

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 681.7.013.7

О.В. Печинская, Е.Д. Сангаджиева

*Московский энергетический институт (технический университет), Россия,
111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: zhukovaOV@mpei.ru*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВОРОТА ОСИ ОБЪЕКТИВА К ОСИ МАТРИЦЫ
ВИДЕОКАМЕРЫ НА ГЛУБИНУ РЕЗКОСТИ**

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния поворота оси фотографического объектива к оси матрицы видеокамеры в оптической системе, оснащённой адаптером Шаймпфлюга, для предмета на конечном расстоянии. Конкретизируются понятия глубины резко изображаемого пространства и глубины резкости для объектива, наклонного к оптической оси системы. Предложен алгоритм определения глубины резкости по изображению тестового экрана.

ГЛУБИНА РЕЗКОСТИ, ГРИП, АДАПТЕР ШАЙМПФЛЮГА, ОБЪЕКТИВ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящей работе приведены результаты исследования изменения глубины резкости в зависимости от угла наклона объектива относительно матрицы фотоприёмника. При оптических исследованиях потоков конструктивно не всегда возможно разместить оптическую систему таким образом, чтобы плоскость объектива была параллельна плоскости наблюдений. Например, при исследовании методом корреляции фоновых изображений деформации крыла самолета, оптика находится либо в салоне, либо на фюзеляже [1]. Другой пример: исследование оптическими методами вибраций крупногабаритных конструкций с возможностью размещения оптической системы в ограниченном пространстве (в укрытии).

Ограниченные возможности размещения ОС имеют ряд недостатков: выход исследуемой области из поля зрения, уменьшение глубины резкости, перспективные искажения. Эти недостатки можно исправить с помощью tilt & shift объективов [2-5] или адаптеров Шаймпфлюга.

Возможности, которые дают объективы с опцией наклона и сдвига:

- 1) изменить глубину резкости,
- 2) коррекция перспективных искажений,
- 3) получение полностью резких изображений наклонных протяжённых предметов.

Из перечисленных возможностей в сферу данного исследования входит возможность управления глубиной резкости. Для этого достаточно располагать возможностью наклона объектива. Фотообъективы с функцией наклона всегда могут быть заменены на адаптер Шаймпфлюга, который является усложненной модификацией обычного адаптера. Наклон объектива позволяет обеспечивать правильную фокусировку на любые снимаемые объекты

даже при недостаточной глубине поля. Или при наклоне объектива в обратном направлении, можно сфокусироваться на определенные части снимаемого предмета.

Основы такой фотосъёмки были заложены Жюлем Карпентье и Теодором Шаймпфлюгом в начале XX века [6]. В дальнейшем теория съёмки с коррекцией искажений была развита Гарольдом Мерклингером [7]. В его работе «Focusing the view camera» изложены оптические принципы съёмки фотокамерой с возможностью наклона и поворота объектива и фотоприёмной части, а также приведена масса полезных при фотосъёмке в различных условиях практических советов, расчётов, таблиц и графиков. Тем не менее, эта работа относится скорее к научно-популярным изданиям. Инструкции и описания к промышленно выпускаемым современным фотообъективам с функцией наклона и сдвига дают самые общие представления, необходимые для работы с объективом и предназначены для определённого круга пользователей – фотографов и фотохудожников.

Научных исследований, посвящённых регистрации высококачественных изображений в оптических системах с возможностью наклона объектива и/или матрицы очень мало. Однако необходимость в них ощущается как в связи с ростом числа задач, требующих применения усовершенствованных оптических систем, так и в связи с невозможностью скорректировать все недостатки изображений компьютерными методами.

ГЛУБИНА РЕЗКОСТИ И ГЛУБИНА РЕЗКО ИЗОБРАЖАЕМОГО ПРОСТРАНСТВА

Величину, характеризующую размер области резко изображаемого пространства в системах с наклонными объективами либо матрицами можно отсчитывать в пространстве предметов не вдоль оптической оси (как ГРИП для классических оптических систем), а перпендикулярно плоскости резкой фокусировки $L_{1,2}$ или вдоль плоскости, параллельной плоскости приёмника L_{PF} . Также возможен вариант отсчёта «вдоль луча» от объектива до некоторой точки изображения $K_{1,2}$ (см. рисунок 1) (т.е. в пространстве изображений вдоль плоскости матрицы), в пределах которого резкость наилучшая для данного кадра. Алгоритм оценки ширины этой области описан ниже. В случае необходимости определённую экспериментально величину глубины резкости можно пересчитать согласно правилам геометрической оптики в соответствующие величины в пространстве предметов. Для систем с наклоном объектива величина ГРИП определяется аналогично.

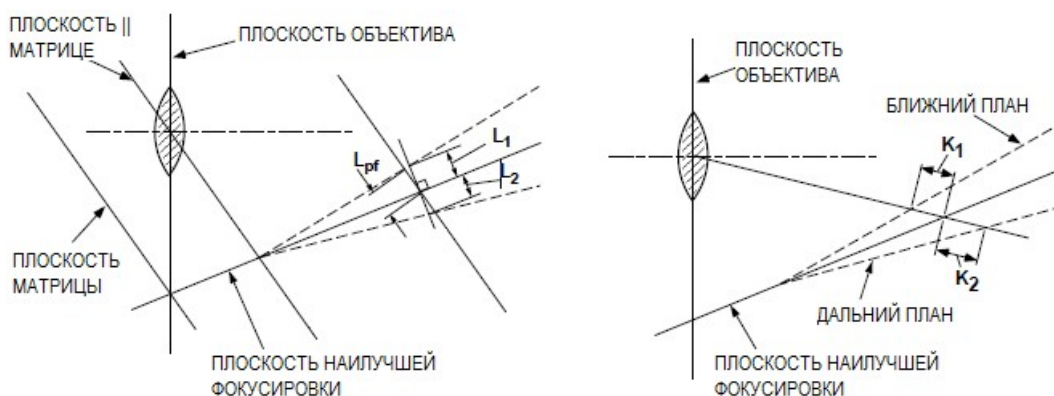


Рис. 1. К определению области резко изображаемого пространства в системах с наклоном матрицы [7]

Схема эксперимента

Для оценки зависимости глубины резкости объектива от угла наклона объектива была проведена серия экспериментов. Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2. В качестве фонового экрана использовался так называемый dot pattern: серые и чёрные соосные кружки на белом фоне. Измерения проводились для различных положений экрана относительно оптической оси: диапазон углов наклона θ от 0° до 80° с шагом $\Delta\theta=10^\circ$. Поворот объектива относительно оптической оси осуществлялся с помощью адаптера

Шаймпфлюга в интервале углов α от 0° до 20° с шагом $\Delta\alpha=5^\circ$. Диапазоны изменений углов выбраны таким образом, чтобы охватить полностью возможные варианты взаимного положения экрана и объектива. Расстояние от экрана до объектива вдоль оптической оси $l=1,5$ м.

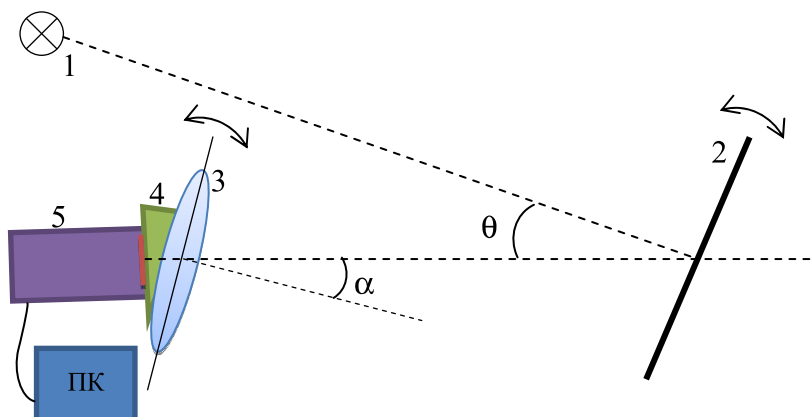


Рис. 2. Схема эксперимента: θ – угол между оптической осью и нормалью к фоновому экрану, α – угол между оптической осью и нормалью к объективу; 1 – подсветка, 2 – фонный экран, 3 – объектив, 4 – адаптер Шаймпфлюга, 5 – видеокамера, подключённая к персональному компьютеру.

Характеристики компонентов системы

- 1) Матричный приёмник UCMOS05100KPA:
 - сенсор Aptina MT9P001;
 - формат сенсора 1/2,5";
 - размер пиксела $2,2 \times 2,2$ мкм²;
 - разрешение 5,1 Мпикс;
 - частота кадров 5 к/с.
- 2) Тилт-адаптер LaVision Scheimpflug mount version3 со следующими конструктивными параметрами:
 - угол поворота от 0 до 20° ;
 - угол поворота в вокруг оптической оси камеры $0-360^\circ$ с последующей фиксацией;
 - крепление объектива F-mount, M42;
 - крепление камеры C-Mount, M42;
 - расстояние до матрицы камеры 17,5 мм;
 - максимальный размер матрицы 36×24 мм;
 - максимальный вес камеры для прямой поддержки до 2 кг;
 - вес 500 грамм;
 - габаритные размеры $83 \times 132 \times 29$ мм.
- 3) Объектив Nikon Nikkor 24мм 1:2,8:
 - фокусное расстояние 24 мм, ЭФР для Nikon DX 36 мм;
 - диафрагма от F/2.8 до F/22 (объектив имеет кольцо управления диафрагмой);
 - минимальная дистанция фокусировки 0,30 м;
 - вес 270 грамм.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ РЕЗКОСТИ

Глубина резкости может быть определена по степени изменения СКО каждого столбца матрицы изображения относительно нулевого

$$SKO_j = \text{stdev}(M^{<0>}, M^{<j>}), \quad (1)$$

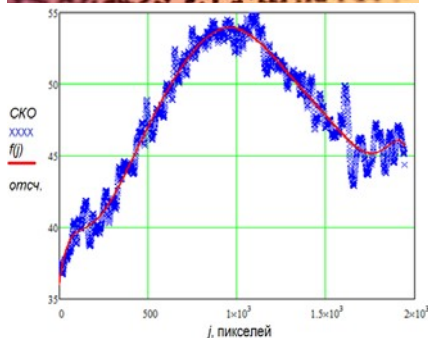
здесь $M^{<j>}$ - столбец матрицы M с индексом j , stdev – встроенная функция Mathcad, возвращает среднеквадратическое отклонение для совокупности элементов $M^{<0>}, M^{<j>}$.

СКО изменяется от столбца к столбцу, так ось поворота объектива параллельна столбцам изображения. При повороте вокруг горизонтальной оси сравнение следует выполнять построчно. При ориентации оси поворота объектива произвольным образом необходимо учитывать возможную целесообразность использования иного критерия определения изменения фокусировки по кадру. Стоит отметить, что, как правило, адаптеры Шаймпфлюга позволяют вращать камеру вокруг оптической оси, и, тем самым, согласовать ось поворота объектива со столбцами или строками изображения.

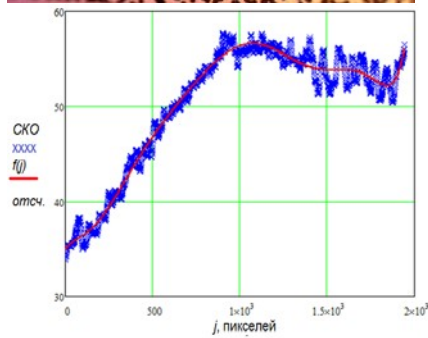
На рисунке 3 приведены примеры графиков зависимости СКО от номера столбца j . Для интерполяции результатов применялась встроенная функция interp в Mathcad, вектор коэффициентов полиномиальной регрессии – результат применения функции regress . Порядок полиномиальной регрессии может быть выбран по величине коэффициента детерминации k . Коэффициент детерминации определяется как квадрат коэффициента корреляции экспериментальных данных и данных модели

$$k = [\text{corr}(SKO, f(j))]^2, \quad (2)$$

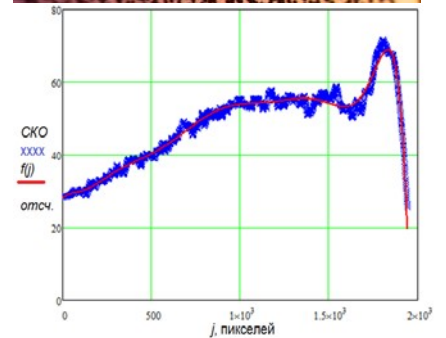
здесь $f(j)$ - функция интерполяции, SKO - вектор значений СКО, corr - встроенная функция Mathcad, возвращает коэффициент корреляции Пирсона элементов из SKO и $f(j)$. При значениях $k > 0,8$ считается, что результаты интерполированы с достаточной точностью.



$\alpha = 20^\circ$ $\theta = 0^\circ$
 $n = 10$ $k = 0,963$



$\alpha = 20^\circ$ $\theta = 30^\circ$
 $n = 10$ $k = 0,979$



$\alpha = 20^\circ$ $\theta = 50^\circ$
 $n = 10$ $k = 0,979$

Рис. 3. Примеры изображений фонового экрана dot pattern и графики СКО для различных положений объектива и экрана, в нижней строке указаны порядок регрессии n и коэффициент детерминации k .

В целом алгоритм обработки изображения может быть выражен блок-схемой, приведённой на рисунке 4.

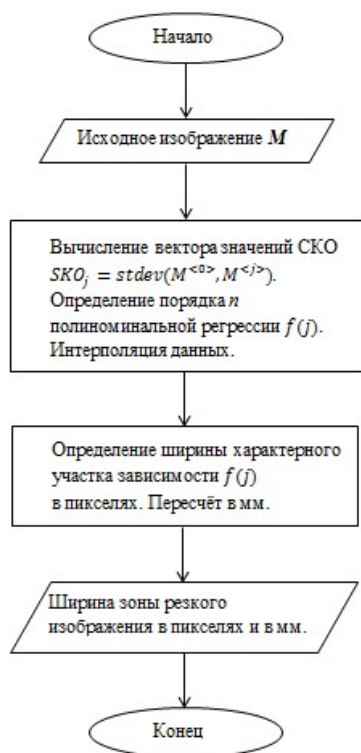


Рис. 4. Алгоритм определения глубины резкости

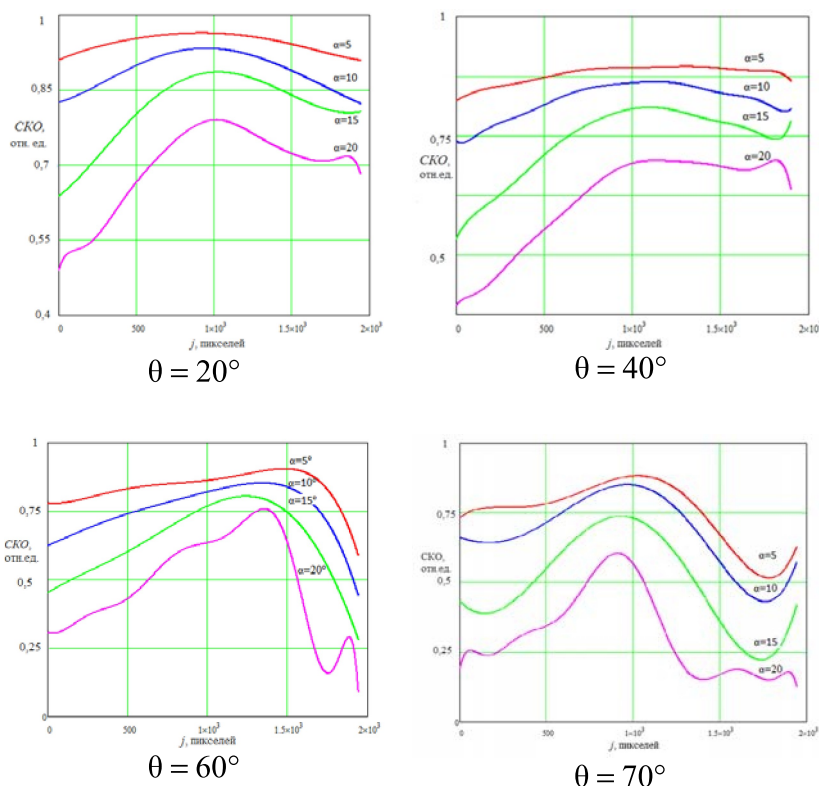


Рис. 5. Графики зависимости СКО для $\theta = 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ, 70^\circ$

Анализ результатов эксперимента

Примеры графиков зависимости СКО для фиксированного угла поворота экрана приведены на рисунке 5. Видно, что графики имеют схожий характер, индивидуальный для каждой группы, и имеют тенденцию к уменьшению ширины распределения по мере возрастания угла наклона объектива.

Хотя графики зависимости СКО от номера столбца выявляют качественный характер изменений резкости по полю изображения, открытым остаётся вопрос о выборе критерия, по которому можно было бы количественно оценить размер области, отображаемой резко. Критерии уровень $1/e$, полная ширина на полувысоте (FWHM) применимы не ко всем изображениям. Это объясняется, в том числе смещением центра фонового экрана относительно центра матрицы и появлением в кадре фрагментов изображений других предметов. Используемый в работе адаптер Scheimpflug mount version3 осуществляет только наклон и не обладает функцией сдвига shift, что не позволяет совместить центр фонового экрана с центром матрицы.

В дальнейшем предполагается оценка ширины области резко изображаемого пространства по величине дисперсии с выбором подходящей нормировки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый анализ показал принципиальную возможность оценки глубины резкости в оптических системах, оснащённых адаптером Шаймпфлюга, по изображениям фонового экрана. Для всех исследованных конфигураций ширина распределения уменьшается с ростом угла поворота объектива, что свидетельствует о сужении зоны резко изображаемого пространства при увеличении угла α , что не противоречит визуальным наблюдениям. Не стоит, однако, забывать, что данные результаты получены для произвольных комбинаций α и θ , в том смысле, что угол поворота экрана не соответствует плоскости наилучшей фокусировки для данного угла поворота объектива.

Для проведения количественного анализа необходимо определить критерий и нормировку, которые позволят получить числовые данные, согласующиеся с визуальными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **P. Ruzicka, J. Rydel, M. Josefik, F. Boden** Assessment of IPCT for wing deformation measurements on a small aircraft. *Advanced in-flight measurements techniques*, Research topics in aerospace. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2013. p.73-92.
2. Инструкция к объективам Canon EF Lens TS-E24mm f/3.5L TS-E45mm f/2.8 TS-E90mm f/2.8 СТ1-8522-003 ©CANON INC. 2006.
3. Объектив фотографический PCS ARSAT H(K) 2.8/35 Руководство по эксплуатации © ARAX INC. KIEV Ukraine 01042 www.araxfoto.com version 2 (5-25-2003).
4. Photographic Lens TS ARAX 2.8/35 Operation manual © ARAX INC. KIEV Ukraine 01042 www.araxfoto.com version 1 (06-17-2005).
5. User manual Schneider Kreuznach PC TILT/Shift Lenses PC-TS SUPER-ANGULON 2.8/50 HM PC-TS MAKRO-SYMMAR 4.5/90 HM PC-TS APO-DIGITAR 5.6/120 HM Aspheric © Schneider Optische Werke GmbH 2011/05-1069035.
6. **Harold M. Merklinger** Scheimpflug's Patent, Photo Techniques, Nov/Dec 1996.
7. **Harold M. Merklinger** Focusing the View Camera. Published by the author: Harold M. Merklinger P. O. Box 494 Dartmouth, Nova Scotia Canada, B2Y 3Y8. Internet Edition (v. 1.6.1) 8 Jan 2007.

O.V. Pechinskaya, E.D. Sangadzhieva, N.M. Skornyakova

*Moscow Power Engineering Institute (technical university), Russia,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st., 14, E-mail: zhukovaOV@mpei.ru*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE LENS AXIS INCLINATION TO THE CAMERA SENSOR AXIS ON DEPTH OF FIELD

In the report are represented the results of experimental investigation of the influence photographic lens axis inclination to the camera sensor axis for the optical system with Schiempflug adapter, for an object at a finite distance Terms depth of object and depth of field for the tilted lens are specified in this report. The algorithm to depth of field determine for dot pattern image is proposed.

DEPTH OF FIELD, DEPTH OF OBJECT, SCHIEMPFLUG ADAPTER, TILT LENS