

УДК 681.786.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЛУЧАЙНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ДОКОВОГО ПРОГИБОМЕРА

А.М. Алеев, А.А. Горбачёв, В.В. Коротаев, А.В. Пантюшин

Рассмотрена схема и принцип действия оптико-электронного прогибомера, предназначенного для непрерывного автоматизированного контроля продольного прогиба плавучего дока. Приведены результаты экспериментального исследования случайной составляющей погрешности прогибомера.

Ключевые слова: док плавучий, прогиб, прогибомер оптико-электронный.

Введение

Докование судов в плавучем доке представляет собой сложный и ответственный процесс, в течение которого должен производиться оперативный контроль различных параметров дока. Одним из важнейших параметров является величина прогиба, характеризующая продольную деформацию дока в целом. Обеспечение надежного и оперативного контроля прогиба дока является одной из приоритетных задач как для снижения риска возникновения аварийных ситуаций, так и для оптимизации времени выполнения операций докования.

На кафедре оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) СПбГУ ИТМО разработан оптико-электронный доковый прогибомер (ПОЭД), позволяющий проводить непрерывное автоматизированное измерение текущего значения прогиба дока бесконтактным методом. В настоящей работе описаны принцип действия и схема построения прогибомера, а также приведены методика и результаты экспериментальной проверки случайной составляющей его основной погрешности.

Схема построения и принцип работы прогибомера

Прогибомер реализован по схеме двухканальной оптико-электронной системы (ОЭС) контроля смещений (рис. 1). В данной схеме базовый блок (ББ), задающий приборную систему координат, устанавливается в центральной части топ-палубы дока. В своем составе ББ содержит два фотоприемных модуля, выполненных в виде цифровых камер, развернутых друг относительно друга на угол 180° . Такое расположение фотоприемных модулей позволяет образовать два измерительных канала, каждый из которых предназначен для регистрации смещения одной из активных реперных меток – МР1, МР2, закрепленных на корме и носу дока по обе стороны от ББ.

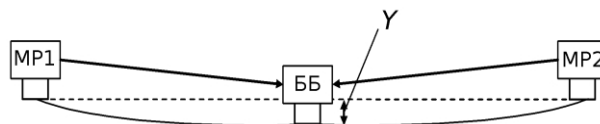


Рис. 1. Схема двухканальной ОЭС контроля смещений

Контроль смещений меток позволяет дифференцированно определять деформации носовой и кормовой частей дока относительно его центральной части, которые в общем случае не равны друг другу. При симметричном расположении меток относительно ББ величина прогиба дока Y определяется как полусумма их смещений. По конструктивным требованиям схема размещения блоков прогибомера может быть и несимметричной, что приводит к введению весовых коэффициентов для смещений меток при расчете величины прогиба. Величины данных коэффициентов определяются из конкретных условий взаимного положения меток и базового блока.

Измерительная схема прогибомера, приведенная на рис. 2, состоит из двух одинаковых измерительных каналов, развернутых друг относительно друга на 180° в горизонтальной плоскости. Каждый из каналов содержит активную реперную метку (МР1, МР2), выполненную в виде полупроводникового излучающего диода (ПИД), излучение которого регистрируется фотоприемным модулем (ФМ1, ФМ2), состоящим из объектива (Об1, Об2) и видеокамеры (ВК1, ВК2) с КМОП-фоточувствительной матрицей.

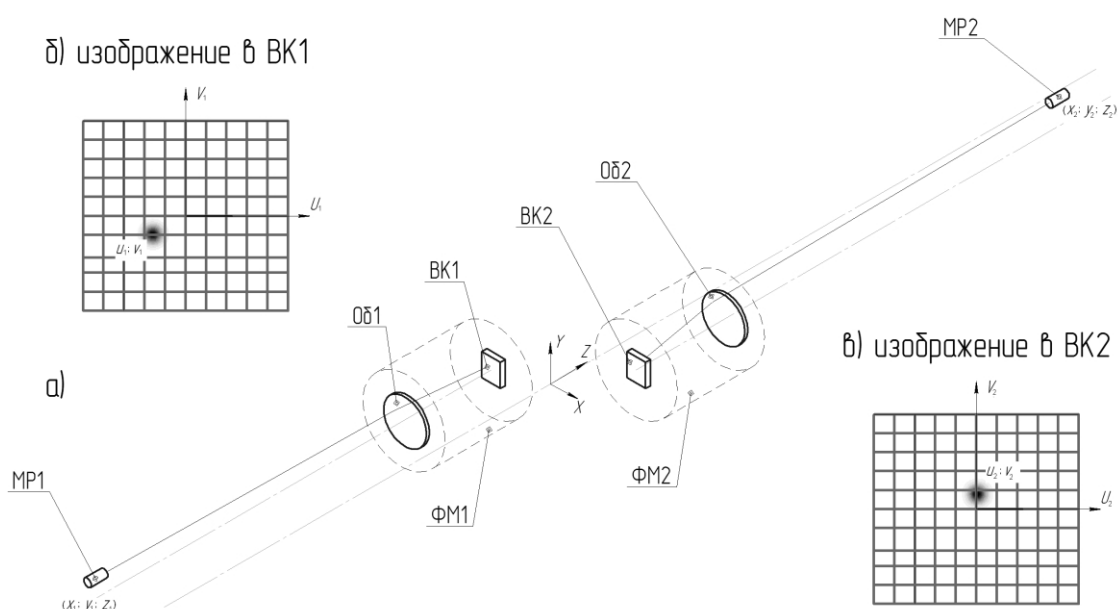


Рис. 2. Измерительная схема прогибомера:
 а – схема измерительных каналов; б, в – изображения меток, сформированные
 видеокамерами 1 и 2 соответственно

Видеокамеры обоих каналов через интерфейс USB подключены к промышленному компьютеру, входящему в состав блока обработки (БО) и выполняющему функцию анализа изображений с целью определения смещений реперных меток и расчета величины прогиба.

Алгоритм работы прогибомера – следующий. БО управляет режимом работы ПИД реперных меток MP1 и MP2 так, чтобы в каждом из каналов фиксировалось два изображения пространства, лежащего в поле зрения объектива: первое – при излучающем ПИД (рис. 3, а), второе – при неизлучающем (рис. 3, б).

Обработка полученных таким образом пар изображений в БО осуществляется в два этапа. На первом этапе проводится выделение из фона изображения метки с помощью алгоритма межкадровой разности. Из изображения при излучающем ПИД «вычитается» изображение при неизлучающем ПИД, в результате чего получается изображение (рис. 2, б, в; рис. 3, в), очищенное от фона, общего для двух кадров. Применение данного алгоритма позволяет достаточно простым в реализации способом эффективно выделить изображение метки и уменьшить влияние различного рода помех, одинаково присутствующих на обоих кадрах серии. Однако этот подход не позволяет избавиться от присутствия на результирующем изображении такого рода объектов, как следы от движущихся объектов, блики, вызванные излучением ПИД реперной метки и других объектов, изменяющихся во времени за период съемки [1, 2].

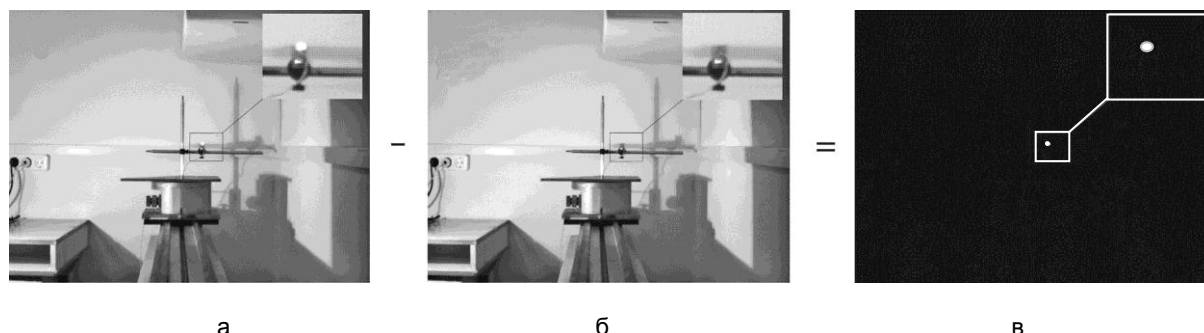


Рис. 3. Пояснение к алгоритму вычисления межкадровой разности: изображение при излучающем ПИД (а); изображение при неизлучающем ПИД (б); очищенное от фона изображение (в)

На втором этапе очищенные от фона изображения анализируются на предмет поиска их энергетических центров тяжести, принимаемых за центры изображений (u_1, v_1) ПИД 1 (рис. 2, б) и (u_2, v_2) ПИД 2 (рис. 2, в).

Поскольку фактически проводится измерение координат точечного источника, изображение которого занимает небольшую часть матрицы, то оценка координат центра тяжести проводится в некоторой области вокруг элемента с максимальной освещенностью в соответствии с выражениями [3]

$$u = \frac{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} i \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}}{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}},$$

$$v = \frac{\sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} j \sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} E_{i,j}}{\sum_{i=U_m-k}^{U_m+k} \sum_{j=V_m-l}^{V_m+l} E_{i,j}},$$

где $E_{i,j}$ – амплитуда видеоимпульса; m, n – число строк и столбцов матрицы ПОИ; U_m, V_m – координаты элемента с наибольшим сигналом; k, l – размер области расчета по горизонтали и вертикали соответственно. Для увеличения быстродействия системы поиск элемента с максимальной освещенностью производится, исключая определенные строки и столбцы. Такой поиск элемента основан на том факте, что изображение ПИД занимает несколько элементов [3].

После нахождения элемента с максимальной освещенностью проводится уточнение его положения в выбранном окне без пропуска строк и столбцов с целью снижения риска возникновения ошибок. На основе найденных координат изображений ПИД рассчитываются величины смещений меток в вертикальном направлении в каждом из каналов:

$$y = (u - U_0) \cdot M_u,$$

где U_0 – координата элемента, соответствующая положению метки без прогиба; M_u – масштабный коэффициент, определяемый при калибровке системы.

При симметричном расположении меток относительно базового блока величина прогиба определяется как полусумма вертикальных смещений меток в каждом из каналов:

$$Y = \frac{y_1 + y_2}{2}.$$

Измеренные смещения реперных меток в обоих каналах y_1, y_2 и величина прогиба Y отображаются на дисплее, подключенном к БО через VGA-интерфейс. Также эти данные могут быть переданы в автоматизированную систему управления доком в цифровом виде по интерфейсу RS-485.

Экспериментальная оценка случайной составляющей основной погрешности прогибомера

При калибровке измерительных каналов подбором коэффициентов M_u удается практически полностью исключить влияние систематической погрешности на результат измерения смещений меток. Таким образом, инструментальная погрешность прибора после калибровки определяется величиной случайной составляющей основной (возникающей при нормальных условиях) погрешности.

Измерение величины случайной погрешности проводилось поочередно в каждом из каналов. Структура измерительного стенда представлена на рис. 4: на расстоянии 17 м от базового блока 1 на моторизованном трансляторе 4 закреплена реперная метка 3. Моторизованный транслятор 4 управляется персональным компьютером 5, в который непрерывно передаются данные о величине смещения метки от блока обработки 2.

В эксперименте был задействован прогибомер со следующей элементной базой. В одном канале установлена цветная 5-мегапиксельная камера VEC-545 (ООО «ЭВС», г. Санкт-Петербург) со следующими параметрами: разрешение 1280×960 пикселей, частота кадров 15 Гц. Во втором канале установлена черно-белая 1,3-мегапиксельная камера VAA-135 (ООО «ЭВС», г. Санкт-Петербург), с параметрами: разрешение 1280×1024 пикселей, частота кадров 7,5 Гц. В обоих каналах установлены объективы Юпитер-11, $f' = 135$ мм. В качестве излучателей реперных меток использованы инфракрасные ПИД Kingbright L-53SF6C, $\lambda = 860$ нм. В блоке обработки установлен промышленный компьютер Lippert CRR-945GSE с центральным процессором Intel Atom N270.

Измерения величины случайной составляющей основной погрешности в каждом из каналов были проведены по следующей методике. С помощью моторизованного транслятора Standa 8MT160-300 задавалось перемещение реперной метки на величину 290 мм с шагом 10 мм в вертикальном направлении сверху вниз и обратно (один цикл измерений, содержащий 60 точек). Всего при проверке каждого из каналов произведено по 8 циклов измерений, причем в каждой точке производилась запись одного результата измерения смещения метки.

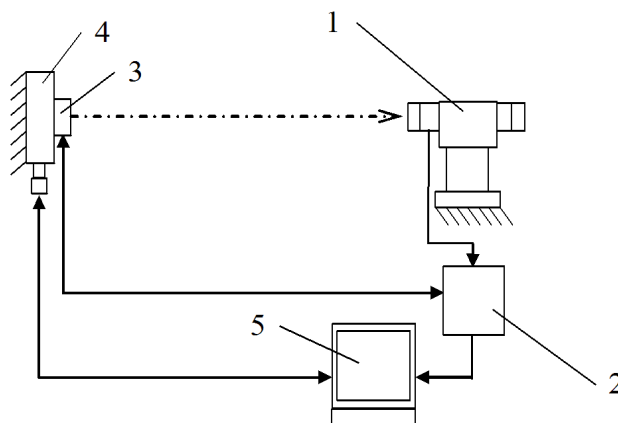


Рис. 4. Общий вид экспериментального стенда:
 1 – базовый блок; 2 – блок обработки; 3 – реперная метка; 4 – моторизованный транслятор;
 5 – ПК управления экспериментом

Среднее квадратическое отклонение (СКО) показаний прогибомера в каждой точке в одном канале определяется выражением

$$s = \sqrt{s_1^2 + s_2^2},$$

где s_1, s_2 – СКО измерений смещения метки в прямом и обратном направлениях.

Результаты эксперимента представлены на рис. 5.

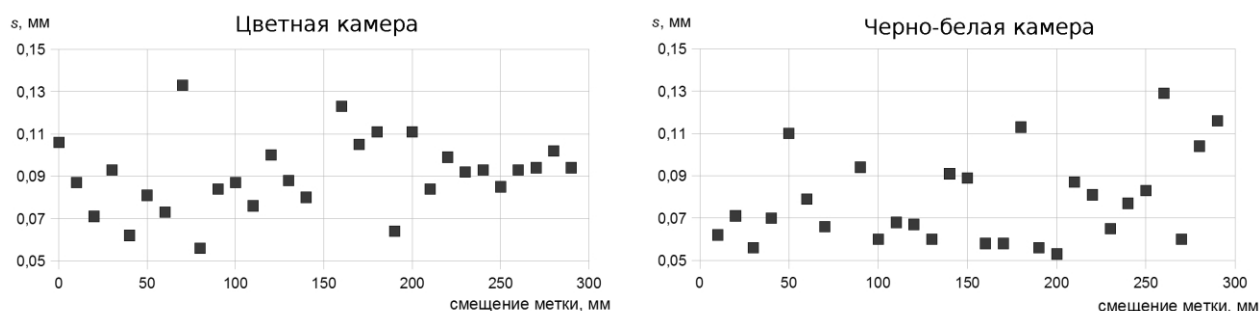


Рис. 5. Результаты эксперимента: СКО показаний прогибомера в каждом из каналов в зависимости от смещения метки

Эксперимент показал, что для данной конфигурации прогибомера средняя величина СКО измерения смещения метки в канале с цветной камерой равна $s = 0,089 \pm 0,007$ мм, в канале с черно-белой камерой $s = 0,076 \pm 0,008$ мм при доверительной вероятности 95%. Как видно на графиках (рис. 5), во всем диапазоне смещений реперной метки не наблюдается существенной разницы в величине СКО измеренных значений между цветной и черно-белой камерами. Данное обстоятельство позволяет сделать заключение об эффективности использования более дешевой черно-белой камеры. В таком случае случайная составляющая основной погрешности прогибомера, определяемая выражением

$$s_{\text{ПРОГИБ}} = \sqrt{0,5(s_{\text{НОС}}^2 + s_{\text{КОРМА}}^2)},$$

будет равна $s_{\text{ПРОГИБ}} = 0,08$ мм.

Заключение

Предложена схема построения оптико-электронного прогибомера, состоящего из двух фотоприемных модулей, развернутых друг относительно друга на угол 180° . Рассмотрены принцип действия и алгоритм работы оптико-электронного прогибомера.

Лабораторные исследования показали целесообразность использования недорогих черно-белых камер. В результате экспериментальных исследований СКО составило 0,08 мм. В дальнейшем планируется провести исследования дополнительной и методической погрешностей оптико-электронного прогибомера, возникающих вследствие влияния таких факторов, как температура, влажность, наличие фоновых засветок на месте эксплуатации прибора.

Работа осуществлялась при финансовой поддержке Федерального агентства по науке и инновациям РФ и проведена в рамках аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» и ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Анисимов А.Г., Горбачев А.А., Краснящих А.В. Исследование влияния блюминга на погрешность оптико-электронной системы контроля соосности // VII Международная конференция «Прикладная оптика – 2006» 16–20 октября 2006 г. – СПб, Россия. Сб. трудов. – Т. 1. Оптическое приборостроение. – СПб, 2006. – С. 24–28.
2. Коняхин И.А., Михеев С.В., Ворона А.М. Сравнительный анализ методов компьютерной обработки видеок кадров ПЗС-камер // Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – Вып. 9. – С. 57–59.
3. Андреев А.Л., Ярышев С.Н., Стрелков А.Р. Аппаратные и программные средства оптико-электронных приборов с телевизионными датчиками на ФПЗС. Методические указания. – СПб: СПбГИТМО, 1995. – 49 с.
4. Жуков Д.В., Коняхин И.А., Усик А.А. Итерационный алгоритм определения координат изображений точечных излучателей // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 43–45.

<i>Алеев Алексей Муратович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, инженер, lexmaister@yandex.ru
<i>Горбачев Алексей Александрович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, gorbachev@grv.ifmo.ru
<i>Коротаев Валерий Викторович</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, korotaev@grv.ifmo.ru
<i>Пантюшин Антон Валерьевич</i>	– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pantyushin@ya.ru