

П. О. Барабаш, к.т.н., О. Б. Голубев, к.т.н., Я. Є. Трокоз, В. В. Горін, к.т.н.

## СТЕНД ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕПЛООБМІНУ ПОТОКУ РОБОЧОГО ТІЛА В ТРУБАХ З ПОВЗДОВЖНИМ ОРЕБРЕННЯМ

*В роботі наведені методика проведення досліджень теплообміну потоку природного газу в трубах з повздовжнім ребренням та схема дослідної установки.*

**Ключевые слова:** *апарати повітряного охолодження, теплообмін потоку робочого тіла, повздовж-ребрена труба.*

P. A. Barabash, PhD, A. B. Golubev, PhD, Ya. E. Trokoz, V. V. Goriv, PhD

## STAND AND METHODOLOGY FOR CONDUCTING HEAT TRANSFER RESEARCH FLOW OF THE WORKING FLUID IN THE PIPES WITH LONGITUDINAL FINS

*In the work lists the methods of the research of heat transfer of the flow of natural gas in pipes with longitudinal fins and the experimental setup.*

**Keywords:** *air cooling apparatus, the heat transfer to the working fluid flow longitudinally-finned tube.*

УДК 621.397

Е. В. Ошаровская<sup>1</sup>, к.т.н., В. И. Солодка<sup>1</sup>, Н. А. Патлаенко<sup>1</sup>, Л. Т. Зиангирова<sup>2</sup>, к.т.н.

<sup>1</sup>Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, г. Одесса

<sup>2</sup>Одесская государственная академия технического регулирования и качества, г. Одесса

## ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ СЕТОК ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВИДЕОИЗОБРАЖЕНИЙ В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*Рассматривается обобщенная схема точности восстановления полигональных сеток пространственных видеоизображений в трехмерном пространстве с минимальной погрешностью. Анализируются разные преобразования для повышения качества восстановления изображения. Показано основная характеристика объекта - погрешность измерения координат триангуляции изображения после его восстановления.*

**Ключевые слова:** *полигональная сетка, трехмерное изображение, погрешность, триангуляция.*

Проблема восстановления поверхностей, заданных различными способами, возникает во многих областях: телевидении, математике, физике, медицине, машинной графике и геоинформационных системах при моделировании поверхностей и решении пространственных задач [1].

Задача построения полигональных сеток является одной из базовых в вычислительной геометрии.

Актуальной задачей телевидения в разных областях человеческой деятельности на сегодняшний день является получение качественных трехмерных моделей реальных объектов. При этом необходимо оценить важные характеристики, такие как отношение сигнал/шум и погрешность измерения трехмерных координат.

Одним из методов описания трехмерных изображений в современном телевидении, есть полигонально-сеточный метод. Этот метод описывает трехмерные поверхности триангуляцией Де-

лоне, состоящей из координат вершин этого объекта и порядка их соединения. Триангуляция Делоне, обладает рядом практически важных свойств. Если внутрь окружности, описанной вокруг любого построенного треугольника, не попадает ни одна из заданных точек триангуляции, то эта триангуляция удовлетворяет условию Делоне (рис. 1).

При получении триангуляции возникает задача, решение которой может меняться на различных её участках. Наиболее часто такая задача возникает при трехмерной визуализации сложных моделей, когда в некотором секторе вблизи точки зрения необходимо иметь триангуляцию высокого разрешения, а для удаленных областей – низкого.

Целью данной работы является описание сложных реальных трехмерных объектов полигональной сеткой с высокой точностью. А также восстановление их с минимально допустимой погрешностью координат описываемой сетки.

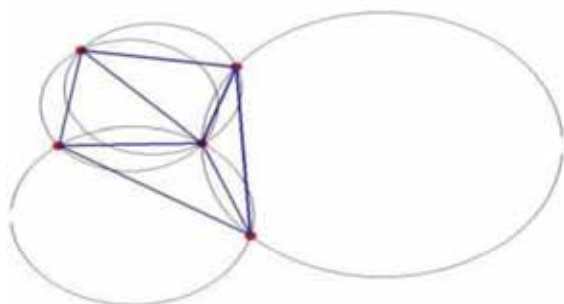


Рисунок 1 – Триангуляція Делоне

Для того, что бы описать сложные трехмерные объекты, необходимо увеличивать детализацию сетки в сложных областях, что приводит к неравномерной выборке в трехмерном пространстве. Триангуляционные модели позволяют точно описать форму поверхности, однако во многих алгоритмах анализа требуется, чтобы треугольники были достаточно маленькими. Наиболее остро эта проблема встает при использовании различных методов конечных элементов и при визуализации реального объекта. Такая задача, обратная к упрощению триангуляции, называется задачей детализации триангуляции.

При детализации отдельные треугольники триангуляции разбиваются на меньшие треугольники. Наиболее распространенным на практике является вариант с выборочным разбиением ребер на две части. Вначале среди всех ребер триангуляции выбираются те ребра, длина которых превышает некоторый допустимый порог. В заключение посередине найденных ребер выполняется вставка нового узла. Разбиение ребер и вставка новых узлов – является наиболее простой в реализации и, как правило, дает приемлемое качество аппроксимации трехмерного объекта.

Итак, для построения сложных объемных объектов используется сетка с не эквидистантным шагом [2], что позволяет детализировать объекты с более высокой точностью.

Соответственно, для высоких частот, т.е. для сложных участков объекта необходимо описывать большим количеством треугольников, и при этом выбираем меньше шаг дискретизации. Для низких частот, т.е. для менее сложных участков объекта увеличиваем шаг дискретизации, и количество треугольников при этом уменьшается это видно по рис. 2 – 6.

Все объекты триангуляции (табл. 1) задаются: узлами, ребрами и треугольниками.

Имея перечисленные виды исходных данных, мы можем построить объекты, передав в алгоритм построения триангуляции Делоне с ограничениями все исходные данные.

Таблица 1 – Исследуемые трехмерные объекты и их параметры [3]

№	Объект	Кол-во вершин	Кол-во треуг.	Вр. воз-стан.
1	Galleon	2510	4698	1,5с
2	Big spider	4670	9286	2с
3	Bunny	35947	69451	5с
4	Dragon	437645	817414	10,6с

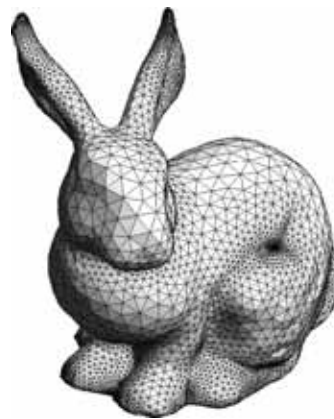


Рисунок 2 – Кролик, построенный с помощью триангуляции Делоне с не эквидистантным шагом

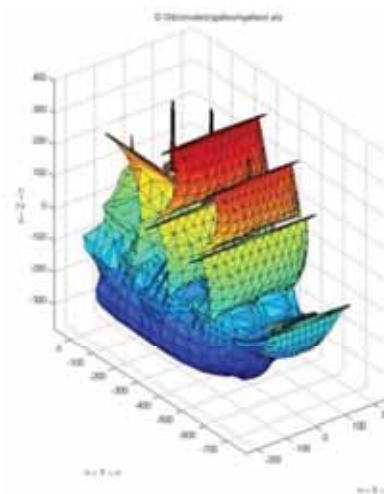


Рисунок 3 – Galleon описанный 4698 треугольниками

Для хранения координат трехмерных изображений с неравномерным шагом дискретизации требуется значительный объем памяти для его описания, а так же необходим индивидуальный алгоритм сжатия для каждого изображения. Для сжатия данных трехмерных изображений с минимально допустимыми потерями может быть применен трехмерный аналог Wavelet – преобразования.

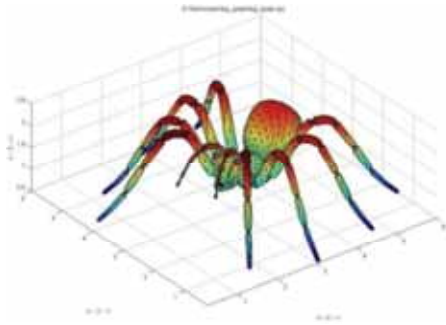


Рисунок 4 – Big\_spider описаний 9286 трикутниками

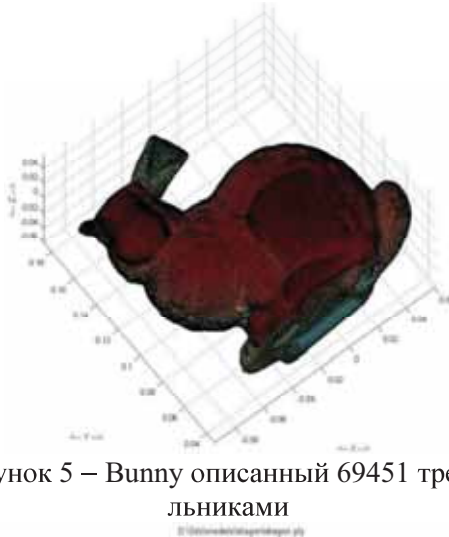


Рисунок 5 – Bunny описаний 69451 трикутниками

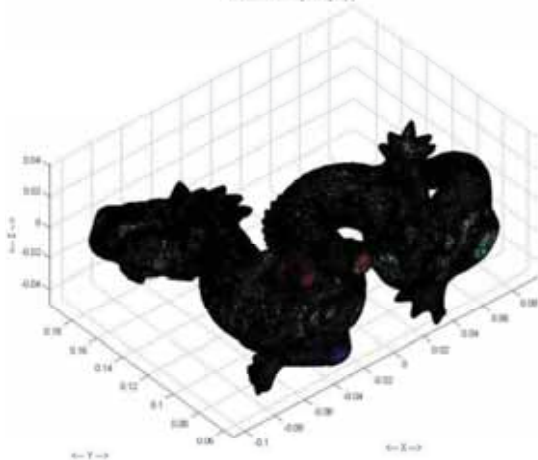


Рисунок 6 – Dragon описаний 817414 трикутниками

Рассмотрим поэтапно восстановление сигнала с высокой точностью.

Этап 1. За исходный сигнал принимаем векторные значения, которые зависят от времени и частоты. Сигнал представляет собой тензор, который характеризует сжатие или растяжение и изменение формы в каждой точке при преобразовании координат.

Компоненты тензора в трёхмерной декартовой системе координат (рис. 7) образуют матрицу:

$$\sigma = [T^{e_1} T^{e_2} T^{e_3}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix},$$

где  $T$  – нормали к поверхностям  $e_1, e_2, e_3$ .

Трёхмерное изображение можно считать трёхмерным сигналом, значением которого является яркость и цветность каждой точки изображения, а параметрами – координаты точки по горизонтали, вертикали и по глубине.

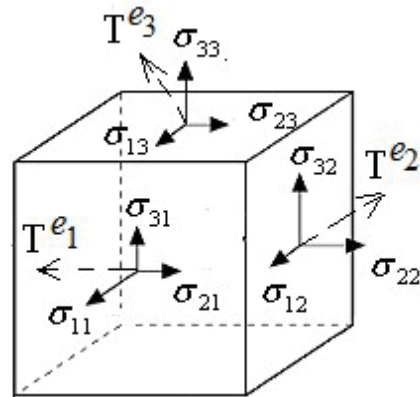


Рисунок 7 – Тензор в трёхмерной системе координат

Этап 2. Преобразование координат происходит с помощью аффинных преобразований, которые на практике удобно задавать одной матрицей. При этом используются однородные координаты. В общем случае произвольная матрица  $T$  размера  $4 \times 4$  задает проективное преобразование. Такие преобразования используются для проецирования трёхмерной сцены.

$$T = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & t_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & t_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где  $\|R_{ij}\|$  представляет собой матрицу линейного оператора над пространством трёхмерных векторов,  $t_x, t_y, t_z$  – разложение коэффициентов поворотов по осям  $x, y, z$ .

Этап 3. Выполняются спектральные преобразования, такие как: дискретное преобразование Фурье, дискретное косинусное преобразование, Wavelet-преобразования.

Для построения спектров трёхмерных сеточных объектов рассмотрим сигнал  $f$ , который является трёхмерным периодическим сигналом с

періодом  $2^S$ , по трем координатам  $f(x, y, z)$ .  
Отсчеты задаются как  $x, y, z \in 0 : 2^S - 1$ .

Дискретное преобразование Фурье для данного сигнала задается формулой:

$$F(a, b, c) = \sum_{x=0}^{2^S-1} \sum_{y=0}^{2^S-1} \sum_{z=0}^{2^S-1} f(x, y, z) e^{-j \frac{2\pi i (ax+by+cz)}{2^S}},$$

где  $a, b, c$  – пространственные частоты.

Трехмерный дискретный спектр  $F$  можно вычислить при помощи ДПФ для каждой компоненты  $x, y, z$ :

$$F(a, b, c) = \sum_{x=0}^{2^S-1} \left[ \sum_{y=0}^{2^S-1} \left[ \sum_{z=0}^{2^S-1} f(x, y, z) \cdot e^{-j \frac{2\pi i a x}{2^S}} \right] \cdot e^{-j \frac{2\pi i b y}{2^S}} \right] \cdot e^{-j \frac{2\pi i c z}{2^S}},$$

где суммы в квадратных скобках представляют собой одномерные вычисления ДПФ по трем координатам сигнала  $f$ .

Задачу сжатия структуры триангуляции можно условно разбить на две составляющие: 1) сжатие координат узлов и 2) сжатие топологии [4].

При использовании распространенных структур данных затрачивается 12–24 байт на хранение координат узлов (при 4- или 8-байтовом представлении координат).

Этап 4. Следующим шагом алгоритма идет векторное квантование, а также происходит ограничение частоты сигнала, а именно, происходит фильтрация некоторых компонентов. Кроме того, получившийся после квантования сигнал отличается от реального сигнала на величину порядка шага квантования. Это различие носит название шума квантования, и оно принципиально неустранимо.

Поэтому, определим погрешности, обусловленные шумом квантования  $I_x, I_y, I_z$ .

В данном случае смещения вдоль строки на один пиксель вызывает приращение координаты глубины:

$$M = \sum_{n_0}^N tg\varphi_N(l_0, n) + \sum_{l_0}^L tg\mu_N(l, N) + \sum_{k_0}^K tg\theta_N(k, K).$$

Здесь  $l, n$  и  $k$  – текущие номера строк и столбцов изображения, полученные после восстановления;

$l_0, n_0$  и  $k_0$  – номера строк и столбцов сферы, для которой координата глубины принята равной нулю;

$L, N$  и  $K$  – номера строки, столбца и пикселя, для которого определяется дискретная координата глубины [5];

$\varphi_N, \mu_N, \theta_N$  – нормали к поверхностям.

Если  $M = tg\varphi_N$ , то погрешность  $I_y$ , допущенная при измерении, приводит к погрешности, с которой вычисляется  $tg\varphi_N$  и, как следствие, к погрешности вычисления координаты глубины. Для объемной модели, дискретной в пространстве, запишем выражения для вычисления погрешности в дифференциальной форме  $dM_x, dM_y, dM_z$

$$dM_x = \frac{\partial(tg\varphi_N)}{\partial I_x} dI_x;$$

$$dM_y = \frac{\partial(tg\varphi_N)}{\partial I_y} dI_y;$$

$$dM_z = \frac{\partial(tg\varphi_N)}{\partial I_z} dI_z;$$

где погрешности  $dI_x, dI_y, dI_z$  невелики.

Этап 5. Следующее преобразование, необходимое для вычисления полусуммы и полуразности значений координат для получения более равномерных значений.

Этап 6. Моделирование среды передачи, являющейся каналом с аддитивным белым гауссовским шумом.

На примере тестовой поверхности (рис. 4), описанной сеткой, проведен эксперимент с Wavelet-преобразованиями с разным шагом дискретизации с нормированными значениями: 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9, которые удовлетворяют теореме Котельникова и показан график (рис. 7) зависимости погрешности координат Big\_spider описанного 9286 треугольниками от нормированного значения шага дискретизации.

В заключение отметим, что при выбранном пороге погрешности  $3 \cdot 10^{-5}$  (рис. 8) выбираем оптимальное нормированное значение шага дискретизации 0,3. Из выбранного порога можно сделать выводы, что погрешности в Wavelet-преобразования Добеши 4-го порядка и преобразования Хаара больше, чем у Добеши 6-го порядка на несколько порядков, что и позволяет повысить быстродействие алгоритмов визуализации трехмерных объектов с большой точностью восстановления.

Предложена реализация сложных объемных поверхностей в виде сетки, состоящей из координат вершин этого объекта и порядка их соединения с не эквидистантным шагом описания.

Увеличение детализации трехмерных изображений обеспечивается уменьшением шага дискретизации сетки в сложных областях, что, в общем случае, свидетельствует об эффективном хранении и быстром синтезе трехмерных объектов.

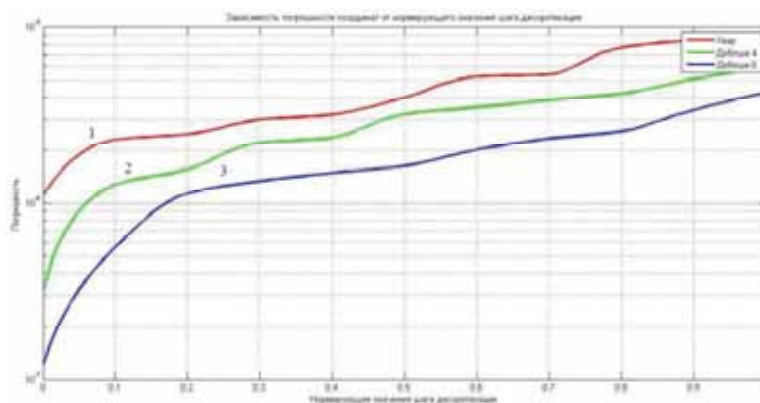


Рисунок 8 – Залежність погрешності координат об'єкта Big\_spider от нормированного значення шага дискретизації:  
 1 – Wavelet-преобразование Хаара; 2 – Wavelet-преобразование Добеши 4-го порядка;  
 3 – Wavelet-преобразование – Добеши 6-го порядка

**Список использованных источников**

1. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. [Текст] / В.В. Шайдуров. – М.: Наука, 1989. – 288 с.  
 2. Ошаровская Е. В. Методы построение сеток в трехмерных областях / Е. В. Ошаровская, Н. А. Патлаенко, В. И. Солодка // Східно-Європейського журналу передових технологій. – 2011. – № 5/4(53).  
 3. ScanView: a system for remote visualization of scanned 3D models [Electronic resource] // <http://graphics.stanford.edu/software/scanview/models/bunny.html>. – Last update: August 1, 2010, 12:42:30 PM.

4. Солодка В.И. Аналіз методів стиснення цифрових відео послідовностей у телевізійних систем / В. И. Солодка, Н. А. Патлаенко, М. І. Арделян // Цифрові технології. – 2012. – № 12. – С. 117 – 122.

5. Солодка В. И. Оценка погрешностей координат 3D ТВ объектов / В.И.Солодка, Е. В. Ошаровская, Н.А. Патлаенко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2014. – № 13. – С. 37 – 40.

Поступила в редакцію 10.11.2014

**Рецензент:** д.т.н., професор Гофайзен О.В., Одеська національна академія зв'язи ім. А.С. Попова, г. Одеса.

**О. В. Ошаровська, к.т.н., В. І. Солодка, М. О. Патлаєнко, Л. Т. Зіангірова, к.т.н.**

**ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛІГОНАЛЬНИХ СІТОК ПРОСТОРОВИХ ВІДЕОЗБРАЖЕННЯ В ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРИ**

*Розглядається узагальнена схема точності відновлення полігональних сіток просторових відеозображень в тривимірному просторі з мінімальною похибкою. Аналізуються різні перетворення для підвищення якості відновлення зображення. Показано основна характеристика об'єкта - похибка вимірювання координат триангуляції зображення після його відновлення.*

**Ключові слова:** полігональна сітка, тривимірне зображення, похибка, триангуляція.

**O. V. Osharovska, PhD, V. I. Solodka, M. O. Patlayenko, L. T. Zianhirova, PhD**

**ESTIMATES FOR THE ACCURACY RECOVERY POLYGONAL MESHES SPATIAL VIDEOS IN THREE-DIMENSIONAL SPACE**

*A generalized scheme of reconstruction accuracy of polygonal meshes spatial video in three-dimensional space with minimal error. The different transformations are analyzed to improve the quality of image reconstruction. Shows the main characteristics of the object - the measurement error triangulation coordinates of the image after it is restored.*

**Keywords:** polygon mesh, three-dimensional image, error, triangulation.