

УДК 681.3.06

А. М. Ковалев
(Новосибирск)

МАТРИЧНО-КОНВЕЙЕРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ*

Рассматривается матричная архитектура, предназначенная для отображения на совокупность дискретных разреженных растров многоугольников, заданных в форме линейных уравнений и функций, путем рекурсивного деления плоскости изображений. Определяется зависимость числа окон, генерируемых на каждом уровне разделения плоскости изображений, от размера матрицы видеопроцессоров. Устанавливается эффективность параллельного алгоритма синтеза изображений на разреженных растрах. Приводятся оценки производительности, загрузки и эффективности матричных реализаций, в которых вычислительный элемент выполнен в виде процессора со стеком или конвейера процессоров. Показано, что матрично-конвейерные генераторы изображений отличаются предельно высокой производительностью и высокой средней загрузкой конвейеров при сравнительно низкой эффективности предложенного алгоритма синтеза на разреженных растрах.

Введение. В [1] предложен алгоритм рекурсивного поиска пикселей для отображения на дискретный растр поверхностей трехмерных объектов [2], заданных в виде совокупности линейных уравнений для ребер выпуклых многоугольников и линейных функций для параметров поверхностей. В [3] рассмотрен вычислительный конвейер для реализации предложенного алгоритма. Приведены оценки производительности и загрузки ряда растровых процессоров с параллельным выполнением операций на уровнях разделения плоскости изображений. Показана значительная неравномерность распределения объема работ по уровням разделения, что снижает эффективность параллельной обработки. Отмечено, что более предпочтительной является архитектура смешанного типа «стек — конвейер — четверичное дерево», позволяющая достичь достаточной производительности для синтеза сложных изображений и имеющая резерв производительности для быстрого удаления невидимых поверхностей методом многоуровневого приоритетного маскирования.

Предметом настоящей работы является оценка производительности и эффективности матрично-конвейерных архитектур, реализующих алгоритм рекурсивного поиска пикселей на «разреженных» растрах [1]. Матрица конвейеров обеспечивает параллельную обработку различных областей плоскости изображений с параллельным выполнением операций на уровнях разделения плоскости.

Генератор изображений. Синтез изображений виртуальной среды, модель которой запомнена в базе данных, обеспечивается вычислительным конвейером, содержащим геометрический процессор, матрицу видеопроцессорных устройств и видеоконтроллер (рис. 1, а). Каждый элемент матрицы — видеопроцессор (рис. 1, б) — снабжен памятью по входу и выходу. Память типа FIFO на входе хранит очередь описаний геометрических примитивов (многоугольников). Videобуферная память на выходе аккумулирует синтезируемое изображение на разреженном растре. Отображение примитивов на разреженный растр производится мини-конвейером из растрового и пиксельного про-

* Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, № 95-01-00028.

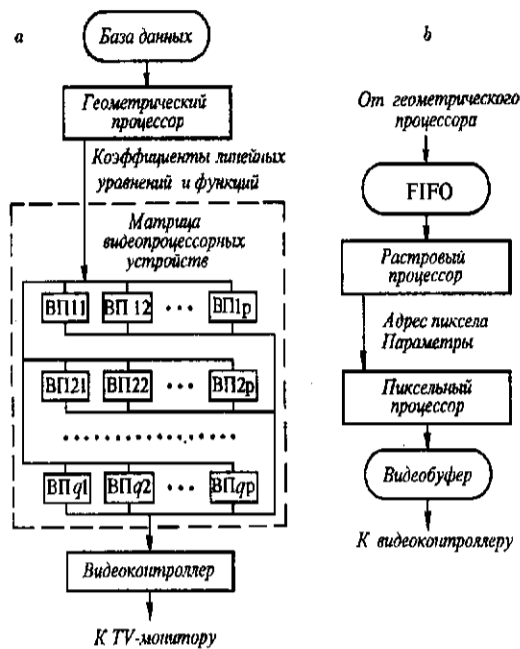


Рис. 1

цессоров. Растровый процессор элемента матрицы — это микроконвейер, который в общем случае может содержать блок начальной установки, s стеков, p -каскадный конвейер и t -уровневое четверичное дерево. Такой микроконвейер подробно описан и исследован в [3]. Части слова «мини» и «микро» не несут какой-то принципиальной нагрузки, а отражают, скорее, физическую реализацию конвейеров подобно [4] и иерархию структуры.

Геометрический процессор производит проективное преобразование графических данных из объектного пространства в пространство изображений и выдает описания геометрических примитивов всем видеопроцессорам матрицы в режиме "Broadcast". Описания определяют очереди на входах растровых процессоров, что способствует ослаблению связей как между видеопроцессорами матрицы, так и между матрицей и геометрическим процессором.

При отображении примитивов на дискретный растр матрицей размером $p \times q$ каждый видеопроцессор обрабатывает каждый p -й пиксел каждой q -й строки, т. е. видеопроцессор работает по всей плоскости изображения, но на разреженном растре, имеющем меньшее разрешение и фиксированное положение внутри полного растра (рис. 2) [1]. При этом совокупность локальной видеобуферной памяти элементов матрицы воспринимается видеоконтроллером, обеспечивающим воспроизведение изображений, как единая память с расслоением по двум координатным осям.

Алгоритм поиска пикселов на разреженных растрах подробно описан в [1], а методика оценки производительности генераторов, использующих рекурсивное деление плоскости изображений, приведена в [3]. Воспользовавшись этой методикой, оценим производительность, загрузку и эффективность матричной реализации алгоритма при двух ограничениях: 1) объем работы между видеопроцессорами матрицы распределен равномерно и 2) связь между видеопроцессорами по входу по причине обработки общих данных, поступающих от геометрического процессора, мала. Можно полагать, что при малой размерности матрицы и достаточном объеме FIFO отмеченные ограничения соблюдаются. При этом оценка производительности и загрузки матрицы совпадает с оценкой производительности и загрузки элемента матрицы, т. е. отдельного видеопроцессора.

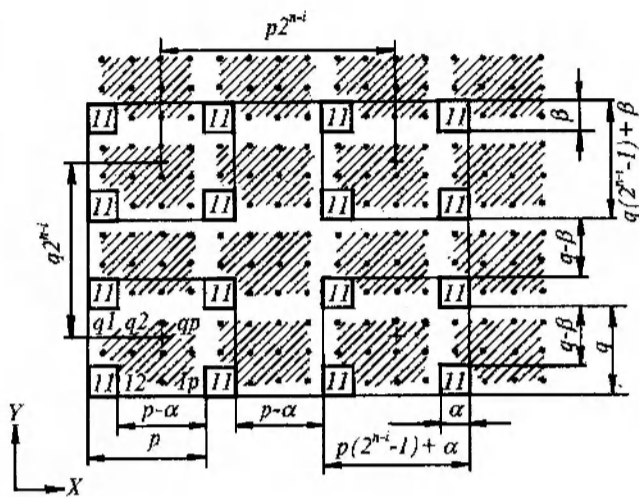


Рис. 2

Число окон, генерируемых многоугольником на i -м уровне. Пусть разреженный растр содержит $2^n \times 2^n$ пикселей, а генератор — матрицу размером $p \times q$ видеопроцессоров и полный дискретный растр составляет $p2^n \times q2^n$ пикселей. Как и в [3], каждый i -й уровень разделения плоскости изображения на разреженном растре ($1 < i < n$) можно представить в виде совокупности окон. Центры окон образуют дискретный растр с $2^i \times 2^i$ точками. Расстояния между точками этого растра вдоль осей x и y равны соответственно $p2^{n-i}$ и $q2^{n-i}$ единиц, а размеры окон составляют $[p(2^{n-i} - 1) + \alpha] \times [q(2^{n-i} - 1) + \beta]$ кв. ед. На рис. 2 показаны фрагмент полного растра на двух последних уровнях разделения и окна $n - 2$ -го, $n - 1$ -го и n -го уровней разреженного растра для видеопроцессора с индексом 11 .

Число окон, генерируемых многоугольником на i -м уровне, не больше площади фильтрованного многоугольника [5] с апертурой фильтра, равной относительным размерам окна:

$$w_i(S) \leq S_i = 4^{i-n} S(pq)^{-1} + 2^{i-n} L \sqrt{(\alpha_i^2 + \beta_i^2) \pi S(pq)^{-1}} + \alpha_i \beta_i, \quad (1)$$

где S_f — площадь фильтрованного многоугольника; S — площадь многоугольника, выраженная количеством пикселей; L — коэффициент формы многоугольника; α_i, β_i — относительные размеры окна на i -м уровне разделения:

$$\alpha_i = 1 + 2^{i-n}(\alpha/p - 1), \quad \beta_i = 1 + 2^{i-n}(\beta/q - 1), \quad (2)$$

где $\alpha \times \beta$ — апертура фильтра на пиксельном уровне.

Как и следовало ожидать, формула (1) описывает более общий случай. При $p = q = 1$ из (1) легко определить число окон, приведенное в [3] для монопроцессорного варианта. Наличие матрицы размером $p \times q$ приводит к тому, что каждый отдельный видеопроцессор обрабатывает $(pq)^{-1}$ часть площади фильтрованного многоугольника S_f на пиксельном уровне разделения. При фиксированном отношении q/p , которое, как правило, выбирается в согласии с форматом изображения (1:1, 3:4, 4:5, 9:16 и т. п.), число окон пиксельного уровня из (1)

$$w_n(S) < [S + L \sqrt{(\alpha^2 q/p + \beta^2 p/q) \pi S} + \alpha \beta] / pq \quad (3)$$

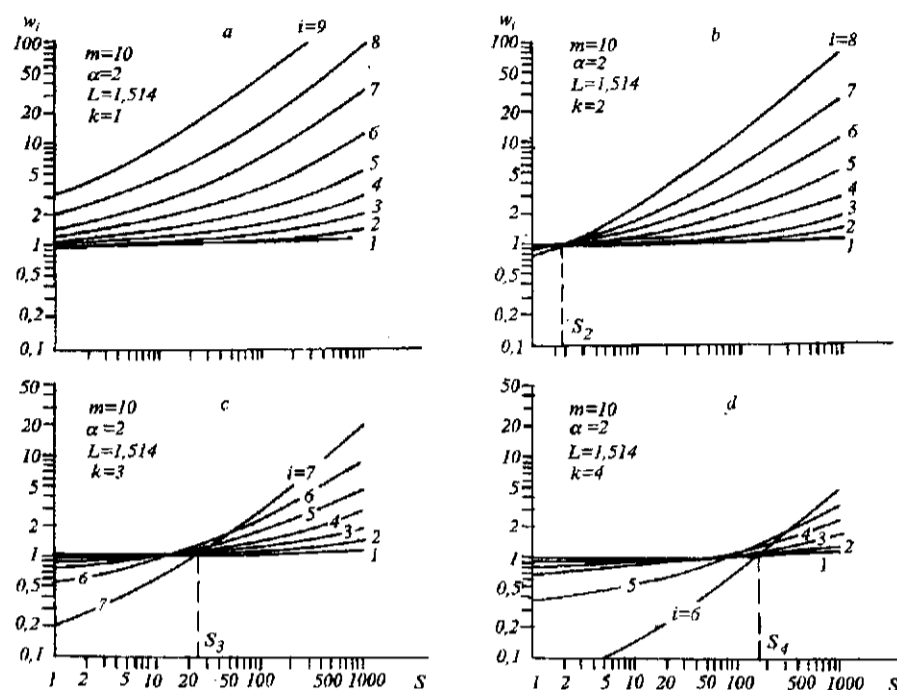


Рис. 3

обратно пропорционально размеру матрицы, что является основной особенностью и преимуществом матрично-конвейерных генераторов изображений. Однако при уменьшении номера уровня разделения в (1) обратная пропорция от размера матрицы для $w_i(S)$ нарушается из-за увеличения относительных размеров окон из (2).

Рис. 3 иллюстрирует зависимости $w_i(S)$ для квадратных матриц размерами $p \times q = 2^k \times 2^k$, где $k = 1, 2, 3, 4$. Разрешение полного растра фиксировано и составляет $2^{n+k} \times 2^{n+k} = 4^m$, где $m = 10$. Квадратная апертура фильтра $\alpha \times \beta = 2^2$ и коэффициент формы многоугольника $L = 1,514$ здесь выбраны такими же, как и для примеров в [3].

При $k = 1$, т. е. для матрицы размером $p \times q = 2 \times 2$ из формулы (2), относительные размеры окон $\alpha_i = \beta_i = 1$, и при этом оказываются справедливыми неравенства $w_i \geq 1$, $w_{i+1} > w_i$ во всем диапазоне изменения S (рис. 3, a). При $S = 0$ $w_i(0) = 1$, т. е. генерируется по одному окну на каждом уровне разделения. При $k > 1$ указанные неравенства нарушаются в области малых S (рис. 3, b—d) из-за уменьшенной апертуры окон ($\alpha_i < 1$), которая увеличивается, стремясь к единице при уменьшении номера уровня i (рис. 4). Интересно заметить, что при уменьшении S в окрестности площади S_k , для которой $w_{m-k}(S_k) = 1$, начинается своеобразный «переходный» процесс нарушения вышеотмеченных неравенств, после окончания которого знак неравенств меняется на противоположный, т. е. $w_1 < 1$ и $w_{i+1} < w_i$. Напомним (см. [3]), что число генерируемых окон и рассматриваемые неравенства справедливы для некоторого «среднего» на множестве многоугольников, одинаковых по площади и форме, но разных по расположению на растре. Если получается, что число окон меньше единицы, то это означает, что при малой площади часть многоугольников из этого множества не имеет пересечений с окнами разреженного растра i -го уровня, т. е. «проваливается» в межоконные области плоскости изображения, образованные объединением вертикальных полос размером $p - \alpha$ и горизонтальных полос размером $q - \beta$ (см. рис. 2). Неравенство

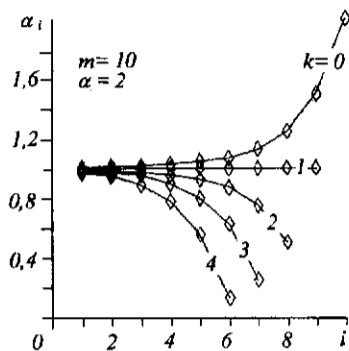


Рис. 4

$w_{i+1} < w_i$ объясняется тем, что относительные размеры межоконных областей увеличиваются при увеличении номера уровня.

Из выражения (3) при $w_{m-k}(S_k) = 1$ ясно, что площадь S_k , в окрестности которой происходит описанный катаклизм смены знаков неравенств, соответствует площади фильтрованного многоугольника S_f , которая равна числу видеопроцессоров в матрице:

$$S_f = S_k + \alpha L \sqrt{2\pi S_k} + \alpha^2 = 4^k. \quad (4)$$

Решив квадратное уравнение (4) для $k = 1, 2, 3, 4$, $\alpha = 2$ и $L = 1,514$, получим $S_1 = 0$; $S_2 = 1,8$; $S_3 = 23,3$; $S_4 = 157$.

Эффективность алгоритма синтеза изображений на разреженных растрах. В [3] показано, что время обработки многоугольника на i -м уровне ($1 \leq i \leq n$) складывается из двух величин, зависящих от числа окон:

$$t_i(S) \leq t_e [4w_{i-1}(S) + w_i(S)k_p/k_e], \quad (5)$$

где t_e — время теста покрытия одного из подокон окна; w_{i-1} — число окон, поступающих на i -й уровень; w_i — число окон, исходящих с i -го уровня; k_p — число параметров поверхности; k_e — число ребер многоугольника; $w_0 = 1$.

Суммарный объем работы по отображению многоугольника на растр зависит от общего числа окон, обрабатываемых на всех уровнях разделения, и с учетом (5)

$$T(S) = \sum_{i=1}^n t_i(S) = t_e \left[4 \sum_{i=0}^{n-1} w_i(S) + (k_p/k_e) \sum_{i=1}^n w_i(S) \right]. \quad (6)$$

Как было отмечено выше, только на пиксельном уровне при $i = n$ число окон (3), генерируемых многоугольником на разреженном растре, меньше числа окон на полном растре в pq раз. На других уровнях разделения число окон на разреженном растре уменьшается с коэффициентом, меньшим, чем pq . Поэтому объем работы на заполнение полного растра, выполняемый матрицей видеопроцессоров, оказывается больше минимально необходимого, выполняемого одним видеопроцессором.

Пусть $T_{s0}(S)$ — суммарное время, затраченное монопроцессором для отображения многоугольника на растр из $p2^n \times q2^n$ пикселей, а $T_s(S)$ — суммарное время, затраченное одним видеопроцессором матрицы размером $p \times q$ для отображения того же многоугольника на разреженный растр из $2^n \times 2^n$ пикселей. Эффективность алгоритма синтеза на разреженных растрах можно определить как отношение

$$Q_a(S) = T_{s0}(S) / [pqT_s(S)]. \quad (7)$$

Очевидно, что найденная эффективность параллельного алгоритма синтеза в точности совпадает с эффективностью мультипроцессорной реализации алгоритма в виде матрицы видеопроцессоров, в которых растровый процессор является процессором со стеком:

$$Q_s(S) = P_s(S) / [pqP_{s0}(S)] = Q_a(S), \quad (8)$$

где $P_s(S)$ — производительность матрицы видеопроцессоров со стеками; $P_{s0}(S)$ — производительность монопроцессора со стеком; pq — число видеопроцессоров в матрице.

На рис. 5, а для квадратных матриц размерами $p \times q = 4^k$, $m = 10$, $\alpha = 2$, $L = 1,514$ и $k_p/k_e = 1$ показана зависимость относительной производительности матрицы видеопроцессоров со стеками $p_s(S) = P_s(S)/P_{\max}$, где $P_s(S) = T^{-1}(S)$; $T(S)$ — время обработки многоугольника из (6) при $n = m - k$; $P_{\max} = 0,2t_e^{-1}$. Рис. 5, б иллюстрирует эффективность алгоритма для матриц разного размера. К сожалению, эффективность алгоритма значительно падает, во-первых, при увеличении размера матрицы и, во-вторых, при уменьшении площади отображаемого многоугольника. Первое объясняется появлением своеобразной алгоритмической связи между видеопроцессорами матрицы за счет того, что окна разреженных растров уровней $i < n$ разных видеопроцессоров пересекаются и с увеличением размера матрицы растет площадь пересечения. Вторая причина уменьшения эффективности алгоритма определяется его рекурсивным характером.

Таким образом, несмотря на равномерное распределение объема работы по видеопроцессорам и отсутствие связи между ними по входу, что показано выше начальными ограничениями, эффективность параллельного алгоритма значительно уменьшается из-за обработки разными видеопроцессорами некоторых общих площадей изображения на всех уровнях разделения, кроме пиксельного.

Производительность матрицы конвейеров. Производительность растрового процессора как вычислительного конвейера равна производительности каскада (каскадов) конвейера с наибольшим временем обработки многоугольника площадью S и с учетом (5)

$$P_p(S) \geq t_{\max}^{-1}(S) = \{t_e \max [4w_{i-1}(S) + w_i(S)k_p/k_e]\}^{-1}. \quad (9)$$

В отличие от моноконвейера, где производительность всегда соответствует времени обработки многоугольника на пиксельном n -м уровне независимо от его площади, при определении производительности матрично-конвейерной реализации следует учитывать три области изменения площади фильтрованного многоугольника S_f : $S_f \gg pq$; $S_f \cong pq$; $S_f \ll pq$.

В первом случае, согласно вышеприведенному анализу, $w_i > w_{i-1}$, $t_i > t_{i-1}$ и производительность определяется временем работы матрицы конвейеров на пиксельном n -м уровне. В области больших площадей при $S_f \cong S$ производительность матрицы конвейеров практически в pq раз выше производительности моноконвейера. При $S_f \cong pq$, как было отмечено выше, происходит своеобразный переходный процесс смены знаков неравенства чисел обрабатываемых окон w_i . В переходной зоне S производительность матрицы определяется некоторым промежуточным каскадом конвейеров уровня i , где $1 < i < n$. Наконец, в области малых площадей $S_f \ll pq$, когда устанавливаются неравенства $w_i < w_{i-1}$ и $t_i < t_{i-1}$, производительность матрицы конвейеров определяется их первыми каскадами и достигает предельно максимальной величины, практически не зависящей от площади S .

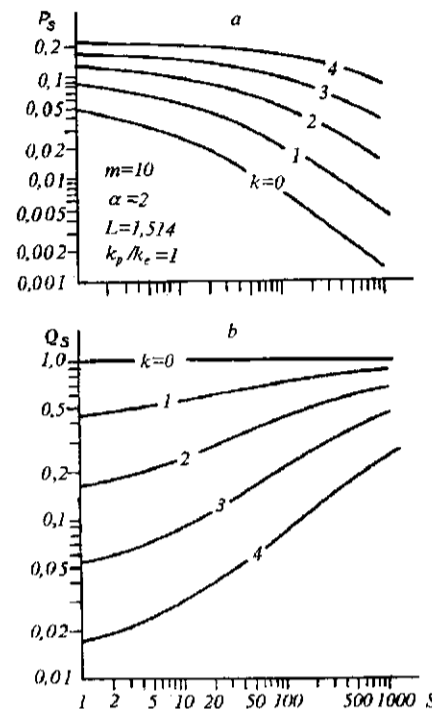


Рис. 5

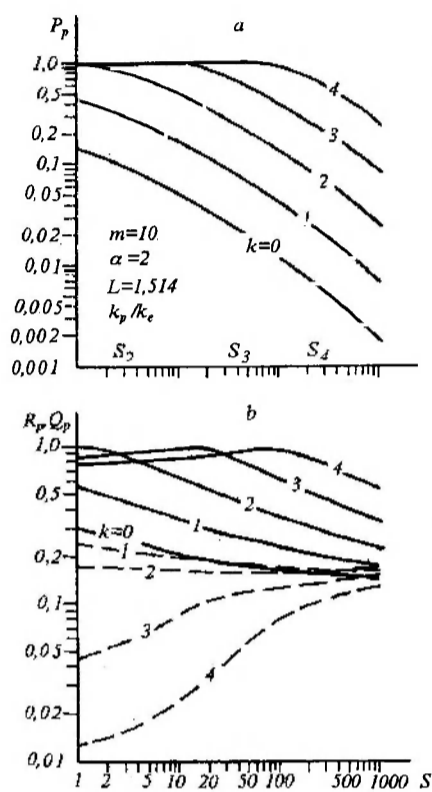


Рис. 6

Существование трех отмеченных областей возможно только в том случае, когда относительные размеры окон α_i, β_i меньше единицы, а это, в свою очередь, зависит как от апертуры фильтра $\alpha \times \beta$ на пиксельном уровне, так и от размера матрицы $p \times q$ (2). На рис. 6, а для квадратных матриц размерами $p \times q = 4^k$, $m = 10$, $\alpha = 2$, $L = 1,514$ и $k_p/k_c = 1$ показаны графики относительной производительности матрично-конвейерных видеопроцессоров $p_p(S) = P_p(S)/P_{max}$, где при расчете $P_p(S)$ из (9) использовались зависимости $w_i(S)$, приведенные на рис. 3. Нетрудно видеть, что в области больших S (например, $S = 1000$) производительность растет практически пропорционально количеству видеопроцессоров 4^k . В переходной зоне, которая существует при $k = 2, 3, 4$, в окрестности $S = S_k$ или $S_f = pq$ рост производительности замедляется, а в области малых площадей при $S < S_k$ — ограничивается предельно максимальным значением.

Загрузка и эффективность. Среднюю загрузку конвейера в матрице можно определить как отношение среднего времени обработки многоугольника одним каскадом конвейера к максимальному времени или как отношение производительности матрицы конвейеров к производительности матрицы стеков, помноженное на число каскадов одного конвейера:

$$R_p(S) = \sum_{i=1}^n t_i(S) / [nt_{max}(S)] = P_p(S) / [nP_s(S)]. \quad (10)$$

Загрузка конвейеров в матрице выше, чем загрузка моноконвейера. Это объясняется некоторым выравниванием распределения объема работ по уровням разделения за счет уменьшения числа обрабатываемых окон на верхних уровнях.

Эффективность матрично-конвейерной реализации можно оценить как отношение средней производительности одного каскада конвейера в матрице к производительности монопроцессора со стеклом

$$Q_p(S) = P_p(S) / [npqP_{s0}(S)]. \quad (11)$$

С учетом (8) и (10) эффективность матрично-конвейерной реализации алгоритма поиска пикселей на разреженных растрах можно выразить через эффективность алгоритма $Q_s(S)$ и среднюю загрузку конвейеров в матрице $R_p(S)$ как их произведение

$$Q_p(S) = Q_s(S)R_p(S). \quad (12)$$

На рис. 6, б для тех же квадратных матриц, выбранных для примера ранее, сплошными линиями показаны зависимости средней загрузки $R_p(S)$, а штриховыми линиями — эффективности $Q_p(S)$. Нетрудно заметить, что, кроме роста загрузки по мере увеличения размера матрицы, характерно наличие миниму-

мов загрузки (практически до 100 %) в окрестности $S = S_k$. Эффективность матрицы конвейеров, естественно, меньше эффективности матрицы стеков, показанной на рис. 5, *b*. И тем не менее в диапазоне площадей $1 < S < S_k$ при матрично-конвейерной архитектуре возможно достижение предельной производительности, равной производительности устройства с архитектурой в виде полного четверичного дерева процессорных элементов [3], при эффективности, которая на три порядка выше эффективности дерева.

Заключение. Матрично-конвейерные генераторы изображений с рекурсивным поиском пикселей отличаются предельно высокой производительностью и высокой средней загрузкой конвейеров при отображении многоугольников, площади которых, выраженные в количестве пикселей, не превышают числа конвейеров в матрице. При этом максимальная производительность соответствует в среднем времени пяти тестов покрытия ($P_{\max} = 0,2t_e^{-1}$). В области больших площадей многоугольников производительность генератора растёт пропорционально размеру матрицы, что также является достоинством архитектуры.

К недостаткам матрично-конвейерной реализации следует отнести сравнительно низкую эффективность, связанную, прежде всего, с эффективностью самого параллельного алгоритма на разреженных растрах. Устранение этого недостатка может быть предметом последующих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А. М. Синтез виртуальной среды с рекурсивным делением плоскости изображения // Автометрия. 1993. № 5.
2. Ковалев А. М., Тарнопольский Ю. В. Проективное преобразование триангулированных поверхностей // Автометрия. 1991. № 1.
3. Ковалев А. М. Производительность генераторов изображений с рекурсивным поиском пикселей // Автометрия. 1995. № 1.
4. Sutherland Ivan E. Micropipelines // Commun. ACM. 1989. 32, N 6.
5. Ковалев А. М., Токарев А. С. К оценке производительности алгоритмов фильтрации синтезированных изображений // Автометрия. 1989. № 2.

Поступила в редакцию 17 мая 1995 г.