



# Повышение информативности оценки содержания железнодорожного пути



Вячеслав СЫЧЁВ  
Vyacheslav P. SYCHEV

Алексей ЛОКТЕВ  
Alexei A. LOKTEV



Даниил ЛОКТЕВ  
Daniil A. LOKTEV

Валентин ВИНОГРАДОВ  
Valentin V. VINOGRADOV



## Increase in Informative Value of Railway Track Maintenance Assessment

(текст статьи на англ. яз. – English text of the article – p. 27)

**С помощью методов статистического анализа, основанных на теории выбросов случайных процессов, теории случайных точечных процессов, методе наименьших квадратов, методе наименьших модулей, алгоритмах фильтрации, выборе вида теоретической функции и её параметров, позволяющих уменьшить ошибку измеряемых характеристик дефектов и отступлений пути от проектного положения, формулируется математическая модель, обеспечивающая повышение информативности оценки фактического состояния железнодорожного пути. Высокая информативность нужна прежде всего для формирования адекватных управляющих воздействий на путь с целью обеспечения безопасности движения.**

*Ключевые слова:* железнодорожный путь, измеряемые параметры, информационно-измерительная система, детектирование дефектов, статистический анализ, теория случайных процессов, математическая модель.

*Сычёв Вячеслав Петрович* – доктор технических наук, профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ), Москва, Россия.

*Локтев Алексей Алексеевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой «Транспортное строительство» МИИТ Москва, Россия.

*Локтев Даниил Алексеевич* – ассистент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации» Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

*Виноградов Валентин Васильевич* – доктор технических наук, профессор, первый проректор МИИТ, Москва, Россия.

**В** основе обеспечения безопасности эксплуатации железнодорожного пути лежит способ формирования базы данных о дефектах в работе пути и мерах по их устранению или недопущению появления. Рассмотрим частную задачу повышения информативности оценки содержания пути по показаниям вагона-путеизмерителя и возможность получения большего числа параметров за один проход путеизмерительной техники с использованием программно-аппаратной системы мониторинга и обработки изображений на предмет обнаружения дефектов и определения их характеристик.

Вагон-путеизмеритель [1] записывает показания состояния геометрии рельсовой колеи, в том числе в плане (сужение, уширение колеи, рихтовка) и профиле (просадки, перекосы), как показано на рис. 1а для одного из параметров. Существующая система оценок состояния рельсовой колеи и планирования работ по показаниям путеизмерителей на основе инструкции [2], утвержденной в 1997 году, не регламентирует оценки для линий со скоростями движения до 140 км/ч.

Кроме того, инструкция допускает неоднозначность толкования оценки состояния пути, например: просадка величиной 26 мм и длиной 6 м требует ограничения скорости 60 км/ч, а просадка длиной 7 м и величиной 50 мм формально допускает скорость 140 км/ч; перекося величиной 21 мм и длиной 20 м предполагает ограничение скорости 60 км/ч, а перекося величиной 40 мм и длиной 21 м формально допускает скорость 120 км/ч. Балловая оценка километров, за которую работники структурных подразделений, обслуживающих железнодорожный путь, получают материальное поощрение, не всегда соответствует порядку устранения отступлений, нацеленных на повышение безопасности движения. По сути, отсутствует дифференциация внутри одной и той же качественной оценки километра. Например, для установленных скоростей движения 61–120 км/ч отступления третьей степени – три перекося в 19–20 мм или один перекося в 17 мм приводят к одной и той же удовлетворительной оценке километра. Подобная оценка не стимулирует устранение в первую очередь опасных отступлений.

Оценка содержания пути по данным путеизмерительного вагона заключается в установлении баллов за превышение установленных пороговых значений от норм содержания пути [2]. Совокупность оценок каждого отступления на участке в виде суммы баллов или количества неисправностей определенных степеней отклонений представляет собой комплексную оценку участка пути в целом [3]. Для уменьшения влияния описанных недостатков предлагается исходить из допущения, что процесс записи состояния пути путеизмерительным вагоном относится к случайным процессам, в которых параметром индексирования

выступает не время, а координата, отсчитываемая вдоль длины пути (рис. 1). При этом можно считать, что он полностью определяется семейством своих реализаций, а превышение установленных порогов (степени отступлений от норм содержания рельсовой колеи) это выбросы случайного процесса.

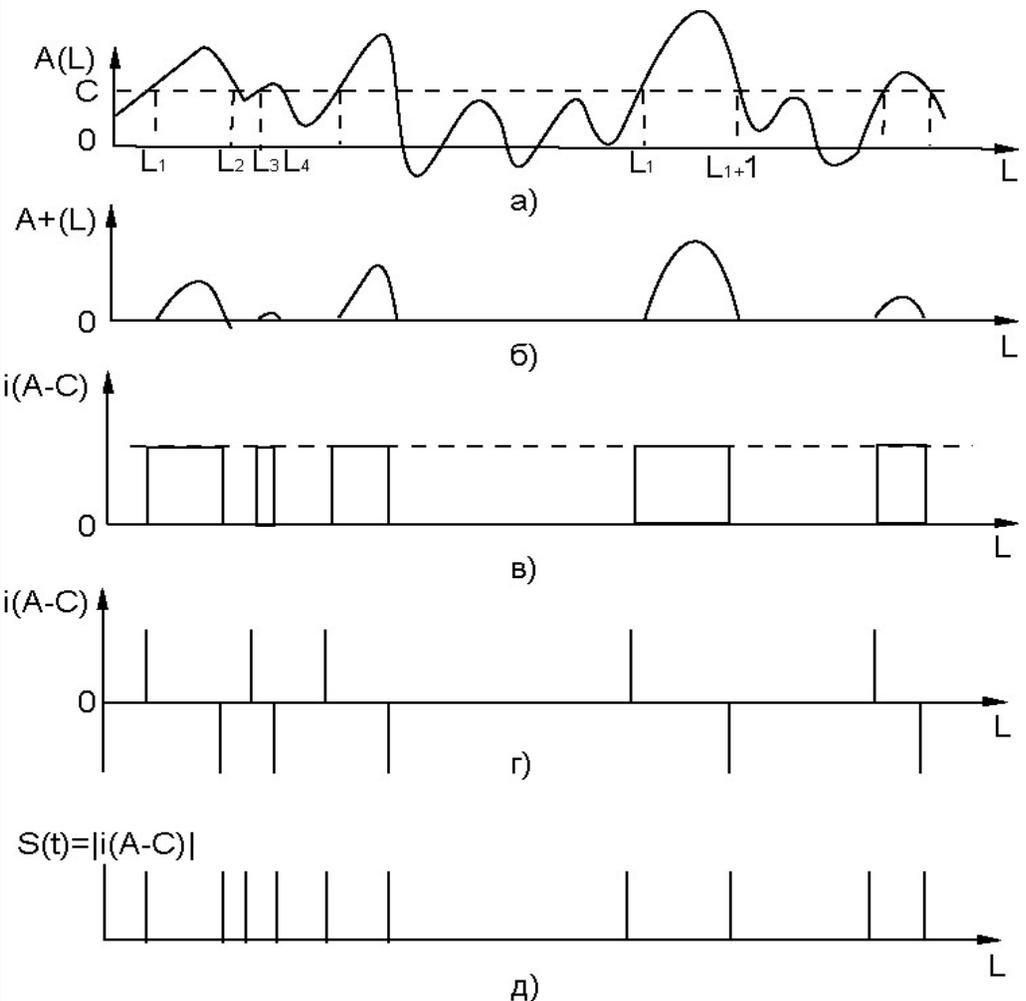
Исследования в области теории случайных процессов [4, 5], доказавшие эквивалентность задач теории пересечении уровней, теории выбросов случайных процессов и теории случайных точечных процессов, дают возможность подойти к созданию математической модели, обеспечивающей повышение информативности оценки фактического состояния железнодорожного пути, необходимой для формирования адекватных управляющих воздействий на путь с целью обеспечения безопасности движения, поддержания его в работоспособном состоянии без дополнительных проходов транспортных средств с детектирующим оборудованием.

Если по оси абсцисс (рис. 1) отложить протяженность пути  $L$ , а по оси ординат – амплитуды неровностей рельсовой колеи  $A$ , то получим выборочную функцию непрерывного случайного процесса  $A(L)$  для участка  $L \in \{L_0, L_0 + L\}$ , которая пересекает пороговые уровни  $C_i$ , характеризующие отступления от норм содержания рельсовой колеи.

Для простоты представления предлагаемой модели возьмем только один пороговый уровень  $C$ , соответствующий, например, третьей степени отступлений от норм содержания пути, который в свою очередь формирует один точечный процесс  $n(L)$ , соответствующий только этому пороговому значению  $C$ . Функция  $A(L)$  при этом характеризует состояние пути на участке  $\{L_0, L_0 + L\}$  относительно порогового уровня  $C$ , ее поведение можно описать числом положительных  $n^+(C, L)$  и отрицательных  $n^-(C, L)$  выбросов. То есть  $a_+(L) = (a-C)l(a-C)$ , где  $a = a(L)$  – реализация записи показаний вагона-путеизмерителя как случайного процесса  $A(L)$ ,  $l(a)$  – единичный скачок.

Процесс  $l(a-C)$  как функция на протяженности оцениваемого участка представляет собой случайную последовательность прямоугольных импульсов единичной амплитуды (рис. 1в). Они синхронны





**Рис. 1.** Запись состояния рельсовой колеи по показаниям вагона-путеизмерителя: а) показания путеизмерителя как функция случайного процесса на участке пути; б) нелинейное преобразование  $A \rightarrow i(A-C)$  как идеальный ограничитель (детектор) по  $C$ ; в) случайная последовательность прямоугольных импульсов единичной амплитуды; г) единичные импульсы выбросов; д) длительность выбросов.

с переходами функции  $A(L)$  через уровень  $C$ , то есть имеют ту же длительность, что и импульсы неправильной формы, показанные на рис. 1б. Число пересечений  $N(C, L)$  заданного уровня  $C$  определяется из условия, что процесс записи состояния рельсовой колеи в пространстве можно считать дифференцируемым. Эта величина определяется для среднего числа пересечений  $N(C, L)$  заданного уровня  $C$  с траекторией случайного процесса  $A(L)$  на оцениваемом участке  $L$ . Для определения числа выбросов на участке функцию  $i(A-C)$  дифференцируем по  $L$ , что дает  $g$  импульсов положительных при  $A' > 0$  и отрицательных при  $A' < 0$ .

В реальности оценки величины выброса недостаточно, ибо просадка и переко

с могут характеризоваться одним и тем же выбросом, но их влияние на безопасность движения различно и определяется не только фактом наличия выброса, но и его длительностью. Длительность выброса может быть записана как  $\Delta L_v = L_{i+1} - L_i$ , а средняя длительность пребывания траектории  $A(L)$  над уровнем  $C$  представлена как  $L^+(C) = 1 - F_A(C, T)$ , при том, что  $F_A(a, L)$  – функция распределения.

Суммарная длительность всех выбросов  $L_v$  на интервале  $(0, L)$  равна арифметической сумме  $L_v = \sum \Delta L_i$  и совпадает с протяженностью пребывания реализации  $a(L)$  в области  $A > C$ . Ту же суммарную длительность имеют и импульсы  $i(A-C)$ , при этом, поскольку импульсы не отрицательны и имеют единичные амплитуды, длитель-

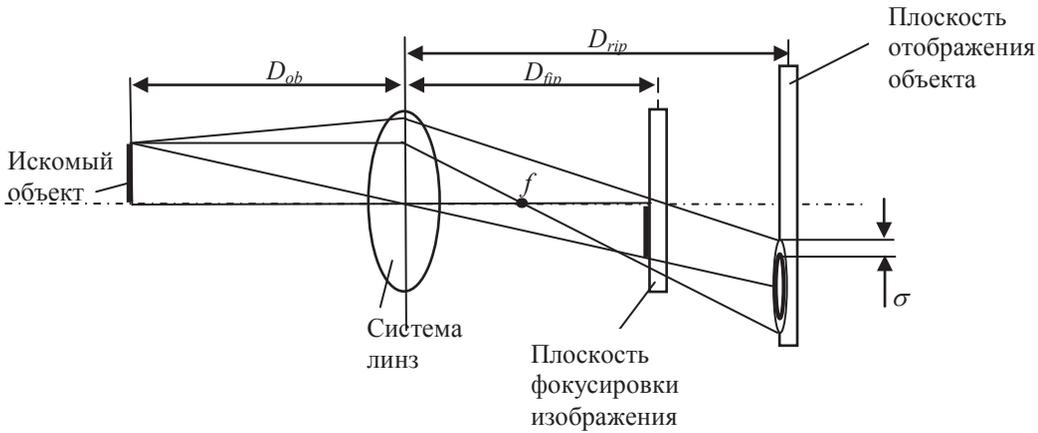


Рис. 2. Схема образования размытия при расфокусировке при  $D_{rip} \geq D_{fp}$ .

ность выбросов можно определить из выражения  $L_v = \int_0^L 1(A-C)dt$ .

Повышение информативности оценки состояния железнодорожного пути возможно также при применении современных систем видеомониторинга и измерения, в которых в качестве способов получения первичной информации о состоянии исследуемых объектов (дефектов и отступлений от проектного положения) [6–11] можно выделить алгоритмы стереозрения [6, 7], набор интеллектуальных камер, позволяющих получить видео в режиме реального времени [8], использование камеры, дающей трехмерное изображение (одним из его параметров является расстояние до отдельных элементов [9]), но применение такой технологии связано с большими вычислительными нагрузками на техническое обеспечение, поэтому обычно выделяются только точки объекта, расположенные вдоль его границы на равном удалении друг от друга [10]. Достаточно активно в решении инженерных задач развивается метод трехмерной реконструкции, основанный на дополнительном подсвечивании исследуемого объекта и изучении формы образуемых теней [11].

В данном случае для повышения информативности оценок состояния пути, получаемых на основе применения путеизмерительной техники, предлагается применять программно-аппаратную систему видеомониторинга, которая посредством анализа серии изображений

объектов исследования помогает определить наличие (распознать [12]) и параметры дефектов (размеры, расположение, форму). Система видеомониторинга использует алгоритмы и методы, позволяющие на основе анализа дефокусировки перейти от параметров фотодетектора к физическим расстояниям для объектов, чьи образы представлены на изображении [6, 8]. Для установления взаимосвязи между параметрами реальных объектов и характеристиками их образов, фотодетекторов и режимов съёмки удобны размытые изображения. «Размытие» образа может появиться из-за движения объекта или детектора, особенностей границ образа, агрегатного состояния, а также из-за различных настроек фотодетектора (фокусное расстояние, диафрагма, выдержка и апертура) (рис. 1). В качестве функционального, связывающего основные характеристики детектора и расположения образа объекта в экспозиции применяется соотношение [6, 13]:

$$1/f = 1/D_{ob} + 1/D_{fp}, \quad (1)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $D_{ob}$  – расстояние от заданной точки объекта до объектива фотодетектора,  $D_{fp}$  – расстояние между центром объектива и сфокусированным изображением исследуемого объекта.

Из выражения (1) требуется определить значения  $D_{ob}$  и  $D_{fp}$  для заданного фокусного расстояния. Размытие образа можно представить в виде [5]

$$\sigma = B |D_{rip} - D_{fp}| / D_{fp}, \quad (2)$$



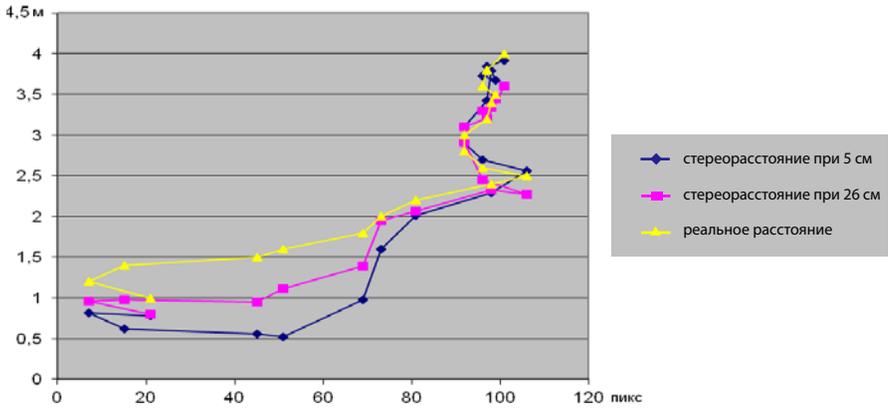


Рис. 3. Расстояния, полученные по схемам стереозрения, и реальное расстояние в зависимости от среднего значения размытия.

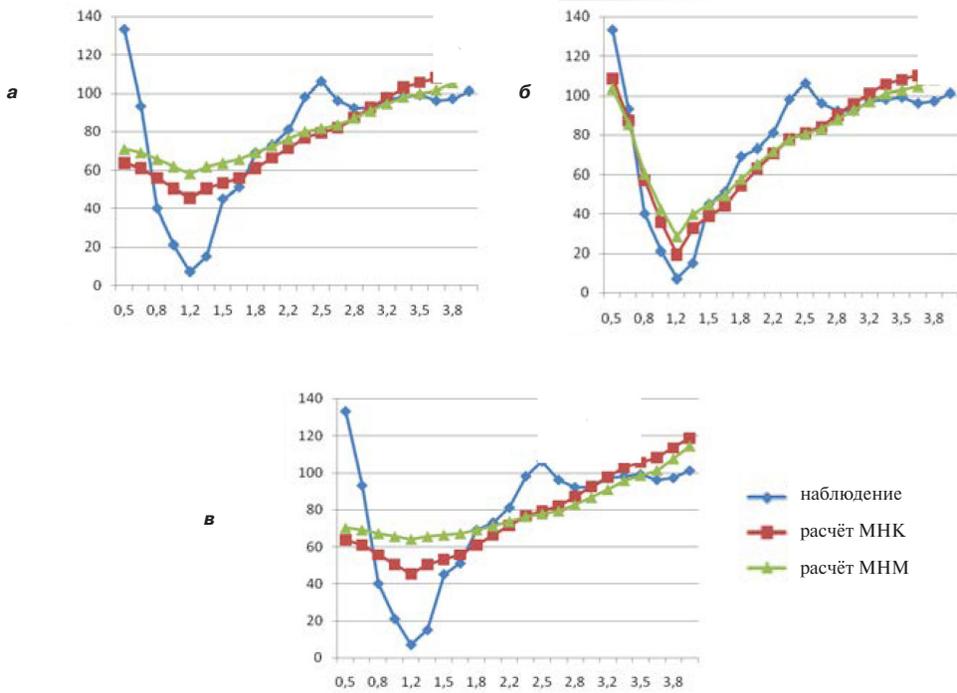


Рис. 4. Зависимость размытия от расстояния до объекта от функции  $h_i(X)$ : а) линейная, б) логарифмическая, в) экспоненциальная.

где  $\sigma$  – размытие объекта,  $B$  – значение апертуры,  $D_{rip}$  – расстояние от центра объекта до плоскости объекта.

При определении размеров пятна размытия предполагается, что размытие в точке происходит одинаково во всех направлениях [7, 8, 13]. Предлагается устанавливать на вагоне-путеизмерителе стереопару, формирующую изображение верхнего строения пути для последующей обработки в системе мониторинга и измерения. Па-

раметры обнаруженных дефектов определяются на основе комплексной методики, агрегирующей алгоритмы стереозрения и оценки размытия изображений объекта, полученных с двух камер (рис. 3) [13, 14].

Каждое измеренное размытие можно представить в виде суммы:

$$\theta_i = \eta_i(X) + \Delta_i, \quad (3)$$

где  $\eta_i(X)$  – некоторая известная функция, относительно которой будем считать оценки распределения;  $\Delta_i$  – ошибка измерения;

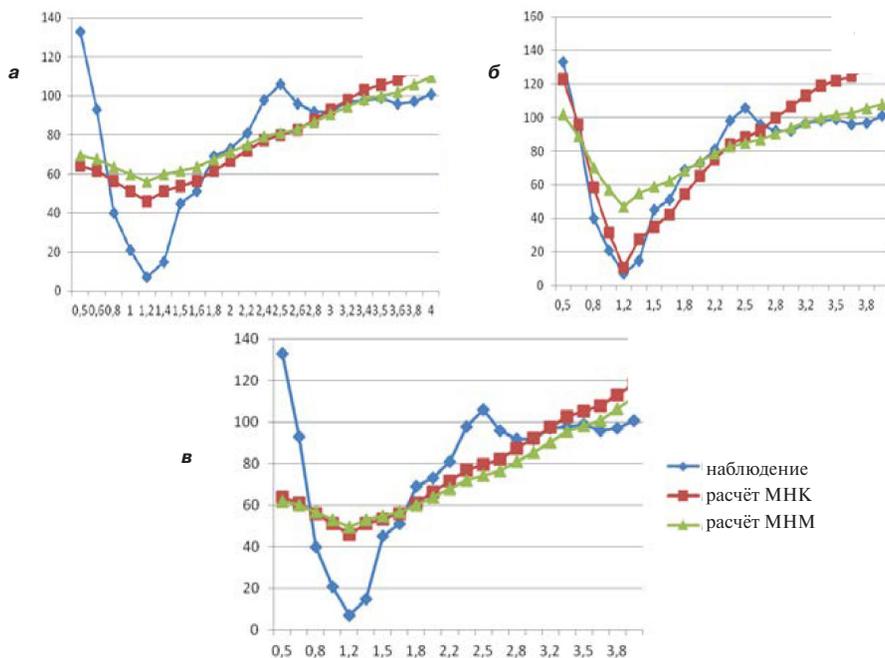


Рис. 5. Зависимость дисперсии от расстояния при коэффициенте фильтрации  $K = 0$ , для различных моделей: а) линейной, б) логарифмической, в) экспоненциальной.

$X = (X_1, \dots, X_n)^T$  – вектор местоположения объекта (дефекта);  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  – результаты измерений средней величины размытия объекта.

Для оценивания вектора параметров дефекта  $X = A_j(\theta)$  предлагается использовать М-оценки, которые представляют собой минимум суммы функций от данных:  $X(\theta) = \arg \min_x (\sum_{i=1}^n L(\theta_i - \eta_i(X)))$ , (4) где  $L(\theta)$  – функция, соответствующая методу оценивания (для метода наименьших квадратов –  $L = z^2$ ; для метода наименьших модулей –  $L = |z|$ ). По анализу этих оценок выбирается наиболее приближенная к наблюдениям функция  $\eta_i(X)$  по свойствам несмещенности, состоятельности и эффективности.

Одним из вариантов получения устойчивых оценок наблюдений  $\theta_i$  является варьирование вида функции  $\eta_i(X)$  при неизвестном распределении ошибок  $\Delta_i$  и использовании среднеквадратичного отклонения  $\theta_i$ . В качестве  $\eta_i(X)$  предлагается рассмотреть ряд функций:  $\eta_i(X) = a + b \cdot |x - x_0|$  (линейная);  $\eta_i(X) = b \cdot |\ln(x - x_0)| + a$  (логарифмическая);  $\eta_i(X) = b \cdot |\exp(c \cdot x - x_0)| + a$  (экспоненциальная). После подстановки данных выражений в определяющие уравнения можно представить в виде графиков зависимости размытия от расстояния до объекта (рис. 4).

Для сглаживания имеющихся и возможных выбросов предлагается применить фильтрацию к первоначальным наблюдениям и проанализировать оценку методов наименьших квадратов (МНК) и наименьших модулей (МНМ) для трех рассмотренных функций после применения фильтра. Процедура фильтрации может быть представлена в виде итерационных выражений:

$$\theta_{k+1}^{opt} = K \cdot \theta_{k+1} + (1 - K) \cdot (\theta_k^{opt} + u_k), \quad (5)$$

$u_k = \eta(x_{k+1}) - \eta(x_k)$  – для линейной функции;

$$\theta_{k+1}^{opt} = K \cdot \theta_{k+1} + (1 - K) \cdot (\theta_k^{opt} \cdot u_k), \quad (6)$$

$u_k = \eta(x_{k+1}) / \eta(x_k)$  – для логарифмической и экспоненциальной функций.

Здесь  $0 \leq K \leq 1$  – коэффициент фильтрации;  $\theta_k^{opt}$  и  $\theta_{k+1}^{opt}$  – текущее и следующее значения наблюдений после фильтрации;  $\theta_{k+1}$  – последующее наблюдение;  $u_k$  – параметр изменения системы;  $\eta(x_k)$  и  $\eta(x_{k+1})$  – текущее и последующее значения функции, взятой в качестве теоретической;  $x_k$  – расстояние до объекта.

В итерационной процедуре первоначальным значением после фильтрации предлагается принять само наблюдение, т.е.  $\theta_1^{opt} = \theta_1$ . При использовании схемы фильтрации



можно добиться уменьшения дисперсии ошибки путем выбора коэффициента  $K$ , а используя методы МНК и МНМ – оценить влияние функции  $\eta_i(X)$  при разных её видах на конечные определяемые геометрические параметры дефектов после применения алгоритмов фильтрации к измерениям (рис. 5).

При помощи предлагаемого алгоритма фильтрации с учетом варьирования коэффициентов  $K$  при анализе полученных функций получаем распределения ошибок с меньшей дисперсией, чем без использования фильтра, то есть оценка получается более эффективной, а значит, можно сделать выводы о том, что фильтр предоставляет возможность получить более точную теоретическую функцию. Оценкой с наименьшей дисперсией является оценка МНК для теоретической функции:  $y_{расч} = a + b|\ln(x-x_0)|$ , где  $a = 10,696$ ,  $b = 93,122$  при алгоритме фильтрации с коэффициентом 0,1.

## ВЫВОДЫ

Повышение информативности оценки состояния пути по показаниям геометрических и оптических средств мониторинга вагона-путьеизмерителя за счёт применения методов статистического анализа позволяет не только повысить достоверность оценки отдельного участка, но и решать другие задачи технического обслуживания железнодорожного пути.

Определение длительности каждого выброса, интервала между выбросами и дисперсии возникающих ошибок напрямую связано с оценкой объёмов работ по устранению отступлений от норм содержания рельсовой колеи и прежде всего величин сдвижек и подъёмов пути и объёма досыпаемого щебня при плано-предупредительной выправке. При этом наиболее эффективно предложенные алгоритмы статистического анализа реальных измерений будут работать совместно с алгоритмом определения параметров кривизны в плане, возвышения по уровню: начало (конец) и длины переходных кривых в плане и по уровню,

радиусы и возвышения в круговых кривых; неровности в продольном профиле, что позволит решить задачу расчёта потребного объёма щебня не только для устранения локальной неровности пути, но и сплошной выправки при постановке пути в проектное положение.

## ЛИТЕРАТУРА

- Исаев К. С., Сычёв В. П., Шекотков Ю. М. Путьеизмерительный вагон – эффективность использования // Железнодорожный транспорт. – 1984. – № 11. – С. 28–30.
- Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путьеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов / Распоряжение МПС от 14.10.1997 г. № ЦПТ 515.
- Сычёв В. П. Методы оценивания железнодорожного пути характеристиками случайных процессов // Наука и техника транспорта. – 2007. – № 3. – С. 84–88.
- Тихонов В. И. Выбросы случайных процессов. – М.: Радио и связь, 1972. – 392 с.
- Сычёв В. П., Дружинина О. В., Черкашин Ю. М. О задаче обеспечения системной безопасности железнодорожного пути // Транспорт: наука, техника, управление. – 2009. – № 12. – С. 2–4.
- Kraft H., Frey J., Moeller T., Albrecht M., Grothof M., Schink B., Hess H. 3D-camera of high 3D-frame rate, depth-resolution and background light elimination based on improved PMD (photonic mixer device)-technologies // In OPTO, 2004, pp. 45–49.
- Stability analysis of an all-fiber coupled cavity Fabry-Perot additive pulse modelocked laser. C. K. Nielsen, T. V. Andersen, S. R. Keiding. J. Quantum Electronics 41 (2), 2005, 198 p.
- Kuhnert K.-D., Langer M., Stommel M. and Kolb A. Dynamic 3D-Vision // Vision Systems: Applications, June 2007, pp. 311–334.
- Lin H.-Y., Chang C.-H. Depth from motion and defocus blur // Optical Engineering V. 45(12), N127201, December 2006, pp. 1–12.
- Levin A., Fergus R., Durand Fr., Freeman W. T. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture // ACM Transactions on Graphics, V. 26, N. 3, Article 70, 2007, pp. 124–132.
- Robinson Ph., Roodt Yu., Nel A. Gaussian blur identification using scale-space theory // Faculty of Engineering and Built Environment University of Johannesburg, South Africa, 2007, pp. 68–73.
- Локтев Д. А., Алфимцев А. Н., Локтев А. А. Алгоритм распознавания объектов // Вестник МГСУ. – 2012. – С. 124–131.
- Loktev A. A., Loktev D. A. Determination of Object Location by Analyzing the Image Blur // Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, No. 11, pp. 467–475
- Loktev A. A., Loktev D. A. Development of a User Interface for an Integrated System of Video Monitoring Based on Ontologies // Contemporary Engineering Sciences, Vol. 8, 2015, no. 17, pp. 789–797. ●

Координаты авторов: **Сычёв В. П.** – vp@vpm770.ru, **Локтев А. А.** – aaloktev@yandex.ru, **Локтев Д. А.** – loktevdan@yandex.ru, **Виноградов В. В.** – +7(495) 684–21–10.

Статья поступила в редакцию 12.12.2016, принята к публикации 21.02.2017.