

УДК 625.656

## Цифровое моделирование геометрических и макрошероховатых параметров автомобильной дороги

А. В. Кочетков<sup>1,а</sup>, А. В. Чванов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия, 614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29

<sup>2</sup> Поволжское отделение Российской академии транспорта,  
Россия, 410054, г. Саратов, Политехническая, д. 77  
E-mail: <sup>а</sup>soni.81@mail.ru

Получено 22 августа 2012 г.,  
после доработки 20 ноября 2012 г.

Предложено оригинальное представление статистической цифровой модели измерения макрошероховатости на локальном участке (до 15 м) состоящей из детерминированной (уклон), коррелированной (нормативные периодические составляющие и периодические отклонения от ровности) и собственно случайной (значения макрошероховатости) составляющих.

Ключевые слова: цифровая модель, автомобильная дорога, макрошероховатость, уклон, ровность

### Digital modeling geometrical and macrorough parameters of a highway

A. V. Kochetkov<sup>1</sup>, A. V. Chvanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Perm national research polytechnical university, 614990, Russia, Perm, Komsomol prospectus, 29

<sup>2</sup> Volga region branch of Russian academy of transport, 410054, Russia, Saratov, Political Ehnichkesky, 77

**Abstract.** — Original representation of statistical digital model of measurement of a macroroughness on a local site (to 15) consisting of determined (bias), correlated (standard periodic making and periodic deviations from flatness) and actually casual making (values of a macroroughness) Is offered.

Keywords: digital model, a highway, a macroroughness, a bias, flatness

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 4, pp. 837–844 (Russian).

## Введение. Актуальность темы

Существенным резервом управления сцепными качествами дорожных покрытий является применение современных передовых технологий, высокотехнологичных приборов, оборудования и передвижных дорожных диагностических лабораторий. Методическая база работ по контролю качества дорожных покрытий в целом отражает сложившийся опыт проведения работ, однако она существенно устарела, не согласована с зарубежными нормами, что затрудняет их применение в отечественной практике.

Подпрограммой «Автомобильные дороги» ФЦП «Развитие транспортной системы России» (2010–2015 годы) предусмотрено расширить создание и использование систем мониторинга транспортно-эксплуатационного состояния федеральных дорог и мостов с применением современных информационных технологий в целях оптимизации на основе адресного и эффективного планирования работ по ремонту и содержанию федеральной дорожной сети, обеспечения ее сохранности.

Считается установленным факт влияния изменения параметров макрошероховатости на изменения коэффициента сцепления. Существенные резервы в обеспечении качества макрошероховатых дорожных покрытий могут быть выявлены за счет совершенствования методов нормирования геометрических параметров шероховатости и их учета при устройстве и контроле качества дорожных покрытий.

Вопросами нормирования и устройства дорожных покрытий с шероховатой поверхностью занимались в Федеральном дорожном агентстве, МАДИ (ГТУ), ОАО «ГИПРОДОРНИИ», ФГУП «РОСДОРНИИ», ОАО «СОЮЗДОРНИИ», ОАО «КАЗДОРНИИ», ОАО «РОСДОРТЕХ», Воронежском государственном архитектурно-строительном университете, Волгоградском государственном архитектурно-строительном университете, СГТУ, ООО «Зиракс» и других организациях. Широко известны результаты исследований А. П. Васильева, М. В. Немчинова, П. И. Поспелова, И. Е. Евгеньева, Б. Б. Каримова, В. В. Столярова, С. И. Романова, И. Г. Овчинникова, Ю. В. Кузнецова, В. Ю. Гладкова, А. А. Сербиненко, М. Л. Ермакова и других. Известны работы Массачусетского технологического института США, Центральной лаборатории дорог и мостов Франции, ученых и специалистов Финляндии, Швеции, Канады и других стран. Цифровая модель автомобильной дороги представляется как совокупность точек дорожного покрытия с известными трехмерными координатами и различными кодовыми обозначениями, предназначенная для аппроксимации поверхности дороги с ее природными характеристиками, условиями и объектами. Математическая модель дорожного покрытия служит для компьютерного решения конкретных инженерных задач. Конечным результатом является получение цифровых моделей в единой системе координат. Все известные виды цифровых моделей можно разбить на три большие группы: регулярные, нерегулярные и статистические [Дорожная энциклопедия].

## Постановка задачи. Близкие аналоги

Регулярные модели создают путем размещения точек в узлах геометрически правильных сеток различной формы, накладываемых на аппроксимируемую поверхность с заданным шагом. Массив исходных данных, используемых для создания регулярных цифровых моделей, может быть представлен в следующем виде:  $F, m, n, x_0, y_0, H_{11}, \dots, H_{1m}, \dots, H_{nm}$ , где  $F$  — шаг сетки;  $m$  — число точек по горизонтали;  $n$  — число строк по вертикали;  $x_0, y_0$  — координаты начальной точки базы измерения,  $H_{11}, \dots, H_{1m}, \dots, H_{nm}$  — высоты точек в узлах сетки. Статистические модели являются во многом универсальными, в своей основе они имеют параболическую интерполяцию.

Массив исходных точек статистической цифровой модели представляют в виде  $x_1, y_1, H_1, x_2, y_2, H_2, \dots, x_n, y_n, H_n$ , где  $x_1, y_1, H_1, \dots, x_n, y_n, H_n$  — координаты точек статистической модели [Дорожная энциклопедия].

Цифровые модели формируют на основе использования материалов наземных и аэрокосмических съемок, а также с помощью передвижных дорожных диагностических лабораторий.

Тахеометрические съемки выполняются с использованием электронных тахеометров или компьютерных геодезических станций с регистрацией снимаемой информации. Получаемые модели привязаны к базе измерения, в которой устанавливается тахеометр, они требуют преобразования к друг к другу, что вызывает необходимость в дополнительной камеральной обработке.

Подавляющее число регулярных и нерегулярных цифровых моделей предполагают при последующем математическом моделировании линейную интерполяцию высот между смежными точками модели.

Наиболее часто для математического моделирования рельефа используют уравнения поверхности 2-го порядка [Дорожная энциклопедия]:

$$H = AX^2 + BXY + CY^2 + DX + EY + F, \quad (1)$$

где  $X, Y$  — известные проектные координаты точки, высоту которой требуется определить;  $A, B, C, D, E, F$  — коэффициенты уравнения аппроксимирующей поверхности 2-го порядка.

Предлагаемые к рассмотрению статистические математические модели основаны на корреляционном анализе цифровых рядов, выделении из них детерминированных, периодических и собственно случайных составляющих. Этот методический подход впервые был разработан М. С. Невельсоном и В. Я. Катковником в теории автоматического управления на металлорежущих станках [Невельсон], был подробно отработан в докторских диссертациях Ж. Н. Кадырова, А. В. Кочеткова, В. Е. Джундибаева, кандидатских диссертациях В. В. Ермолаевой, Д. И. Жунусова.

Этот методический подход позволяет определить элементы технологического процесса, которые необходимо усовершенствовать, количественно оценить зависимость отклонения процесса от влияющих факторов различной природы, составить прогноз эффективности от внедрения тех или иных мероприятий по улучшению технологии, создать математическую базу для разработки автоматических систем управления, использовать компьютеры и микропроцессоры для управления строительно-дорожными машинами.

Математические модели геометрии участков автомобильных дорог могут быть синтезированы с помощью аналитических или статистических методов. Аналитическая модель предполагает полную детерминированность цифрового ряда цифровой модели. Однако реальные цифровые модели практически невозможно достаточно точно описать с помощью детерминированных моделей. Обычно происходит усложнение их математического описания в виде алгебраических или дифференциальных уравнений и к увеличению размерности моделей. Что бы исключить их детальное описание используют вероятностно-статистические методы моделирования, одним из которых является корреляционный анализ.

Синтезу математической модели геометрии участка автомобильной дороги должен предшествовать этап сбора экспериментальных данных геометрии участка, полученных в автоматическом цикле проезда передвижной дорожной геоинформационной или видеолaborатории. После сбора этих данных следующим объектом исследования становится случайный цифровой ряд одного из сечений цифровой модели участка автомобильной дороги.

Если удастся выявить величину цикла стохастического процесса, например профиля макрошероховатого дорожного покрытия, то такой временной ряд можно использовать для прогнозирования с использованием аддитивных и мультипликативных моделей.

## Метод решения

Предлагается оригинальное представление статистической цифровой модели измерения макрошероховатости на локальном участке (до 15 м) состоящей из детерминированной (уклон), коррелированной (нормативные периодические составляющие и периодические отклонения от

ровности) и собственно случайные составляющие (искомые значения макрошероховатости). Это представление основано на следующем.

Аддитивную модель числового ряда можно представить в виде  $F = T + S + E$ , где  $F$  — прогнозируемое значение;  $T$  — тренд;  $S$  — периодическая (функциональная) составляющая;  $E$  — ошибка прогноза (случайная составляющая). Применение таких моделей оправдано тем, что в некоторых временных рядах значение сезонной компоненты представляет собой определенную долю трендового значения.

Пусть в результате проведения эксперимента имеется дискретная последовательность с целочисленными значениями аргумента:

$$x_n = X_n - X_{зад}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (2)$$

где  $x_n$  — отклонение места измерения дорожного покрытия от заданного значения в  $n$ -м такте измерения;  $X_n$  — фактическая координата места измерения;  $X_{зад}$  — заданная (номинальная) координата участка автомобильной дороги

Анализируя изменение средних значений по пробам с течением времени, получим точечные диаграммы смещения средних значений отклонения места измерения дорожного покрытия от заданного значения в  $n$ -м такте измерения. При этом под пробой понимается ряд последовательных значений групп значений в цифровой модели для данного (например, продольного сечения по полосе наката) сечения (от 10 до 30 значений). По виду точечных диаграмм можно судить о характере изменения уровня участка автомобильной дороги, а по разбросу значений относительно средних значений о мгновенном разбросе отклонений. Последовательность отклонений места измерения дорожного покрытия от заданного значения в  $n$ -м такте измерения представим в виде  $x_n = \bar{x}_n + \xi_n$ , где  $\bar{x}_n$  — смещение уровня в  $n$ -м такте (он характеризуется математическим ожиданием),  $\xi_n$  — случайные отклонения от текущего среднего значения, т. е., другими словами, разделим последовательность отклонения места измерения на систематическую и случайную составляющие.

Основной задачей при исследовании отклонений места измерения является задача выделения из последовательности отклонений систематической и случайной составляющих:  $x_n = g_n + \xi_n$ , где  $g_n$  — систематическая составляющая отклонений места измерения дорожного покрытия, выраженная в виде детерминированной (кусочно-линейной) и периодической (коррелированной) составляющих.

### **Математическое моделирование**

Естественным критерием выделения из последовательности отклонений места измерения систематической и случайной составляющих является некоррелированность случайных отклонений.

Следовательно, о качестве разделения можно судить по степени коррелированности отклонений от систематической составляющей. В соответствии с введенным критерием идеальное условие разделения имеет вид  $M\{\xi_n \xi_{n+k}\} = 0, \quad k \neq 0$ . Наиболее общим способом выделения систематической составляющей является сглаживание исходной реализации  $\{x_n\}$  полиномом  $r$ -й степени по методу наименьших квадратов.

В большинстве случаев систематическая составляющая может быть аппроксимирована линейной (кусочно-линейной) зависимостью. Это обусловлено преобладающим влиянием на последовательность отклонений мест измерения таких факторов, как монотонный износ дорожного покрытия, тепловые деформации, отклонения водного режима и др. В этом случае для систематической составляющей можно записать  $g_n = a + bn$ .

Однако указанный способ еще не гарантирует полного выделения систематической составляющей. О погрешности разделения можно судить по виду корреляционной функции от-

клонений от линейной составляющей  $K_{x_n^0}(\tau)$ , где  $x_n^0 = x_n - a - bn$ . Чем медленнее затухают значения  $K_{x_n^0}(\tau)$  с ростом  $\tau$ , тем более грубым оказывается метод разделения последовательности отклонений путем линейной аппроксимации.

Более точные методы разделения основаны на учете автокорреляционных связей в последовательности отклонений от линейной составляющей [Невельсон].

Кроме детерминированной (линейной) части систематической составляющей присутствует случайная часть, возникающая в результате последствия собственно случайных факторов:  $\{X_n\} = \{g_n\} + \{\xi_n\}$ , где  $g_n = l_n + v_n$  ( $l_n$  — линейная систематическая составляющая; в отличие от  $\xi_n$  является неслучайной).

Значение  $v_n$  в каждом цикле можно оценить усреднением нелинейной составляющей отклонений  $\xi_n, \xi_{n-1}, \dots, \xi_{n-l}$ :  $v_n = \sum_{j=0}^l \alpha_j \xi_{n-j}$ , где  $l$  — выражает длительность затухания последствия,  $\alpha_j$  — параметр аппроксимации. Тогда [Невельсон]:

$$x_n = l_n + \xi_n + \sum_{j=0}^l \alpha_j \xi_{n-1} \tag{3}$$

Рассмотрим задачу выделения из последовательности отклонений мест измерения дорожного покрытия систематической и случайной составляющих. В основе ее решения лежит спектральный метод оценки параметров мгновенного распределения. В дальнейшем будем оперировать отклонениями от линейной составляющей

$$x_n^0 = x_n - l_n = \xi_n + v_n, \tag{4}$$

где  $v_n = \sum_{j=0}^l \alpha_j \xi_{n-1}$ .

Выделение линейной составляющей целесообразно проводить методом наименьших квадратов. При таком способе получения реализации  $x_n^0$  ее математическое ожидание  $M\{x_n\} = 0$ . Величина  $\{x_n^0\}$  чаще всего распределена по нормальному закону. Проверку такой гипотезы целесообразно проводить по критерию Пирсона. Дисперсия последовательности  $\{x_n^0\}$  является суммой соответственно систематической и случайной составляющих:  $G_{x^0}^2 = G_v^2 + G_\xi^2$ . Дисперсия случайных составляющих характеризует мгновенный разброс отклонений:  $G_{\text{мгн}}^2 = G_\xi^2$ .

Предполагаем, что случайные процессы  $\xi_n$  и  $v_n$  являются стационарными с нулевыми математическими ожиданиями:  $M\{\xi_n\} = 0$ ,  $M\{v_n\} = 0$ . Из условия некоррелированности последовательности  $\{\xi_n\}$  следует, что

$$K_\xi(\tau) = \begin{cases} G_\xi^2, & \tau = 0 \\ 0, & \tau > 0. \end{cases} \tag{5}$$

Задача выделения систематической составляющей аналогична задаче выделения «шума», обусловленного случайными помехами. Такие задачи решаются методом линейной фильтрации. Для рассматриваемых условий решение задачи фильтрации заключается в отыскании не-

которой линейной функции от известных значений  $x_n^0$ , обеспечивающей наилучшее приближение к искомой составляющей [Дорожная энциклопедия]

$$\tilde{v}_n = \sum_{k=0}^n b_k x_{n-k}^0. \quad (6)$$

Определяются значения коэффициентов  $b_k$ , обеспечивающие наилучшее приближение по минимуму среднего квадрата отклонений  $\tilde{v}_n$  от  $v_n$ . Был разработан программный модуль формирования оценок математической модели [Чванов, 2009; Чванов, 2010].

Вычислительное моделирование было проведено совместно с А. И. Стекольниковым.

Построение плана автомобильной дороги по данным передвижной дорожной диагностической лаборатории демонстрируется в виде решения, полученного на основе вычислительного моделирования [Дорожная энциклопедия]. Выделяются составляющие статистической цифровой модели измерения макрошероховатости на локальном участке (до 15 м). В качестве первой составляющей выделялась детерминированная (уклон). В качестве второй составляющей выделялась коррелированная составляющая. В качестве третьей составляющей выделялась собственно случайная составляющая (искомые значения макрошероховатости).

Файл содержит  $N$  значений,  $N = 5500$  — по числу метров на измеряемом участке (рис. 1).

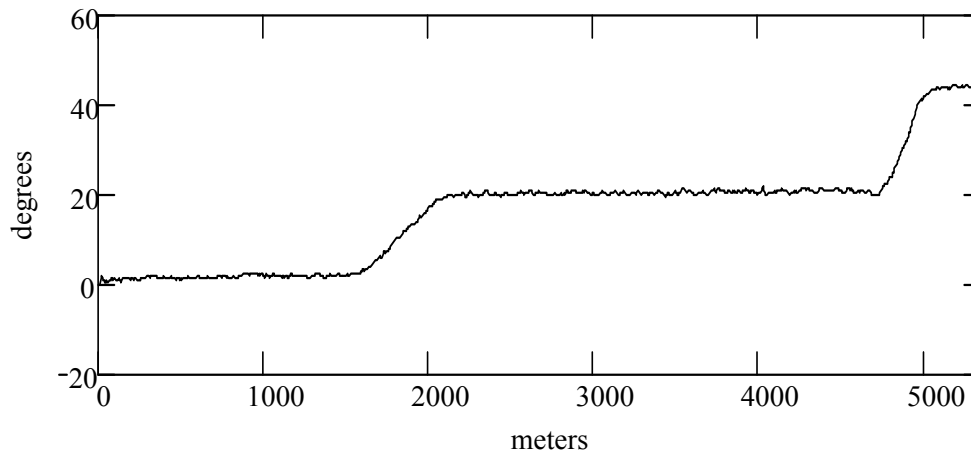


Рис. 1. Цифровой ряд результатов измерения участка автомобильной дороги

Осуществляется поиск и исправление выбросов в данных. Параметр устанавливает границы допуска (ширины поля разброса) для значений ряда 5 м (рис. 2).

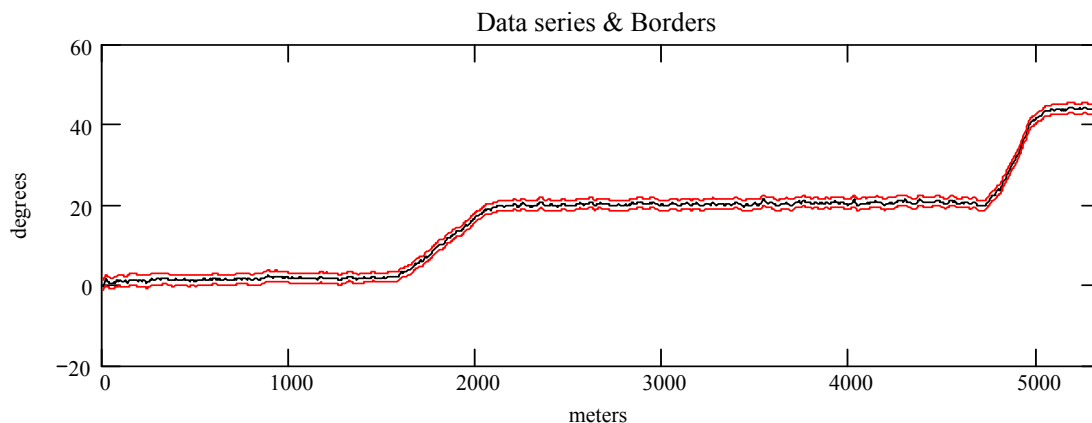


Рис. 2. График цифровой модели участка автомобильной дороги

Превышение этого значения вызывает процедуру удаления этого значения как случайного выброса.

После выделения уклона решение задачи построения плана автомобильной дороги позволяет по данным с лазерного датчика, установленного на передвижной дорожной диагностической лаборатории, выделять систематическую и случайную составляющую микропрофиля дорожного покрытия (рис.3).

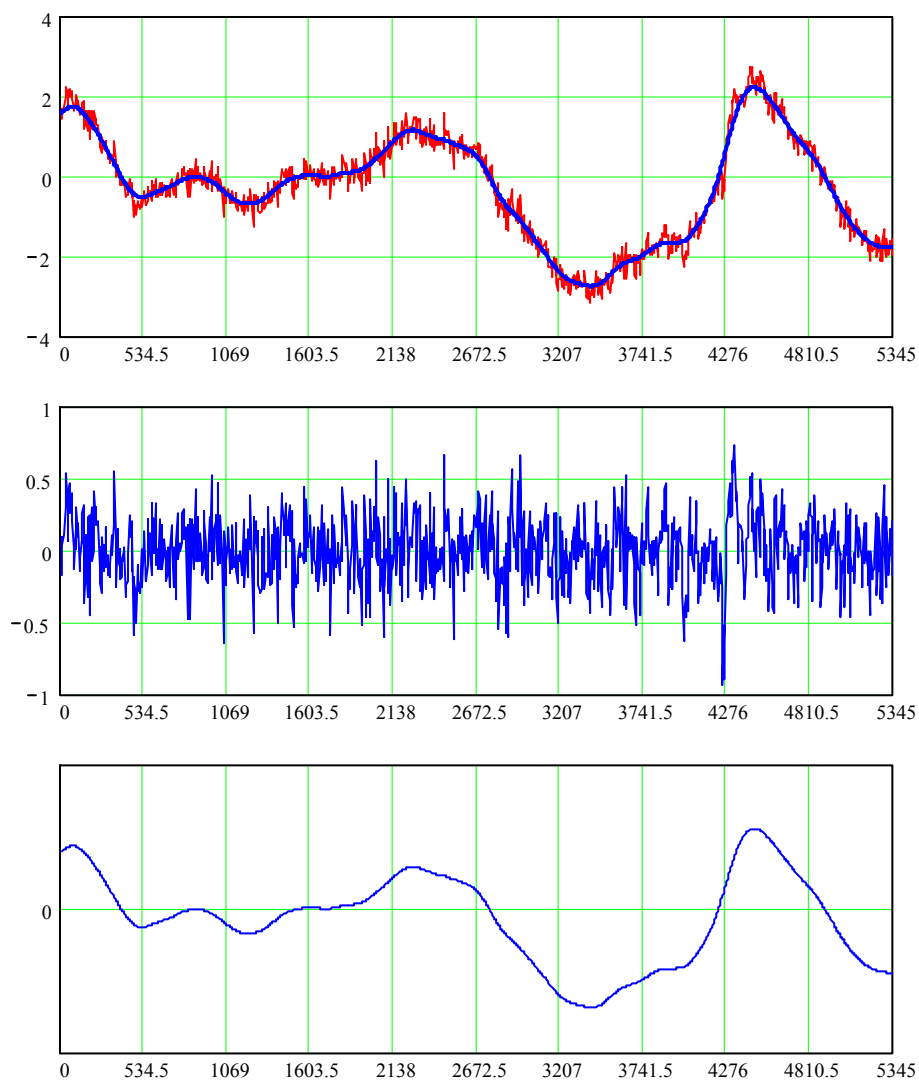


Рис. 3. Графики систематической и случайной составляющих цифровой модели

## Обсуждение

Погрешность данного метода составила до 0.3 мм при дискрете измерения 0.05 мм. Это достижимо при использовании длиннобазового лазерного датчика ТИРП-100 (Беломо, Республика Беларусь) или его аналогов. Достигнута цель данного исследования — выделена центрированная случайная декорелированная составляющая, физический смысл которой определяется параметрами геометрии макрошероховатости.

Дальнейшая обработка позволяет выделить разновысотность активных выступов и разноточность впадин макрошероховатости, которые являются диагностируемыми параметрами оценки сцепных свойств дорожного покрытия.

## Заключение

1. Предложено оригинальное представление статистической цифровой модели измерения макрошероховатости на локальном участке (до 15 м) состоящей из детерминированной (уклон), коррелированной и собственно случайной (искомые значения макрошероховатости) составляющих.

2. Способ реализован на передвижной дорожной диагностической лаборатории АДС-МАДИ.

## Список литературы

Дорожная энциклопедия. В 8 томах. — М.: ГП «Информавтодор», 2002.

*Невельсон М. С.* Автоматическое управление точностью на металлорежущих станках / М. С. Невельсон. — Л.: Машиностроение. — 182 с.

*Чванов А. В.* Научные основы нормирования шероховатых поверхностей дорожных покрытий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2009. — Вып. 14 (33). — С. 80–86.

*Чванов А. В.* Обоснование новых параметров геометрических характеристик макрошероховатого дорожного покрытия // Дороги и мосты. — 2010. — № 1. — С. 105–116.