

Сравнительный анализ методов калибровки датчика волнового фронта Шэка-Гартмана

Д. Г. Денисов, А. А. Золотухина, А. В. Кудряшов, А. Н. Никитин

Выполнен сравнительный анализ методов калибровки датчика волнового фронта Шэка-Гартмана по плоскому волновому фронту (калибровка по наклону датчика) и сферическому волновому фронту (абсолютная калибровка). Для сравнения был проведен общий анализ достоинств и недостатков методов калибровки. Показано, что калибровка датчика включает в себя следующие этапы: создание опорного волнового фронта и определение точных проектных параметров датчика. Значения проектных параметров используются в реконструкции измеряемого волнового фронта и определяют такие параметры датчика Шэка-Гартмана, как динамический диапазон и чувствительность. Также для численного сравнения был проведен анализ погрешностей динамического диапазона, определяемого по абберациям типа наклон и дефокусировка, и построены зависимости этих погрешностей от погрешности проектных параметров датчика.

Ключевые слова: датчик волнового фронта, абсолютная калибровка, динамический диапазон, погрешности.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-153-163

Введение

В современных научных исследованиях датчики Шэка-Гартмана (ДШГ) становятся все более распространенными для

контроля параметров волнового фронта в адаптивных системах астрономических телескопов, в задачах контроля качества оптических поверхностей и в офтальмологии. На сегодняшний день такие характеристики ДШГ, как быстродействие, погрешности измерения и динамический диапазон, уникальны в решении задач определения искажений волнового фронта.

Конструктивно ДШГ состоит из микролинзового раstra и фотодетектора (ПЗС- или КМОП-камеры). Принцип работы ДШГ показан на рис. 1, а. Поступающий во входной зрачок датчика волновой фронт (ВФ) разбивается микролинзовым растром, каждый элемент (микролинза) которого фокусирует часть ВФ на фоточувствительной матрице детектора. В результате в плоскости фотодетектора полу-

Денисов Дмитрий Геннадьевич¹, доцент, к.т.н.

E-mail: denisov_dg@mail.ru

Золотухина Анастасия Александровна¹, студент.

E-mail: anastasiazolotuhina17@gmail.com

Кудряшов Алексей Валерьевич², рук. лаборатории, д.т.н.

Никитин Александр Николаевич², н.с.

¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Россия, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

² Институт динамики геосфер РАН.

Россия, 119334, Москва, Ленинский проспект, 38.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.

© Денисов Д. Г., Золотухина А. А., Кудряшов А. В., Никитин А. Н., 2021

чается двумерный массив фокальных пятен, называемый гартманогаммой.

Массив смещений энергетических центров тяжести фокальных пятен измеряемого ВФ относительно эталонной (референсной) сетки, записанной от опорного ВФ, позволяет получить локальные углы наклона ВФ в пределах каждой субапертуры

ры. На рис. 1, б схематично изображена микролинза растра, область ПЗС-камеры, соответствующая этой микролинзе, и смещение фокального пятна от референсного положения вследствие локального наклона волнового фронта. Причиной этого наклона являются искажения пучка света.

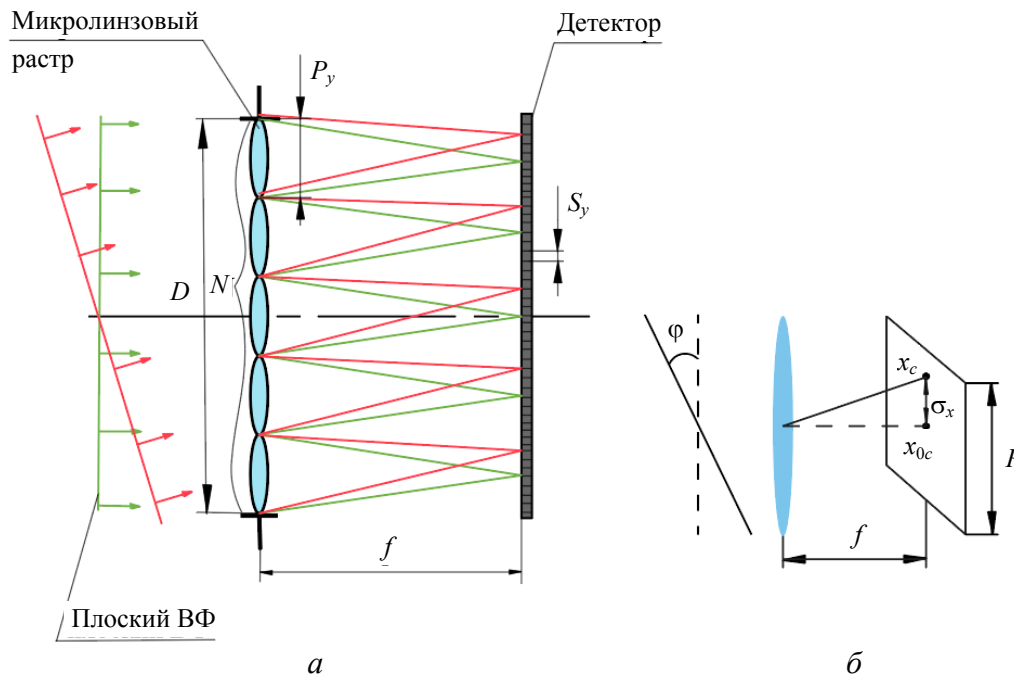


Рис. 1. Иллюстрация принципа работы ДШГ: *а* – основные проектные параметры ДШГ: N – количество микролинз в массиве, D – диаметр полной апертуры, f – расстояние между микролинзовым растром и фотодетектором, $P_x \times P_y$ – размер субапертур (микролинз), $S_x \times S_y$ – размер пикселя матрицы фотодетектора; *б* – определение локального наклона ВФ.

Из рис. 1, б видно, что смещение центра фокального пятна по оси x пропорционально тангенсу угла наклона волнового фронта, то есть $\partial\phi/\partial x$. Для смещения по оси y аналогично:

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{\sigma_x}{f}, \quad \frac{\partial\phi}{\partial y} = \frac{\sigma_y}{f}, \quad (1)$$

где $\sigma_x = (x_{0c} - x_c)$, $\sigma_y = (y_{0c} - y_c)$ – смещение центра фокального пятна по оси x и по оси y соответственно.

Полученные локальные наклоны ВФ являются исходными данными для его дальнейшей реконструкции. Из уравнения

(1) видно, что значение расстояния между линзовым растром и фотодетектором f влияет на конечное значение измерений, так как участвует в нахождении производной ВФ. Поэтому для получения достоверных результатов анализа датчиком Шэка-Гартмана необходима его калибровка. Калибровка включает в себя следующие этапы: определение точного значения расстояния f и запись опорного ВФ, относительно которого будут проводиться измерения.

Среди наиболее распространенных методов калибровки датчика Шэка-Гартмана в современных исследованиях [1–4] встре-

чаются: метод калибровки по плоскому и по сферическому ВФ.

Целью данной работы является сравнение этих методов между собой по их особенностям и по точностным показателям. Для достижения поставленной цели был проведен обзор аппаратной реализации методов калибровки и выделены их достоинства и недостатки.

Постановка работы

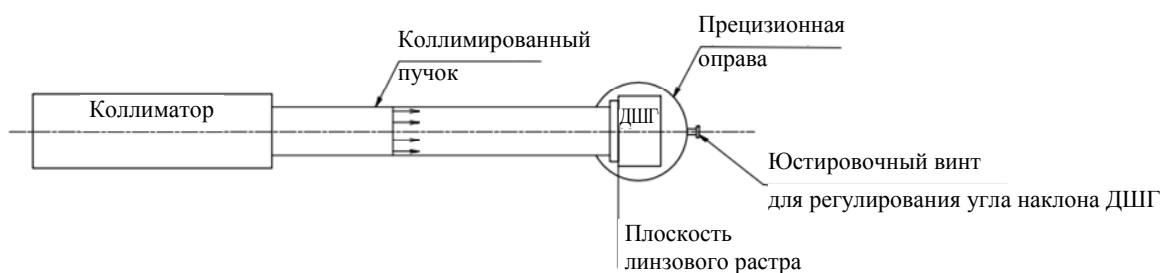
В качестве анализируемого по точности параметра был выбран динамический диапазон датчика Шэка-Гартмана. Динамическим диапазоном ДШГ является диапазон значений от минимального до максимального смещения энергетического центра тяжести фокального пятна, который может быть зафиксирован датчиком с определенными проектными параметрами. Динамический диапазон датчика в зависимости от анализируемого волнового фронта удобно представить в виде совокупности aberrаций типа наклон или дефокусировка, что будет подробнее рассмотрено ниже. Динамический диапазон измерения

aberrаций является одной из самых важных характеристик ДШГ, так как определяет границы применения конкретного датчика в определенных задачах. Поэтому анализ точности динамического диапазона ДШГ является важной и актуальной задачей.

Калибровка ДШГ по плоскому волновому фронту (метод калибровки по наклону датчика)

В работе [1] для калибровки по плоскому волновому фронту предложена схема по наклонам ДШГ. Схема установки для такого метода калибровки показана на рис. 2, из которого видно, что ДШГ закреплен в прецизионную оправу, с помощью которой можно точно регулировать угол его наклона. Винт для поворота оправы заранее откалиброван с известным соответствием одного деления углу поворота датчика. При этом ось вращения оправы лежит в плоскости массива линзового раstra ДШГ. В результате поворота датчика возникает aberrация типа наклон (tilt).

1) Запись референса при нулевом наклоне датчика Шэка-Гартмана



2) Поворот датчика на известный угол с помощью прецизионной оправы. Запись коэффициентов Цернике C_1^1 , соответствующих aberrации типа наклон.

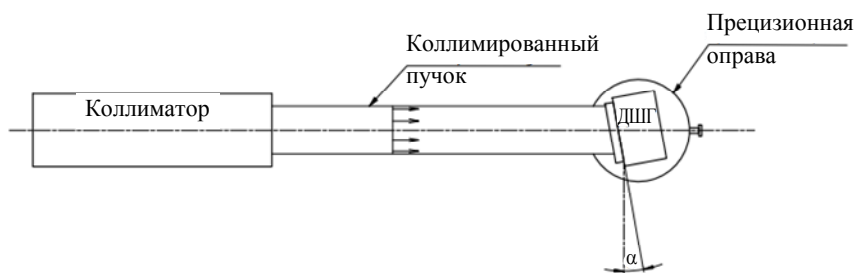


Рис. 2. Схема установки для калибровки ДШГ по наклону.

Теоретически абберация типа наклон может быть рассчитана как произведение диаметра апертуры ДШГ D и тангенса угла α , на который повернут датчик:

$$PV_{\text{теор}} = D \operatorname{tg}(\alpha). \quad (2)$$

На практике программа, реконструирующая волновой фронт, вычисляет тангенс угла по заданному из паспорта фокусному расстоянию линз $f_{\text{теор}}$ и смещению фокальных пятен S , усредненному по микролинзовому растру:

$$PV_{\text{практ}} = D \frac{S}{f_{\text{теор}}}. \quad (3)$$

Поворачивая датчик в оправе на целое количество делений, можно составить таблицу данных $PV_{\text{теор}}$ и $PV_{\text{практ}}$ при разных углах поворота. Если их значения не соответствуют друг другу, значит, фокусное расстояние задано неправильно в программном обеспечении и его значение следует уточнить. Так как f обратно пропорционально PV , из пропорции можно получить реальное значение фокусного расстояния:

$$f_{\text{практ}} = \frac{PV_{\text{практ}}}{PV_{\text{теор}}} f_{\text{теор}}. \quad (4)$$

Далее полученное значение можно внести в качестве расчетного параметра в программное обеспечение, которое производит реконструкцию фазы ВФ.

Основные достоинства метода калибровки по наклону – простота реализации и хорошо разработанный алгоритм расчета. Также использование плоского опорного ВФ дает преимущество в расчетах, так как шаг матрицы микролинз P и шаг гартманнограммы Q равны.

К недостаткам метода следует отнести отсутствие приборов, с помощью которых можно контролировать плоскостность опорного ВФ, а также то, что источники

плоского волнового фронта не сертифицируются. При этом необходимо знать с высокой точностью угол поворота оправы. Не зная степени соответствия записанного эталонного ВФ (референса) плоскому волновому фронту, трудно судить и о точности проведенных измерений. Например, если такой записанный опорный ВФ будет иметь дефокус, то при измерениях сферического ВФ с таким же дефокусом ДШГ покажет, что измеряемый фронт – плоский.

Также метод наклона ДШГ позволяет точно определить только один проектный параметр датчика – расстояние между микролинзовым растром и фотодетектором f , что в совокупности с проблемами использования плоского референса значительно снижает точность восстановления волнового фронта.

Калибровка ДШГ по сферическому волновому фронту (метод абсолютной калибровки)

Преимуществами использования для калибровки сферического ВФ является то, что эталонный сферический волновой фронт можно получить на выходе хорошо обработанного торца одномодового волокна. Кроме того, радиус волнового фронта, приходящего к датчику Шэка-Гартмана, равен расстоянию между источником излучения и датчиком. А зная это расстояние, можно утверждать, что карта измеренного волнового фронта составлена отталкиваясь от сферического волнового фронта с конкретным радиусом кривизны.

Одной из трудностей абсолютной калибровки является сложность совмещения оси одномодового волокна, выполняющего роль точечного источника излучения, с оптической осью микролинзового растра ДШГ (центр входной апертуры датчика). Для преодоления этой трудности в установку для калибровки вводят вспомогательную систему юстировки. Например, в работе [2] такую систему составляют ла-

зер, зеркало и светоделительный куб. Лазер и зеркало формируют оптическую систему, из которой с помощью светоделителя выходят два противоположно направленных параллельных пучка. Положение светоделителя выбирается так, чтобы один из пучков попадал на выходной торец волокна, тогда противоположный покажет, где нужно расположить центр входной апертуры ДШГ. Однако изготовить и точно установить такую систему юстировки – трудоёмкая инженерная задача. Также сложно опираться на измерения,

проведенные по такой схеме, так как перед каждым измерением необходимо убирать светоделитель, а при смене расстояния между волокном и датчиком устанавливать его обратно для калибровки оси.

В работах [3, 4] предложена альтернативная схема установки для абсолютной калибровки, показанная на рис. 3.

Достоинство представленной на рис. 3 схемы в простоте реализации и в отсутствии каких-либо изменений во время проведения эксперимента, кроме изменения расстояния между источником и ДШГ.

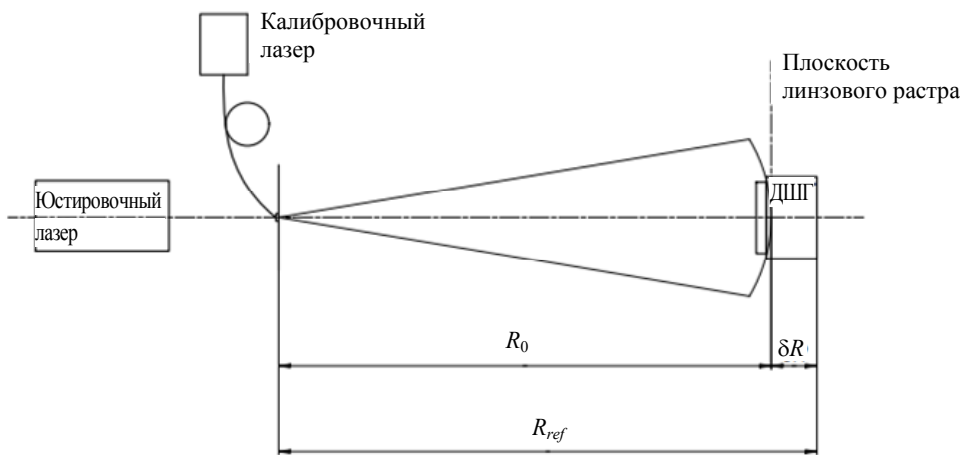


Рис. 3. Схема установки для абсолютной калибровки.

Для того, чтобы раскрыть суть метода абсолютной калибровки, рассмотрим анализ датчиком Шэка-Гартмана сферического ВФ. На рис. 4 видно, что гартманограмма сферического ВФ представляет собой расходящиеся от центра равноудаленные друг от друга на расстояние Q фокальные пятна. При этом смещение пятна σ от оптической оси микролинзы при удалении от центра полной апертуры ДШГ увеличивается между соседними субапертурами.

Используя приближения Френеля для сферической волны, запишем выражение для фазы сферического ВФ:

$$\varphi(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2R_0}. \quad (5)$$

Подставив формулу (5) в уравнение (1), получим выражение для смещения фокальных пятен по оси x и y :

$$\sigma_x = \frac{f}{R_0} x_{ij}, \quad \sigma_y = \frac{f}{R_0} y_{ij}. \quad (6)$$

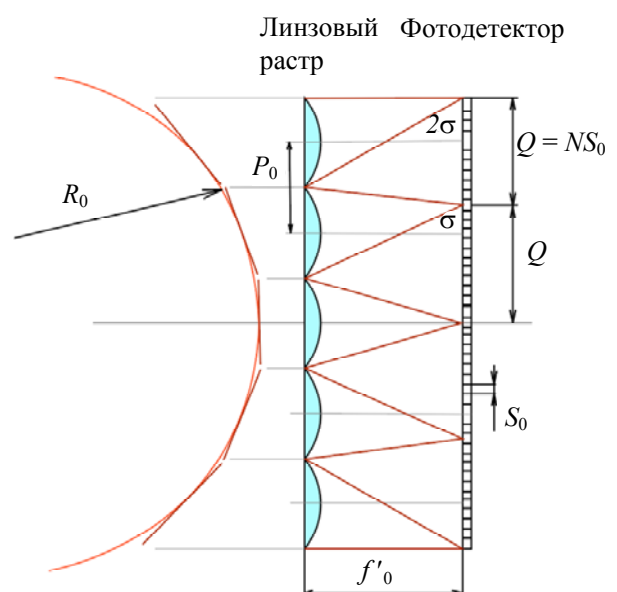


Рис. 4. Измерение сферического волнового фронта.

Смещение σ увеличивается между соседними субапертурами на $\sigma = \sigma(x_{i,j}) - \sigma(x_{i-1,j})$. Поэтому расстояния между соседними фокальными пятнами гартманограммы постоянны, и их можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} Q_x &= (iP_0 + \sigma(x_{i,j})) - ((i-1)P_0 + \sigma(x_{i-1,j})) = \\ &= P_0 + \frac{f_0}{R_0}(x_{ij} - x_{i-1,j}) = P_0 \left(1 + \frac{f_0}{R_0} \right). \end{aligned}$$

Аналогично получаем равенство

$$Q_y = P_0 + \frac{f_0}{R_0}(y_{ij} - y_{i-1,j}) = P_0 \left(1 + \frac{f_0}{R_0} \right).$$

Следовательно, справедливо выражение

$$Q = N \times S_0 = Q_x = Q_y = P_0 \left(1 + \frac{f_0}{R_0} \right), \quad (7)$$

где P_0 – шаг линзового раstra; f_0 – расстояние между линзовым растром и фотодетектором; R_0 – расстояние между источником излучения и плоскостью линзового раstra; N – количество пикселей между пятнами гарманограммы, а S_0 – их размер.

Из формулы (7) можно выразить кривизну исследуемого сферического ВФ в зависимости от паспортных параметров ДШГ (f_0, P_0, S_0):

$$\rho_{ref} = \frac{1}{R_0} = \left(\frac{NS_0}{P_0} - 1 \right) \frac{1}{f_0}. \quad (8)$$

Для того, чтобы определить, насколько параметры (f_0, S_0, P_0) отличаются от паспортных, вводятся поправки δf , δS и δP , для которых справедливы следующие отношения:

$$\begin{aligned} S &= S_0 + \delta S, \quad \frac{\delta S}{S} \ll 1; \\ P &= P_0 + \delta P, \quad \frac{\delta P}{P} \ll 1; \\ f &= f_0 + \delta f, \quad \frac{\delta f}{f} \ll 1. \end{aligned} \quad (9)$$

Однако из-за введенных отклонений измеренная кривизна будет отличаться от реальной на величину:

$$\begin{aligned} \delta \rho &= \rho_m - \rho_{ref} = \\ &= -\rho_{ref} \frac{\delta f}{f_0} - \frac{1}{f_0} \left(\frac{\delta P}{P_0} - \frac{\delta S}{S_0} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

С помощью линейной регрессии уравнения (10) можно провести корректировку проектных параметров ДШГ – (f, P, S). Поскольку погрешности δP и δS суммируются, достаточно корректировать только один из параметров: P или S . Исходными данными для калибровки являются расстояния между соседними фокальными пятнами гартманограммы для радиуса кривизны ρ_{ref} , выраженные в пикселях. Измеряя эталонные ВФ для различных расстояний R_{ref} , получим совокупность точек на графике $\delta \rho(\rho_{ref})$.

Далее с помощью метода наименьших квадратов [5] можно определить оптимальную кривую, которая будет удовлетворять измерениям, а коэффициенты этой кривой будут соответствовать погрешностям определяемых параметров δS , δf или δP .

Основной проблемой, ограничивающей точность абсолютной калибровки, является сложность определения точного расстояния между выходным торцом волокна и плоскостью матрицы микролинз ДШГ. Однако с помощью метода абсолютной калибровки можно точно определить не только расстояние между микролинзовым растром и фотодетектором, но и значение шага раstra или размер пикселя фоточувствительной матрицы. А значения этих проектных параметров датчика участвуют в вычислении его динамического диапазона. Т. е. с помощью абсолютной калибровки можно также уточнить динамический диапазон датчика Шэка-Гартмана.

Расчет точности динамического диапазона ДШГ в aberrациях типа наклон и дефокусировка

Динамический диапазон ДШГ – это максимальная амплитуда aberrации, регистрируемой датчиком. Для случая плоского волнового фронта динамический диапазон обычно определяется как максимальный наклон, регистрируемый ДШГ.

Рассмотрим прохождение плоского ВФ через одну микролинзу растра, показанное на рис. 5.

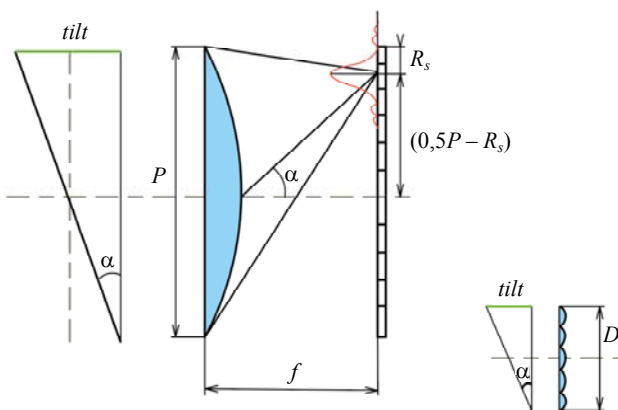


Рис. 5. Определение динамического диапазона: P – диаметр микролинзы, f – расстояние между линзовым растром и фотодетектором, $2R_s$ – размер пятна Эйри, D – диаметр полной апертуры, α – угол наклона ВФ.

Из-за волновой природы света, в фокальной плоскости микролинзы (которая должна соответствовать плоскости фотодетектора) наблюдается дифракционная картина Фраунгофера [6]. Так как большинство микролинзовых растров изготавливается с микролинзами прямоугольной формы, дифракционная картина будет описываться функцией $\left(\frac{\sin x}{x}\right)^2$ и состоит из последовательных светлых и темных пятен, параллельных сторонам прямоугольника. Причем на центральный максимум приходится около 85 % энергии света. Поэтому считается, что пятно гарманнограммы не потеряно, пока в области фотодетектора, соответствующей микролинзе,

еще находится первый нуль интенсивности после максимума в центре картины Эйри – R_s .

Из рис. 5 видно, что конечное выражение для динамического диапазона, выраженное в aberrации типа наклон, имеет вид:

$$tilt = D \times \frac{\left(0,5 \times P - \frac{\lambda \times f}{P}\right)}{f}, \quad (11)$$

где λ – длина волны.

Для сферического волнового фронта (рис. 4) определение динамического диапазона отличается. Так как фокальные пятна гартманнограммы сферического ВФ расходятся, динамический диапазон будет определяться по крайней субапертуре. Как только фокальное пятно от крайней микролинзы перестает попадать в соответствующую ей область фотодетектора, часть гартманнограммы на краю считается потерянной. Поэтому сначала для крайней субапертуры рассчитывается максимальная aberrация типа *tilt*, а затем по ней можно определить максимальную aberrацию типа *defocus*. Для этого необходимо рассмотреть зависимости волновой aberrации от зрачковых координат (профиль волнового фронта), показанные на рис. 6.

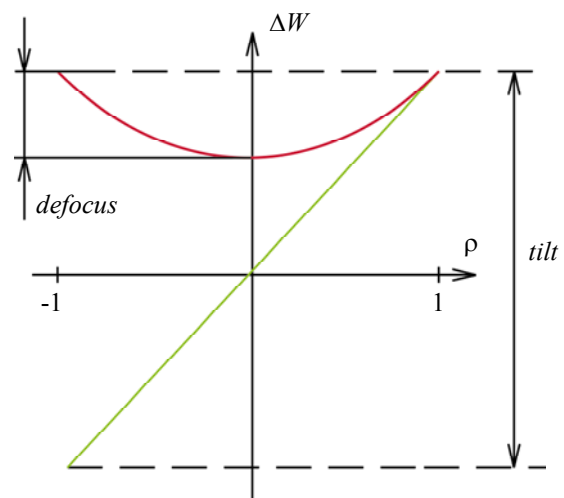


Рис. 6. Зависимости волновой aberrации от зрачковых координат.

Далее решение задачи сводится к нахождению точки касания профиля aberr-

рации $tilt$ и профиля aberrации $defocus$ на краю зрачка $\rho = 1$. Для этого можно найти производную $\Delta W_{defocus}$ и приравнять её к ΔW_{tilt} .

Конечная формула для динамического диапазона по aberrации типа дефокусировка выглядит следующим образом:

$$defocus = \frac{tilt}{4} = D \times \frac{\left(0,5 \times P - \frac{\lambda \times f}{P}\right)}{4f}. \quad (12)$$

Для наглядности в таблице приведен динамический диапазон, рассчитанный

при длине волны источника излучения $\lambda = 650$ нм по aberrации типа наклон и по aberrации типа дефокусировка для датчика Шэка-Гартмана фирмы «Активная оптика НайтН».

Проведем оценку погрешности динамического диапазона по aberrациям типа наклон и типа дефокусировка. Для этого предположим, что проектные параметры датчика (P, f, D) имеют заданные погрешности ($\delta P, \delta f, \delta D$). При этом измеренные значения используются для вычисления функции $tilt(P, f, D)$.

Таблица

Динамический диапазон датчика Шэка-Гартмана с определенными проектными характеристиками

Проектные характеристики ДШГ					Динамический диапазон	
f , мм	D , мм	P_{xy} , мкм	S_{xy} , мкм	$N_x \times N_y$, px	$tilt_{max}$, мкм	$defocus_{max}$, мкм
3,2	11,26	136	6	752×1480	185	46

Если погрешности в P, f, D независимы и случайны, то погрешность в $tilt$ можно выразить следующим образом [5]:

$$\delta tilt = \sqrt{\left(\frac{d}{dP} tilt(P, f, D) \times \delta P\right)^2 + \left(\frac{d}{df} tilt(P, f, D) \times \delta f\right)^2 + \left(\frac{d}{dD} tilt(P, f, D) \times \delta D\right)^2}.$$

С учетом уравнения (12) выражение для погрешности динамического диапазона в $defocus$ имеет вид:

$$\delta defocus = \frac{1}{4} \delta tilt.$$

Будем изменять одну из погрешностей с некоторым шагом при условии, что две

другие остаются неизменными. Полученное семейство графиков (рис. 7) показывает зависимость погрешности динамического диапазона по aberrациям типа наклон и типа дефокусировка от погрешности одного из проектных параметров датчика.

Распределенными погрешностями для расчета приняты величины: $\delta f = 0,01$ мм; $\delta P = 0,001$ мм; $\delta D = 0,1$ мм.

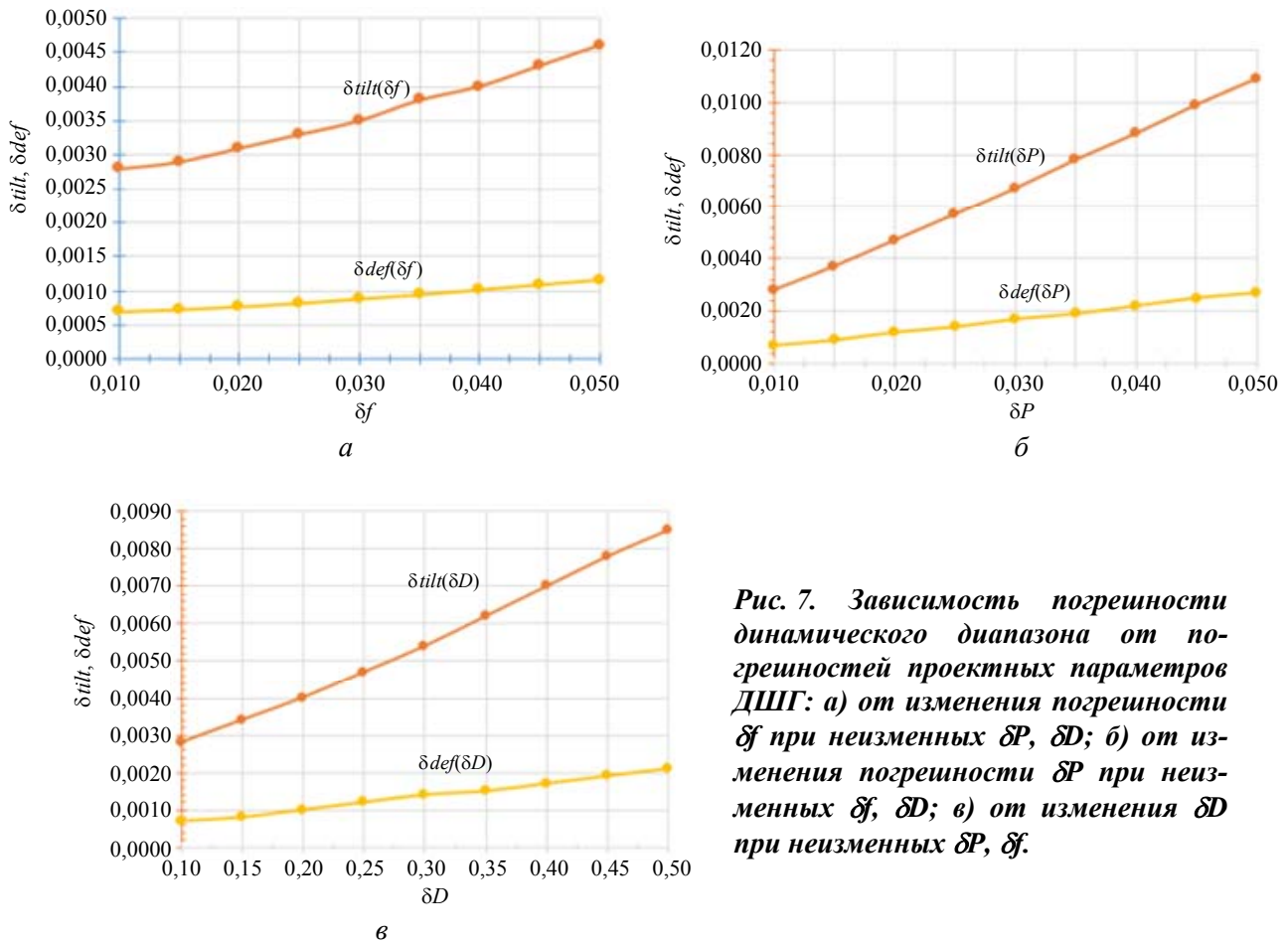


Рис. 7. Зависимость погрешности динамического диапазона от погрешностей проектных параметров ДШГ: а) от изменения погрешности δf при неизменных δP , δD ; б) от изменения погрешности δP при неизменных δf , δD ; в) от изменения δD при неизменных δP , δf .

Заключение

В работе проведен сравнительный анализ существующих методов калибровки датчика волнового фронта Шэка-Гартмана, а именно, по плоскому волновому фронту (калибровка по наклону датчика) и сферическому волновому фронту (абсолютная калибровка). При этом был проведен общий анализ достоинств и недостатков методов калибровки с учетом их динамического диапазона.

Проанализировав полученные графики рис. 7, можно сделать вывод о том, что для обоих выражений динамического диапазона изменение погрешности шага микролинзового раstra дало наиболее сильную зависимость. Только метод абсолютной калибровки дает возможность определить точное значение этого проектного параметра и, следовательно, уточнить динамический диапазон ДШГ. В случае абсолютной калибровки динамический диапазон

расфокусировки напрямую влияет на диапазон расстояний между источником излучения и ДШГ, на которых можно проводить измерения, т. е. определяет границы применения конкретного датчика Шэка-Гартмана.

Показано, что погрешность динамического диапазона калибровки по сферическому ВФ при одних и тех же погрешностях проектных параметров меньше, чем при калибровке по плоскому ВФ. Например, при $\lambda = 650$ нм для погрешности расстояния между микролинзовым растром и камерой $\delta f = 0,3$ мм (рис. 7, а) при неизменных погрешности шага раstra $\delta P = 0,001$ мм и погрешности полной апертуры датчика $\delta D = 0,1$ мм погрешность динамического диапазона по абберрации типа наклон $\delta tilt = 0,0035$ мм, а погрешность динамического диапазона по абберрации типа дефокусировка $\delta def = 0,00088$ мм. Однако методика проведения абсолютной

калибровки и схема установки для такой калибровки являются менее разработанными, чем калибровка по наклону ДШГ. Поэтому на данный момент целесообразнее проводить калибровку датчика Шэка-Гартмана по двум методам, прорабатывая требования к их аппаратной реализации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nikitin A. N., Kudryashov A. V., Sheldakova J., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. // SPIE Conferences and Exhibitions «Photonics West-2015», 7–12

February 2015, San Francisco, California, United States, P. 9369-5.

2. Chernishov A., Sterr Uwe, Riehle Fritz, Helmcke Jurgen, Pfund Johannes. // Appl. Opt. 2005. Vol. 44. P. 6419.

3. Nikitin A. N., Galaktionov I., Sheldakova J., Kudryashov A., Baryshnikov N., Denisov D., Karasik V., Sakharov A. // SPIE "Photonic Instrumentation Engineering VI", 2019.

4. Jinsheng Yang, Ling Wei, Hongli Chen, Xuejun Rao, Changhui Rao. // Optics Communications. 2009. Vol. 283 (6). P. 910.

5. Те́йлор Дж. Введение в теорию ошибок / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.

6. Стюард И. Г. Введение в фурье-оптику / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.

PACS: 07.60.-j

Comparative analysis of methods for calibration of a Shack-Hartmann wavefront sensor

D. G. Denisov¹, A. A. Zolotukhina¹, A. V. Kudryashov², and A. N. Nikitin²

¹ Bauman Moscow Technical University
5 2-nd Baumanskaya st., Moscow, 105005, Russia
E-mail: denisov_dg@mail.ru

² Institute of Geosphere Dynamics of the Russian Academy of Science
38 Leninsky Prospekt, Moscow, 119334, Russia

Received March 26, 2021

This paper is devoted to a comparative analysis of the methods for calibrating the Shack-Hartmann wavefront sensor: on the plane wavefront (calibration by turning the sensor) and spherical wavefront (absolute calibration). For comparison, a general analysis of the advantages and disadvantages of calibration methods was carried out, including the creation of a reference wavefront and the determination of the exact geometric parameters of the sensor. The geometric parameters of the Shack-Hartmann wavefront sensor are used in the reconstruction of the measured wavefront and determine such parameters of the Shack-Hartmann sensor as the dynamic range and sensitivity. Also, for numerical comparison, an analysis of the errors of the dynamic range, determined by aberrations such as tilt and defocus, was carried out, and the dependences of these errors on the error of the geometric parameters of the sensor were constructed.

Keywords: wavefront sensor, absolute calibration, dynamic range, errors.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-2-153-163

REFERENCES

1. A. N. Nikitin, A. V. Kudryashov, J. Sheldakova, D. Denisov, V. Karasik, and A. Sakharov, *SPIE Conferences and Exhibitions «Photonics West-2015»*, 7–12 February 2015, San Francisco, California, United States, p. 9369-5.
2. A. Chernishov, Uwe Sterr, Fritz Riehle, Jurgen Helmcke, Johannes Pfund, *Appl. Opt.* **44**, 6419 (2005).
3. A. N. Nikitin, I. Galaktionov, J. Sheldakova, A. Kudryashov, N. Baryshnikov, D. Denisov, V. Karasik, and A. Sakharov, *SPIE "Photonic Instrumentation Engineering VI"* (2019).
4. Jinsheng Yang, Ling Wei, Hongli Chen, Xuejun Rao, Changhui Rao, *Optics Communications* **283** (6), 910 (2009).
5. J. R. Taylor, *An introduction to error analysis*, 2ed (University Science Books, California, 1982).
6. E. G. Steward, *Fourier Optics: An Introduction* (1989).