

П.С. Сердюков, К.Е. Румянцев

СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ТРЕХМЕРНОЙ СЦЕНЫ ОБЪЕКТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ

Рассмотрены основные способы определения координат цилиндрических объектов для контроля геометрических параметров объекта с регулярной структурой. Преимущественно рассматриваемые способы применяются при определении параметров тепловыделяющих стержней (установок) топливных сборок на атомной электростанции. Целью данной работы является анализ существующих методов определения геометрических параметров объектов с регулярной структурой. Для достижения поставленной цели необходимо решение следующей задачи – сравнить и провести исследование существующих методов определения геометрического положения объектов с регулярной структурой и выявить их достоинства и недостатки, а также сформулировать математическую модель определения погрешности измерения основываясь на конкретном методе. Сравнительный анализ включал в себя описание существующих контактных и бесконтактных методов (измерения линейных размеров трехмерных объектов, измерения геометрических параметров объекта в пространстве и устройство для его осуществления и три различных метода контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам). Для определения был использован следующий инструмент – исследуемый объект фотографировали одной видеокамерой на ПЗС-матрице, устойчивой к радиации, из двух определенных точек пространства. На полученных снимках опознавали точки изображения объекта. Далее, используя данные о размерах атомного реактора и параметры видеокамеры, вычисляли пространственные координаты точек объекта в системе координат объекта и элементы внешнего ориентирования снимков. Необходимые для решения задачи приближенные значения неизвестных определили заранее, с помощью известных в фотограмметрии приемов. Проведенный анализ показал, что наибольшей эффективностью обладают бесконтактные методы, основанные на обработке изображений сцены, сформированных видеокамерами на основе мозаичных фотоприемников. Таким образом, измерительные системы на основе телевизионных датчиков (видеокамер) являются наиболее целесообразными для измерения разновысотности упорядоченной последовательности цилиндрических объектов. Рассмотренная математическая модель позволила определить методическую погрешность измерения геометрических параметров посредством реконструкции трехмерной сцены по серии изображений в условиях бесконтактного определения, обусловленную несовершенством определяемого метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. На основе полученных данных появляется возможность определить центр тяжести той головки ТВС, для которой методическая погрешность является минимальной, и, соответственно, принять ее за основу, относительно которой рассчитать разновысотность всех стальных головок ТВС.

Телевизионная камера; техническая обработка изображения; объекты с регулярной структурой; трехмерная сцена.

P.S. Serdyukov, K.E. Rumyantsev

METHODS OF OBTAINING INFORMATION ABOUT THE THREE-DIMENSIONAL SCENE TO SOLVE PROBLEMS OF DETERMINING THE SPATIAL POSITION OF OBJECTS WITH A REGULAR STRUCTURE

In this paper the basic methods of determining the coordinates of cylindrical objects to control the geometric parameters of an object with a regular structure are considered. Predominantly the considered methods are used in determining the parameters of fuel rods (installations) of fuel assemblies at a nuclear power plant. The purpose of this work is to analyze the existing methods for determining the geometric parameters of objects with regular structure. To achieve this goal, it is necessary to solve the following problem - to compare and conduct a study of existing methods for determining the geometric position of objects with a regular structure and to identify their

strengths and weaknesses, as well as to formulate a mathematical model to determine the error of measurement based on a particular method. Comparative analysis included a description of existing contact and non-contact methods (measurements of linear dimensions of three-dimensional objects, measurements of geometric parameters of an object in space and a device for its implementation and three different methods of controlling linear dimensions of three-dimensional objects by three Cartesian coordinates). The following tool was used for the determination - the object under study was photographed by one video camera on a radiation-resistant CCD from two defined points in space. The image points of the object were identified on the obtained images. Then, using the data on atomic reactor dimensions and video camera parameters, we calculated the spatial coordinates of the object points in the object coordinate system and the elements of external orientation of the images. The approximate values of the unknowns needed to solve the problem were determined in advance, using the methods known in photogrammetry. The analysis showed that the most effective are non-contact methods based on processing images of the scene formed by video cameras based on mosaic photodetectors. Thus, measuring systems based on television sensors (video cameras) are the most expedient for measuring the height difference of an ordered sequence of cylindrical objects. The considered mathematical model has allowed to define a methodical error of measurement of geometrical parameters by reconstruction of a three-dimensional scene on a series of images in conditions of the non-contact definition, caused by imperfection of the defined measuring method or the simplifications admitted at measurements. On the basis of the obtained data, it is possible to determine the center of gravity of the fuel assembly head, for which the methodological error is minimal, and, accordingly, to take it as a basis, relative to which to calculate the height difference of all steel heads of fuel assembly.

TV camera; technical image processing; objects with a regular structure; three-dimensional scene.

Введение. Ядерная энергетика принадлежит к базовым отраслям, которые определяют темпы развития промышленности и социальной сферы. Одним из приоритетных направлений в атомной энергетике является создание высоконадежных комплексов для управления технологическими процессами.

Существуют алгоритмы бесконтактного контроля разновысотности цилиндрических объектов, расположенных группами на большой площади (сцене). Исследуемые объекты расположены в строгом геометрическом порядке, и визуально могут рассматриваться как «ячейки» из семи тепловыделяющих сборок (далее – ТВС), причём центры тяжести верхних поверхностей шести ТВС находятся в вершинах, а центр поверхности седьмого ТВС – в геометрическом центре правильного шестиугольника. Исследуемые объекты располагаются в водной среде. Осветительное устройство закреплено на видеокамере, непосредственно освещая обследуемый фрагмент сцены.

В настоящее время известны контактный и бесконтактный методы, позволяющие измерять разновысотность наблюдаемых объектов. Использование контактного метода в атомной энергетике нецелесообразно из-за отсутствия доступа и возможности облучения.

Таким образом, бесконтактный метод измерения является единственно возможным для измерения разновысотности головок ТВС в активной зоне реактора энергоблока АЭС.

Широкому распространению бесконтактных телевизионных методов измерения препятствует возможная низкая освещенность, которая не позволяет получать контрастные телевизионные изображения объектов. В связи с этим для более точного определения границ объекта приходится «подсвечивать» объект. Такой способ требует дополнительных энергетических затрат и приводит к значительным погрешностям при уменьшении освещенности подсветки из-за загрязнения или неисправности осветителя.

Измерительные системы на основе телевизионных датчиков (видеокамер) являются наиболее целесообразными для измерения разновысотности упорядоченной последовательности цилиндрических объектов.

Приоритетным направлением в области бесконтактного определения и измерения геометрических параметров объектов сложной конфигурации является создание телеметрических систем контроля, позволяющих получать изображение измеряемых объектов при помощи видеокамер и производить их анализ методами цифровой обработки сигналов. Новые высокоскоростные ЭВМ позволяют реализовать сложнейшие алгоритмы статистической и математической обработки данных. Это направление реализовано в системах компьютерного (машинного) зрения и отражено в научных трудах Сойфера В.А. [1], Ярославского Л.П. [2], Балабаева С.Л., Зиброва В.А., Румянцева К.Е. [3–10].

Основная часть. Анализ существующих решений для бесконтактных измерений геометрических размеров сложных объектов.

Известно несколько способов бесконтактного измерения геометрических размеров объектов.

Первый способ – способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов. Заключается в многократном формировании на поверхности контролируемого объекта зондирующей структурированной подсветки путем освещения поверхности контролируемого объекта пучком оптического излучения и последовательной регистрации изображений искаженной рельефом поверхности контролируемого объекта структуры зондирующей подсветки. Для каждой точки контролируемого объекта определяют зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения.

Недостатком этого способа является высокая погрешность, обусловленная тем, что при направлении на поверхность контролируемого объекта, модулированного по одной координате транспарантом с неизменной периодической структурой оптического изучения, нельзя предусмотреть либо заранее учесть искажения картины, вызванные различными отражательными свойствами поверхности и глубокими впадинами, которые не возможно идентифицировать без априорной информации о макроструктуре поверхности контролируемого объекта.

Следующий способ – способ бесконтактных измерений геометрических параметров объекта в пространстве и устройство для его осуществления. Изобретение относится к способу бесконтактных измерений геометрических параметров объекта в пространстве. При реализации способа на поверхности объекта выделяют одну и более обособленную зону, для которой можно заранее составить несколько разных упрощенных математических параметрических моделей на основании заранее известных геометрических закономерностей исследуемого объекта, характеризующих форму, положение, движение, деформацию. Наносят маркеры на поверхность объекта, группируя по обособленным зонам в обособленные группы. Далее регистрируют изображения центральной проекции указанных маркеров. И на их основании с учетом заранее известных геометрических закономерностей исследуемого объекта и с использованием методов многомерной минимизации расхождений определяют искомые геометрические параметры объекта. Технический результат - повышение точности и достоверности измерений геометрических параметров объекта при использовании одной камеры, особенно в условиях стесненного окружающего пространства и ограниченного оптического доступа.

Общим недостатком способов и устройств стереосъемки и устройств с применением структурированного освещения, является необходимость применения двух и более устройств регистрации центральной проекции или проекторов структурированного освещения в нескольких позициях (точках пространства), что не может быть достижимо в ядерном реакторе в связи с его конструкцией.

Третий способ контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [11]. Способ заключается в том, что на объект проецируют систему разноцветных полос, создаваемую путем пространственной модуляции вдоль одной координаты интенсивности зондирующего оптического излучения. Система разноцветных полос носит периодический характер и создает структурированную подсветку. В результате в одном кадре регистрируют целиком всю попадающую в поле зрения фотоприемного устройства часть поверхности контролируемого объекта и наложенное на поверхность искаженное изображение структурированной подсветки. О контролируемых размерах судят по степени искажений изображения множества полос и местоположению полос в декартовой системе координат.

Недостатком этого способа является низкая точность, связанная с невозможностью однозначно интерпретировать разрывы в изображении полос, искаженных либо рельефом поверхности контролируемого объекта, либо низким значением спектрального коэффициента отражения, зависящего от материала и цвета какого-либо участка поверхности контролируемого объекта.

Четвертый способ контроля линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам [12]. Способ заключается в многократном формировании на поверхности контролируемого объекта зондирующей структурированной подсветки, каждый раз с управлением пространственной модуляцией интенсивности пучка оптического излучения по одной координате так, что на поверхности контролируемого объекта создается изображение структурированной подсветки в виде аperiodической совокупности полос, регистрации изображений искаженной рельефом поверхности контролируемого объекта структуры зондирующей подсветки, которую производят путем накопления суммарного изображения, определении положения искажений структуры подсветки в зарегистрированных изображениях по расстоянию вдоль полосы и номеру полосы, формируемому логическим суммированием двоичных чисел, кодирующих положение полос в каждой из реализации аperiodической совокупности полос так, что единица соответствует наличию полосы, а ноль - отсутствию полосы.

Недостатком четвертого способа является низкая точность определения линейных размеров, ограниченная точностью определения координат формируемой полосы на регистраторе изображения. Низкая точность определения координат полосы обусловлена сложностью детектирования полосы на участках объекта, имеющих различные отражательные свойства. Кроме того, поперечный размер полосы на регистраторе, влияющий на точность определения координат, зависит от угла между нормалью к поверхности и осью излучения структурированной подсветки.

Пятый известный способ определения линейных размеров трехмерных объектов по трем декартовым координатам заключается в том, что для каждой точки измеряемого объекта определяют зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения, и для определения высоты рельефа поверхности измеряемого объекта определяют расстояние от базовой поверхности до точки калибровочной поверхности [13].

Недостатком этого способа является сложность практической реализации процедуры калибровки системы. Точность измерения напрямую зависит от точности калибровки измерителя, а для проведения калибровки системы, работающей известным способом, необходимо обеспечить высокоточный контроль перемещений плоской калибровочной поверхности. Погрешность измерения данным способом будет напрямую зависеть от погрешности перемещения плоской поверхности и отклонения геометрии этой плоской поверхности от идеальной плоскости. При измерении этим способом крупногабаритных объектов себестоимость калибро-

вочной плоскости и инфраструктуры для ее перемещения будет превышать стоимость всей остальной измерительной базы системы, реализующей данный способ измерения. Итог: сложность практической реализации и низкая точность измерения.

Бесконтактный метод измерения разновысотности на основе видикона. Разрешающая способность системы по горизонтали в центре превышает 500 тел. линий при температуре окружающей среды (25 ± 10) °С. При изменении температуры окружающей среды от нормальной до крайних значений диапазона рабочей температуры разрешающая способность системы по горизонтали в центре превышает 400 тел. линий.

Телевизионная система предусматривает использование всего одной видеокамеры. Для формирования стереоизображения в системе предусмотрено последовательное расположение видеокамеры в конкретных точках пространства. Изображения объекта с видеокамеры в двух соседних положениях, полученные в разное время, принимаются за стереопару. На основании этой стереопары формируется пространство объектов для определения их разновысотности. Реализация этого метода предполагает точную установку (перемещение видеокамеры) в заданной точке пространства. Однако на практике это практически недостижимо.

Применение видикона в атомной энергетике обусловлено стойкостью его характеристик к радиации. В то же время на сегодняшний день созданы видеокамеры на ПЗС-матрицах, устойчивых к радиационному излучению. Применение же видеокамер на ПЗС-матрицах не оценивалось в описанной ранее системе. В то же время известно, что мозаичная (дискретная) структура ПЗС-матриц обеспечивает более точное измерение координат объектов.

Для устранения вышеуказанных недостатков возможно решение задачи бесконтактного (фотограмметрического) способа определения координат точек объекта и снижения стоимости выполнения работ за счет использования видеокамер упрощенной конструкции, не имеющих координатных меток, и исключения работ по их заданию, а также обеспечения возможности проведения измерений, доизмерений или переизмерений без «привязки» к какой-либо плоской системе координат измерительного прибора или снимка.

Поставленная задача решается тем, что предлагается способ определения координат точек объекта, который включает фотографирование объекта с нескольких разных позиций одной видеокамерой, в том числе и не имеющей координатных меток, опознавание точек изображения объекта на снимках, измерение расстояний между опознанными точками снимков и вычисление пространственных координат определяемых точек объекта.

Исследуемый объект фотографируют одной видеокамерой на ПЗС-матрице, устойчивой к радиации, из двух определенных точек пространства. На полученных снимках опознают точки изображения объекта. Далее, используя данные о размерах атомного реактора ВВЭР-1000 и параметры видеокамеры, вычисляют пространственные координаты точек объекта в системе координат объекта и элементы внешнего ориентирования снимков. Необходимые для решения задачи приближенные значения неизвестных определяют заранее, с помощью известных в фотограмметрии приемов.

Математическая модель регистрирующей видеокамеры для измерения разновысотности существующим методом. Математическая модель регистрирующей видеокамеры дает возможность определить методическую погрешность измерения геометрических параметров посредством реконструкции трехмерной сцены по серии изображений в условиях бесконтактного определения существующего метода.

Исследуемым объектом является «сота» ТВС с 7-ю головками, верхние грани которых представляют эллипсы на изображении. При создании идеализированной модели сота представляется регулярной структурой в виде правильного шестиугольника с семью точками в центре и его вершинах на окружности радиусом R , являющимися центрами тяжести эллипсов.

ТВС ядерного реактора визуально может рассматриваться как «сота» из семи цилиндров, причём шесть из них находятся в вершинах правильного шестиугольника (позиции (1)-(6) на рис. 1), а седьмой – в его геометрическом центре (позиция (0) на рисунке 1). Стержни объекта условно обозначаются точками.

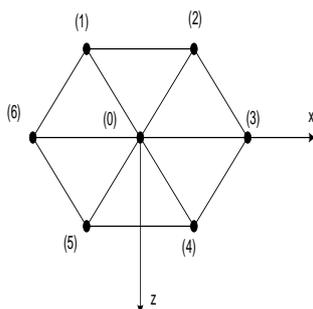


Рис. 1. Объект в виде правильного шестиугольника

Разработанная модель процесса формирования изображений, выявляет соотношения между координатами точек сцены и их изображениями и позволяет определять параметры системы регистрации и трехмерной структуры сцены группы тепловыделяющей сборки (ТВС).

В модели, разработанной в среде Mathcad, использована видеокамера системы «Диаконт», фокусное расстояние которой $f=17$ мм, размер матрицы $8,8 \times 6,6$ мм, разрешение 800×600 .

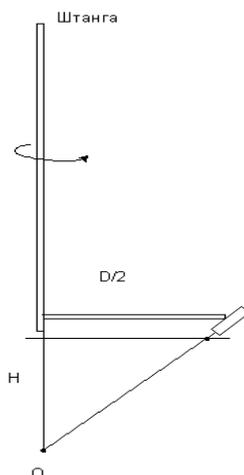


Рис. 2. Крепление видеокамеры

H – высота подвеса видеокамеры над сотой;
 R – радиус соты;
 $D/2$ – радиус вращения видеокамеры;
 f – фокусное расстояние объектива.

Оптический центр видеокамеры располагается на окружности $D/2$, центром которой является ось штанги. В идеале предполагаем, что ось штанги является перпендикуляром к геометрическому центру шестиугольника (позиция (0)). Видеокамера перемещается по кругу диаметром D и последовательно формирует изображения с 6 ракурсов. Для формирования трехмерной информации о сцене используются 15 стереопар, полученных как комбинации изображений 6 положений видеокамер.

Высота расположения оптического центра над плоскостью стержней составляет H и определяется, исходя из охвата всех 7 стержней полем зрения видеокамеры. При этом оптическая ось видеокамеры также проходит через стержень (0).

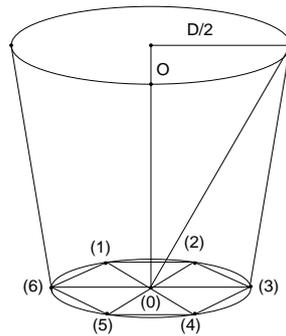


Рис. 3. Общая модель объекта

Измерение разновысотности геометрических объектов осуществляется применением методов фотограмметрии на основе стереопары изображений. Высота стержня определяется в глобальной системе координат (ГСК) координатой по оси OY , начало которой совпадает с центральной точкой шестиугольника, ось OY направлена вверх, ось OZ – перпендикулярна одной из сторон шестиугольника.

Изначально, имеются естественные координаты фотоприемника семи точек для каждого положения (ПВК) видеокамеры.

Начала координат в плоскостях изображений видеокамеры на видиконе совпадают с главными точками ($u_0 = v_0 = 0$), а единицы измерения координат в глобальной системе и в плоскостях изображения камер одинаковы ($w = h = 1$).

Координаты центров тяжести цилиндров головок ТВС в плоскости изображения первого (левого) положения видеокамеры обозначим через (x'_k, y'_k) , а в плоскости изображения второго (правого) положения камеры – через (x''_k, y''_k) . Проекция одной и той же точки в плоскостях разных положений видеокамеры – сопряженные точки.

Левому положению видеокамеры соответствует система координат $O'X'Y'Z'$, а правому – $O''X''Y''Z''$.

Пусть вектор $\mathbf{M}'_i = (X'_{ik}, Y'_{ik}, Z'_{ik})^T$ характеризует координаты семи точек трехмерного пространства в системе левого положения видеокамеры, а вектор $\mathbf{M}''_j = (X''_{jk}, Y''_{jk}, Z''_{jk})^T$ – в системе правого.

$\mathbf{R} = \mathbf{R}''\mathbf{R}'^T$ – ортогональная матрица, описывающая ориентацию системы координат правого положения видеокамеры относительно левого, а $\mathbf{t} = -\mathbf{R}''\mathbf{R}'^T\mathbf{t}' + \mathbf{t}''$ – вектор трансляции, определяющий положение оптического центра правого положения видеокамеры в системе координат левого.

\mathbf{t}' , \mathbf{t}'' – трехмерный вектор смещения начала координат глобальной системы (ГСК) относительно начала координат стандартной системы (ССК) соответственно для левого и правого положений видеокамеры.

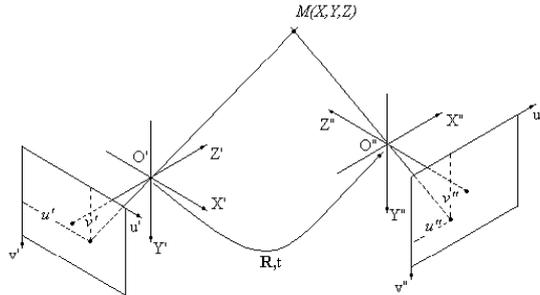


Рис. 4. Общая модель объекта в плоскости

Матрицу и вектор \mathbf{t} принято называть *внешними параметрами* системы регистрации.

Имея естественные координаты точек для каждого положения видеокамеры, определим матрицы однородных внутренних координат видеокамеры левого положения $\mathbf{v}_i = (u_{ik}, v_{ik}, 1)^T$ и правого положения $\mathbf{v}_j = (u_{jk}, v_{jk}, 1)^T$.

При этом необходимо использовать матрицу *внутренних параметров* камеры, поскольку она содержит только параметры оптической системы и фотоприемника видеокамеры. В связи с тем, что в модели использована одна видеокамера, меняющая свои положения, то и матрица внутренних параметров будет одинаковой для всех положений.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} f/w & 0 & u_0 \\ 0 & f/h & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Для определения координат проекций семи точек в изображении используется собственная система координат (ССК) видеокамеры.

Итак, зная матрицу внутренних параметров, матрицы однородных внутренних координат, ортогональную матрицу \mathbf{R} , и вектор трансляции, определим координаты Z в ССК для заданных положений видеокамеры стереосистемы.

$$\begin{bmatrix} Z' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}'^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}' & -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{R}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}'' \\ -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{R}^T \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}'' & \mathbf{v}''^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{v}'' \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\mathbf{v}'^T \mathbf{A}^{-T} \mathbf{R}^T \\ \mathbf{v}''^T \mathbf{A}^{-T} \end{bmatrix} \mathbf{t}.$$

Теперь можно вычислить вектор трехмерных координат точки \mathbf{M} в системе любого из положений видеокамеры:

$$\mathbf{M}' = Z' \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{v}', \quad \mathbf{M}'' = Z'' \mathbf{A}_2^{-1} \mathbf{v}''.$$

Таким образом, мы получаем набор координат ССК для каждого из положений видеокамеры для каждой точки.

Затем, используя матрицы поворота и вектор трансляции, мы переходим от координат в системе ССК к ГСК. Пересчет координат точек из ССК в ГСК происходит с учетом углов ее поворота относительно осей OX , OY , OZ .

$$M_i = \frac{M' - t}{R}$$

$$M_j = \frac{M' - t}{R}.$$

В итоге получается по 2 комплекта координат ГСК для каждой точки, определенных по координатам сопряженных точек заданных положений видеокамеры.

Разработанная математическая модель позволяет, имея координаты центров тяжести головок ТВС в естественных координатах фотоприемника, получить координаты точек в ССК и пересчитать их в ГСК.

В случае использования видеокамеры на ПЗС-матрице исходными данными являются координаты точек в системе fotocувствительной плоскости матрицы в пикселях.

Здесь матрицы однородных внутренних координат видеокамеры левого положения $\mathbf{v}_i = (p_{ik}, q_{ik}, 1)^T$ и правого положения $\mathbf{v}_j = (p_{jk}, q_{jk}, 1)^T$ задаются с помощью p и q , координат точек в пикселях. Затем рассчитываются координаты Z , изменений в математической модели не происходит.

При использовании ПЗС-матрицы возникает дискретизация в результате того, что при проецировании точек на ПЗС-матрицу, им присваиваются координаты центра пикселя, в который они попадают. За счет этого возникает дискретизация.

Выводы. В работе рассмотрены существующие методы определения геометрических параметров объектов на основе различных физических принципов, приведены их преимущества и недостатки. Анализ методов показал, что наибольшей эффективностью обладают бесконтактные методы, основанные на обработке изображений сцены, сформированных видеокамерами на основе мозаичных фотоприемников.

Таким образом, представленная математическая модель позволяет определить методическую погрешность измерения геометрических параметров посредством реконструкции трехмерной сцены по серии изображений в условиях бесконтактного определения, обусловленную несовершенством метода измерений или упрощениями, допущенными при измерениях. На основе полученных данных появляется возможность определить центр тяжести той головки ТВС, для которой методическая погрешность является минимальной, и, соответственно, принять ее за основу, относительно которой рассчитать разновысотность всех стальных головок ТВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы компьютерной обработки изображений [под ред. Сойфера В.А. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.
2. *Прэнтт Э.* Цифровая обработка изображений: пер. с англ. / под ред. Д.С. Лебедева. – М.: Мир, 1982. – Кн. 1. – 312 с.
3. *Павлидис Т.* Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. – М.: Радио и связь, 1986. – 398 с.
4. *Хуанг Т.С., Эклунд Дж.-О., Нуссбаумер Г.Дж. и др.* Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений: преобразования и медианные фильтры / под ред. Т.С. Хуанга: пер. с англ. / под ред. Л.П. Ярославского. – М.: Радио и связь, 1984. – 220 с.
5. *Ярославский Л.П.* Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: введение в цифровую оптику. – 220 с.
6. *Балабаев С.Л., Зибров В.А., Румянцев К.Е.* Бесконтактное измерение геометрических размеров изделий прокатно-металлургического производства: монография / под ред. К.Е. Румянцева. – Шахты: Изд-во ЮРГУЭС, 2004. – 154 с.

7. Энергетика России: проблемы и перспективы. Труды научной сессии РАН: Общ. собрание РАН 19-21 декабря 2005. – М.: Наука, 2006.
8. *Макеев В.В., Поваров В.П., Коробкин В.В., Лебедев О.В.* Система бесконтактного определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок в активной зоне реактора // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2006. – № 16. – С. 37-41.
9. *Каляев И.А., Румянцев К.Е., Макеев В.В., Балабаев С.Л., Коробкин В.В., Коровин Я.С., Кухаренко А.П., Радецкий В.Г.* Бесконтактный метод определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора на основе реконструкции трёхмерных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3 (80). – С. 126-131.
10. *Балабаев С.Л., Радецкий В.Г., Румянцев К.Е.* Телеметрический метод контроля разнвысотности цилиндрических объектов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 3 (80). – С. 94-110.
11. *Коробкин В.В., Коровин Я.С., Хисамутдинов М.В., Румянцев К.Е., Балабаев С.Л., Макеев В.В.* Система бесконтактного определения разнвысотности головок тепловыделяющих сборок реактора / Патент на полезную модель РФ № 103963. 2011. Дата регистрации 22.12.2010.
12. *Балабаев С.Л., Корнилова Т.А., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е.* Стереоскопическая система контроля разнвысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора // Проблемы управления и моделирования в сложных системах (ПУМСС-2014): Тр. XVI Международной конференции (30 июня – 3 июля 2014 г, Самара, Россия). – Самара: Самарский научный центр РАН, 2014. – С. 673-677.
13. *Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е.* Оценка методической погрешности измерения разнвысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 8 (157). – С. 227-241.
14. Патент РСТ WO 00/70303, РСТ/US99/70303, G01B 11/24, 23.11.2000.
15. Патент РФ №2185598, G01B 11/24, 2003 г.
16. Патент РФ №2334195, G01B 11/24, 2008 г.
17. *Андрущенко, С.А., Афонов А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф.* АЭС с реактором типа ВВЭР - 1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010. – 604 с.
18. *Маркелов В.А.* Совершенствование состава и структуры сплавов циркония в обеспечении работоспособности ТВЭЛов, ТВС и труб давления активных зон водоохлаждаемых реакторов с увеличенным ресурсом: автореферат канд. тех. наук. – М., 2010. – 18 с.
19. *Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С.* Фильтрация изображений в целях выделения эллипсов в системе бесконтактного определения разнвысотности тепловыделяющих сборок активной зоны реактора типа ВВЭР-1000 // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 4. – С. 42-44.
20. *Хисамутдинов М.В., Коровин Я.С.* Метод вычисления координат высоты изделий в системе бесконтактного определения разнвысотности ТВС активной зоны реактора // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 12. – С. 142-148.
21. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. – М.: Машиностроение, 2011. – 384 с.

REFERENCES

1. Metody komp'yuternoy obrabotki izobrazheniy [Methods of computer image processing], ed. by Soyfera V.A. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit, 2003, 784 p.
2. *Prett E.* Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing]: transl. from engl., ed. by D.S. Lebedeva. Moscow: Mir, 1982. Book 1, 312 p.
3. *Pavlidis T.* Algoritmy mashinnoy grafiki i obrabotki izobrazheniy [Algorithms of machine graphics and image processing]. Moscow: Radio i svyaz', 1986, 398 p.
4. *Khuang T.S., Eklund Dzh.-O., Nussbaumer G.Dzh. i dr.* Bystrye algoritmy v tsifrovoy obrabotke izobrazheniy: preobrazovaniya i mediannye fil'try [Fast algorithms in digital image processing: transformations and median filters], ed. by T.S. Khuanga: transl. from engl., ed. by L.P. Yaroslavskogo. Moscow: Radio i svyaz', 1984, 220 p.
5. *Yaroslavskiy L.P.* Tsifrovaya obrabotka signalov v optike i golografii: vvedenie v tsifrovuyu optiku [Digital signal processing in optics and holography: an introduction to digital optics], 220 p.

6. *Balabaev S.L., Zibrov V.A., Rumyantsev K.E.* Beskontaktnoe izmerenie geometricheskikh razmerov izdeliy prokatno-metallurgicheskogo proizvodstva: monografiya [Contactless measurement of geometric dimensions of products of rolling and metallurgical production: monograph], ed. by K.E. Rumyantseva. Shakhty: Izd-vo YuRGUES, 2004, 154 p.
7. Energetika Rossii: problemy i perspektivy [Energy of Russia: problems and prospects], *Trudy nauchnoy sessii RAN: Obshch. sobranie RAN 19-21 dekabrya 2005* [Proceedings of the scientific session of the Russian Academy of Sciences: The General Meeting of the Russian Academy of Sciences on December 19-21, 2005]. Moscow: Nauka, 2006.
8. *Makeev V.V., Povarov V.P., Korobkin V.V., Lebedev O.V.* Sistema beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok v aktivnoy zone reaktora [The system of contactless separation of different heights of the heads of fuel assemblies in the reactor core], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of universities. The North Caucasus region. Technical sciences], 2006, No. 16, pp. 37-41.
9. *Kalyaev I.A., Rumyantsev K.E., Makeev V.V., Balabaev S.L., Korobkin V.V., Korovin Ya.S., Kukharenskiy A.P., Radetskiy V.G.* Beskontaktnyy metod opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok atomnogo reaktora na osnove rekonstruktsii trekhmernykh izobrazheniy [Contactless method for determining the different heights of the heads of fuel assemblies of a nuclear reactor based on the reconstruction of three-dimensional images], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3 (80), pp. 126-131.
10. *Balabaev S.L., Radetskiy V.G., Rumyantsev K.E.* Telemetricheskyy metod kontrolya raznovysotnosti tsilindricheskikh ob"ektov [Telemetric method for monitoring the height difference of cylindrical objects], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2008, No. 3 (80), pp. 94-110.
11. *Korobkin V.V., Korovin Ya.S., Khisamutdinov M.V., Rumyantsev K.E., Balabaev S.L., Makeev V.V.* Sistema beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok reaktora. Patent na poleznuyu model' RF № 103963. 2011. Data registratsii 22.12.2010 [The system of contactless determination of the different heights of the heads of the fuel assemblies of the reactor. Utility model Patent of the Russian Federation No. 103963. 2011. Registration date 22.12.2010].
12. *Balabaev S.L., Kornilova T.A., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E.* Stereoskopicheskaya sistema kontrolya raznovysotnosti golovok teplovydelyayushchikh sborok atomnogo reaktora [Stereoscopic control system of different heights of the heads of fuel assemblies of a nuclear reactor], *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh (PUMSS-2014): Tr. XVI Mezhdunarodnoy konferentsii (30 iyunya – 3 iyulya 2014 g, Samara, Rossiya)* [Problems of control and modeling in complex systems (PUMSS-2014): Proceedings of the XVI International Conference (June 30 – July 3, 2014, Samara, Russia)]. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2014, pp. 673-677.
13. *Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E.* Otsenka metodicheskoy pogreshnosti izmereniya raznovysotnosti raspolozhennykh v strogom geometricheskom poryadke ob"ektov na osnove tsifrovoy televizionnoy sistemy [Evaluation of the methodological error of measuring the different heights of objects arranged in a strict geometric order on the basis of a digital television system], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 8 (157), pp. 227-241.
14. Patent PCT WO 00/70303, PCT/US99/70303, G01B 11/24, 23.11.2000.
15. Patent RF No. 2185598, G01B 11/24, 2003.
16. Patent RF No. 2334195, G01B 11/24, 2008.
17. *Andrushenko, S.A., Afonov A.M., Vasil'ev B.yu., Generalov V.N., Kosourov K.B., Semchenkov Yu.M., Ukraintsev V.F.* AES s reaktorom tipa VVER - 1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyutsii proekta [Nuclear power plants with a VVER - 1000 reactor. From the physical foundations of operation to the evolution of the project]. Moscow: Logos, 2010, 604 p.
18. *Markelov V.A.* Sovershenstvovanie sostava i struktury splavov tsirkoniya v obespechenie rabotosposobnosti TVELov, TVS i trub davleniya aktivnykh zon vodookhlazhdaemykh reaktorov s uvelichennym resursom: avtoreferat kand. tekh. nauk [Improving the composition and structure of zirconium alloys to ensure the operability of fuel rods, fuel assemblies and pressure pipes of the active zones of water-cooled reactors with an increased resource: abstract of the cand. of eng. sc. Moscow, 2010, 18 p.

19. *Khisamutdinov M.V., Korovin Ya.S. Fil'tratsiya izobrazheniy v tselyakh vydeleniya ellipsoidov v sisteme beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti teplovydelyayushchikh sborok aktivnoy zony reaktora tipa VVER-1000 [image filtering in order to isolate ellipses in the system of non-contact determination of the different heights of the fuel assemblies of the reactor core of the VVER-1000 type], Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie [Mechatronics, automation, control], 2011, No. 4, pp. 42-44.*
20. *Khisamutdinov M.V., Korovin Ya.S. Metod vychisleniya koordinat vysoty izdeliy v sisteme beskontaktnogo opredeleniya raznovysotnosti TVS aktivnoy zony reaktora [Method of calculating the coordinates of the height of products in the system of contactless determination of the different heights of the fuel assemblies of the reactor core], Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 12, pp. 142-148.*
21. *Rusinov M.M. Kompozitsiya opticheskikh sistem [Composition of optical systems]. Moscow: Mashinostroenie, 2011, 384 p.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженюк.

Сердюков Павел Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: serdyukov-pavel@mail.ru; г. Таганрог, Россия; аспирант.

Румянцев Константин Евгеньевич – e-mail: rke2004@mail.ru; тел.: +78634371902; кафедра информационной безопасности телекоммуникационных систем; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Serdyukov Pavel Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: serdyukov-pavel@mail.ru; Taganrog, Russia; graduate student.

Rumyantsev Konstantin Evgenyevich – e-mail: rke2004@mail.ru; phone: +78634371902; the department of information security of telecommunication systems; head of department; dr. of eng.sc.; professor.

УДК 681.883

DOI 10.18522/2311-3103-2022-6-128-139

А.А. Марьев

О ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА БЫСТРОГО ЦИФРОВОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРАВЛЕННОСТИ В СИСТЕМАХ ЛОКАЦИИ СО СЛОЖНЫМИ СИГНАЛАМИ

Работа относится к области гидроакустики, а именно к задаче цифрового формирования характеристик направленности (ЦФХН) на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ) по пространству в многолучевом эхолоте (МЛЭ) с квадратурной цифровой обработкой сигналов. Рассматривается вопрос применимости ЦФХН на основе БПФ при использовании относительно широкополосных зондирующих сигналов. Основное внимание уделяется МЛЭ со статичным веером лучей (характеристик направленности), в то же время полученные результаты применимы и для систем локации, обеспечивающих динамическое управление лучом. Целью исследования является установление связи между относительной шириной спектра зондирующего сигнала и уровнем полезного сигнала в пространственном канале МЛЭ с заданным наибольшим отклонением луча от нормали. Определено качественное условие применимости ЦФХН на основе БПФ по пространству для зондирующего сигнала с заданной относительной полосой. Получено аналитическое выражение, связывающее коэффициент ослабления сигнала в пространственном канале со следующими характеристиками сигнала и приемника: число элементов линейной эквидистантной антенной решетки (АР), расстояние между элементами АР, угол отклонения луча от нормали, корреляционная функция комплексной огибающей зондирующего сигнала, оконная функция для весовой обработки отклика согласованного фильтра (СФ) в спектральной области. Приведенные результаты могут быть полезны при проектировании многолучевых эхолотов, обеспечивающих высокое разрешение как по дальности, так и по угловым координатам.

Многолучевой эхолот; характеристика направленности; быстрое преобразование Фурье; относительная ширина спектра; антенная решетка.