

На правах рукописи

УДК 515.2



Куи Мин Хан

**Математическое и программное обеспечение
расчета затененности солнечных батарей
космических летательных аппаратов**

Специальность 05.13.18 - Математическое моделирование, численные
методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва - 2018

Работа выполнена на кафедре «Инженерная графика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Маркин Леонид Владимирович**, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Инженерная графика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)

Официальные оппоненты: **Мельников Виталий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (ЦНИИ-МАШ)

Локтев Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры "Инженерная графика" ФГБОУ ВО "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН".

Ведущая организация: АО "Научно-исследовательский центр автоматизированных систем конструирования" (НИЦ АСК)

Защита состоится «15» марта 2018 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.12 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, в аудитории 302.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, а также на сайте института по адресу:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=87024

Автореферат разослан « » января 2018 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый Совет МАИ.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.12, к.т.н., доцент

А.В. Старков

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

В данной работе рассматривается геометрическое моделирование размещения солнечных батарей на космических летательных аппаратах и солнечных концентраторах при колонизации планет и их спутников. Такая же проблема возникает и при проектировании гелиоэлектростанций на земле. В последнем случае солнечные батареи принято называть гелиостатами. Актуальность такого исследования обусловлена тем, что на земле гелиоэнергетика является источником экологически чистой энергии, а в космосе – зачастую единственным источником жизнеобеспечения внеземных поселений и обитаемых космических станций. Известно, что всего за три дня Солнце посылает на Землю столько энергии, сколько её содержится во всех разведанных запасах ископаемых топлив, а за 1 сек. – 170 млрд. Дж. Как по экономическим, так и экологическим причинам в мире все большее внимание уделяется возобновляемым источникам энергии, среди которых первое место занимает солнечная энергия. Потенциальные возможности энергетики, основанные на использовании непосредственного солнечного излучения, чрезвычайно велики. Роль же солнечной энергии в космосе возрастает многократно, так как она не требует для получения доставки больших масс углеводородного топлива и кислорода для его сжигания. Кроме того, использование солнечной энергии в космосе более эффективно, чем на земле, так как там отсутствует потери энергии в атмосфере и оседание пыли на панелях, снижающее выработку энергии до 40% .

В данной работе речь идет о полях концентраторов и солнечных батарей летательных аппаратов, не обеспечивающих слежение за изменением положения Солнца.

Повышение качества проектирования космических летательных аппаратов (КЛА) требует создания соответствующего алгоритмического и математического обеспечения. Поскольку в данной задаче решаются задачи размещения объектов и влияние этого размещения на прохождения солнечных лучей, то она по своей сути является задачей геометрической. Поэтому и методы ее решения следует искать в геометрическом моделировании размещения на космическом летательном аппарате (КЛА) солнечных батарей или солнечных концентраторов.

Объект исследования. Геометрические модели размещения солнечных батарей и определения эффективной поверхности освещенности при различных вариантах расположения источника освещенности и затеняющих объектов (корпуса КЛА, других солнечных батарей и т.п.).

Предмет исследования. Методики, геометрические модели, алгоритмы и программы расчета эффективной площади освещения солнечных концентраторов.

Цель исследования. Повышение качества проектирования КЛА (снижение сроков проектирования, повышение энерговооруженности КЛА и снижение массы КЛА за счет увеличения плотности эффективно работающих солнечных батарей).

Задачи исследования:

- сформулировать физическую, математическую и геометрическую постановку задачи размещения солнечных батарей КЛА;
- разработать геометрические модели описания формы КЛА и солнечных батарей, позволяющих оценить степень затененности обитаемым модулем, так и другими солнечными батареями;
- разработать алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА;
- разработать программы реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета;
- разработать алгоритмы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей;
- провести верификацию и исследовать эффективность разработанных геометрических моделей, алгоритмов и программ их реализации методом численного эксперимента;
- провести внедрение полученных результатов исследования в промышленность и учебный процесс ВУЗа.

Методы исследования: Теоретические исследования проведены на основе методов инженерной и вычислительной геометрии. В процессе исследования использованы методы математического моделирования, численного эксперимента, оптимизации и компьютерной графики в среде программирования C#.

Методологическую основу работы составляют методы геометрического и математического моделирования, классические методы математического программирования, дискретного анализа и теории множеств, теории алгоритмов. В математической постановке задача размещения солнечных батарей на КЛА рассматривается как оптимизационная задача.

Методологические и теоретические основы исследования основаны на фундаментальных трудах в области:

- метода геометрического моделирования, изложенные в работах отечественных ученых Валькова К.И., Голованова Н.Н., Денискина Ю.И., Иванова Г.С., Котова И.И., Михайленко В.Е., Осипова В.А., Полозова В.С., Похвалинского А.Б., Рвачева В.Л., Роткова С.И., Рыжова Н.Н., Стародетко Е.А., Тевлина А.М., Фролова С.А., Четверухина Н.Ф., Якунина В.И. и др, а также

зарубежных Поля де Кательджо, Роберта Фергюсона (Robert Fergusson), Стивена Кунса (Steven Coons), Пьера Безье (Pierre Bézier), Шарля Эрмитта (Charles Hermite), Исаака Шенберга (Isaac Jacob Schoenberg), Карла де Бура (Carl de Boor), Кена Версприла (Ken Versprille), Юджина Ли (Eugene Lee), Стива Гейзберга (Steve Ginsberg) и других.

- методов геометрического моделирования задач освещенности (инсоляции), изложенные в трудах Апресяна А., Бахарева Д.В., Глазкова А.Ф., Гусева Н.М., Дашкевича Л.Л., Дунаева Б.А., Иванниковой (Ревзиной) Н.В., Колтуна М.М., Куца О.К., Митрофановой С.А., Оболенского Н.В., Орловой Л.Н., Рудницкого А.Н., Суханова И.С., Трембача В.В., Штейнберга А.Я., Хейфеца А.Л.

- использования солнечной энергии в космическом пространстве, изложенные в трудах Барабанова Г.В., Ванке В.А., Виссарионова, Грилихеса В.А., Комкова В.А, Мельников В.М. и Харлов Б.Н., Кудрина И.О., Нариманова Е.А., Райкунова Г.Г., Скребушевского Б.С. и др.

- общей методики автоматизации проектирования, изложенной в трудах Вермишева Ю.Х., Горелика А.Г., Королева А.Л., Норенкова И.П., Семенкова О.И., Сироты А.А., Падалко С.Н., Прхорова А.Ф., Стояна Ю.Г., а также ряда зарубежных авторов - Гардана И. (Yvon Gardan) и Люка М. (Michel Lucas) , Грувера М. (Mikell P. Groover) и Зиммерса Э. (Emory W. Zimmers), Принса М., Шпура Г. (Gunter Spur) и Краузе Ф. (Frank-Lothar Krause) и других.

- методики автоматизации компоновки авиационной техники, изложенная в трудах Волошина В.В., Гаврилова В.Н., Егера С.М., Лисейцева Н.К. и Самойловича О.С., Мальчевского В.В., Осина М.И., Куприкова М.Ю. и др.

- методов дискретного моделирования геометрических объектов в работах Зозулевича Д.М., Горелика А.Г., Герасименко Е.П., Клишина В.В., Корн Г.В., Локтева М.А., Лоторевича Е.А., Наджарова К.М., Ньи Ньи Хтуна, Пашенко О.Б., Ситу Лина, Рогозы Ю.А., Толока А.В., а также ряда иностранных авторов – Гаргантини И. (Gargantini I.), Реквишы А.А.Г., (Requcha A.A.G.) и ряда других.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. На основании исследования физической, математической и геометрической постановки задачи размещения солнечных батарей КЛА и выбран и обоснован рецепторный метод геометрического моделирования задачи внешней компоновки солнечных антенн КЛА.

2. Разработаны рецепторные геометрические модели описания формы КЛА и солнечных батарей, позволяющих оценить степень затененности обитаемым модулем, так и другими солнечными батареями.

3. Разработаны алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА;

4. Разработаны на языке C# программы реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета.

5. Разработаны методики и алгоритмы и программы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей, основанные на методе сужающейся окрестности.

Практическая значимость и внедрение.

Результаты исследования данной диссертационной работы использованы в практике отработки конструкции КЛА в Научно техническом центре (НТЦ) "Элис" Национального института авиационных технологий (НИАТ), а также в учебном процессе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в курсе для слушателей факультета повышения квалификации преподавателей (ФПКП) "Инженерное геометрическое моделирование как методологическая основа подготовки специалистов в высокотехнологичных областях промышленности"

Апробация результатов исследования. Результаты проведенных исследований докладывались на следующих международных научных конференциях: конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2014", г. Москва, МАИ, 22-24 апреля 2014; конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2015", г. Москва, МАИ, 21-23 апреля 2015; конф. "Авиация и космонавтика-2015", г. Москва, МАИ, 17-21 июня 2015, конф. "Гагаринские чтения-2017", г. Москва, МАИ, 5-19 апреля 2017.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Рецептронные геометрические модели внешней компоновки солнечных антенн КЛА, позволяющие оценить их степень затененности как другими объектами КЛА (например жилыми модулями), так и другими солнечными антеннами.

2. Алгоритмы оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА при различных положениях источника света относительно КЛА.

3. Программы на языке C# реализации оценки эффективной площади освещенности солнечных батарей КЛА, включая графическую оболочку визуализации результатов расчета.

4. Методики и алгоритмы и программы оптимизации размещения конструктивных элементов КЛА для обеспечения максимально эффективного функционирования солнечных батарей, основанные на методе сужающейся окрестности.

Публикации по теме диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, из них 3 - в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, 1 - научная монография, опубликованная в международном издательстве.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, 3 глав, основных результатов и выводов, заключения и библиографического списка литературы. Общий объем диссертации составляет 105 страниц, 87 рисунков. Библиографический список включает в 289 наименований, в том числе 95 иностранных литературных источников.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы научная новизна и практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту.

В разделе 1 проведен анализ особенностей функционирования солнечных батарей на стационарных гелиостанциях и на КЛА. Показано, что взаимное затенение солнечных батарей, показанное, например, на рисунке 1 (МКС), приводит к значительному уменьшению их эффективности, и, как следствие, проблемами эксплуатации всего КЛА. Поэтому на стадии проектирования КЛА оценка степени затененности солнечных батарей друг другом и другими элементами КЛА является актуальной задачей.



Рисунок 1 - Затенение солнечных батарей на международной космической станции (МКС)

Проведено обоснование расчетной модели, в которой примем, что на солнечные батареи КЛА суммарной площадью S с некоторого направления W падает поток солнечной энергии (рисунок 2 а). Тогда со стороны потока солнечной энергии (направления W) КЛА будет виден как некоторая аксонометрическая проекция (рисунок 3 б). Очевидно, что видимая с этого направления площадь солнечных батарей S' будет меньше их реальной площади S , то площадь S' будет в данном случае именно той «рабочей» или эффективной площадью, т.е. той площадью солнечных батарей, которая перпендикулярна потоку энергии. Очевидно, что мы хотим, чтобы солнечные батареи работали максимально эффективно, поэтому наша целевая функция $S' \rightarrow \max$.

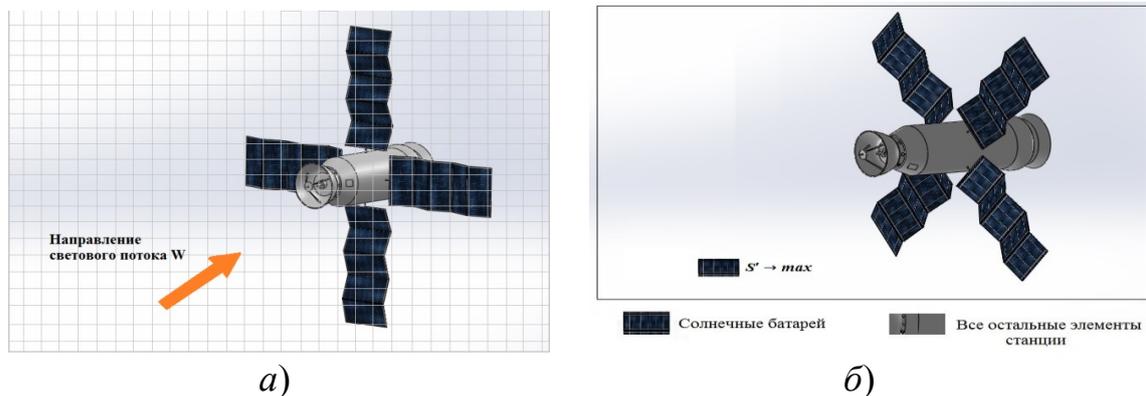


Рисунок 2 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (б)

Показано, что с математической точки зрения задачу исследования можно рассматривать как задачу оптимизации размещения солнечных батарей КЛА к задаче математического программирования. Предположим, что у нас имеется пространство размещения солнечных батарей Ω , в котором нам необходимо разместить и ориентировать n солнечных батарей. Полученное решение (один из возможных его вариантов) обозначим X . С учетом установленной этим решением X конкретной геометрии солнечных батарей КЛА и их расположением относительно самой КЛА из области допустимых решений Ω и ориентацией самой КЛА относительно потока энергии W (в каждый момент времени t каждая из n солнечных батарей будет иметь эффективную площадь поглощения энергии $s_i(t)$, а все вместе в данный момент времени $-S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n s_i(t)$). Наша цель – получить в данный момент (т.е. при данной ориентации КЛА) максимальную энергию солнца, определяемую максимальной эффективной площадью солнечных батарей, что можно записать в виде выражения

$$\underset{P_x \rightarrow \min}{\text{Max}} S_{\Sigma}(t) \text{ для } X \subset \Omega.$$

Из этого выражения следует, что максимум энергии должен быть получен при дополнительных ограничениях – варианте X размещения гелиостатов в области допустимых решений Ω и минимизации потерь энергии P_x , обусловленных взаимным затенением солнечных батарей как солнечными батареями, так и самим КЛА. Очевидно, что требование принадлежности X области допустимых решений Ω содержит внутри себя еще множество дополнительных ограничений – как общих (минимизация занимаемой площади), так и конкретных ограничений, обусловленных, например, неплоскими панелями солнечных элементов, площадями, занятыми дополнительными силовыми элементами на них, не участвующих в выработке электроэнергии и т.п.).

Очевидно, что максимальная энергия вырабатывается солнечными батареями тогда, когда они не затеняются сами корпусом космической станции и не затеняют друг друга. Если они конструктивно сделаны поворотными, то они должны быть ориентированы перпендикулярно направлению солнечных лучей.

Построение геометрических и оптимизационных моделей, учитывающих все эти факторы, и составляют предмет настоящего исследования.

Путем анализа литературных источников показано, что используемые в настоящее время все методы инсоляционных расчетов принято делить на две группы – геометрические и энергетические. С помощью геометрических методов можно определить продолжительность инсоляции или затенения участка, помещения или отдельной точки, характер перемещения солнечных лучей и т.п. Такой подход использован в работах Грилихеса В.А., Хейфеца А.Л. и ряда других ученых. Энергетические же методы, разработанные в трудах Штейнберга А.Я., Гусева Н.М. и др. направлены на расчет непосредственно солнечной радиации (энергии Солнца) и позволяют определить количество тепловой и световой энергии солнечных лучей в каждый момент времени на участке с определенным географическим положением.

Методы первой группы основаны на аппарате начертательной геометрии, так как солнечные лучи распространяются прямолинейной. Исходными данными для таких задач является направление солнечного луча по отношению к исследуемому объекту. Направление луча, в свою очередь, определяется положением солнца, в условиях земной поверхности однозначно определяемым тремя параметрами – географическая широта местности, дата и время. По примерно такой же траектории движется солнце и в космических поселениях. Что же касается КЛА, то положение Солнца (как источника энергии) однозначно описывается тремя углами Эйлера в системе координат КЛА (в соответствии с ГОСТ 20058-80).

Задача оценки взаимного затенения объектов в пространстве являются традиционными в строительстве и архитектуре (задачи инсоляции). Под **инсоляцией** (от латинского *in solo* – выставляю на солнце) в технике принято понимать облучение поверхностей солнечным светом (солнечной радиацией). Разработка методов решения задач инсоляции в основном была завершена в 70 гг. прошлого столетия. В эти годы трудами ряда советских ученых (Д.В. Бахарев, Х.А. Беккет, Б.А. Дунаев, Г. Плейжел, Г. Марти, Д.С. Масленников, Н.В. Оболенский, А.М. Рудницкий, М. Тваровский, В.Т. Шимко) были систематизированы методы пространственно-временного расчета инсоляции и учета экранирования с использованием методологического аппарата начертательной геометрии. Ручной способ расчета продолжительности инсоляции, представленный в этих трудах, конечно же устарел в XXI веке информационных технологий. В настоящее время созданы алгоритмы и компьютерные программы, позволяющие рассчитывать любые характеристики инсоляции. Известны отечественная компьютерная программа расчета инсоляции СОЛЯРИС, LARA_02 "Программа расчета инсоляции и естественного освещения" и японская программа MicroShadow for ArchiCAD, реализующая ручной метод ортогонального проецирования. Такой подход использован и в других известных нам работах Грилихеса В.А., Хейфеца А.Л. и ряда других ученых-геометров, написанные на языке AutoLISP как программное приложение к пакету AutoCAD.

Так как задача автоматизации расчета взаимного затенения является задачей геометрического моделирования, то в разделе 1 рассмотрены основные методы геометрического моделирования объектов космической техники и методов их визуализации.

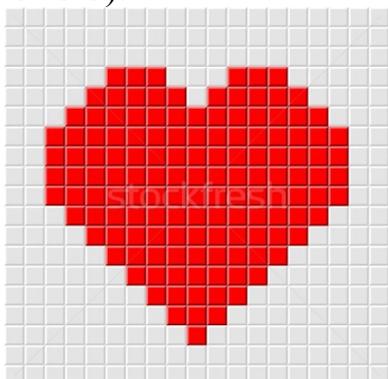
В разделе 2 обосновано использования для решения поставленной задачи рецепторных геометрических моделей. Пространство E^3 в, котором ведется моделирование, называется *дискретным* или *рецепторным*, а геометрическая модель, формируемая в таком пространстве, соответственно *дискретной* или *рецепторной моделью*.

Англоязычным аналогом термина "рецептор", используемым в зарубежной научной литературе, является слово "Воксель" - "voxel" (аббревиатура от слов "VOlumatic" и "piXEL"), т.е. трехмерный пиксель. Хотя в настоящее время и в русскоязычной литературе все чаще используется этот термин, но мы в данном исследовании будем использовать русскоязычный термин "рецептер", впервые введенный Зозулевичем Д.М. В литературе рецепторный метод имеет и другие названия («матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.).

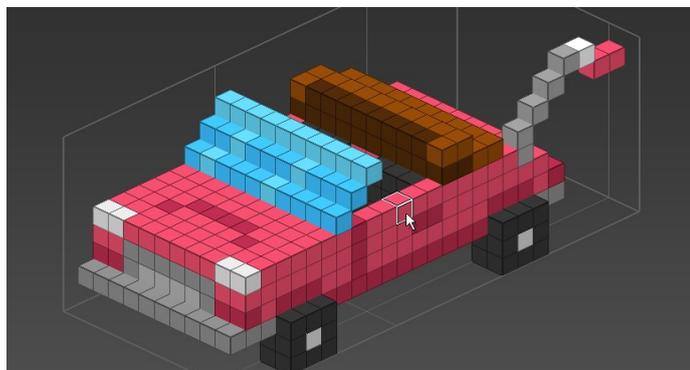
В основу рецепторного метода положено приближенное представление геометрического объекта в поле или пространстве рецепторов. Для плоского случая поле рецепторов представляет собой однородную прямоугольную сеть $m \times n$, каждая клетка которой рассматривается как отдельный рецептор, который может иметь два состояния – «0» или «1». Математически рецепторная геометрическая модель описывается множеством $A = \{a_{i,j}\}$, где

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если рецептор возбужден,} \\ 0, & \text{если рецептор не возбужден} \end{cases}$$

Рецептор считается невозбужденным, если через него не проходит граница объекта и он не принадлежит внутренней области (рисунок 3 а). Трехмерные объекты описываются трехмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $m \times n \times p$ (рисунок 3 б).



а)



б)

Рисунок 3 - Рецепторная модель 2D-тела (а) и 3D-тела (б)

Рецепторный метод геометрического моделирования был предложен в начале 70-х годов прошлого века белорусским ученым Зозулевичем Д.М., но в те он годы не получил распространения из ограниченных возможностей ЭВМ по

памяти и быстройдействию. В дальнейшем, в связи с развитием производительности вычислительной техники, рецепторные геометрические модели нашли свое практическое применение. Исследование и разработка рецепторных геометрических моделей для различных случаев применения была проведена в работах отечественных ученых Горелика А.Г., Герасименко Е.П., Клишина В.В., Корн Г.В., Локтева М.А., Лоторевича Е.А., Ньи Ньи Хтуна, Пащенко О.Б., Рогозы Ю.А., Ситу Лина, Толока А.В. и его учеников, а также ряда иностранных авторов – Гаргантини И. (Gargantini I.), Реквишы А.А.Г., (Requcha A.A.G.) и ряда других.

Рецепторный метод имеет как свои достоинства, так и недостатки. К очевидным недостаткам следует отнести дискретность модели и потребность в больших объемах компьютерной памяти для своей реализации, невозможность исследования инженерно-дифференциальных характеристик поверхности объекта, что, впрочем, не мешает создавать из кубиков вполне узнаваемые объекты сложных технических форм.

Рецепторные геометрические модели не требуют для своей реализации сложных формул или логических построений. Однако их практическая реализация обладает своей, специфической сложностью. Главной сложностью использования рецепторных геометрических моделей (РГМ) является то, что они никогда не являются изначальными. Исходные объекты, с которыми работает конструктор, являются, как правило, параметрическими геометрическими моделями, т.е. задающими вид объекта и его параметры. Проектант работает с параметрической моделью, легко определяемой из чертежа. Именно по этому принципу работают все современные системы геометрического моделирования. Описание параметрической модели имеет вид $P=f(\delta, \tau)$,

где δ - постоянная часть описания (задание типа примитива);

τ - переменная часть описания (задание размеров примитива)

Таким образом, рецепторную модель можно рассматривать исключительно как «внутримашинную». Поэтому возникает необходимость в дополнительном программном модуле «Параметрическая модель» ↔ «Рецепторная модель». Вопросы такого преобразования решены в работах Г.В.Корн, Ньи Ньи Хтуна и Ситу Лина. Однако анализ этих работ показывает, что каждый из этих авторов осуществлял такое преобразование в соответствии со своими задачами исследования, т.е. решал эту проблему "под себя". Поэтому общие методы преобразования «Параметрическая модель» ↔ «Рецепторная модель» нам неизвестны.

Безусловным же достоинством РГМ является уникальная легкость определения условия взаимного непересечения (УВН) уже размещенных объектов – если значение конкретного рецептора «0», то он доступен для размещения, если «1» - то он уже кем-то «занят». Именно эти причины, а также увеличение вычислительной мощности современных компьютеров побудили в последние годы интерес к РГМ как во всем мире.

Особенностью нашего подхода является то, что мы будем использовать в расчетах не классическую рецепторную матрицу (заполненную "0" и "1"), а

многозначную, в которую добавлены дополнительные коды. Конкретно она будет трехзначной – «0» - свободное пространство, «1» - пространство, занятое космической станцией, «2» - пространство, занятое солнечными батареями (рисунок 4 а). В этом случае элементы КЛА будут записаны в рецепторную матрицу кодами, показанными на рисунке 4 б.

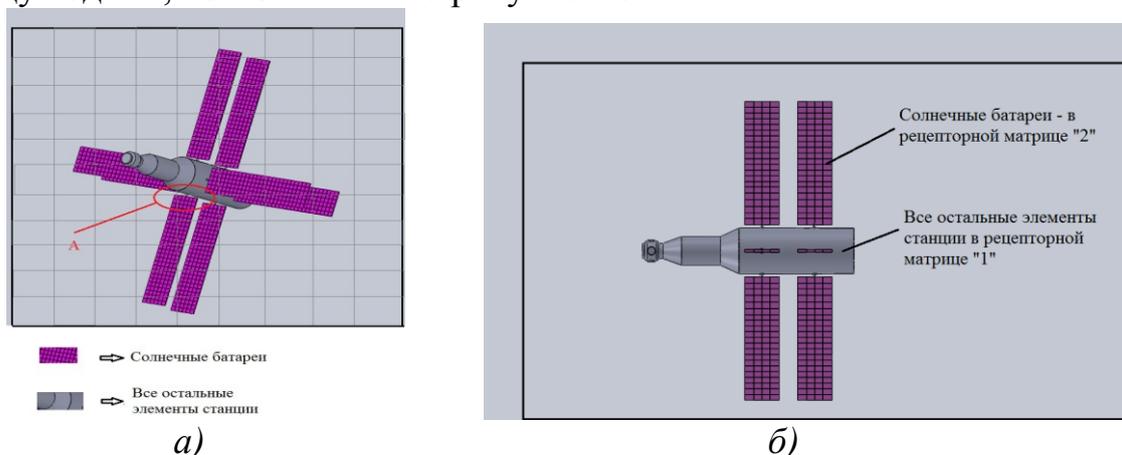


Рисунок 4 - Представление КЛА многозначной рецепторной матрицей

Использование многозначной рецепторной геометрической модели КЛА для проведения расчетов затененности производится использованием следующих операций. При направлении потока энергии W параллельно координатным осям КЛА и рецепторной матрицы, в которую он загружен. Будем сканировать рецепторную матрицу по слоям вдоль координатной плоскости от начала до конца рецепторной матрицы так, как это показано на рисунке 5 а. Вид среза рецепторной матрицы толщиной в 1 рецептор в каждом срезе даст нам дискретный образ КЛА примерный вид которого показан на рисунке 5 б.

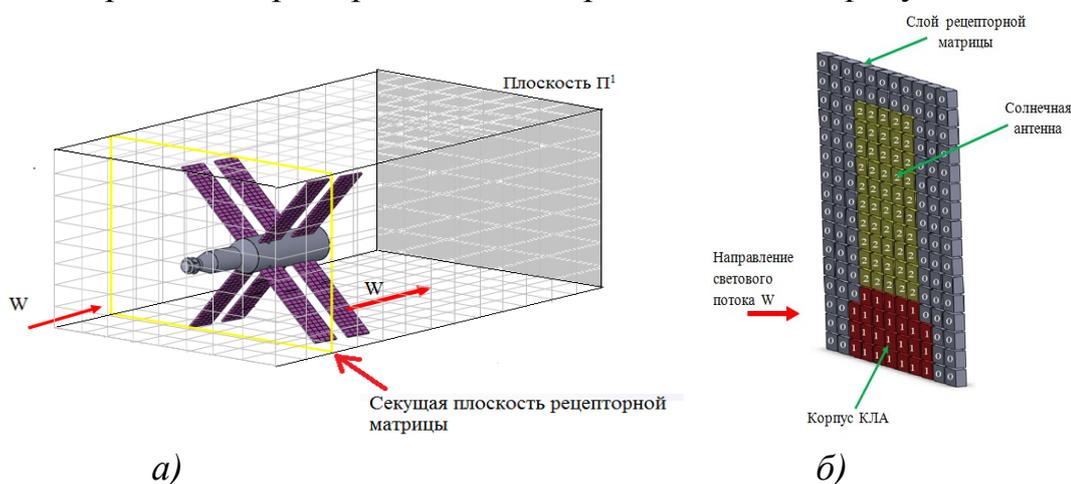


Рис 5. Сканирование рецепторной матрицы (а) и геометрический образ, получаемый на срезе (б)

Однако при всей простоте и очевидности такой геометрической модели подсчета площадей, она обладает очевидными недостатками. Если размеры рецепторов относительно меньше, чем те, которые показаны на рисунке 5 б, через объем солнечной батареи могут проходить не один, а несколько слоев рецепторной матрицы. В этом случае каждый слой "увидит" солнечную батарею и заполнит область пересечения с ней кодами "2" (рис. 6 а), а потом необоснованно

внесет эти площади на каждом срезе в общую сумму площадей солнечной батареи.

Другой недостаток такой модели показан на рисунке 6 б. Если солнечные батареи расположены друг за другом, то в нашей модели площади всех 3-х солнечных батарей, показанных на рисунке 6 б, нашей моделью будут учтены и необоснованно добавлены в общую эффективную площадь солнечных батарей. Хотя что по направлению потока энергии W эффективно работает только 1-я батарея, а остальные ей полностью заэкранированы и в расчет эффективной площади учитываться не должны.

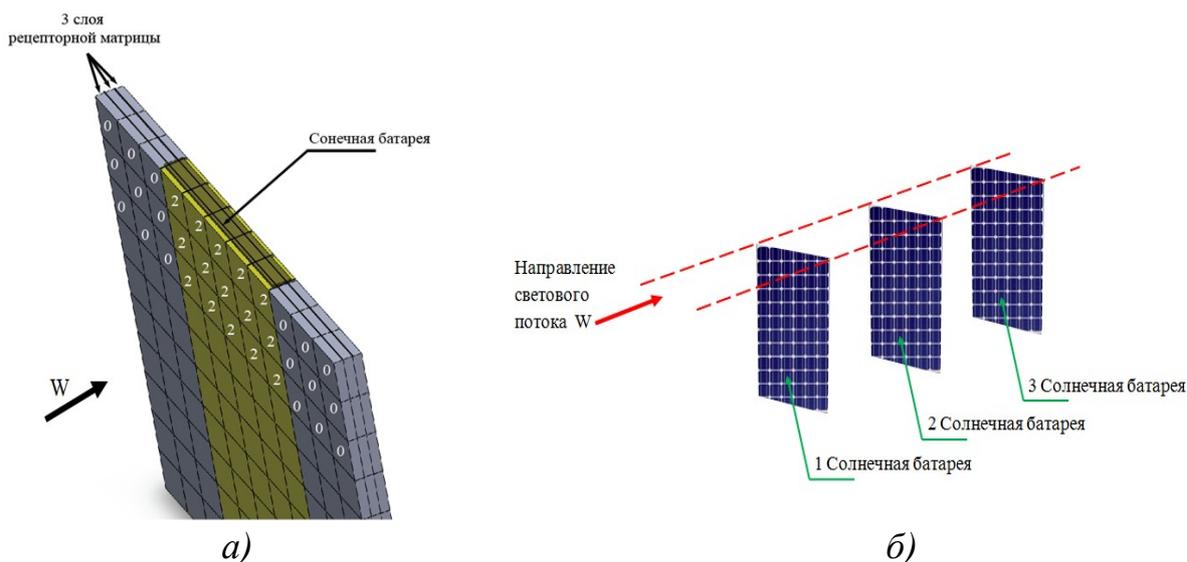


Рисунок 6 - Источники ошибок геометрической модели: а - прохождение многих слоев рецепторной матрицы; б - экранирование солнечных батарей по направлению потока энергии W

Все это требует усложнения описанной геометрической модели, исключая необоснованный повторный учет заэкранированных объектов. Для этого в рецепторной матрице использован дополнительный код "3", который исключит учет площадей всех последующих рецепторов по данному направлению. Укрупненная схема алгоритма такой модифицированной модели представлена на рисунке 7. Такая же операция проводится и для корпусных элементов КЛА, которые также затеняют все последующие за ними объекты.

В результате работы этого алгоритма элементы КЛА получают коды, показанные на рисунке 8 а, а рецепторная матрица пример вид, показанный на рисунке 8 б. Очевидно, что в модифицированной (4 - х значной) рецепторной модели рецепторы с кодом "3" ни в каких расчетах площадей не участвуют.

Важнейшим вопросом геометрического моделирования задачи взаимного затенения элементов КЛА является ориентация самого КЛА относительно направления падающего потока энергии W . Изображенная на рисунке 5 а секущая плоскость в рецепторной матрице перемещалась ортогонально положению станции, что на практике бывает лишь в том случае, если станцию строго ориентирована по направлению "на Солнце", что бывает крайне редко.

Поэтому в исследовании рассмотрен более общий случай - когда положение КЛА не будет соосно направлению падающей солнечной энергии (рисунок 9 *а*). В этом случае вид КЛА со стороны падающей солнечной энергии будет таким, как показано на рисунке 9 *б*, но и в этом случае мы хотели бы, чтобы эффективная (незатененная) площадь солнечных батарей S стремилась бы к максимуму.

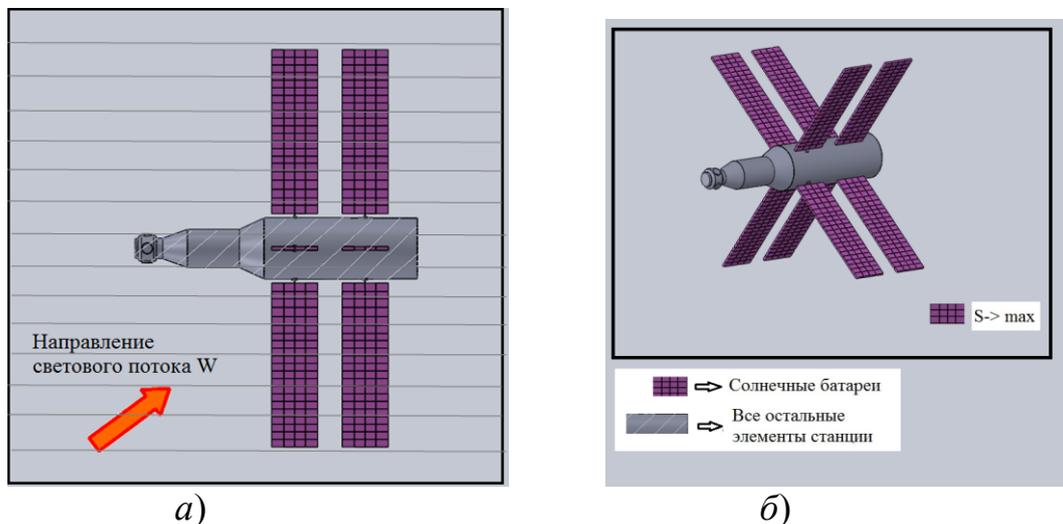


Рисунок 9 - Положение КЛА относительно Солнца (*а*) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (*б*)

В этом случае наши расчеты усложняются, но мы для их облегчения используем следующий прием – разместим КЛА в рецепторной матрице так, чтобы направление источника света W совпадало с направлением граней рецепторной матрицы (рисунок 10 *а*), а сам КЛА находился в рецепторной матрице под некоторыми углами относительно граней, соответствующим его ориентации в пространстве относительно вектора W . Такой поворот достигается использованием элементарных формул аналитической геометрии поворота осей координат. Углы наклона КЛА относительно координатных осей рецепторной матрицы будем рассчитывать по требованиям ГОСТ Р 51794-2008 – "Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек".

Вид на КЛА со стороны солнечного потока энергии показан на рисунке 10 *б*.

Одно из положительных свойств рецепторных геометрических моделей – возможность быстрого расчета сумм значений рецепторов. Имея на каждом срезе плоскую рецепторную матрицу типа изображенной на рисунке 10 *б*, мы можем рассчитать суммарное значение «двоек» и тем самым, эффективную площадь солнечных батарей для конкретной геометрии КЛА при его конкретной ориентации относительно направления потока энергии Солнца.

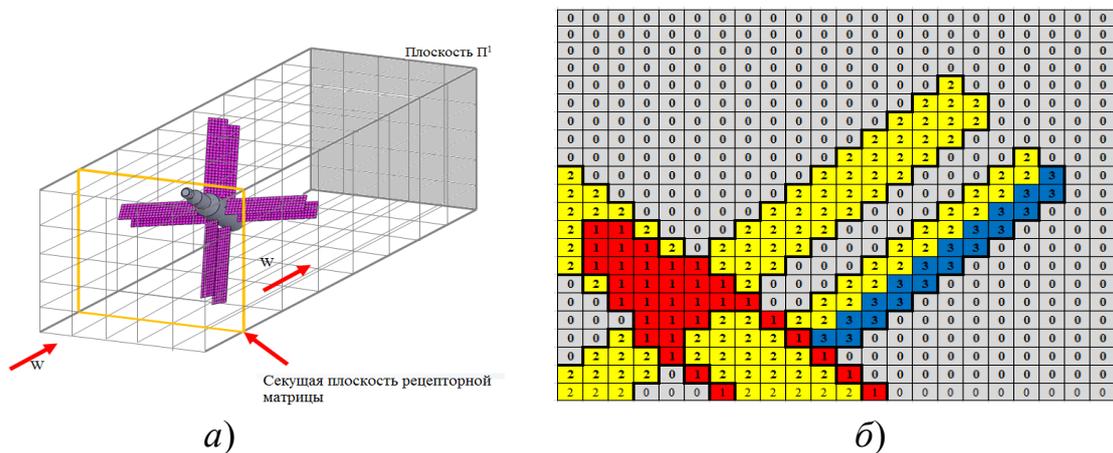


Рисунок 10 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид итогового геометрического образа проекций элементов КЛА на плоскость проекций П' (б)

На основании модифицированной геометрической модели был создан программный комплекс, реализованный на языке С#, позволяющий моделировать эффективную площадь солнечных концентраторов. При этом разработана графическая оболочка, позволяющая увидеть численное значение полученных результатов. Пример работы такого комплекса представлен на рисунке 11.

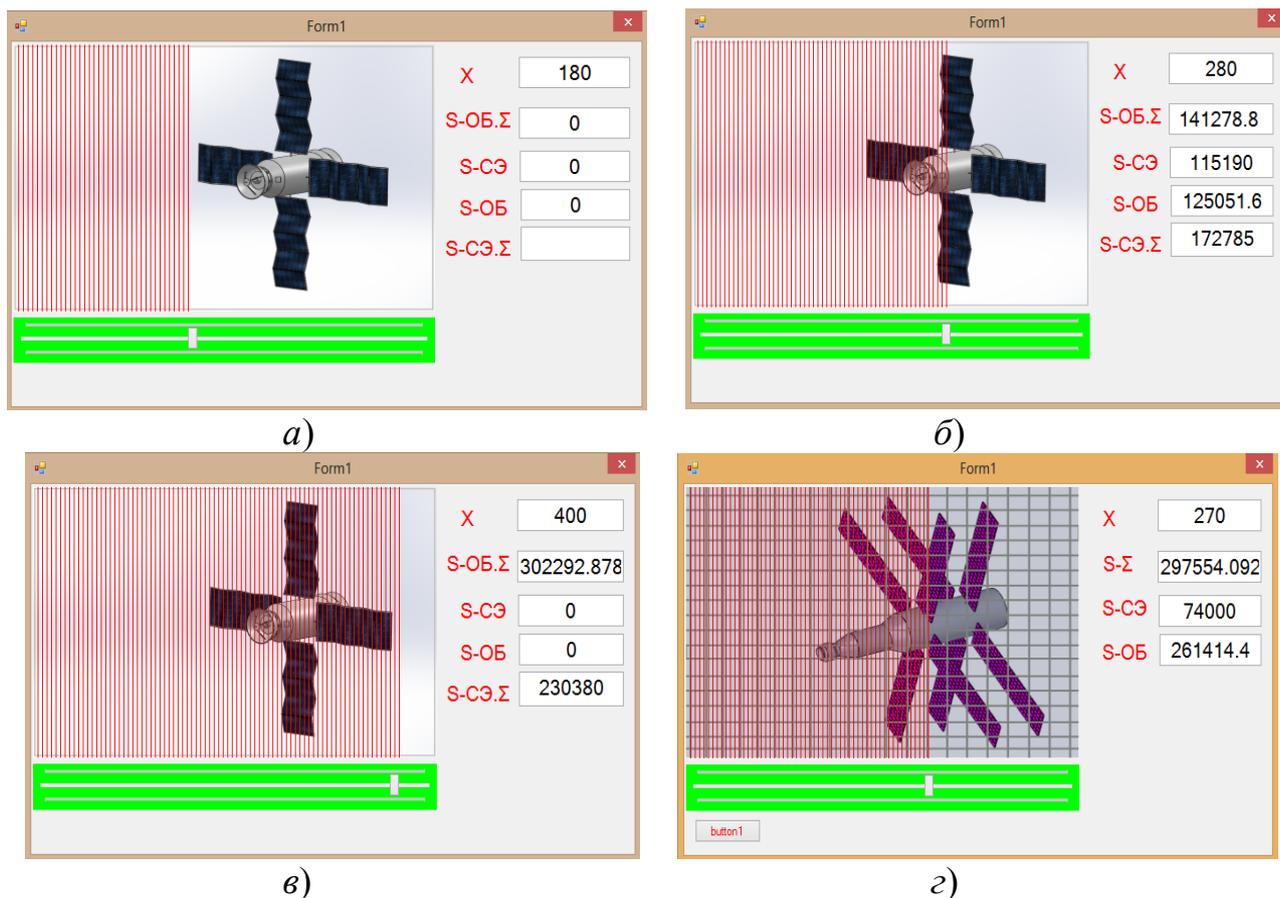


Рисунок 11 - Этапы сканирования 3D модели КЛА наклонного положения для вычисления площадей сечений солнечных батарей и корпуса КЛА (а...в); г - использование сканирующего алгоритма для КЛА с более сложной геометрией солнечных батарей

Использование разработанной и модифицированной геометрической модели расчета эффективной площади солнечных батарей при заданной исходной геометрии КЛА и его ориентации относительно Солнца позволяет нам построить как график изменения эффективных площадей по дистанции сканирования сечений так и суммарную эффективную площадь. Таким образом, мы получили результат проверочного расчета эффективной площади солнечных батарей для КЛА заданной формы и геометрии при заданном ракурсе его освещения Солнцем. Такой результат имеет самостоятельную научную и практическую ценность, но при этом возникает вопрос оптимальности полученного результата - насколько удачны исследованная нами форма и расположение солнечных батарей X_i из множества допустимых решений Ω и нельзя ли улучшить значение S_{Σ} выбрав какое либо другое конструктивное решение X_j ?

Рассмотрим это на примере простейшего конструктивного решения X_i , изображенного на рисунке 12. При заданном ограничении на область допустимых конструктивных решений Ω в виде заданной общей площади солнечных батарей S их конструктивное исполнение будет определяться тремя параметрами - l - расположением передней кромки солнечных батарей в системе координат КЛА; h - длиной одной панели и b - шириной одной панели. Параметр l , не влияющий на площадь S , также должен будет нами учитываться, так как оказывает существенно влияние на затенение батарей корпусом КЛА.

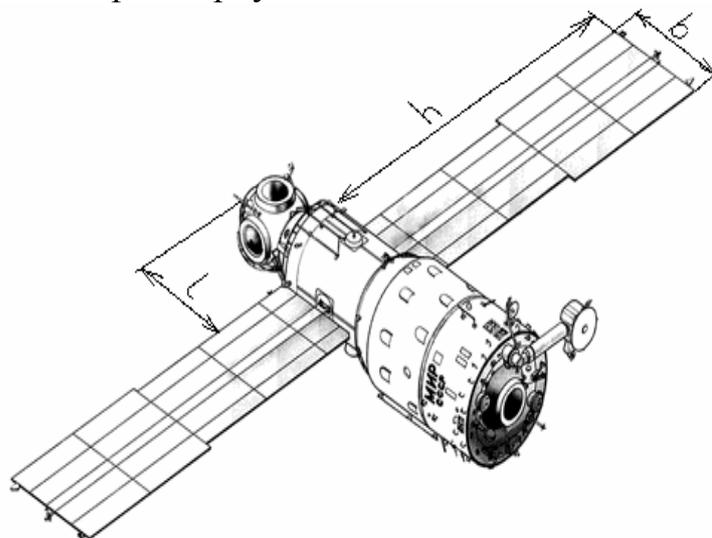


Рисунок 12 - Параметры простейшего конструктивного исполнения солнечных батарей (на примере КЛА "Союз")

В общем случае конкретное конструктивное исполнение X будет функционалом достаточно большого количества конструктивных параметров a_1, a_2, \dots, a_n , $X=f(a_1, a_2, \dots, a_n)$. Очевидно, что на каждый из конструктивных параметров a_i будут наложены ограничения (например, параметр расположением передней кромки солнечных батарей l на может превышать общую длину КЛА).

Поэтому следующей задачей исследования является выбор метода оптимизации функции (строго говоря функционала) X из допустимого множества

конструктивных параметров Ω , описываемых совокупностью независимых параметров a_1, a_2, \dots, a_n . Очевидно, что с учетом сложности поставленной задачи и разнообразием конструктивных исполнений КЛА нам не удастся построить непрерывные аналитические функции цели и использовать в расчетах градиентные методы оптимизации. Нашей задачей является определение глобального экстремума или приближенного к нему значения) многоэкстремальной функции в пространстве \mathcal{H}^n , для которой сравнительно просто находить значения самой функции, но невозможно описать ее аналитически и произвести полный перебор локальных экстремумов в силу большого их количества. Примерный вид целевой функции X для простейшего двумерного случая приведен на рисунке 13. Отсутствие аналитического описания исследуемой функции исключает использование градиентных методов поиска экстремума, поэтому единственным способом поиска экстремума для нас остается слепой случайных поиск. В нем случайным образом подбирается и разыгрывается совокупность параметров $\{a_{ij}\}$ из области допустимых значений параметров. Для этой совокупности параметров вычисляется значение функции цели, а из набора комбинаций исходных данных запоминается рекордное значение функции цели и совокупность параметров, ему соответствующих.

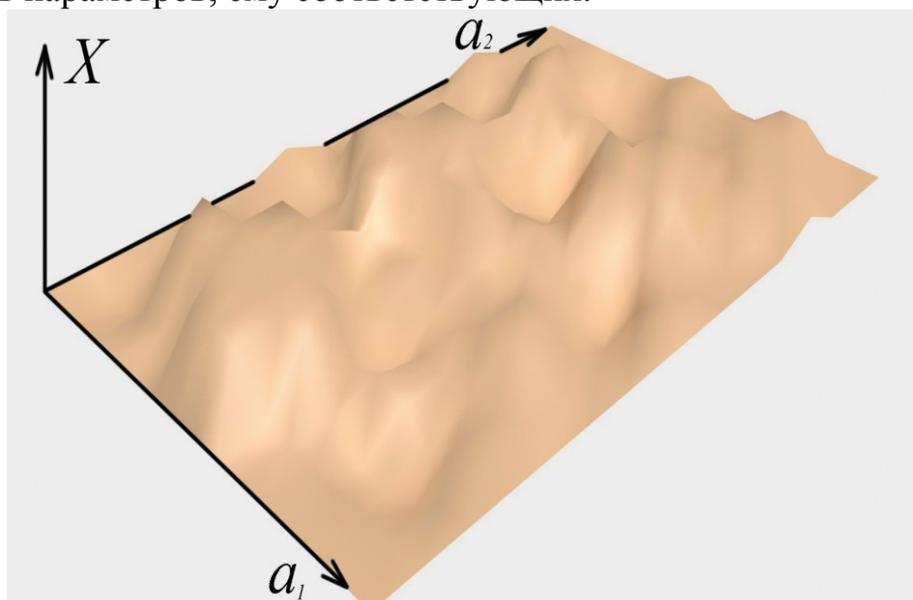
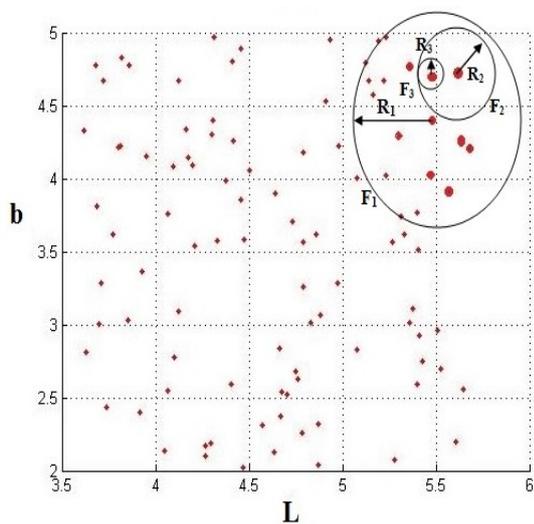


Рисунок 13 - Примерный вид функции цели X для 2-х переменных

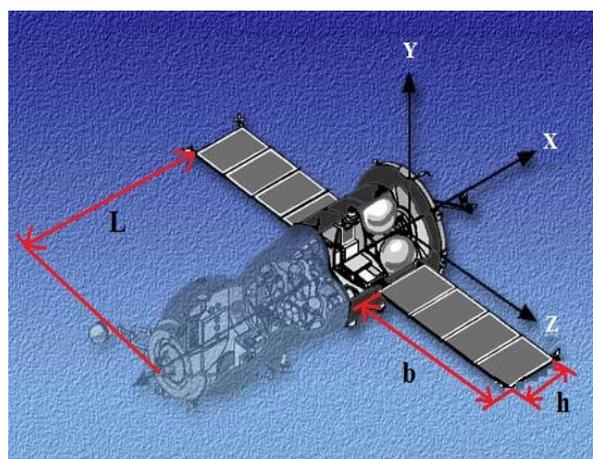
Учитывая "непредсказуемость" поведения оптимизируемой функции будем искать рациональные решения среди методов имитационного моделирования. Известных попытки модификации слепого поиска, из которых нам кажется наиболее удачным для нашей задачи методу сужающихся окрестностей, предложенный Стояном Ю.Г. и Соколовским. Суть метода заключается в том, что случайным образом выбираются комбинации переменных a_{1i} и a_{2j} , для которых вычисляется значение целевой функции X_{ij} . Среди множества значений целевой функции X_{ij} выбирается рекордное и дальнейших поиск значения целевой функции X производится уже вблизи этого рекордного значения. Таким образом, в этом методе уточнение решения достигается сужением диапазона изменения

переменных вокруг найденного решения. Описанный метод оптимизации не гарантирует нам достижения глобального оптимума целевой функции, поэтому мы вправе говорить о получении таким способом не глобального, а одного из локальных оптимумов функции X . Таким образом мы получим не оптимальное, а рациональное решение поставленной задачи. Учитывая, что оно справедливо лишь при строго определенном направлении падающего солнечного света нас не должно это сильно огорчать.

Пример процедуры оптимизации расположения солнечных батарей для КЛА с расположением солнечных антенн, показанном на рисунке 12 при фиксированном направлении солнечного потока (также соответствующего рисунку 12.) показан на рисунке 14. Полученные имитационным моделированием значения конструктивных параметров в нашем примере составили $L=5,7$ м, $b=4,91$ м и $h=1,25$ м. Расчеты затененности солнечных антенн в рамках внедрения результатов исследования были проведены для изделий "Знамя-2" и "Луна-Глоб" в НТЦ "Элис" при Национальном институте авиационных технологий - НИАТ.



a)



б)

Рисунок 14 - Сужающиеся окрестности в области допустимых решений (а) и оптимизируемые конструктивные параметры КЛА "Союз" (б)

В разделе 3 описана программная реализация геометрического моделирования степени затененности солнечных батарей КЛА и визуализация результатов вычислений. Функциональная схема этого комплекса, написанного на языке $C\#$, реализующего рецепторную геометрическую модель оценки степени затененности солнечных батарей КЛА, представлена на рисунке 15.

При работе программного комплекса сканирование по сечениям производится автоматически, но к определенному сечению можно вернуться вручную, задействовав мышкой изображенный на рисунке 11 движок, задающий положение секущей плоскости.

Параметры ПЭВМ, на котором реализован описанный программный комплекс следующие - это ноутбук с центральным процессором (ЦП) - 3210M, с количеством ядер 4, тактовой частотой 2.50 GHz и объемом кэш-памяти - 6144 Мб. Данный процессор 3210M является мобильным исполнением процессора 3-го поколения Intel® Core™ i5. Оперативная память ноутбука - DDR3 типа 1600 объемом 6 Гб, работающая в двухканальном режиме, объем дисковой памяти 750 Гб. Требования к видеокарте ПЭВМ не критичны, так как выводимое изображение несложное и нединамичное. В нашем случае была использована видеокарта производства компания Intel HD4000 с количеством видеопамати 2048 Мб. Таким образом мощность используемой в нашем исследовании вычислительной техники можно оценить как среднюю на момент написания диссертации.

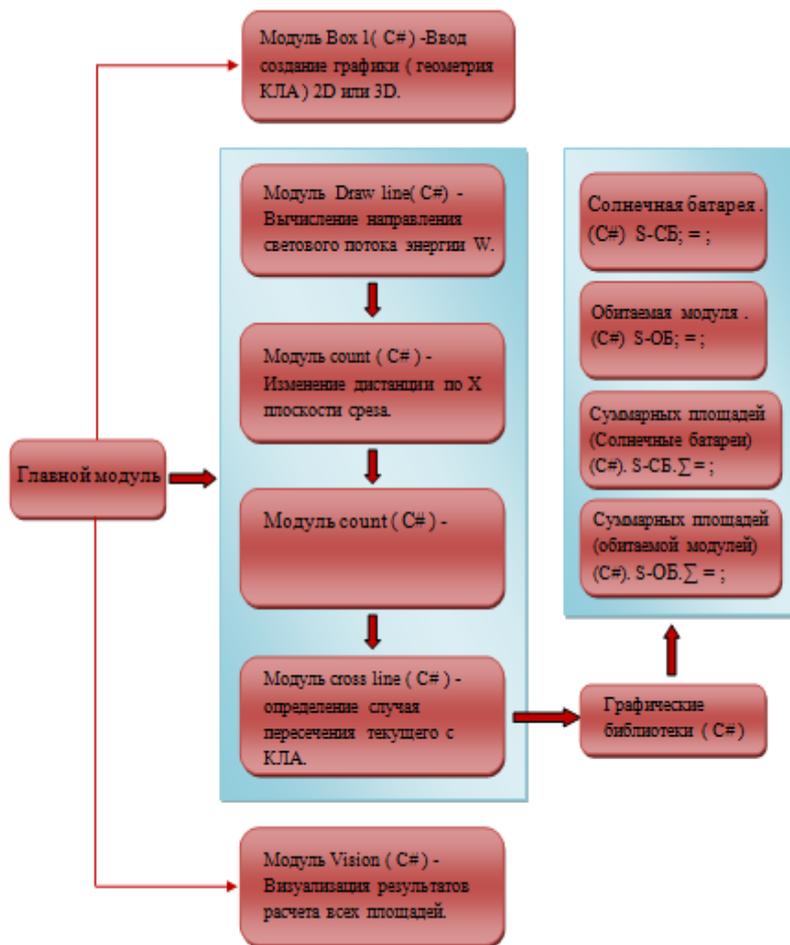


Рисунок 15 - Функциональная схема программного комплекса на языке C#

Для оценки точности реализации будем исследовать тестовую модель КЛА, геометрические параметры которой позволяют заранее определить значение эффективной площади солнечных батарей. Это позволит нам "прогнать" эту модель через реализованную на языке C# геометрическую модель с заранее известными параметрами эффективной освещаемой площади.

Так результаты вычисления площади для тестового КЛА с заранее известными теоретическими значениями S - эффективной (незатененной) поверхности солнечных батарей КЛА приведены на рисунке 16.

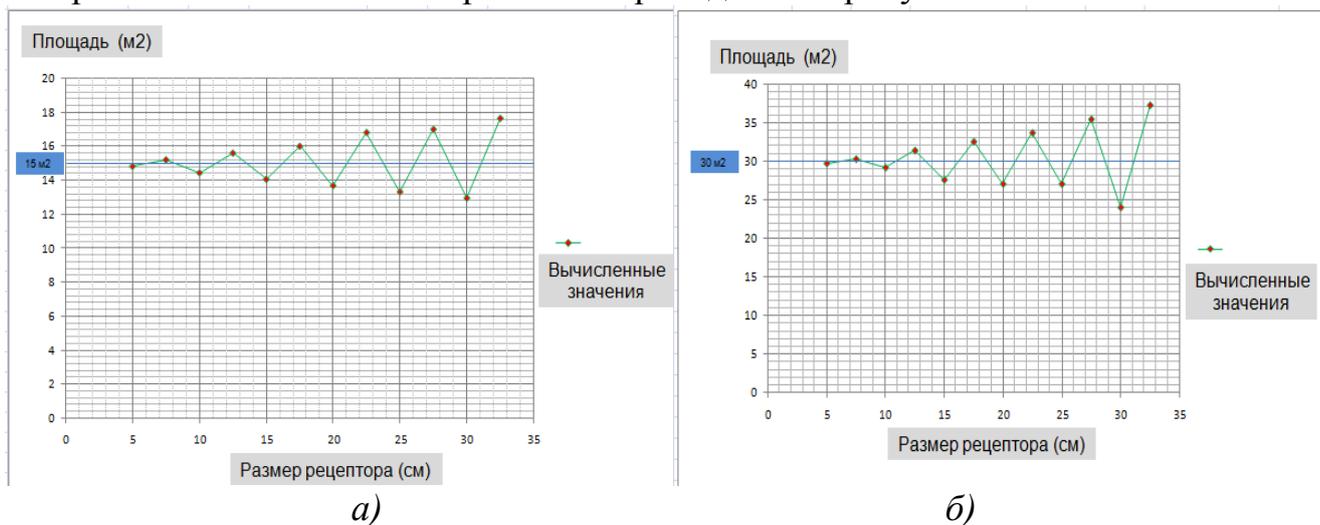


Рисунок 16 - Вычисленные значения площадей солнечных батарей в тестовых примерах: *a* - для площади $S=15 \text{ м}^2$, *б* - для площади $S=30 \text{ м}^2$

Из рисунка 16 видно, что для обоих тестовых примеров $S=15 \text{ м}^2$ и $S=30 \text{ м}^2$ кривая регрессии не уходит от теоретической площади солнечных батарей, что говорит о корректности предложенной нами геометрической модели. С увеличением размера рецептора расчетное значение эффективной площади все более ощутимо отклоняется от теоретического значения, что вполне ожидаемо.

На основании результатов расчета тестовой модели подсчитаны погрешности вычислений в зависимости от размера рецептора в расчетной модели. Очевидно, что чем меньше размер рецептора, тем меньше значение погрешности (выше точность вычислений). Так же из теории рецепторных моделей известно, что за увеличение точности вычислений путем уменьшения размеров приходится расплачиваться временем вычислений.

Результаты сопоставления точности и времени вычислений (процессорного времени) представлены рисунке 17.

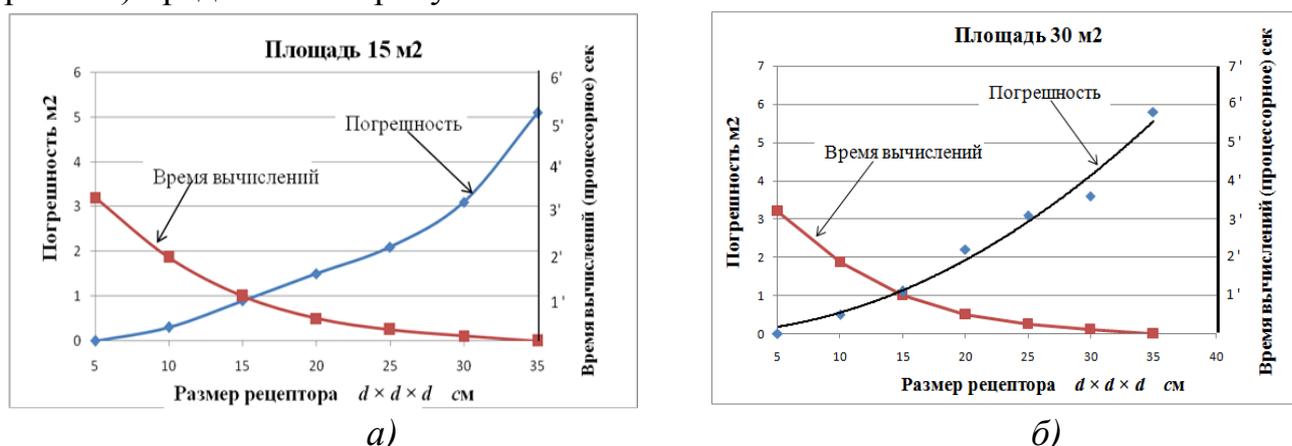


Рисунок 17 - Зависимости вычисленных значений погрешности площадей тестового примера и процессорного времени вычислений от размера рецептора: *a* - для $S=15 \text{ м}^2$; *б* - $S=30 \text{ м}^2$

Полученные результаты говорят о том, что уменьшая размер рецепторов можно достичь высокой точности без существенного увеличения процессорного времени для проведения вычислений. Например при размере рецептора 5 см, погрешность вычислений эффективной площади составила 0,1 м² при теоретической общей площади солнечных батарей 30 м². Погрешность вычислений при этом составляет 0,33% при приемлемом процессорном времени 3,2 сек, что является вполне приемлемым для практики результатом. По-видимому столь небольшое процессорное время объясняется однородностью выполняемых вычислительных операций, осуществляемых современным ПК с использованием лишь оперативной памяти (без обращения к дисковой в процессе проведения вычислений).

Была проведена попытка в тестовом примере $S=30$ м² еще более уменьшить размеры рецепторов - с 5 до 1 см. Время вычислений при этом ожидаемо возросло, но сравнительно немного. При уменьшении размера рецептора в 5 раз (с 5 до 1 см) процессорное время выросло всего лишь в 2 раза, что говорит о возможности и перспективности использования рецепторных методов в геометрическом моделировании. Результаты этого теста оценки необходимого процессорного времени графически представлены на рисунке 18.

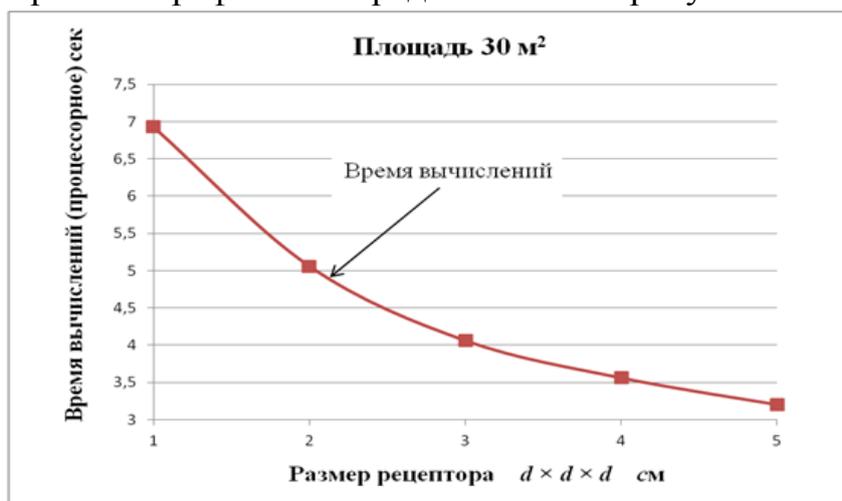


Рисунок 18 - Зависимость процессорного времени вычислений эффективной площади от размера рецептора в диапазоне 5...1 см

Заключение и выводы

В процессе исследования получены следующие результаты:

1. Вопросы расчетов взаимного затенения объектов (инсоляции) решены лишь для архитектурно-строительных задач. Решение таких задач осуществляется как с помощью средств механизации (солнечные линейки), так и посредством компьютерных программ.

2. Задача оптимизации размещения солнечных батарей на КЛА с математической точки зрения может быть описана как задача математического программирования.

3. На основании рецепторных геометрических моделей разработаны сканирующие алгоритмы вычисления площадей затенения поверхностей различного типа КЛА, а также модификации этих алгоритмов, учитывающих конструктивные особенности анализируемых КЛА.

4. Построение геометрической модели с использованием четырехзначной логики (рецепторов с кодами "0", "1", "2" и "3" является эффективным приемом, позволяющим разделить эффективную площадь поверхности как солнечных батарей КЛА, так и его основного корпуса.

5. Разработана основанная на методе сужающейся окрестности методика оптимизации совокупности конструктивных параметров компоновки внешних солнечных батарей по критерию их максимальной эффективности (минимальной затененности солнечных батарей как друг другом, так и другими конструктивными элементами КЛА).

6. Осуществлена программная реализация на языке C# предложенной в предыдущей главе рецепторной геометрической модели оценки эффективной площади освещения солнечных батарей.

7. Разработана графическая оболочка на языке C# с подключением графических библиотек этого языка, позволяющая визуализировать результаты проведенных расчетов.

8. Проведена верификация результатов работы геометрической модели и ее компьютерной реализации путем сравнения идеальной модели с заранее известными результатами и данными, полученными в результате расчета.

9. Результаты верификации показали, что точность расчетов по геометрической модели ожидаемо зависит от размера рецептора и при размере рецептора $5 \times 5 \times 5$ см погрешность вычислений эффективной площади солнечных батарей площадью 30 м^2 составляет $0,1 \text{ м}^2$, что соответствует $0,33\%$.

10. Проведенная в рамках верификации оценка необходимого процессорного времени показала, что оно зависит от размера рецепторов, но для диапазона их размеров от 20 до 1 см изменяется для реальных КЛА в диапазоне от 0,5 до 6,93 сек.

Публикации по теме диссертационной работы

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Куи Мин Хан. Геометрические модели внешней компоновки солнечных антенн космических летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ", № 82. Режим доступа <http://trudymai.ru/published.php?ID=58836>

2. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Дискретные модели геометрического моделирования компоновки авиационной техники //

Электронный журнал "Труды МАИ", - 2016, № 86. Режим доступа <http://trudymai.ru/published.php?ID=66465>

3. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ", - 2017, № 93. Режим доступа <http://trudy.mai.ru/published.php?ID=80474>.

Научные монографии:

1. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Рецепторные модели в задачах автоматизированной компоновки техники. - Саарбрюкен, изд-во Ламберт, 2016. - 110 С.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

1. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Оптимизация размещения солнечных батарей на космических станциях // Сб. тезисов конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2014", М.: МАИ, 22-24 апреля 2014, с. 114-115.

2. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Геометрические модели компоновки солнечных батарей на космических станциях // Сб. тезисов конф. "Инновации в авиации и космонавтике-2015", М.: МАИ, 21-23 апреля 2015, с. 256-257.

3. Куи Мин Хан. Автоматизация компоновки солнечных батарей и концентраторов в ракетно-космической технике // Сб. тезисов конф. "Авиация и космонавтика-2015", М.: МАИ, 17-21 июня 2015, с. 233-234.

4. Куи Мин Хан. Компьютерное моделирование внешней компоновки солнечных батарей космических летательных аппаратов // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2016", М.: МАИ, 12-15 апреля 2015, Том 2, с. 67-68.

5. Куи Мин Хан, Маркин Л.В., Е Вин Тун, Корн Г.В. Рецепторные модели в задачах автоматизированной компоновки техники. - Саарбрюкен, изд-во Ламберт, 2016. - 110 С.

6. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов // Электронный журнал "Труды МАИ", , 2017, № 93 (перечень ВАК).

7. Куи Мин Хан, Маркин Л.В. Расчет взаимного затенения солнечных антенн космических летательных аппаратов // Сб. тезисов конф. "Гагаринские чтения-2017", М.: МАИ, 5-19 апреля 2017, с. 1454.