений волнового фронта (RMS, Wavefront, Centroid – среднеквадратическое значение искажения волнового фронта по отношению к центру входного зрачка).

Для получения вида изображения этих пучков на МПИ используем встроенную функцию в САПР «Zemax» – PSF (Point Spread Function) – функция рассеяния (ZEMAX Development Corporation, June 25, 2007). Данные расчёта для каждого конкретного наклона и диаметра пучков затем могут быть интерпретированы, как сигнал с МПИ, соответствующий распределению интенсивности в фокальной плоскости объектива.

Наклоны пучков излучения целесообразно задавать вокруг каждой оси отдельно: ±3 угл. мин. в плоскости XOZ и 0 угл. мин. в плоскости YOZ и наоборот (Рисунок 1). В таком случае для определения энергетического центра пятна можно ограничиться значительно меньшим объёмом данных: достаточно рассмотреть только один ряд/строку пикселей в той плоскости, в которой было введено угловое смещение, так как в другой плоскости пятно будет находиться на оси и геометрические аберрации не приведут к смещению центра или несимметрии пятна.

Массив данных функции рассеяния (PSF) в соответствующей плоскости записывается в массив *I*_{ij} и проводится расчёт одной из координат энергетического центра по формуле (5). Например, формула для вычисления координаты энергетического центра пятна рассеяния по оси X, примет вид:

$$\Delta x = \frac{\sum_{j=0}^{n} I_{ij} \cdot j}{\sum_{j=0}^{n} I_{ij}}$$
(5')

где i = m / 2 – центральный пиксель по оси Y, I_{ij} – значения функции рассеяния в сечении XOZ (Рисунок 2, Рисунок 3). Для получения информации о центре пятна по оси Y проводится аналогичный расчёт Δy . Полученные значения Δx , Δy являются децентрировками пятна излучения вследствие несимметричности пятна, однако они заданы в собственных координатах функции рассеяния: центр координат $X_{PSF}O_{PSF}Y_{PSF}$ находится в точке пересечения главного луча с плоскостью изображения (Рисунок 3). Поэтому, для того, чтобы получить реальные значения энергетического центра пятна на МПИ, необходимо пересчитать координаты по формулам (7):

$$\begin{aligned} x &= x_{chief} + \Delta x \\ y &= y_{chief} + \Delta y \end{aligned} \tag{7}$$

где *x_{chief}*, *y_{chief}* – координаты пересечения главного луча с плоскостью изображения (Рисунок 2, Рисунок 3).



Рисунок 2. Схема геометрического хода лучей в САЮ



Рисунок 3. Схема определения координат энергетического центра с помощью функции рассеяния точки (PSF) в САПР «Zemax»

После этого необходимо рассчитать угловые координаты пучка излучения по выражениям (1) и сравнить с заданными σ_x , σ_y во вкладке Field data для определения погрешности измерения угловых координат, вносимой неравномерностью распределения энергии в пятне рассеяния:

$$\delta_{x} = \gamma_{x} - \sigma_{x}; \tag{8}$$
$$\delta_{y} = \gamma_{y} - \sigma_{y};$$

4. Результаты расчёта погрешностей измерения взаимного углового рассогласования осей пучков

Для примера рассмотрим вариант объектива, состоящий из двух сферических зеркал – рефлектора с радиусом кривизны поверхности -704,7 мм и контррефлектора с радиусом -363,1 мм. Диаметр пучка РЛ – 145 мм, МЛ – 10 мм. Расстояние между компонентами после оптимизации – 235 мм. Исследуем поведение энергетического центра пятна при отклонении пучков МЛ и РЛ в пределах 6 угл. минут по приведённой методике. Результаты расчётов приведены в таблице 1 для МЛ и в таблице 2 для РЛ. В соответствии с приведенным выше алгоритмом, в таблицах представлены следующие параметры в линейной и угловой мере: координаты главного луча x_{chief} , y_{chief} ; смещение координат главного луча относительно нуля Δx_{chief} , Δy_{chief} ; координаты энергетического центра x, y; смещение координат энергетического центра относительно нуля δ_x , δ_y в зависимости от углов наклона

параллельного пучка излучения σ_x , σ_y .

	Ø	r _x		σ_x	1	σ_x	0	σ_x	6	<i>,</i>
По оси Х	-6 угл, ми		-3 yı	-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		, мин
	Мм	угл.ми	H MM	угл.ми	н Мм	угл.мин	Мм	угл.мин	ММ	угл.мин
Координаты главного луча х _{chief}	-1,7090	-5,875	0-0,854	5 -2,937	5 0	0	0,8545	2,9375	1,7090	5,8750
Смещение относительно нуля Δx_{chief}	-1,7090	-5,875	0-0,854	5 -2,937	5 0	0	0,8545	2,9375	1,7090	5,8750
Координаты энергетического центра, х	-1,7090	-5,875	0-0,854	5 -2,937:	5 0	0	0,8545	2,9375	1,7090	5,8750
Смещение энергетического центра Δx	-1,7090	-5,875	0-0,854	5 -2,937:	5 0	0	0,8545	2,9375	1,7090	5,8750
Погрешность δ_x (угл. сек.)	7,4985		3,	3,7496		0		-3,7496		4985
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		0	^r y
По оси Ү	-6 угл, мин		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.мин	ММ	угл.мин	ММ	угл.мин	ММ	угл.мин	ММ	угл.мин
Координаты главного луча у _{chief}	-3,8652	-13,2875	-2,9063	-9,9912	-1,9476	-6,6953	-0,9889	-3,3997	-0,0304	-0,1045
Смещение относительно нуля Δy_{chief}	-1,9176	-6,5923	-0,9588	-3,2960	0	0	0,9586	3,2956	1,9172	6,5908
Координаты энергетического центра, у	-3,8664	-13,2916	-2,9075	-9,9952	-1,9487	-6,6993	-0,9901	-3,4037	-0,0315	-0,1084
Смещение энергетического центра Ду	-1,9176	-6,5924	-0,9588	-3,2960	0	0	0,9587	3,2956	1,9172	6,5908
Погрешность бу (угл. сек.)	-35,5	390	-17,2	7580	()	17,7	7359	35,4	4504

Таблица 1. Результаты расчёта для МЛ (объектив со сферическим рефлектором)

Таблица 2. Результаты расчёта для РЛ (объектив со сферическим рефлектором)

	σ _ж -6 угл, мин			σ _ж -3 угл, мин		σ _ж 0 угл, мин		<i>σ_x</i> 3 угл, мин		σ_x	
По оси Х			-3 yı							1, мин	
	ММ	угл.ми	H MM	угл.мин	иМм	угл.мин	MM	угл.мин	ММ	угл.мин	
Координаты главного луча x _{chief}	-1,7073	-5,8693	3 -0,853	6 -2,9346	0	0	0,8536	2,9346	1,7073	5,8693	
Смещение относительно нуля Δx_{chief}	-1,7073	-5,8693	3 -0,853	6 -2,9346	0	0	0,8536	2,9346	1,7073	5,8693	
Координаты энергетического центра, х	-1,7119	-5,8850	0 -0,855	9 -2,9425	0	0	0,8559	2,9425	1,7119	5,8850	
Смещение энергетического центра Δx	-1,7119	-5,8850	0 -0,855	9 -2,9425	0	0	0,8559	2,9425	1,7119	5,8850	
Погрешность δ_x (угл. сек.)	6,9	021	З,	3,4499		0		-3,4500		-6,9023	
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		
По оси Ү	-6 угл,	6 угл, мин -3		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	ММ	угл.мин	MM	угл.мин	
Координаты главного луча у _{chief}	-1,7073	-5,8693	-0,8536	-2,9346	0	0	0,8536	2,9346	1,7073	5,8693	
Смещение относительно нуля Δy_{chief}	-1,7073	-5,8693	-0,8536	-2,9346	0	0	0,8536	2,9346	1,7073	5,8693	
Координаты энергетического центра, у	-1,7119	-5,8850	-0,8559	-2,9425	0	0	0,8559	2,9425	1,7119	5,8850	
Смещение энергетического центра Ду	-1,7119	-5,8850	-0,8559	-2,9425	0	0	0,8559	2,9425	1,7119	5,8850	
Погрешность б _у (угл. сек.)	6,90	21	3,4499		0		-3,4500		-6,9023		

Как видно из приведённых данных, погрешности определения угловых координат пучка для МЛ по оси Х и для РЛ по обеим осям лежат в пределах ±(7..7,5) угл. сек. Однако

значительную погрешность вносит неравномерность распределения энергии по оси Y для пучка МЛ: ±35 угл. сек.

Для улучшения точностных характеристик, проведём оптимизацию объектива с помощью встроенных функций, позволяющих осуществить минимизацию среднеквадратического значения искажения волнового фронта. При изменении параметра conic рефлектора (радиус поверхности остаётся фиксированным -704,7 мм) получим объектив с асферической поверхностью второго порядка в виде эллипса: conic = -0,6. Проведём аналогичное исследование поведения энергетического центра пятна при отклонении пучков МЛ и ТЛ в пределах 6 угл. минут (см. таблицы 3-4)

	σ	x		σ_x	!	σ_x	(σ_x	6	σ_x
По оси Х	-6 угл, мин		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.мин	MM	угл.мин	н Мм	угл.мин	Мм	угл.мин	MM	угл.мин
Координаты главного луча х _{chief}	-1,7412	-5,9857	-0,8706	-2,9929	0 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9857
Смещение относительно нуля	-1,7412	-5,9857	-0,8706	-2,9929	0 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9857
Координаты энергетического центра, х	-1,7412	-5,9859	-0,8706	-2,9929	0 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9859
Смещение энергетического центра	-1,7412	-5,9859	-0,8706	-2,9929	0 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9859
Погрешность δ_x (угл. сек.)	0,8	489	0,4249		0		-0,4249		-0,8489	
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		σ_y	
По оси Ү	-6 угл	, мин	-3 угл	, мин	0 угл	, мин	3 уг л	, мин	6 уг л	і, мин
По оси Ү	-6 у гл Мм	, мин угл.мин	-3 угл мм	і , мин угл.мин	0 угл мм	, мин угл.мин	3 угл мм	, мин угл.мин	6 уг л мм	, мин угл.мин
По оси Ү Координаты главного луча y _{chief}	-6 угл Мм -1,7434	, мин угл.мин -5,9932	- 3 уг л мм -0,8702	, мин угл.мин -2,9914	0 уг л мм 0,0029	, мин угл.мин 0,0101	3 уг л мм 0,8760	, мин угл.мин 3,0114	6 уг л мм 1,7490	, мин угл.мин 6,0125
По оси Ү Координаты главного луча у _{chief} Смещение относительно нуля	-6 угл Мм -1,7434 -1,7463	угл.мин -5,9932 -6,0033	- 3 уг л мм -0,8702 -0,8731	, мин угл.мин -2,9914 -3,0015	0 уг л мм 0,0029 0	, мин угл.мин 0,0101 0	3 уг л мм 0,8760 0,8730	, мин угл.мин 3,0114 3,0013	6 уг л мм 1,7490 1,7460	, мин угл.мин 6,0125 6,0024
По оси Ү Координаты главного луча у _{chief} Смещение относительно нуля Координаты энергетического центра, у	-6 угл Мм -1,7434 -1,7463 -1,7434	, мин угл.мин -5,9932 -6,0033 -5,9934	-3 угл мм -0,8702 -0,8731 -0,8702	а , мин угл.мин -2,9914 -3,0015 -2,9915	0 уг л мм 0,0029 0 0,0019	, мин угл.мин 0,0101 0 0,0065	3 угл мм 0,8760 0,8730 0,8760	угл.мин 3,0114 3,0013 3,0114	6 угл мм 1,7490 1,7460 1,7490	у гл.мин 9/7л.мин 6,0125 6,0024 6,0125
По оси Y Координаты главного луча y _{chief} Смещение относительно нуля Координаты энергетического центра, у Смещение энергетического центра	-6 угл Мм -1,7434 -1,7463 -1,7434 -1,7453	, мин угл.мин -5,9932 -6,0033 -5,9934 -5,9998	-3 угл мм -0,8702 -0,8731 -0,8702 -0,8721	, мин угл.мин -2,9914 -3,0015 -2,9915 -2,9979	0 уг л мм 0,0029 0 0,0019 0	а, мин угл.мин 0,0101 0 0,0065 0	3 угл мм 0,8760 0,8730 0,8760 0,8741	, мин угл.мин 3,0114 3,0013 3,0114 3,0050	6 уг л мм 1,7490 1,7460 1,7490 1,7471	у гл.мин 6,0125 6,0024 6,0125 6,0061

Таблица 3. Результаты расчёта для МЛ (объектив с эллиптическим рефлектором, оптимизированным по волновому фронту)

Таблица 4. Результаты расчёта для РЛ (объектив с эллиптическим рефлектором,

	σ_ж -6 угл, мин			σ _ж -3 угл, мин		σ _x 0 угл, мин		<i>σ_x</i> 3 угл, мин		σ_x
По оси Х			-3 yı							і, мин
	Мм	угл.ми	H MM	угл.ми	н Мм	угл.мин	Мм	угл.мин	ММ	угл.мин
Координаты главного луча х _{chief}	-1,7387	-5,977	2 -0,869	3 -2,9886	5 0	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Смещение относительно нуля	-1,7387	-5,977	2 -0,869	3 -2,9886	5 O	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Координаты энергетического центра, х	-1,7462	-6,003	0 -0,873	1 -3,0015	5 0	0	0,8731	3,0015	1,7462	6,0030
Смещение энергетического центра	-1,7462	-6,003	0-0,873	1 -3,0015	5 0	0	0,8731	3,0015	1,7462	6,0030
Погрешность δ_x (угл. сек.)	-0,1800		-0	-0,0903		0		0,0903		799
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		σ_y	
По оси Ү	-6 угл, мин		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин
Координаты главного луча у _{chief}	-1,7387	-5,9772	-0,8693	-2,9886	0	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Смещение относительно нуля	-1,7387	-5,9772	-0,8693	-2,9886	0	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Координаты энергетического центра, у	-1,7462	-6,0030	-0,8731	-3,0015	0	0	0,8731	3,0015	1,7462	6,0030
Смещение энергетического центра	-1,7462	-6,0030	-0,8731	-3,0015	0	0	0,8731	3,0015	1,7462	6,0030
Погрешность δ_y (угл. сек.)	-0,1	800	-0,0903		0		0,0903		0,1799	

оптимизированным по волновому фронту)

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод о значительном уменьшении погрешностей определения угловых координат пучка при использовании объектива с эллиптическим рефлектором, по сравнению с объективом со сферическими зеркалами: погрешности по обеим осям лежат в пределах ±(0,2..0,8) угл. сек.

При анализе результатов расчёта различных конфигураций объектива (таблицы 1-4) можно заметить, что угловые координаты главного луча отличаются от угловых координат энергетического центра пучка. Это объясняется действием геометрических аберраций. Оптимизируем объектив, используя встроенные функции, позволяющие минимизировать поперечные геометрические аберрации.

В результате оптимизации получим объектив, состоящий из двух зеркал – рефлектора с радиусом кривизны поверхности -717,48 мм и conic = -0,59 и контррефлектора с радиусом -385,937 мм. Расстояние между компонентами после оптимизации – 235 мм. Результаты расчётов приведены в таблице 5 для МЛ и в таблице 6 для РЛ.

I аблица 5. Результаты расчета для МЛ (объектив с эллиптическим рефлекто
--

	σ _ж -6 угл, мин		σ_ж -3 угл, мин		σ _x 0 угл, мин		<i>σ_x</i> 3 угл, мин		σ _ж 6 угл, мин		
По оси Х											
	Мм	угл.мин	MM	угл.ми	н Мм	угл.мин	Мм	угл.мин	MM	угл.мин	
Координаты главного луча х _{chief}	-1,7412	-5,9857	-0,8706	5 -2,9929	9 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9857	
Смещение относительно нуля	-1,7412	-5,9857	-0,8706	5 -2,9929	9 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9857	
Координаты энергетического центра, х	-1,7412	-5,9858	-0,8706	5 -2,9929	9 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9858	
Смещение энергетического центра	-1,7412	-5,9858	-0,8706	-2,9929	0 0	0	0,8706	2,9929	1,7412	5,9858	
Погрешность δ_x (угл. сек.)	0,8-	491	0,4250		0		-0,4250		-0,8491		
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		
По оси Ү	-6 угл	-6 угл, мин		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	
Координаты главного луча у _{chief}	-1,7434	-5,9932	-0,8702	-2,9914	0,0029	0,0101	0,8760	3,0114	1,7490	6,0125	
Смещение относительно нуля	-1,7463	-6,0033	-0,8731	-3,0015	0	0	0,8730	3,0013	1,7460	6,0024	
Координаты энергетического центра, у	-1,7434	-5,9933	-0,8702	-2,9915	0,0029	0,0101	0,8760	3,0115	1,7490	6,0126	
Смещение энергетического центра	-1,7463	-6,0034	-0,8731	-3,0016	0	0	0,8731	3,0013	1,7460	6,0025	
Погрешность δ_y (угл. сек.)	-0,2	067	-0,0955		0		0,0807		0,1474		

оптимизированным по поперечным аберрациям)

Таблица 6. Результаты расчёта для РЛ (объектив с эллиптическим рефлектором,

оптимизированным по поперечным аберрациям)

	σ _ж -6 угл, мин			σ_x		σ _x		σ_x	σ _x	
По оси Х			ін -3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.ми	H MM	угл.мин	н Мм	угл.мин	Мм	угл.мин	ММ	угл.мин
Координаты главного луча х _{chief}	-1,7387	-5,977	2 -0,869	3 -2,9886	5 O	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Смещение относительно нуля	-1,7387	-5,977	2 -0,869	3 -2,9886	5 O	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Координаты энергетического центра, х	-1,7460	-6,002	1 -0,873	0-3,0011	0	0	0,8730	3,0011	1,7460	6,0021
Смещение энергетического центра	-1,7460	-6,002	1 -0,873	0-3,0011	0	0	0,8730	3,0011	1,7460	6,0021
Погрешность δ_x (угл. сек.)	-0,1	281	-0,0642		0		0,0642		0,1280	
	σ_y		σ_y		σ_y		σ_y		σ_y	
По оси Ү	-6 угл, мин		-3 угл, мин		0 угл, мин		3 угл, мин		6 угл, мин	
	Мм	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин	MM	угл.мин
Координаты главного луча у _{chief}	-1,7387	-5,9772	-0,8693	-2,9886	0	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Смещение относительно нуля	-1,7387	-5,9772	-0,8693	-2,9886	0	0	0,8693	2,9886	1,7387	5,9772
Координаты энергетического центра, у	-1,7460	-6,0021	-0,8730	-3,0011	0	0	0,8730	3,0011	1,7460	6,0021
Смещение энергетического центра	-1,7460	-6,0021	-0,8730	-3,0011	0	0	0,8730	3,0011	1,7460	6,0021
Погрешность δ_y (угл. сек.)	-0,12	281	-0,0642		0		0,0642		0,1280	

Сравнивая точностные характеристики полученных объективов, можно сделать вывод, что наибольшей точности позволяют добиться объективы с эллиптическим рефлектором, причём оптимизация с целью минимизации искажений волнового фронта и оптимизация с целью минимизации поперечных аберраций дают схожие результаты, находящиеся в пределах ±(0,2..0,8) угл. сек.

Исследуем влияние дефокусировки объектива на погрешности определения угловых координат пучка. Проведём такое исследование для объектива с эллиптическим рефлектором, оптимизированным по волновому фронту. Зададим дефокусировку в виде изменения расстояния между компонентами на ±500 мкм. Для этого исследования достаточно привести погрешности по самым критическим точкам (см. таблицу 3): по осям X и Y при σ_x = -6 угл. мин. и σ_y = 6 угл. мин. для МЛ и по оси X при σ_x = -6 угл. мин. для DL Верики точка и респёта и рассий в добщица 7

РЛ. Результаты расчёта приведены в таблице 7.

Таблица 7. Влияние дефокусировки объектива на погрешности определения угловых координат пучка δ_x , δ_y (угл. сек.)

	M	РЛ		
Дефокусировка, мкм	<i>σ_x</i> = -6 угл. сек.	<i>σ</i> _{<i>y</i>} = 6 угл. сек.	<i>σ_x</i> = -6 угл. сек.	
500	0,7639	1,4639	2,6157	
250	0,7985	1,2135	1,2232	
100	0,8319	0,9145	-0,1662	
0	0,8489	0,3642	-0,1800	
-100	0,8659	0,1289	-0,7102	
-250	0,8914	0,1010	-1,5942	
-500	0,9132	0,0916	-1,5951	

Как видно из таблицы 7, дефокусировка объектива в пределах ±100 мкм не приводит к увеличению погрешностей определения угловых координат пучка более чем на 1 угл. сек., что позволяет сформировать приемлемые требования к сборке и юстировке системы.

5. Заключение

Полученные результаты подтверждают возможность создания оптикоэлектронного координатора на базе зеркального объектива с эллиптическим рефлектором, обеспечивающего измерения взаимного углового положения осей контролируемых лазерных пучков с погрешностью на уровне единиц угловых секунд.

Список литературы

1. Барышников Н.В. Разработка и исследование устройств параллельного переноса пучка излучения для систем автоюстировки каналов лазерных локационных станций // Измерительная техника. 2011. № 4. С. 65-70.

2. Барышников Н. В., Пискунов Т. С. Исследование влияния излучения рабочего лазера на работу систем автоюстировки высокоточных лазерных приборов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 10. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/241632.html</u> (дата обращения 21.09.11).

3. Барышников Н.В., Карачунский В.В., Свигач О.А. Современные методы проектирования систем автоюстировки высокоточных оптико-электронных приборов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. Спец. выпуск «Современные проблемы оптотехники». С. 128-142.

4. Барышников Н.В., Денисов Д.Г., Животовский И.В. Система измерения углового рассогласования осей рабочего лазера и маркерного источника на основе дифракционных оптических элементов// Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 8. Режим доступа: <u>http://technomag.edu.ru/doc/199490.html</u> (дата обращения 05.05.12).

5. Орлов В.М., Карасик В.Е. Лазерные системы видения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 352 с.

6. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность. М.: Новости, 2009. 834 с.

7. ZEMAX Optical Design Program User's Guide. USA: ZEMAX, 2007.

SCIENCE and EDUCATION

EL Nº FS77 - 48211. Nº0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Study of the influence of angular aberrations of the opticalelectronic coordinator lens on the quality of measuring the mutual angular misalignment of the laser beams

11, November 2012 DOI: 10.7463/1112.0479575 Baryshnikov N., V., Jivotovskii I.V., Piskunov T.S.

> Russia, Bauman Moscow State Technical University <u>thedistorted@yandex.ru</u> <u>baryshnikov@bmstu.ru</u> <u>ilja@rl2.bmstu.ru</u>

This article considers a self-alignment system (SAS) designed to measure the mutual angular position of laser beams while designing, operating and adjusting high-precision laser optical-electronic systems (OES). A method of measuring angular misalignment of optical axes of receiving and transmitting system channels with the use of various algorithms of digital signal processing is proposed. Measurement error is analyzed; technique for reducing this error by means of optimization of lens optical system, which is used to perform those measurements, is proposed

Publications with keywords: auto adjustment system, optoelectronic system, alignment optical axis, optical-electronic coordinator, aberration characteristics of optical systems
Publications with words: auto adjustment system, optoelectronic system, alignment optical axis, optical-electronic coordinator, aberration characteristics of optical systems

References

1. Baryshnikov N.V. Razrabotka i issledovanie ustroistv parallel'nogo perenosa puchka izlucheniia dlia sistem avtoiustirovki kanalov lazernykh lokatsionnykh stantsii [Development and research of devices of parallel transport of the beam of radiation for systems of auto-alignment of channels of laser radar stations]. *Izmeritel'naia tekhnika* [Measurement technique], 2011, no. 4, pp. 65-70.

2. Baryshnikov N. V., Piskunov T. S. Issledovanie vliianiia izlucheniia rabochego lazera na rabotu sistem avtoiustirovki vysokotochnykh lazernykh priborov [Research of influence of radiation of the main laser on the systems of automatic adjustment of precision laser devices].

Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 10. Available at: <u>http://technomag.edu.ru/doc/241632.html</u>, accessed 21.09.11.

3. Baryshnikov N.V., Karachunskii V.V., Svigach O.A. Sovremennye metody proektirovaniia sistem avtoiustirovki vysokotochnykh optiko-elektronnykh priborov [Modern methods for designing the systems of auto-alignment of high-accuracy optic-electronic devices]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering], 2011, *spec. iss. «Sovremennye problemy optotekhniki»* ["Modern problems of optical engineering"], pp. 128-142.

4. Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Zhivotovskii I.V. Sistema izmereniia uglovogo rassoglasovaniia osei rabochego lazera i markernogo istochnika na osnove difraktsionnykh opticheskikh elementov [System of measuring angular mismatch axis of working and adjusting laser beams on basis of diffraction grating]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2011, no. 8. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/199490.html , accessed 05.05.12.

5. Orlov V.M., Karasik V.E. *Lazernye sistemy videniia* [Laser vision system].Moscow, Bauman MSTU Publ., 2000. 352 p.

6. Geikhman I.L., Volkov V.G. *Videnie i bezopasnost'* [Vision and safety]. Moscow, Novosti, 2009. 834 p.

7. ZEMAX Optical Design Program User's Guide. USA, ZEMAX, 2007.