

УДК 004.92

## Высокопроизводительный рендеринг трехмерных изображений для систем объемной пространственной визуализации

С.А. Зори

профессор кафедры «Программная инженерия» им. Л.П. Фельдмана,  
Донецкий национальный технический университет

[ik.ivt.rec@mail.ru](mailto:ik.ivt.rec@mail.ru)

### Аннотация

В статье рассмотрена предложенная автором общая концепция представления трехмерной дискретной объемной сцены и обобщенный метод синтеза объемного изображения воксельной сцены для систем объемной пространственной визуализации. Предложена архитектура вычислительной системы объемной пространственной визуализации на основе разработанных средств. Намечены направления дальнейших исследований методов и алгоритмов эффективной генерации воксельных представлений, а также разработок новых решений на основе ускоряющих техник и упрощений.

### Введение

Организация бурно развивающихся в последнее время компьютерных систем объемной пространственной 3D-визуализации предусматривает принципиально новую организацию вычислительного процесса, отличную от «классического» 3D графического конвейера, и применения принципиально другого представления трехмерной дискретной объемной сцены, сложных методов синтеза и визуализации (объемная трассировка лучей, объемный рендеринг и пр.). Среди этих систем наибольшее распространение получили системы воксельного представления и визуализации [1 - 5]. Недостаточный уровень практической реализации таких систем – их сложность, дороговизна, отсутствие стандартизированной аппаратной поддержки, слабая реалистичность создаваемых образов и большое время синтеза (за счет применения в них усложненных трудоемких вычислительных процедур модельной 3D-генерации и 3D-пространственной обработки) обуславливает необходимость некоей «стандартизации» общей концепции представления трехмерной дискретной объемной сцены и обобщенного метода синтеза объемного изображения воксельной сцены, с целью разработки «под них» эффективных методов и алгоритмов синтеза изображений объемных графических примитивов [1 - 5].

В работе рассмотрены предложенная автором общая концепция представления трехмерной дискретной объемной сцены и обобщенный метод синтеза объемного изображения воксельной сцены для систем объемной пространственной визуализации (3D-объемной СОИ). Предложена архитектура вычислительной системы объемной пространственной визуализации на основе раз-

работанных средств, освещены дальнейшие направления исследований и разработок.

### Общая концепция представления трехмерной дискретной объемной сцены и синтеза изображений в системе объемной пространственной визуализации

Предлагается следующая обобщенная концепция представления дискретной объемной трехмерной сцены (объемного объектного пространства, «мира») и синтеза 3D-объемных изображений [1] (рис. 1). Далее будем использовать прямоугольную (декартову) правостороннюю трехмерную систему координат.

Пусть заданы:

1) **Воксель** – минимальный трехмерный пространственный элемент дискретизированного с некоторым шагом некоторого трехмерного пространства, в общем случае трехмерный прямоугольный параллелепипед. В простейшем случае – трехмерный куб с единичными сторонами.

2) **Вокселизованный дискретный мир** (сцена)  $Wd$  как объемное дискретно-пространственное представление геометрии ( $Gd$ ) и энергетических характеристик ( $Ed$ ) «реального» мира (сцены)  $Wr$ , заданное объемными воксельными моделями (аппроксимациями) объектов и окружающего их 3D-пространства мира  $Wr \xrightarrow{Gd, Ed} Wd$ . Для  $Wd$  заданы:

2.1) **Параметры пространственной дискретизации мира** (пространства сцены и объектов) – разрешение  $Ds, Do$ .

2.2) **Мировая система координат (МСК) - OXYZ**.

В МСК определено воксельное представление пространства сцены  $S$  как массив  $S$  вокселей  $S_{l,m,n}$ , где  $l, m, n$  – индексы вокселя в  $S$ , соответствующие координатам  $XYZ$  в МСК.

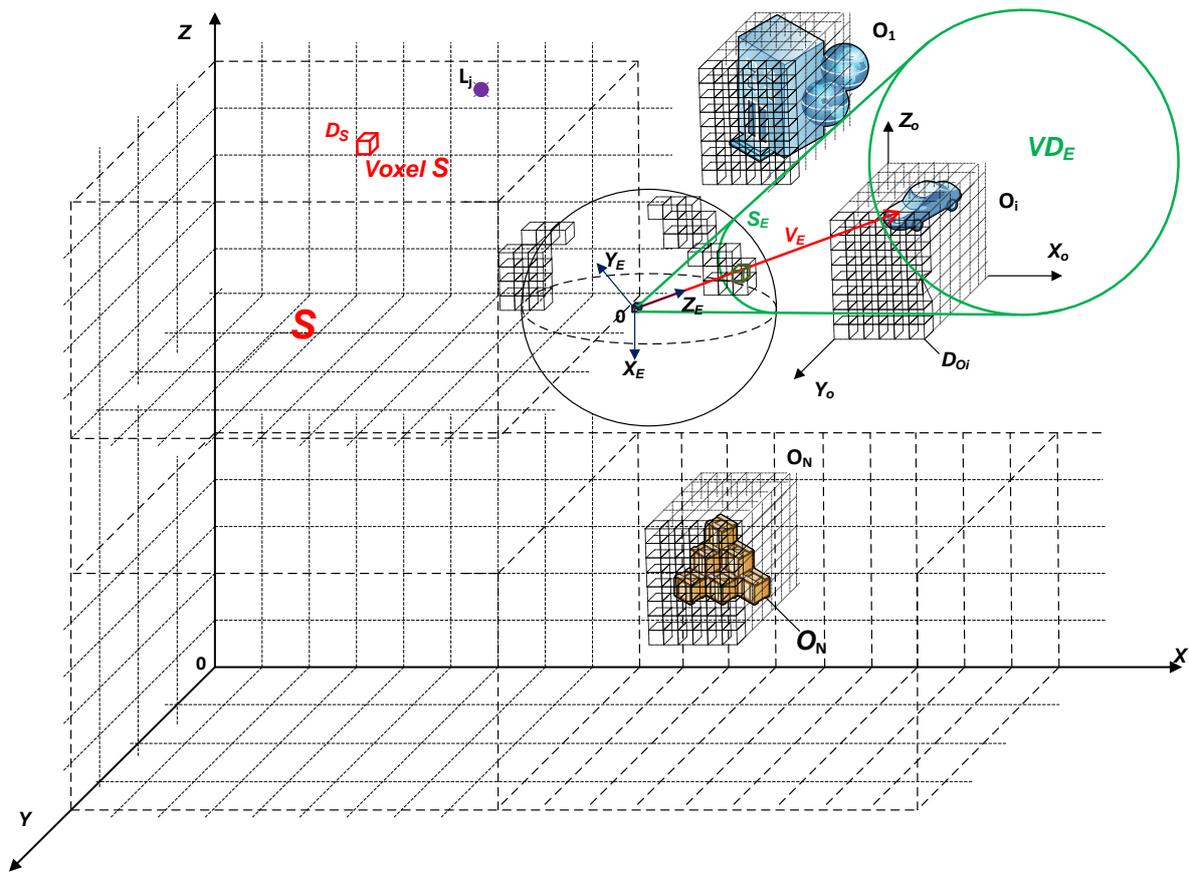


Рисунок 1 - Концепция представления дискретной трехмерной объемной сцены и синтеза изображений в 3D-объемной СОИ

Значение вокселя  $S_{l,m,n}$  задает некоторую характеристику «воздуха» пространства сцены в определенном данным вокселем объеме (например, коэффициент поглощения, и т.п.)

2.3) **Воксельные представления объектов сцены  $O_i$** , определенные в системе координат объекта (СКО)  $Ox_oY_oZ_o$  или в МСК.

Под воксельным представлением объекта  $O_i$  будем понимать множество (массив)  $\Phi_i$  вокселей  $O_{l,m,n}$ , таких, что  $O_{l,m,n} \in O_i$ ,  $l,m,n$  – индексы вокселя в  $\Phi_i$ , соответствующие координатам  $X_o; Y_o; Z_o$  в СКО.

Для объекта  $O_i$  собственная (связанная) система координат (СКО<sub>i</sub>), задается:

- положением СКО<sub>i</sub> относительно МСК  $(X_o; Y_o; Z_o)$ ;

- углами поворота СКО<sub>i</sub> относительно МСК  $(\psi_{oi}, \theta_{oi}, \gamma_{oi})$ .

При этом значение вокселя  $O_{l,m,n}$  суть некоторая характеристика объекта в этом «элементарном» объеме (цвет, прозрачность и т.п.)

2.4) **Источники освещения  $L_j$**  – заданы в МСК своим местоположением  $(X_{Lj}, Y_{Lj}, Z_{Lj})$  и энергетическими характеристиками (цвет, интенсивность и пр.), точечные источники света.

Отметим, что источники света могут быть и не точечными, тогда для них задается геометрическое описание поверхности источника и энергетические характеристики (аналогично  $O_i$ ).

3) **Наблюдатель - E:**

3.1) **Система координат наблюдателя (СКН) -  $Ox_EY_EZ_E$ .**

СКН относительно МСК задается аналогично СК объектов – своим положением  $(X_o; Y_o; Z_o)$  и ориентацией - углами поворота системы координат наблюдателя относительно мировой системы координат  $(\psi_E, \theta_E, \gamma_E)$ .

3.2) **Направление взгляда наблюдателя (луч визирования) –  $V_E$ .** Обычно направление визирования совпадает с осью  $Z_E$ .

3.3) **Сектор пространственного обзора наблюдателя -  $S_E$ .**

Сектор обзора может задаваться различными способами – пространственными угловыми характеристиками, ограничивающими лучами и пр. в зависимости от используемой модели наблюдателя и формы дисплея.

4) **Объемный экран (дисплей)**

Под **объемным экраном (дисплеем)  $VD_E$**  будем понимать видимую наблюдателем  $E$  часть

объемного пространства мира -  $VS_E$  (дисплей отображает видимое пространство мира).

**Видимый объем  $VS_E$**  (видовое пространство) – видимая наблюдателем  $E$  пространственная геометрическая часть объемного пространства  $S$  мира (сцены), определяемая физической моделью наблюдения,  $VS_E \in S$ .

Видимый объем  $VS_E$  задается как массив  $V$  вокселей  $V_{l,m,n}$ , полностью покрывающий (заполняющий)  $VS_E$ .

В зависимости от физической модели наблюдения (с использованием специфики зрения человека - модели глаза, или без ее использования), а также других принятых упрощений и ограничений, в [1, 4] определены примеры разновидностей форм видового пространственного объема объемных дисплеев.

**Объемное изображение** – видимая наблюдателю объемная часть вокселизованного дискретного мира, попавшей в видовое пространство объемного дисплея.

**5) Динамические характеристики мира:**

5.1) Параметры, характеризующие поведение объектов во времени:

- изменения в пространственно-дискретизированном представлении геометрии каждого объекта сцены, собственно изменение  $\mathbb{O}_i$ ;
- изменения визуальных характеристик объектов (изменения значений  $\mathbb{O}_i$ );
- изменения расположения и ориентации объектов (перемещение, вращение объектов и пр.) в МСК.

5.2) Параметры динамики источников освещения:

- пространственного расположения источников освещения;
- изменения в энергетических характеристиках источников освещения.

5.3) Параметры динамики наблюдателя:

- пространственного расположения и ориентации наблюдателя;
- изменения направления визирования и сектора обзора.

5.4) Параметры динамики изменения визуальных свойств окружающего внутреннего пространства сцены – изменения значений  $S_{l,m,n}$ .

**Задачей объемной визуализации** является построение объемного пространственно-дискретизированного образа мира – объемного изображения  $\mathbb{P}$ , видимого наблюдателю с его позиции в направлении визирования в пространстве объемного дисплея.

То есть, для каждого момента времени найти такое **множество вокселей**  $\mathbb{P}_{l,m,n}$ , что (рис. 2):

$$\mathbb{P}_{l,m,n} \in \mathbb{P}, \mathbb{P} = V \cap S \cap_{i=1}^N \mathbb{O}_i. \quad (1)$$

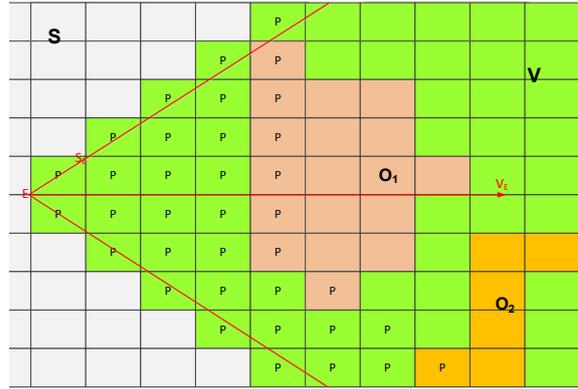


Рисунок 2 - Объемное изображение

При этом каждый воксель объемного изображения  $\mathbb{P}_{l,m,n}$  должен получить **значение (характеристику)**  $C_{\mathbb{P}_{l,m,n}}$ , с учетом характеристик вокселей объектов  $C_{\mathbb{O}_{l,m,n}}$ , попавших в видовой объем  $VS_E$  объемного дисплея  $VD_E$ , источников освещения  $C_{L_j}$  и характеристик вокселей пространства сцены:

$$C_{S_{l,m,n}}: C_{\mathbb{P}_{l,m,n}} = C_{\mathbb{O}_{l,m,n}} \cup C_{L_j} \cup C_{S_{l,m,n}}. \quad (2)$$

Здесь необходимо отметить **главную особенность такого подхода** к объемной пространственной визуализации – фактически, при наличии готовых пространственно-дискретизированных (воксельных) моделей объектов мира (и других характеристик дискретного мира) построение изображения можно свести к определению видимых наблюдателю вокселей моделей объектов, попавших в видовой пространственной объем объемного дисплея, с дальнейшим учетом в их характеристиках параметров освещения и других визуальных свойств внутреннего окружающего пространства мира.

Таким образом, в рамках предложенной концепции, при **решении статической задачи синтеза объемного изображения** вокселизованного мира с заданными моделями объектов в МСК по сути достаточно:

1. Выполнить построение вокселизированной модели мира – воксельных представлений (моделей) окружающего пространства и объектов, их пространственного размещения в сцене.

Данный этап - сценарный процессинг - для статической задачи синтеза объемного изображения (если геометрия объектов и мира не изменятся) выполняется один раз и может быть вынесен за рамки основного процесса (препроцессирование).

2. Выполнять процедуру трассировки лучей визирования с заданным шагом пространственной дискретизации по видимому наблюдателю объему пространства сцены до первого пересечения с вокселем некоторого объекта, который и

будет непосредственно виден наблюдателю (лучу) в данной точке.

3. Для применения к этому вокселю характеристик освещения достаточно выполнить от него трассировку светового (теневого) луча до источника(-ов) света и модифицировать исходную энергетическую характеристику материала вокселя (цвет и др.) с учетом характеристик источника света и окружающей среды (спец. эффекты и пр.).

4. Для найденного воксельного элемента объекта можно также вычислять и более слож-

ные характеристики освещения - фотореалистичные эффекты преломлений и отражений, используя аналогичные, применяемые в традиционной трехмерной графике, техники методов трассировки лучей [1, 3, 4, 5, 6].

Обобщенный метод синтеза объемного изображения дискретного воксельного мира проиллюстрирован на рис. 3.

В псевдокоде приведено упрощенное определение отражений и преломлений (единичные эффекты, аналогично базовому алгоритму Уиттеда трассировки лучей [7]).

### Метод синтеза объемного изображения воксельной сцены

```

Begin
Сформировать  $S = \{S_{l,m,n}; C_{S_{l,m,n}}\}$ 
Do (для всех объектов  $O_i$  объемного мира  $S$ ):
Сформировать  $\mathbb{O}_i = \{O_{l,m,n}; C_{O_{l,m,n}}\}$ ;
Преобразовать  $O_i$  в МСК И Разместить в  $S$ :
 $S \cup \mathbb{O}_i$ .
End_Do
Do (для всех вокселей  $V$  объемного экрана  $VD_E$ ):
 $V_{l,m,n} = S_{l,m,n}$ ;
 $C_{V_{l,m,n}} = C_{S_{l,m,n}}$ ;
End_Do
Do (для каждого луча визирования видового пространства  $VS_E$  (первичного луча) из  $E$  с заданными  $D_S$  и  $S_E$ ):
Выполнить пошаговую ( $k$ ) дискретную трассировку луча через воксели  $VS_E$  и найти первое пересечение луча с вокселем некоторого объекта  $\mathbb{O}_i$  мира;
 $\mathfrak{P}_{l,m,n}(k) = V_{l,m,n}(k)$ 
 $C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) = C_{V_{l,m,n}}(k)$ ;
If (есть пересечение)
Then
 $\mathfrak{P}_{l,m,n}(k) = O_{l,m,n}(k)$ 
Do (для каждого источника света  $L_j$ ):
Выполнить дискретную трассировку теневого луча из вокселя пересечения первичного луча с объектом к источнику света  $L_j$ ;
If (есть пересечение)
If (пересечение с некоторым объектом  $\mathbb{O}_i'$  мира)
Then
прекратить обработку этого  $L_j$  (он не виден), воксель - в тени;
Else
учесть освещенность от этого источника  $L_j$ :
 $C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}^j = C_{O_{l,m,n}}(k) \cup C_{L_j}$ ;

```

```

End_If
End_If
 $C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) = C_{V_{l,m,n}}(k) + C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}^j$ ;
End_Do
If (материал вокселя объекта  $\mathbb{O}_i$  отражающий)
Then
Выполнить дискретную трассировку отраженного луча и найти первое пересечение луча с вокселем некоторого объекта  $\mathbb{O}_i''$  мира;
If (есть пересечение с некоторым объектом  $\mathbb{O}_i''$ )
Then
учесть характеристику вокселя объекта  $\mathbb{O}_i''$  с коэффициентом отражения  $R_i$  материала  $\mathbb{O}_i$ :
 $C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) = C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) \cup (C_{\sigma''_{l,m,n}} * R_i)$ ;
End_If
End_If
If (материал вокселя объекта  $\mathbb{O}_i$  преломляющий)
Then
Выполнить дискретную трассировку преломленного луча и найти первое пересечение луча с вокселем некоторого объекта  $\mathbb{O}_i'''$  мира;
If (есть пересечение с некоторым объектом  $\mathbb{O}_i'''$ )
Then
учесть значение вокселя объекта  $\mathbb{O}_i'''$  с коэффициентом преломления  $F_i$  материала  $\mathbb{O}_i$ :
 $C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) = C_{\mathfrak{P}_{l,m,n}}(k) \cup (C_{\sigma'''_{l,m,n}} * F_i)$ ;
End_If
End_If
End_Do
End

```

Рисунок 3 - Обобщенный метод решения статической задачи синтеза объемного изображения воксельной дискретной сцены в объемной 3D- СОИ

Алгоритм дискретной трассировки (траверса) луча при этом может быть наглядно представлен следующим образом (рис. 4) [1, 4]. Здесь показана проекция воксельной сетки в плоскости XY. Для корректного траверса воксельной сетки луч должен последовательно посетить воксели 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. Уравнение луча при этом -  $u \vec{v} + \vec{v}$  для  $t \geq 0$  и алгоритм распространяет луч в интервале  $t$ , каждый  $t$  покрывает 1 воксель.

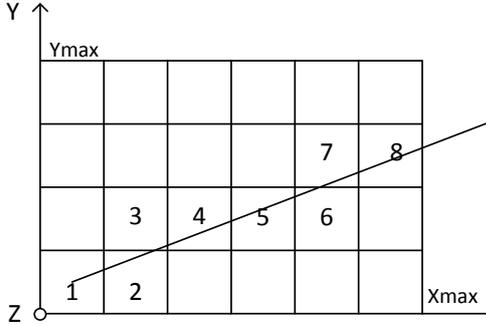


Рисунок 4 - Траверс трассирующего луча

Предлагается следующий инкрементный алгоритм траверса дискретного луча (рис. 5).

```

Begin
List:= NULL;
Определение  $tX, tY, tZ, X, Y, Z$  по  $t(\vec{u})$ ;
Do {
If ( $tX < tY$ ) Then
If ( $tX < tZ$ ) Then
 $X := X + dX$ ;
If ( $X \geq Xmax$ ) Then /* вышли за сетку по X*/
return (NULL); End_If
 $tX := tX + tdX$ ;
Else {
 $Z := Z + dZ$ ;
If ( $Z \geq Zmax$ ) Then /* вышли за сетку по Z*/
return (NULL); End_If
 $tZ := tZ + tdZ$ ; } End_If
Else {
If ( $tY < tZ$ ) Then
 $Y := Y + dY$ ;
If ( $Y \geq Ymax$ ) Then /* вышли за сетку по Y*/
return (NULL); End_If
 $tY := tY + tdY$ ;
Else {
 $Z := Z + dZ$ ;
If ( $Z \geq Zmax$ ) Then /* вышли за сетку по Z*/
return (NULL); End_If
 $tZ := tZ + tdZ$ ; } End_If
} End_If
List:= List_of_Object ([X][Y][Z]);
} while (List == NULL);
return (List);
End

```

Рисунок 5 - Алгоритм траверса пространственно- дискретного луча

Алгоритм начинается с инициализации - определения начального вокселя  $\vec{u}$ . Если начало луча находится вне сетки, то нужно найти воксель, через который луч проникает в сетку (сцену). Переменные  $X$  и  $Y$  инициализируются координатами исходного вокселя. Переменные  $dX$  и  $dY$  – шаги и представляются либо +1, либо -1, указывая на увеличение или уменьшение  $X$  и  $Y$  на каждом шаге пересечения луча вокселя (определяется знаком  $X$  и  $Y$  координат в  $\vec{v}$ ).

Далее определяется значение  $t$ , при котором луч пересекает вертикальную границу первого вокселя, и сохраняется в переменной  $tX$ . Аналогично производятся вычисления для  $Y$  ( $tY$ ). Минимум этих двух величин будет показывать, как долго мы можем распространять луч в текущем вокселе. Далее вычисляется  $tdX$  и  $tdY$ , которые показывают, как далеко вдоль луча мы можем двигаться (в единицах  $t$ ) для горизонтальной составляющей (равной ширине вокселя) или вертикальной (равной высоте вокселя). Аналогичная техника используется для  $Z$ - координаты.

Базовый цикл продолжается до тех пор, как мы не найдем воксель с непустым списком объектов ( $List$ ) в нем (видимый воксель объекта в этом трассирующем луче), или не покинем пространство (сетку) сцены.

Совершенно понятно, что таким же образом можно представить и траверсы вторичных лучей.

Таким образом, предложенный подход сочетания пространственно-дискретного представления мира и пространственно- дискретизированной трассировки лучей позволяет достаточно просто алгоритмически выполнить построение объемного изображения, фактически одновременно решая сразу множество задач–стадий графического 3D-конвейера – сценарного процессинга, геометрических модельных преобразований (включая отсечение, видовые и аффинные преобразования), рендеринга (включая решение задачи удаления невидимых поверхностей и освещения), и собственно визуализации.

Обобщенная архитектура синтеза объемного изображения, иллюстрирующая техники синтеза в воксельной 3D- объемной СОИ с использованием предложенных средств, представлена на рис. 6.

Предлагается [1] следующее качественно-адекватное представление значений (характеристик - параметров) вокселей объектов мира  $C_{O_{l,m,n}}$ , позволяющее производить расчет освещенности вокселей  $C_{\Phi_{l,m,n}}$  объемного изображения  $\Phi_{l,m,n}$  с учетом характеристик источников освещения  $C_{L_j}$  и характеристик вокселей пространства  $C_{S_{l,m,n}}$  (2), включающее следующие признаки и значения (рис. 7).

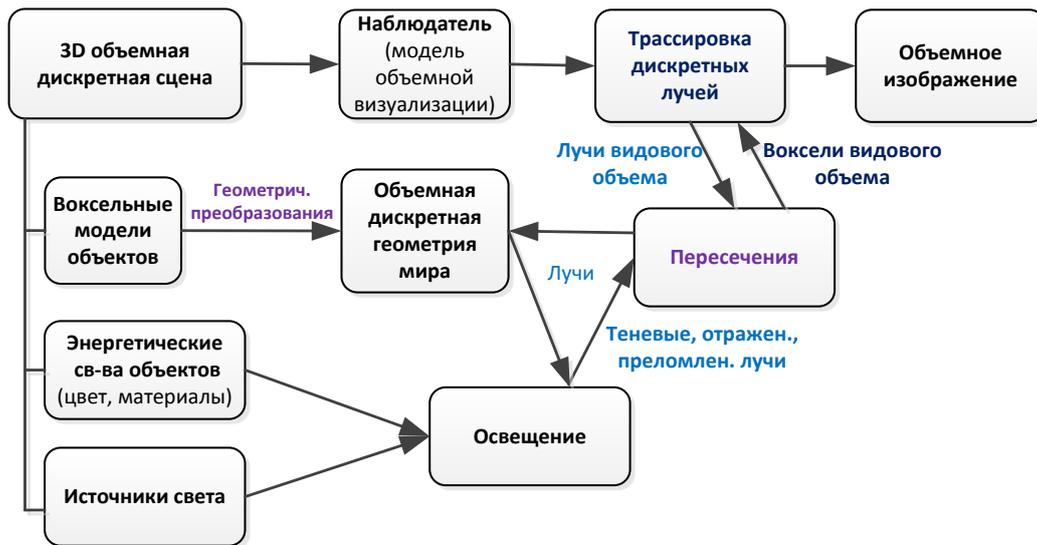


Рисунок 6 - Обобщенная архитектура синтеза 3D-объемного изображения дискретного воксельного мира

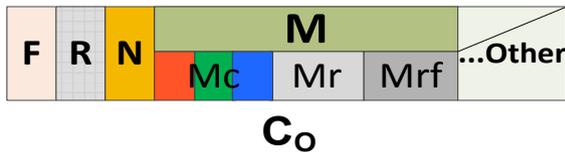


Рисунок 7 - Предлагаемое представление характеристики  $C_{O_{l,m,n}}$  вокселей объектов  $O_{l,m,n}$

- признак **F** (face) вокселя (воксель внешней образующей поверхности объекта (F=1) / воксель внутреннего объема (F=0));
- доля **R** (gate) единичного объема в этом вокселе (R=1, если F=0 и R = доли объемной площади поверхности объекта в этом вокселе, если F=1);
- нормаль **N** (normal) к поверхности объекта;
- энергетические характеристики материала **M** (material) вокселя – цвет материала **Mc** (например, в RGB), отражающая **Mr** и преломляющая **Mrf** характеристики материала или их упрощения;
- другие необходимые характеристики.

По аналогии и с использованием упрощений можно подойти и к заданию значений вокселей внутреннего пространства сцены  $C_{S_{l,m,n}}$  и источников света  $C_{L_j}$ . Например, в модели  $C_{S_{l,m,n}}$  можно исключить признаки F, R, N, а вместо Mr и Mrf использовать значение прозрачности Mt (transparency) материала. Для задания  $C_{L_j}$  достаточно определить цвет источника света Mc и вектор освещения N.

Характеристики вокселей **C** определяются (заполняются) на этапе генерации моделей мира (рис. 3). Учет характеристик вокселей **C** мира при синтезе объемных изображений методами 3D- воксельной трассировки лучей выполняется

в соответствии с основными этапами 3-4 метода решения задачи синтеза объемного изображения вокселизованного дискретного мира (рис. 3). При этом используются аналогичные, применяемые в традиционной трехмерной графике, техники определения освещенности методов трассировки лучей в зависимости от используемого прототипа метода рейтрейсинга [1, 3, 4].

Заметим, что для организации ускорения синтеза динамических объемных изображений мира (динамика объектов, наблюдателя, освещения), можно использовать известные в компьютерной графике подходы – распараллеливание, временную и пространственную декомпозицию процесса обработки [1, 2, 4, 5, 6, 8, 9].

Например, организацию объемного дисплея с двумя буферами кадра для соблюдения заданных временных критериев синтеза объемного изображения, применение конвейерной обработки для уменьшения времени 3D- пространственной визуализации, закрепление вычислительных компонент 3D СОИ за объектами мира (параллельная перестройка (генерация) пространственных воксельных моделей объектов, геометрические аффинные преобразования (вращения, перемещения и пр.) и т.д.).

### Архитектура вычислительной системы аппаратной поддержки 3D-объемной визуализации воксельного мира на основе предложенных средств

Предлагаемая архитектура вычислительной системы аппаратной поддержки 3D-объемной визуализации пространственно-дискретизированного воксельного мира с учетом предложенной концепции и обобщенного метода синтеза (рис. 3 - 7) показана на рис. 8 [2].

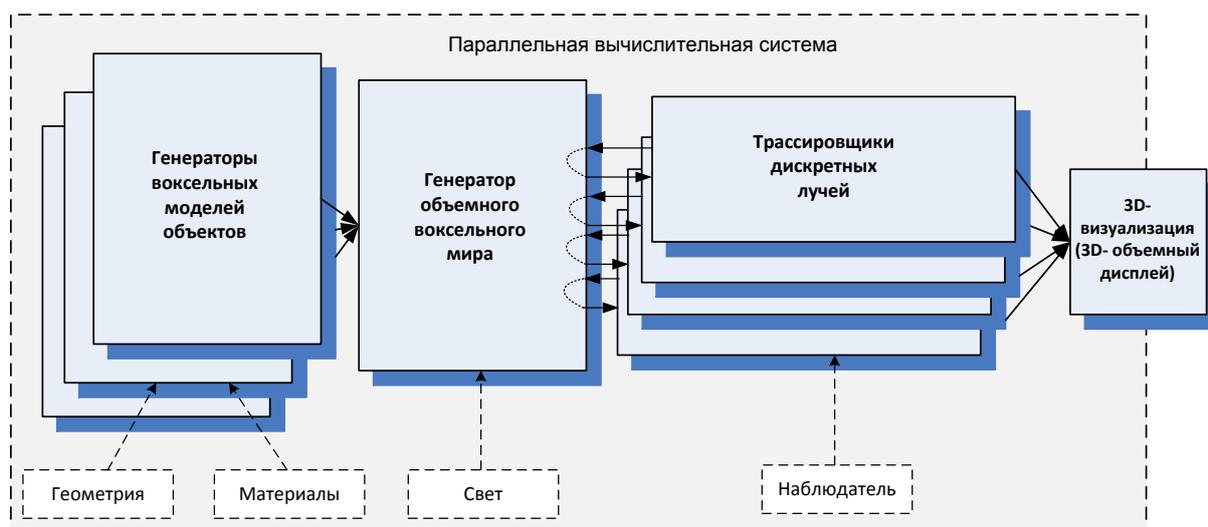


Рисунок 8 - Архитектура вычислительной системы аппаратной поддержки 3D- объемной визуализации воксельного мира)

Основные направления ускорения синтеза в системах такого класса связаны, согласно предложенной концепции генерации 3D- объемных изображений дискретного воксельного мира, с ускорением решения двух основных задач:

- эффективной генерации воксельных представлений (моделей) объектов пространственно-дискретного мира;
- эффективного и быстрого выполнения дискретной трассировки лучей.

Таким образом, предлагаются к дальнейшим исследованиям такие направления ускорения синтеза 3D- изображений в системах 3D-объемной пространственной визуализации:

- ускорение алгоритмической базы синтеза на основе упрощений в модели дискретной пространственной трассировки лучей (одного отраженного/преломленного луча (нет рекурсии)) и быстрого траверса луча;
- ускорение алгоритмической базы синтеза на основе модификации ускоряющей техники трассировки BVH - AABB;
- ускорение алгоритмической базы синтеза на основе разработки быстрых алгоритмов 3D-дискретной (воксельной) аппроксимации пространственных геометрических форм объектов сцены и генерации пространственных 3D- графических примитивов (включая быструю генерацию дискретного 3D- трассировочного луча вокселизованного пространства сцены);

- ускорение 3D- объемного синтеза изображений на основе предложенной алгоритмической базы путем отображения и эффективной реализации параллельной вычислительной системы его аппаратной поддержки (рис. 8) на архитектуру GPU-CUDA для организации синтеза в реальном времени [10].

## Выводы

В статье рассмотрена предложенная автором общая концепция представления трехмерной дискретной объемной сцены и обобщенный метод синтеза объемного изображения воксельной сцены для систем объемной пространственной визуализации.

Предложена архитектура вычислительной системы объемной пространственной визуализации на основе разработанных средств. Освещены дальнейшие направления исследований и разработок, главными из которых являются:

- методы и алгоритмы эффективной генерации воксельных представлений (3D моделей) объектов пространственно-дискретного мира (на сегодняшний день нет стандартов и общепринятых концепций);
- алгоритмы эффективного и быстрого выполнения дискретной трассировки лучей на основе ускоряющих техник и упрощений;
- способы отображения предложенной архитектуры вычислительной системы на GPU для организации работы 3D СОИ в реальном времени.

## Литература

1. Zori, S. A. Spatial Visualization via Real Time 3D Volumetric Display Technologies / S. A. Zori, E. A. Bashkov, Anas-M. Al Oraiqat // Lambert Academic Publishing (LAP). - 2018-01-25 | book. ISBN: 978-620-2-09398-9
2. Specialized Computer Systems for Environment Visualization // Springer 3D Research. - 2018. - Vol. 9, No 2. - 13 P. | DOI: 10.1007/s13319-018-0168-9
3. Башков, Е. А. Реалистичная пространственная визуализация с использованием технологий объемного отображения: Монография /

Е.А. Башков, С.А. Зори. – Донецк: ГВУЗ "ДонНТУ", 2014. – 150 с.

4. Зори, С. А. Высокопроизводительные средства организации реалистичной объемной визуализации в системах трехмерной компьютерной графики: Монография / Е. А. Башков, С. А. Зори. – Покровск: ГВУЗ "ДонНТУ", 2017. - 215 с.: ил. ISBN 978-966-377-215-8

5. Зори, С. А., Аноприенко, А. Я. Особенности организации объемной визуализации в системах трехмерной компьютерной графики // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно- вычислительных систем (ПИИВС-2018): сборник научных трудов II Международной научно-практической конференции, 14-18 ноября 2018 г. – Донецк, ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет», 2018. – Том. 1. - С. 302 – 308.

6. Bashkov, E. A. Realistic stereo visualization system architecture using ray tracing / Evgeniy A. Bashkov; Sergii A. Zori; Anas M. Al-Oraiqat; Akmaral Tleshova; Piotr Kisala // Proc. SPIE 10808 - Photonics Applications in Astronomy, Communi-

cations, Industry and High-Energy Physics Experiments, 2018. - Wilga, Poland. - Vol. 108080X (1 October 2018). – 8 p. DOI: 10.1117/12.2501601

7. Whitted Turner. An improved illumination model for shaded display / Whitted T. // Commun. ACM, 1989. – Vol. 23, No. 6. – PP. 343 – 349.

8. Зори, С. А. Использование средств аппаратной поддержки для повышения производительности систем 3D- пространственной визуализации / С. А. Зори, А. Я. Аноприенко, Р. В. Мальчева, О. А. Авксентьева // Информатика и кибернетика. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 1 (15). - С. 5 – 12.

9. Malcheva, R. An Acceleration of FPGA-based Ray Tracer / R. Malcheva, M. Yunis // European Scientific Journal, 2014. - Vol.10, N7. – PP. 186-190.

10. 3D Primitives GPGPU Generation for Volume Visualization in 3D Graphics Systems Anas M. Al-Oraiqat, Sergii A. Zori //Journal of KING ABDULAZIZ UNIVERSITY: Computing and Information Technology Sciences, 2020. - Vol. 9, No.2. – PP. 85-97. (ISSN 1658-6336)

***Зори С.А. Высокопроизводительный рендеринг трехмерных изображений для систем объемной пространственной визуализации.** В статье рассмотрена предложенная автором общая концепция представления трехмерной дискретной объемной сцены и обобщенный метод синтеза объемного изображения воксельной сцены для систем объемной пространственной визуализации. Предложена архитектура вычислительной системы объемной пространственной визуализации на основе разработанных средств. Намечены направления дальнейших исследований методов и алгоритмов эффективной генерации воксельных представлений, а также разработок новых решений на основе ускоряющих техник и упрощений.*

***Ключевые слова:** объемная пространственная визуализация, синтез 3D изображений, воксель, 3D объемная сцена, рендеринг, повышение производительности, архитектура*

***Zori S.A. High-performance rendering of 3D images for volumetric spatial visualization systems.** The article discusses the general concept for representing a 3D discrete volumetric scene and a generalized method for synthesizing a volumetric image of a voxel scene for volumetric spatial visualization systems. The architecture of a computer system for volumetric spatial visualization based on the developed tools is proposed. The directions of further research of methods and algorithms for efficient generation of voxel representations, as well as the development of new solutions based on accelerating techniques and simplifications are offered.*

***Keywords:** volumetric spatial visualization, 3D image synthesis, voxel, volumetric 3D scene, rendering, performance improvement, architecture*

*Статья поступила в редакцию 02.03.2023  
Рекомендована к публикации профессором Мальчевой Р.В.*