

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОНТРОЛЯ СМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕПЕРНЫХ МЕТОК ИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

© 2009 г. А. В. Пантюшин; М. Г. Серикова; А. Н. Тимофеев, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: oeps@grv.ifmo.ru

Рассматриваются результаты исследований вариации показаний измерительного прибора при контроле положения железнодорожного пути относительно массива реперных меток с помощью стереоскопической оптико-электронной системы и определение способов ослабления погрешности.

Коды OCIS: 080.3620, 120.4630

Поступила в редакцию 30.03.2009

Для обеспечения безопасности и плавности движения поездов на высоких скоростях при дистанционных измерениях наряду с высокой точностью необходимо обеспечить и требуемое быстродействие измерительных систем. При этом одной из серьезных практических проблем является решение задачи контроля пространственного положения железнодорожного пути при движении по нему в прямом и обратном направлениях с высокими скоростями [1].

Разработанная в СПбГУ ИТМО оптико-электронная система контроля положения реперных меток (ОЭСКПРМ), построенная по стереоскопической схеме, позволяет в процессе движения выправочной машины определять просадки железнодорожного полотна в вертикальной плоскости (выправка), взаимное положение рельсовых нитей по высоте (поперечный уровень) и положение в плане (рихтовка) относительно массива полупроводниковых излучающих диодов, являющихся реперными метками, которые сопряжены с геодезической опорной сетью [2].

ОЭСКПРМ (рис. 1) состоит из базового блока 1, блока обработки и реперных меток 2. системы расположен на тележке 3 и оборудован лазерным датчиком, необходимым для обнаружения меток. Тележка 3 жестко базируется на железнодорожном пути 4 и определяет свое положение относительно реперных меток 2 в приборной системе координат  $OXYZ$  ( $OX$  – рихтовка,  $OY$  – выправка). Реперная метка содержит полупрово-

дниковый излучающий диод, который конструктивно объединен с отражательным элементом, необходимым для функционирования датчика обнаружения меток. Координаты и угол поворота базового блока относительно оси  $OZ$  (поперечный уровень) измеряются в момент прохождения выправочной машины мимо опоры с закрепленной на ней меткой.

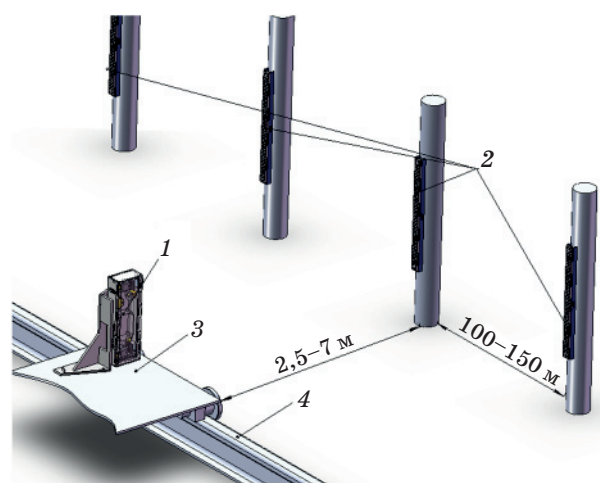


Рис. 1. Принцип действия оптико-электронной системы контроля положения реперных меток. 1 – базовый блок, 2 – массив реперных меток, 3 – тележка, 4 – железнодорожный путь.

Сканирование всего массива реперных точек позволяет (с учетом данных от штатных систем контроля железнодорожного полотна) вычислить положение любой точки сканируемого участка пути в абсолютной системе координат. Это, в свою очередь, позволяет проводить его обслуживание с привязкой к абсолютной системе координат, что благотворно сказывается на безопасности и комфорте скоростного железнодорожного движения.

Целью настоящей статьи является оценка основных погрешностей контролируемых параметров ОЭСКПРМ как в статике, так и при движении. Особое внимание уделено исследованию вариации показаний ОЭСКПРМ при ее движении по железнодорожному пути в прямом и обратном направлениях.

В базовом блоке (рис. 2) две камеры, разнесенные в пространстве на расстояние  $B = B_1 + B_2$  (их визирные оси составляют углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  с осью  $OZ$  приборной системы координат), реализуют стереоскопическую схему измерений. В этой схеме визирные оси объективов верхней и нижней камер проходят через задние главные точки объектива и точки с координатами  $(u_{01}, v_{01})$  и  $(u_{02}, v_{02})$  на поверхностях фоточувствительных матриц  $M_1$  и  $M_2$ . При этом поверхности матриц расположены на расстояниях  $a'_1$  и  $a'_2$  от задней главной точки объектива.

При работе системы после обнаружения метки (получение сообщения от датчика обнаружения

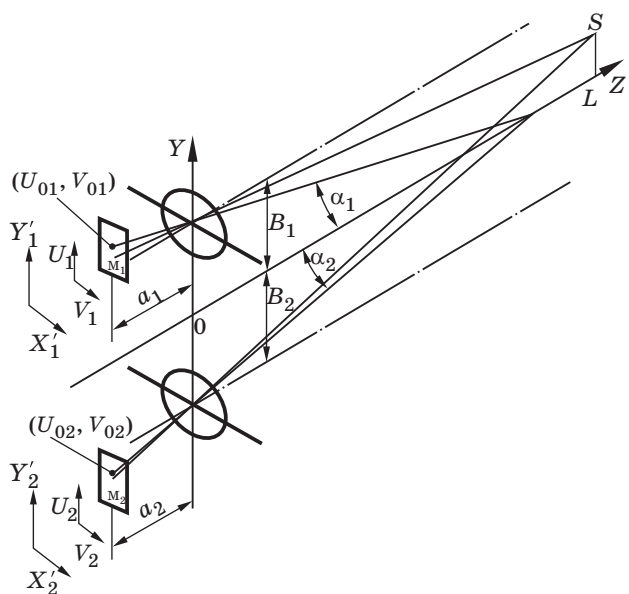


Рис. 2. Схема работы оптико-электронной системы контроля положения реперных меток (пояснения в тексте).

меток) производится “захват” кадров с камер. На основе анализа кадров определяются координаты изображений источника в системе координат, связанной с матричным полем камер. После этого исходя из полученных данных рассчитываются значения относительного смещения  $S$  (выправка) и удаления  $L$  (рихтовка) базового блока и реперной метки по формулам

$$S = (B_1(B_2/Z_{02} - y'_2/a'_2) - B_2(B_1/Z_{01} - y'_1/a'_1)) / (B_2/Z_{02} - y'_2/a'_2 + B_1/Z_{01} - y'_1/a'_1), \quad (1)$$

$$L = (B_1 + B_2) / (B_2/Z_{02} - y'_2/a'_2 + B_1/Z_{01} - y'_1/a'_1). \quad (2)$$

Здесь  $Z_{01}, Z_{02}$  – координаты пересечения оси  $OZ$  визирными осями верхнего и нижнего каналов соответственно;  $y'_1$  и  $y'_2$  – координаты энергетических центров изображений реперной метки, измеренные в системе координат верхней и нижней камер и пересчитанные с учетом различных поправок. Эти координаты являются функциями следующих параметров [3]:

$$y'_1, y'_2 = f(u_1, v_1, u_2, v_2, u_{01}, v_{01}, u_{02}, v_{02}, \alpha_1, \alpha_2, \gamma_1, \gamma_2, n, d, k), \quad (3)$$

где  $u_1, u_2, v_1$  и  $v_2$  – координаты изображений по осям  $O_1U_1, O_2U_2$  и  $O_1V_1, O_2V_2$  матриц  $M_1$  и  $M_2$  соответственно;  $n$  и  $d$  – показатель преломления и толщина защитных стекол камер,  $k$  – размер пиксела матричного фотоприемника.

Как известно, потенциальная точность измерений зависит от погрешностей  $\Delta y'_1$  и  $\Delta y'_2$  определения центра изображений [2]. Относительные частичные погрешности  $\Delta L_{y'_i}, \Delta S_{y'_i}$  измерения координат смещений пути от  $\Delta y'_i$ , рассчитываются как

$$\begin{aligned} \Delta L_{y'_i} &= \Delta y'_i / [a'_i(P + R)], \\ \Delta S_{y'_i} &= P^{(2-i)}(-R)^{(i-1)}(B_1 + B_2) \times \\ &\times \Delta y'_i / [a'_i(B_1P - B_2R)(P + R)], \end{aligned} \quad (4)$$

где  $i = 1$  относится к верхней камере,  $i = 2$  – к нижней,

$$P = [B_2/Z_{02} - y'_2/a'_2], \\ R = [B_1/Z_{01} - y'_1/a'_1].$$

В свою очередь зависимости суммарных относительных погрешностей определения координат

нат смещений пути от погрешностей измерения энергетических центров изображений реперной метки будут определяться как

$$\Delta L_{y'} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\Delta L_{y'_i})^2}, \quad \Delta S_{y'} = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (\Delta S_{y'_i})^2}. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования показали, что погрешность определения координат изображений на матрице в лабораторных условиях не превышает 0,05 пиксела [3]. В этом случае для элементов, примененных в схеме ОЭСКПРМ (КМОП-матрицы OV5610 Color CMOS QSXGA фирмы “Omni Vision” с размером пиксела 0,00555 мм; объектив Гелиос 33 с  $f' = 35$  мм; излучатели реперной метки – светодиод SFH 485 P фирмы “Siemens” с  $\lambda = 880$  нм), и значений  $B_1 = B_2 = 150$  мм,  $Z_{01} = Z_{02} = 3000$  мм расчетная погрешность на дистанции 2000 м не должна превышать 0,016 мм при определении смещения и 0,33 мм при определении дистанции. Однако экспериментальные исследования погрешностей в статическом режиме во всем диапазоне измерений показали, что погрешность измерений носит как систематический, так и случайный характер и достигает существенно больших значений, чем указано выше. Возникновение существенных составляющих систематических погрешностей обусловлено в основном неточностью задания значений задних отрезков объективов и углов сведения каналов, и они могут быть уменьшены за счет калибровки системы.

Калибровка заключалась в минимизации суммарной ошибки априорно известных координат метки и координат, рассчитанных на основе экспериментально полученного массива координат изображений метки в этих точках путем поиска локального минимума по алгоритму Левенберга–Маркардта [4].

Методику калибровки можно условно разделить на два этапа [5]. На первом этапе снимаются статические характеристики системы по всему диапазону измерений, при этом записываются априорные значения дистанции и смещения, а также соответствующие этим значениям апостериорные координаты изображений метки, полученные каждым из измерительных каналов.

На втором этапе рассчитывается функция, характеризующая суммарную разницу между априорно задаваемыми значениями дистанции и смещения и апостериорными значениями, рассчитанными по формулам (1)–(3) с помощью измеренных координат изображений. Далее проводится минимизация полученной функции

путем варьирования параметров, входящих в выражения (1)–(3).

Использование указанной методики позволило снизить ошибку определения смещения до 0,4 мм, а ошибку определения дистанции до 1,3 мм, что почти в три раза уменьшило систематическую составляющую погрешности, получаемой до калибровки, т. е с установленными номинальными параметрами, определенными на основе конструкторской документации.

Однако вследствие того, что система работает с движущимися объектами, возникает необходимость проверки ее работы в динамических условиях. Для этих целей был собран стенд с возможностью перемещения метки относительно базового блока системы, а следовательно, и возможностью получения динамических характеристик системы во всем диапазоне измеряемых величин.

При этом особое внимание уделялось проверке вариации показаний системы при движении метки в противоположных направлениях относительно базового блока.

В процессе получения статистических характеристик ось *OZ* приборной системы координат выставлялась параллельно оптической скамье 2 (рис. 3), после чего положение измерительного блока 1 системы фиксировалось с помощью специального крепления таким образом, что система могла перемещаться только вдоль оси *OZ*. Реперная метка 3 закреплялась напротив измерительного блока системы на специальной

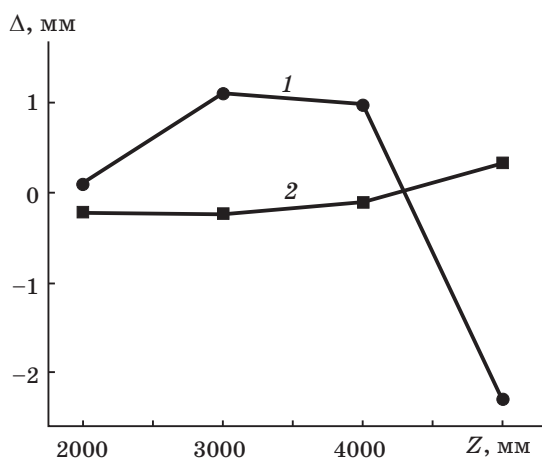


Рис. 3. Расположение блоков системы на измерительном стенде. 1 – измерительный блок, 2 – оптическая скамья, 3 – реперная метка, 4 – специальная подвижка.

подвижке 4, позволяющей изменять скорость движения точечного излучателя относительно измерительного блока в пределах до 3,5 м/с. Направляющие подвижки 4 закреплялись параллельно оси  $OX$  приборной системы координат. Реперная метка устанавливалась на подвижке таким образом, что ее проекция в плоскости  $OYZ$  приборной системы координат оставалась неподвижной, а проекция на плоскость  $OXY$  могла перемещаться лишь по одной из координат. Таким образом, оказалось возможным задавать взаимное перемещение блоков системы как в прямом (в положительном направлении оси  $OX$ ), так и в обратном (в отрицательном направлении) ходе в диапазоне измеряемой дальности от 2000 до 5000 мм, при поперечных смещениях +140 мм. Исследования проводились при разрешении камер  $1280 \times 200$ , частоте кадров в каналах 60 Гц и количестве измерений на каждой дистанции не менее 50.

После статистической обработки показаний системы, измеренных в двух противоположных направлениях движения метки относительно базового блока, были получены зависимости (рис. 4) вариации показаний прибора от задаваемой дистанции до источника излучения.

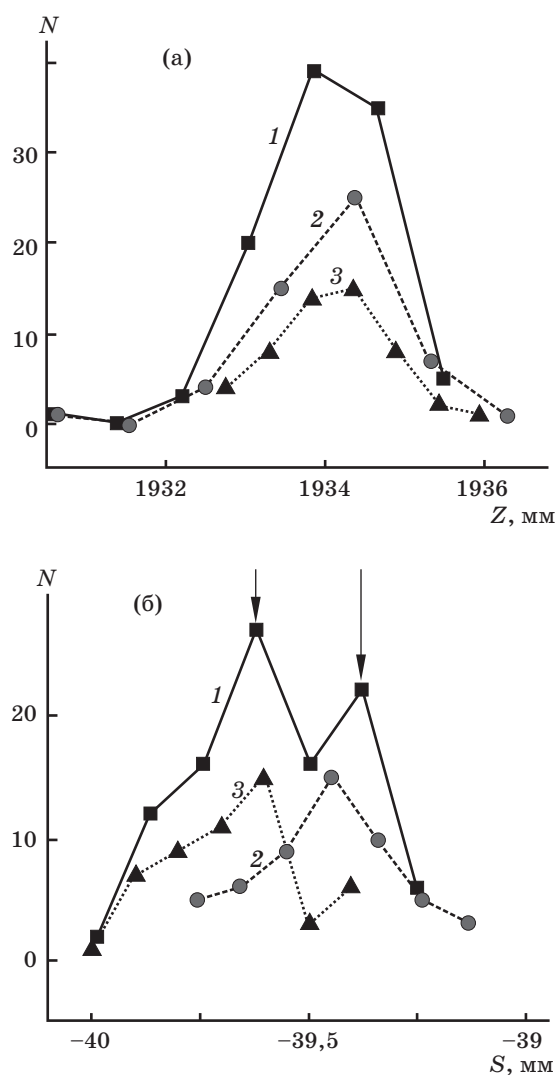
При определении дальности было отмечено хорошее совпадение среднеарифметических значений выборок, полученных в прямом и обратном ходе. Максимальное расхождение результатов, равное 2,31 мм, соответствует максимальной дистанции измерения 5000 мм. При вычислении



**Рис. 4.** Вариации показаний системы  $\Delta$  от задаваемой дистанции  $z$  до источника излучений. 1 – разность средних значений выборок при измерении дальности, полученных в прямом и обратном ходе, 2 – разность средних значений выборок при измерении вертикального смещения в тех же условиях.

смещения максимальное расхождение результатов также соответствует максимальной дистанции измерений и равно 0,33 мм, что не превышает значений, полученных при статических испытаниях.

Стоит также отметить, что при измерении смещения получаемые значения группируются у двух достаточно обособленных значений (рис. 5б отмечены стрелками, тогда как при измерении дистанции такого эффекта не наблюдается (рис. 5а). Это объясняется большим полем рассеяния значений дистанции, что обусловлено ее большей чувствительностью к изменению координаты центра изображения (1, 2).



**Рис. 5.** Полигоны рассеяния измеряемых значений. а – при измерении дистанции, б – при измерении смещения). 1 – полигон рассеяния значений объединенной выборки, 2 – полигон рассеяния значений, полученных в прямом ходе, 3 – полигон рассеяния значений, полученных в обратном ходе.

Среди основных причин, вызывающих вариацию показаний прибора при изменении направления измерения, следует отметить рассинхронизацию работы камер измерительных каналов и “смаз” изображения.

Рассинхронизация работы камер, т. е. неодновременный захват кадров, приводит к некорректной интерпретации системой положения объекта в результате анализа изображений с кадров, соответствующих разным стереопарам.

Появление “смаза” в изображении точечного источника обусловлено в первую очередь движением измерительного блока относительно метки. Следует отметить, что “смаз” изображения источника в данной системе принципиально не может быть устранен из-за применения камер с прогрессивной разверткой (на основе КМОП-структур). Таким образом, уменьшение экспозиции не приводит к существенному изменению длины “смаза”, а только уменьшает его ширину. Решить указанные трудности могло бы применение камер с полнокадровой разверткой.

Для преодоления вышеописанных трудностей предлагается использовать более сложный алгоритм определения координат, основанный на определении траектории движения изображения источника по кадру [6].

### Заключение

В ходе экспериментального исследования показано, что калибровка системы по предложенной методике существенно снижает систематические составляющие погрешностей определяемых смещений.

По результатам экспериментального исследования вариации показаний были получены статистические характеристики работы системы при изменении направления движения точечного источника относительно матричного поля анализа

системы, причем отмечено, что для обеспечения инвариантности показаний необходимо уменьшать влияние “смаза” изображения источника и рассинхронизации работы измерительных каналов. С целью уменьшения вариации показаний предложено исследовать траекторный алгоритм обработки изображений.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Коган А.Я., Ершова К.Б., Петуховский В.В. и др. Актуальные проблемы выправки и приемки пути после ремонта // Путь и путевое хозяйство. 2007. № 5. С. 7–9.
2. Алеев А.М., Араканцев К.Г., Тимофеев А.Н., Ершова К.Б., Петуховский В.В., Петуховский С.В., Холин А.Е. Оптико-электронная система контроля положения железнодорожного пути относительно реперных меток // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 9. С. 18–22.
3. Анисимов А.Г., Араканцев К.Г., Горбачев А.А. Исследование погрешности контроля дистанции в симметричном внутрибазовом канале двухкоординатной оптико-электронной системы контроля смещений // Научно-технич. вестник СПбГУ ИТМО. 2006. В. 34. С. 213–218.
4. Фортсайд Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Изд. дом “Вильямс”, 2004. 928 с.
5. Жуков Д.В., Пантюшин А.В., Серикова М.Г. Повышение точностных характеристик методом оптимизации параметров алгоритма в оптико-электронной системе контроля положения реперных меток // Научно-технич. вестник СПбГУ ИТМО. 2008. В. 49. С. 183–188.
6. Жуков Д.В., Пантюшин А.В., Усик А.А. Алгоритм определения координат изображений точечных источников в движущейся стереоскопической системе на примере оптико-электронной системы контроля положения реперных меток // Научно-технич. вестник СПбГУ ИТМО. 2008. В. 49. С. 207–212.