

Научная статья

УДК 621.398

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71>

EDN:DSL BKD



Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разницы высот головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига

Павел Сергеевич Сердюков✉, serdyukov-pavel@mail.ru

Константин Евгеньевич Румянцев, rke2004@mail.ru

Южный федеральный университет,
Таганрог, 347928, Российская Федерация

Аннотация

Актуальность. Бесконтактный контроль разницы высот головок тепловыделяющих сборок является важной задачей обеспечения безопасной и эффективной эксплуатации атомных электростанций, поскольку отклонения пространственного положения тепловыделяющих сборок могут свидетельствовать о деформации элементов активной зоны и приводить к ухудшению условий дальнейшей работы реакторной установки. Применение метода параллакс-сдвига на основе последовательных кадров одной телевизионной камеры позволяет отказаться от механического контакта с объектом контроля и использовать естественное перемещение камеры для формирования квазистереопар. Однако практическое внедрение такого подхода требует количественной оценки влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на итоговую точность определения разницы высот.

Цель настоящего исследования состоит в установлении количественных зависимостей между параметрами телевизионной камеры, геометрией формирования квазистереопар и погрешностью определения разницы высот головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига, а также в определении рациональных диапазонов параметров измерительной системы.

Результаты. Установлено, что определяющим фактором итоговой погрешности является ошибка определения диспарантности. Показано, что устойчивость метода обеспечивается не отдельным параметром телевизионной системы, а согласованным выбором фокусного расстояния, базиса квазистереопары, высоты подвеса камеры и условий субпиксельной локализации центров головок тепловыделяющих сборок. Определены рациональные диапазоны параметров измерительной системы. **Новизна** заключается в комплексной оценке влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность метода параллакс-сдвига применительно к задаче бесконтактного контроля головок тепловыделяющих сборок.

Теоретическая и практическая значимость: развитие расчетной модели метода параллакс-сдвига и установление аналитических зависимостей, связывающих ошибку определения диспарантности с погрешностью восстановления относительной высоты объектов регулярной структуры, а также возможность использования полученных диапазонов параметров при настройке телевизионных средств контроля тепловыделяющих сборок и при обосновании требований к бесконтактной измерительной системе, предназначенной для работы в условиях ограниченного пространства активной зоны реактора без применения дополнительных контактных устройств.

Ключевые слова: параллакс-сдвиг, квазистереопара, разницы высот, тепловыделяющие сборки, фокусное расстояние, диспарантность, точность измерений, геометрия съемки, бесконтактные измерения, телевизионная камера, активная зона реактора

Ссылка для цитирования: Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разницы высот головок тепловыделяющих сборок методом параллакс-сдвига // Труды учебных заведений связи. 2026. Т. 12. № 3. С. 62–71. DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71. EDN:DSL BKD


Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71>

EDN:DSL BKD

Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on the Accuracy of Fuel Assembly Head Height Difference Measurement Using the Parallax-Shift Method

 Pavel S. Serdyukov , serdyukov-pavel@mail.ru

 Konstantin E. Rumyantsev, rke2004@mail.ru

Southern Federal University,
Taganrog, 347928, Russian Federation

Annotation

Relevance. Non-contact monitoring of fuel assembly (FA) head height differences is important for ensuring the safe operation of nuclear power plants. Deviations in FA positions may indicate deformation of reactor core elements and affect reactor performance. The parallax-shift method, based on sequential frames acquired by a single television camera, eliminates mechanical contact with the monitored object and uses camera motion to form quasi-stereo pairs. However, its practical application requires assessing the influence of television system parameters and imaging geometry on measurement accuracy.

The purpose of this study is to establish relationships between television camera parameters, quasi-stereo pair geometry, and the error in determining FA head height differences using the parallax-shift method, as well as to identify rational parameter ranges for the measuring system.

Results. It was established that disparity estimation error is the dominant factor affecting final accuracy. Method stability is achieved through the coordinated selection of focal length, baseline, camera suspension height, and conditions for subpixel localization of fuel assembly head centers. Rational parameter ranges ensuring the required accuracy were determined. **The novelty** lies in the comprehensive assessment of the influence of television system parameters and imaging geometry on the accuracy of the parallax-shift method and in substantiating a rational quasi-stereo measurement configuration formed by a single television camera during arc motion.

Theoretical significance. The theoretical significance is determined by the development of a computational model of the parallax-shift method and by establishing relationships between disparity estimation error and relative height reconstruction error.

Practical significance. The obtained results can be used to configure television systems for FA monitoring and to justify requirements for non-contact measuring systems operating in the confined space of a reactor core.

Keywords: parallax shift, quasi-stereo pair, fuel assembly height difference, focal length, disparity, measurement accuracy, imaging geometry, non-contact measurement, television camera, reactor core

For citation: Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on the Accuracy of Fuel Assembly Head Height Difference Measurement Using the Parallax-Shift Method. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2026;12(3):62–71. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2026-12-3-62-71. EDN:DSL BKD

1. Введение

Бесконтактный контроль геометрических параметров объектов в условиях ограниченного доступа является одним из приоритетных направлений развития современных телевизионных измерительных систем. Для атомных электростанций особую значимость имеет задача определения раз-

новысотности головок тепловыделяющих сборок (далее ТВС), поскольку отклонения их пространственного положения могут свидетельствовать о деформации элементов активной зоны, приводить к нарушению условий эксплуатации и повышать риски при дальнейшей работе реакторной установки. В связи с этим повышение точности и опера-

тивности контроля разнвысотности ТВС представляет собой важную научно-техническую задачу, непосредственно связанную с обеспечением безопасности и эффективности эксплуатации энергоблоков.

Традиционно контроль разнвысотности ТВС на действующих атомных электростанциях (далее АЭС) выполняется с применением контактных средств измерения или специализированных оптомеханических устройств. Однако такие подходы характеризуются существенными ограничениями: необходимостью механического взаимодействия с объектом, увеличением продолжительности перегрузочных операций, усложнением аппаратурной реализации и зависимостью результата от точности позиционирования измерительных средств. Эти обстоятельства стимулируют переход к бесконтактным методам, основанным на анализе телевизионных изображений и использовании алгоритмов технического зрения. Особый интерес в этом контексте представляет применение штатной телевизионной камеры перегрузочной машины, позволяющее реализовать измерение без внесения изменений в существующую инфраструктуру системы контроля.

Одним из перспективных подходов к решению данной задачи является метод параллакс-сдвига, при котором оценка положения объекта осуществляется по смещению его проекции на изображениях, полученных из разных положений одной телевизионной камеры. При дуговом перемещении камеры над активной зоной последовательные кадры видеопотока формируют квазистереопары, а возникающая диспарантность позволяет вычислять относительное положение и разнвысотность головок ТВС. Преимуществом данного подхода является возможность формирования стереобазы не за счет многокамерной схемы, а в результате естественного перемещения камеры, что особенно важно в условиях ограниченного пространства и жестких эксплуатационных требований АЭС. При этом метод может быть интегрирован в существующие системы видеоконтроля без аппаратной модернизации и обеспечивает автоматизированную обработку изображений в реальном времени.

Даже при использовании субпиксельных методов локализации ошибка определения диспарантности остается критическим источником итоговой погрешности, а отклонения геометрии перемещения камеры могут существенно исказить параметры квазистереопар и приводить к снижению метрологической надежности измерений.

Несмотря на наличие работ [1, 2], посвященных как общим вопросам бесконтактного контроля ТВС, так и анализу отдельных составляющих погрешности метода параллакс-сдвига, вопрос комплексного влияния параметров телевизионной

системы и геометрии съемки на точность определения разнвысотности головок ТВС требует отдельного рассмотрения. Для практического применения метода недостаточно показать лишь его принципиальную работоспособность; необходимо установить количественные зависимости между параметрами системы и итоговой точностью измерений, определить чувствительность результата к ошибке диспарантности и обосновать такие значения параметров камеры и траектории перемещения, при которых обеспечивается достоверный контроль допустимых отклонений высоты головок ТВС.

Целью данной статьи является установление количественного влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разнвысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига. Для достижения поставленной цели в работе предлагается расчетная модель формирования квазистереопар, анализируется связь между погрешностью определения разнвысотности и ошибкой диспарантности, выполняется оценка чувствительности результата к изменению фокусного расстояния, размера пикселя, базиса и геометрических параметров перемещения камеры, а также определяются допустимые диапазоны параметров измерительной системы, обеспечивающие контроль разнвысотности ТВС на уровне порядка 5 мм.

2. Расчетная модель определения разнвысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига

В предлагаемом подходе разнвысотность головок ТВС определяется по последовательности изображений, получаемых от одной телевизионной камеры на ПЗС-матрице, установленной на перегрузочной машине и перемещающейся по дуговой траектории над активной зоной реактора. Такое перемещение формирует квазистереопары кадров, в которых одно и то же наблюдаемое основание сцены фиксируется из двух близких положений, а смещение проекции объекта на изображении интерпретируется как диспарантность.

Геометрически задача сводится к определению глубины Z_i для каждой головки ТВС по известному базису B между двумя положениями камеры, фокусному расстоянию f и измеренной диспарантности d_i . В алгоритмической реализации координаты центров головок ТВС сначала определяются на двух кадрах в пиксельной системе координат, после чего вычисляется их взаимное смещение. Поскольку в практической схеме используется одна камера, перемещенная между двумя положениями, базис квазистереопары задается геометрией перемещения камеры, а сама схема эквивалентна классической стереосистеме с малой горизонтальной базой.

Для однозначности дальнейших выводов введем следующие обозначения, приведенные в таблице 1.

ТАБЛИЦА 1. Основные обозначения расчетной модели

TABLE 1. Main Notation of the Calculation Model

Обозначение	Физический смысл	Единица измерения
f_{px}	фокусное расстояние в пикселях	px
B	базис квазистереопары	мм
d_i	диспарантность i -й головки ТВС	px
Z_i	глубина i -й головки ТВС относительно камеры	мм
Z_{min}	минимальная глубина в группе объектов	мм
Δh_i	разновысотность i -й головки ТВС	мм

В рабочей конфигурации использовались: разрешение 768×576 пикселей, фокусное расстояние порядка 800 пикселей, высота подвеса камеры около 1300 мм, радиус траектории около 2000 мм и шаг смещения между кадрами порядка 10–15 мм [3]. Наглядная схема метода параллакс-сдвига представлена на рисунке 1.

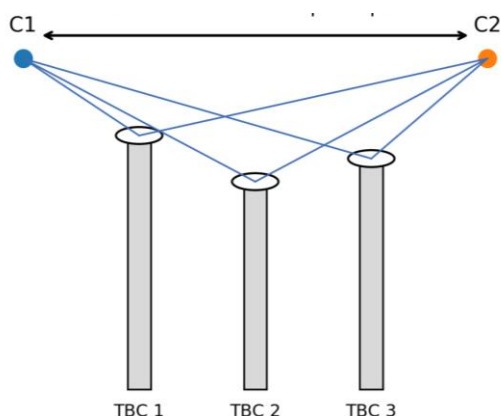


Рис. 1. Расчетная схема метода параллакс-сдвига

Fig. 1. Calculation Scheme of the Parallax-Shift Method

В качестве базового соотношения используется классическая стереозависимость, адаптированная под квазистереопару, формируемую последовательными кадрами одной камеры. В пиксельной форме расчетное выражение удобно записывать следующим образом:

$$Z_i = (f_{px} \cdot B) / d_i.$$

Поскольку в задаче контроля ТВС практически значимой величиной является не абсолютная глубина как таковая, а разность высот между головками, далее вводится относительная характеристика:

$$\Delta h_i = Z_i - Z_{min}.$$

Такая нормализация позволяет исключить постоянную составляющую, связанную с абсолютным положением камеры, и перейти непосредственно к измерению разновысотности.

Если требуется перейти к записи через физические параметры матрицы, можно использовать связь:

$$f_{px} = f / s,$$

где f – фокусное расстояние объектива в миллиметрах; s – размер пикселя матрицы.

Тогда выражение для глубины принимает вид:

$$Z_i = (f \cdot B) / (s \cdot d_i).$$

Для демонстрации работоспособности расчетной модели рассмотрим пример, в котором использовались параметры $f_{px} = 1545$ px и $B = 12$ мм. Из измеренных координат центров на двух кадрах были получены диспарантности $d_1 = 4,8$ px, $d_2 = 7,2$ px и $d_3 = 7,2$ px.

Тогда глубины объектов составляют:

$$Z_1 = (1545 \cdot 12) / 4,8 = 3862,5 \text{ мм},$$

$$Z_2 = (1545 \cdot 12) / 7,2 = 2575,0 \text{ мм},$$

$$Z_3 = (1545 \cdot 12) / 7,2 = 2575,0 \text{ мм}.$$

Примечание. В примере значение $f_{px} = 1545$ px соответствует объективу $f \approx 12,8$ мм при $s = 8,3$ мкм. Значения Δh порядка сотен миллиметров носят иллюстративный характер и демонстрируют формулу при произвольных диспаранностях. В реальной задаче контроля ТВС разновысотности не превышают 5 мм, диспарантности соседних головок различаются на доли пикселя – поэтому необходима субпиксельная локализация центров. Практически достигаемая точность $\pm 1,3$ мм (при $B = 12$ мм) подтверждена экспериментально [4].

Минимальная глубина в рассматриваемой группе равна $Z_{min} = 2575,0$ мм, поэтому относительные высоты определяются как:

$$\Delta h_1 = 3862,5 - 2575,0 = 1287,5 \text{ мм},$$

$$\Delta h_2 = 2575,0 - 2575,0 = 0 \text{ мм},$$

$$\Delta h_3 = 2575,0 - 2575,0 = 0 \text{ мм}.$$

Основные расчеты разновысотности по данным квазистереопары представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Пример расчета разновысотности по данным квазистереопары

TABLE 2. Example of Height Difference Calculation from Quasi-Stereo Pair Data

№ объекта	d_i , px	Z_i , мм	Δh_i , мм
1	4,8	3862,5	1287,5
2	7,2	2575,0	0
3	7,2	2575,0	0

Таким образом, базовая расчетная модель метода параллакс-сдвига сводит задачу определения разновысотности головок ТВС к трем основным

этапам: выделению центров головок ТВС на квазистереопаре изображений, вычислению диспарантности для каждой головки и пересчету глубины в относительную высоту. Уже из полученных соотношений видно, что итоговая точность метода в наибольшей степени определяется точностью определения диспарантности.

Для иллюстрации работы модели в условиях, соответствующих реальной задаче контроля головок ТВС, рассмотрим практический пример с параметрами рабочей конфигурации: $f_{px} = 800$ px, $B = 12$ мм, высота подвеса телевизионной камеры ≈ 1200 мм. При этих параметрах разновысотность головок порядка 5 мм соответствует различию диспарантностей соседних объектов на уровне 0,03–0,04 px, что непосредственно подтверждает необходимость субпиксельной точности определения центров окружностей.

Пусть три наблюдаемые головки ТВС имеют следующие диспарантности (px), определенные по паре квазистереокадров: $d_1 = 8,000$; $d_2 = 7,980$; $d_3 = 7,967$.

Тогда глубины объектов относительно телевизионной камеры составляют:

$$Z_1 = (800 \cdot 12) / 8,000 = 1200,0 \text{ мм},$$

$$Z_2 = (800 \cdot 12) / 7,980 = 1203,0 \text{ мм},$$

$$Z_3 = (800 \cdot 12) / 7,967 = 1205,0 \text{ мм}.$$

Минимальная глубина в рассматриваемой группе $Z_{\min} = 1200,0$ мм.

Разновысотности головок ТВС относительно опорной:

$$\Delta h_1 = 0,0 \text{ мм}; \Delta h_2 = 3,0 \text{ мм}; \Delta h_3 = 5,0 \text{ мм}.$$

Практический пример расчет разновысотности представлен в таблице 3.

ТАБЛИЦА 3. Практический пример расчета разновысотности при реальных параметрах ($f_{px} = 800$ px, $B = 12$ мм)

TABLE 3. Practical Height Difference Calculation Example at Real Parameters ($f_{px} = 800$ px, $B = 12$ mm)

№ объекта	d_i , px	Z_i , мм	Δh_i , мм
1	8,000	1200,0	0,0
2	7,980	1203,0	3,0
3	7,967	1205,0	5,0

Данный пример наглядно демонстрирует, что при реальных параметрах рабочей конфигурации диспарантности соседних объектов различаются на 0,020–0,033 px, то есть существенно менее одного пикселя. Следовательно, достоверное измерение разновысотностей порядка 5 мм возможно лишь при субпиксельной точности определения центров головок ТВС, что в полной мере согласуется с требованиями к алгоритмической реализации метода параллакс-сдвига.

3. Влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности

Точность определения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига определяется не только качеством алгоритмов выделения окружностей, но и выбором параметров телевизионной системы и геометрии формирования квазистереопары. К числу ключевых факторов относятся фокусное расстояние, размер пикселя, базис квазистереопары, величина диспарантности, радиус дуги, высота подвеса и угловое положение камеры.

Из базовой формулы $Z = (f \cdot B) / (s \cdot d)$ следует, что глубина Z возрастает пропорционально фокусному расстоянию и базису, убывает пропорционально размеру пикселя и диспарантности, а относительная погрешность в первом приближении может быть представлена в виде:

$$\frac{\Delta Z}{Z} \approx \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta s}{s} + \frac{\Delta d}{d}.$$

Следовательно, фокусное расстояние, базис и размер пикселя влияют на результат линейно в относительном смысле, тогда как роль диспарантности оказывается двойственной: с одной стороны, рост d уменьшает оценку глубины, с другой – повышает устойчивость измерения к ошибкам локализации изображения.

Наиболее показательной является частная производная по диспарантности:

$$\partial Z / \partial d = - (f \cdot B) / (s \cdot d^2).$$

Из этого выражения следует, что чувствительность результата к ошибке Δd обратно пропорциональна квадрату диспарантности. Это означает, что при малом параллаксе даже субпиксельная ошибка определения центра головки ТВС может приводить к заметной ошибке по высоте.

Из параметров телевизионных средств наиболее прямое влияние на точность оказывают фокусное расстояние объектива и размер пикселя матрицы. Увеличение фокусного расстояния приводит к росту масштаба изображения и, следовательно, к росту диспарантности для одного и того же пространственного смещения объекта. Аналогично уменьшение размера пикселя улучшает пространственное разрешение и уменьшает шаг квантования координат центра окружности, однако этот выигрыш реализуется только при достаточном качестве оптики и устойчивой предобработке изображения.

Наряду с параметрами оптики и геометрией формирования квазистереопары, существенное влияние на точность определения центров головок ТВС оказывают условия освещенности и качество изображения. Недостаточная или неравномерная осве-

ценность активной зоны реактора снижает локальный контраст изображения, затрудняет выделение границ объектов и приводит к росту случайной составляющей ошибки субпиксельной локализации центра. Снижение отношения сигнал/шум (ОСШ) в изображении непосредственно увеличивает неопределенность вычисляемых координат центра окружности, то есть увеличивает ошибку диспарантности Δd , которая, как было показано в настоящем разделе, является определяющим фактором итоговой погрешности определения разновысотности.

Для ослабления влияния указанных факторов в алгоритмической схеме обработки видеопотока применяются: нормализация яркости с ограничением контраста (метод CLAHE), медианная и гауссова фильтрация шумов, автоматическое управление экспозицией телевизионной камеры, а также отбраковка кадров с недостаточным контрастом по заданному пороговому критерию. Практика применения субпиксельных методов локализации контуров показывает: для обеспечения ошибки $\Delta d \leq 0,1$ px необходимо поддерживать отношение сигнал / шум изображения не ниже 20 дБ, что достигается при надлежащей организации освещения рабочей зоны и применении адаптивной предобработки кадра. Данное требование должно учитываться при проектировании осветительной подсистемы телевизионного контроля ТВС.

Отдельно необходимо выделить ошибку определения диспарантности Δd . Для ее практической иллюстрации влияния рассмотрим расчетную оценку чувствительности в пиксельной форме:

$$Z = (f_{px} \cdot B) / d, \quad \Delta Z_d \approx \left(f_{px} \cdot \frac{B}{d^2} \right) / \Delta d,$$

В качестве базовых параметров примем, что $f_{px} = 800$ px и $B = 12$ мм, соответствующие рабочей конфигурации. При субпиксельной точности локализации $\Delta d = 0,1$ px получаем значения, приведенные в таблице 4, которая вместе с рисунком 2 наглядно показывает, что при малых значениях диспарантности рабочая точность резко ухудшается, а при переходе в область $d \geq 15-20$ px чувствительность к ошибке Δd уменьшается в разы. Это подтверждает практическое требование: для контроля разновысотности порядка 5 мм система должна обеспечивать либо достаточно большой параллакс, либо очень малую ошибку субпиксельной локализации, а желательно – обе эти условия одновременно.

Геометрия съемки влияет на точность не менее существенно, чем параметры самой камеры. Увеличение высоты подвеса уменьшает масштаб изображения и снижает диспарантность, увеличение радиуса дуги при фиксированном угловом шаге повышает базис, но усиливает требования к точности выдерживания траектории, а отклонение оптической оси и наклон камеры вносят систематическое искажение в взаимное положение изображений.

ТАБЛИЦА 4. Расчетная чувствительность к ошибке диспарантности при $f_{px} = 800$ px и $B = 12$ мм

TABLE 4. Calculated sensitivity to disparity error at $f_{px} = 800$ px and $B = 12$ mm

Диспарантность d , px	ΔZ_d	
	при $\Delta d = 0,1$ px, мм	при $\Delta d = 0,2$ px, мм
5	38,4	76,8
10	9,6	19,2
15	4,3	8,5
20	2,4	4,8

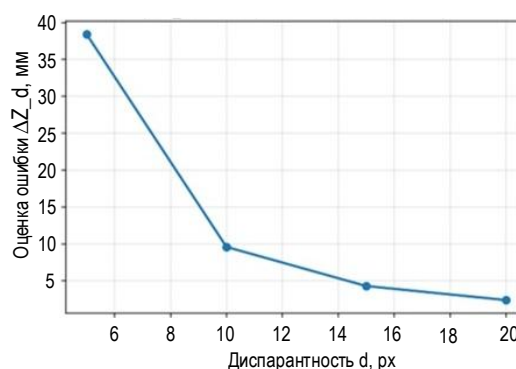


Рис. 2. Зависимость ошибки по высоте от диспарантности
Fig. 2. Height Error vs. Disparity

Проведенный анализ показывает, что точность определения разновысотности методом параллакс-сдвига определяется совместным действием параметров телевизионной камеры и геометрии съемки. Наиболее чувствительным фактором является ошибка определения диспарантности Δd .

Практическая реализация метода параллакс-сдвига требует предварительной калибровки телевизионной системы и целенаправленной компенсации систематических погрешностей. Внутренняя калибровка телевизионной камеры предусматривает определение эффективного фокусного расстояния f_{px} , координат главной точки на фотоматрице и коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии объектива. Некомпенсированная дисторсия приводит к систематическому смещению проекций объектов от их истинного положения, что вносит ошибку в определение диспарантности и, следовательно, в восстанавливаемые значения глубины и разновысотности. Внешняя калибровка определяет взаимное расположение камеры и системы координат объекта контроля, а также масштабный коэффициент, согласующий пиксельные координаты с физическими размерами. Полученные выводы по качеству существенно влияют на параметры телевизионных средств на точность представлены в таблице 5.

Ключевым источником систематической погрешности является неточность знания базиса B : ошибка ΔB вносит в итоговую разновысотность пропорциональную погрешность $\Delta h = \Delta h \cdot \Delta B / B$, линейно зависящую от измеряемой величины.

Компенсация этой ошибки достигается точным измерением геометрии перемещения камеры и применением калибровочных коэффициентов при вычислении Z_i . Устранение ошибки дисторсии производится путем корректирующего преобразования координат центров окружностей перед вычислением диспаратности с использованием коэффициентов, полученных при калибровке. Периодическая проверка системы по эталонным объектам с известными геометрическими параметрами позволяет контролировать стабильность калибровочных коэффициентов и вводить поправки при изменении рабочих условий, например вследствие температурного дрейфа параметров оптической системы.

ТАБЛИЦА 5. Качественное влияние параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность
TABLE 5. Qualitative Influence of Television System Parameters and Imaging Geometry on Accuracy

Параметр	Рост параметра	Влияние на точность	Практический вывод
f	увеличивается	чувствительность растет	повышает масштаб, но сужает поле зрения
s	увеличивается	точность ухудшается	нужен малый пиксель при достаточном SNR
B	увеличивается	чувствительность растет	растут требования к геометрической стабильности
d	увеличивается	влияние Δd снижается	рабочая зона должна обеспечивать достаточный параллакс
Высота подвеса H	увеличивается	точность ухудшается	желательно ограничивать рост расстояния до сцены
Радиус дуги R	увеличивается	базис может расти	требуется жесткий контроль траектории
Наклон камеры α	увеличивается	систематическая ошибка растет	необходима стабилизация оси
ОСШ изображения	снижается	точность ухудшается (рост Δd)	адаптивная предобработка (CLAHE, фильтрация)

3. Численная оценка и допустимые диапазоны параметров измерительной системы

Аналитические зависимости, полученные в предыдущем разделе, позволяют установить не только направление влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности, но и рассчитать такие диапазоны параметров, при которых метод параллакс-сдвига сохраняет практическую приме-

нимость в задаче контроля головок ТВС. Для условий эксплуатации на АЭС это особенно важно, поскольку система должна не просто формально восстанавливать относительные высоты, а обеспечивать достоверное обнаружение отклонений порядка 5 мм.

В интересах оценки допустимых диапазонов параметров в качестве опорной принимается конфигурация, подтвержденная в материалах по реализации метода [5]: телевизионная камера с эффективным фокусным расстоянием порядка 800 px, базис перемещения между кадрами 10–15 мм, высота подвеса камеры 1200–1300 мм, дуговая траектория с контролируемым радиусом и субпиксельное определение центров окружностей головок ТВС. Наиболее устойчивые результаты были получены при $B = 12$ мм, что позволяет принять это значение как рациональное базовое для дальнейших расчетов.

С учетом полученных данных примем:

– $f_{px} = 800$ px; $B = 12$ мм;

– рабочую ошибку локализации $\Delta d = 0,1\text{--}0,2$ px;

– допустимую методическую погрешность $\Delta h_{\max} < 2,5$ мм.

Таблица 6 показывает высокую чувствительность модели к ошибке диспаратности, особенно при малых значениях d . Однако в практической системе измеряется относительная разновысотность группы регулярных объектов с использованием фильтрации по качеству сопоставления и отбора согласованных окружностей. Поэтому расчет по формуле чувствительности задает верхнюю оценку риска, тогда как реальная система использует дополнительные механизмы подавления ошибки. А на рисунке 3 представлено разделение диапазонов диспаратности.

ТАБЛИЦА 6. Расчетная оценка ошибки по высоте при различных значениях диспаратности

TABLE 6. Calculated Height Error Estimation at Various Disparity Values

d , px	ΔZ_d , мм	
	при $\Delta d = 0,1$ px	при $\Delta d = 0,2$ px
3	106,7	213,3
4	60,0	120,0
5	38,4	76,8
6	26,7	53,3
10	9,6	19,2
15	4,3	8,5
20	2,4	4,8



Рис. 3. Качественное разделение диапазонов диспаратности

Fig. 3. Qualitative Classification of Disparity Ranges

Из полученных оценок следует важный практический вывод. Диапазон $d = 3-6$ рх следует рассматривать как минимально достаточный рабочий диапазон, который может обеспечивать требуемую точность только при хорошей геометрической стабильности, фильтрации сопоставления и субпиксельной локализации центров. Для повышения запаса метрологической устойчивости предпочтительно обеспечивать увеличенную диспарантность, насколько это допускают условия съемки и поле зрения камеры.

Анализ показал, что при смещении камеры по высоте в диапазоне 1200 ± 100 мм достигается параллакс порядка $3-6$ рх, обеспечивающий расчет с точностью около $\pm 1,3$ мм. При увеличении высоты подвеса свыше $1800-2000$ мм параллакс становится настолько малым, что точное измерение заметно осложняется. Рациональная высота съемки лежит в диапазоне $1000-1300$ мм. Для базиса перемещения наиболее устойчивые результаты были получены при $B = 12$ мм. Базис 10 мм обеспечивает работоспособность метода, но снижает величину параллакса и уменьшает запас по чувствительности. Базис 15 мм дает большой сдвиг изображения, но требует более жесткого контроля геометрии траектории и корректности сопоставления объектов между кадрами. Даже при рациональном выборе высоты подвеса и базиса перемещения точность измерения может быть утрачена при нарушении геометрии дугового движения камеры. Ошибка базиса линейно влияет на итоговую ошибку определения высоты. Основными причинами такой ошибки являются отклонение радиуса перемещения, нестабильность угла наклона камеры, колебания подвесной системы и нестабильность углового шага.

Численная оценка показывает, что работоспособность метода параллакс-сдвига в задаче контроля разновысотности головок ТВС определяется не одним отдельным параметром, а согласованностью всей измерительной конфигурации. Для уверенного контроля отклонений порядка 5 мм измерительная система должна обеспечивать методическую погрешность менее $2,5$ мм, что в исследованной конфигурации достигается при высоте подвеса порядка $1000-1300$ мм, базисе перемещения $10-15$ мм с предпочтительным значением ≈ 12 мм, наличии устойчивой квазистереопары и субпиксельной локализации центров объектов. Наглядно это представлено в таблице 7.

Практическая реализация предложенного метода требует оценки вычислительной сложности алгоритма и требований к производительности обрабатывающей аппаратуры. Алгоритм обработки видеопотока включает следующие основные этапы: предварительная обработка кадра (нормализация яркости методом CLANE, шумовая фильтрация),

выделение окружностей методом кругового преобразования Хафа, субпиксельная локализация центров и расчет диспарантностей и разновысотностей. Вычислительная сложность предварительной обработки кадра составляет $O(N^2)$ по числу пикселей, преобразования Хафа для окружностей – $O(N^2 \cdot r)$, где r – диапазон перебираемых радиусов, субпиксельной локализации – $O(K)$ по числу выделенных окружностей, расчета разновысотностей – $O(M)$, где M – число головок ТВС в поле зрения. Доминирующим по сложности является этап преобразования Хафа [6].

ТАБЛИЦА 7. Рекомендуемые диапазоны параметров измерительной системы

TABLE 7. Recommended Parameter Ranges for the Measurement System

Параметр	Допустимый диапазон	Рациональное значение	Основание выбора
Фокусное расстояние f_{px}	порядка 800 рх	800 рх	подтверждено в экспериментальной конфигурации
Базис B	10–15 мм	12 мм	наиболее устойчивые результаты при 12 мм
Высота подвеса H	1000–1300 мм	1200 мм	минимум ошибки и достаточный параллакс
Диспарантность d	не менее 3–6 рх	5–6 рх и выше	минимально достаточная рабочая зона
Методическая погрешность Δh	< 2,5 мм	1,3–2,0 мм	необходима для контроля порога 5 мм
Геометрия траектории	контролируемая	симметричные пары	снижение систематической ошибки

Производительность системы должна обеспечивать полную обработку одного кадра за время, не превышающее период поступления следующего кадра. В отличие от систем видеонаблюдения реального времени, в задаче контроля ТВС перегруженная машина перемещается с малой угловой скоростью, что позволяет ограничиться частотой обработки $1-2$ кадра в секунду и располагать бюджетом времени порядка $500-1000$ мс на один кадр. При разрешении 768×576 рх современные одноплатные промышленные компьютеры обеспечивают выполнение полного алгоритма в пределах указанного бюджета. При необходимости увеличения частоты обработки кадров возможно применение аппаратного ускорения на основе GPU или специализированных программируемых логических интегральных схемах.

Заключение

В работе была дана оценка влияния параметров телевизионных средств и геометрии съемки на точность определения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига. Показано, что при использовании одной телевизионной камеры, перемещающейся по дуговой траектории и формирующей квазистереопары последовательных кадров, точность определения разновысотности определяется согласованным выбором фокусного расстояния, базиса квазистереопары, высоты подвеса камеры, а также качеством определения диспаратности. Экспериментальные и расчетные материалы подтверждают, что при рациональной геометрии съемки метод обеспечивает инструментальную точность, достаточную для практического контроля отклонений головок ТВС без применения дополнительных контактных измерительных устройств.

На основе аналитической модели установлено, что наибольшее влияние на итоговую погрешность оказывает ошибка определения диспаратности Δd , причем чувствительность результата к этой ошибке возрастает при уменьшении величины параллакса. Это означает, что при малых значениях диспаратности даже субпиксельные ошибки локализации центров головок ТВС могут приводить к заметному ухудшению точности. Следовательно, одной из ключевых задач при проектировании измерительной системы является обеспечение такого диапазона параметров камеры и траектории движения, при котором формируется устойчивый квазистереоэффект и сохраняется достаточная величина диспаратности для надежного расчета относительных высот.

Проведенная численная оценка позволяет определить рациональные диапазоны параметров измерительной системы. Установлено, что при высоте подвеса камеры порядка 1000–1300 мм, базисе квазистереопары 10–15 мм с предпочтительным значением около 12 мм, а также при обеспечении

субпиксельной локализации центров объектов метод параллакс-сдвига позволяет достигать точности до $\pm 1,3$ мм и типичной рабочей погрешности порядка $\pm 2,0 \dots 2,5$ мм. При этих условиях обеспечивается уверенный контроль разновысотности головок ТВС на уровне 5 мм, что соответствует требованиям практической диагностики в условиях АЭС.

Таким образом, полученные результаты показывают, что эффективность метода параллакс-сдвига определяется не изолированным выбором одного параметра, а согласованием характеристик телевизионной камеры и геометрии ее перемещения. Практическая значимость исследования заключается в том, что установленные диапазоны параметров могут быть использованы при настройке телевизионных средств контроля ТВС и при обосновании требований к измерительной системе, предназначенной для бесконтактного определения разновысотности головок ТВС в условиях ограниченного пространства активной зоны реактора.

Вместе с тем, практическое применение метода требует учета ряда дополнительных условий. Точность субпиксельной локализации центров головок ТВС определяется не только параметрами телевизионных средств, но и качеством изображения: снижение ОСШ вследствие недостаточной освещенности активной зоны приводит к росту ошибки диспаратности и требует применения адаптивной предобработки кадра (нормализация яркости, шумовая фильтрация, контроль экспозиции). Устойчивость измерений также обеспечивается предварительной калибровкой телевизионной системы и компенсацией систематических погрешностей, прежде всего дисторсии объекта и ошибки знания базиса квазистереопары. Реализация полного алгоритма обработки не предъявляет жестких требований к производительности: при характерной скорости перемещения перегрузочной машины достаточно обрабатывать 1–2 кадра в секунду, что достижимо на современных промышленных вычислителях.

Список источников

1. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Оценка методической погрешности измерения разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8(157). С. 227–241. EDN:STQRKT
2. Балабаев С.Л., Лозовская Е.Г., Румянцев К.Е. Методика оценки погрешности измерения цифровой видеосистемой разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов // Физико-математические методы и информационные технологии в естествознании, технике и гуманитарных науках: Сборник материалов международного научного e-симпозиума (Москва, Российская Федерация, 27–28 декабря 2014 г.). Краснодар: Международный центр научно-исследовательских проектов, 2015. 128 с. С. 61–76. EDN:RQBVJH
3. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Способы получения информации трехмерной сцены объекта для определения пространственного положения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2022. № 6(230). С. 117–128. DOI:10.18522/2311-3103-2022-6-117-128. EDN:VZOLOD
4. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Алгоритмическая обработка видеопотока и реализация метода параллакс-сдвига для бесконтактного контроля высоты объектов // Оборонный комплекс научно-техническому прогрессу России. 2025. № 4(168). С. 29–35. EDN:MOYUQI
5. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Метод параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС на основе видеопотока телевизионной камеры // Проектирование и технология электронных средств. 2025. № 4. С. 13–19. EDN:WTMLXG

6. Сердюков П.С., Румянцев К.Е. Исследование погрешностей бесконтактного измерения разновысотности головок ТВС методом параллакс-сдвига при дуговой траектории телевизионной камеры // Вестник СибГУТИ. 2025. Т. 19. № 4. С. 92–109. DOI:10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN:YKYWJR


References


1. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Estimates of the Error in the Height of the Strict Geometric Order of Objects Based on Digital Television Systems on the CCD. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014;8(157):227–241. (in Russ.) EDN:STQRKT
2. Balabaev S.L., Lozovskaya E.G., Rumyantsev K.E. Methods Estimating Uncertainty of Measurement Height of Objects in Strict Geometrical Order Using the Digital Video Systems. *Proceedings of the International Scientific e-Symposium on Physical and Mathematical Methods and Information Technologies in Natural Sciences, Engineering and Humanities*, Russian Federation, Moscow, 27–28 December 2014. Kirov: International Center for Scientific Research and Projects Publ.; 2015. p.61–76. (in Russ.) EDN:RQBVJH
3. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Methods of Obtaining Information About the Three-Dimensional Scene to Solve Problems of Determining the Spatial Position of Objects with a Regular Structure. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2022; 6(230):117–128. (in Russ.) DOI:10.18522/2311-3103-2022-6-117-128. EDN:VZOLOD
4. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Algorithmic video stream processing and implementation of the parallax-shift method for non-contact height measurement of objects. *Oboronyj kompleks nauchno-tekhnicheskomu progressu Rossii*. 2025;4(168): 29–35. (in Russ.) EDN:MOYUQI
5. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Parallax-shift method for non-contact measurement of fuel assembly head height differences using television camera video stream. *Design and Technology of Electronic Equipment*. 2025;4:13–19. (in Russ.) EDN:WTMLXG
6. Serdyukov P.S., Rumyantsev K.E. Investigation of Errors in Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Variations Using the Parallax-Shift Method with an Arc-Trajectory Television Camera. *Vestnik SibGUTI*. 2025;19(4):92–109. (in Russ.) DOI:10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN:YKYWJR

Статья поступила в редакцию 06.04.2025; одобрена после рецензирования 29.05.2026; принята к публикации 25.06.2026

The article was submitted 06.04.2025; approved after reviewing 29.05.2026; accepted for publication 25.06.2026

Информация об авторах:

СЕРДЮКОВ | аспирант института радиотехники, электроники и систем связи Южного федерального университета
Павел Сергеевич |  <https://orcid.org/0009-0003-1010-0902>

РУМЯНЦЕВ | доктор технических наук, заведующий кафедрой информационной безопасности телекоммуникационных систем института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного Федерального Университета
Константин Евгеньевич |  <https://orcid.org/0000-0001-7601-1505>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.