

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ТЕОРІЯ КОДУВАННЯ

УДК 004.92

Є. К. Завальнюк, О. Н. Романюк, В. В. Войтко, О. В. Романюк, А. В. Снігур

РОЗРОБКА МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ ШЛІКА ДЛЯ
ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКУЛЯРНОЇ СКЛАДОВОЇ КОЛЬОРУ

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

Анотація. Проаналізовано найпоширеніші дистрибутивні функції відбивної здатності (ДФВЗ), до числа яких відноситься функція Шліка. Ця функція порівняно з ДФВЗ Блінна та Фонга має меншу степінь, що дає можливість її використання у засобах динамічної комп'ютерної графіки. Функція Шліка для обчислення використовує коефіцієнт спекулярності поверхні та косинус кута між вектором нормалі до поверхні і серединним вектором. Недоліком функції є нереалістичне відтворення відблиску у зоні затухання.

З метою реалістичного відтворення як епіцентру відблиску, так і його блумінгу запропоновано нову модифікацію функції Шліка з використанням поправочних коефіцієнтів і степенів. Розроблено програму підбору степенів і коефіцієнтів. Наведено граф-схему програми з детальним описом. Засобами Mathcad 2001 Professional здійснено порівняльний аналіз ДФВЗ Шліка, Блінна та модифікованої функції. Доведено перевагу модифікованої функції порівняно з ДФВЗ Шліка у швидкості падіння в зоні затухання.

Встановлено менше значення відносно похибки апроксимації модифікованої ДФВЗ Шліка на рівні епіцентру відблиску. Побудовано графіки залежностей максимальних відносних й абсолютних похибок апроксимації модифікованої ДФВЗ Шліка порівняно з ДФВЗ Блінна залежно від коефіцієнта спекулярності поверхні. Знайдено аргумент, при якому модифікована ДФВЗ досягає мулевого рівня. Доведено монотонні спадання запропонованої ДФВЗ на проміжку аргументів $[0, \pi/2]$. Для запропонованої ДФВЗ, ДФВЗ Шліка та Блінна розраховано інтервали обчислення спекулярної складової кольору. Граничні значення інтервалів використано при знаходженні відношень розмірів плям відблисків для модифікованої ДФВЗ і ДФВЗ Блінна, Шліка та Блінна. Відношення розмірів плям для ДФВЗ проілюстровані тривимірними графіками. Встановлено, що зона блумінгу для модифікованої ДФВЗ обчислюється на меншому проміжку, ніж для ДФВЗ Шліка. Модифікована ДФВЗ може бути використана в системах високопродуктивного рендерингу та забезпечує підвищену реалістичність формування відблисків порівняно з ДФВЗ Шліка.

Ключові слова ДФВЗ Шліка, ДФВЗ Фонга, ДФВЗ Блінна-Фонга, затухання відблиску, епіцентр відблиску.

Abstract. The most common bidirectional reflectance distribution functions (BRDF), among which the Schlick function is included, were analyzed. Compared to Blinn and Phong's BRDF, this function has a smaller degree, which makes it possible to use it in dynamic computer graphics tools. The Schlick function uses the specular coefficient of the surface and the cosine of the angle between the vector normal to the surface and the median vector for calculation. The disadvantage of the function is the unrealistic reproduction of glare in the attenuation zone. In order to realistically reproduce both the glare epicenter and its blooming, a new modification of the Schlick function using correction coefficients and exponents is proposed. A program for selecting powers and coefficients has been developed. A diagram of the program with a detailed description is given. Mathcad 2001 Professional tools were used to perform a comparative analysis of the Schlick, Blinn BRDFs and modified function. The advantage of the modified function compared to Schlick's BRDF in the fall speed in the attenuation zone is proved. A smaller value of the relative error of approximation of the modified Schlick BRDF at the level of the glare epicenter was proven. Graphs of the dependences of the maximum relative and absolute approximation errors of the modified Schlick's BRDF compared to Blinn's BRDF depending on the specular coefficient of the surface are plotted. An argument was found in which the modified BRDF reaches the sludge level. The monotonic decrease of the proposed BRDF on the interval of arguments $[0, \pi/2]$ is proven. The intervals for calculating the specular color component were calculated for the proposed BRDF, Schlick and Blinn BRDFs. The limit values of the intervals were used when finding the ratio of the size of the glare spots for the modified BRDF and Blinn BRDF, Schlick and Blinn BRDFs. Spot size ratios for BRDFs are illustrated by three-dimensional graphs. It was proven that the blooming zone for the modified BRDF is calculated on a shorter interval than for Schlick's BRDF. The modified BRDF can be used in high-performance rendering systems and provides increased realism in the formation of reflections compared to Schlick's BRDF.

Key words: Schlick BRDF, Phong BRDF, Blinn-Phong BRDF, glow attenuation, glow epicenter.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-55-3-4-12>.

Вступ

При формуванні тривимірних графічних сцен особливу увагу приділяють реалістичності відтворення складових об'єктів. При цьому необхідно точно відтворити як форму і конструкторські особливості, так і візуальні характеристики поверхонь. Важливим для реалістичності є відтворення відблисків, за які відповідає спекулярна складова кольору. При відтворенні відблисків використовуються моделі відбиття на основі двонаправлених функцій. Використання моделей Блінна і Фонга потребує значних обчислювальних витрат, що позначається на швидкості формування графічних сцен. Тому актуальною задачею є розробка нової дистрибутивної функції, яка має меншу обчислювальну складність і з достатньою точністю відтворює як епіцентр відблиску, так і його блумінг.

Аналіз літературних джерел

За оптичні властивості поверхні відповідає двопробенева дистрибутивна функція відбивної здатності ДФВЗ (BRDF – Bidirectional Reflectance Distributive Function). Методи, які використовуються для моделювання освітлення, оперують із розсіяним і відбитим світлом. Відбите світло у своєму складі має дві компоненти: дифузну та спекулярну [1]. Розсіяне (фонове) світло – це світло, яке відбивається від навколишнього середовища, сусідніх об'єктів [2].

При наявності в сцені точкового джерела світла, інтенсивність дифузійного відбиття пропорційна косинусу кута між нормаллю до поверхні й напрямком на джерело світла. У цьому випадку для обчислення інтенсивності дифузійного відбиття застосовують закон косинусів Ламберта [3].

У більшості випадків дистрибутивна функція визначається через скалярний добуток відповідних нормованих векторів. Значно рідше оперують зі значенням кута між векторами, оскільки це передбачає виконання обернених тригонометричних функцій.

Нехай I – інтенсивність джерела світла, \vec{L} , \vec{V} – відповідно вектори до джерела світла та спостерігача, \vec{N} – вектор нормалі до поверхні (рисунок 1).

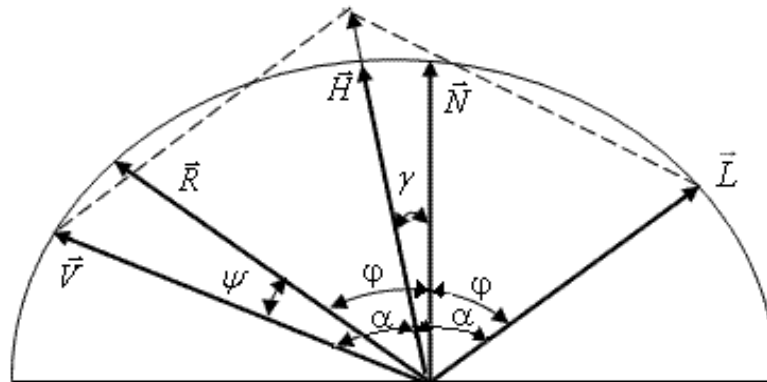


Рисунок 1 – Вектори нормалей до точки поверхні

У комп'ютерній графіці найбільш часто використовують модель визначення спекулярної складової кольору Б. Фонга [3], що має вигляд

$$I_s = I \cdot \cos^n \alpha. \quad (1)$$

У ДФВЗ Фонга $\cos \alpha = \vec{V} \cdot \vec{R}$, де $\vec{R} = 2 \cdot (\vec{L} \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} - \vec{L}$. Вектор \vec{R} називають вектором дзеркального відбиття. У дистрибутивній функції Блінна, яка історично з'явилася пізніше ДФВЗ Фонга, замість $\cos \alpha$ використовують $\cos \gamma = \vec{N} \cdot \vec{H}$, де $\vec{H} = \vec{L} + \vec{V} / |\vec{L} + \vec{V}|$ [4]. Вектор \vec{H} називають серединним, оскільки його напрям співпадає з бісектрисою кута між векторами \vec{L} , \vec{V} .

У комп'ютерній графіці іноді для формування відблисків використовують ДФВЗ Гаусса [3], яка має такий вигляд $e^{-\frac{n \cdot (\angle(\vec{H}, \vec{L}))^2}{2}}$. Така дистрибутивна функція є достатньо точною, реалістично відтворює як зону епіцентру відблиску, так і його затухання (блюмінгу), однак отримала широке поширення тільки для аналізу зображень, оскільки передбачає використання обернених функцій для обчислення кута між векторами нормалей

У сучасних пакетах тривимірної графіки широкого поширення отримала дистрибутивна функція Шліка [1], що обчислюється [5]

$$\cos \gamma / (n - n \cos \gamma + \cos \gamma). \quad (2)$$

ДФВЗ Шліка має значно меншу обчислювальну складність порівняно з функціями Фонга та Блінна. Аналіз функції показав, що за областю епіцентру відблиску спостерігається суттєве розходження з результатами, отриманими згідно з моделлю освітлення Блінна. Суттєвим недоліком ДФВЗ Шліка [3] є те, що дистрибутивна функція в зоні формування блюмінга падає до нульового рівня надзвичайно повільно, що обумовлює неприродне освітлення графічного об'єкта та додаткові обчислення за рахунок збільшення інтервалу зміни аргументу.

Низька степінь функції Шліка обумовлює можливість її використання в засобах динамічної комп'ютерної графіки, але невисока точність відтворення відблисків є перешкодою використання для високореалістичного відтворення графічних сцен.

Тому актуальною задачею є модифікація ДФВЗ Шліка з метою більш реалістичного відтворення відблисків.

Мета статті

Мета статті – розробка модифікованої ДФВЗ Шліка, яка з достатньою точністю відтворює спекулярну складову кольору.

Розробка модифікованої ДФВЗ Шліка

Розглянемо модифікацію ДФВЗ Шліка. Знайдемо нову дистрибутивну функцію відбивної здатності поверхні у вигляді

$$\frac{a_1 \cos(x)^{b_1}}{a_2 (a_3 n^{b_3} - a_4 (n * \cos(x))^{b_4} + a_5 \cos(x)^{b_5})^{b_2}}. \quad (3)$$

Знайдемо невідомі змінні b_n (степені) і a_n (множники).

Оскільки при $x=0$, то $\cos(x)$ дорівнює 1, тому у запропонованій ДФВЗ Шліка $n - n \cos(x) = 0$. Звідси $b_4 = b_3, a_4 = a_3$. З урахуванням останнього, отримуємо такий вигляд запропонованої ДФВЗ

$$\frac{a_1 \cos(x)^{b_1}}{a_2 (a_3 n^{b_3} - a_3 (n * \cos(x))^{b_3} + a_5 \cos(x)^{b_5})^{b_2}}. \quad (4)$$

Позначимо запроповану ДФВЗ як F_{MSH} .

Розроблено програму для підбору коефіцієнтів a_n й степенів b_n , граф-схему якої наведено на рисунку 2.

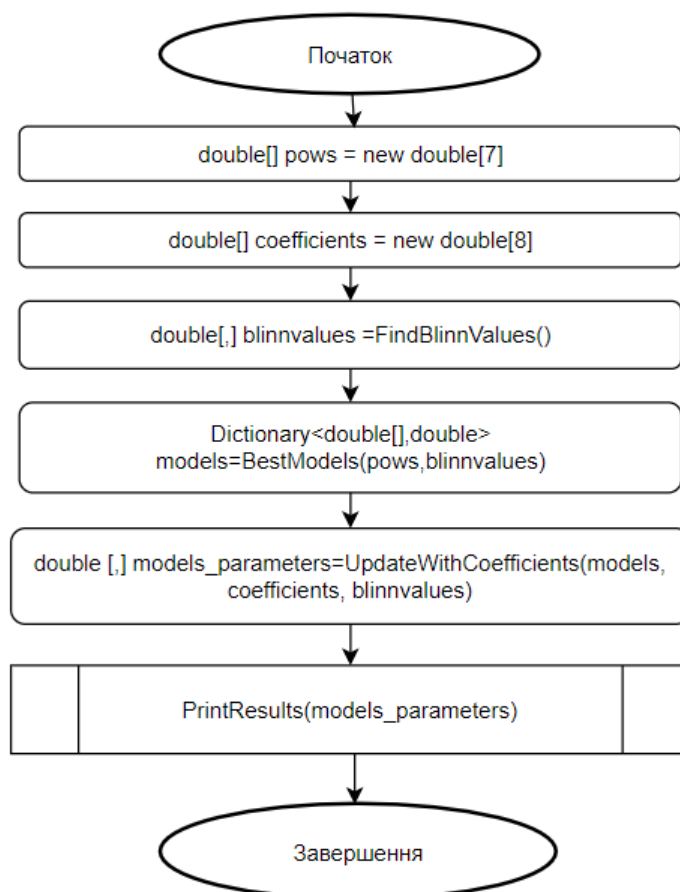


Рисунок 2 – Блок-схема комп'ютерного перебору параметрів F_{MSH}

Для спрощення визначення невідомих в F_{MSH} розділимо процедури підбору коефіцієнтів і степенів. Підберемо степені $b_1 - b_5$. На даному етапі значення коефіцієнтів $a_1 - a_5$ приймемо рівними одиниці.

Враховуючи швидке зростання обчислювальної складності перебору та необхідність низької обчислювальної складності функції, значення масиву можливих степенів $rows$ виберемо з інтервалу $[-3,3]$.

Масив можливих коефіцієнтів $coefficients$ містить значення: 0.25, 0.5, 1, 1.25, 1.5, 2, 2.5, 3.

Далі у подвійному циклі для кутів $[0,90]$ і коефіцієнтів спекулярності поверхні n $[1,1000]$ (всередині методу `FindBlinnValues`) викликається функція обчислення значень ДФВЗ Блінна. Отримані значення формують двовимірний масив `blinnvalues`.

У чотирирівимірному циклі всередині функції `BestModels` (відповідно до 4 невідомих степенів) для n і кутів заповнюється двовимірний масив значень F_{MSH} з випадковими степенями. Обчислюється середнє значення абсолютних відхилень масиву від `blinnvalues`. У циклах формується список п'яти наборів степенів з найменшим середнім абсолютним відхиленням. Список записується у словник `models` (ключ словника – набір степенів, значення – відхилення).

У чотирирівимірному (відповідно до 4 невідомих коефіцієнтів) циклі функції `UpdateWithCoefficients` випадкові набори коефіцієнтів поєднуються зі знайденими п'ятьма наборами степенів. Для кожного набору степенів визначається набір коефіцієнтів, що забезпечує найменше середнє абсолютне відхилення від `blinnvalues`.

Функція повертає двовимірний масив, де рядки представляють інформацію сукупності параметрів F_{MSH} : середнє абсолютне відхилення від ДФВЗ Блінна, п'ять значень степенів, п'ять значень коефіцієнтів. Здійснюється передача результату функції масиву `models_parameters`.

Функція `PrintResults` здійснює виведення інформації про отримані моделі (набори шуканих параметрів).

Проаналізуємо отримані результати (таблиця 1). Найвищу точність має модель 1. Однак модель вимагає 5 піднесень до вищих степенів. Модель 0 є другою за точністю. Для неї необхідно 3 піднесення до вищих степенів. Модель 2 є компромісною за точністю та потребує лише одне піднесення. Тому, враховуючи точність й простоту моделей, обрано модель 2.

Таблиця 1 – Отримані параметри для F_{MSH}

№	Степені					Коефіцієнти					Середнє абсолютне відхилення від ДФВЗ Блінна
	2	2	1	1	2	2	1.25	1	1	1.25	
0	2	2	1	1	2	2	1.25	1	1	1.25	0.0063
1	3	2	1	1	3	2	1.25	1	1	1.25	0.0062
2	1	2	1	1	1	2	1.25	1	1	1.25	0.0066
3	2	2	1	1	3	2	1.25	1	1	1.25	0.0066
4	1	2	1	1	2	2	1.25	1	1	1.25	0.0070

Для розрахунку спекулярної складової найбільш оптимальним є такий вид F_{MSH}

$$\frac{2\cos x}{\left(1 + \frac{1}{4}\right) \left(n - n * \cos x + \left(1 + \frac{1}{4}\right) \cos x\right)^2} \cdot \quad (5)$$

Проаналізуємо запроповану ДФВЗ. Позначимо ДФВЗ Шліка як F_{SH} , ДФВЗ Блінна як F_B .

На рисунку 3 зображено графіки F_{MSH} , F_{SH} , F_B . З наведених графіків видно, що запропонована F_{MSH} забезпечує краще відтворення блюмінгу відблиску порівняно з F_{SH} , що дає можливість усунути її суттєвий недолік – неприродне відтворення зони затухання відблиску та надлишкові обчислення.

Порівняємо максимальні відносні похибки F_{MSH} і F_{SH} (δ_{msh} , δ_{sh} відповідно) при апроксимації F_B у точці, де значення $F_B = 0.3$. Цей рівень відповідає за епіцентр відблиску.

Знайдемо абсцису цієї точки (x_{ep}) для еталонної функції F_B , яка дорівнює :

$$a \cos\left(\exp\left(\frac{-1.2}{n}\right)\right). \quad (6)$$

При n з проміжку $[2, 1000]$ δ_{msh} суттєво менше δ_{sh} (не більше 16% проти не більше 52%) (рисунки 3, 4).

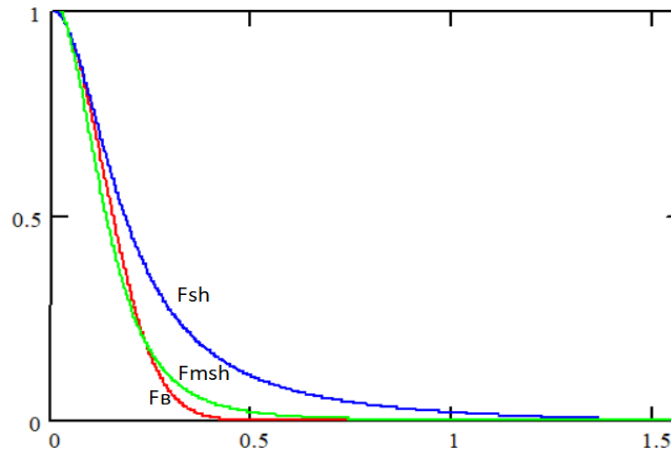


Рисунок 3 – Графіки F_{MSh} , F_{Sh} , F_B ($n=60$)

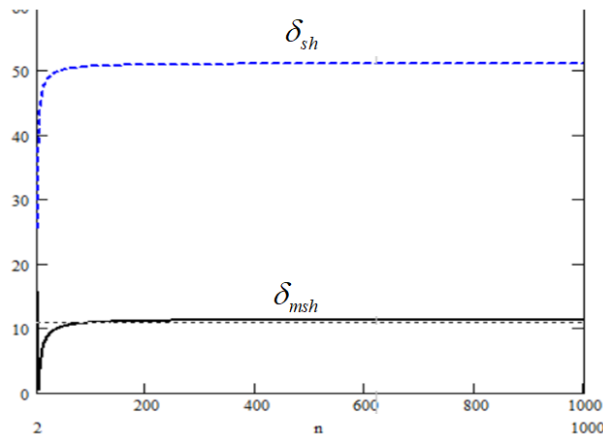


Рисунок 4 – δ_{msh} та δ_{sh} у точці x_{ep}

Формула для обчислення модуля абсолютної похибки при апроксимації F_B має вигляд

$$|F_{apr} - \cos(x)^n|, \tag{7}$$

де F_{apr} – апроксимація F_B .

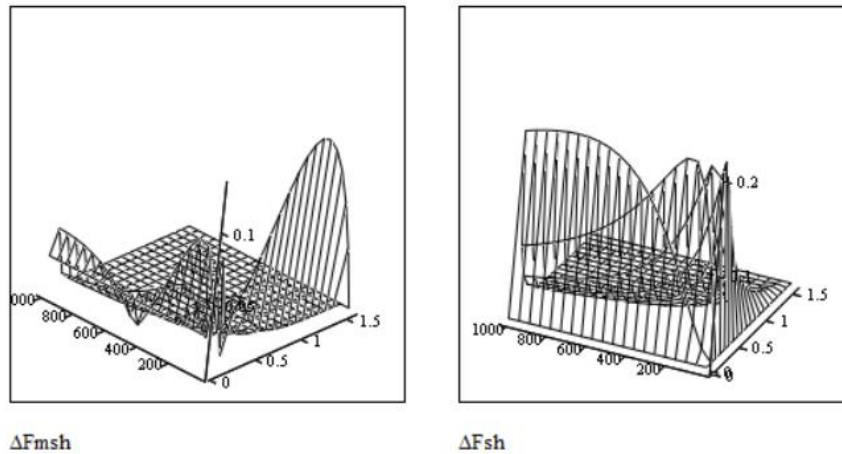
Побудуємо тривимірні графіки (рисунки 5) абсолютних похибок F_{MSh} , F_{Sh} від F_B . ($\Delta_{F_{MSh}}$, $\Delta_{F_{Sh}}$ відповідно) залежно від n і кута.

З графіків встановлюємо, що найбільша $\Delta_{F_{MSh}}$ менша за найбільшу $\Delta_{F_{Sh}}$ приблизно удвічі.

Знайдемо значення аргументів, за яких F_{MSh} досягає нульового значення. Для цього прирівнюємо F_{MSh} до нуля. Знаходимо, що F_{MSh} досягає нуля при $x=1.570796$, що наближено дорівнює $\frac{\pi}{2}$.

Доведемо, що функція F_{MSh} монотонно спадає. Для цього знайдемо похідну, яка дорівнює:

$$\frac{-1.6 * \sin(x)}{(n - n * \cos(x) + 1.25 \cos(x))^2} - \frac{3.2 * \cos(x)}{(n - n * \cos(x) + 1.25 * \cos(x))^3} (n \sin(x) - 1.25 \sin(x)) \tag{8}$$

Рисунок 5 – Графіки $\Delta_{F_{MSH}}$, $\Delta_{F_{SH}}$ відносно n та кута

На рисунку 6 наведено графік зміни похідної від n та кута x.

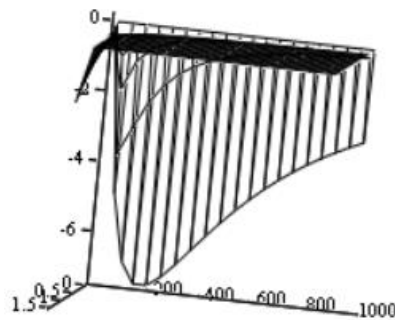


Рисунок 6 – Графік похідної функції

Функція монотонно спадає, оскільки значення її похідної від'ємне.

Обчислимо співвідношення розмірів відблисків F_{MSH} і F_{SH} відносно F_B . Введемо граничне значення 2^{-q} , яке визначає аргумент, за межами якого розрахунок ДФВЗ припиняється.

Спершу запишемо нерівність для F_{SH} , яка визначає інтервал розрахунку аргументу для визначення спекулярної складової кольору.

$$0 \leq \frac{\cos x}{n - n \cos(x) + \cos(x)} \leq 2^{-q}. \quad (9)$$

У результаті розв'язання нерівності отримуємо:

$$0 \leq x \leq a \cos\left(\frac{n}{2^q + n - 1}\right). \quad (10)$$

Аналогічно запишемо нерівність для визначення інтервалу зміни значення для F_{MSH} :

$$0 \leq \frac{2 \cos x}{1.25(n - n \cos(x) + 1.25 \cos(x))^2} \leq 2^{-q}. \quad (11)$$

Знаходимо значення кута x:

$$0 \leq x \leq a \cos \left(\frac{4 \left(16 * 2^q + 20n^2 - 25n - 4 * 2^{q+0.5} (8 + 20 * 2^{-q} n^2 - 25 * 2^{-q} n)^{\frac{1}{2}} \right)}{5(16n^2 - 40n + 25)} \right) \quad (12)$$

Для F_B нерівність має такий вигляд

$$0 \leq \cos(x)^n \leq 2^{-q}. \quad (13)$$

Результатом розв'язку є

$$0 \leq x \leq a \cos \left(2^{\frac{-q}{n}} \right). \quad (14)$$

Обчислимо \mathfrak{R} . Для F_{SH} це значення розраховується так

$$\frac{a \cos \left(\frac{n}{2^q + n - 1} \right)}{a \cos \left(2^{\frac{-q}{n}} \right)} \quad (15)$$

Знайдемо \mathfrak{R} для F_{MSH}

$$\frac{a \cos \left(\frac{4 \left(16 * 2^q + 20n^2 - 25n - 4 * 2^{q+0.5} (8 + 20 * 2^{-q} n^2 - 25 * 2^{-q} n)^{\frac{1}{2}} \right)}{5(16n^2 - 40n + 25)} \right)}{a \cos \left(2^{\frac{-q}{n}} \right)} \quad (16)$$

На рисунку 7 наведено графіки відношень \mathfrak{R} для F_{MSH} та F_B (А), F_{SH} і F_B (В).

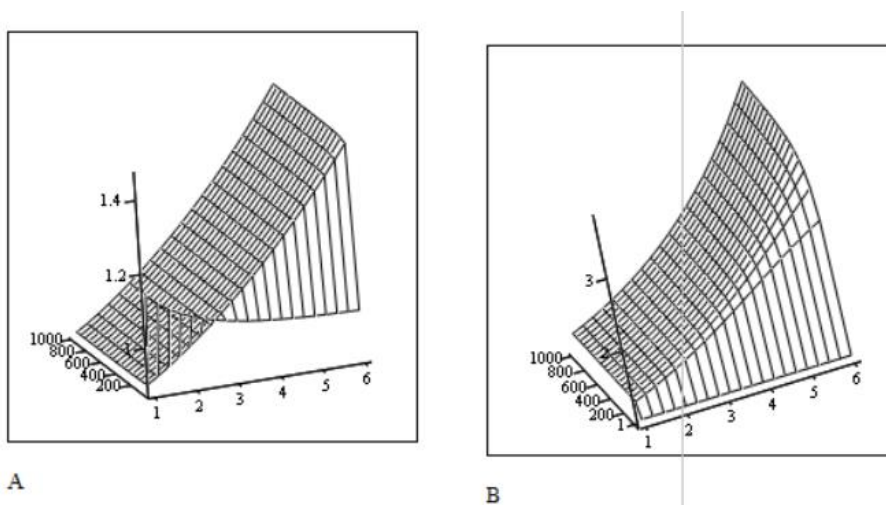


Рисунок 7 – Графіки відношень \mathfrak{R} для F_{MSH} і F_B (А), F_{SH} і F_B (В)

Отже, для розробленої функції блюмінг відповідає інтервалу, що зменшує обсяги обчислень.

Розраховані граничні значення аргументів ДФВЗ використаємо при побудові графіків максимальних відносних похибок (δ) F_{MSH} , F_{SH} залежно від n .

Вираз для визначення δ апроксимації ДФВЗ відносно F_B має такий вигляд

$$\left| \frac{100(F_{apr} - \cos(x)^n)}{\cos(x)^n} \right|. \quad (17)$$

Для обчислення максимального δ апроксимації ДФВЗ по кожному n з врахуванням граничних значень у Mathcad 2001 було розроблено програму, граф-схема програми наведена на рисунку 8.

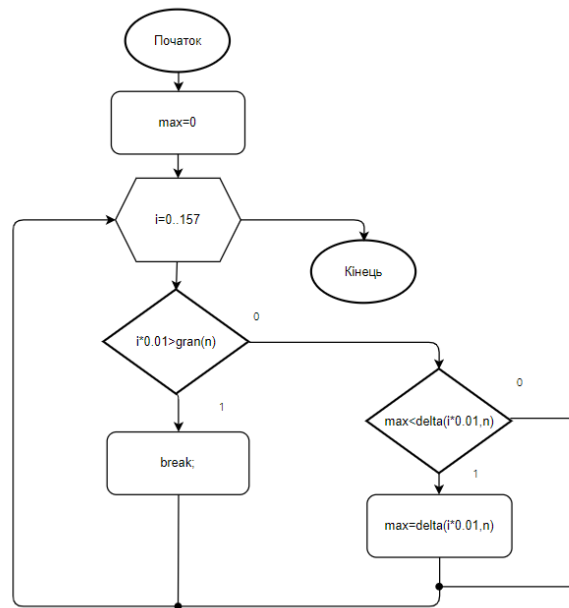


Рисунок 8 – Граф-схема програми обрахунку максимальної δ для визначеного n

У циклі множник $i*0.01$ відповідає значенню кута в радіанах та порівнюється із обчисленим граничним значенням розрахунку для ДФВЗ $gran(n)$. Якщо кут більший, здійснюється вихід з циклу оператором `break`. Інакше тимчасове максимальне значення δ (змінна `max`) порівнюється з обчисленим δ для нового кута (результат функції `delta`). Якщо значення `delta` більше, змінна `max` оновлюється.

На рисунку 9 зображено побудовані графіки максимальних δ F_{MSH} , F_{SH} відносно n . Значення для кожного n обчислені через розроблену програму.

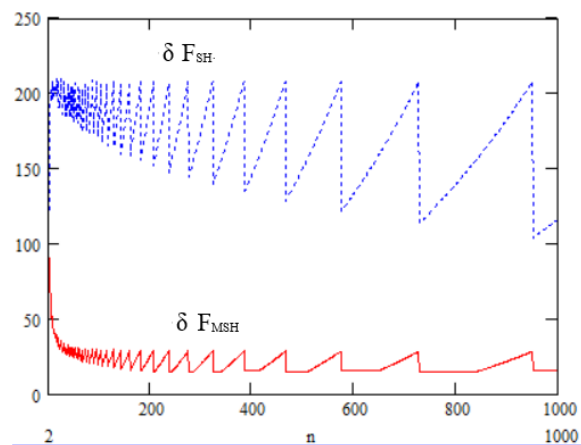


Рисунок 9 – Залежність δ F_{MSH} і δ F_{SH} від n

З побудовано графіка встановлюємо, що максимальні δF_{MSH} є меншими, ніж максимальні δF_{SH} у 1,5 – 7 разів для послідовності n.

Висновок

Запропоновано нову модифікацію ДФВЗ Шліка, здійснену шляхом комп'ютерного перебору. Нова модифікація зберігає обчислювальні переваги ДФВЗ Шліка та підвищує реалістичність відтворення відблисків у зоні блонінгу. Показано переваги модифікованої ДФВЗ над ДФВЗ Шліка за параметрами: максимальна відносна похибка, максимальна абсолютна похибка, відносна похибка на рівні епіцентру відблиску, розмір плями відблиску.

Список літератури

- [1] О. Н. Романюк, та А. В. Чорний, *Високопродуктивні методи та засоби зафарбовування тривимірних графічних об'єктів*. Вінниця, Україна: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2006.
- [2] О. Н. Романюк, *Комп'ютерна графіка. Навчальний посібник*. Вінниця: УНІВЕСУМ-Вінниця, 2001.
- [3] О. Н. Романюк, "Класифікація дистрибутивних функцій відбивної здатності поверхні", *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*, вип. 9. с. 145-151. 2008.
- [4] O. Romanuyk, and A. Chernij, "Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation", *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications*. Sofia, pp. 615-619. 2005.
- [5] О. Н. Романюк, "Альтернативна реалізація дистрибутивної двопроменевої функції для моделей освітлення Бліна та Фонга", *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація»*, випуск 106, с. 151-156. 2006.

Стаття надійшла: 22.09.2022.

References

- [1] O. N. Romanyuk, ta A. V. Chorny, *Vysokoproduktyvni metody ta zasoby zafarbovuvannya tryvymirnykh hrafichnykh obyektiv*. Vinnytsya, Ukrayina: UNIVESUM-Vinnytsya, 2006 [in Ukrainian].
- [2] O. N. Romanyuk, *Kompyuterna hrafika. Navchalnyu posibnyk*. Vinnytsya: UNIVESUM-Vinnytsya, 2001 [in Ukrainian].
- [3] O. N. Romanyuk, "Klasyfikatsiia dystributyvnykh funktsii vidbyvnoi zdatnosti poverkhni", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ser.: Informatyka, kibernetyka ta obchysliuvalna tekhnika*, vyp. 9. s. 145-151. 2008 [in Ukrainian].
- [4] O. Romanuyk, and A. Chernij, "Methods for Specular Color Component Accelerate Calculation", *IEEE Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing systems: Technology and Applications*. Sofia, pp. 615-619. 2005.
- [5] O. N Romanyuk, "Alternatyvna realizatsiia dystributyvnoi dvopromenevoi funktsii dlia modelei osvittennia Blina ta Fonha", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriia «Obchysliuvalna tekhnika ta avtomatyzatsiia»*, vypusk 106, s. 151-156. 2006 [in Ukrainian].

Відомості про авторів

Завальнюк Євген Костянтинович – студент групи ІПІ-21м, кафедра програмного забезпечення.

Романюк Олександр Никифорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення.

Войтко Вікторія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення.

Романюк Оксана Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення.

Снігур Анатолій Васильович – кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки.

Ye. K. Zavalniuk, O. N. Romanyuk, V. V. Voitko, O. V. Romanyuk, A. V. Snigur

THE DEVELOPMENT OF THE MODIFIED SCHLICK MODEL FOR THE SPECULAR COLOR COMPONENT CALCULATION

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia