

4. Молдалиев Э.Д. Омуров Ж.М. Экспериментальное исследование процесса движения седельных автопоездов при перевозке жидких грузов в горных условиях. Известия КГТУ им.И.Раззакова, №32, часть I.

#### References

1. Antonov D.A. The theory of stability of motion of multi-axle vehicles. М.: Mechanical Engineering, 1978
2. AS Litvinov, Theory of operation properties: Textbook for Universities for departments of "Automobiles and automobile industry" -М., Mechanical Engineering, 1989
3. Babkov V.F. Road conditions and traffic safety. - Moscow: Transport, 1982
4. Moldaliev E.D. Omurov J.M. Experimental study of the movement of truck trucks during transportation of liquid cargo to the mountains. News of KSTU named after I.Razzakova. Izvestiya №32 Part I.

УДК 625.7: 519.6

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ДОРОЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННОГО НА ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ И НОВОМ ТИПЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ МУЛЬТИВЕЙВЛЕТАМИ ЭРМИТА<sup>1</sup>

**Кудуев Алтынбек Жалилбекович**, ст. преподаватель, ОшГУ, Кыргызстан, 723500, г.Ош, ул. Ленина 331, e-mail: gold\_oshsu@rambler.ru

Работа представляет новую систему мультивейвлетов Эрмита пятой степени, удовлетворяющих ортогональным условиям ко всем полиномам до той же самой степени. Рассматриваются построение и обращение блока фильтров согласно задаче обработки регулярных сигналов и трехмерных областей. Описаны проблемы моделирования поверхностей автомобильных дорог, используя данные лазерного сканирования. Предлагается алгоритм, основанный на вейвлет-преобразовании Эрмита, чтобы обнаружить трещины и повреждения дорожного полотна. Кроме того, предложен фильтр для вычисления производных, необходимых в преобразовании. Также представлены результаты числовых экспериментов и наложения спроектированной дороги на обработанные лазерные измерения. Числа и данные, следующие из экспериментов, показывают, что вейвлет-преобразование Эрмита - мощный инструмент в обнаружении трещин и повреждений дорожного полотна.

**Ключевые слова:** лазерное сканирование, обработка данных, вейвлеты, моделирование автомобильных дорог

### A STUDY ON METHOD OF MODELING OF ROAD PAVEMENTS BASED ON LASER SCANNED DATA AND A NEW TYPE OF APPROXIMATING HERMITE WAVELETS

**Kuduev Altynbek Zh.**, Senior Lecturer, Kyrgyzstan, 723500, c.Osh, OshSU ,e-mail: gold\_oshsu@rambler.ru

Paper presents a new system of Hermite basic spline-wavelets of fifth degree, which satisfy orthogonal conditions to all polynomials up to the same degree. Construction and inverting of the block of filters are considered according to the task of processing regular signals and three-dimensional fields. The problems of modeling automobile road pavements using, scanned by laser data are described. Algorithm, based on Hermite wavelet-transformation, to find cracks and damages of a roadbed is offered. Besides, the filter for calculation of the derivatives, necessary in transformation, is offered. Results of numerical experiments and imposing of the designed road on the processed laser measurements are also presented. The digits and data, following from experiments show that Hermite wavelet-transformation, is the powerful tool in detection of cracks and damages of a roadbed.

**Keywords:** scanned by laser, data processing, wavelets, modeling automobile roads

Лазерное сканирование - новое направление в 3D измерениях высокой точности [9]. Относительно мобильного сканирования, области применения включают геопозиционирование автомобиля и железных дорог, мостов, переходов, городских улиц, береговой линии и т.д. (Рис. 1).

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту РФФИ 15-31-50383-мол\_нр

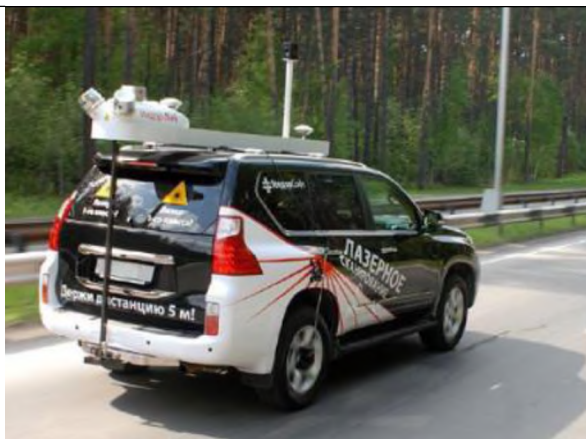


Рис. 1. Мобильный лазерный сканер

Главное преимущество лазерного сканирования - возможность работать на объектах с интенсивным движением, на производственных объектах, не останавливая производства и в труднодоступных местах, а также на объектах, имеющих сложную конфигурацию [13]. Декартовы координаты данных GPS от лазерного устройства сканирования представлены в форме множества («облака») точек (Рис. 2), в которой нет никакого подразделения на отдельные сканы.

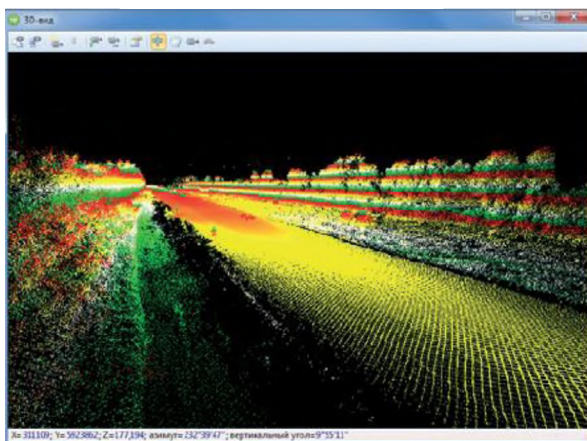


Рис. 2. 3D вид облака точек сканирования

Поскольку принцип мобильной системы сканирования позволяет работать на дороге без транспортного перекрытия, облако точек содержит придорожный пейзаж и помехи на проезжей части (отражение от людей, которые находятся на объекте, техники, растительности и т.д.) (Рис. 3).

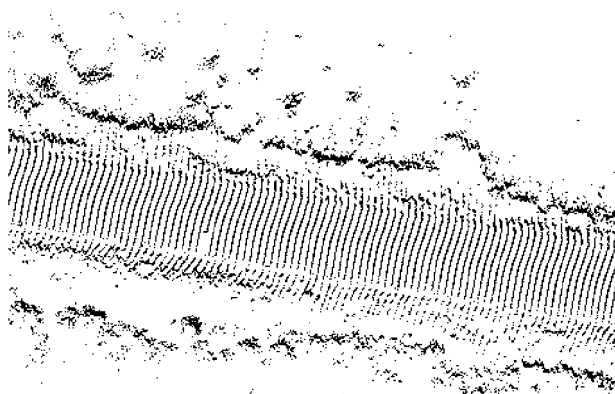


Рис. 3 Плановый вид облака точек

Главные цели предварительной обработки данных лазерного сканирования - удаление обочины и окружающего пейзажа, заполнение пропусков в сканированных данных, созданных автомобилями, проходящими мимо на проезжей части, и выделение плановой осевой линии дороги (Рис. 4) [6].

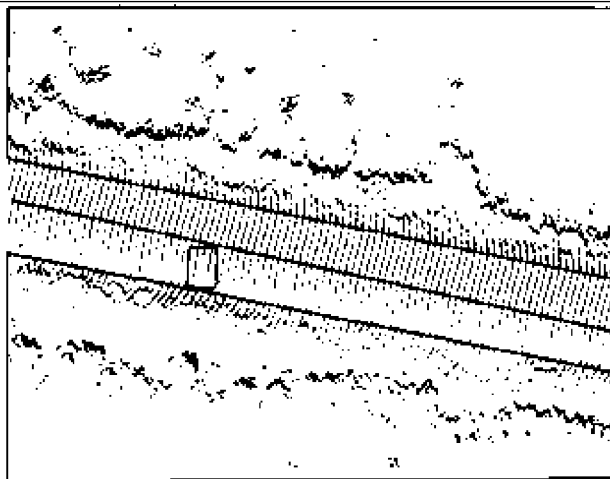


Рис. 4. Выпрямление лазерных точек

С математической точки зрения выделение оси дороги позволяет преобразовать изгибы шоссе в некоторую прямоугольную область, для которой возможно применить стандартные методы двумерной интерполяции сплайнами [2] на прямоугольной сетке, сохраняя структурные линии дороги (края, бровки), в отличие от популярного метода восстановления поверхности шоссе триангуляцией хаотических точек [10]. Очень важно то, что при таком подходе гарантируется высокая точность обнаружения трещин и повреждений дорожного полотна в местах, требующих ремонта, а также значительно облегчается построение и применение вейвлет преобразования сплайн интерполяции для сжатия сканированной информации в местах дороги, не требующих ремонта [1].

## 1. ЭРМИТОВЫ СПЛАЙН-ВЕЙВЛЕТЫ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ

Кубические сплайны гладкости  $C^2$  стали популярными для дорожных инженеров как соответствующий способ математического представления пикетного метода трассирования дорог. Что касается сплайнов Эрмита, они позволяют в явной форме, используя значения коэффициентов сплайна, удовлетворять геометрические ограничения на контрольные точки (пикеты автомобильной трассы), и на тангенсы трассы (направления линии касательной у входа на мост или у примыкания) и радиусы переходных кривых (значения кривизны на скоростных и тормозных участках трассы) [3]. Недостатки биортогональных вейвлетов Эрмита состоят в рекурсивном типе двойственных функций [12]. Таким образом, чтобы использовать их в вариационном методе трассирования автомобильных дорог в качестве конечных элементов, мы должны вернуться к самой густой сетке, и затем интерполировать фильтрованные значения. Этим недостатком лишены полуортогональные сплайн-вейвлеты Эрмита вместо отсутствия взаимно ортогональных первичных функций [9]. Однако, в этом случае с вычислительной точки зрения локальных формул усреднения не существует, и вычисление сводится до:

- а) усечения бесконечного ряда для коэффициентов сплайн-вейвлетов, что сопровождается ошибками усечения;
- б) или численного вычисления интегрированных коэффициентов Фурье, что сопровождается ошибками интегрирования;
- с) или обращения систем уравнений, что осложняется разреженной структурой матрицы обработки.

### 1.1 . Построение новой системы эрмитовых сплайн-вейвлетов

Определим пространство сплайнов степени 5 гладкости  $C^2$  на отрезке  $[a, b]$  с равномерной сеткой

узлов  $\Delta^L : u_i = a + (b - a)i / 2^L, i = 0, 1, \dots, 2^L, L \geq 0,$  и базисными функциями

$N_{i,\kappa}^L(v) = \Phi_\kappa(v - i), \kappa = 0, 1, 2 \forall i,$  где  $v = 2^L(u - a)/(b - a) + 1,$  с центрами в целых числах, порожденными сжатиями и сдвигами трех функций вида [2]:

$$\begin{bmatrix} \varphi_0(t) \\ \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} t^3(6t^2 - 15t + 10) \\ -t^3(3t^2 - 7t + 4) \\ \frac{t^3}{2}(t^2 - 2t + 1) \end{bmatrix}, 0 \leq t \leq 1; \begin{bmatrix} (2-t)^3(6t^2 - 9t + 4) \\ (2-t)^3(3t^2 - 5t + 2) \\ \frac{(2-t)^3}{2}(t^2 - 2t + 1) \end{bmatrix}, 1 \leq t \leq 2 \right\},$$

$$\varphi_k(t) = 0, k = 0, 1, 2, t \notin [0, 2].$$

Для дальнейшего удобно записать базисные сплайн-функции в виде единой матрицы-строки,  $\varphi^L = [N_{0,0}^L, N_{0,1}^L, N_{0,2}^L, N_{1,0}^L, N_{1,1}^L, \dots, N_{2,2}^L]$  и упорядочить коэффициенты сплайна в виде вектора,  $C^L = [C_0^{L,0}, C_0^{L,1}, C_0^{L,2}, C_1^{L,0}, C_1^{L,1}, \dots, C_{2,2}^L]^T$ . На любой сетке  $\Delta^L, L \geq 0$ , интерполяционный эрмитов сплайн 5-й степени может быть представлен как  $S^L(u) = \varphi^L(u)C^L$ , где коэффициенты  $C_i^{L,k}, k = 0, 1, 2$ , являются значениями и, соответственно, первыми и вторыми производными аппроксимируемой функции в узлах. Суть вейвлет-преобразования состоит в том, что оно позволяет иерархически разложить заданную функцию на серию все более грубых приближенных представлений и локальных уточняющих подробностей. При этом «более грубый» уровень представления функции на сетке  $\Delta^{L-1}$  получается из «более подробного» уровня представления функции на сетке  $\Delta^L$  посредством прореживания (удаления каждого второго, как правило, отсчета). Здесь необходимо лишь, чтобы каждая базисная функция в  $\varphi^{L-1}$  могла быть выражена в виде линейной комбинации базисных функций  $\varphi^L: \varphi^{L-1} = \varphi^L P^L$ . Здесь блоки матрицы  $P^L$  составлены из коэффициентов двухмасштабного соотношения для эрмитовых сплайнов 5-ой степени [12]:

$$\begin{bmatrix} \varphi_0(t) \\ \varphi_1(t) \\ \varphi_2(t) \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^2 H_k \begin{bmatrix} \varphi_0(2t - k) \\ \varphi_1(2t - k) \\ \varphi_2(2t - k) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

где

$$H_0 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{15}{16} & 0 \\ -\frac{5}{32} & -\frac{7}{32} & \frac{3}{8} \\ \frac{1}{64} & \frac{1}{64} & -\frac{1}{16} \end{bmatrix}, H_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{4} \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{15}{16} & 0 \\ \frac{5}{32} & -\frac{7}{32} & -\frac{3}{8} \\ \frac{1}{64} & -\frac{1}{64} & -\frac{1}{16} \end{bmatrix}.$$

Следующим этапом является определение пространства уточняющих подробностей. В отличие от классического определения вейвлетов, будем искать вейвлеты  $M_{i,k}^L(x), k = 0, 1, 2 \forall i$ , как линейные комбинации базисных эрмитовых сплайнов на сетке  $\Delta^{L+1}$ , вида

$$M_{i,k}^L(x) = \sum_{l=0}^2 \sum_{j=0}^2 \alpha_{j,l}^i \varphi_l(2t - j), t = (x - x_{2i}), -1 \leq t \leq 3,$$

удовлетворяющие условиям ортогональности многочленам 6-го порядка, то есть

$$\int_a^b M_{i,k}^L(x) x^m dx = 0, k = 0, 1, 2 \forall i (m = 0, 1, \dots, 5) \tag{2}$$

**ТЕОРЕМА.** Пусть  $M_{1,0}^0(x) = M_0(v), M_{1,1}^0(x) = M_1(v), M_{1,2}^0(x) = M_2(v)$ ,

$$M_{1,0}^L(x) = w_0(v), M_{1,1}^L(x) = w_1(v), M_{1,2}^L(x) = w_2(v),$$

$$M_{2^L,0}^L(x) = w_0(2^L - v), M_{2^L,1}^L(x) = -w_1(2^L - v), M_{2^L,2}^L(x) = w_2(2^L - v), L \geq 1,$$

$$M_{i,0}^L(x) = \psi_0(v + 3/2 - i), M_{i,1}^L(x) = \psi_1(v + 3/2 - i), M_{i,2}^L(x) = \psi_2(v + 3/2 - i),$$

$$i = 2, 3, \dots, 2^L - 1, L \geq 2,$$

где  $v = 2^L(x - a)/(b - a)$ ,  $u$

$$M_0(t) = \phi_0(2t) - 4\phi_0(2t + 1) - 4\phi_0(2t - 1) + 84(\phi_1(2t + 1) - \phi_1(2t - 1)) - 828(\phi_2(2t + 1) + \phi_2(2t - 1)),$$

$$M_1(t) = 35\phi_1(2t) - 200(\phi_1(2t + 1) + \phi_1(2t - 1)) + 8\phi_0(2t + 1) - 8\phi_0(2t - 1) + 2280(\phi_2(2t + 1) + \phi_2(2t - 1)),$$

$$M_2(t) = 35\phi_2(2t) - 251(\phi_2(2t + 1) + \phi_2(2t - 1)) - \phi_0(2t + 1) - \phi_0(2t - 1) + 23(\phi_1(2t + 1) - \phi_1(2t - 1)),$$

$$w_0(t) = 1296\phi_0(2t + 1) + 7990\phi_0(2t) - 538\phi_0(2t - 1) - 41545\phi_1(2t) - 41140\phi_1(2t - 1) - 924040\phi_2(2t) + 438040\phi_2(2t - 1),$$

$$w_1(t) = 432\phi_1(2t + 1) + 283\phi_0(2t) - 12\phi_0(2t - 1) - 1161\phi_1(2t) - 1288\phi_1(2t - 1) - 32372\phi_2(2t) + 13520\phi_2(2t - 1),$$

$$w_2(t) = 2160\phi_2(2t + 1) + 77\phi_0(2t) - 2\phi_0(2t - 1) - 245\phi_1(2t) - 320\phi_1(2t - 1) - 8900\phi_2(2t) + 3320\phi_2(2t - 1),$$

$$\psi_0(t) = 164\phi_0(2t) + 28\phi_0(2t + 1) + 28\phi_0(2t - 1) + 115\phi_1(2t + 1) - 115\phi_1(2t - 1) - 13200\phi_2(2t),$$

$$\psi_1(t) = 80\phi_1(2t) - \phi_0(2t + 1) + \phi_0(2t - 1) + 37\phi_1(2t + 1) + 37\phi_1(2t - 1) + 412\phi_2(2t + 1) - 412\phi_2(2t - 1),$$

$$\psi_2(t) = 464\phi_2(2t) - 4\phi_0(2t) - 11\phi_1(2t + 1) + 11\phi_1(2t - 1) - 112\phi_2(2t + 1) - 112\phi_2(2t - 1).$$

(3)

Система функций  $M_{i,k}^L(x), k = 0, 1, \dots, r, i = 1, 2, \dots, 2^L$ , удовлетворяет условиям (2) с носителями не более чем из двух шагов сетки и образует базис.

**ДОКАЗАТЕЛЬСТВО** теоремы следует из [7].

## 2. ПОСТРОЕНИЕ И ОБРАЩЕНИЕ БЛОКА ФИЛЬТРОВ

Аналогично, запишем базисные вейвлет-функции на уровне разрешения  $L$  в виде матрицы-строки,  $\Psi^L = [M_{1,0}^L, M_{1,1}^L, M_{1,2}^L, \dots, M_{2^L,2}^L]$ . Соответствующие коэффициенты вейвлет-разложения на уровне разрешения  $L$  будем собирать в вектор,  $D^L = [D_1^{L,0}, D_1^{L,1}, D_1^{L,2}, \dots, D_{2^L}^{L,2}]^T$ . Тогда с использованием обозначений для блочных матриц процесс получения  $C^L$  из  $C^{L-1}$  и  $D^{L-1}$  может быть записан как [5]:

$$C^L = [P^L | Q^L] \begin{bmatrix} C^{L-1} \\ D^{L-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь блоки матрицы  $P^L$  составлены из коэффициентов масштабных соотношений для эрмитовых сплайнов 5-ей степени (1), тогда как блоки матрицы  $Q^L$  – из коэффициентов соотношений (3). Обратный процесс разбиения коэффициентов  $C^L$  на более грубую версию  $C^{L-1}$  и уточняющие коэффициенты  $D^{L-1}$  состоит в решении системы линейных уравнений (4). Разрешимость данной системы гарантирована линейной независимостью базисных функций. При этом для ускорения вычислений матрицу  $[P^L | Q^L]$  можно сделать ленточной, изменив порядок неизвестных так, чтобы столбцы матриц  $P^L$  и  $Q^L$  перемежались (см. [5]).

### 2.1. Пример

Положим

$$\begin{aligned} \psi_1^0(x) &= 0.922M_{1,0}^0(x), \quad \psi_2^0(x) = 13.125M_{1,1}^0(x), \quad \psi_3^0(x) = 147.537M_{1,2}^0(x), \\ \psi_{i-2}^L(x) &= 0.236 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,0}^L(x), \quad \psi_{i-1}^L(x) = 2.476 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,1}^L(x), \\ \psi_i^L(x) &= 49.321 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,2}^L(x), \quad i = 3, 3 \cdot 2^L, \quad L \geq 1; \\ \psi_{i-2}^L(x) &= 2.226 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,0}^L(x), \quad \psi_{i-1}^L(x) = 10.999 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,1}^L(x), \\ \psi_i^L(x) &= 233.334 \cdot 2^{L/2} M_{i/3,2}^L(x), \quad i = 6, 9, \dots, 3 \cdot 2^L - 3, \quad L \geq 2. \end{aligned}$$

Заметим, что  $\psi_i^L(x)$  нормированы так, что  $\|\psi_i^L(x)\|_{L_2(0,1)} = 1$  для  $i = 1, 2, \dots, 3 \cdot 2^L$ .

Для  $x \in [0, 1]$ , полагая на верхнем уровне разрешения  $L = 5$ , находим длину шага сетки  $h = 2^{-5} = 1/32$ . Рассмотрим в качестве тестовой функции пример Хартена [8]

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sin(3\pi x), & x \leq \frac{1}{3}, \\ |\sin(4\pi x)|, & \frac{1}{3} < x \leq \frac{2}{3}, \\ -\frac{1}{2} \sin(3\pi x), & x > \frac{2}{3}. \end{cases}$$

Если аннулировать все вейвлет-коэффициенты, то получится некоторый сглаживающий многочлен 5-й степени  $S^0(x)$ , весьма незначительно отличающийся от МНК-решения (см. Рис. 5).

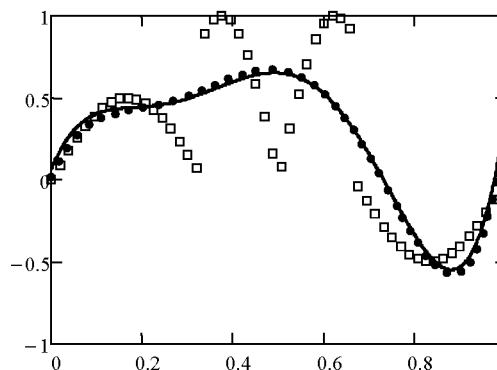


Рис. 5. Сравнение результатов вейвлет-синтеза значений сглаживающего многочлена 5-ой степени (сплошная линия) и МНК-многочлена 5-ой степени (точки), построенного по значениям функции Хартена (квадратики)

Результаты синтеза коэффициентов эрмитового сплайна 5-ой степени  $S^5(x)$  при условии обнуления вейвлет-коэффициентов, по модулю меньших величины  $0.61 \cdot h^{L/2}$ , представлены на Рис. 6. Здесь сплошной линией обозначаются исходная функция и ее производная. При этом достигается коэффициент сжатия  $K = 99/45 \approx 2$ .

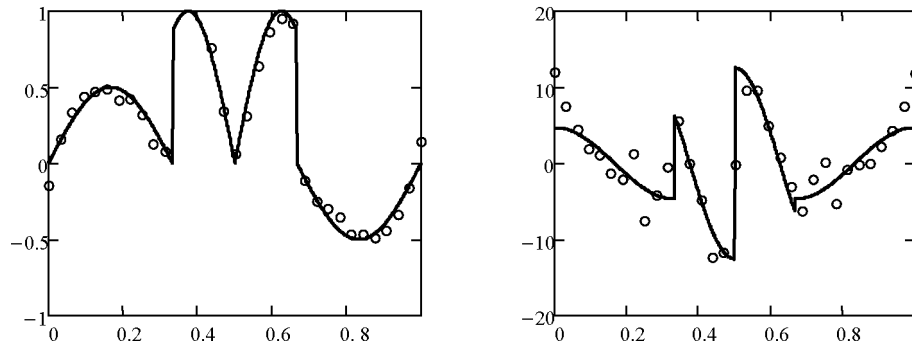


Рис. 6. Сравнение результатов синтеза узловых значений (кружочки) сплайна 5-ой степени (слева) и первой производной (справа) для случая функции Хартена

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Мы выбрали для применения тензорный метод разложения [4], поскольку у множества сканов шоссе есть преобладающая длина в одном из направлений. Как обычно, мы запишем основные функции сплайна в форме двух матричных строк для направлений  $u$  и  $v$  соответственно,

$$\varphi_u^{L_1} = [N_{0,0}^{L_1}, N_{0,1}^{L_1}, N_{0,2}^{L_1}, N_{1,0}^{L_1}, N_{1,1}^{L_1}, \dots, N_{2^{L_1},2}^{L_1}]$$

и

$$\varphi_v^{L_2} = [N_{0,0}^{L_2}, N_{0,1}^{L_2}, N_{0,2}^{L_2}, N_{1,0}^{L_2}, N_{1,1}^{L_2}, \dots, N_{2^{L_2},2}^{L_2}]$$

Тогда одномерное вейвлет-преобразование может быть записано как:

$$C^{L_1} = P^{L_1} \cdot C^{L_1-1} + Q^{L_1} \cdot D^{L_1-1} \text{ для переменной } u \text{ и } C^{L_2} = C^{L_2-1} \cdot (P^{L_2})^T + D^{L_2-1} \cdot (Q^{L_2})^T$$

для переменной  $v$ , где вектора  $D^{L_1-1}$  и  $D^{L_2-1}$  – коэффициенты одномерного вейвлет-разложения. Пусть коэффициенты  $C_{i,j}^{k_1,k_2}$  двумерного сплайна собраны в матрицу

$$C^{L_1,L_2} = \begin{bmatrix} C_{0,0}^{0,0}, & C_{0,0}^{0,1}, & C_{0,0}^{0,2}, & \dots, & C_{0,2^{L_2}}^{0,2} \\ C_{0,0}^{1,0}, & C_{0,0}^{1,1}, & C_{0,0}^{1,2}, & \dots, & C_{0,2^{L_2}}^{1,2} \\ C_{0,0}^{2,0}, & C_{0,0}^{2,1}, & C_{0,0}^{2,2}, & \dots, & C_{0,2^{L_2}}^{2,2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{2^{L_1},0}^{1,0}, & C_{2^{L_1},0}^{1,1}, & C_{2^{L_1},0}^{1,2}, & \dots, & C_{2^{L_1},2^{L_2}}^{1,2} \\ C_{2^{L_1},0}^{2,0}, & C_{2^{L_1},0}^{2,1}, & C_{2^{L_1},0}^{2,2}, & \dots, & C_{2^{L_1},2^{L_2}}^{2,2} \end{bmatrix}$$

При введенных обозначениях формула для аппроксимации поверхности запишется как:

$$S(u, v) = \varphi_u^{L_1} \cdot C^{L_1,L_2} \cdot (\varphi_v^{L_2})^T. \text{ Тогда для двумерного случая имеет место формула:}$$

$$C^{L_1, L_2} = P^{L_1} \cdot \left[ C^{L_1-1, L_2-1} \cdot (P^{L_2})^T + E^{L_1-1, L_2-1} \cdot (Q^{L_2})^T \right] + \\ + Q^{L_1} \cdot \left[ F^{L_1-1, L_2-1} \cdot (P^{L_2})^T + D^{L_1-1, L_2-1} \cdot (Q^{L_2})^T \right],$$

где  $C^{L_1-1, L_2-1}, E^{L_1-1, L_2-1}, F^{L_1-1, L_2-1}, D^{L_1-1, L_2-1}$  – матрицы коэффициентов двумерного вейвлет-разложения. Последняя формула показывает, что двумерное вейвлет-разложение сводится к одномерному вейвлет-разложению для каждого столбца исходной матрицы данных  $C^{L_1, L_2}$  и получению при этом двух матриц промежуточных данных. Затем строки этих промежуточных матриц также подвергаются одномерному вейвлет-преобразованию – при этом получаем четыре итоговых матрицы и т.д.

Заметим, что, используя вейвлет-преобразования, основанные на сплайнах Эрмита, необходимо вычислить приближенные значений производных в узлах самой густой сетки с подходящей точностью (например, через ENO-схему [8]). С точки зрения сжатия количество коэффициентов вейвлета, данных таким образом по сравнению с методами, основанными на  $B$ -сплайн-вейвлет-преобразованиях, кратно возрастает. Однако, в результате принимая во внимание пренебрежение менее значимых коэффициентов вейвлета, этот подход может все еще быть конкурентоспособным.

Вышеизложенные алгоритмы были основанием для пакета программ для обработки данных лазерного сканирования. Результаты визуализации обработанных данных даны в Рис. 7-9.

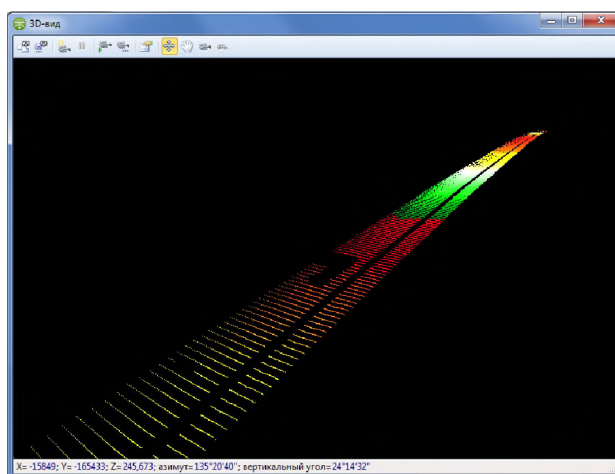


Рис. 7. Лазерные данные после предварительной фильтрации

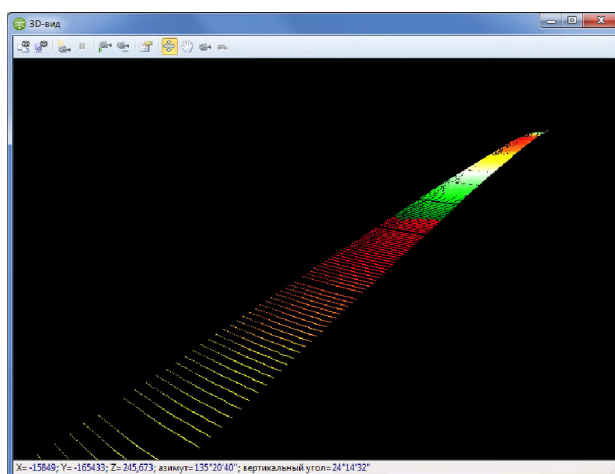


Рис. 8. Заполнение пропусков данных и формирование регулярных точек



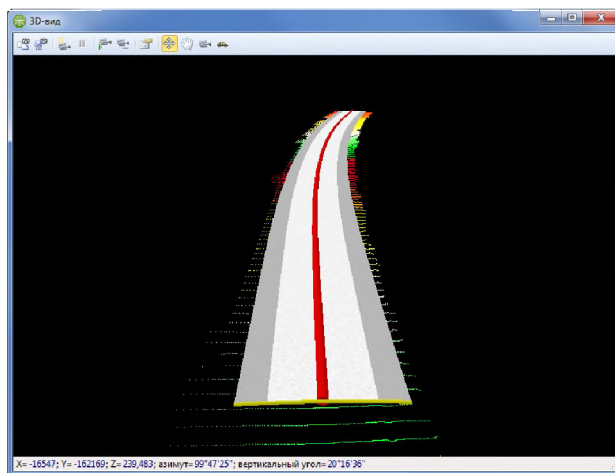


Рис. 9. Наложение запроектированной дороги на обработанные лазерные точки

**Выводы:** В этой статье мы предлагаем алгоритм, основанный на вейвлет-преобразовании Эрмита, чтобы обнаружить трещины и повреждения дорожного полотна. Кроме того, мы проектируем фильтр производных, необходимый в преобразовании. Числа и данные, следующие из экспериментов, показывают, что вейвлет-преобразование Эрмита - мощный инструмент в обнаружении трещин и повреждений дорожного полотна.

Мы полагаем, что гибкость мультимасштабного вейвлет-разложения Эрмита имеет потенциал, который будет использоваться все больше при обработке изображений и видеоматериалов. И мы ожидаем комбинацию обучающейся машины обнаружения трещин и повреждений дорожного тротуара, чтобы в будущем разрабатывать более интеллектуальную систему восстановления дороги.

#### Список литературы

1. Бекмуратов А. Т., Онопенко Г. А., Кудуев А. Ж., Шумилов Б. М., Эшаров Э.А. Вейвлет-преобразование и сжатие данных лазерного сканирования автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, – 2011, № 4 (33), – С. 228-238.
2. Завьялов Ю. С., Квасов Б. И., Мирошниченко В. Л. Методы сплайн-функций. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 352 с.
3. Кудуев А. Ж., Лаходынова Н. В., Шумилов Б. М., Эшаров Э. А. Вариационное трассирование автомобильных дорог с помощью нового типа эрмитовых кубических сплайн-вейвлетов // Вестник ТГАСУ. - 2011. - № 3 (32). - С. 176-183.
4. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
5. Столниц Э., ДеРоуз Т., Салезин Д. Вейвлеты в компьютерной графике: Пер. с англ. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. – 272 с.
6. Турсунов Д. А., Шумилов Б. М., Байгулов А. Н., Колупаева С. Н. Предварительная обработка материалов лазерного сканирования автомобильных дорог // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета, – 2011, №3 (32), – С. 184-191.
7. Шумилов Б. М., Кудуев А. Ж. Новый тип мультивейвлетов пятой степени, ортогональных многочленам пятой степени // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика, №4 (21), 2012. - С. 108-116.
8. Aràndiga F., Baeza A., Donat R. Discrete multiresolution based on hermite interpolation: computing derivatives // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2004, v. 9, p. 263–273.
9. Boehler W., Marbs A. 3D Scanning Instruments, Proc. of the CIPA WG6 Int. 2002. Workshop on scanning for cultural heritage recording. – Режим доступа:  
4. <http://www.isprs.org/commission5/workshop/> (дата обращения 12.01.2015), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. англ.
10. Boissonnat J. D., Devillers O., Teillaud M., Yvinec M. Triangulations in CGAL, Proc. 16th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom., 2000, pp. 11-18.
11. Han B. Approximation properties and construction of Hermite interpolants and biorthogonal multiwavelets, J. Approxim. Theory, Vol.110, 2001, pp. 18-53.
12. Strela V. Multiwavelets: Theory and Applications, PHD Thesis (Math.), Cambridge, Massachusetts, 1996, 99 p.
13. Yun H. C., Kim M. G., Lee J. S. Applicability Estimation of Mobile Mapping System for Road Management, Contemporary Engineering Sciences, Vol.7, 2014, pp. 1407-1414.

## References

1. Bekmuratov A. T., Onopenko G. A., Kuduev A. Zh., Shumilov B. M., Esharov E. A. Veivlet-preobrazovanie i szhatie dannykh lazernogo skanirovaniya avtomobil'nykh dorog [Wavelet-transform and data compression of road laser scanning]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. No. 4. 2011.Pp. 228-238. (In Russ.)
2. Zavyalov Y. S., Kvasov B. I., Miroshnichenko V.L. Methods of Spline Functions, Fizmatgiz, Moscow, 1980. 352 p. (in Russ)
3. Kuduev A. Zh., Lahodynova, N. V., Shumilov B. M., Esharov E. A. Variacionnoe trassirovanie avtomobil'nykh dorog s pomoshh'ju novogo tipa jermityovykh kubicheskikh splajn-vejvletov [Variation tracing of roads by means of new type Hermite cubic a spline-wavelets] Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. No. 3. 2011.Pp. 176–183. (In Russ.)
4. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing. M: Mir,2005. 671 p. (transl. from Engl.)
5. Stollnitz E. J., DeRose T. D., Salesin D. H. Wavelets for Computer Graphic.Theory and Applications. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2002. 272 p. (transl. from Engl.)
6. Tursunov D. A., Shumilov B. M., Baigulov A. N., Kolupaeva S. N. Predvaritel'naja obrabotka materialov lazernogo skanirovaniya avtomobil'nykh dorog [Preliminary data processing of roads laser scanning]. Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. No. 3. 2011.Pp. 184–191. (In Russ.)
7. Shumilov B. M., Kuduev A. Zh. Novyi tip multiveivletov piatoi stepeni, ortogonal'nykh mnogochlenam piatoi stepeni [New type multiwavelets of the fifth degree orthogonal to quintic polynomials] Tomsk State University Journal of Control and Computer Science. 2012. № 4(21). P. 108–116. (In Russ.)
8. Aràndiga F., Baeza A., Donat R. Discrete multiresolution based on hermite interpolation: computing derivatives // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2004, v. 9, p. 263–273.
9. Boehler W., Marbs A. 3D Scanning Instruments, Proc. of the CIPA WG6 Int. 2002. Workshop on scanning for cultural heritage recording. Available at:
10. <http://www.isprs.org/commission5/workshop/> (accessed 12 January 2015).
11. Boissonnat J. D., Devillers O., Teillaud M., Yvinec M. Triangulations in CGAL, Proc. 16th Annu. ACM Sympos. Comput. Geom., 2000, pp. 11-18.
12. Han B. Approximation properties and construction of Hermite interpolants and biorthogonal multiwavelets, J. Approxim. Theory, Vol.110, 2001, pp. 18-53.
13. Strela V. Multiwavelets: Theory and Applications, PHD Thesis (Math.), Cambridge, Massachusetts, 1996, 99 p.
14. Yun H. C., Kim M. G., Lee J. S. Applicability Estimation of Mobile Mapping System for Road Management, Contemporary Engineering Sciences, Vol.7, 2014, pp. 1407-1414.

УДК 621.3

## STATIC AND SEISMIC STABILITY ANALYSIS OF KUMTOR'S TAILINGS DAM

**Ruslan Bekturovich Chukin**, PhD candidate, researcher, Institute of Geomechanics National Academy of Science, Laboratory «Stability of Geotechnicals Objects», Kyrgyz Republic, 720017, Bishkek, O.Mederov str. 98, e-mail: rchukin@mail.ru

Kumtor gold mine is situated in the Kyrgyz Republic in Central Tien Shan Mountains at the altitude of 4000 meters in permafrost area. Construction and operation of the tailings dam started in 1995. In 1999 displacement of the dam to downstream side was detected. The dam height was 20 meters. Analysis of monitored data showed that displacement took place in ice rich loamy layer in the foundation on 4 meters depth. To stop this displacement they decided to excavate loamy layer beyond downstream and change it by construction shear key made of macro fragmental soil. The depth of shear was 5 meters. For the more the monitoring data showed that tailings dam continue to move on underlying soils. The additional geological investigation was done. It showed that more solid soil was located on the depth from 10 to 12 meters. The methodology of displacement stoppage was the same as previous. Worked out measures to stop the tailings dam displacement was accomplished in the period from 2006 to 2010. The goal of the research is to create numerical model in FLAC codes, forecast calculation of dam stability to 2016 when the dam height would be 42.7 meters, the dam seismic stability analysis with consideration of layered foundation.

**Keywords:** displacement, foundation, loamy layer, shear key, monitoring data, numerical modeling, back analysis, creep, assessment of seismic stability, soil condition, peak ground acceleration