

Особенности визуализации водной поверхности

Сапронов Роман

Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

lurky@rambler.ru

1. АННОТАЦИЯ

Предложено решение задачи нормализации карт высот и смещений, генерируемых на основе модели, описанной Д. Тессендорфом. Предложены способы устранения визуальных артефактов в методе проективных сеток при нахождении камеры на большой высоте, при визуализации на границе водно-воздушного интерфейса. Выведена комплексная модель освещения водной поверхности.

Ключевые слова: Визуализация, Водная Поверхность, Летный Симулятор, Реальное Время, Спектральная Модель, Модель Освещения.

2. ВВЕДЕНИЕ

При визуализации открытых пространств неизбежно приходится сталкиваться с проблемой реалистичного отображения водной поверхности. С учетом специфических особенностей летного симулятора указанная проблема представляется в несколько упрощенном варианте (можно пренебречь взаимодействием объектов с водной поверхностью, не учитывать ряд визуальных эффектов, проявляющихся при нахождении наблюдателя в толще воды). Несмотря на это, реалистичное представление водной поверхности является одним из основных критериев, предъявляемых к подобным системам. В результате анализа ряда фотографических изображений водной поверхности, полученных при различных значениях освещения, времени суток, силе ветра, и других параметрах сформулировано предположение, что эффект визуальной правдоподобности при нахождении наблюдателя в широком диапазоне высот (1 м. – 10 км.) достигается при соблюдении следующих условий:

1. Реализуется физически правдоподобная модель распространения волн;
2. Производится реалистичная визуализация водной поверхности с соблюдением соответствующих оптических характеристик (преломление, отражение, оптическая плотность);
3. Моделируются эффекты, характерные при перемещении поверхностных водных масс под действием внешних сил (гребни волн, пена, и т.п.).

В главе 3 рассмотрены принципы формирования изображения водной поверхности на основе быстрого преобразования Фурье [1] (БПФ). В главе 4 приведены разработанные способы устранения визуальных артефактов в методе отображения водной поверхности при использовании проективных сеток. Проведен анализ существующих

полигональных методов моделирования водной поверхности, обусловлен выбор метода проективных сеток, для которого рассмотрен вопрос повышения стабильности генерируемого изображения путем расширения проецируемой области за границы экрана. Предложен способ нормализации ошибок вычисления при нахождении наблюдателя на большом расстоянии от центра системы координат. Предложен новый алгоритм моделирования окружающей обстановки при нахождении наблюдателя на границе водно-воздушного интерфейса путем внесения изменений в геометрических данных. Показана необходимость в нормализации данных, получаемых в ходе рассмотренного в главе 3 метода БПФ для модели Филлиппа, выведен способ нормализации значений карты высот для указанной модели, получено аналитическое выражение высоты от величины скорости ветра. Предложен способ упрощения вычислений (и уменьшения занимаемого пространства памяти видеокарты, что существенно для видеопроцессоров нижнего ценового диапазона) в локальной модели В. Росса и Э. Брунетона [2] путем замены выборки из трехмерной текстуры эмпирически выведенным выражением. На основании указанной модели выведен комплексный алгоритм моделирования и освещения водной поверхности.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Несмотря на существование различных подходов к моделированию волн на поверхности воды, наиболее простым способом моделирования водной поверхности является представление ее в виде турбулентной шумовой функции следующего вида:

$$h(\mathbf{p}, t) = \sum_{k=0}^N \frac{1}{2^k} |2 \cdot N(2^k, 2^k t) - 1|. \quad (1)$$

Здесь $h(\mathbf{p}, t)$ - функция высоты от двумерной координаты \mathbf{p} и времени t ; k - количество октав шума. Необходимо добавить, что $h(\mathbf{p}, t)$ более реалистичные результаты достигаются применением метода дискретизации системы уравнений Навье-Стокса на сетке, использование которого затруднительно ввиду большого количества элементов сетки в случае моделирования открытой воды с достаточной степенью детализации, а также самой необходимостью определения границ моделируемого объема. На основании изучения траектории движения произвольной точки на поверхности воды Ф. Герстнером [3,4] в 1804 было приведено приближенное решение для уравнений динамики жидкости (нелинейная теория трохoidalной волны), в виде следующих уравнений:

$$x = x_0 - (\mathbf{k} / k) A \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x} - \omega t) \quad (2)$$

$$y = A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}_0 - \omega t). \quad (3)$$

Здесь, \mathbf{k} - волновой вектор, направленный по направлению движения волны, а k - его величина, обратно пропорциональная значению длины волны:

$$k = 2\pi / \lambda. \quad (4)$$

Величина ω определяет частоту волны, и зависит от величины волнового вектора и набора граничных условий. Так, в условиях глубокой воды принимается

$$\omega^2(k) = gk, \quad (5)$$

в силу $\omega = 2\pi / T$ и (4).

Для реалистичного моделирования водной поверхности, использование одной синусоидальной волны при имитации всего спектра возмущений, очевидно, недостаточно. В подобных случаях, водная поверхность представляется в виде профиля, получаемого суммированием набора отдельных волн (аналогично сложению нескольких октав турбулентного шума), каждая из которых в свою очередь представлена набором волновых векторов \mathbf{k}_i , амплитуд A_i , частот ω_i и фаз:

$$x = x_0 - \sum_{i=1}^N (\mathbf{k}_i / k_i) A_i \sin(\cdot x_0 - \omega_i t + \phi_i) \quad (6)$$

$$y = \sum_{i=1}^N A_i \cos(\mathbf{k}_i \cdot x_0 - \omega_i t + \phi_i). \quad (7)$$

Несмотря на исключительную значимость модели Герстнера в понимании физической природы волн, в океанологической литературе применяется статистическая модель, где функция высот (карта высот участка водной поверхности) $h(\mathbf{p}, t)$ рассматривается, как случайная переменная двумерной координаты \mathbf{p} и времени t .

Подобно волнам Герстнера, статистические модели также основаны на декомпозиции высот как суммы элементарных волн. В основе декомпозиции лежит применение Быстрого Преобразования Фурье (БПФ) к спектру волн в частотном диапазоне. Функция $h(\mathbf{p}, t)$ в этом случае примет вид:

$$h(\mathbf{p}, t) = \sum_{\mathbf{k}} \tilde{h}(\mathbf{k}, t) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x}). \quad (8)$$

Здесь, $\mathbf{k} = (k_x, k_y) = (2\pi n / L_x, 2\pi m / L_y)$, и n и m – целые числа, такие, что $-N/2 \leq n < N/2$ и $-M/2 \leq m < M/2$. В результате применения БПФ генерируется значение высоты в точке $\mathbf{p} = (nL_x / N, mL_y / M)$, значения коэффициентов (зависимых от времени амплитуд) ряда Фурье $\tilde{h}(\mathbf{k}, t)$ определяются в соответствии с одной из возможных спектральных функций, основанных на статистических исследованиях. Наиболее распространенной моделью для представления волн в открытом море, является спектральная функция, предложенная О. Филлипсом [1,5] (существуют и другие виды спектров, большинство из которых основано на спектральной модели Пирсона-Московица [6]):

$$h(\mathbf{k}) = \frac{A}{k^4} \left| \hat{\omega} \right|^2 e^{-\frac{1}{kL}}, \quad (9)$$

где $L = V^2 / g$ характеризует наибольшую высоту волны, возникающей при непрерывном ветре скоростью V , g – гравитационная постоянная, $\hat{\omega}$ – вектор направления ветра, A – некоторая константа.

Начальные значения $\tilde{h}(\mathbf{k}, t)$ генерируются на первом этапе работы алгоритма в частотном домене по следующей формуле:

$$\tilde{h}_0(\mathbf{k}) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\xi_r + i\xi_i) \sqrt{P_h(\mathbf{k})}, \quad (10)$$

где ξ_r и ξ_i – независимые выборки генератора случайных гауссовых чисел, с нулевым математическим ожиданием и единичных среднеквадратическим отклонением.

При этом, амплитуды волн в частотном домене в момент времени t могут быть выражены следующим образом:

$$\tilde{h}(\mathbf{k}, t) = \tilde{h}_0(\mathbf{k}) e^{i\omega t} + \tilde{h}_0^*(-\mathbf{k}) e^{-i\omega t}, \quad (11)$$

Здесь, $\tilde{h}(\mathbf{k}, t)$ – новое значение комплексной амплитуды, $\tilde{h}_0(\mathbf{k}) e^{i\omega t}$ и $\tilde{h}_0^*(-\mathbf{k}) e^{-i\omega t}$ – предыдущие значения амплитуд,

при этом соблюдается условие $\tilde{h}^*(\mathbf{k}, t) = \tilde{h}(-\mathbf{k}, t)$. После задания указанных величин возможно вычисление значений карты высот $h(\mathbf{p}, t)$ с использованием (8). Получение реалистичного вида гребней волн возможно путем нахождения значений смещения по следующей формуле:

$$\tilde{D}(\mathbf{k}, t) = i \frac{\mathbf{k}}{k} \tilde{H}(\mathbf{k}, t), \quad (12)$$

Значения нормалей при этом могут быть вычислены конечно-разностным методом (в подходе, предложенном Д. Тессендорфом предлагается использовать несколько дополнительных преобразований Фурье, что занимает значительно большее время). С учетом указанных выше изменений, основные этапы алгоритма могут быть выражены в виде следующей диаграммы:

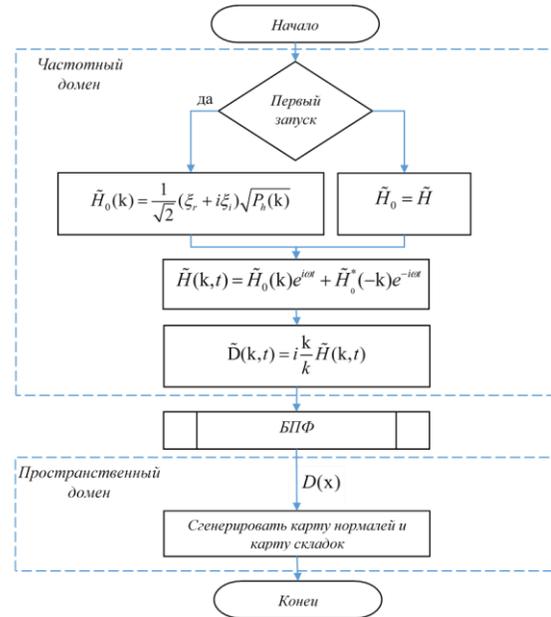


Рис. 1. Принципиальная схема основных этапов построения малого участка водной поверхности

На диаграмме, представленной выше, отображен процесс формирования карт смещения точек двумерной сетки поверхности воды, карт нормалей, карт складок, представляющих собой маску для наложения текстуры пены, получаемую в соответствии с формулой:

$$F(x) = J_{xx}J_{yy} - J_{xy}J_{yx}, \quad (13)$$

где $J_{xx}(\mathbf{x}), J_{yy}(\mathbf{x}), J_{yx}(\mathbf{x}), J_{xy}(\mathbf{x})$ - элементы матрицы Якоби [1], построенной на основе двух компонент карты векторов смещений : $D(x)$

$$\begin{aligned} J_{xx}(\mathbf{x}) &= 1 \lambda \frac{\partial D_x(\mathbf{x})}{\partial x}, \\ J_{yy}(\mathbf{x}) &= 1 \lambda \frac{\partial D_y(\mathbf{x})}{\partial y}, \\ J_{yx}(\mathbf{x}) &= \lambda \frac{\partial D_y(\mathbf{x})}{\partial x}, \\ J_{xy}(\mathbf{x}) &= \lambda \frac{\partial D_x(\mathbf{x})}{\partial y}. \end{aligned} \quad (14)$$

4. ОТОБРАЖЕНИЕ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

При визуализации водной поверхности, необходимо учитывать ее протяженность в направлении горизонта, кроме того, необходимо обеспечить плавное изменение детализации, в зависимости от положения наблюдателя. В ходе анализа существующих решений выделены две группы алгоритмов. К первой группе относятся различные LOD-схемы [7,8] (аналогичные методам, используемым при полигональном моделировании поверхности), ко второй следует отнести методы, использующие проективные сетки [9,10]. В первом случае (рис. 2, слева), поверхность представляется в мировом координатном пространстве в виде совокупности полигональных патчей (участков), с размерами, обратно пропорциональными расстоянию до наблюдателя, во втором (рис. 2 справа), поверхность представлена в виде единой полигональной сетки, спроецированной на экранное пространство, с последующей репроеекцией каждой точки сетки на плоскость (в системе мировых координат) с высотой, соответствующей уровню воды.

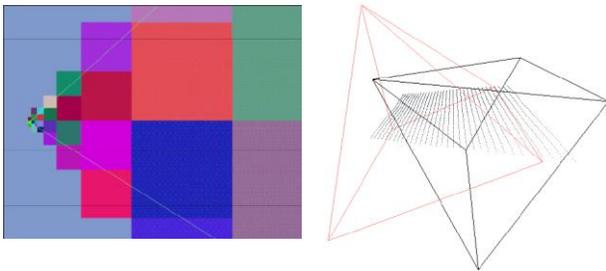


Рис. 2. Слева-отображение водной поверхности, основанной на стратегии использования уровней детализации (вид сверху); справа - визуализация поверхности основанной на методе проективных сеток (черным цветом обозначена видовая камера, красным - камера-проектор)

Наличие дополнительной проецирующей камеры (рис. 2, справа) обусловлено следующими обстоятельствами:

1. При некоторой ориентации вектора направления видовой камеры относительно базовой плоскости (плоскости водной поверхности) не удастся корректно найти точки пересечения некоторых лучей пирамиды видимости и указанной плоскости (эффект “backfiring”)

2. Необходимо минимизировать внеэкранные области, обеспечивая включение всей потенциально видимой области);

3. Необходимо обеспечить равномерное распределение плотности рассматриваемой полигональной сетки.

С целью обеспечения плавной аппроксимации уровней детализации (метод основанный на LOD во многих случаях допускает наличие значительного количества полигонов, меньших экранного пикселя и требует дополнительного рассмотрения способов расширения к горизонту), при моделировании водной поверхности, используется метод проективных сеток. Теоретически, указанный выше метод представляет бесконечное количество уровней детализации (при сколь угодно большом приближении к проецируемой плоскости размер полигонов в проективном пространстве остается неизменным – иными словами, размер элемента полигональной сетки, выраженный в пространстве мировых координат, уменьшается пропорционально сокращению расстояния между ближней плоскости отсечения и рассматриваемой поверхностью). Внеэкранные области, служащие для устранения краевых разрывов при большой высоте волн могут быть уменьшены путем искусственного изменения соответствующей высоты, величина которого определяется расстоянием от края экрана. Эффект «лесенки» (алиасинг) эффективно устраняется выбором проецирующей камеры и стратегии выборки значений карты смещения на расстоянии.

В ходе визуализации водной поверхности, для обеспечения корректной работы метода проективных сеток, максимальная (и минимальная) высота волн должна быть задана явным образом. Кроме того, в задачах сопоставлении различных спектральных моделей и ряда существующих шкал (Бофорта, Дугласа) возникает необходимость в средстве нормализации полученных в ходе ОБПФ карт высот и смещений. В общем случае, для нормализации указанных карт могут использоваться эмпирические соотношения, определяющие зависимость максимальной H_{\max} и значительной $H^{1/3}$ высот волн [11] от спектрального момента нулевого порядка функции $S(\omega)$:

$$H_{\max} \sim 2H^{1/3}; H^{1/3} = 4\sqrt{M_0}; M_0 = \int_0^{\infty} S(\omega)d\omega. \quad (15)$$

Здесь, $S(\omega)$ - изотропный спектр частот, в то же время, $P_n(\mathbf{k})$ в формуле (9) – двумерный спектр плотности волнового действия, выраженный, как функция волнового вектора \mathbf{k} , $D(\omega, \theta) = |\hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{u}}|^2$ - функция распространения волн (spreading function), где $\theta = \arccos(\hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{u}})$ - угол распространения волны. Полный спектр с учетом функции распространения имеет вид:

$$S(\omega, \theta) = S(\omega)D(\omega, \theta). \quad (16)$$

Поскольку суммарная энергия спектра $S(\omega, \theta)$ должна совпадать с суммарной энергией волнового спектра (спектра от волнового вектора) $S(\mathbf{k})$ [12] можно записать:

$$S(\omega, \theta)d\theta d\omega = S(k_x, k_y)dk_x dk_y. \quad (17)$$

Воспользовавшись теоремой замены пределов интегрирования, получим:

$$\int_{\omega(k_x, k_y)} \int_{\theta(k_x, k_y)} S(\omega(k_x, k_y), \theta(k_x, k_y)) d\omega d\theta \quad (18)$$

$$= \int_{k_x, k_y} \int S(k_x, k_y) |\det(\mathbf{J}_{\omega, \theta})| dk_x dk_y$$

Здесь $|\det(\mathbf{J}_{\omega, \theta})|$ - абсолютное значение определителя матрицы Якоби, составленной из частных производных ω и θ по компонентам вектора \mathbf{k} :

$$|\det(\mathbf{J}_{\omega, \theta})| = \left| \frac{\partial \omega}{\partial k_x} \frac{\partial \theta}{\partial k_y} - \frac{\partial \omega}{\partial k_y} \frac{\partial \theta}{\partial k_x} \right|. \quad (19)$$

В частности, можно записать:

$$d\omega d\theta = |\det(\mathbf{J}_{\omega, \theta})| dk_x dk_y. \quad (20)$$

С учетом того, что $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ и $\theta = \arctan(k_y / k_x)$ найдем частные производные:

$$\frac{\partial \omega}{\partial k_x} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial k_x} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{k_x}{k}, \quad (21)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial k_y} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial k_y} = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{k_y}{k}, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial k_x} = -\frac{k_y}{k^2} \quad (23)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial k_y} = \frac{k_x}{k^2} \quad (24)$$

Подставляя (21)-(24), в (19), получим:

$$|\det(\mathbf{J}_{\omega, \theta})| = \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{1}{k}. \quad (25)$$

Выразим из (17), (20) и (25):

$$S(\mathbf{k}) = S(\omega, \theta) \frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{1}{k}. \quad (26)$$

Учитывая (16) и (26), $\frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{g}{2\sqrt{gk}}$ (для глубокой воды

$\omega = \sqrt{gk}$), получим:

$$P_h(\omega) = P_h(\mathbf{k}) \left[\frac{\partial \omega}{\partial k} \frac{1}{k} D \right] = \frac{2g^2 A}{5} \exp \left[-\left(\frac{g}{U} \right)^4 \frac{1}{\omega^4} \right] \quad (27)$$

Интегрируя (27) по \mathbf{k} и подставляя результаты в (15) получим искомую зависимость H_{\max} от $P_h(\mathbf{k})$, позволяющую нормализовать карты высот и смещений:

$$M_0 = \frac{AU^4}{2g^2}; H_{\max} \sim 5.66 \sqrt{A} \frac{U^2}{g}, \quad (28)$$

Необходимо отметить, некоторые из существующих спектров (JONSWAP, Texel MARSEN ARSLOE(TMA) и др.) [13–15] выведены на основе модели Пирсона-Московца, параметрическая форма которой имеет вид:

$$S(\omega) = 5 \frac{(H^{1/3})^2}{p^4} \frac{1}{5} \exp \left[\frac{20\pi^4}{T_p^4} \frac{1}{\omega^4} \right], \quad (29)$$

где T_p - пиковый период, p - по-прежнему, значительная высота. В этом случае удастся генерировать спектральную функцию с изначально заданными характеристиками.

При нахождении камеры на большом расстоянии от начала системы координат (что возможно, учитывая рассматриваемый сценарий полета на большие расстояния), а также при больших значениях дальней плоскости отсечения видовой камеры (что также вполне допустимо) точности при вычислении пересечения камеры проектора и плоскости оказывается недостаточно, ввиду чего при повороте и перемещении камеры проявляется ряд видимых артефактов, выражающихся в мерцании и временном пропадании части водной поверхности. Для их устранения горизонтальные значения положения исходной камеры были выровнены с началом системы координат, что позволило устранить указанные ошибки вычислений на всем диапазоне работы алгоритма.

Для коррекции отображения водной поверхности при нахождении наблюдателя на границе водно-воздушного интерфейса разработан следующий подход:

1. Вычисляется высота водной поверхности $H(v_x, v_z)$ в горизонтальной проекции положения наблюдателя \mathbf{v} ;
2. Вычисленная высота сравнивается с положением наблюдателя, и если $v_y - H_0 < H(v_x, v_z)$, где H_0 - значение уровня воды, то выполняется привязка высоты водной поверхности к высоте верхней плоскости усеченной пирамиды видимости, в противном случае - к нижней. В разработанном подходе используется концепция расстояния между краями (верхним или нижним) ближней плоскости отсечения и положением наблюдателя \mathbf{v} :
 $r_{safe} = \|\mathbf{p}_{left-top} \mathbf{M}_{viewproj}^{-1} - \mathbf{v}\|$, $\mathbf{p}_{left-top} \mathbf{M}_{viewproj}^{-1}$ - проекция координат левой верхней точки ближней плоскости отсечения, привязка в этом случае осуществляется к $H_{inside} = \max(H, r_{safe} + v_y)$ при $v_y - H_0 < H(v_x, v_z)$ либо к $H_{outside} = \min(H, v_y - r_{safe})$, где $H = H(p_x, p_z)$ - высота в точке p .

Визуализация поверхности воды выполняется с учетом преломления и отражения лучей на границе водной поверхности, при этом, для определения доли отраженного (преломленного) излучения используется аппроксимация формулы Френеля [16].

Цель (текстура) для выборки значений отражения и преломления является текущим изображением сцены из G-Buffer'a [17], при этом зеркальные отражения (преломления) вычисляются путем нахождения пересечения отраженного (преломленного) луча с поверхностью сцены, с использованием нескольких шагов линейного и бинарного поиска (количество промежуточных шагов может быть значительно сокращено при использовании вспомогательных структур, аналогичных ММ-пирамиде [18], построенных на основе линейной карты глубины).

Отражения объектов сцены, имеющих значительную протяженность у краев видимой области (небо, облака) требуют большого количества шагов процедуры трассировки, и подвержены краевым артефактам, связанным с отсутствием информации об элементах сцены за пределами G-Buffer'a строятся процедурно. Так, для построения облаков для карты отражений используется оригинальный алгоритм с меньшим количеством итераций, в случае небесной сферы возможно использование как оригинального алгоритма, так и интерполяции между значениями яркости в нескольких точках небесной сферы.

Необходимо добавить, что для обеспечения быстрого доступа к текстуре отражений небосвода, а также устранения краевых артефактов при построении протяженных объектов (в т.ч., облаков и небо), целесообразно использовать сферическую проекцию, где направление трассировки определяется из двумерных текстурных координат.

Для получения отраженного солнечного света используется модифицированная локальная модель освещения предложенная В. Россом и Э. Брунеттоном [19,20]:

$$I_{sun} \approx L_{sun} \Omega_{sun} p(\zeta_h) \frac{R + (1-R)(1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{l})^5}{4h_z^4 \cos \theta_v (1 + \Lambda(a_v) + \Lambda(a_l))}. \quad (30)$$

Здесь L_{sun} - яркость солнечного излучения; Ω_{sun} - величина телесного угла на котором значения модели освещения являются постоянными; выражение в числителе является аппроксимацией коэффициента Френеля; $h_z = \mathbf{n} \cdot |\mathbf{l} + \mathbf{v}|$, \mathbf{n} , \mathbf{l} и \mathbf{v} - вектор нормали, вектор на источник освещения и наблюдателя соответственно ; остальные параметры выражаются следующим образом:

$$\Lambda(a_i) = \frac{\exp(-a_i^2) - a_i \sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(a_i)}{2a_i \sqrt{\pi}}, i \in \{v, l\}. \quad (31)$$

$$a_i = (2(\sigma_x^2 \cos^2 \phi_i + \sigma_y^2 \sin^2 \phi_i) \tan \theta_i)^{-1/2}. \quad (32)$$

$$p(\zeta) = \frac{1}{\pi \sigma_x \sigma_y} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\zeta_x^2}{\sigma_x^2} + \frac{\zeta_y^2}{\sigma_y^2} \right)\right). \quad (33)$$

Соотношения между величинами $\phi_l, \phi_v, \theta_v, \theta_l$, компонентами вектора нормали к микрограну ζ_x и ζ_y и нормалью к поверхности \mathbf{n} приведены на рис. 3:

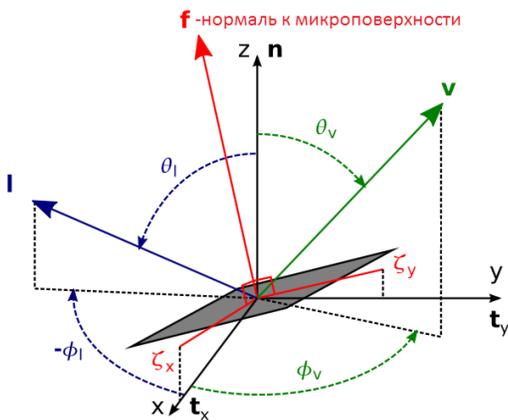


Рис. 3. Координатная система локальной модели освещения водной поверхности



Рис.4. Демонстрация результатов локальной модели освещения



Рис.5. Имитация объемного освещения

Зависимость быстродействия (в кадрах/сек.) от размера генерируемого изображения приведена на рис. 6:

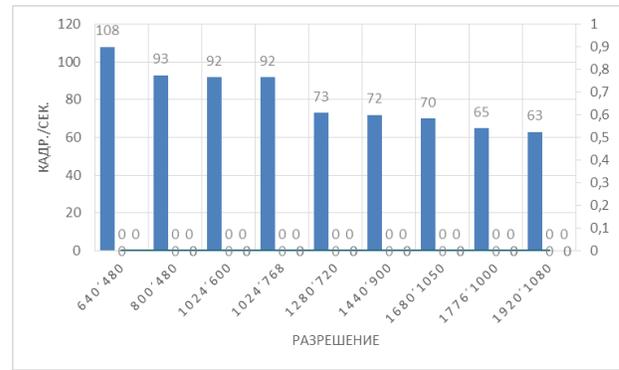


Рис.6. Зависимость быстродействия (в кадрах/сек.) от разрешения генерируемого изображения

Несмотря на множество интенсивных вычислений, отраженных в формулах (16-19) в ходе реализации и анализа производительности исходного алгоритма выявлено, что наибольшие затраты по времени вызывает расчет и выборка значений параметра σ^2 , для расчета которого применяется либо численное интегрирование в вершинном и пиксельном шейдерах (что, очевидно, существенно уменьшает производительность) либо выборка из предварительно построенной трехмерной текстуры, что возлагает дополнительные требования к оборудованию. В ходе анализа оригинального алгоритма эмпирически выявлена зависимость указанного параметра от величины вертикальной проекции видового вектора \mathbf{v}_y , при помощи которой определяются пределы суммирования σ^2 :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}^T = \sum_{N_{\min}}^{N_{\max}} [\mathbf{k}_{i,x}^2 \mathbf{k}_{i,y}^2]^T / \|\mathbf{k}_i\|^2 \left(1 - \sqrt{1 - \|\mathbf{k}_i\|^2 h_i^2} \right). \quad (34)$$

Ввиду указанной зависимости и необходимости повышения эффективности вычислений, принято решение о замене указанной функции с использованием следующего соотношения:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_y^2 \end{bmatrix}^T \sim \text{lerp}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \log_2(C / \mathbf{v}_y)). \quad (35)$$

Здесь, \mathbf{a} и \mathbf{b} -значения в двух заранее выбранных точках. На практике было выявлено, что компоненты указанных векторов принимают значения, пропорциональные значениям σ_{total}^2 , полученным суммированием по всем возможным длинам волн, кроме того, возможно управление дисперсией по одному из двух горизонтальных направлений выбором соответствующих значений. Результат работы разработанного алгоритма выбора представлен на рис. 4 и 5, при этом, замена выборки из трехмерной текстур простыми арифметическими действиями позволило несколько (до 5%) ускорить производительность алгоритма, позволяя успешно использовать его на системах нижнего ценового диапазона (все указанные в статье изображения получены в реальном времени (60-65 кадров/с.) при разрешении 1920×1080 на машине с мобильным процессором и видеокартой).

В соответствии с описанным ранее, выведен комплексный алгоритм анимации и визуализации водной поверхности, реализованный в программном коде, вершинном и пиксельном шейдерах, представляющий собой следующую последовательность действий:

1. Построить карты смещения, нормалей и карты складок, используя одну из доступных спектров и параллельную реализацию БПФ;

2. Найти угловую матрицу
$$\mathbf{M}_{range} = \begin{bmatrix} x_{\max} - x_{\min} & 0 & 0 & x_{\min} \\ 0 & y_{\max} - y_{\min} & 0 & y_{\min} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

, определяющую проекцию потенциальной видимой области $V_{visible}$ на ближнюю плоскость отсечения усеченной пирамиды видимости камеры-проектора, где компоненты x_{\max} , x_{\min} , y_{\max} , y_{\min} получены путем пересечения указанной пирамиды видимости с плоскостями S_{upper} и S_{lower} , ограничивающими потенциально видимую область, с последующим их проецированием перспективной матрицей проектора и выбором наибольших и наименьших значений в двумерном пространстве экрана;

3. Применить матрицу
$$\mathbf{M}_{projector} = \mathbf{M}_{range} \cdot [\mathbf{M}_{pview} \cdot \mathbf{M}_{perspective}]^{-1}$$
к координатам вершин единичного куба для получения мировых координат проектора, включающего всю потенциально видимую область (\mathbf{M}_{pview} и $\mathbf{M}_{perspective}$ -видовая и

перспективные матрицы камеры-проектора), с последующим нахождением пересечения лучей вида

$(x + \Delta x \cdot t, y + \Delta y \cdot t, z + \Delta z \cdot t, w + \Delta w \cdot t)$, с базовой плоскостью S_{base} согласно формуле

$$t = \frac{w \cdot h - y}{\Delta y - \Delta w \cdot h} \text{ для каждого луча;}$$

4. Передать четыре найденные координаты (\mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} и \mathbf{d}) проекции потенциально видимой области на базовую плоскость S_{base} в вершинный шейдер, выполнить линейную интерполяцию между ними, используя в качестве параметра экранные координаты соответствующей вершины $x, y \in (0, 1)$:
$$\mathbf{p} = \mathbf{a}x + (1 - x)\mathbf{b} + (1 - y)(\mathbf{c}x + (1 - x)\mathbf{d}) ;$$

5. На основании полученной мировой координаты вычислить координаты для выборки из текстур;

6. Применить карты смещения к координате вершины путем сложения координаты \mathbf{p} . с масштабированным значением вектора смещения, выбранного по текстурным координатам, полученным на предыдущем шаге;

7. Передать необходимые данные в пиксельный шейдер;

8. Выбрать значения яркости преломленного L_{sky} и отраженного освещения L_{ref} из соответствующих текстур;

9. На основании значения глубины найти значение цвета воды:

$$L_{sea} = attenuation \cdot L_{ref} + inscatter \cdot L_{fog}$$

$attenuation = e^{-c(s-p_y+1)}$, c - плотность, s - базовый уровень водной поверхности, \vec{p} - точка пересечения видового луча и поверхности воды, \vec{o} - точка пересечения видового луча и морского дна, $l = \|\vec{p} - \vec{o}\|$,

$$inscatter = e^{-c(s-o_y)} \left[\frac{e^{(d_y-1)cl} - 1}{(d_y - 1)c} \right]$$

$$\vec{d} = \frac{\vec{p} - \vec{o}}{\|\vec{p} - \vec{o}\|};$$

10. $I = FL_{sky} + (1 - F)L_{sea} + I_{sun} + I_{foam}$,

где F - коэффициент Френеля, I_{sun} - отраженный свет Солнца, полученный в соответствии с локальной моделью освещения, описанной ранее, I_{foam} - цвет нескольких слоев пены, смешанный в соответствии с величиной, полученной из карты складок. Результаты, полученные в ходе моделирования водной поверхности приведены на рис. 4 и 5.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

. В статье предложено решение задачи нормализации карт высот и смещений, генерируемых на основе различных спектральных моделей. Предложены новые способы для устранения визуальных артефактов в методе проективных сеток при нахождении камеры на большой высоте, при визуализации на границе водно-воздушного интерфейса. Выведена реалистичная модель освещения водной поверхности.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Прикладные научные исследования проведены при финансовой поддержке государства в лице 1) Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор № ГУ2/2015) 2) Минобрнауки России (уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57414X0105).

7. ССЫЛКИ

1. Tessendorf J. Simulating Ocean Water // *Environment*. 2001. Vol. 2. P. 1–19.
2. Bruneton E., Neyret F., Holzschuch N. Real-time realistic ocean lighting using seamless transitions from geometry to BRDF // *Comput. Graph. Forum*. 2010. Vol. 29, № 2. P. 487–496.
3. Gerstner T. Fast multiresolution extraction of multiple transparent isosurfaces // *Proc. Viss*. 2001.
4. Fournier A., Reeves W.T. A Simple Model of Ocean Waves // *SIGGRAPH 86 Proc. 13th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech*. 1986. Vol. 20. P. 75–84.
5. AA, Phillips O.M. On the generation of waves by turbulent wind // *J. Fluid Mech*. 1957. Vol. 2, № February. P. 417–445.
6. Hinsinger D., Neyret F., Cani M.-P.M. Interactive animation of ocean waves // ... *Symp. Comput. Animat*. 2002. Vol. 46. P. 5471–5481.
7. Losasso F., Hoppe H. Geometry clipmaps: terrain rendering using nested regular grids // *Int. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech*. 2004. Vol. 23, № 3. P. 769–776.
8. Tanner C.C., Migdal C.J., Jones M.T. The Clipmap: A Virtual Mipmap // *SIGGRAPH '98 Proc. 25th Annu. Conf. Comput. Graph. Interact. Tech*. 1998. P. 151–158.
9. Johanson C., Lejdfors C. Real-time water rendering // *Lund Univ*. 2004. № March 2004. P. 42.
10. Mahsman J.D. Projective grid mapping for planetary terrain. University of Nevada, Reno, 2010.
11. Laing A.K. et al. Guide to Wave Analysis and forecasting // *WMO-No. 702*. 1998. Vol. 1998, № 702. 1-109 p.
12. Rodriguez O.C. et al. Modeling arrival scattering due to surface roughness // *Proc. 10th Eur. Conf. Underw. Acoust*. 2010. P. 1–8.
13. Fréchet J. Realistic Simulation of Ocean Surface using Wave Spectra // *J. Virtual Real. Broadcast*. 2007. Vol. 4, № 11.
14. Grindstad T., Rasmussen R. Deep water ocean surface modelling with ship simulation. 2011.

15. Thesis M. Filip Krijt Adaptive Simulation of Large-Scale Ocean Surface. 2014.
16. Schlick C. An Inexpensive BRDF Model for Physically-based Rendering // *Comput. Graph. Forum*. 1994. Vol. 13, № 3. P. 233–246.
17. Shishkovtsov O. Deferred shading in stalker // *GPU Gems 2 Program. Tech. Perform. Graph. Gen. Comput*. 2005.
18. Tevs A., Ihrke I., Seidel H.-P. Maximum mipmaps for fast, accurate, and scalable dynamic height field rendering // *Proc. 2008 Symp. Interact. 3D Graph. games - SI3D '08*. 2008. P. 183–190.
19. Ross V., Dion D., Potvin G. Detailed analytical approach to the Gaussian surface bidirectional reflectance distribution function specular component applied to the sea surface. // *J. Opt. Soc. Am. A. Opt. Image Sci. Vis*. 2005. Vol. 22, № 11. P. 2442–2453.
20. Bruneton E., Neyret F. Real-time realistic rendering and lighting of forests // *Comput. Graph. Forum*. 2012. Vol. 31. P. 373–382.

Об авторах

Роман Сапронов – н.с. КНИТУ-КАИ имени А.Н. Туполева, магистр. E-mail: lurky@rambler.ru.

Some approaches to the water rendering problem.

Abstract

An approach to height and displacement maps normalisation from spectra described by J. Tessendorf is defined. Techniques to avoid some rendering artefacts with projected grids when a viewer is 1) far from the coordinate's origin 2) near the waterline are considered. Modeling and lighting of the water surface is described.

Keywords: Rendering, Water Surface, Flying Simulator, Real-time, Spectra, Shading.

Roman Saponov – KNRTU-KAI named after A.N. Tupolev