

К. Г. АРАКАНЦЕВ, А. А. ГОРБАЧЁВ, М. Г. СЕРИКОВА

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ФАКТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Приводятся результаты испытаний макета оптико-электронной стереоскопической системы, предназначенной для использования в качестве средства контроля положения железнодорожного пути.

***Ключевые слова:** контроль положения железнодорожного пути, стереоскопическая система, испытания макета, погрешность измерения.*

В России железнодорожный транспорт осуществляет 80 % грузовых и 40 % пассажирских перевозок, при этом скорость перемещения поездов может достигать 200 км/ч и более [1]. Такой режим работы требует своевременной индикации и устранения неточностей положения железнодорожного полотна [2]. Требования к точности контроля текущего положения

полотна обусловлены максимально достижимой точностью его выправки современными выправочно-подбивочно-рихтовочными машинами [3]. Допустимая погрешность определения положения пути в продольном профиле и плане не должна превышать 2 мм.

Для автоматизации работ по приведению пути в проектное положение применяются системы, работающие по методу сглаживания неровностей. В настоящее время все большее применение, особенно при обслуживании высокоскоростных магистралей, находят системы, возвращающие путь в проектное положение относительно реперов, расположенных вдоль рельсовой колеи. Функционирование таких систем основано на использовании GPS-приемников и электронных тахеометров. Однако системы, построенные на GPS-приемниках, не способны показать требуемую точность измерения, а системы, построенные на электронных тахеометрах, характеризуются невысокой производительностью измерений (от 0,5 до 3,5 км/ч), сложной схемой, высокой стоимостью, большими габаритами и низкой степенью автоматизации измерений. Существенным недостатком указанных систем является и проведение измерений в ненагруженном состоянии железнодорожного пути.

Свободную от указанных недостатков систему можно реализовать на базе оптико-электронной стереоскопической системы, устанавливаемой непосредственно на путевую машину и контролирующей пространственное положение железнодорожного пути относительно активных реперов, закрепленных вдоль пути на столбах контактной сети. Такое решение позволит проводить полностью автоматизированные измерения со скоростью до 10 км/ч при малой энергоемкости и стоимости системы в целом.

Для проверки возможности использования стереоскопической системы в качестве средства контроля положения железнодорожного пути были проведены экспериментальные исследования макета системы (рис. 1).

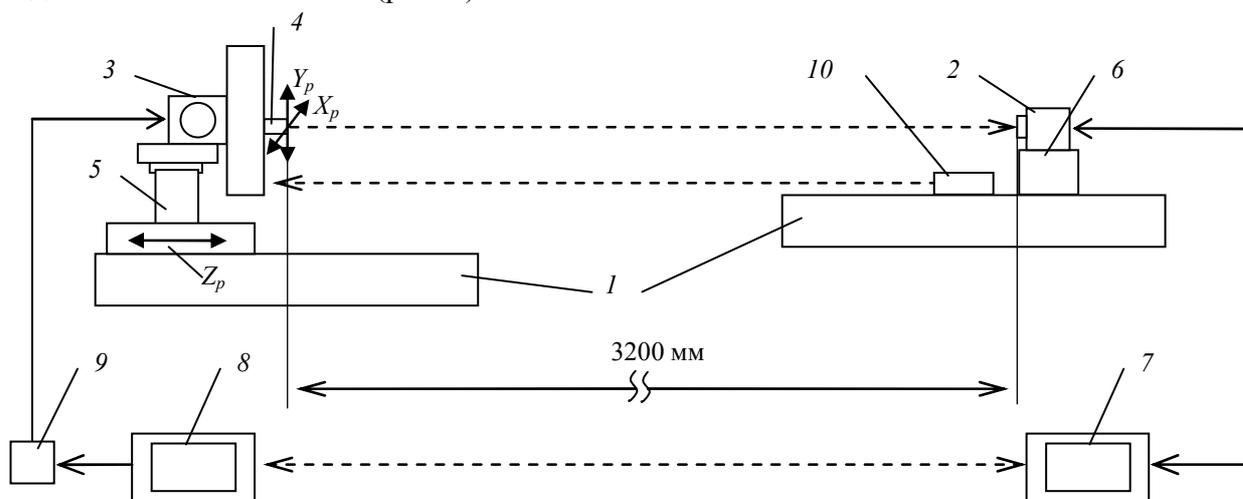


Рис. 1

Перед стереоскопической системой 2 с базой 300 мм, установленной на основании 1 и состоящей из двух телевизионных камер (камеры VEC-545 фирмы EVS, Россия, с объективами Computar 80G: $f=25$ мм, $k=1,4$), располагался контрольный элемент 4 (инфракрасный излучающий диод L-34SF4C фирмы “Kingbright”, Тайвань), закрепленный на двухкоординатной подвижке 3 (собранный из двух подвижек 8MT160-300 и 8MT160-200 фирмы “Standa”, Латвия), управление которой осуществлялось компьютером 8 через блок сопряжения 9. Зарегистрированное камерами перемещение контрольного элемента 4 анализировалось компьютером 7. Контроль дальности установки подвижки 3 относительно стереоскопической системы проводился лазерной рулеткой 10 (Leica DISTO™ D3a). Подвижка и стереосистема крепились к основанию с помощью устройств 5 и 6.

Следует отметить, что использование активного контрольного элемента продиктовано требованиями по энергосбережению. При этом вариант с использованием пассивного

контрольного элемента (малоразмерного отражателя) был отклонен по результатам проверочного энергетического расчета. Реализация системы с отражателем потребовала бы включения в состав системы одного или нескольких мощных прожекторов подсветки, что существенно увеличило бы энергопотребление и привело к дополнительному нагреву оптических и электронных компонентов стереоскопической системы.

Изображения, демонстрирующие расположение телевизионных камер 1 и 2 макета стереоскопической системы и принцип установки контрольного элемента на двухкоординатной подвижке, приведены на рис. 2, а, б соответственно.

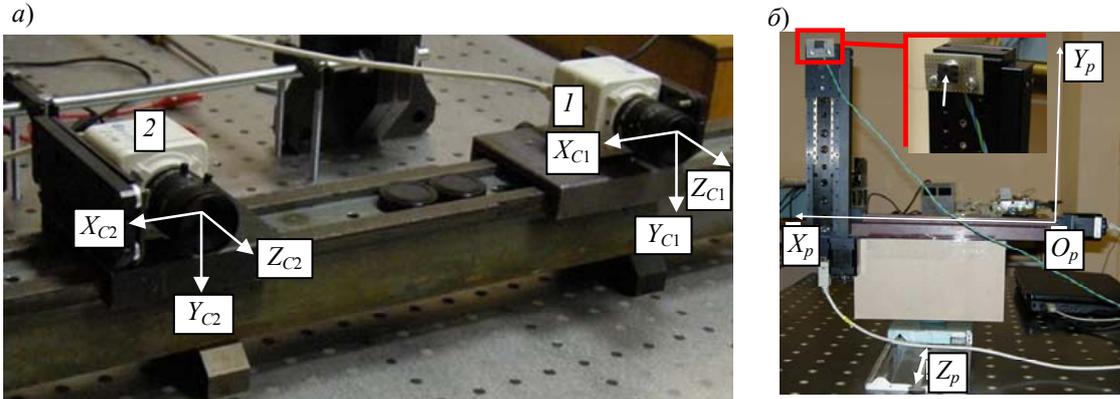


Рис. 2

В результате перемещений подвижки была получена статическая характеристика стереоскопической системы с шагом 20 мм вдоль координатных осей $O_p X_p$ и $O_p Y_p$ в трех отстоящих друг от друга на расстояние 100 мм плоскостях 1—3 (рис. 3).

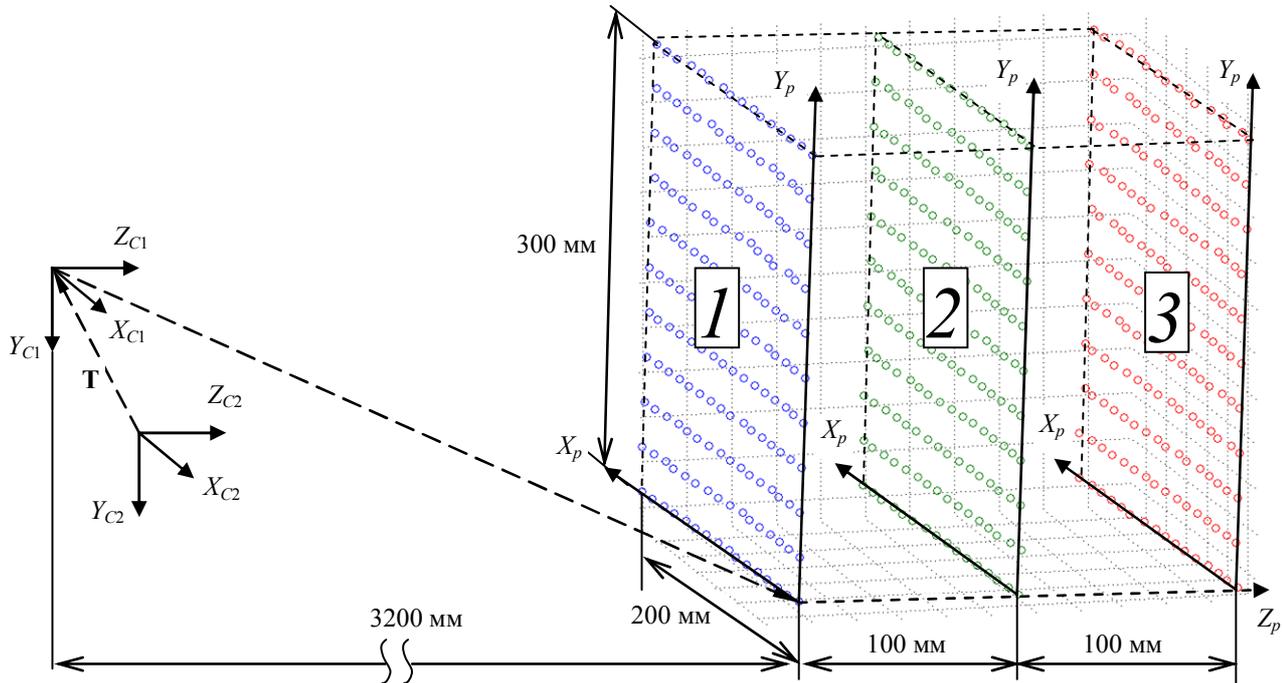


Рис. 3

Для каждого положения контрольного элемента в соответствующем кадре стереопары произведен поиск изображения контрольного элемента и найдены координаты его энергетического центра (u_1, v_1) и (u_2, v_2) [4].

Для минимизации систематических погрешностей измерений была проведена процедура калибровки стереоскопической системы. Для этого перед камерами устанавливалась калибровочная сетка последовательно в 30 различных положениях, изображения которой обрабатывались в программе MatLab Calibration Toolbox [5]. В результате выполнения этой опе-

рации были определены внутренние и внешние параметры каждой камеры и стереоскопической системы в целом.

В качестве приборной системы координат была выбрана система координат X_{C1}, Y_{C1}, Z_{C1} камеры 1 (см. рис. 2, а). Расчет искомым координат X_1, Y_1, Z_1 контрольного элемента осуществлялся с использованием выражения [6]

$$\mathbf{P} = (X_1 \ Y_1 \ Z_1)^T = Z_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{r}_1,$$

где $\mathbf{r}_1 = (u_1 \ v_1 \ 1)^T$ — вектор координат изображения контрольного элемента, при этом координата Z_1 определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} K_1 Z_1 + K_2 Z_2 - L_1 &= 0; \\ K_3 Z_1 + K_4 Z_2 - L_2 &= 0; \end{aligned} \right\}$$

здесь Z_2 — координата контрольного элемента в системе координат камеры 2; $K_1, K_2, K_3, K_4, L_1, L_2$ — коэффициенты, определяемые выражениями

$$\begin{aligned} K_1 &= \mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T (\mathbf{A}_1^{-1}) \mathbf{r}_1, \quad K_2 = K_3 = -\mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T \mathbf{R}^T (\mathbf{A}_2^{-1}) \mathbf{r}_2, \quad K_4 = \mathbf{r}_2^T (\mathbf{A}_2^{-1})^T (\mathbf{A}_2^{-1}) \mathbf{r}_2, \\ L_1 &= -\mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T \mathbf{R}^T \mathbf{T}, \quad L_2 = \mathbf{r}_2^T (\mathbf{A}_2^{-1})^T \mathbf{T}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{r}_2 = (u_2 \ v_2 \ 1)^T$ — вектор координат изображения контрольного элемента в системе координат второй камеры; $\mathbf{T} = (t_x \ t_y \ t_z)^T$ — вектор трансляции, определяющий положение центра проекции первой камеры в системе координат второй; $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ — матрицы внутренних параметров первой и второй камер соответственно:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} -f_1'/p_{X_1} & 0 & u_{01} \\ 0 & -f_1'/p_{Y_1} & v_{01} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} -f_2'/p_{X_2} & 0 & u_{02} \\ 0 & -f_2'/p_{Y_2} & v_{02} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

здесь f_1', f_2' — фокусное расстояние объективов первой и второй камер соответственно, мм; $p_{X_1}, p_{Y_1}, p_{X_2}, p_{Y_2}$ — горизонтальный и вертикальный размеры элементов матриц первой и второй камер соответственно, мм; $u_{01}, v_{01}, u_{02}, v_{02}$ — координаты точек пересечения плоскостей анализа камер и оптических осей соответствующих объективов, пкс; $\mathbf{R} = \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_Z$ — матрица поворота локальной системы координат первой камеры относительно осей локальной системы координат второй камеры:

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где α, β, γ — углы поворота вокруг осей X_1, Y_1 и Z_1 соответственно.

Расчет по указанному алгоритму обеспечивает минимальную среднеквадратическую погрешность измерений [6].

Поскольку номинальные положения контрольного элемента относительно системы координат первой камеры неизвестны, измеренные координаты X_1, Y_1, Z_1 в каждом из положений двухкоординатной подвижки (1 — 2 — 3, см. рис. 3) были аппроксимированы плоскостями по методу наименьших квадратов, при этом положения узлов получившейся сетки

были приняты за номинальные положения контрольного элемента. В таблице приведены значения среднеквадратических погрешностей измерения координат контрольного элемента для трех значений Z_1 .

Z_1 , мм	σX_1 , мм	σY_1 , мм	σZ_1 , мм
3200	0,09	0,21	0,71
3300	0,09	0,27	0,72
3400	0,16	0,29	0,86

Указанные в таблице значения погрешностей соответствуют среднеквадратической погрешности измерения координат изображений контрольного элемента, равной $\sigma=0,17$ пкс. Это значение было использовано для экстраполяции результатов исследования погрешности измерения на случай, когда дальность установки подвижки увеличена до 10 м (рис. 4).

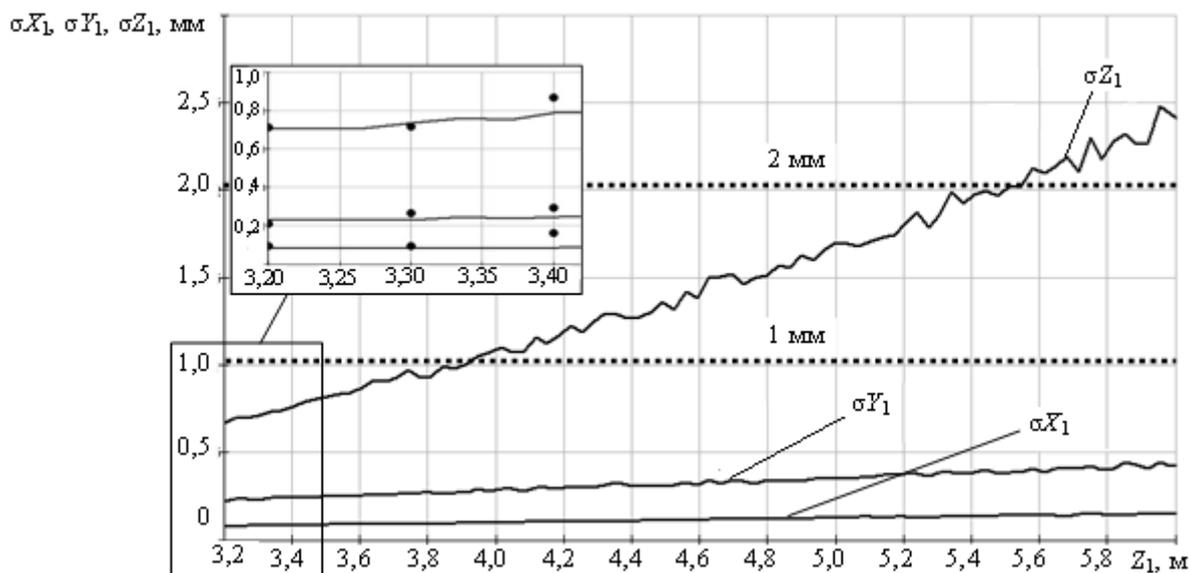


Рис. 4

Анализ рис. 4 показывает, что экспериментальные данные согласуются с результатами стохастического моделирования; кроме того, точность стереоскопической системы соответствует требуемой ($\pm 1 \dots 2$ мм) погрешности определения положения пути при перемещении контрольного элемента на расстояние до 5000 мм. Практика показывает, что дальность установки реперов от оси железнодорожного пути крайне редко превышает указанное расстояние.

Проведенные исследования показали, что стереоскопическая система контроля фактического положения железнодорожного пути не уступает по точности имеющимся на рынке аналогам, обеспечивая полную автоматизацию измерений.

В дальнейшем планируется исследовать точность системы при работе в динамическом режиме со скоростью до 10 км/ч. Такой режим работы вызовет появление дополнительных погрешностей, обусловленных вибрациями, искажением изображений контрольного элемента и другими факторами. Однако требуемую точность измерений можно обеспечить посредством введения в схему дополнительных оптических элементов, использования улучшенной процедуры калибровки и модификации алгоритмов обработки информации.

Следует отметить, что быстродействие стереоскопической системы позволяет производить измерения со скоростью, превышающей заявляемые 10 км/ч. Однако для аппаратуры, установленной на выправочной машине и предназначенной для определения межрельсового расстояния, стрел изгиба, возвышения наружного рельса и других параметров пути, указанный скоростной режим является максимальным.

Внедрение стереоскопической оптико-электронной системы в состав автоматизированных комплексов по обслуживанию железных дорог позволит увеличить их пропускную способность и сократить время выполнения ремонтных работ.

Статья подготовлена по результатам исследований, проведенных при поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., соглашение № 14.В37.21.1529 от 20.09.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитрий Верхотуров*. Железные дороги России: настоящее и возможное будущее [Электронный ресурс]: <<http://www.apn.ru/publications/article17542.htm>>.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: <<http://www.dzd-ussr.ru/doc/norm/pte.htm>>.
3. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. ред. *Н. С. Конарев*. М.: Изд-во „Большая Российская энциклопедия“, 1994. С. 76.
4. *Соломатин В. А.* Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. М.: Машиностроение, 1992. 128 с.
5. Camera Calibration Toolbox for MatLab [Электронный ресурс]: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>.
6. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / *И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

Сведения об авторах

- Константин Геннадьевич Араканцев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: kostya3312@yandex.ru
- Алексей Александрович Горбачёв** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: gorbachyov@grv.ifmo.ru
- Мария Геннадьевна Серикова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: serikovamg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
06.06.11 г.