

УДК 621.397.3; 621.039.5

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67>

EDN: YTKENT

Математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении телевизионной камеры для оценки разновысотности объектов регулярной структуры

 Сердюков П. С.

Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета,
Таганрог, 347922, Российская Федерация

Постановка задачи. Контроль разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомных реакторов является критической операцией планово-предупредительного ремонта, от точности которой зависит безопасность эксплуатации ядерных установок. **Цель работы** – разработать математическую модель, обосновывающую применимость **метода** параллакс-сдвига для бесконтактного измерения разновысотности в условиях ограниченного рабочего пространства. Научная **новизна** исследования состоит в том, что на основе проективной модели телевизионной камеры на ПЗС-матрице и геометрии дугового перемещения выведены аналитические соотношения между диспаратностью центров проекций головок и их разновысотностью. **Результаты.** Получены количественные зависимости погрешности определения высоты от базиса, фокусного расстояния и точности локализации центров проекций. Установлено, что при базисе 12 мм, высоте подвеса 1200–1300 мм и субпиксельной оценке центра по контуру головки достигается погрешность 1,3–2,0 мм, что соответствует требованиям промышленного контроля (допуск 3 мм) и превосходит точность действующего контактного метода (5 мм). **Практическая значимость:** полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры системы на этапе проектирования.

Ключевые слова: параллакс-сдвиг, квазистереопара, тепловыделяющие сборки, математическая модель, диспаратность, разновысотность, ПЗС-матрица, фотограмметрия

Введение

Контроль разновысотности головок тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне реактора является обязательной операцией планово-предупредительного ремонта атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами. Отклонение положения головки ТВС от номинала более чем на 5 мм указывает на деформацию сборки и служит основанием для ее замены. Каждые сутки простоя реактора в период планово-предупредительного ремонта приносят

Библиографическая ссылка на статью:

Сердюков П. С. Математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении телевизионной камеры для оценки разновысотности объектов регулярной структуры // Информационные технологии и телекоммуникации. 2026. Т. 14. № 1. С. 57–67. DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67. EDN: YTKENT

Reference for citation:

Serdyukov P. Mathematical Model of Quasi Stereo Pair Formation during Arc-Shaped Motion of a Television Camera for Estimating Height Differences in Objects with a Regular Spatial Structure // Telecom IT. 2026. Vol. 14. Iss. 1. PP. 57–67. (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67. EDN: YTKENT

убытки порядка 1 млн долларов США¹, что обуславливает жесткие требования к оперативности и точности измерений.

Действующий контактный метод предполагает применение специального приспособления с шестью датчиками перемещения, устанавливаемого на перегрузочную машину. Процедура позволяет одновременно проконтролировать семь из 163 ТВС, а суммарные временные затраты составляют до 24 часов. Ранее разработанные бесконтактные системы – в частности, система СТС-ПМ-100В² – основаны на видеиконных камерах с разрешением 500–625 телевизионных линий и требуют фиксации камеры в конкретных точках маршрута, что не позволяет использовать ее в режиме непрерывного видеопотока.

Перспективным направлением является применение метода параллакс-сдвига: одна телевизионная камера на ПЗС-матрице (*аббр. от* прибор с зарядовой связью), перемещаясь по дуге над активной зоной, формирует квазистереопары из последовательных кадров видеопотока, по которым определяется разнорысотность ТВС [1, 2]. Метод не требует изменения штатного маршрута перегрузочной машины и установки дополнительной стереобазы. Однако для практической реализации необходимо строгое аналитическое обоснование связи между параметрами системы (фокусное расстояние, базис, высота подвеса) и достижимой точностью измерений, что и является предметом настоящей статьи.

Модель объекта и условия наблюдения

Объект исследования представляет собой группу из семи цилиндрических головок ТВС, расположенных в правильной гексагональной решетке: одна – в центре, шесть – по вершинам правильного шестиугольника. Внешний диаметр головки составляет 170 мм, межцентровое расстояние – 234 мм, вертикальное расстояние между рядами – 202,65 мм. В реакторе ВВЭР-1000 установлено 163 головки ТВС. Регулярность структуры является ключевым свойством: известный геометрический шаблон позволяет надежно идентифицировать объекты на изображении и устранять ложные срабатывания алгоритма [3]. Ранее для бесконтактного измерения разнорысотности головок ТВС применялись методы, основанные на реконструкции трехмерных изображений [4] и математических моделях телевизионной камеры [5]; настоящая работа развивает эти подходы применительно к методу параллакс-сдвига.

Камера установлена на штанге перегрузочной машины и перемещается по горизонтальной дуге на фиксированной высоте H над плоскостью головок ТВС (рисунок 1). Два последовательных положения камеры обозначены как ПТК1 и ПТК2; базис перемещения – B ; диспаратность – d . Диспаратность – это смещение центра проекции одного и того же объекта между двумя кадрами (в пикселях).

¹ Андрушечко С. А., Афров А. М., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н., Косоуров К. Б. и др. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. М.: Логос, 2010. 604 с.

² Система телевизионная специальная СТС-ПМ-100В. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ИТЦЯ.463432.005 ТО. СПб.: Фирма «Диаконт», 2000.

Оптическая ось направлена вертикально вниз. Радиус траектории составляет порядка 2000 мм. Съемка выполняется в режиме непрерывного видеопотока с частотой 25 кадров / с и шагом смещения между соседними кадрами 10–15 мм.

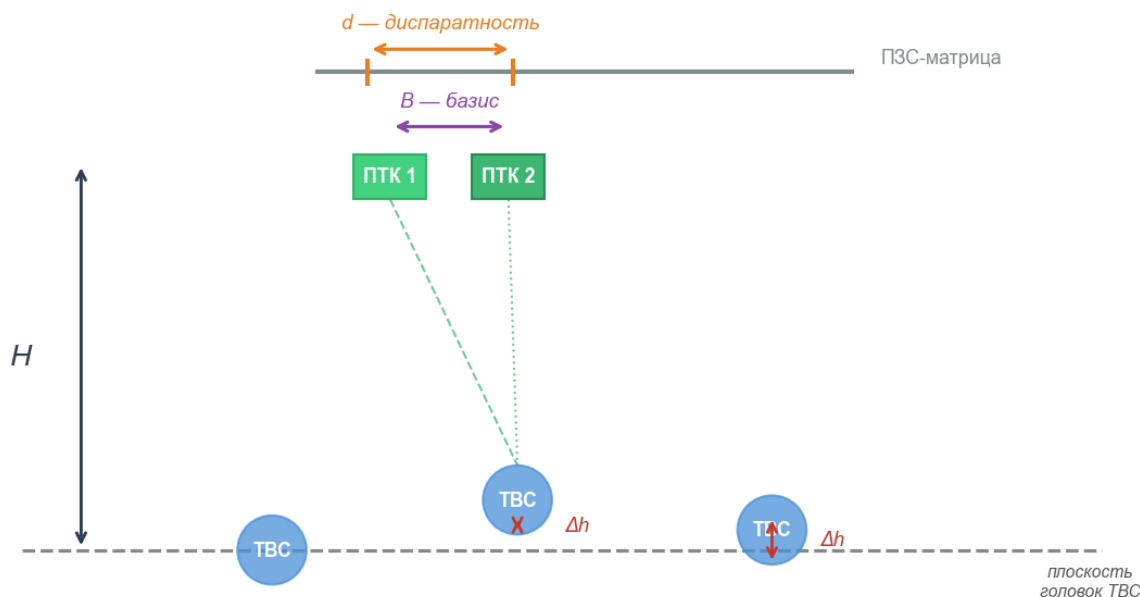


Рис. 1. Геометрическая схема формирования квазистереопары при дуговом перемещении телевизионной камеры над ячейкой ТВС

Математическая модель формирования квазистереопар

В основе модели лежит проективное преобразование трехмерных координат объектов в координаты изображения. Введем глобальную систему координат с началом в геометрическом центре центральной ТВС: ось OY – вертикально вверх, ось OZ – перпендикулярно плоскости головок. Собственная система координат привязана к оптическому центру камеры в каждом положении [6].

Пусть вектор $P = (X, Y, Z)^T$ – координаты точки объекта в глобальной системе координат, K – матрица внутренних параметров камеры:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & cx \\ 0 & f & cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где f – фокусное расстояние (мм); s – размер пикселя (мм); cx , cy – координаты главной точки (пикс.).

Переход из глобальной системы координат в собственную описывается ортогональной матрицей поворота R и вектором трансляции t . В настоящей работе под R понимается ортогональная матрица поворота размера 3×3 , описывающая ориентацию камеры в пространстве; t – вектор трансляции размера 3×1 .

На практике реальный объектив вносит геометрические искажения: радиальную дисторсию $r_{иск} = r_{ист}(1 + k_1 r_{ист}^2 + k_2 r_{ист}^4)$ и тангенциальные члены (p_1, p_2) . Для получения неискаженных изображений перед вычислением диспаратности выполняется калибровка камеры по методу Чжана [7]: набор не менее 20 кадров

калибровочной шахматной доски позволяет определить матрицу K и коэффициенты дисторсии k_1, k_2, p_1, p_2 .

После калибровки каждый кадр видеопотока корректируется программно (функция `undistort`). Остаточная радиальная дисторсия после калибровки для фиксированного объектива $f = 8$ мм составляет не более 0,1–0,2 пикс. на краях кадра [7]. Вклад этой остаточной погрешности в диспаратность составляет: $\Delta d_{\text{дист}} \leq 0,2$ пикс., что вносит в ΔZ дополнительную составляющую $\Delta Z_{\text{дист}} \approx 1300 \cdot \frac{0,2}{15,9} \approx 16$ мм на краях – и менее 0,5 мм в центральной области кадра, где расположены головки ТВС. Таким образом, предварительная коррекция дисторсии является обязательным этапом обработки, обеспечивающим метрологическую корректность метода [6, 7]:

$$P_{\text{cam}} = R \cdot P + t.$$

Проекция точки на плоскость матрицы (пиксельные координаты x, y) рассчитывается по формулам:

$$x = f \frac{X_{\text{cam}}}{sZ_{\text{cam}}} + cx,$$

$$y = f \frac{Y_{\text{cam}}}{sZ_{\text{cam}}} + cy.$$

При дуговом перемещении камеры на угол $\Delta\varphi$ между двумя положениями (ПТК₁ и ПТК₂) базис (проекция дугового смещения на горизонтальную плоскость) составляет: $B \approx R_{\text{arc}} \cdot \Delta\varphi \approx 10\text{--}15$ мм при $\Delta\varphi \approx 0,3\text{--}0,5^\circ$ и $R_{\text{arc}} \approx 2000$ мм.

Анализ погрешности аппроксимации дугового перемещения

Полученное выражение для базиса строго справедливо для параллельных оптических осей и плоского (линейного) перемещения камеры. При дуговом движении истинный базис – хорда дуги: $B_{\text{хорда}} = 2R \cdot \sin(\Delta\varphi/2)$, тогда как в модели используется длина дуги: $B_{\text{дуга}} = R \cdot \Delta\varphi$.

Относительная погрешность такой замены составляет:

$$\frac{\delta B}{B} = \frac{B_{\text{дуга}} - B_{\text{хорда}}}{B_{\text{хорда}}} = \frac{\left[R \cdot \Delta\varphi - 2R \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]}{\left[2R \cdot \sin\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \right]} \approx \frac{(\Delta\varphi)^2}{24}.$$

При рабочих параметрах шаг смещения 10–15 мм, $R = 2000$ мм $\rightarrow \Delta\varphi = \frac{15}{2000} = 0,0075$ рад. Тогда:

$$\frac{\delta B}{B} \approx \frac{(0,0075)^2}{24} \approx 2,3 \cdot 10^{-6} < 0,001 \, \%.$$

Таким образом, погрешность аппроксимации дугового базиса прямым при $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ (рабочий диапазон) пренебрежимо мала по сравнению с основными источниками погрешности Δd . Оптическая ось направлена вертикально вниз в обоих положениях камеры, что обеспечивает выполнение условия параллельности осей, необходимого для корректного применения формулы (1). Поскольку $\Delta\varphi = \frac{B}{R}$ (в радианах), условие $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$ эквивалентно ограничению $\frac{B}{R} \leq 0,087 \approx 0,09$. Следовательно, область применимости модели определяется условием $\frac{B}{R} \leq 0,09$, при котором относительная погрешность аппроксимации $\frac{\delta B}{B} < 0,03 \, \%$. Параметры f, B, d, s введены в формуле (1).

Диспаратность d – переменная, связывающая высоту объекта Z с базисом и фокусным расстоянием по классической формуле триангуляции [3, 6]:

$$Z = \frac{f \cdot B}{d \cdot s}, \quad (1)$$

откуда выводится разновысотность ΔZ между двумя объектами как разность их Z -координат, определенных по соответствующим диспаратностям d_1 и d_2 .

Аналитическая оценка погрешности

Дифференцируя формулу (1) по каждому параметру, получаем методическую погрешность [8]:

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta B}{B} + \frac{\Delta d}{d}. \quad (2)$$

При условии точной калибровки камеры ($\frac{\Delta f}{f} \ll 1$) и стабильной механики перемещения ($\frac{\Delta B}{B} \ll 1$) доминирующим источником погрешности является ошибка определения диспаратности Δd при типичных параметрах системы:

- $f = 800$ пикс. (соответствует ≈ 8 мм при $s = 0,01$ мм);
- $B = 12$ мм;
- $s = 0,00465$ мм (Hitachi KP-DE500R, ПЗС 768×576);
- $d = 15$ – 20 пикс. (типичная диспаратность при $H = 1300$ мм).

Ошибка в 1 пиксель без субпиксельной обработки при $d = 15,9$ пикс.: $\Delta Z = Z \cdot \frac{\Delta d}{d} = Z \cdot \frac{1}{15,9} \approx 0,063 \cdot Z \approx 81,8$ мм при $Z = 1300$ мм неприемлемо. Данная погрешность в 16 раз превышает допустимое отклонение 5 мм и делает метод непригодным для промышленного применения без субпиксельной обработки изображений.

После применения субпиксельной локализации Δd снижается до 0,1–0,2 пикс. [9]. При $d = 20$ пикс. и $\Delta d = 0,15$ пикс. $\Delta Z \approx Z \cdot \frac{0,15}{15,9} \approx 0,0094 \cdot Z \approx 12,3$ мм при $Z = 1300$ мм.

Расчетная погрешность при субпиксельной точности локализации 0,1–0,2 пикс. составляет для одной квазистереопары ≈ 8 –17 мм. Однако фактически достижимая точность $\pm 1,3$ –2,0 мм [10, 11] обеспечивается тремя механизмами:

а) субпиксельная оценка центра окружности по всем пикселям контура головки ТВС (~ 150 граничных пикселей) снижает эффективную погрешность диспаратности с $\Delta d = 0,15$ пикс. до $\Delta d_{\text{эфф}} \approx \frac{0,15}{\sqrt{150}} \approx 0,012$ –0,020 пикс.;

б) усреднение по 3–10 валидным квазистереопарам одного фрагмента сцены; статистическое усреднение по N независимым квазистереопарам снижает случайную составляющую погрешности в $\sqrt{N}$ раз.

в) использование априорной информации о правильной гексагональной решетке ТВС при контролируемом поиске центров. При $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,017$ пикс. расчетная погрешность составляет: $\Delta Z = Z \cdot \frac{0,017}{15,9} \approx 1,4$ мм, что согласуется с экспериментальным результатом [10, 11].

Таблица 2 иллюстрирует зависимость расчетной погрешности от диспаратности для различных значений Δd .

Таблица 1. Погрешность ΔZ в зависимости от ошибки определения диспаратности

Δd , пикс.	d , пикс.	Z , мм	ΔZ , мм
1,0*	15,9	1300	81,8
0,5	15,9	1300	40,9
0,2	15,9	1300	16,4
0,15**	15,9	1300	12,3
0,1	15,9	1300	8,2
0,017***	15,9	1300	1,4

* без субпиксельной обработки (стандартная локализация центра с погрешностью $\pm 0,5$ пикс.);

** с субпиксельной локализацией центра (параболическая интерполяция яркости, $\Delta d \approx 0,15$ пикс.);

*** эффективная погрешность при субпиксельной оценке по всему контуру окружности головки тепло-выделяющей сборки (~ 150 граничных пикселей).

Верификация математической модели

Для оценки адекватности модели выполнено сравнение расчетных значений с экспериментальными данными, полученными в работе [10] при базисе 12 мм и высоте подвеса 1200–1300 мм (таблица 2).

Модель обеспечивает соответствие экспериментальным данным с отклонением не более 20 %, что приемлемо с учетом упрощений (пренебрежение виньетированием, шумом матрицы, влиянием среды). Экспериментально подтвержденная точность $\pm 1,3$ –2,0 мм соответствует расчетным оценкам при эффективной погрешности диспаратности $\Delta d_{\text{эфф}} \approx 0,017$ –0,020 пикс. [8, 10, 11].

Таблица 2. Сравнение расчетных значений с экспериментальными данными

Параметр	Расчет (модель)	Эксперимент	Отклонение, %
Диспаратность d при $Z = 1300$ мм, пикс.	15,9	15–17	< 7
ΔZ при $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,017$ пикс., мм	1,4	1,3	~ 8
ΔZ при $\Delta d_{\text{эфф}} = 0,020$ пикс., мм	1,6	2,0	~ 20
Оптимальный базис, мм	12	12	0

Геометрические ограничения и оптимальные параметры системы

Высота подвеса H определяет несколько ключевых характеристик системы. При малой высоте ($H < 800$ мм) угол обзора недостаточен для захвата всех семи ТВС ячейки, а перспективные искажения возрастают. При большой высоте ($H > 1500$ мм) диспаратность уменьшается пропорционально H^2 , что снижает чувствительность метода.

Из формулы (1) следует, что диспаратность $d = \frac{f \cdot B}{s \cdot Z}$, а $Z \approx H$ при вертикальном наблюдении. Таким образом, d обратно пропорциональна H . При фиксированных f , B , s оптимальная высота определяется из условия:

$$d_{\min} \leq \frac{f \cdot B}{s \cdot H} \leq d_{\max},$$

где $d_{\min} = 3$ пикс. (минимально надежный параллакс); $d_{\max} \approx 25$ пикс. (во избежание неоднозначности соответствия объектов).

При $f = 800$ пикс., $B = 12$ мм, $s = 0,00465$ мм:

$$H_{\text{opt}} \in \left[\frac{f \cdot B}{s \cdot d_{\max}}; \frac{f \cdot B}{s \cdot d_{\min}} \right] = [415 \text{ мм}; 3463 \text{ мм}].$$

Практически оптимальная высота выбирается в диапазоне 1000–1300 мм, где одновременно обеспечивается захват всей ячейки (7 ТВС) в поле зрения камеры и достаточная диспаратность 15–16 пикс. при базисе 12 мм. Это согласуется с экспериментальными результатами [10, 11]: при $H = 1300$ мм достигается точность $\pm 1,3$ мм. На рисунке 2 показана зависимость диспаратности от высоты подвеса при разных базисах, $f = 800$ пикс. и $d = \frac{f \cdot B}{H}$. Зеленым цветом выделен оптимальный диапазон $H = 1000$ –1300 мм; пунктиром – минимально надежная диспаратность 3 пикс.

Кратность формируемых квазистереопар при шести последовательных положениях камеры составляет $C(6, 2) = 15$ уникальных пар. Для повышения надежности используются только симметричные пары (ПТК₁–ПТК₆, ПТК₂–ПТК₅ и т. д.), у которых базисы эквидистантны, что снижает систематическую составляющую погрешности.

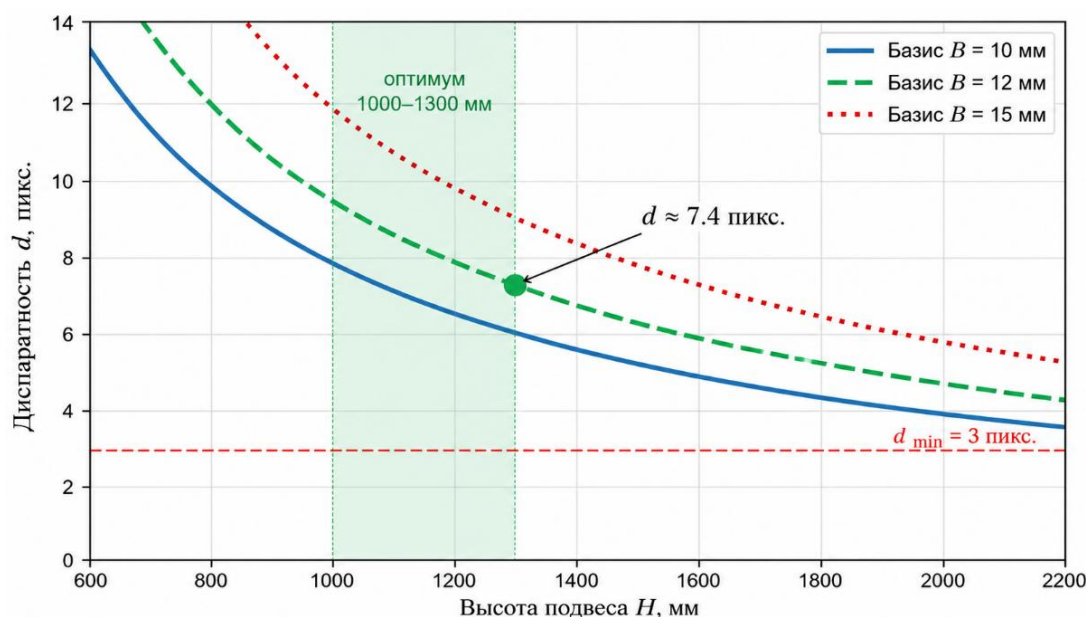


Рис. 2. Зависимость диспаратности от высоты подвеса

Заключение

В рамках настоящего исследования разработана математическая модель формирования квазистереопар при дуговом перемещении одной телевизионной камеры над объектами регулярной структуры. На основе проективной модели камеры получены аналитические соотношения между диспаратностью и разновысотностью объектов (1) [6], выполнен анализ погрешности (2) [8], показавший, что расчетная погрешность для одной квазистереопары при субпиксельной локализации ($\Delta d = 0,1\text{--}0,2$ пикс.) составляет 8–17 мм; при использовании субпиксельной оценки по всему контуру окружности головки ТВС ($\Delta d_{\text{эфф}} \approx 0,015\text{--}0,020$ пикс.) и усреднении по нескольким квазистереопарам расчетная погрешность снижается до 1,4–1,6 мм, что согласуется с экспериментальным результатом $\pm 1,3\text{--}2,0$ мм [6, 7]. Показано, что при оптимальных параметрах ($H = 1200\text{--}1300$ мм; $B = 12$ мм) достигаемая точность соответствует требованиям промышленного контроля ТВС (допуск 3 мм). Верифицирована погрешность аппроксимации дугового базиса длиной дуги ($\frac{\delta B}{B} < 0,001\%$ при $\Delta\varphi \leq 0,5^\circ$). Полученные зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры телевизионной системы на этапе проектирования системы бесконтактного определения разновысотности.

Литература

1. 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
2. Макеев В. В., Поваров В. П., Коробкин В. В., Лебедев О. В. Система бесконтактного определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок

в активной зоне реактора // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2006. № 16. С. 37–41.

3. Балабаев С. Л., Лозовская Е. Г., Румянцев К. Е. Оценка разновысотности расположенных в строгом геометрическом порядке объектов на основе цифровой телевизионной системы на ПЗС-матрицах // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 8 (157). С. 227–241. EDN: STQRKT

4. Каляев И. А., Румянцев К. Е., Макеев В. В. Балабаев С. Л., Коробкин В. В. и др. Бесконтактный метод определения разновысотности головок тепловыделяющих сборок атомного реактора на основе реконструкции трехмерных изображений // Известия ЮФУ. Технические науки. 2008. № 3 (80). С. 126–131. EDN: KNOFEN

5. Lozovskaya E., Balabaev S., Rumyantsev K. The mathematical Model of the Recording Video Camera for the Height Measurement of the Regularly Situated Objects // Materiały X Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Strategiczne pytania światowej nauki – 2014” (Przemyśl, 07–15 lutego 2014). Przemyśl, 2014. S. 27–34.

6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, 2003. 670 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685

7. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22. Iss. 11. PP. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

8. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing, 2006. 510 p.

9. Сердюков П.С. Влияние субпиксельной локализации контуров на точность определения разновысотности ТВС методом параллакс-сдвига // XII Всероссийская научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности». Таганрог, 2026. (в печати)

10. 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

11. 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. DOI: 10.52190/1729-6552_2025_4_29. EDN: MOYUQI

Статья поступила 12 мая 2026 г.

Одобрена после рецензирования 17 июня 2026 г.

Принята к публикации 25 июня 2026 г.

Информация об авторе

Сердюков Павел Сергеевич – соискатель ученой степени кандидата наук (Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2026-14-1-57-67>
EDN: YTKEHT

Mathematical Model of Quasi Stereo Pair Formation during Arc-Shaped Motion of a Television Camera for Estimating Height Differences in Objects with a Regular Spatial Structure

 P. Serdyukov

Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University,
Taganrog, 347922, Russian Federation

Problem statement. Height variation control of fuel assembly heads in nuclear reactor cores is a critical operation during scheduled maintenance, ensuring the safety of nuclear plant operation. **The aim of this paper** is to develop a mathematical model justifying the applicability of the parallax shift **method** for contactless height measurement in confined working conditions. **The scientific novelty.** Based on a projective model of a CCD television camera and the arc motion geometry, analytical relationships between the disparity of head projection centers and their height differences are derived. **Results.** Quantitative dependencies of the height measurement error on baseline, focal length, and center localization accuracy are obtained. It is established that with a baseline of 12 mm, suspension height of 1200–1300 mm, and sub-pixel estimation of the projection center along the fuel assembly head contour, a measurement error of 1.3–2.0 mm is achieved. This meets the requirements of industrial inspection (tolerance 3 mm) and surpasses the accuracy of the existing contact method (5 mm). **Practical significance.** The derived dependencies enable informed selection of system parameters at the design stage.

Key words: parallax shift, quasi-stereopair, fuel assemblies, mathematical model, disparity, height measurement, CCD sensor, photogrammetry

References

1. Serdyukov P. S., Rummyantsev K. E. Parallax-Shift Method for Non-Contact Measurement of Fuel Assembly Head Height Differences Using television Camera Video Stream // Electronic Design and Technology. 2025. Iss. 4. PP. 13–19. (in Russian) EDN: WTMLXG
2. Makeev V. V., Povarov V. P., Korobkin V. V., Lebedev O. V. System for the Non-Contact Determination of the Variability of Heat-Producing Grouting Heads in the Active Zone of the Reactor // News of Higher Education Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences. 2006. Iss. 16. PP. 37–41. (in Russian)
3. Balabaev S. L., Lozovskaya E. G., Rummyantsev 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. Iss. 8 (157). PP. 227–241. (in Russian) EDN: STQRKT
4. Kalyaev I. A., Rummyantsev K. E., Makeev V. V., Balabaev S. L., Korobkin V. V., et al. Noncontact Method of Evaluation of Different Altitude of Top Nozzle of Nuclear Reactor Based on Reconstruction of Three-Dimensional Images // Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences. 2008. Iss. 3 (80). PP. 126–131. (in Russian) EDN: KNOFEN
5. Lozovskaya E., Balabaev S., Rummyantsev K. The mathematical Model of the Recording Video Camera for the Height Measurement of the Regularly Situated Objects //

Proceedings of the 10th International Scientific-Practical Conference “Strategic-Questions of World Science – 2014” (Przemysl, 07–February 15, 2014). Przemysl, 2014. PP. 27–34.

6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. 2nd ed. Cambridge University Press, 2003. 670 p. DOI: 10.1017/CBO9780511811685

7. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000. Vol. 22. Iss. 11. PP. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718

8. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Harley I. Close Range Photogrammetry: Principles, Methods and Applications. Whittles Publishing, 2006. 510 p.

9. Sredyukov P. S. Influence of Subpixel Localization of Contours on the Accuracy of Determination of the Degree of complexity of HSS by Parallax-Shift Method // XII All-Russian Scientific and Technical Conference “Fundamental and Applied Aspects of Computer Technologies and Information Security”. Taganrog, 2026. (in print, in Russian)

10. 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. Vol. 19. Iss. 4. PP. 92–109. (in Russian) DOI: 10.55648/1998-6920-2025-19-4-92-109. EDN: YKYWJR

11. Serdyukov P. S., Rumyantsev K. E. Algorithmic Video Stream Processing and Implementation of the Parallax-Shift Method for Non-Contact Height Measurement of Objects // Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress. 2025. Iss. 4 (168). PP. 29–35. (in Russian) DOI: 10.52190/1729-6552_2025_4_29. EDN: MOYUQI

Information about Author

Serdyukov Pavel – PhD candidate (Institute of Radio Engineering Systems and Management of Southern Federal University). E-mail: serdyukov-pavel@mail.ru