

В. А. БУРОВЦЕВ, С. В. ВЛАСОВ, С. И. ВЯТКИН, Б. С. ДОЛГОВЕСОВ,  
А. М. КОВАЛЕВ, А. А. ЛУБКОВ, Б. С. МАЗУРОК,  
К. Ф. ОБЕРТЫШЕВ, А. Ф. РОЖКОВ, Ю. Э. ТИССЕН  
(Новосибирск)

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРОЦЕССОР СИНТЕЗИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Современный уровень развития синтезирующих систем визуализации (ССВ), обеспечивающих формирование трехмерных изображений в реальном масштабе времени и отображение их на экране телевизионного монитора, характеризуется высокой сложностью и качеством воспроизводимых сцен. Достижение этих параметров осуществляется за счет применения специализированных вычислителей, преобразующих исходное описание трехмерных объектов в телевизионный растр.

Разработанная в Институте автоматики и электрометрии СО АН СССР синтезирующая система визуализации состоит из сценарного процессора, геометрического процессора и канала видеопреобразования; структура описана в работе [1]. В качестве сценарного процессора используется мини-ЭВМ общего назначения «Электроника 79», в задачи которой входят: формирование глобальной базы данных, создание приоритетно-упорядоченных списков потенциально видимых объектов для заданного положения наблюдателя; связь с оператором.

Геометрический процессор (ГП) — это специализированный конвейерный вычислитель, включающий два быстродействующих периферийных процессора «Электроника МТ-70М» [2] и процессор для генерации и сортировки сегментов (ПГС).

Канал видеопреобразования (КВП) формирует видеосигнал, соответствующий телевизионному стандарту. Количество КВП в системе определяется необходимым углом обзора при решении конкретных задач. Рассматриваемая ССВ может содержать до восьми каналов видеопреобразования. Один канал видеопреобразования обеспечивает угол обзора 30—40°. Подробное описание канала видеопреобразования приводится в работе [3].

Геометрический процессор осуществляет преобразование над такими геометрическими примитивами, как вершины, ребра и сегменты многоугольников, составляющих изображение. Включение формирования сегментов в функции ГП с последующей их буферизацией — отличительная особенность данной ССВ.

В системах визуализации (например, таких фирм, как General Electric, Singer — Link, Advanced Technology Systems [4]) функции ГП заканчиваются обычно формированием и буферизацией ребер многоугольников; дальнейшие преобразования, включая генерацию сегментов и получение видеосигнала, осуществляются каналом видеопреобразования. Это требует дополнительных вычислительных ресурсов (временных и аппаратных) в канале видеопреобразования, что является нежелательным фактором, если учитывать работу КВП на видеочастоте. Построение многоканальных высокопроизводительных систем в этом случае требует большого объема оборудования. Ввиду случайного закона изменения

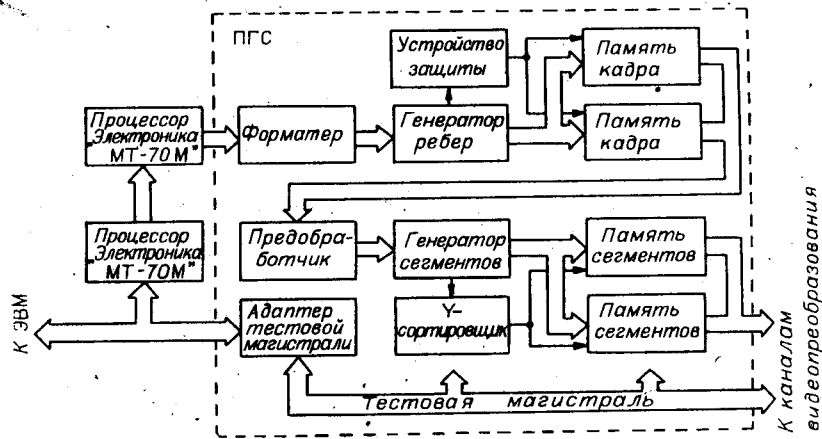


Рис. 1

сложности изображения в поле телевизионного растра канал видеопреобразования в подобных системах лишен защиты от информационных перегрузок из-за отсутствия априорных знаний о распределении сегментов по строкам.

Генерация и буферизация сегментов на уровне ГП обладают еще и тем преимуществом, что позволяют обеспечить работу генератора сегментов на некоторой средней, а не пиковой производительности, рассчитываемой по максимальному числу сегментов в строке.

Структурная схема геометрического процессора, приведенная на рис. 1, по своей организации представляет собой конвейер, где каждый вычислительный блок выполняет определенные функции, используя результат обработки данных в предыдущем блоке.

В ГП можно выделить два вида вычислительных операций. Первый вид операций, выполняемых с вещественными числами, осуществляется в программируемом процессоре «Электроника МТ-70М». С целью обеспечения необходимой производительности ССВ в геометрическом процессоре используются два таких процессора, выполняющие преобразования объектов локальной базы данных, поступающих из ЭВМ. Функции между процессорами распределены так, что первый осуществляет матричные преобразования, а второй — процедуру отсечения граней и перспективное преобразование, требующее выполнения операции деления, что для данного типа процессора — трудоемкая операция. Используемые в ГП стандартные процессоры «Электроника МТ-70М» дополнены каналом вещественных чисел для связи между процессорами и с ПГС и делителем вещественных чисел для повышения общей производительности системы.

Операции второго вида: масштабирование и смещение, генерация и сортировка сегментов — выполняются процессором генерации и сортировки сегментов, который ниже описывается более подробно.

Основная функция ПГС в системе — формирование сегментов из спроецированных на плоскость экрана

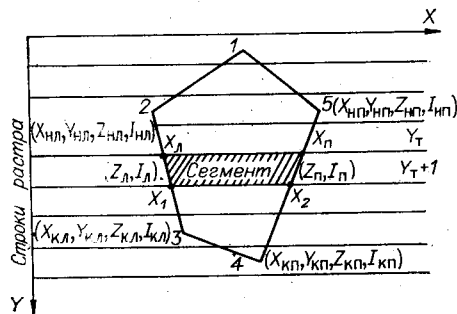


Рис. 2

на приоритетно-упорядоченных многоугольничков, сортировка по Y-координате и запись их в память сегментов. Под сегментом здесь понимается четырехугольник, образованный пересечением строки телевизионного растра с отображаемым многоугольничком (рис. 2). (Если при пересечении многоугольничка со строкой образуется фигура более сложной формы, то она преобразуется в четырехугольник.) Координаты X, Y сегмен-

тов задаются одиннадцатью разрядами, хотя для используемого формата разложения ( $512 \times 512$  квантов) достаточно девяти. Такое задание сегментов связано со стремлением повысить качество изображения (уменьшить дефекты квантования) за счет применения цифровой фильтрации в каналах видеообразования.

Для отображения криволинейных поверхностей, аппроксимированных набором граней, в ССВ применен метод линейной интерполяции яркостей Гуро [5]. Суть его сводится к тому, что в каждой вершине многоугольника вычисляется нормаль как результат усреднения всех нормалей граней, включающих данную вершину. По значению усредненной нормали в каждой вершине вычисляется интенсивность и таким образом удается избежать разрывов функции яркости на ребрах смежных многоугольников. В ПГС по значениям интенсивностей  $I_{нл}$ ,  $I_{кл}$  и  $I_{нп}$ ,  $I_{кп}$  в вершинах вычисляются значения интенсивностей левого  $I_{л}$  и правого  $I_{п}$  концов сегмента, а в КВП интерполируется интенсивность вдоль видимых сегментов и вычисляется результирующий цвет кванта изображения как произведение цвета многоугольника на значение интенсивности в данном кванте.

Использование ССВ в имитаторах визуальной обстановки становится более эффективным, если в них заложена возможность создания воздушной дымки и тумана. Корректное значение цвета многоугольника в каждом кванте экрана с учетом имитации дымки и тумана является функцией расстояния от наблюдателя до объекта (координаты  $Z$ ). Поэтому, как и в случае линейной интерполяции интенсивности, для вычисления цвета необходимо в ПГС по значениям  $Z_{нл}$ ,  $Z_{кл}$  и  $Z_{нп}$ ,  $Z_{кп}$  в вершинах многоугольника вычислять значения  $Z_{л}$  и  $Z_{п}$  для каждого сегмента, а в канале видеообразования путем линейной интерполяции по значениям  $Z_{л}$ ,  $Z_{п}$  на краях сегментов определить  $Z$  в каждом кванте экрана.

Процессор для генерации и сортировки сегментов представляет собой конвейер, включающий набор аппаратно реализованных вычислителей (см. рис. 1). На вход ПГС из процессора «Электроника МТ-70М» поступают выпуклые многоугольники, спроецированные на плоскость экрана и заданные координатами вершин  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  и интенсивностями  $I_0$  в виде вещественных 38-разрядных чисел. Каждый многоугольник отделяется друг от друга заголовком, в котором указан его цвет  $C$ . Кроме того, отдельные элементы обстановки такие, как посадочные огни, звезды, могут быть заданы специальным типом изображений, отмеченных знаком «огонь». «Огни» задаются координатами центра  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ , диаметром, цветом  $C$  и интенсивностью  $I_0$ . Диапазон изменения данных следующий:

$$-1 \leq X_0 \leq 1; \quad -1 \leq Y_0 \leq 1; \quad 0 \leq I_0 \leq 1; \quad 0 \leq D_0 \leq 1.$$

Через канал вещественных чисел данные поступают на вход формatera, где происходит преобразование их в числа с фиксированной запятой в соответствии с выражениями

$$\begin{aligned} X &= 2048X_0 + 2047; \\ Y &= 2048Y_0 + 2047; \\ I &= 256I_0; \\ D &= 2048D_0. \end{aligned} \tag{1}$$

После преобразования значения координат  $X$  и  $Y$  ограничиваются диапазоном целых чисел  $0..4095$ , значения  $I$  —  $0..255$ , а значения  $D$  —  $0..7$ . Координата  $Z$  остается в формате с плавающей запятой и представляется 15-разрядным числом, где 8 разрядов — порядок, 7 — мантисса.

Из формatera данные поступают в генератор ребер, где осуществляется определение левых и правых ребер многоугольника, вычисление тангенса угла наклона ребер к оси  $Y$  по формуле

$$\delta X = (X_i - X_{i-1}) / (Y_i - Y_{i-1}). \tag{2}$$

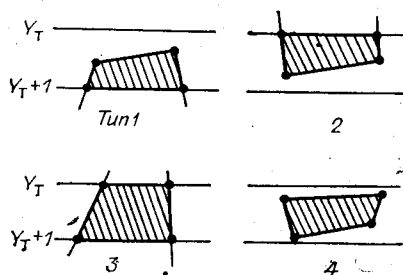


Рис. 3

Время формирования ребер определяется темпом поступления вершин на вход ПГС и составляет не более 10 мкс на одно ребро. Одновременно происходит отбраковка вершин, расстояние между которыми  $\Delta Y = Y_i - Y_{i-1}$  меньше, чем расстояние между соседними строками раstra. Экстремальные значения вершин многоугольника при этом не отбраковываются. Данная процедура позволяет удалить вырожденные объекты, а также уменьшить поток информации в следующие кас-

кады процессора, не внося существенных искажений в изображение.

Сформированные ребра в виде списка левых и правых ребер многоугольника записываются в память кадра, состоящую из двух независимых банков емкостью по 16 К. В одном банке происходит формирование кадра, а содержимое другого банка поступает на вход преобразователя сегментов. Переключение банков памяти кадра происходит после окончания формирования нового кадра синхронно с импульсами кадровой развертки. Таким образом, время формирования изображения может составлять от одного телевизионного полукадра (20 мс) до нескольких кадров.

Считанные из памяти кадра ребра поступают на преобразовщик. Преобразовщик отбраковывает мелкие ребра и многоугольники, вычисляет пересечения со строками раstra на концах ребер и передает их в генератор сегментов.

По координатам  $X$ ,  $Y$  начала и конца ребер, наклону  $\delta X$  в генераторе сегментов осуществляется вычисление координат сегментов  $X_n$ ,  $X_1$ ,  $X_n$ ,  $X_2$  (см. рис. 2) инкрементным способом и определение одного из четырех типов сегмента (рис. 3). К первому типу относятся сегменты, образованные началом многоугольника, ко второму — концом многоугольника; сегменты, не включающие экстремальных значений многоугольника по  $Y$ -координате, образуют третий тип; четвертый тип — это сегменты многоугольников, полностью попавших в строку раstra. Данное разделение сегментов на типы используется при фильтрации изображения в КВП.

В генераторе сегментов вычисляются также значения интенсивности  $I$  и координаты  $Z$ . В связи с тем что в системе для построения криволинейных поверхностей используется линейная интерполяция интенсивности, для каждого сегмента вычисляются значения интенсивности левого  $I_n$  и правого  $I_n$  его концов по формуле

$$I_{л(п)} = I_{нл(п)} \frac{Y_{кл(п)} - Y_T}{Y_{кл(п)} - Y_{нл(п)}} + I_{кл(п)} \frac{Y_T - Y_{нл(п)}}{Y_{кл(п)} - Y_{нл(п)}}, \quad (3)$$

где  $I_{нл(п)}$  — интенсивность начала ребра левого (или правого);  $I_{кл(п)}$  — интенсивность конца ребра левого (или правого);  $Y_{нл(п)}$ ,  $Y_{кл(п)}$  — координаты начала и конца левого (или правого) ребра;  $Y_T$  — координата текущего сегмента.

Аналогичным образом вычисляются значения  $Z_n$  и  $Z_n$  концов сегмента по координатам начала  $Z_n$  и конца  $Z_n$  левого и правого ребер, образующих сегмент:

$$Z_{л(п)} = Z_{нл(п)} \frac{Y_{кл(п)} - Y_T}{Y_{кл(п)} - Y_{нл(п)}} + Z_{кл(п)} \frac{Y_T - Y_{нл(п)}}{Y_{кл(п)} - Y_{нл(п)}}. \quad (4)$$

Вычислитель  $I$ ,  $Z$  выполнен в виде множително-делительного устройства конвейерного типа с тактом работы 100 нс.

При поступлении из памяти кадра «огня» в генераторе сегментов по координатам центра и диаметру формируются сегменты «огня» с использованием таблицы кодирования параметров. Окончательно сформиро-

ванные сегменты записываются в память сегментов, предварительно пройдя стадию сортировки по координате  $Y_r$ .

У-сортировщик для каждой строки телевизионного полукадра методом «корзинной» сортировки формирует в памяти сегментов связанный список сегментов с сохранением их приоритетного порядка на строке. Указатели начала этих списков запоминаются в специальной памяти У-сортировщика для последующей построчной передачи сегментов в КВП.

В У-сортировщике ведется подсчет числа сегментов на каждой строке раstra, что необходимо для организации защиты КВП от информационных перегрузок.

Память сегментов реализована в виде двух независимых банков емкостью 48 Кслов каждый для хранения сегментов соответственно четного и нечетного полукадра. Сегменты, относящиеся к разным каналам видеопреобразования, сопровождаются своим номером канала. Переключение банков происходит синхронно с частотой кадровой развертки телевизионного монитора. Среднее время записи одного сегмента в память составляет 400 нс, время считывания сегмента — 200 нс.

В связи с тем что сложность отображаемой обстановки в системе ограничена объемом используемой памяти сегментов (96 Кслов), в процессе формирования изображения возможны ситуации, когда поступающее из геометрического процессора изображение превышает указанный объем памяти и на экране монитора будут наблюдаться существенные искажения. Для устранения этих дефектов в ПГС предусмотрена аппаратная защита от перегрузок. Принцип действия устройства защиты от перегрузок основан на предположении, что исчезновение из изображения объектов, имеющих малую площадь, незначительно сказывается на целостности его восприятия. Реализация этого подхода требует подсчета площадей многоугольников, поступающих в память кадра. Для этого по мере поступления вершин многоугольника вычисляются разности  $\Delta Y_j$  и суммы  $\sigma X_j$  всех ребер многоугольника

$$\begin{aligned}\Delta Y_j &= Y_{j+1} - Y_j; \\ \sigma X_j &= X_{j+1} + X_j.\end{aligned}\tag{5}$$

В экранной системе координат положительные разности соответствуют левым ребрам, а отрицательные — правым. Площадь многоугольника при этом равна

$$P_j = -\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \Delta Y_j \sigma X_j,\tag{6}$$

где  $n$  — количество ребер в многоугольнике.

При записи в память кадра многоугольникам в соответствии со значением их площади присваивается 4-разрядный код от 1 до 15, причем меньшему значению кода соответствуют многоугольники большей площади. Код площади, равный нулю, присваивается многоугольникам, помеченным специальным признаком защиты от отбраковки. Одновременно методом «корзинной» сортировки производится подсчет числа сегментов, образованных многоугольниками, имеющими заданный код площади. При считывании многоугольников преобразовщиком сегментов осуществляется проверка их кода площади, и во внимание принимаются только многоугольники с кодом площади, не превышающим порогового значения, определенного при условии, чтобы суммарное число сегментов в текущем кадре не превышало 96 К. Признаком защиты от отбраковки в базе данных отмечаются объекты, исчезновение которых по каким-либо соображениям нежелательно.

В состав ПГС входит адаптер тестовой магистрали, предназначенный для тестирования ПГС и каналов видеопреобразования с помощью ЭВМ «Электроника 79», входящей в ССВ. Для осуществления тестирования отдельные функциональные узлы системы имеют специальный выход на