

УДК 681.31

Денисюк В.О.

Вінницький національний аграрний університет

## ІНФОРМАЦІЙНО-АПАРАТУРНИЙ КРИТЕРІЙ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСОРУ ГРАФІЧНОЇ СИСТЕМИ

*В статті розглядається інформаційно-апаратурний критерій ефективності процесору для графічної системи.*

*In the article the features of information-apparatus criterion of efficiency of processor are probed for the graphic system.*

Ключові слова: комп'ютерна графіка, графічний процесор, критерій ефективності.

### Вступ

Комп'ютерна графіка вирішує складні та важливі задачі з інформаційного обслуговування науково-практичної діяльності людини. Для опрацювання додатків комп'ютерної графіки використовуються різноманітні графічні системи, як універсальні, так і спеціалізовані – професійні. Аби розвантажити центральні процесори графічних систем від невласливих комп'ютерній графіці операціям та збільшити загальну швидкодію графічних систем, використовуються спеціалізовані графічні акселератори, графічних процесорів, що виконані у вигляді окремих чи декількох інтегральних схем. Досить актуальною є задача ефективного вибору графічного процесору для відповідної графічної системи.

### Постановка задачі

Графічні системи набули широкого застосування у різних галузях діяльності людини від складних імітаційних систем візуалізації різних

комплексів (автомобільних, авіаційних, космічних тощо), систем відтворення складної графічної інформації у режимі реального часу (системи керування, військові комплекси тощо), або систем візуалізації задач економічного моделювання, до графічних акселераторів, що використовуються в нескладних побутових комп'ютерах. Досить актуальною є задача вибору засобів комп'ютерної графіки, а саме спеціалізованих графічних процесорів, які забезпечують необхідну якість та швидкодію формуванні графічних зображень без збільшення апаратних витрат з достатньою достовірністю відтворення графічної інформації. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком виробництва графічних процесорів у вигляді спеціалізованих інтегральних схем та обиранням необхідного за відповідними параметрами графічного процесору та вимогами кожної конкретної графічної системи.

### **Вибір критерію порівняння процесорів для графічної системи**

З метою порівняння графічних процесорів, у вигляді спеціалізованих інтегральних схем, (ГП) для графічної системи (ГС) необхідно обрати критерій порівняння, або критерій ефективності того чи іншого пристрою, за яким відбудеться порівняння [3, 4, 7, 8, 11, 17]. Для цього розглянемо параметри графічних процесорів. Сучасні ГП характеризуються такими основними параметрами:

- кількість потокових процесорів (шт.);
- частота ядра (МГц або ГГц);
- частота шейдерів (шейдерного домена) (МГц або ГГц);
- частота пам'яті (МГц або ГГц);
- об'єм пам'яті (адресне поле відеопам'яті) (МБ);
- інтерфейс пам'яті (ширина шини пам'яті) (біт);
- перепускна спроможність пам'яті (Гб/с);
- швидкість заповнення сцени текстурами (млрд/с);
- підтримка графічних стандартів (наприклад, API DirectX, OpenGL);

- можливість нарощування (наприклад, відповідність технології SLI);
- апаратні витрати (млн. грн.);
- технологія виробництва (нм);
- споживання електричної потужності (Вт);
- вартість придбання.

Параметр точності відтворення різноманітних функціональних залежностей у дискретному координатному просторі відображення (ДКПВ) не розглядається тому, що усі сучасні графічні процесори використовують алгоритми, які надають точність не гірше 0,5 дискрета [10-13, 18, 19].

Існують різні методики оцінки ефективності, наприклад, вартість одного кадра ДКПВ за секунду [20]. Але така методика суттєво залежить від маркетингових обставин та особливостей ціноутворення на ГП.

При обиранні критерія ефективності необхідно враховувати те, що критерій ефективності не можна одержати засобами математики [8]. Одержання критерію є суто евристичною процедурою, яка виконується із урахуванням призначення та умов функціонування об'єкта оцінювання уцілому [2, 8]. На практиці поліпшення одного параметра нерідко супроводжується погіршенням принаймні одного іншого параметра, що вказує на необхідність використання комплексних критеріїв ефективності, що пов'язують у необхідних пропорціях найбільш важливі часткові показники [2, 7, 8, 17].

Найпоширеніший узагальнений критерій ефективності технічного пристрою має вигляд [7, 8, 17]:

$$Q_r = \frac{(\text{ефект})}{(\text{витрати})}. \quad (1)$$

Причому, недолік ефекту можна компенсувати зменшенням витрат [1, 2].

У зв'язку з вищенаведеним і з традиціями інформаційної техніки [1, 3, 7, 17], за критерій ефективності обирається інформаційно-апаратурний критерій [8]:

$$Q_r = \frac{\bar{R}}{C}, \quad (2)$$

де  $\bar{R}$  - інформаційна продуктивність пристрою;

$C$  - апаратні витрати на реалізацію пристрою.

Інформаційна продуктивність пристрою визначається у зв'язку з перерахованими вище параметрами процесору і специфікою його застосування [3, 15, 18] за співвідношенням:

$$\bar{R} = P_s \cdot (N_d + N_c) \cdot K_f, \quad (3)$$

де  $P_s$  - продуктивність пристрою [пікселів за секунду];

$N_d$  - розрядність одного з вимірів ДКПВ [біт];

$N_c$  - розрядність однієї із трьох складових кольору (R, G, B) [біт];

$K_f$  - коефіцієнт складності графічних примітивів виведення у порівнянні зі складністю виводу відрізка прямої лінії двовимірним (2D) лінійним інтерполятором, що дорівнює "1".

Значення коефіцієнта  $K_f$  обирається відповідно до суб'єктивних оцінок складності операцій обробки, які виконуються, та відтворення інформації, прийнятими в машинній графіці [2-4, 11-13, 18] і реалізованими на даному пристрої. Причому, кожна додаткова функція машинної графіки, яку здійснює пристрій, або доповнення ДКПВ на один вимір збільшує  $K_f$  на "1". Наприклад, для пристрою, що відтворює 2D відрізки прямої лінії, він дорівнює 1; 3D відрізки прямої лінії - 2; незафарбовані тривимірні (3D) трикутники - 3; зафарбовані 3D трикутники або незафарбовані, але з можливістю їх афінних перетворень - 4; зафарбування 3D трикутників з можливістю виконання афінних перетворень даного трикутника - 5; відтворення 3D трикутника, його афінні перетворення, а також видалення невидимих ліній - 6, поверхонь - 7; для пристрою, який виконує усі перераховані вище функції та може бути запрограмованим - 8; для ГП, який виконує усі перераховані вище функції та може бути використаним у технології SLI - 9; 10 – максимальне значення

параметру , яке враховує майбутнє розширення функцій ГП. Для більшості сучасних ГП значення  $K_f$  відповідає значенням {6, 7, 8, 9} [3-5, 11].

В якості апаратних витрат на реалізацію пристрою ( $C$ ) можливо обрати, або число еквівалентних вентилів з двома входами, або відповідне їм число транзисторів для пристроїв реалізованих у вигляді великих інтегральних схем (ВІС) або надвеликих інтегральних схем (НВІС), а для пристроїв на дискретних компонентах - число еквівалентних вентилів з двома входами [2, 3, 10, 11].

З урахуванням (3) вираз (2) приймає вигляд (4):

$$Q_r = \frac{P_s \cdot (N_d + N_c) \cdot K_f}{C}. \quad (4)$$

Зміст критерія  $Q_r$  (4) полягає в оцінці середньої продуктивності пристрою в пікселях за секунду, що припадає на один транзистор (вентиль) пристрою при побудові у ДКПВ, кожний з вимірів якого становить  $N_d$  біт, з кількістю біт на кожному зі складових кольору  $N_c$  і складністю виведених графічних примітивів  $K_f$ .

Далі орієнтуємося на одночасне збільшення параметра  $P_s$  і зменшення параметра  $C$ , тобто на досягнення максимально можливої швидкодії ГП при реалізації його з мінімально можливими апаратними витратами, з огляду на функціональні можливості ГП у відповідному ДКПВ.

Критерій (4) використовується для одержання узагальненого критерію ефективності, що дозволяє визначити відносний ступінь ефективності ГП, що порівнюються [7]:

$$E = \frac{Q_r}{Q_o}, \quad (5)$$

де  $Q_r$  - інформаційно-апаратний критерій ефективності (4) даного ГП;

$Q_o$  - узагальнена "потенційна" характеристика ідеального пристрою ГП за критерієм (4).

$Q_o$  відповідає задоволенню максимальних вимог по відтворенню графічної інформації у ДКПВ. Вираз для  $Q_o$  має вигляд [2, 3]:

$$Q_o = \frac{P_{s \max} \cdot (N_{d \max} + N_{c \max}) \cdot K_{f \max}}{C_{\min}}, \quad (6)$$

де:  $P_{s \max}$  - максимальна продуктивність пристрою, що відповідає найкращому випадку відтворення інформації у ДКПВ [Д1];

$N_{d \max}$  - максимальна розрядність одного із вимірів ДКПВ, що задовільняє поставленим завданням;

$N_{c \max}$  - максимальна розрядність однієї із трьох складових кольору, що задовільняє завданню;

$K_{f \max}$  - коефіцієнт максимальної складності виведених динамічних примітивів;

$C_{\min}$  - мінімальні апаратні витрати ідеалізованого пристрою, у [шт. транзисторів], який обирається із існуючих найбільш технологічних графічних ВІС (з метою досягнення необхідної динаміки зображення, величини ДКПВ та колірної роздільної спроможності; кількість кристалів обираються із середнього часу спрацьовування вентиля існуючих найбільш технологічних графічних ВІС і необхідним часом на піксель шляхом розпаралелювання обчислювального процесу на відповідну кількість аналогічних кристалів, що пропорційно збільшує апаратні витрати).

Аналіз параметру  $E$  показує, що характеристики ГП можуть бути поліпшені шляхом збільшення параметра  $P_s$ , а збільшення інших параметрів ( $N_d$ ,  $N_c$ ,  $K_f$  обумовлених специфікою застосування ВІС) впливає на збільшення параметра  $C$ . Збільшити  $P_s$  можна, як за рахунок використання більш швидкодіючої елементної бази, так і за рахунок використання більш

швидкодійних методів реалізації ГП. У свою чергу, використовуючи менш апаратомі методи реалізації ГП, що зменшують  $C$ , можна збільшити ефективність  $Q_r$  або  $E$  уцілому.

### **Вплив функціональності графічних систем на вимоги до процесорів**

Кожний із додатків комп'ютерної графіки накладає свої вимоги на функціональні параметри ГП за: роздільною здатністю ДКПВ; колірною роздільною здатністю; набору примітивів, які використовуються; точністю відтворення зображень за кольором та формою; швидкістю побудови зображень. У процесі синтезу ГП вирішується питання про прийнятний компроміс між вищенаведеними параметрами та витратами на їх реалізацію (програмними і апаратними), що в остаточному підсумку визначає функціональні параметри, реальної системи, яка створюється, та її вартість.

ГС використовуються при розв'язанні багатьох задач [2-5, 12, 13, 18]:

- відображення динамічних ситуацій у реальному масштабі часу при керуванні технологічними процесами, військовими об'єктами;
- відображення результатів та ходу наукових досліджень і експериментів;
- автоматизація проектування технологічних процесів, програмного забезпечення, архітектури, дизайну, проектування великих інтегральних схем, розрахунку топології друкованих плат та ін.;
- статистична обробка даних (побудова гістограм, використання плавних кривих та ін.);
- обробка топографічної й картографічної інформації;
- обробки ділової, економічної та управлінської графічної інформації (кругові, стовпчикові та інші діаграми);
- обробка зображень штучних супутників Землі для вивчення земної поверхні;
- обробка біомедичних зображень (комп'ютерна томографія);

- моделювання реальних об'єктів в архітектурі, різних тренажерах та імітаторах (віртуальна реальність);
- завдання користувача людино-машинного інтерфейсу (меню, піктограми та ін.);
- комп'ютерне кіно, анімація, реклама, ігри (мистецтва).

У якості головних параметрів, за якими доцільно обирати ГП виступають [2, 3, 5, 15]:

- швидкодія, або час на один піксель зображення;
- роздільна здатність ДКПВ у ГС;
- роздільна здатність кольорових складових у ГС;
- апаратні витрати на ГП.

Проведемо оцінку вимог, до ГС з точки зору відтворення графічної інформації на пристрої відображення графічної інформації (ПВГІ) даної ГС за часом побудови одного пікселя.

Необхідна продуктивність ГП по побудові зображення становить [2, 3, 5]:

$$P_O = N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e \quad , \quad (7)$$

де  $N_x$  - роздільна здатність ПВГІ по горизонталі;

$N_y$  - роздільна здатність ПВГІ по вертикалі;

$F_d$  - динамічна частота зображення на екрані;

$K_e$  - коефіцієнт заповнення екрану ГС;

$t_p$  - час обробки одного пікселя;

Реальна продуктивність ПВГІ може бути визначена за наступним співвідношенням

$$P_r = \frac{K_v}{t_p} \quad , \quad (8)$$



де  $K_v$  - коефіцієнт доступу до відеопам'яті за кадр, характеризує ступінь доступності відеопам'яті (як правило, для однопортової відеопам'яті  $K_v = 0,25 \div 0,35$ , для двопортової -  $K_v \approx 0,7$  [2, 3]).

Вираз для обчислення часу, необхідного для обробки одного пікселя (9) [2, 3, 5]:

$$t_p = \frac{K_v}{N_x \cdot N_y \cdot F_d \cdot K_e} \cdot \quad (9)$$

Так, наприклад, деякі варіанти значення  $t_p$ :

1) для перспективних задач активної 3D графіки ( $F_d = 60$  кадрів/с), з виконанням умови повної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ), використання усього ДКПВ (165 Гпікселів) для ПВГІ ( $K_e = 1$ ) -  $t_p \approx 94,1(\phi c)$ ;

2) для повної динаміки ( $F_d = 24$  кадри/с) у режимі реального часу в завданнях комп'ютерної анімації або кінематографії, за умови повної прозорості відеопам'яті ПВГІ ( $K_v = 1$ ) і використання усього ДКПВ для ПВГІ (8192×8192) під зображення ( $K_e = 1$ ) -  $t_p \approx 0,62(нс)$ ;

3) для задач машинобудування без динаміки зображення ( $F_d = 1$ ,  $K_v = 1$  та  $K_e = 0,2$  у просторі 1280×1024) -  $t_p \approx 3,81(мкс)$ .

Проаналізувавши особливості відтворення графічної інформації та усереднюючи вимоги до ГС можливо зробити висновок про те, що достатньо широкий клас задач машинної графіки може бути вирішений у ГС з розмірами ДКПВ від 1280×1024 пікселів до 8192×8192 пікселів з кольоровою роздільністю по 24 кольоровим площинам (по 8 двійкових розрядів на кожному складову кольору - R, G, B) і частотою відновлення усього зображення від 4 до 30 кадрів за секунду, а для перспективних задач активної 3D графіки - до 60 кадрів за секунду на ДКПВ розмірністю у 165 Гпікселів з кольоровою роздільністю по 48 кольоровим площинам (по 16 розрядів на R, G, B) [5].

## Приклад оцінки ефективності графічних процесорів

Ринок графічних процесорів поділяють між собою такі виробники, як AMD, Intel, NVIDIA, SiS, VIA, причому, частка у 80% належить AMD та Nvidia, які володіють також 98% ринку дискретних відеокарт з безперечним лідерством Nvidia [3, 6, 16].

Відома діаграма параметрів процесорів (графічних і універсальних) та вимог до засобів машинної графіки [3]. За її допомогою виходячі із області застосування кожної конкретної ГС можна визначити параметри  $N_x \cdot N_y$  та  $F_d$ . Після цього, в залежності від доступу до відеопам'яті обирається значення  $K_v$ . Потім підібрати ГП, який буде задовільняти за параметрами вимогам вхідної задачі.

Для подальшої оцінки ефективності ГП визначимо  $Q_o$  (6). Дані для кожного із прикладів ГС узяті з відповідних сайтів виробників [3, 9, 21, 22, 23]. Параметри таких графічних процесорів та ВІС, як ГВ, ЦФГП1 та ЦФГП2 узяті з [2]. У якості абстрактного ідеалізованого процесора обрано ГП, який буде складатися з 32-х процесорів AMD RV790 [14, 21], що забезпечить необхідну швидкодію  $t_p \approx 94,1(\text{фс})$ , значення компонентів (6) такі:

$$P_{s \max} = 165 \times 2^{30} \times 60 \text{ [пікселів/с]; } N_{d \max} = 13 \times 2^{15}; N_{c \max} = 16;$$

$$K_{f \max} = 10; C_{\min} = 32 \text{ [млрд.тр.]}$$

Таким чином:  $Q_o = 1\,415\,124\,615$  [пікселів/(с·тр.)].

Відома таблиця прикладу значень параметрів ефективності для деяких ВІС ГП [2a] (табл.1).

Зміст скорочень у табл.1 такий:

ГВ - ВІС генератора векторів КА1515 ХМІ-107 [2, 10, 11];

ЦФГП1 - ГП для лінійної інтерполяції [2, 10, 11];

ЦФГП2 - ГП на ВІС БМК [2, 10, 11].

RV790 – ГП AMD [14, 21]

GTX 275 – ГП Nvidia [14, 16, 23]

Таблиця 1. Приклад значень параметрів ефективності графічних процесорів

Графічний процесор	$P_s$ , пікселів/с	$N_x$	$N_y$	$K_f$	$C$ , тр.	$Q_r$ , пікселів/(с·тр.)	$E$
Ідеальний ГП	$165 \times 2^{30} \times 60$	425 984	16	10	32 млрд.	1 415 124 615	1,00000000
ГВ	1 700 000	12	0	1	12 800	1 594	0,00000113
ЦФГП1	7 000 000	12	0	1	27 984	3 002	0,00000212
ЦФГП2	5 000 000	16	0	2	12800×2	6 250	0,00000442
RV790	666 666 666 667	34 133	16	9	959 млн.	213 653 806	0,1509788
GTX 275	333 333 333 333	12 600	16	9	1,4 млрд.	27 034 286	0,0191038

Порівняння даних ГП по ефективності  $Q_r$  та  $E$  (табл. 1) показує ефективність використання ГП AMD RV790.

Крім того існують поради по ефективній комбінації універсальних центральних процесорів із спеціалізованими ГП, наприклад, Intel DX58SO або Core i7 XE та GeForce GTX 295 [9].

### Висновки

Оскільки ринок графічних процесорів стрімко розвивається та залежить не тільки від технічних, але й від маркетингових причин, робити вибір, або порівняння ГП для графічних систем треба за деякими усередненими критеріями ефективності. Запропоновано інформаційно-апаратурний критерій ефективності (4), який є оцінкою середньої продуктивності пристрою в пікселях за секунду, що припадає на один транзистор (вентиль) пристрою при побудові у ДКПВ, кожний з вимірів якого становить відповідну кількість біт, з визначеною кількістю біт на кожну із складових кольору та заданою складністю виведення графічних примітивів. Також запропоновано безрозмірний узагальнений критерій ефективності (5), який дозволяє зробити

відносно порівняння ГП. Наведено приклади визначення параметрів ефективності ГП і діаграма параметрів процесорів та вимог до засобів машинної графіки.

### Література

1. Вентцель Е.С. Исследование операций / Вентцель Е.С. - М.: Сов.радио, 1972.- 552 с.
2. Денисюк В.А. Исследование и разработка цифровых функциональных генераторов графических примитивов для устройств отображения информации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.08 / Денисюк Валерий Александрович.- Винница.-1996.-202 с.
3. Денисюк В.О. Вибір процесору для графічної системи/ Денисюк В.О., Цвілюк А.О., Чех О.І.// Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”.- Хмельницький, 2009. - № 2 – С. 146-152.
4. Денисюк В.О., Боднар А.В., Ліщинський О.В. Аналіз етапів графічного конвеєру. Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”.- Хмельницький, 2009. - № 2 – С. 230-235.
5. Денисюк В.О. Дослідження вимог до пристроїв відображення графічної інформації з погляду людино-машинного інтерфейсу / Денисюк В.О., Денисюк А.В., Терешко В.О. // Міжнародний науково-технічний журнал “Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”.- Хмельницький, 2008. - № 2 - С. 116-121.
6. Интегрированные графические процессоры исчезнут к 2012 году, утверждают аналитики/ Журнал iXBT. Апрель, #4(78)/2009 [Электронный ресурс] . - Режим доступа: <http://rose.ixbt.com/cgi-bin/>
7. Кузьмин И.В. Оценка эффективности и оптимизация автоматических систем контроля и управления.- М.: Сов.радио, 1971.- 296 с.

8. Моисеев В.С. Системное проектирование преобразователей информации / Моисеев В.С. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982.- 255 с.
9. Набережный А. GeForce GTX 285 и GeForce GTX 295 как ни крути ... [Электронный ресурс].- Режим доступа: <http://www.osp.ru/pcworld/list/2009/02.html>
10. Петух А.М. Інтерполяція в задачах контурного формоутворення [Монографія] / Петух А.М., Обідник Д.Т., Романюк О.Н. - Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.- 103 с.- ISBN 978-966-641-223-5.
11. Петух А. М. Швидкодійні цифрові функціональні генератори графічних примітивів : монографія / А. М. Петух, В. О. Денисюк, Д. Т. Обідник. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 148 с. ISBN 978-966-641-343-0.
12. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики / Роджерс Д.; пер. с англ.- М.: Мир, 1989.- 512 с.- ISBN 5-03-000476-9.
13. Роджерс Д. Математические основы машинной графики / Роджерс Д., Адаме Дж.; пер. с англ. — М.: Мир, 2001. — 604 с. ISBN 5-03-002143-4.
14. Самый мощный однопроцессорный 3D-ускоритель от AMD: ATI Radeon HD 4890 1024MB. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ixbt.com/video3/rv790.shtml#p1>
15. Технология визуализации в компьютерном синтезе реалистичных изображений/ [Палташев Т.Т., Климина СМ., Лях А.С., Ю Вл.К.] // Зарубежная радиоэлектроника.- 1991.- № 6- С. 71, 96-108.
16. Универсальный чип. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://lenta.ru/articles/2008/08/05/larrabee/>
17. Филинюк Н.А. Критерий эффективности информационных устройств преобразования и управления / Филинюк Н.А. // Приборостроение.- 1984.- № 3- С. 3-8.
18. Херн Д. Компьютерная графика и стандарт OpenGL / Д. Херн , М. Бейкер; пер. с англ. — М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. — 1168 с. - ISBN 5-8459-0772-1.

19. Termblay C. Mathematics for Game Developer / Christopher Termblay. - Course Technology PTR, 2004. - 648 p. - ISBN 159200038X.
20. aka GTS 240” vs. GTX 285 или “вперед бацьки в пекло!” [Электронный ресурс] . - Режим доступа: <http://people.overclockers.ru/MSport/record5>
21. AMD Product Information. [Electronic resource] , - Mode of access: <http://www.amd.com/us-en/Processors/ProductInformation/>
22. Intel Processors. [Electronic resource] , - Mode of access: <http://ark.intel.com/Default.aspx>
23. Nvidia Tesla. GPU Computing Technical Brief [Electronic resource] / Nvidia, 2007.- v.1.0.0 - Mode of access: [http:// www.nvidia.com](http://www.nvidia.com).