

**ПОСТРОЕНИЕ ПОДСТИЛАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МОДЕЛЕЙ РЕАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ  
В МОДЕЛЯХ РЕАЛЬНОЙ МЕСТНОСТИ  
ПРИ ФИКСИРОВАННЫХ ТОЧКАХ  
РАСПОЛОЖЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ**

**В.Р. Роганов, Э.В. Роганова, О.О. Игонин**

*ГОУ ВПО «Пензенский государственный университет»,  
Центр поддержки молодых ученых Пензенской области,  
г. Пенза*

*Рецензент В.В. Леденев*

**Ключевые слова и фразы:** модель реальной местности; подстилающая поверхность; решение задачи коллизии.

**Аннотация:** Рассматривается один из алгоритмов построения подстилающей поверхности построенной по планам и фотографиям реального участка местности. Отличительной особенностью предложенного алгоритма является наличие неподвижного наблюдателя. Разработанная подстилающая поверхность используется в тренажерных комплексах для моделирования поверхности Земли и размещения на ней неподвижных и подвижных моделей реально существующих объектов.

Развитие программно-аппаратных комплексов и устройств моделирования трехмерного изображения привело к ситуации, когда упростилось решение задач, связанных с визуальным моделированием размещения на выбранном участке земной поверхности инженерных сооружений. Примерами таких задач можно считать привязку создаваемых инженерных сооружений к местности с учетом визуального контроля, а также создание моделей реально существующих участков для тренажерных комплексов. В первом случае для просмотра полученной модели используется, как правило, монитор компьютера. Во втором случае используются специальные устройства индикации, позволяющие наблюдателю видеть трехмерное изображение модели местности с возможностью приобретения профессиональных навыков ориентировки на местности – например, определению невооруженным глазом расстояний до видимых объектов (профессио-

---

Роганов В.Р. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерные технологии управления» ПензГУ; Роганова Э.В. – председатель Центрального совета директоров общественной детско-юношеской организации «Центр поддержки молодых ученых Пензенской области»; Игонин О.О. – аспирант ПензГУ, г. Пенза.

нальные навыки не должны конфликтовать с навыками, полученными наблюдателем при тренировках в реальных условиях) [1]. Не вдаваясь в особенности используемых устройств индикации в тренажерах, отметим, что для решения перечисленных выше задач, и в том, и в другом случае, необходимо иметь трехмерные координаты всех точек моделей инженерных сооружений и точек подстилающей поверхности, на которой располагаются эти модели. Для получения необходимой реалистичности, подстилающая поверхность наносится на видеоизображение реальной местности. При этом в качестве исходных данных принято использовать планы выбранного участка местности и его фотографии.

Фотография дает изображение, которое является перспективной проекцией, полученной с определенной точки. План участка может дать три координаты выбранных точек местности. Однако, как показывает опыт, простое совмещение точек на карте и на фотографии приводит к ошибкам. Наиболее часто ошибки связаны с моделированием перемещения моделей подвижных объектов по модели местности. При визуализации модели таких объектов часто «зависают» над рельефом местности или «продавливаются» в рельеф. В литературе [2] задача взаимодействия моделей подвижных объектов и инженерных сооружений с моделью местности получила название – решение задачи коллизий. Одним из вариантов ее решения является построение подстилающей поверхности<sup>1</sup>, методы создания которой в настоящее место недостаточно описаны.

Рассмотрим один из алгоритмов построения подстилающей поверхности для решения задачи коллизии при условии, что наблюдатель неподвижен (или может находиться в заранее заданных точках моделируемого пространства), при этом в сцене может находиться неограниченно много подвижных объектов, в том числе движение которых управляется по командам от наблюдателя.

В этом случае задача создания подстилающей поверхности сводится к решению задачи построения сетки, натянутой на отдельные точки рельефа местности, всегда видимые с места расположения наблюдателя. Примем ограничения, что такая сетка имеет:

- абсолютно плоские поверхности ячеек (для облегчения расчет места ее касания моделями подвижных объектов);
- каждая ячейка может быть только выпуклым многоугольником;
- все вершины ячеек подстилающей поверхности видны с точки нахождения наблюдателя.

В тренажерах, работающих в режиме реального времени (**РРВ**), с циклом обработки очередного кадра за время, не превышающее 120 мс, всегда возникает вопрос выбора размера ячейки, так как ее размер в итоге влияет на скорость обработки информации. Учитывая, что полученная модель в любых устройствах индикации вначале отображается на экране, а затем

---

<sup>1</sup> За подстилающую поверхность берется абсолютно твердая, невидимая поверхность с расположенными на ней узлами с известными, или легко рассчитываемыми координатами (по трем осям). Невидимая подстилающая поверхность считается абсолютно твердой и непреодолимой преградой для моделей объектов, которые могут находиться только с одной стороны этой поверхности.

рассматривается наблюдателем непосредственно с экрана или через систему оптических устройств, существует предел разбиения выбранного участка местности на отдельные ячейки – случай, когда каждый пиксель экрана проецируется на местность и задает размер рассматриваемых ячеек сетки [2]. В дальнейшем остановимся на этом самом сложном случае. Решение задач, когда несколько пикселей с незначительным разбросом по цвету группируются в одну ячейку, в данной работе не рассматривается. Решением поставленной задачи будет являться массив координат всех вершин рассматриваемой сетки.

За исходные данные, для каждого положения наблюдателя, примем:

- фотографию участка местности;
- координаты места расположения фотоаппарата на плане  $X_v, Y_v, Z_v$ , с коррекцией высоты места проведения съемки с учетом высоты используемого штатива  $H_1$  и известным направлением оптической оси объектива;
- характеристики оптики фотоаппарата: угол обзора по горизонтали  $U_g$  и угол обзора по вертикали  $U_h$ , (считаем, что разрешающая способность используемого в фотоаппарате прибора с зарядной связью (ПЗС) матрицы по горизонтали  $M_{11}$  и по вертикали  $M_{12}$  эквивалентна по горизонтали  $M_{21}$  и по вертикали  $M_{22}$  разрешающей способности телевизионного экрана<sup>2</sup>).

Рассматриваемый алгоритм решения задачи предполагает первоначальное получение двух координат искомых точек в плоскости  $XOY$ , используя фотографию. Однако использование только фотографии не позволяет определить третью координату (например,  $Z$ ), что в итоге не позволяет создать подстилающую поверхность, за исключением случая, когда все рассматриваемые объекты находятся на идеально ровной поверхности (ранее использовалось в отечественных тренажерах) [1]. Для получения третьей координаты будем использовать карту (или план) выбранного участка.

Тогда алгоритм предписывает следующую последовательность действий.

1. Считаем, что при данной постановке задачи будем искать координаты вершин трапециевидных ячеек подстилающей поверхности, каждая из которых проецируется на карту (или план) местности как один из пикселей экрана видеоизображения моделируемого участка местности. При этом максимально может быть  $M_v$  рассматриваемых трапециевидных

ячеек –  $M_v = \sum_{i=1}^{P_g} \sum_{j=1}^{P_h} V_{i,j}$ . Нумерация вершин каждой трапециевидной

ячейки ведется по часовой стрелке с точкой отсчета, лежащей в левой, нижней от наблюдателя вершине и обозначается как  $V^1_{i,j}, V^2_{i,j}, V^3_{i,j}, V^4_{i,j}$ . Четыре смежные вершины четырех соседних ячеек могут иметь разные координаты по оси  $z$ , и одинаковые по осям  $x$  и  $y$ .

<sup>2</sup> За разрешающую способность экрана примем количество пикселей по горизонтали  $P_g$  и по вертикали  $P_h$  в каждой строке и в каждом столбце, тогда количество ячеек на которые разбивается видимый участок не больше  $R = P_g \times P_h$ .

2. Определяем на карте моделируемой местности место расположения фотоаппарата и от этой точки наносим след от камеры наблюдения (или след от пирамиды видимости).

3. Так как полученное изображение местности отображается на экране монитора компьютера в виде рядов горизонтально и вертикально расположенных пикселей, считаем, что при обработке полученного видеоизображения последовательно формируем:

– плоскости типа «В», отделяющие друг от друга группы вертикально расположенных в одну линию пикселей и делящие рассматриваемое пространство на ряд вертикально расположенных слоев;

– плоскости типа «Г», отделяющие друг от друга группы горизонтально расположенных в одну линию пикселей и делящие рассматриваемое пространство на ряд горизонтально расположенных слоев;

– в итоге двух предшествующих действий получаем трапециевидные ячейки подстилающей поверхности сформированных за счет пересечения подстилающей поверхности плоскостями типов «В» и «Г» (рис. 1) при условии, что ячейки подстилающей поверхности находятся ниже линии горизонта, видимой на видеоизображении моделируемого участка.

С учетом сказанного на карте моделируемой местности (или на плане местности) определяем участок видимости, заключенный в телесный угол, называемый пирамидой видимости (или камерой наблюдения [3]). С учетом угла  $U_g$ , а также с учетом того, что вершина пирамиды видимости лежит в точке расположения фотоаппарата, полученный угол  $U_g$  равномерно делим плоскостями типа «В» на  $(n_s - 1)$  углов, обозначенных как  $U'_s$ , где  $n_s$  – число пикселей в горизонтальной строке используемого телевизионного экрана.

4. Далее, анализируя видеоизображение, находим на карте точки, через которые должны проходить плоскости типа «Г» и, через соответствующие точки, проводим следы этих плоскостей, число которых не более чем  $(n_h - 1)$ , где  $n_h$  – число пикселей в вертикальной строке используемого телевизионного экрана. Плоскости типа «Г» проводят от места расположения камеры до линии горизонта, точки которой определяют по видеоизображению моделируемого участка местности. Они делят вертикальный угол пирамиды видимости на  $(n_h - 1)$  углов, обозначенных как  $U'_v$ , где  $n_h$  – число пикселей в вертикальной строке используемого телевизионного экрана.

5. Находим координаты всех вершин полученных трапециевидных фигур в плоскости  $XOY$ . Вершины трапециевидных ячеек находят, отделив ряды пикселей на используемом экране плоскостями типа «В» и «Г». За точку отсчета берем левый нижний угол экрана, тогда координата очередного  $i$ -го нижнего угла ячейки в  $j$ -ой горизонтальной строке пиксе-

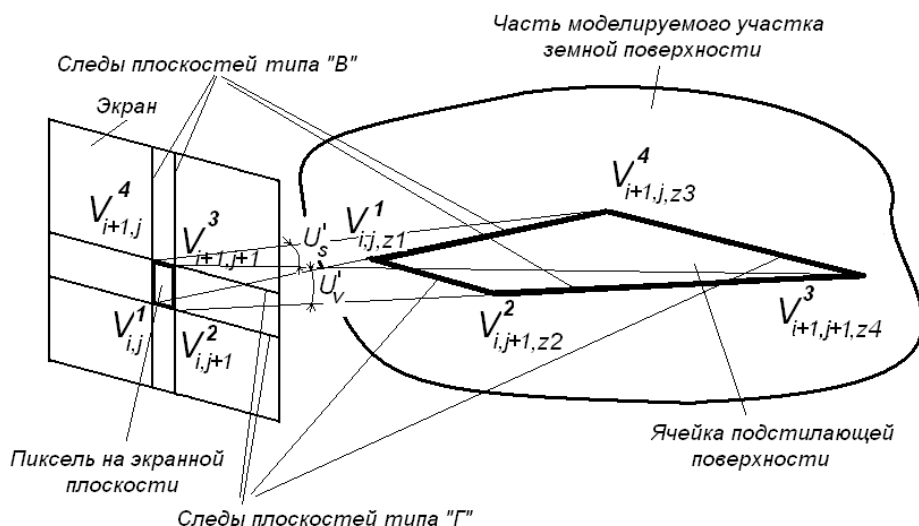


Рис. 1. Проецирование пикселя экрана на подстилающую поверхность

лей рассчитывается по формуле  $V_{ij} = iS/n_v$ ,  $i = \overline{1, I}$ , а соответственно координата очередного  $j$ -го верхнего угла ячейки в  $i$ -ой вертикальной строке пикселей рассчитывается по формуле  $V_{ij} = jH/n_s$ ,  $j = \overline{1, J}$ , где  $S$  – ширина экрана;  $H$  – высота экрана;  $I$  – число пикселей в горизонтальной строке;  $J$  – число пикселей в вертикальном ряду.

6. Находим по карте (или по плану) координаты трапециевидных ячеек по оси  $Z$ . За эту величину примем расстояние  $l_T$ , которое определяется как длина отрезка между проекцией на карте (или плане) места нахождения камеры и проекцией конкретной вершины рассматриваемой ячейки, при условии принадлежности этого отрезка одной плоскости типа «Г» и одной плоскости типа «В». Это расстояние можно считать гипотенузой треугольника, вершины которого лежат в точке проекции расположения камеры на нулевую высоту карты или плана моделируемой местности, в точке расположения видеокамеры (пренебрежем высотой используемого телевизионного экрана, так как она много меньше рассматриваемых расстояний, которые на карте можно получить всегда с ошибкой и величина этой ошибки превосходит возможную корректировку расстояния с учетом высоты пикселей экрана), и в точке пересечения рассматриваемых плоскостей типов «Г» и «В». Если точка пересечения плоскости типа «Г» с плоскостью типа «В» совпадает с изолинией, то очередная координата места пересечения по  $z$ , обозначим ее как  $z_T$ , рассчитывается по формуле  $z_T = h_u - h_k$ , (где  $h_k$  – высота расположения объектива видеокамеры, определенная по карте с учетом высоты штатива,  $h_u$  – высота, указанная на изолинии). Если точка пересечения плоскости типа «Г» с плоскостью типа «В» не совпадает с изолинией (рис. 2), то проводится отрезок прямой от ближайшей изолинии, отмечающей наименьшую высоту  $h_1$  с одной стороны, через точку пересечения плоскости типа «Г» с плоскостью типа «В» до ближай-

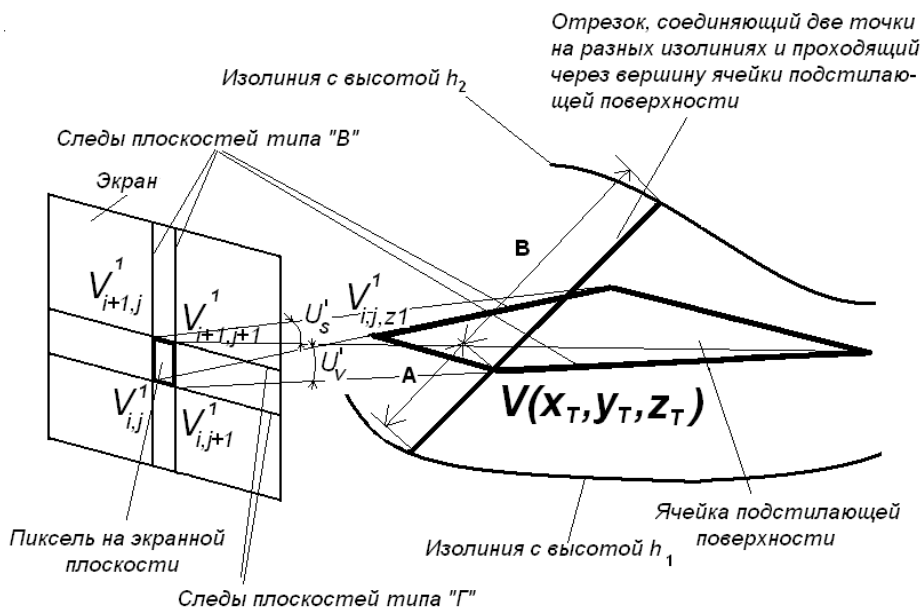


Рис. 2. Схема перерасчета высоты по изолиниям

шей изолинии, отмечающей более высокую высоту  $h_2$  с другой стороны. Точка пересечения плоскости типа «Г» с плоскостью типа «В» делит рассматриваемый отрезок на две части длиной  $A$  и  $B$ . Тогда высота точки пересечения  $h_v$ , она же координата  $z_T$  рассчитывается по формуле

$$h_v = h_1 + \frac{A(h_2 - h_1)}{A + B},$$

а  $z_T$ , в свою очередь, рассчитывается по формуле

$$z_T = h_v - h_k.$$

Тогда координата по  $z(v_k)$  любой рассматриваемой вершины из множества  $v_k \in \{V^1_{i,j}, V^2_{i,j}, V^3_{i,j}, V^4_{i,j}\}$  где  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$  будет рассчитываться как  $z(v_k) = \sqrt{l_T^2 - z_T^2}$ .

7. Следующим этапом является уточнение полученных координат каждой ячейки подстилающей поверхности с целью дальнейшего использования. Этап нужен для привязки моделей объектов к модели местности, где необходимым условием является принадлежность всех вершин каждой ячейки подстилающей поверхности  $V^1_{i,j}$ ,  $V^2_{i,j}$ ,  $V^3_{i,j}$ ,  $V^4_{i,j}$ ,  $i = \overline{1, I}$ ,  $j = \overline{1, J}$ , к одной плоскости. Так как эта задача достаточно сложная, за рубежом [1], часто разбивают четырехугольную ячейку на две треугольные и в дальнейшем рассматривают не трапециевидные ячейки подстилающей поверхности, а треугольные ячейки подстилающей поверх-

ности, а так как треугольник плоская фигура, то задача принадлежности его вершин к одной плоскости решается «по построению». Однако, в тренажеростроении, при работе в РРВ придется вдвое увеличивать число вычислений, что несмотря на неплохую производительность современных многоядерных процессоров серьезно ограничивает возможности моделирования, особенно при наличии в сцене визуализации подвижных моделей. Поэтому предлагается, после получения вершин трапецевидной фигуры, сначала по трем вершинам  $V_{i,j}^1, V_{i,j}^2, V_{i,j}^4$ , где  $i = \overline{1, I}, j = \overline{1, J}$ , провести плоскость, затем, пересчитав координату  $z$  вершины  $V_{i,j}^3$ , решить задачу ее принадлежности к рассматриваемой плоскости трапецевидной фигуры. Вершина выбрана с учетом того, что это одна из двух наиболее удаленных вершин трапецевидной ячейки, а следовательно изменение одной из ее координат минимизирует возможные ошибки.

Расстояния  $V_i^1, V_i^2 \neq V_k^1 V_k^2, V_i^2, V_i^3 \neq V_k^2 V_k^3, V_i^3, V_i^4 \neq V_k^3 V_k^4, V_i^4, V_i^1 \neq V_k^4 V_k^1$  на карте местности (или плане местности) зависят как от разрешающей способности используемой камеры, так и от рельефа местности, поэтому чаще всего, при разработке модели реального участка местности, эти расстояния разные.

Рассматривая поочередно все трапецевидные ячейки, получаем нужный массив координат вершин.

В данном случае, за счет проецирования четвертой вершины трапецевидной ячейки на плоскость, заданную ее тремя первыми вершинами, получаем возможную ошибку в координатах вершин двух смежных трапецевидных ячеек. Иными словами  $V_{n,j}^3 \neq V_{n+1,j}^2$  при условии, что  $n = \overline{1, I-1}, j = \overline{1, J}$ , однако, как показывает практика, величина этой ошибки визуально не воспринимается и не сказывается на подготовке обучаемых.

#### *Список литературы*

1. Роганов, В.Р. Методы формирования виртуальной реальности / В.Р. Роганов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2002. – 127 с.
2. Игонин, О.О. Двухканальный имитатор визуальной обстановки тренажером операторов-наводчиков ПТРК / О.О. Игонин, Э.В. Роганова // В кн. : сб. конкурсных работ Всероссийского смотра-конкурса научно-технического творчества студентов высших учебных заведений «Эврика-2007», г. Новочеркасск, 19–25 ноября 2007 г. ; Федеральное агентство по образованию ; Юж. Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск : Ониск+, 2007. – С. 101–102.
3. Девид, Форсайт. Компьютерное зрение / Форсайт Девид, Понис Жан. – М. ; СПб. ; Киев, 2004. – 926 с.

**Designing of Underlying Surface for Distribution  
of Real Objects Models in Real Ground Models  
when the Observer is Placed in Fixed Points**

**V.R. Roganov, E.V. Roganova, O.O. Igonin**

*Penza State University,  
Center for Young Scientists Support of Penza region, Penza*

**Key words and phrases:** real ground model; underlying surface; solution to collision task.

**Abstract:** One of the algorithms for designing underlying surface produced in conformity with the plans and pictures of a real ground section is considered. The specific feature of the proposed algorithm is a fixed observer. The designed underlying surface is used in simulated complexes for modeling the Earth surface and placement of fixed and moving models of really existing objects.

---

© В.Р. Роганов, Э.В. Роганова, О.О. Игонин, 2008