



УКРАЇНА

(19) UA (11) 71489 (13) A

(51) 7 G06T15/50

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВИНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ДЗЕРКАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ КОЛЬОРУ

1

(21) 20031213276

(22) 31.12.2003

(24) 15.11.2004

(46) 15.11.2004, Бюл. № 11, 2004 р.

(72) Романюк Олександр Никифорович, Чорний
Анатолій Вікторович(73) ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

(57) 1. Пристрій для визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору, який включає перший, другий, третій і четвертий реєстри, мультиплексор, суматор, блок постійної пам'яті, блок множення, вихід якого підключений до інформаційного виходу пристрою, а перший і другий входи з'єднані відповідно з виходом першого реєстра і виходом блока постійної пам'яті, вихід другого реєстра підключений до другого входу суматора, вихід якого з'єднаний з першим інформаційним входом мультиплексора, вихід якого підключений до інформаційного входу четвертого реєстра, а другий інформаційний вхід - до виходу третього реєстра, другий вхід суматора з'єднаний з виходом четвертого реєстра, який **відрізняється** тим, що в нього введені п'ятий реєстр, лічильник, дешифратор, другий блок постійної пам'яті, другий блок множення та блок керування, перший вихід якого з'єднаний з входом лічби лічильника, вихід переносу якого підключений до третього входу блока керування, другий вихід якого з'єднаний з керуючим входом мультиплексора, а третій вихід - з входом запису в четвертий реєстр, вихід якого з'єднаний з першим входом другого блока множення, другий вхід якого підключений до виходу другого блока постійної пам'яті, інформаційний вхід якого підключений до виходу п'ятого реєстра і входу дешифратора, перший, другий, третій та четвертий виходи якого з'єднані відповідно з найстаршим та трьома наступними розрядами адресного входу першого блока постійної пам'яті, вихід другого блока множення з'єднаний з інформаційним входом першого блока постійної пам'яті, перший, другий, третій, четвертий та п'ятий інформаційні вхо-

2

ди пристрою підключені відповідно до інформаційних входів першого, другого, третього, п'ятого реєстрів та лічильника, перший, другий, третій та четвертий входи запису в пристрій підключені відповідно до входів запису в перший, другий, третій та п'ятий реєстри, п'ятий вхід запису в реєстр з'єднаний з входом запису в лічильник, вхід початкового установлення та вхід "Пуск" з'єднані відповідно з першим та другими входами блока керування, четвертий та п'ятий виходи якого підключені до виходу "Кінець" і виходу ознаки достовірності даних.

2. Пристрій за п. 1, який **відрізняється** тим, що блок керування містить перший елемент I, перший, другий, третій і четвертий D-тригери, генератор імпульсів, другий елемент I, інвертор, елемент I-NI, перший вхід блока керування підключений до першого входу першого елемента I, другий вхід якого зв'язаний з третім входом блока керування, вихід першого елемента I підключений до входів обнулення першого та четвертого з D-тригерів та до входу обнулення другого D-тригера, другий вхід блока керування зв'язаний з входом синхронізації першого D-тригера, вихід якого підключений до інформаційного входу другого D-тригера та четвертого виходу блока керування, перший вихід генератора імпульсів зв'язаний з другим входом елемента I-NI та входом синхронізації другого D-тригера, вихід якого підключений до першого входу другого елемента I і до інформаційного входу та входу скидання третього D-тригера, другий вхід генератора імпульсів підключений до другого входу другого елемента I, вихід якого зв'язаний з входом інвертора, входом синхронізації четвертого D-тригера, з п'ятим та третім виходами блока керування, вихід інвертора зв'язаний з входом синхронізації третього D-тригера, вихід якого підключений до другого виходу блока керування; вихід четвертого D-тригера зв'язаний з першим входом елемента I-NI, вихід якого підключений до першого виходу блока керування.

(13) A

(11) 71489

(19) UA

Винахід відноситься до автоматики та обчислювальної техніки і призначений для використання в системах формування реалістичних зображень.

Відомий пристрій для визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору, який містить перший та другий суматори, перший-четвертий блоки множення, зсувний регістр, лічильник, схему порівняння, мультиплексор (патент №5739820 США, МПК6 G06T15/50, 1998, фіг.7C, 7D).

Недолік пристрою полягає в низькій точності формування інтенсивності дзеркальної складової кольору.

Найбільш близьким до технічного рішення, що заявляється, є пристрій для визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору, який включає перший, другий, третій і четвертий регістри, суматор, мультиплексор, блок постійної пам'яті, блок множення, вихід якого підключений до інформаційного виходу пристрою, а перший і другий входи з'єднані відповідно з виходом першого регістра і виходом блоку постійної пам'яті, вихід другого регістра підключений до другого входу суматора, вихід якого підключений до першого інформаційного входу мультиплексора, керуючий вхід якого з'єднаний з першим керуючим входом пристрою, вихід мультиплексора підключений до інформаційного входу четвертого регістра, а другий інформаційний вхід до виходу третього регістра, другий керуючий вхід пристрою з'єднаний з керуючим входом четвертого регістра, вихід якого підключений до входу блоку постійної пам'яті та першим входом суматора (Abbas A. M., Szirmay-Kalos L., Horvath T. Hardware Implementation of Phong Shading using Spherical Interpolation // Periodica polytechnica. -Vol.44. -Nos 3-4, 2000.).

Недолік пристрою полягає в низькій точності визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору.

В основу винаходу поставлена задача створення пристрою для формування інтенсивності дзеркальної складової кольору, в якому за рахунок використання не однієї, а чотирьох двонаправлених дистрибутивних функцій (BRDF), введення нових елементів та зв'язків між ними досягається суттєве підвищення точності визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору.

Поставлена задача вирішується тим, що в пристрій для визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору, який включає перший, другий, третій і четвертий регістри, мультиплексор, суматор, блок постійної пам'яті, блок множення, вихід якого підключений до інформаційного виходу пристрою, а перший і другий входи з'єднані відповідно з виходом першого регістра і виходом блоку постійної пам'яті, вихід другого регістра з'єднаний з другим входом суматора, вихід якого підключений до першого інформаційного входу мультиплексора, вихід якого підключений до інформаційного входу четвертого регістра, а другий інформаційний вхід - до виходу третього регістра, другий вхід суматора з'єднаний з виходом четвертого регістра введені п'ятий регістр, лічильник, дешифратор, другий блок постійної пам'яті, другий блок множення та блок керування, перший вихід якого з'єднаний з входом лічби лічильника, вихід переносу

якого підключений з третім входом блоку керування, другий вихід якого з'єднаний з керуючим входом мультиплексора, а третій вихід - з входом запису в четвертий регістр, вихід якого з'єднаний з першим входом другого блоку множення, другий вхід якого підключений до виходу другого блоку постійної пам'яті, інформаційний вхід якого підключений до виходу п'ятого регістра і входу дешифратора, перший, другий, третій та четвертий виходи якого з'єднані відповідно з найстаршим та трьома наступними розрядами адресного входу першого блоку постійної пам'яті, вихід другого блоку множення з'єднаний з інформаційним входом першого блоку постійної пам'яті, перший, другий, третій, четвертий та п'ятий інформаційні входи пристрою підключені відповідно з інформаційними входами першого, другого, третього, п'ятого регістрів та лічильника, перший, другий, третій та четвертий входи запису в пристрій підключені відповідно до входів запису в перший, другий, третій та п'ятий регістри, п'ятий вхід запису в регістр з'єднаний з входом запису в лічильник, вхід початкового установлення та вхід "Пуск" з'єднані відповідно з першим та другими входами блоку керування, четвертий та п'ятий виходи якого підключені до виходу "Кінець" і виходу ознаки достовірності даних.

На фіг.1 зображена структурна схема пристрою;

на фіг.2 - принципова електрична схема блоку керування;

на фіг.3 представлено модель освітлення Бліна;

на фіг.4 - представлена інтерполяція векторів нормалей та серединних векторів в рядку растерізації;

на фіг.5 представлений графік залежності максимальної відносної похибки апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^2 a \delta$ від коефіцієнта спекулярності n ;

на фіг.6 представлена структурна схема пристрою-прототипу;

на фіг.7 представлений графік формування зон відблиску;

на фіг.8 - таблиця, в якій наведені діапазони зміни коефіцієнта спекулярності для забезпечення заданої точності апроксимації;

на фіг.9 представлений графік залежності відносної похибки апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією

$\cos^k \sqrt{\frac{n}{k}} \delta$ від коефіцієнта спекулярності n ;

на фіг.10 наведена таблиця відповідності BRDF значенням коефіцієнту спекулярності n ;

на фіг.11 приведена часова діаграма роботи блоку керування;

на фіг.12 зображені пікселі рядка растерізації;

на фіг.13 приведений варіант реалізації дешифратора 10;

на фіг.14 приведена таблиця карти прошивки блоку 9 постійної пам'яті;

на фіг.15 приведені функціональні зображення блоку 12 постійної пам'яті;

на фіг.16 приведено зображення, яке було сформоване при моделюванні роботи пристрою.

Пристрій для визначення інтенсивності дифузної складової кольору (фіг.1) включає перший регістр 1, другий регістр 2, третій регістр 3, п'ятий регістр 4, лічильник 5, суматор 6, мультиплексор 7, четвертий регістр 8, другий блок 9 постійної пам'яті, дешифратор 10, другий блок 11 множення, перший блок 12 постійної пам'яті, перший блок 13 множення, блок 14 керування. Пристрій має входи 15÷26, виходи 27, 28, 29. Перший 15, другий 17, третій 19 і четвертий 21 інформаційні входи пристрою з'єднані відповідно з інформаційними входами першого 1, другого 2, третього 3, п'ятого 4 регістрів. П'ятий 23 інформаційний вхід пристрою з'єднаний з інформаційним входом лічильника 5. Перший 16, другий 18, третій 20, четвертий 22 та п'ятий 24 входи запису в пристрій з'єднані відповідно з входами запису в перший, другий, третій, п'ятий регістри і в лічильник 5. Вхід 25 початкової установки пристрою з'єднаний з першим входом блоку 14 керування. Вхід 26 "Пуск" пристрою з'єднаний з другим входом блоку 14 керування. Четвертий і п'ятий виходи блоку 14 керування з'єднані відповідно з виходом 28 "Кінець" і виходом 29 ознаки достовірності даних. Вихід першого блоку 13 множення з'єднаний з інформаційним виходом 27 пристрою. Вихід регістру 1 з'єднаний з першим входом блоку 13 множення, другий вхід якого підключений до виходу першого блоку 12 постійної пам'яті. Перший 30, другий 31, третій 32, четвертий 33 виходи дешифратора 10 з'єднані з відповідними старшими розрядами адресних входів блоку 12 постійної пам'яті, причому вихід 30 відповідає старшому розряду адресного входу блоку 12. Перший вхід другого блоку 11 множення з'єднаний з виходом четвертого регістра 8 та першим входом суматора 6, вихід якого підключений до першого інформаційного входу мультиплексора 7. Виходи регістрів 2 та 3 з'єднані відповідно з другим входом суматора 6 та другим інформаційним входом мультиплексора 7, вихід якого підключений до інформаційного входу регістра 8. Вхід запису в регістр 8 з'єднаний з третім 37 виходом блоку 14 керування. Керуючий вхід мультиплексора 7 підключений до другого 36 виходу блоку 14 керування. Вихід регістра 4 з'єднаний з молодшими розрядами адресного входу блоку 9 постійної пам'яті та входом дешифратора 10. Вихід блоку 9 постійної пам'яті підключений до другого входу блоку 11 множення. Вихід переносу лічильника 5 з'єднаний з третім 35 входом блоку 14 керування, перший 34 вихід якого підключений до входу лічби лічильника 5. Вихід блоку 11 множення з'єднаний з молодшими розрядами першого блоку 12 постійної пам'яті.

Блок 14 керування (фіг.2) включає перший елемент 38 I, перший D - тригер 39, генератор імпульсів 40, другий D - тригер 41, другий елемент I 42, третій D - тригер 43, четвертий D - тригер 44, інвертор 45, елемент 46 I-NI.

Перший вхід 25 блоку 14 керування підключений до першого входу першого елемента 38 I, другий вхід якого зв'язаний з третім входом 35 блоку 14 керування. Вихід елемента 38 підключений до входів обнулення першого та четвертого з D - тригерів 39 та 44 та до входу обнулення другого D - тригеру 41. Другий вхід 26 блоку 14 керування

зв'язаний з входом синхронізації першого D - тригеру 39, вихід якого підключений до інформаційного входу другого D - тригеру 41 та четвертого виходу 28 блоку 14 керування. Перший вихід генератора імпульсів 40 зв'язаний з другим входом елемента 46 I-NI та входом синхронізації другого D - тригеру 41, вихід якого підключений до першого входу другого елемента I 42 і до інформаційного входу та входу скидання третього D - тригеру 43. Другий вихід генератора імпульсів 40 підключений до другого входу другого елемента I 42, вихід якого зв'язаний з входом інвертора 45, входом синхронізації четвертого D - тригеру 44, з п'ятим 29 та третім 37 виходами блоку 14 керування. Вихід інвертора 45 зв'язаний з входом синхронізації третього D - тригеру 43, вихід якого підключений до другого виходу 36 блоку 14 керування. Вихід четвертого D - тригеру 44 зв'язаний з першим входом елемента 46 I-NI, вихід якого підключений до першого виходу 34 блоку 14 керування.

Регістр 1 призначений для зберігання параметра C, який поступає від зовнішнього пристрою на вхід 15. В регістрі 3 зберігається значення початкового кута, який відповідає початковому пікселю рядка rasterізації. Значення кута $\zeta(X_{start})$ поступає на вхід 19 пристрою. Регістр 2 пристрою призначений для зберігання приросту кута $\Delta\zeta(X)$, який поступає на вхід 17 пристрою. В регістрі 4 зберігається значення коефіцієнту спекулярності n, який поступає на вхід 21 пристрою. Запис в регістр 1, 2, 3, 4 здійснюється при подачі на відповідні входи запису 16, 18, 20, 22 значення логічної одиниці. Лічильник 5 призначений для визначення закінчення процесу зафарбовування рядка rasterізації, має два керуючих входи - 24, 34. Вхід 24 призначений для запису в лічильник 5. Активний рівень сигналу запису - нульовий. На вхід 34 лічильника 5 поступає імпульсна послідовність для виконання мікрооперації лічби. З кожним переднім фронтом імпульсу, який поступає на вхід 34, лічильник 5 зменшує свій стан на одиницю. На виході 35 лічильника 5 формується сигнал переносу, який має від'ємну полярність. Сигнал переносу формується при переході лічильника 5 з нульового стану в його максимальний стан. Суматор 6, мультиплексор 7, регістр 8 утворюють нагромаджувальний суматор, в якому визначається значення поточного кута. Запис в регістр 8 здійснюється під дією переднього фронту імпульсної послідовності, яка формується на виході 37 блоку 14 керування. Мультиплексор 7 передає на вхід регістра 8 значення операнду або від суматора 6, або від регістра 3. Рівень логічного нуля на керуючому вході мультиплексора 7 забезпечує передачу на його вихід операнду, який зберігається в регістрі 3. Якщо на виході 36 блоку 14 керування формується рівень логічної одиниці, то на вихід мультиплексора 7 передається операнд, який поступає на його перший інформаційний вхід з виходу суматора 6. Дешифратор 10 визначає один із чотирьох діапазонів, до яких відноситься коефіцієнт спекулярності n і, як наслідок, тип двонаправленої дистрибутивної функції, яка відповідає даному діапазону. В блоку 9 постійної пам'яті

зберігаються коефіцієнти $\sqrt{\frac{n}{k}}$ для k=1, 2, 4, 16,

$n=1\div 1000$.

Другий блок 11 множення забезпечує перемноження операндів, які поступають від блоку 9 постійної пам'яті та регістра 8. В першому блоці 12 постійної пам'яті зберігається значення чотирьох косинусів, які використовуються при визначенні інтенсивності дзеркальної складової кольору. Перший блок 13 множення призначений для визначення добутку операндів, які поступають з регістра 1 та блоку 12 постійної пам'яті.

Розглянемо основні теоретичні положення, які використовуються в запропонованому пристрої і в пристрої-прототипі (Abbas A. M., Szirmai-Kalos L., Horvath T. Hardware Implementation of Phong Shading using Spherical Interpolation // Periodica polytechnica. -Vol.44. -Nos 3-4, 2000).

В запропонованому пристрої, як і в пристрої-прототипі, для зафарбовування використовується широко розповсюджена модель освітлення Бліна, згідно з якою інтенсивність дзеркальної складової кольору розраховується по формулі:

$$I = I_s k_s \cos^n \delta \quad (1)$$

де I_s - інтенсивність джерела світла,

k_s - коефіцієнт дзеркального відбиття,

n - коефіцієнт яскравості поверхні, який знаходиться в діапазоні $1\div 1000$,

δ - кут між вектором нормалі \vec{N} до поверхні в заданій точці і серединним вектором \vec{H} , $\cos^n \delta$ - двонаправлена дистрибутивна функція (BRDF), яка відповідає за оптичні характеристики поверхні. На практиці BRDF - це математична формула, що має декілька параметрів, за допомогою яких представляються оптичні характеристики матеріалу, з якого виготовлено об'єкт. Серединний вектор \vec{H} розраховується за формулою

$$\vec{H} = \frac{\vec{L} + \vec{V}}{|\vec{L} + \vec{V}|},$$

де \vec{L} та \vec{V} - одиничні вектори, що визначають відповідно місце розташування джерела світла та спостерігача (фіг.3). Серединний вектор \vec{H} знаходиться шляхом додавання векторів \vec{L} та \vec{V} та нормалізації отриманого вектору.

В пристрої-прототипі для зафарбовування використовується модифікований метод Фонга, в якому для визначення векторів нормалей та серединних векторів використовується не лінійна, а кутова інтерполяція.

В роботі формулу (1) представлено у вигляді

$$I = I_s A^n \cos^n(t\gamma - \lambda) \quad (2)$$

де $A^n \cos^n(t\gamma - \lambda) \approx \cos^n \delta$.

В формулі (2) $t = \frac{X - X_{start}}{X_{end} - X_{start}}$, де X - координата поточного пікселя рядка rasterization, X_{start} ,

X_{end} - координати початкового та кінцевого пікселів рядка rasterization. Параметри A , λ та γ знаходять з системи рівнянь:

$$\begin{cases} A \cos \lambda = \cos \theta_1 \\ A \sin \lambda = \frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1 \cos \gamma}{\sin \gamma} \end{cases}$$

де θ_1 - кут між вектором нормалі \vec{N}_1 та серединним вектором \vec{H}_1 в початковому пікселі рядка rasterization, θ_2 - кут між вектором нормалі \vec{N}_1 в початковому пікселі рядка rasterization та вектором \vec{H}_2 , γ - кут між серединним вектором \vec{H}_1 до початкового пікселя рядка rasterization та вектором \vec{H}_2 (фіг.4)

Вектор \vec{H}_2 розраховується за формулою

$$\vec{H}_2 = \vec{H}_1 - (\vec{N}_1 \times \vec{N}_2) \times \vec{H}_1 + \frac{(\vec{N}_1 \times \vec{N}_2) \times ((\vec{N}_1 \times \vec{N}_2) \times \vec{H}_1)}{1 + (\vec{N}_1 \times \vec{N}_2)}$$

де \vec{H}_2 - серединний вектор в кінцевому пікселі рядка rasterization.

З останньої системи рівнянь знаходять

$$A = \frac{\cos \theta_1}{\cos \left(\arctg \left(\frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1 \cos \gamma}{\cos \theta_1 \sin \gamma} \right) \right)},$$

$$\lambda = \arctg \left(\frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1 \cos \gamma}{\cos \theta_1 \sin \gamma} \right).$$

Для спрощення позначимо $\frac{\cos \theta_2 - \cos \theta_1 \cos \gamma}{\cos \theta_1 \sin \gamma}$

через P . Тоді рівняння для визначення параметрів A та γ перепишуться наступним чином:

$$A = \frac{\cos \theta_1}{\cos(\arctg P)}, \quad \lambda = \arctg P \quad (3)$$

Кут γ розраховується за формулою:

$$\gamma = \arccos(\vec{H}_1 \times \vec{H}_2) \quad (4)$$

Позначимо добуток $I k_s A^n$ в формулі (2) константою C :

$$C = I k_s A^n \quad (5)$$

З урахуванням виразу (5) формула (2) прийме наступний вигляд:

$$I = C \cos^n(t\gamma - \lambda) \quad (6)$$

Базовою фігурою для процедури зафарбовування є трикутник, для вершин якого розраховують напрямки векторів нормалей та серединних векторів. На стадії підготовки здійснюється інтерполяція векторів нормалей та серединних векторів вздовж ребер трикутника, проводиться розрахунок невідомих параметрів C , λ , γ формули (6) для кожного рядка rasterization, з яких складається трикутник.

Пристрій-прототип виконує зафарбовування трикутника шляхом визначення інтенсивностей кольору пікселів вздовж рядків rasterization згідно формули (6).

В пристрої-прототипі функція $\cos^n \delta$ апроксимована функцією $\cos^2 a \delta$:

$$\cos^n \delta \approx \cos^2 a \delta \quad (7)$$

де a - параметр, який залежить від величини коефіцієнта спекулярності поверхні n і знаходиться в циклі підготування до зафарбовування.

З урахуванням формули (7) вираз (6) можна записати у вигляді

$$I = C \cos^2 \xi(a(t\gamma - \lambda)) = C \cos^2 \xi(X),$$

де

$$\xi(X) = a\gamma \frac{X - X_{\text{start}}}{X_{\text{end}} - X_{\text{start}}} - a\lambda = sX + b \quad (8)$$

Для розрахунку аргументу $sX+b$ за формулою (8) застосовується підхід, згідно якого кожне наступне значення кута $\xi(X)$ розраховується з попереднього значення $\xi(X-1)$:

$$\xi(X) = \xi(X-1) + s \quad (9)$$

де

$$s = \frac{a\gamma}{X_{\text{end}} - X_{\text{start}}} \quad (10)$$

Покажемо, що при апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^2 a\delta$ мають місце достатньо великі похибки, що суттєво впливає на якість сформованого зображення. На фіг.5 представлені графіки залежності максимальної відносної похибки апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^2 a\delta$ для різних значень коефіцієнта спекулярності n на інтервалі, на якому формується епіцентр відблиску, до якості відображення якого пред'являються підвищені вимоги по точності. Графіки залежності на фіг.5 отримаю авторами з використанням пакету Mathcad 5.0.

З фіг.5 видно, що максимальна відносна похибка апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^2 a\delta$ більша 10%, що вказує на відносно низьку точність формування відблиску на поверхні.

Структурна схема пристрою-прототипу приведена на фіг.6 (Abbas A. M., Szirmai-Kalos L., Horvath T. Hardware Implementation of Phong Shading using Spherical Interpolation // Periodica polytechnica. -Vol.44. -Nos 3-4, 2000, page 11). В якості пристрою-прототипу використовується не весь пристрій зафарбовування, а тільки та його частина, яка відповідає за дзеркальну складову кольору. На фіг.6 виділена та частина пристрою зафарбовування, яка і відповідає за дзеркальну складову кольору.

Пропонується підвищити точність апроксимації функції $\cos^n \delta$ шляхом її заміни функцією $\cos^k(a\lambda)$. Представимо функцію $\cos^n \delta$ у вигляді $\cos^k(a\lambda)$

$$\cos^n \delta = \cos^k(a\lambda). \quad (11)$$

Розклавши ліву та праву частину виразу (11) в ряд Маклорена та обмежившись першими чотирма членами, отримуємо

$$\begin{aligned} 1 - \frac{1}{2} \cdot n \cdot \lambda^2 + \frac{1}{8} \cdot \lambda^4 \cdot n^2 - \frac{1}{12} \cdot \lambda^4 \cdot n &= \\ = 1 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot a^2 \cdot \lambda^2 + \frac{1}{8} \cdot \lambda^4 \cdot k^2 \cdot a^4 - \frac{1}{12} \cdot \lambda^4 \cdot k \cdot a^4. \end{aligned}$$

Враховуючи, що перші члени лівої та правої частини отриманого рівняння співпадають, то найбільш визначальними в розкладі обох функцій в ряд Маклорена будуть другі члени. Прирівняємо другі члени лівої та правої частини рівняння (3) між собою.

$$1 - \frac{1}{2} \cdot n \cdot \lambda^2 = 1 - \frac{1}{2} \cdot k \cdot a^2 \cdot \lambda^2 \Rightarrow n = k \cdot a^2$$

$$\text{Звідси, } a = \sqrt{\frac{n}{k}}$$

Пропонується апроксимувати функцію $\cos^n \delta$

функцією вигляду $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$, де k - коефіцієнт,

значення якого вибирають в залежності від точності апроксимації.

При зафарбовуванні поверхонь дзеркальна складова інтенсивності кольору забезпечує формування відблиску. Підвищені вимоги до точності визначення інтенсивності кольору пред'являються тільки для епіцентру відблиску, за границями якого необхідно відносно реалістично передати зміну інтенсивності кольору без появи артефактів. На фіг.7 представлений вигляд функції $\cos^n \delta$, де точка перегину розділяє зону епіцентру відблиску від зони затухання.

Нехай задана відносна похибка q апроксимації

функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$

Коефіцієнт k розраховується таким чином, щоб відносна похибка апроксимації функції $\cos^n \delta$

функцією $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ на інтервалі, до якого

пред'являються підвищені вимоги, не перевищувала заданого значення. Розрахунок проводиться для всіх можливих значень коефіцієнта спекулярності n з діапазону від 0 до 1000. Результати розрахунків приведені в таблиці 1 (фіг.8). Дані таблиці 1 були отримані шляхом моделювання в пакеті Mathcad 5.0.

З таблиці видно, що, наприклад, для забезпечення відтворення епіцентру відблиску з максимальною відносною похибкою, яка б не перевищувала 1%, необхідно використати 4 BRDF з $k=1, 2, 3, 9$. Таку ж відносну похибку можна досягти і при $k=1, 2, 4, 16$, які є степенями двійки. Моделювання показало, що в останньому випадку $q \leq 0,6\%$ для всіх $n \geq 6$ для всього діапазону зміни n . Для $n \leq 6$ відносна похибка не перевершує 1%.

Пропонується апроксимувати функцію $\cos^n \delta$

функцією $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ з точністю, яка б не пере-

вищувала 1%. Для цього необхідно використати 4 BRDF (див. фіг.8). Пропонується взяти BRDF з коефіцієнтами $k=1, 2, 4, 16$.

На фіг.9 представлені графіки залежності максимальної відносної похибки апроксимації функції

$\cos^n \delta$ функцією $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ від кута δ для різних

значень коефіцієнта спекулярності n . Для порівняння точності апроксимації запропонованої функ-

ції $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ з точністю апроксимації функцією

$\cos^2 a\delta$, яка була використана в пристрої-прототипі, взяті такі ж самі значення коефіцієнта спекулярності n .

Як видно з фіг.5, 9 при апроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^2 a\delta$ для значень коефіцієнта спекулярності n , з усього діапазону його існування,

максимальна відносна похибка перевищує 10%, а приапроксимації функції $\cos^n \delta$ функцією $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ максимальна відносна похибка не більша 1%.

Процес зафарбовування здійснюється аналогічно до методу, запропонованого в роботі. Різниця полягає в тому, що для апроксимації функції $\cos^n \delta$ використовується не одна функція $\cos^2 a \delta$, а чотири функції $\cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right)$ з різними коефіцієнтами k .

Інтенсивність дзеркальної складової кольору в запропонованому пристрої розраховується згідно формули

$$I = C \cos^k \left(\sqrt{\frac{n}{k}} \delta \right) = C \cos^k \zeta \left(\sqrt{\frac{n}{k}} (t\gamma - \lambda) \right) = C \cos^k \zeta(X)$$

де

$$\zeta(X) = \sqrt{\frac{n}{k}} \gamma \frac{X - X_{\text{start}}}{X_{\text{end}} - X_{\text{start}}} - \sqrt{\frac{n}{k}} \lambda = \sqrt{\frac{n}{k}} (\Delta\zeta(X) \cdot (X - X_{\text{start}}) + (-\lambda)) \quad (12)$$

Невідомі параметри C , γ , λ , розраховуються по формулам 3, 4, 5.

Для розрахунку аргументу $\sqrt{\frac{n}{k}} (\Delta\zeta(X) \cdot (X - X_{\text{start}}) + (-\lambda))$ формули (12) застосовується підхід, згідно якого кожне наступне значення кута $\zeta(X)$ розраховується з попереднього значення $\zeta(X-1)$:

$$\zeta(X) = \sqrt{\frac{n}{k}} (\zeta(X-1) + \Delta\beta\zeta(X)) \quad (13)$$

де

$$\Delta\zeta(X) = \frac{\gamma}{l} \quad (14)$$

В формулі (14) l - довжина рядка rasterізації, яка розраховується наступним чином

$$l = X_{\text{end}} - X_{\text{start}} \quad (15)$$

Згідно формули (12) величина початкового кута $\zeta(X_{\text{start}})$ дорівнює:

$$\zeta(X_{\text{start}}) = \sqrt{\frac{n}{k}} (\Delta\zeta(X) \cdot (X_{\text{start}} - X_{\text{start}}) + (-\lambda)) = -\sqrt{\frac{n}{k}} \lambda \quad (16)$$

Пристрій працює наступним чином.

При включенні пристрою на вхід 25 початкової установки поступає рівень логічного нуля, який забезпечує установку пристрою в режим очікування прийому даних від зовнішнього пристрою.

В роботі пристрою виділяють цикл підготовки та цикл визначення інтенсивностей дзеркальної складової кольору в рядку rasterізації.

В циклі підготування в зовнішньому пристрої визначаються параметри $\zeta(X_{\text{start}})$, C , $\Delta\zeta(X)$, l та n , які заносяться в блоки 1-5 пристрою.

Значення параметрів $\zeta(X_{\text{start}})$, C , $\Delta\zeta(X)$, l визначаються згідно формул (5), (14), (15), (16).

Параметр C поступає на вхід 15 пристрою і записується в регістр 1 активним рівнем сигналу на керуючому вході 16. Значення початкового кута $\zeta(X_{\text{start}})$ заносяться в регістр 3. Для цього на вхід 19 пристрою поступає операнд $\zeta(X_{\text{start}})$, який записується в регістр 3 активним рівнем сигналу на вході

19. На вхід 17 пристрою поступає значення приросту кута $\Delta\zeta(X)$, який запам'ятовується в регістрі 2. Для цього на керуючий вхід 18 пристрою подають активний рівень сигналу. На вхід 21 пристрою поступає значення коефіцієнту спекулярності n , який заносяться в регістр 4 при подачі на керуючий вхід 22 активного рівня сигналу. В лічильник 5 від зовнішнього пристрою поступає операнд, який визначає довжину рядка rasterізації l . Запис в лічильник 5 здійснюється нульовим рівнем сигналу, який поступає на вхід 24 пристрою.

На цьому закінчується цикл підготовки.

Цикл визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору починається з моменту подачі на вхід 26 сигналу "Пуск", який подається після занесення операндів в блоки 1-5 пристрою. Відразу після надходження сигналу "Пуск" на виході 28 пристрою формується рівень логічного нуля, який сигналізує, що пристрій знаходиться в режимі формування інтенсивності дзеркальної складової кольору і не готовий до прийому операндів в блоки 1-5.

В початковий момент часу на виході 36 блоку 14 керування формується рівень логічного нуля, під дією якого через мультиплексор 7 забезпечується передача значення початкового кута з виходу регістру 3 на вхід регістра 8. Під дією переднього фронту сигналу, який поступає з виходу блоку 14 керування на керуючий вхід регістра 8, в останній заносяться значення початкового кута $\zeta(X_{\text{start}})$.

З виходу регістра 4 на вхід дешифратора 10 поступає значення коефіцієнту спекулярності n . На одному з виходів дешифратора формується сигнал, який визначає, яка із чотирьох BRDF буде використовуватися в даний момент часу.

Тип BRDF визначається значенням коефіцієнту спекулярності, який зберігається в регістрі 4. На фіг.10 представлена таблиця 2, в якій приведені види BRDF для різних значень коефіцієнтів спекулярності n та значення сигналів на виході блоку 10.

З блоку 9 постійної пам'яті для заданого значення n і типу BRDF вибирається значення $\sqrt{\frac{n}{k}}$, яке поступає на другий вхід блоку 11 множення. В

блоці 11 множення значення $\sqrt{\frac{n}{k}}$ з виходу блоку 9

перемножується зі значенням початкового кута з виходу регістра 8. Отримане значення добутку поступає на блок 12 постійної пам'яті. На блок 12 постійної пам'яті з виходів 30÷33 дешифратора 10 поступає також сигнал, який вказує, яка BRDF використовується в даний момент часу. На виході блоку 12 постійної пам'яті формується значення BRDF для даного аргументу. В першому блоці 13 множення знаходиться добуток операнду C , який зберігається в регістрі 1, зі значенням BRDF. Отримане значення інтенсивності дзеркальної складової кольору поступає на вихід 27 пристрою. Задній фронт імпульсу на виході 29 блоку 14 керування підтверджує, що на виході блоку 27 сформоване достовірне значення інтенсивності кольору.

Вказані дії стосувалися початкової точки рядка

растерізації.

В подальшому на виході 36 блоку 14 керування формується рівень логічної одиниці, який забезпечує передачу через мультиплексор 7 операнду з виходу суматора 6 на вхід регістра 8. Оскільки на перший вхід суматора 6 з виходу регістра 8 поступає значення початкового кута, а на другий вхід - значення приросту кута $\Delta\zeta(X)$ з виходу регістра 2, то на виході суматора 6 отримують значення $\zeta(X_{\text{start}}) + \Delta\zeta(X)$, тобто наступне значення кута. Під дією переднього фронту імпульсу, який поступає з виходу 37 блоку 14 керування, в регістр 8 записується значення кута для наступної точки рядка rasterізації. Визначення операнду на виході 27 пристрою аналогічне описаному для початкової точки.

В циклі визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору в нагромаджувальному суматорі, який включає суматор 6, мультиплексор 7 та регістр 8, знаходиться сума поточного значення кута по формулі (13), шляхом додавання до місту регістру 8 приросту кута, який зберігається в регістрі 2.

Після видачі операнда на вихід 27 та підтвердження його достовірності (активним фронтом сигналу на виході 29) вміст лічильника 5 зменшується на одиницю. Це здійснюється переднім фронтом сигналу, який поступає з виходу 34 блоку 14 керування. При досягненні лічильником 5 нульового стану на його виході переносу формується імпульс від'ємної полярності, який поступає на вхід 35 блоку 14 керування. Під дією даного сигналу блок 14 керування переходить в початковий стан, а на виході 28 блоку 14 керування формується сигнал нульового рівня, який сигналізує, що пристрій визначив інтенсивності кольору всіх точок рядка rasterізації і готовий до прийому нових операндів наступного рядка rasterізації.

Блок 14 керування працює наступним чином.

Перед роботою пристрою на вхід 25 початкової установки поступає імпульс від'ємної полярності, під дією якого тригери 39, 40, 43, 44 переводяться в нульовий стан.

Після задання всіх необхідних параметрів для роботи пристрою на вхід 26 "Пуск" поступає імпульс, переднім фронтом якого тригер 39 переводиться в одиничний стан. Оскільки вихід тригера 39 з'єднаний з інформаційним входом тригера 41, то останній переводиться в одиничний стан переднім фронтом імпульсу послідовності, яка формується на інверсному виході генератора 40 імпульсів. Вказані дії забезпечують присинхронізований початок роботи пристрою до імпульсної послідовності, яка формується на прямому виході генератора 40 імпульсів. Одиничний стан тригера 41 забезпечує формування на виході другого елемента 1 42 імпульсної послідовності, передній фронт якої забезпечує запис в регістр 8 пристрою, а задній фронт стробує (підтверджує достовірність даних) на виході 27 пристрою.

Одиничний стан тригера 41 розблоковує роботу тригера 43. Як видно з часової діаграми роботи блоку 14 керування (фіг.11) тригер 43 переходить в одиничний стан тільки по задньому фронту імпульсної послідовності, яка формується на виході 37, тобто після формування першого імпульсу на

виході 37. Це забезпечує запис в регістр 8 значення початкового кута $\zeta(X_{\text{start}})$, оскільки на виході 36 формується в даний час рівень логічного нуля, а на виході 37 формується сигнал запису в регістр 8. Переднім фронтом імпульсу послідовності, яка формується на виході елемента 45 I-НІ в одиничний стан переводиться тригер 43, що забезпечує переключення мультиплексору 7 в режим передачі інформації від регістру 2, в якому зберігається приріст кута $\Delta\zeta(X)$. В подальшому під дією імпульсної послідовності на виході 37 блоку 14 керування в регістрі 8 формується поточне значення кута $\zeta(X)$.

Переднім фронтом імпульсної послідовності, яка формується на виході 37 в одиничний стан переводиться тригер 44, що забезпечує формування на виході елемента 46 I-НІ імпульсної послідовності, яка поступає через вихід 34 блоку 14 керування на вхід рахунку лічильника 5. З кожним імпульсом, який формується на виході 34 блоку 14 керування стан лічильника 5 зменшується на одиницю. При досягненні лічильником нульового стану на його виході 35 формується імпульс від'ємної полярності, під дією якого тригери 39, 41 і 44 переводяться в нульовий стан. В нульовий стан перейде і тригер 43, оскільки його R - вхід обнулення підключений до виходу тригера 41.

З моменту переходу в одиничний стан тригера 39 до моменту його обнулення на виході 28 блоку 14 керування формується додатний імпульс, який сигналізує, що пристрій знаходиться в стані визначення інтенсивності дзеркальної складової кольору. Рівень логічного нуля на виході 28 блоку 14 керування сигналізує про те, що пристрій готовий прийняти значення нових параметрів для подальшої роботи.

Слід відмітити, що блок 14 керування синтезований таким чином, щоб забезпечити видачу на вихід 27 пристрою інтенсивності дзеркальної складової кольору як початкової точки в рядку rasterізації, так і всіх точок, які лежать за нею.

На фіг.12 показаний рядок rasterізації трикутника. Із фіг.12 видно, що рядок rasterізації включає три проміжки, які лежать між чотирма точками, тобто необхідно видати значення інтенсивностей кольору чотирьох точок. В цьому випадку в лічильник 5 заноситься кількість проміжків, тобто значення 3. На фіг.11 приведений приклад часової діаграми саме для даного випадку. Як видно з фіг.11 на виході 37 формується чотири імпульси для формування і стробування чотирьох інтенсивностей кольору, причому перший імпульс на виході 37 відповідає за формування початкової точки рядка rasterізації, а три наступних - за інші три точки рядка rasterізації. Під час формування останніх трьох імпульсів на виході 37 на виході 36 присутній рівень логічної одиниці.

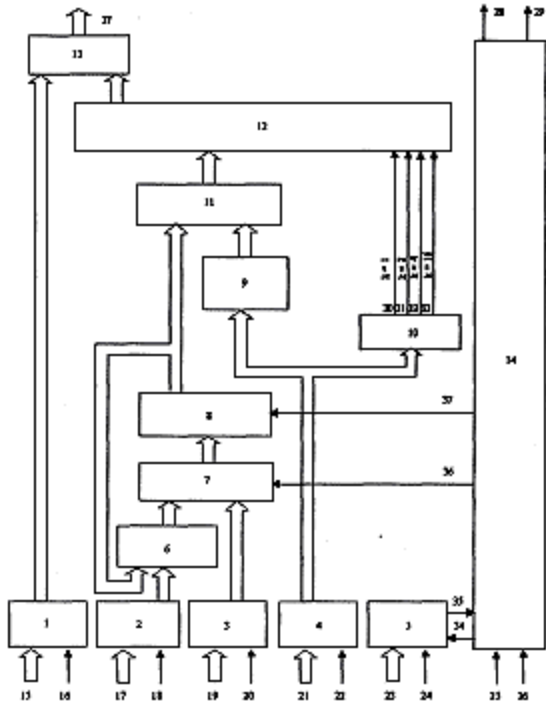
Дешифратор 10 може бути реалізований різними способами. Наприклад, його можна реалізувати у вигляді блоку постійної пам'яті.

На фіг.13 приведений один із можливих варіантів реалізації дешифратора 10. Він включає елементи 47÷52, 54 1, а також елемент 53 АБО. На фіг.13 входи $v1 \div v9$ дешифратора відповідають виходам регістра 4, причому $v1$ - відповідає молодшому розряду. Елемент 47 виділяє значення ко-

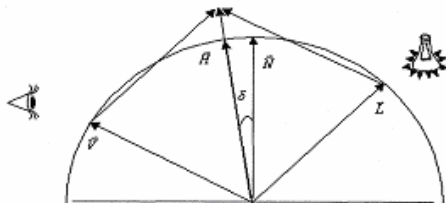
ефіцієнту спекулярності $n=1$, елемент 48 - $n=2$, елементи 49÷53 - $n=3÷6$ (елемент 49 виділяє $n=3$, елемент 50 виділяє $n=4$, елемент 51 виділяє $n=5$, елемент 52 виділяє $n=6$, а елемент 53 АБО об'єднує випадки $n=3÷6$). Елемент 54 I виділяє випадки, коли на виходах елементів 47, 48 та 53 присутні рівні логічного нуля, тобто випадок, коли $n=7÷1000$.

Дешифратор 10 (фіг.13) сигнали на виходи 30÷33, яка визначає який коефіцієнт k ставиться у відповідність коефіцієнту спекулярності n (фіг.10). Оскільки коефіцієнт спекулярності n знаходиться в діапазоні $n=1÷1000$, то дешифратор має 9 входів $v_1÷v_9$ (фіг.13).

В блоку 9 постійної пам'яті зберігається значення $\sqrt{\frac{n}{k}}$. Враховуючи, що для кожного діапазону значень коефіцієнту n ставиться у відповідність свій коефіцієнт k (фіг.8), то кількість комірок блоку 9 буде дорівнювати кількості значень коефіцієнту спекулярності n . Оскільки $n=1÷1000$, то блок 9 постійної пам'яті буде складатись з 1000 комірок. В таблиці 3 (фіг.14) представлені значення величини коефіцієнта спекулярності n , які подаються на вхід



Фіг. 1

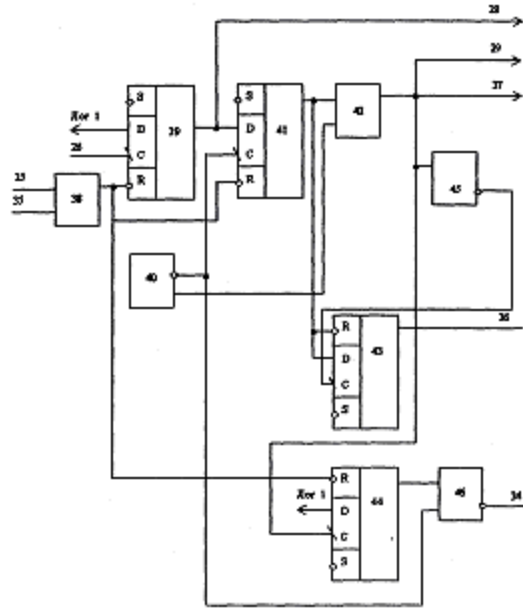


Фіг.3

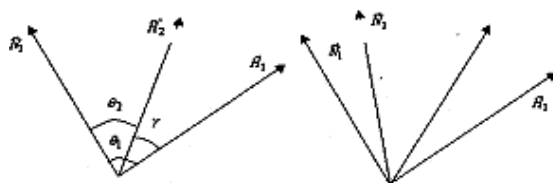
блоку 9 та значення величин $\sqrt{\frac{n}{k}}$, які одержуються на його виході.

Функціональне зображення блоку 12 постійної пам'яті представлено на фіг.15. Старші розряди адресного входу блоку 12 підключені до виходів 30, 31, 32, 33 дешифратора. На вказаних виходах дешифратора в кожний момент часу присутня тільки одна логічна одиниця, яка визначає тип BRDF. Наприклад при значенні логічної одиниці на виході 30 дешифратора 10 використовується функція $\cos(\zeta(X))$, тому по адресних входах $A_1÷A_{n-4}$ блоку 12 заносять значення $\cos(\zeta(X))$. Аналогічно при $A_n, A_{n-1}, A_{n-2}, A_{n-3}=0100$ по адресах $A_1÷A_{n-4}$ в блок 12 заносять значення функції $\cos^2(\zeta(X))$, при $A_n, A_{n-1}, A_{n-2}, A_{n-3}=0010$ по адресах $A_1÷A_{n-4}$ в блок 12 заносять значення функції $\cos^4(\zeta(X))$, при $A_n, A_{n-1}, A_{n-2}, A_{n-3}=0001$ по адресах $A_1÷A_{n-4}$ в блок 12 заносять значення функції $\cos^{16}(\zeta(X))$.

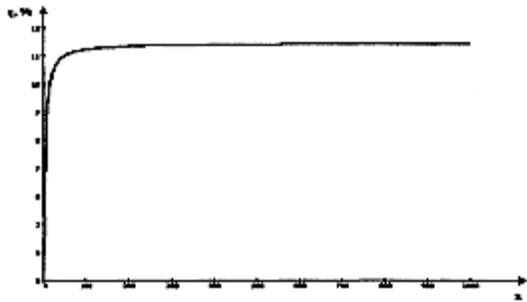
Авторами винаходу було проведено програмне моделювання роботи пристрою. На фіг.16 приведено зображення, яке було сформоване при моделюванні. На фіг.16 чітко виражені відблиски, які надають зображенню високої реалістичності.



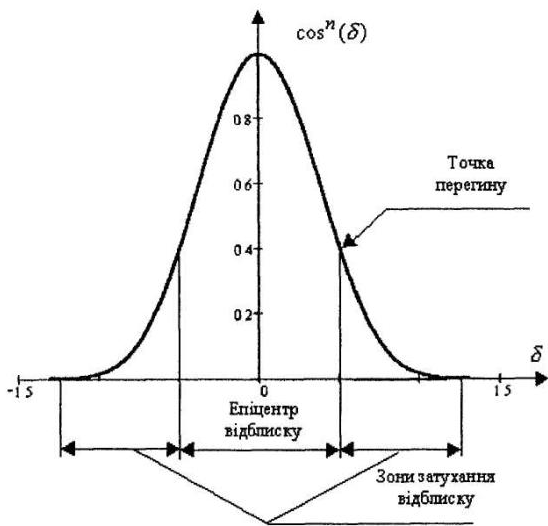
Фіг. 2



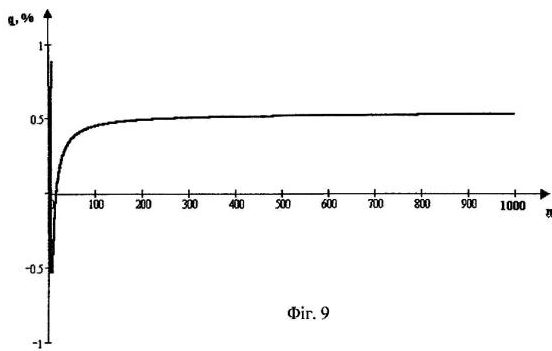
Фіг.4



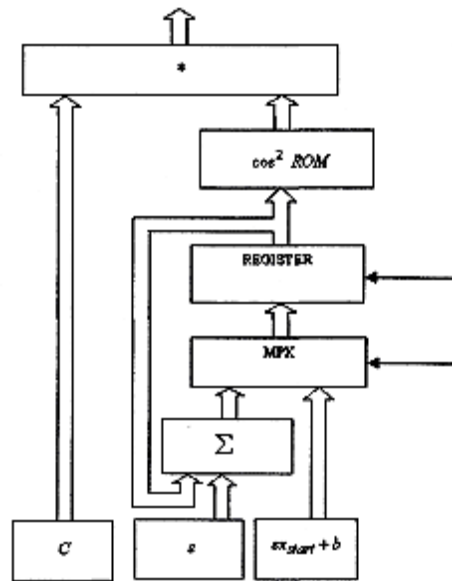
Фиг. 5



Фиг. 7



Фиг. 9



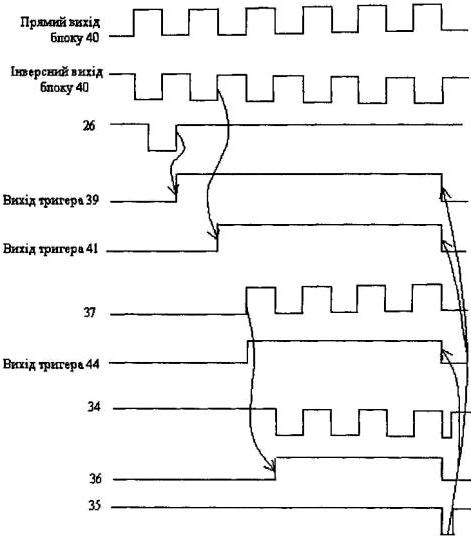
Фиг. 6

Величина відносної похибки q	Діапазон зміни значень коефіцієнта спекулярності n для заданого значення коефіцієнта k									
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7	k=8	k=9-15	k=16
1%	1	2	3±4	3±6	4±10	4±17	5±33	5±105	6±1000	7±1000

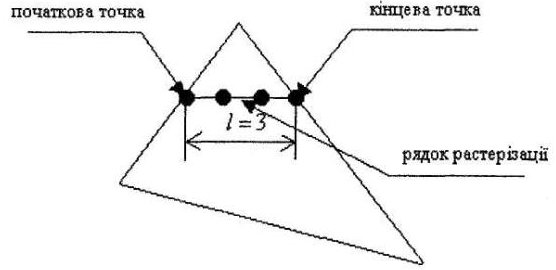
Фиг. 8

Діапазон значень коефіцієнта спекулярності n	Значення двонаправленої дистрибутивної функції (BRDF)	Значення сигналів на виході блоку 10			
		30	31	32	33
1	$\cos(\zeta(X))$	1	0	0	0
2	$\cos^2(\zeta(X))$	0	1	0	0
3-6	$\cos^4(\zeta(X))$	0	0	1	0
7-1000	$\cos^{16}(\zeta(X))$	0	0	0	1

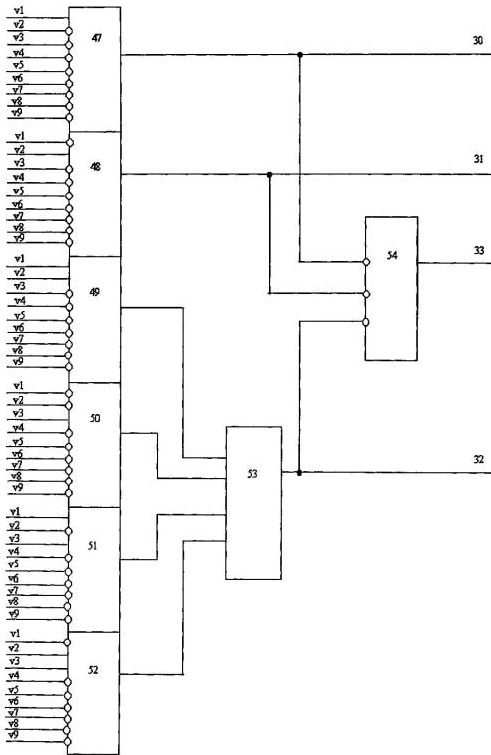
Фиг. 10



Фіг. 11



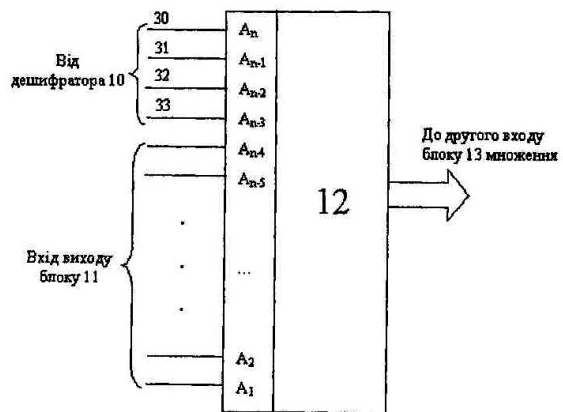
Фіг. 12



Фіг. 13

Значення n	Адресний вхід блоку 9 постійної пам'яті									Значення операнду на виході блоку 9 постійної пам'яті
	V9	V8	V7	V6	V5	V4	V3	V2	V1	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	$\sqrt{n/1} = \sqrt{1/1}$
2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	$\sqrt{n/2} = \sqrt{2/2}$
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	$\sqrt{n/4} = \sqrt{3/4}$
4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	$\sqrt{n/4} = \sqrt{4/4}$
5	0	0	0	0	0	0	1	0	1	$\sqrt{n/4} = \sqrt{5/4}$
6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	$\sqrt{n/4} = \sqrt{6/4}$
7	0	0	0	0	0	0	1	1	1	$\sqrt{n/16}$
.										
.					...					
1000	1	1	1	1	0	1	0	0	0	

Фіг. 14



Фіг. 15



Фіг. 16