

РАСЧЕТ ВНЕШНИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ МЕТОДОМ Z-БУФЕРА

А.А. Солуянов

vinivka442@yandex.ru

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Аннотация

Для определения тепловых потоков от Солнца и Земли на космический аппарат предложено использовать единый алгоритм. Алгоритм основан на разбиении видимой поверхности Земли на множество зон подсветки и замене собственного излучения Земли и отраженного Землей солнечного излучения в телесном угле, охватывающем каждую зону, параллельным пучком лучей, уходящим из ее центра. Показано, что основная сложность определения лучистых потоков на космический аппарат связана с учетом взаимного затенения его конструктивных элементов. Предложен способ и приведены математические соотношения для расчета площадей миделей конструктивных элементов космического аппарата, позволяющие получать значения падающих на них лучистых потоков с учетом полного или частичного затенения. Способ основан на методах параллельного проецирования объектов и z-буфера, используемых в компьютерной графике для построения изображений. Получены оценки временных затрат на расчет площадей миделей конструктивных элементов космического аппарата для различных уровней детализации его сеточной геометрической модели и разрешения получаемого изображения

Ключевые слова

Космический аппарат, сеточная геометрическая модель, затенение, пиксель, z-буфер

Поступила в редакцию 27.06.2016
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

Введение. Одним из важных этапов математического моделирования теплового режима космического аппарата (КА) в процессе орбитального полета является определение падающих на его поверхность внешних лучистых потоков: прямого солнечного излучения, собственного излучения Земли, отраженного Землей солнечного излучения. Расчет падающего потока прямого солнечного излучения обычно основывается на допущении, что поток солнечной радиации представляет собой пучок параллельных лучей. Тогда тепловой поток, падающий на конструктивный элемент (КЭ) внешней поверхности КА, равен произведению солнечной постоянной на площадь проекции этого КЭ на плоскость, перпендикулярную направлению излучения.

Расчет потоков собственного и отраженного Землей солнечного излучений существенно сложнее, поскольку при полете КА в околоземном космическом пространстве нельзя пренебрегать угловым размером планеты [1, 2]. Один из возможных путей решения этой задачи заключается в следующем. Видимая с орбиты КА

поверхность Земли разбивается на множество зон подсветки, и для каждой зоны определяются условия освещения ее Солнцем на момент расчета — не освещена, освещена частично или полностью. С учетом освещенности для каждой зоны рассчитываются суммарные потоки, включающие в себя компоненты собственного излучения Земли и отраженного Землей солнечного излучения. В пределах телесного угла, охватывающего каждую зону подсветки, излучение принимается однородным и уходящим из ее центра в виде параллельного пучка лучей [3]. Учитывая это допущение, тепловой поток, падающий от какой-либо зоны подсветки на КЭ КА, может быть определен способом, аналогичным расчету потока прямого солнечного излучения, — путем произведения плотности потока от зоны подсветки на площадь проекции КЭ по направлению на ее центр.

Описанный подход позволяет получать значения падающих на КЭ КА лучистых потоков с использованием единого алгоритма независимо от их источника. Ключевым моментом в реализации такого алгоритма является расчет площади проекции каждого КЭ КА на плоскость, перпендикулярную направлению распространения излучения, т. е. площади миделя.

Для КА простой формы решение этой задачи не вызывает трудностей. Расчет площадей миделей КЭ может быть выполнен аналитически, графически или численно [4, 5]. Однако на практике такая ситуация встречается нечасто. Большинство современных КА имеет сложную конфигурацию, для которой характерно наличие взаимного экранирования (затенения) тех или иных участков внешней поверхности в зависимости от ракурса визирования.

Расчет площадей миделей КЭ КА с учетом их взаимного экранирования для произвольного направления наблюдения является сложной задачей. Для ее решения используются методики, основанные на последовательном применении доступных CAD/CAE-систем (CATIA, ANSYS и др.) и разработанных исследователями собственных программных средств [6, 7]. Первые используются для построения сеточной геометрической модели (СГМ) КА, вторые — для расчета экранирования. Сеточная геометрическая модель с требуемой степенью точности аппроксимирует КЭ КА, расположенные на его внешней поверхности, множеством площадок выпуклой (обычно плоской) формы. Степень экранирования какого-либо КЭ определяется отношением суммы площадей проекций аппроксимирующих его площадок на заданное направление, затененных от падающего излучения другими площадками, к общей площади проекций площадок, аппроксимирующих элемент, на это же направление.

Для расчета экранирования какой-либо площадки обычно используются две основные схемы. Первая основана на последовательном переборе всех площадок СГМ и проверке пересечения с ними луча, испущенного из центра заданной площадки в направлении распространения излучения. Если точка пересечения луча с плоскостью площадки находится внутри ее контура, площадка считается экраном, в противном случае — нет. Такой способ расчета экранирования имеет невысокую производительность, так как требует значительных вычислительных затрат, быстро возрастающих с увеличением числа площадок СГМ. Вторая схема отличается

тем, что площадки предварительно упорядочиваются в целях уменьшения числа переборов на каждом шаге расчета. Например, для каждой площадки формируется массив, включающий в себя индексы только тех площадок, которые расположены перед ней, и только они участвуют в проверке экранирования. Процедуры упорядочивания сложны в программной реализации. Кроме того, обе схемы не учитывают частичное экранирование площадок, поэтому для повышения точности расчета приходится уменьшать их размеры.

Значительно более эффективные методы и алгоритмы определения взаимного положения и видимости элементов разработаны в компьютерной графике [8, 9]. Объект может быть расположен таким образом, что часть его поверхности оказывается заслоненной от наблюдателя непрозрачными поверхностями или другими объектами. Для корректного вывода его на экран используются разнообразные алгоритмы, имеющие собирательное название «удаление невидимых частей». Проводя аналогию с СГМ КА, можно сказать, что видимые с определенного направления площадки его внешней поверхности могут закрывать от наблюдателя другие, расположенные за ними площадки. Для учета экранирования требуется построить изображение СГМ КА под нужным ракурсом наблюдения и определить, какие площадки являются видимыми, а какие нет, т. е. экранированы. Направление наблюдения в этом случае совпадает с вектором лучистого потока от источника к центру масс КА.

В настоящей работе предложен простой в программной реализации способ расчета площадей миделей КЭ КА, позволяющий получать значения падающих на них с заданного направления лучистых потоков с учетом полного или частичного взаимного экранирования. Способ основан на используемых в компьютерной графике методах параллельного проецирования объектов и z-буфера.

Построение изображения СГМ КА путем параллельного проецирования.

Поскольку расстояние до источников внешних лучистых потоков намного больше размеров КА, для формирования его изображения используется параллельная ортографическая проекция. Для ее построения (рис. 1) задаются картинная плоскость (плоскость проецирования), проекционная система координат (правая) на картинной плоскости, окно на картинной плоскости и нормирующее преобразование.

Картинная плоскость задается в строительной системе координат (ССК) объекта $X'Y'Z'$ с началом в центре масс КА через опорную точку Q_r и единичный вектор нормали, совпадающий в параллельной ортографической проекции с вектором наблюдения \bar{v}_p . Под вектором наблюдения в данном случае понимается единичный вектор направления лучистого потока от источника к центру масс КА. Уравнение картинной плоскости в ССК в векторной форме имеет вид

$$\bar{r} \cdot \bar{v}_p + D = 0,$$

где \bar{r} — радиус-вектор произвольной точки плоскости; D — расстояние от начала ССК до опорной точки Q_r вдоль прямой, заданной вектором направления лучистого потока \bar{v}_p .

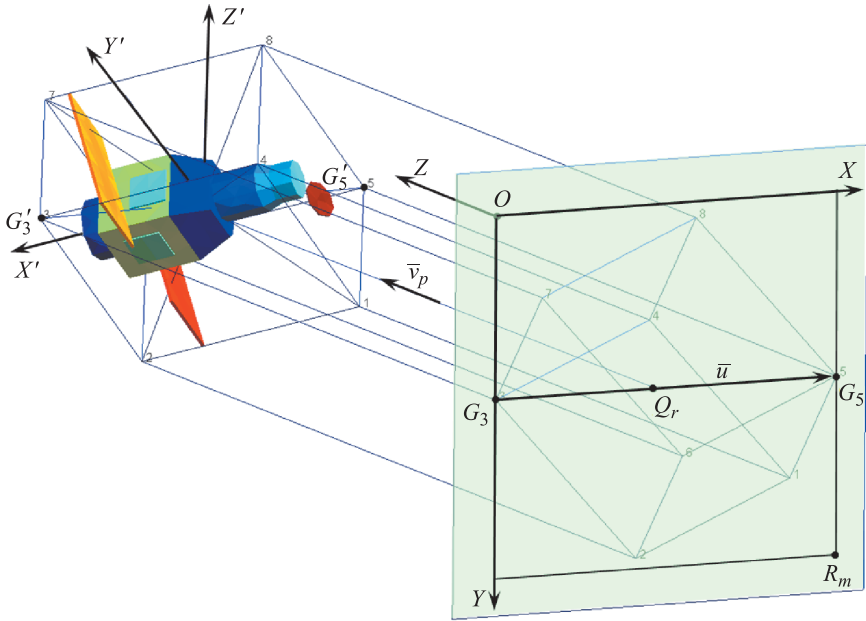


Рис. 1. Схема задания картинной плоскости, окна и проекционной системы координат

Расстояние D выбирается таким, чтобы картинная плоскость ни при каком ракурсе наблюдения не пересекала габаритный параллелепипед (ГП) СГМ КА. Для задания проекционной СК $OXYZ$ используется схема с базовым вектором горизонтали \bar{u}_b , проекция которого на картинную плоскость \bar{u} совпадает по направлению с осью OX . В общем случае в качестве базового вектора может быть выбрана или одна из осей ССК СГМ КА, или любой другой вектор, заданный в этой ССК. Однако необходимо учитывать, что при некоторых ракурсах наблюдения проекция базового вектора на картинную плоскость может стать нулевой, а направление задаваемой им оси OX вследствие этого — неопределенным. Для исключения такой ситуации в качестве вектора горизонтали целесообразно использовать одну из четырех диагоналей ГП СГМ КА, дающую на картинной плоскости при заданном ракурсе наблюдения проекцию максимальной длины. Длину вектора \bar{u} можно выразить через корень квадратный из скалярного произведения вектора самого на себя:

$$R_m = [(\bar{g}_j - \bar{g}_i) (\bar{g}_j - \bar{g}_i)]^{0,5},$$

где \bar{g}_i , \bar{g}_j — координаты точек, являющихся проекциями вершин ГП G_i , G_j , расстояние между которыми на картинной плоскости максимально при заданном ракурсе наблюдения, например, на рис. 1 это вершины 3 и 5.

Координаты проекций вершин ГП на картинную плоскость в ССК определяются векторным выражением вида

$$\bar{g}_k = \bar{g}_{bk} - \bar{v}_p (\bar{v}_p \cdot \bar{g}_{bk} + D),$$

где \bar{g}_{bk} — координаты k -й вершины габаритного параллелепипеда G_k в ССК, $k = 1 \dots 8$.

Единичный вектор \bar{e}_x оси OX проекционной СК в ССК определяется путем нормировки проекции вектора горизонтали на картинную плоскость:

$$\bar{e}_x = (\bar{g}_j - \bar{g}_i) / R_m. \quad (1)$$

Единичный вектор \bar{e}_y оси OY проекционной СК в ССК определяется векторным произведением единичных векторов \bar{v}_p и \bar{e}_x :

$$\bar{e}_y = \bar{v}_p \times \bar{e}_x. \quad (2)$$

Единичным вектором оси OZ проекционной СК в ССК является вектор \bar{v}_p .

После определения осей проекционной СК на картинной плоскости задается окно координатами его левого верхнего и правого нижнего углов: x_{\min}, y_{\min} и x_{\max}, y_{\max} . Выбор в качестве вектора горизонтали диагонали ГП СГМ КА, дающей на картинной плоскости при заданном ракурсе наблюдения проекцию максимальной длины R_m , позволяет однозначно определить размер окна вдоль горизонтальной оси OX . Поскольку вектор \bar{u} соединяет две крайние точки изображения, его размер по горизонтали не превышает R_m . Для удобства вычислений размер окна по оси OY также можно принять равным R_m . Тогда координаты левого верхнего и правого нижнего углов окна в проекционной СК будут равны: $x_{\min} = y_{\min} = 0, x_{\max} = y_{\max} = R_m$.

Привязка окна к ССК, необходимая для выполнения нормирующего преобразования при построении изображения, осуществляется путем задания в ней координат начала проекционной СК — точки O . Ее координаты в ССК определяются векторным выражением

$$\bar{o} = \bar{g}_i - \bar{e}_y R_m / 2.$$

Все дальнейшие операции по построению изображения СГМ КА осуществляются в проекционной СК. Для этого окно на картинной плоскости разбивается регулярной ортогональной сеткой на ячейки, размер которых

$$s = R_m / N_e,$$

где N_e — заданное число элементарных ячеек изображения по ширине и высоте окна на картинной плоскости, обеспечивающее компромиссное удовлетворение противоречивых требований по детальности изображения и скорости вычислений.

Проводя аналогию с компьютерной графикой, окно на картинной плоскости можно назвать экраном, а ячейки, из которых формируется изображение СГМ КА, — пикселями. Как и в компьютерных мониторах, для улучшения качества изображения необходимо увеличивать разрешение экрана, т. е. число пикселей.

Перед началом расчета координаты вершин всех площадок приводятся к безразмерному виду путем деления их на размер s пикселя. Это позволяет уменьшить объем вычислений и увеличить скорость построения изображения.

Координаты вершин площадок СГМ КА переводятся в проекционную СК путем нормирующего преобразования, которое заключается в комбинации поворотов ССК относительно точки O для совмещения ее осей с осями проекционной СК, а также в переносе начала повернутой СК в точку O .

Учитывая, что компоненты единичных векторов осей проекционной СК определены в ССК (1) и (2), матрица поворота, осуществляющая перевод координат вершин площадок и нормалей к ним из ССК в проекционную СК, имеет вид

$$M = \begin{pmatrix} e_{xx} & e_{xy} & e_{xz} \\ e_{yx} & e_{yy} & e_{yz} \\ \nu_{px} & \nu_{py} & \nu_{pz} \end{pmatrix},$$

где первая–третья строки — это компоненты единичных векторов $\bar{e}_x, \bar{e}_y, \bar{e}_z$.

С учетом переноса начала повернутой СК в точку O и приведения координат к безразмерному виду, которое выполняется перед началом расчета, нормирующее преобразование для произвольной точки P модели примет вид

$$\bar{p} = M(\bar{p}_b - \bar{o}) / s, \quad (3)$$

где \bar{p}_b — координаты точки P в ССК.

Нормирующее преобразование для единичного вектора нормали к k -й площадке СГМ КА заключается только в его повороте:

$$\bar{n}_k = M\bar{n}_{bk}, \quad (4)$$

где \bar{n}_{bk} — единичный вектор нормали к k -й площадке в ССК.

В процессе построения изображения осуществляется перебор всех площадок СГМ КА, видимых по направлению вектора \bar{v}_p . Предварительно к координатам вершин всех площадок и векторам нормалей к ним применяются нормирующие преобразования (3) и (4). В проекционной СК для оценки видимости k -й площадки достаточно проверить знак z -компоненты нормали к ней. Если $n_{kz} < 0$, то площадка видна, в противном случае — нет, т. е. отвернута от потока излучения.

В проекционной СК для каждой видимой площадки определяются координаты проекций ее вершин. Благодаря свойствам нормирующего преобразования никаких действий для этого выполнять не требуется, за исключением отбрасывания z -координаты. Однако значение z -координаты для одной из вершин каждой площадки сохраняется. Эта вершина с координатами \bar{a}_{kr} используется в дальнейшем в качестве опорной точки k -й площадки при расчете глубины пикселей в процессе построения изображения методом z -буфера.

Совокупность проекций вершин и соединяющих их ребер образует контур проекции площадки на картинную плоскость. Пиксели, попадающие внутрь этого контура, формируют изображение площадки или растр. Пиксель считается включенным в изображение, если его центральная точка попадает внутрь контура площадки, в противном случае — нет. В качестве примера на рис. 2 приведен растр треугольной площадки, заданной на картинной плоскости проекциями вершин A_1, A_2, A_3 .

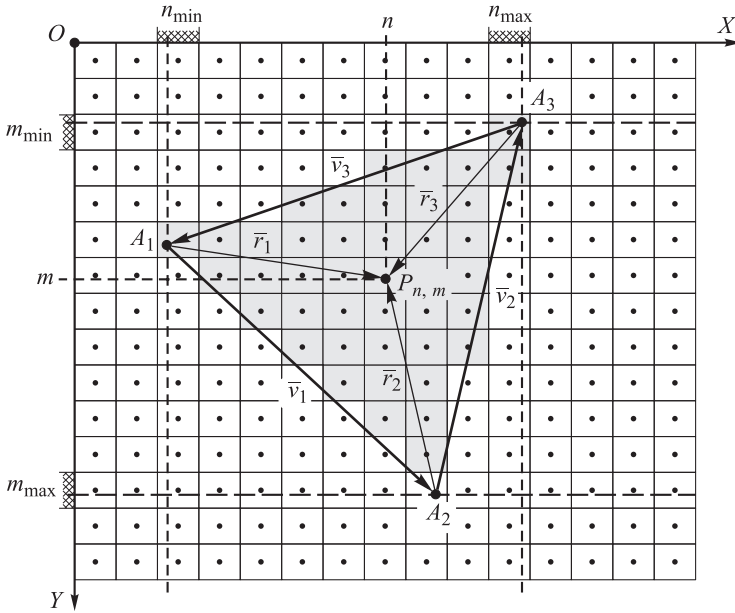


Рис. 2. Схема формирования изображения площадки на картинной плоскости

Построение раstra начинается с определения его границ в пикселях по горизонтали и вертикали. Левая n_{min} и правая n_{max} границы раstra в пикселях по горизонтали рассчитываются по формулам:

$$n_{min} = \lfloor x_{min} \rfloor + 1;$$

$$n_{max} = \lfloor x_{max} \rfloor + 1,$$

где x_{min} , x_{max} — минимальное и максимальное значения x -координаты среди вершин треугольника A_{1-3} ; $\lfloor \dots \rfloor$ — операция выделения целой части вещественного числа.

Нижняя m_{min} и верхняя m_{max} границы раstra в пикселях по вертикали рассчитываются аналогично границам по горизонтали с использованием минимального и максимального значений y -координаты среди вершин треугольника. Все пиксели из области, ограниченной парами целых чисел $n_{min} - n_{max}$ по горизонтали и $m_{min} - m_{max}$ по вертикали, последовательно проверяются на попадание внутрь контура проекции площадки. Для этого используется тест на принадлежность точки полигону [10], который реализуется следующим образом.

Вычисляются координаты центра пикселя — точки $P_{n,m}$ на картинной плоскости:

$$x_{P_{n,m}} = n - 0,5;$$

$$y_{P_{n,m}} = m - 0,5,$$

где n , m — номера тестируемого пикселя по горизонтали и вертикали.

На вершинах A_1 , A_2 и A_3 треугольника в картинной плоскости строятся векторы его сторон, образующие замкнутый контур:

$$\bar{v}_1 = \bar{a}_2 - \bar{a}_1;$$

$$\bar{v}_2 = \bar{a}_3 - \bar{a}_2;$$

$$\bar{v}_3 = \bar{a}_1 - \bar{a}_3,$$

где \bar{a}_k — координаты k -й вершины треугольника, $k = 1 \dots 3$.

Из каждой вершины треугольника в точку $P_{n,m}$ также строятся векторы:

$$\bar{r}_k = \bar{p}_{n,m} - \bar{a}_k,$$

где $\bar{p}_{n,m}$ — координаты центра пикселя (точки $P_{n,m}$).

Из рис. 2 следует, что точка $P_{n,m}$ находится внутри треугольника, если повороты всех векторов \bar{v}_k относительно вершин A_k до совмещения их с векторами \bar{r}_k выполняются против хода часовой стрелки. Это означает, что все векторы \bar{c}_k , полученные в результате векторных произведений парных векторов $\bar{v}_k \times \bar{r}_k$, будут направлены в одну сторону. Единственными ненулевыми компонентами векторов \bar{c}_k являются их z -компоненты:

$$c_{kz} = v_{kx} r_{ky} - v_{ky} r_{kx}.$$

Для принятия решения о нахождении центра пикселя внутри контура площадки достаточно проанализировать знаки z -компонент векторов \bar{c}_k . Если z -компоненты всех векторов отрицательны или равны нулю, то точка $P_{n,m}$ — внутри контура, если хотя бы одна из них положительна — нет. Данный тест может применяться также и для площадок с числом вершин больше трех.

Вследствие наличия экранирования у объектов сложной формы в картинной плоскости растры многих площадок могут накладываться друг на друга. Для корректного отображения таких объектов необходимо однозначно установить, какой площадке соответствует каждый пиксель. Критерием принадлежности пикселя изображению какой-либо площадки является минимум расстояния от картинной плоскости до точки пересечения проектора этого пикселя с площадкой. После нормирующего преобразования ближе к картинной плоскости расположены точки с минимальной z -координатой, часто называемой глубиной.

Область памяти, необходимую для хранения в процессе расчета текущих значений z -координаты для пикселей, называют буфером (откуда произошло название способа построения изображения объектов — метод z -буфера) или буфером глубины [9]. Алгоритм z -буфера реализован аппаратно в видеокартах и применяется при решении ряда задач [11, 12]. Графические процессоры обеспечивают высокое быстродействие при расчете самых сложных СГМ. При этом от исследователя требуются углубленные знания в области компьютерной графики. Вариант программной реализации z -буфера, предложенный в настоящей работе, предназначен для тех задач, где определяющими показателями являются надежность и универсальность применения, а быстродействие не считается критически важным. Кроме того, этот способ не накладывает никаких ограничений на форму площадок: это могут быть треугольники, четырехугольники, изопараметрические элементы.

Расчет площадей миделей КЭ КА с использованием z-буфера. Технически буфер состоит из двух матриц размером $N_e \times N_e$. Первая — матрица глубины — предназначена для хранения текущих значений глубины для пикселей, вторая — для номеров площадок, к изображению которых они принадлежат. Перед началом расчета матрица глубины заполняется значениями, гарантированно превышающими расстояние от картинной плоскости до самой удаленной от нее точки СГМ, а матрица номеров площадок обнуляется. Для пикселя с номерами n, m , прошедшего тест на принадлежность изображению обрабатываемой k -й площадки, вычисляется значение глубины $z_{n,m}$, т. е. расстояние от картинной плоскости до точки пересечения проектора этого пикселя с плоскостью площадки:

$$z_{n,m} = \bar{n}_k \cdot (\bar{a}_{kr} - \bar{p}_{nm}) / n_{kz},$$

где \bar{n}_k, n_{kz} — единичный вектор нормали к площадке в проекционной СК и его z -компонента; \bar{a}_{kr} — координаты опорной точки k -й площадки в проекционной СК.

Полученное значение глубины сравнивается с тем, которое имеется в буфере для пикселя с номерами n, m . Если новое значение $z_{n,m}$ окажется меньше имеющегося в буфере, то выполняются следующие действия:

- в ячейку матрицы глубины с индексами n, m помещается вычисленное значение $z_{n,m}$;
- в ячейку матрицы номеров с индексами n, m помещается номер обрабатываемой k -й площадки, которая с этого момента будет считаться ближайшей к картинной плоскости во фрагменте изображения, занимаемом пикселем.

После перебора всех площадок СГМ КА в буфере останутся номера только тех из них, которые являются полностью или частично видимыми по направлению лучистого потока. Визуально это соответствует удалению «невидимых частей» изображения. В качестве примера на рис. 3 приведено изображение СГМ КА, полученное с использованием описанного алгоритма.

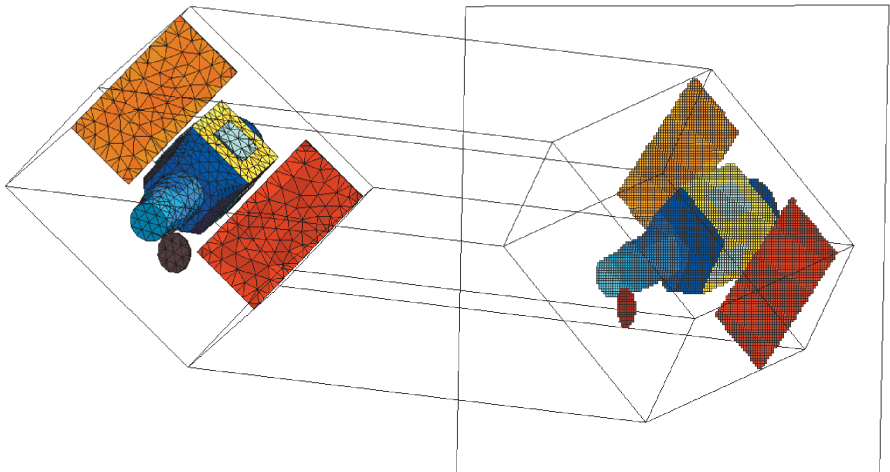


Рис. 3. Схема проецирования и изображение СГМ КА

Расчет площади миделя k -й площадки СГМ КА по отношению к потоку излучения проводится с использованием матрицы номеров площадок z -буфера. Для этого в области буфера в границах растра площадки подсчитывается число относящихся к ней пикселей:

$$N_k = \sum_{n=n_{\min}}^{n=n_{\max}} \sum_{m=m_{\min}}^{m=m_{\max}} \chi_{n,m},$$

где $\chi_{n,m}$ — функция принадлежности пикселя с номерами n, m растру k -й площадки: $\chi_{n,m} = 1$, если пиксель принадлежит растру, в противном случае $\chi_{n,m} = 0$.

Полученное значение N_k фактически является площадью миделя k -й площадки в безразмерном виде. Переход к размерной величине осуществляется путем умножения на площадь s^2 пикселя. Полные лучистые потоки к площадкам СГМ КА определяются суммой потоков от всех внешних источников. Для этого расчет миделей, следовательно, и построение изображений СГМ КА необходимо выполнить для каждого источника. Имея информацию о том, какие площадки СГМ аппроксимируют те или иные КЭ КА, можно определить падающие на них тепловые потоки.

Приведенный алгоритм был реализован на языке Фортран 95. Для оценки его быстродействия была проведена серия расчетов площадей миделей элементов КА для СГМ с разным числом площадок при различных значениях размера z -буфера. Тесты проводились на компьютере с центральным процессором AMD Phenom II X3720 2.8 ГГц, 8 ГБ оперативной памяти и операционной системой Microsoft Windows 7 × 64. Для компиляции программы использовался Free Software Foundation gfortran 4.7.0. Результаты тестирования приведены в таблице.

Время выполнения единичного расчета в зависимости от числа площадок СГМ КА и размера z -буфера

Число площадок СГМ	Время расчета (с) при различных значениях размера z -буфера (пиксели)			
	400 × 400	600 × 600	800 × 800	1000 × 1000
2000	< 0,001	0,015	0,031	0,063
3000	< 0,001	0,015	0,031	0,063
4000	0,001	0,016	0,032	0,064
5000	0,001	0,016	0,032	0,064

Результаты тестирования показывают, что время единичного расчета в исследованных пределах изменения влияющих на него параметров слабо зависит от числа площадок на внешней поверхности модели, а определяется главным образом разрешением изображения. Полученные оценки быстродействия позволяют сделать вывод, что расчет лучистых потоков к КЭ КА от Солнца и множества зон подсветки на поверхности Земли (до нескольких сотен) может быть выполнен за приемлемое время. Практика моделирования тепловых режимов

КА показывает, что для решения многих задач вполне достаточно той степени детализации геометрических моделей и их изображений, которые приведены в таблице.

Заключение. Разработан способ расчета потоков собственного теплового излучения Земли, прямого и рассеянного Землей солнечного излучения к КЭ КА с учетом их полного или частичного взаимного экранирования для текущей пространственной ориентации. Он основан на ортогональном проецировании элементов сеточных САД-моделей КА на плоскость и z-буфера, разработанном в области компьютерной графики. К достоинствам способа относятся простота программной реализации, приемлемая производительность и применимость к геометрическим конфигурациям КА любой сложности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козлов Л.В., Нусинов М.Д., Петров Г.И. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей его среды. М.: Машиностроение, 1971. 382 с.
2. Залетаев С.В., Копяткевич Р.М. Программный комплекс теплового проектирования и анализа тепловых режимов космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 4. С. 84–91.
3. Моделирование спектроэнергетических характеристик космических объектов в оптическом диапазоне / А.И. Богоявленский, А.А. Каменев, М.М. Полуян, А.А. Солуянов, С.И. Ханков // Радиопромышленность. 2014. № 1. С. 147–154.
4. Байва Ю.В., Лаповок Е.В., Ханков С.И. Методика расчета нестационарных температур космического объекта, движущегося по эллиптической орбите // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 6. С. 67–72.
5. Дзитолев А.М., Ханков С.И. Методика расчета коэффициентов облученности цилиндрического космического объекта подсветкой Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2014. № 1. С. 145–150.
6. Шилко И.И. Организация учета светового давления на поверхность космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2011. № 1. С. 123–125.
7. Палешкин А.В., Колесников А.В. Численный метод моделирования внешнего теплообмена космического аппарата с произвольной формой наружных поверхностей // Вестник МАИ. 2010. Т. 17. № 4. С. 81–89.
8. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 560 с.
9. Васильков Д.М. Геометрическое моделирование и компьютерная графика: вычислительные и алгоритмические основы. Минск: Изд-во БГУ, 2011. 203 с.
10. Ярошевич В.А. Компьютерная графика. М.: Изд-во МИЭТ, 2014. 68 с.
11. Кулясов П.С., Никулин Е.А. Ускорение вычислений форм-факторов при расчете освещенности сцены методом излучательности // Вестник Нижегородского университета. 2012. № 3. С. 184–188.
12. Шаенко А.Ю. Методика расчета теплообмена в радиационных экранах больших космических обсерваторий // Космонавтика и ракетостроение. 2011. № 1. С. 57–64.

Солюянов Андрей Аркадьевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (Российская Федерация, 197198, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 13).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Солюянов А.А. Расчет внешних тепловых потоков на космический аппарат методом z-буфера // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 2. С. 15–27. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-15-27

SPACECRAFT EXTERNAL HEAT FLOW ANALYSIS BY Z-BUFFER METHOD

A.A. Soluyanov

vinivka442@yandex.ru

Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Determining the external heat flow from direct sunlight to spacecraft is an important stage in analysis and design of the spacecraft thermal control. The Earth IR and albedo radiation provide the noticeable contribution in total spacecraft heating in case when a spacecraft is operating in Low Earth Orbit. The task gets significantly more complicated in case of complex spacecraft geometrical configuration in presence of mutual shading by spacecraft components. The zonal method is often applied to simplify calculations when visible terrestrial region is subdivided into a finite number of surface area zones. The radiation from each zone is approximated as a parallel beam is irradiated from a point source placed in the zonal center. Direct sunlight is considered to be a parallel beam from the point source as well, therefore it is possible to calculate the total external heating using the same approach. The key point of the approach implementation is to choose an algorithm for calculating the spacecraft external surface projected area facing radiation from each point of the source if there is a possibility of spacecraft components mutual shading. Known algorithms based on ray-tracing could experience a significant loss of performance being applied to complex models, especially containing components of non-regular shape. This paper presents a method for carrying out such calculations on a meshed spacecraft CAD model with its external surface subdivided into a finite number of faces of any kind (triangles, quadrangles or isoparametric faces). The method uses the z-buffer (or depth buffer) technique well-known in the field of computer graphics. Advantages of the method are straightforward implementation, applicability to a geometrical model of any complexity and acceptable performance which is not affected by the non-regularity of geometry

Keywords

Spacecraft, meshed geometrical model, mutual shading, pixel, z-buffer, depth buffer

REFERENCES

- [1] Kozlov L.V., Nusinov M.D., Petrov G.I. Modelirovanie teplovykh rezhimov kosmicheskogo apparata i okruzhayushchey ego sredy [Spacecraft and its environment thermal conditions simulation]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 382 p.
- [2] Zaletaev S.V., Kopyatkevich R.M. Software package of a thermal design and an analysis of spacecraft thermal conditions. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2014, no. 4, pp. 84–91 (in Russ.).
- [3] Bogoyavlenskiy A.I., Kamenev A.A., Poluyan M.M., Soluyanov A.A., Khankov S.I. Modeling for optical spectrum range energetic characteristics of space objects. *Radiopromyshlennost'* [Radio industry], 2014, no. 1, pp. 147–154 (in Russ.).
- [4] Baeva Yu.V., Lapovok E.V., Khankov S.I. Calculation method of the transient temperatures for moving space object on the elliptical orbit. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2013, no. 6, pp. 67–72 (in Russ.).
- [5] Dzitoev A.M., Khankov S.I. Calculation methods for irradiance coefficients of cylindrical space object by the earth radiation. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, no. 1, pp. 145–150 (in Russ.).
- [6] Shilko I.I. The organization of the light pressure on the satellite surface account. *Vestnik SibGAU*, 2011, no. 1, pp. 123–125 (in Russ.).
- [7] Paleshkin A.B., Kolesnikov A.B. Numerical method of modelling of external heat exchange of the space vehicle with any form of external surfaces. *Vestnik MAI*, 2010, vol. 17, no. 4, pp. 81–89 (in Russ.).
- [8] Nikulin E.A. Komp'yuternaya geometriya i algoritmy mashinnoy grafiki [Computer geometry and computer graphics algorithms]. Sankt-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2003. 560 p.
- [9] Vasil'kov D.M. Geometricheskoe modelirovanie i komp'yuternaya grafika: vychislitel'nye i algoritmicheskie osnovy [Geometric modeling and computer graphics: calculating and algorithmic principles]. Minsk, BSU Publ., 2011. 203 p.
- [10] Yaroshevich V.A. Komp'yuternaya grafika [Computer graphics]. Moscow, MIET Publ., 2014. 68 p.
- [11] Kulyasov P.S., Nikulin E.A. Accelerating the form factor computation in scene illumination calculations by the radiosity method. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod], 2012, no. 3, pp. 184–188 (in Russ.).
- [12] Shaenko A.Yu. Calculation method of heat exchange in radiation screen of large space observatories. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2011, no. 1, pp. 57–64 (in Russ.).

Soluyanov A.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Scientist, Mozhaisky Military Space Academy (Zhdanovskaya ul. 13, St. Petersburg, 197198 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Soluyanov A.A. Spacecraft External Heat Flow Analysis by z-Buffer Method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 2, pp. 15–27. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-2-15-27