

УДК 515.2

Геометрические модели внешней компоновки солнечных антенн космических летательных аппаратов

Куи Мин Хан

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: kyiminhhan50@gmail.com*

Аннотация

В статье рассмотрено решение этой проблемы автоматизации размещения и ориентации солнечных батарей и концентраторов как на земле, так и на космических летательных аппаратах. Цель исследования - оценить взаимное затенение солнечных батарей как между собой, так и другими объектами (например, космической станцией). Данная задача рассматривается как оптимизационная задача математического программирования, направленная на максимально эффективное использование этих высокотехнологичных источников энергии в космических орбитальных станциях и космических поселениях. Метод решения - геометрическое моделирование космической станции и солнечных батарей с определенной ориентацией. В качестве метода моделирования использованы рецепторные геометрические модели, дискретизирующие пространство размещения как батарей, так и самой космической станции.

Ключевые слова: автоматизация проектирования, гелиоэнергетика, солнечные батареи, космический летательный аппарат, гелиостат, ориентация, затенение, рецепторные геометрические модели.

Введение

В данной работе рассматривается автоматизация проектирования размещения солнечных батарей на космических летательных аппаратах и солнечных концентраторах при колонизации планет и их спутников (рисунок 1*а*). Такая же проблема возникает и при проектировании гелиоэлектростанций на земле (рисунок 1*б*). 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 [1 - 3]. Сразу оговоримся, что речь идет о полях концентраторов и солнечных батарей летательных аппаратов, не обеспечивающих слежение за изменением положения Солнца.



а)



б)

Рисунок 1 - Солнечные батареи в космосе (*а*) и на земле (*б*)

Разработка систем автоматизированного проектирования требуется создания соответствующего алгоритмического и математического обеспечения. Так как в данной задаче решаются задачи размещения объектов, 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.

Сложность геометрического моделирования размещения концентраторов в том, что решение этой задачи требует взаимосвязанного решения двух проблем:

- вычисление эффективной площади солнечных батарей КЛА или на внеземном поселении при любой конкретной ориентации КЛА по отношению к потоку солнечной энергии или же статичных солнечных батарей (гелиостатов) на внеземных поселениях;
- разработке аппарата оптимизации количества и геометрии (т.е. конкретных размеров и формы) размещенных на КЛА или на определенной площади внеземного поселения гелиостатов.

Первая проблема обусловлена тем, что при движении по своей траектории солнце в каждый конкретной точке этой траектории отдача энергии солнцем различная. Возможность же снять падающую в каждый конкретный момент солнечную энергию определяется ориентацией солнечного концентратора относительно положения Солнца (рисунок 2). Из этого рисунка видно, что при положении Солнца 1 наиболее эффективен наклон солнечных батарей 30° , а при положении 2 – 75° .

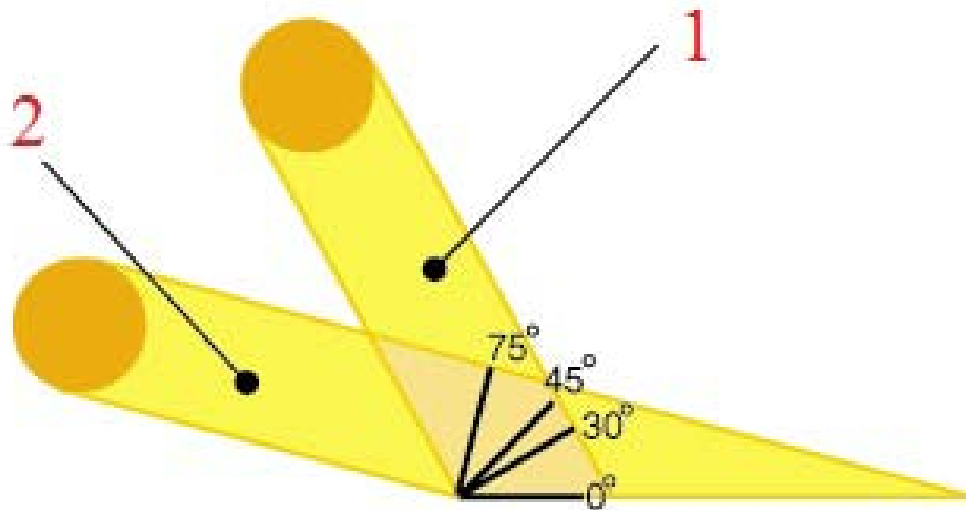


Рисунок 2 - Эффективная ориентация солнечных батарей по отношению к положению Солнца

Вторая проблема связана с тем, что солнечные батареи располагаются группами (на КЛА) или полями (на внеземных поселениях) и при этом частично экранируют друг друга. На КЛА они также будут дополнительно экранироваться самим космическим объектом. Поэтому если на определенном объекте солнечных батарей будет мало, то и съем энергии Солнца будет маленьким, если же слишком много – то они будут работать неэффективно, затеняя друг друга.

Физическая постановка задачи исследования

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.

Сам процесс получения энергии (прежде всего электрической) из солнечной радиации основан либо на прямом преобразовании солнечной энергии в электрическую посредством полупроводников (как это производится на орбитальных станциях и спутниках), либо выработки энергии посредством тепловых машин (такая схема чаще используется на земле). В любом случае использование солнечной энергии в космосе более эффективно, чем на земле, так как там отсутствует потеря энергии в атмосфере и оседание пыли на панелях, снижающее выработку энергии до 40% .

В нашей расчетной модели примем, что на солнечные батареи КЛА суммарной площадью S с некоторого направления W падает поток солнечной энергии (рисунок 3 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 перпенди-

кулярна потоку енергії. Очевидно, що ми хочемо, щоб сонячні батареї працювали максимально ефективно, тому наша цільова функція $S' \rightarrow \max$.

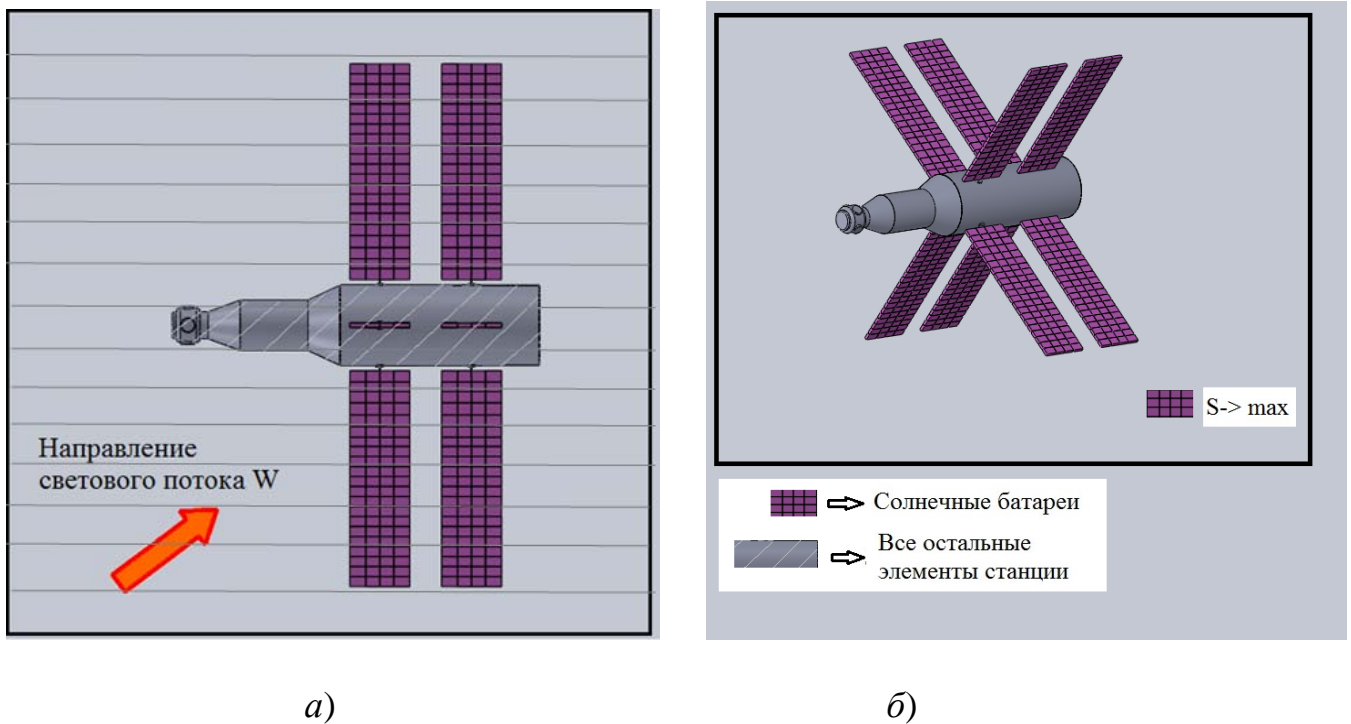


Рисунок 3 - Положение КЛА относительно Солнца (а) и вид КЛА со стороны потока энергии Солнца (б)

Математическая постановка задачи исследования

С математической точки зрения сведем задачу оптимизации размещения солнечных батарей КЛА или стационарных гелиостатов к задаче математического программирования. Предположим, что у нас имеется пространство размещения солнечных батарей (или гелиостатов) Ω , в котором нам необходимо разместить и ориентировать n солнечных батарей (или гелиостатов). 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 относи-

тельно 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

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

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.

В случае размещения солнечных батарей на обитаемых спутниках наше математическое описание может быть еще более усложнено дополнительным требованием – получение максимальной энергии не в каждый конкретный момент, а за все время нахождения Солнца в пределах его видимости гелиостатом, а получение максимального потока энергии $Max P_{\Sigma}$ в определенное время t_0 . Это запишется выражением

$$Max_{t_0} P_{\Sigma}(t) \text{ for } X \subset \Omega.$$

$P_x \rightarrow \min$

Такое «специфическое» требование может быть обусловлено необходимостью требования максимально возможного количества энергии за весь световой день на наземных станциях или время видимости Солнца на космическом летательном аппарате. Построение геометрических и оптимизационных моделей, учитывающих все эти факторы, и составляют предмет настоящего исследования.

Подходы к решению поставленной задачи

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. [4, 5]. Энергетические же методы 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 [6, 7].

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 (рисунок 4). По примерно такой же траектории движется солнце и в космических поселениях.

Сразу оговоримся, что в нашем исследовании речь идет о статично расположенных гелиостатах, изначально расположенных под оптимальным углом относительно поверхности земли с учетом географических координат места расположения. Гелиостаты со следящей системой дороги, ненадежны и сами потребляют значительную часть произведенной ими энергии.

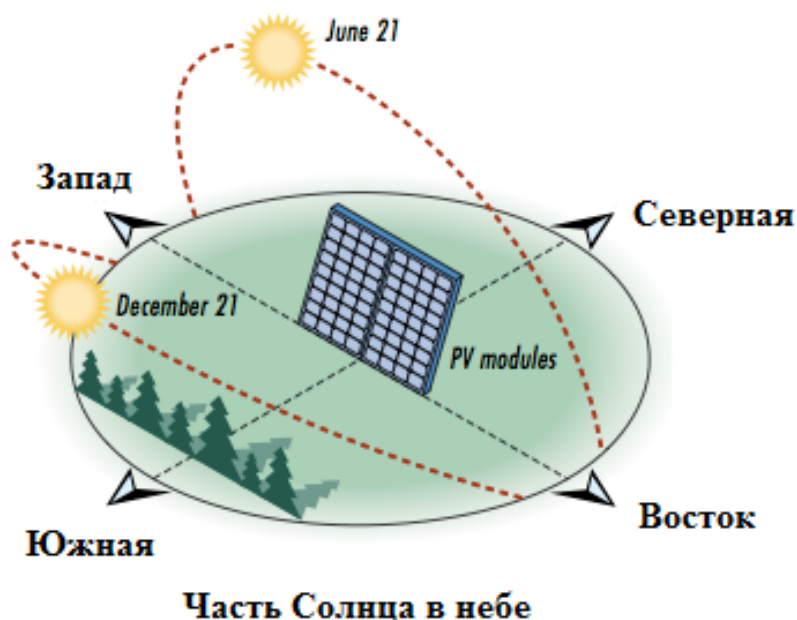


Рисунок 4 - Траектория солнца в зависимости от времени года и географического положения размещения гелиостата

Методы решения задачи и принятые допущения

Однако эти методы не работают в условиях нашей специфической задачи – определения эффективной площади солнечных батарей КЛА. Поэтому для ее решения мы применим сравнительно редко используемый метод геометрического моделирования – метод дискретизации пространства, или рецепторные геометрические модели. В основу рецепторного метода (известного также как «матричный», «бинарный», «перечисления элементов пространства» и т.д.) 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 5).

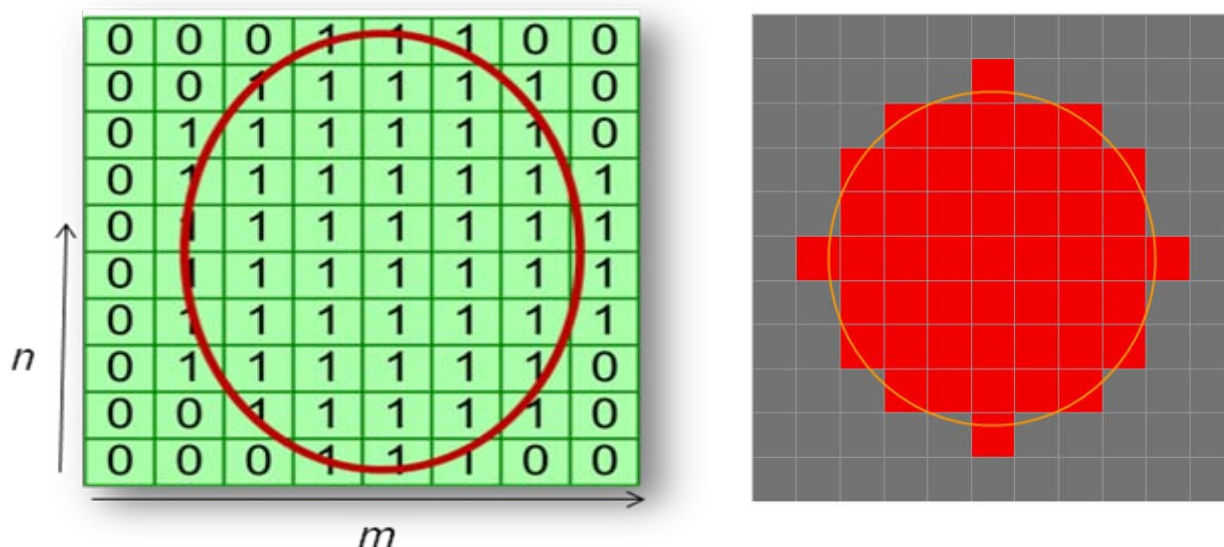


Рисунок 5 - Рецепторная модель 2D-объекта

Трёхмерные объекты описываются трёхмерной матрицей $A = \{a_{i,j,k}\}$ размерностью $m \times n \times p$ (рисунок 6).

Преимуществом рецепторных геометрических моделей является легкость решения многих позиционных задач геометрии (например, определение условия взаимного непересечения объектов, описанных рецепторными моделями), недостатками – необходимость преобразования пространственных объектов, описанных средствами конструктивной геометрии в технической документации, в рецепторную форму и обратное преобразование. Вопросы компьютерной реализации рецепторных моделей, бывшие преткновением на начальном этапе развития вычислительной техники, когда эти рецепторные модели и были предложены А.Д.Зозулевичем (середина 60-х годов прошлого века) [8, 9], в настоящее время успешно преодолены развитием аппаратных и программных средств вычислительной техники.

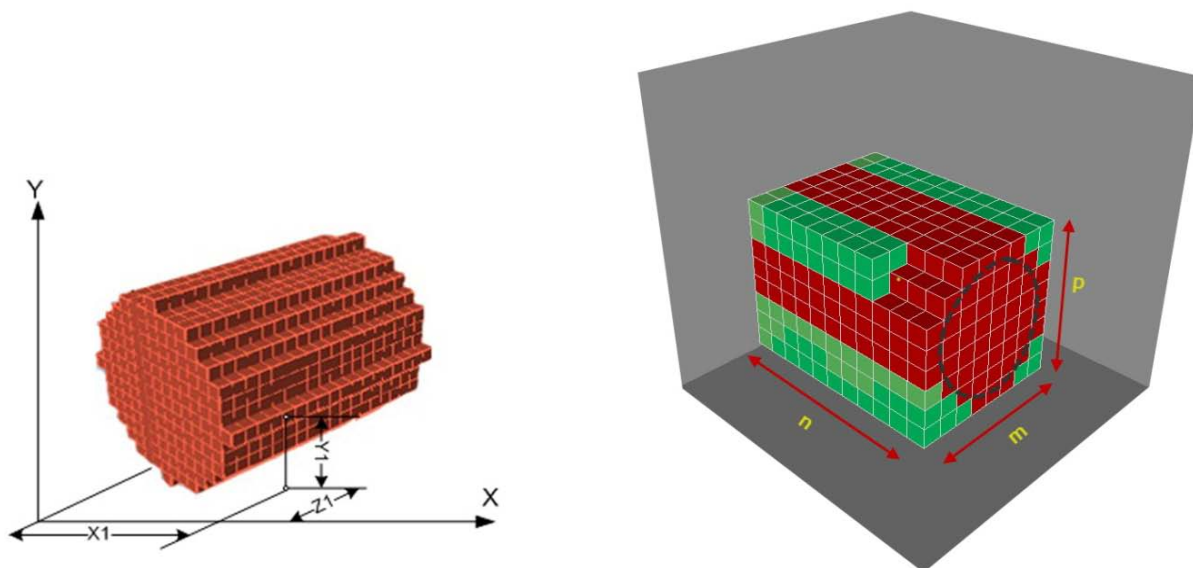


Рисунок 6 - Рецепторная модель 3D-тела

Используемые в исследовании методы и алгоритмы

Итак, переведем геометрическое описание КЛА (вместе с солнечными батареями) в рецепторную форму. При этом используем маленькую хитрость – разместим его в рецепторной матрице так, чтобы направление источника света W совпадало с направлением граней рецепторной матрицы (рисунок 7), а сам КЛА находился в рецепторной матрице под некоторыми углами относительно граней, соответствующим его ориентации в пространстве относительно вектора W .

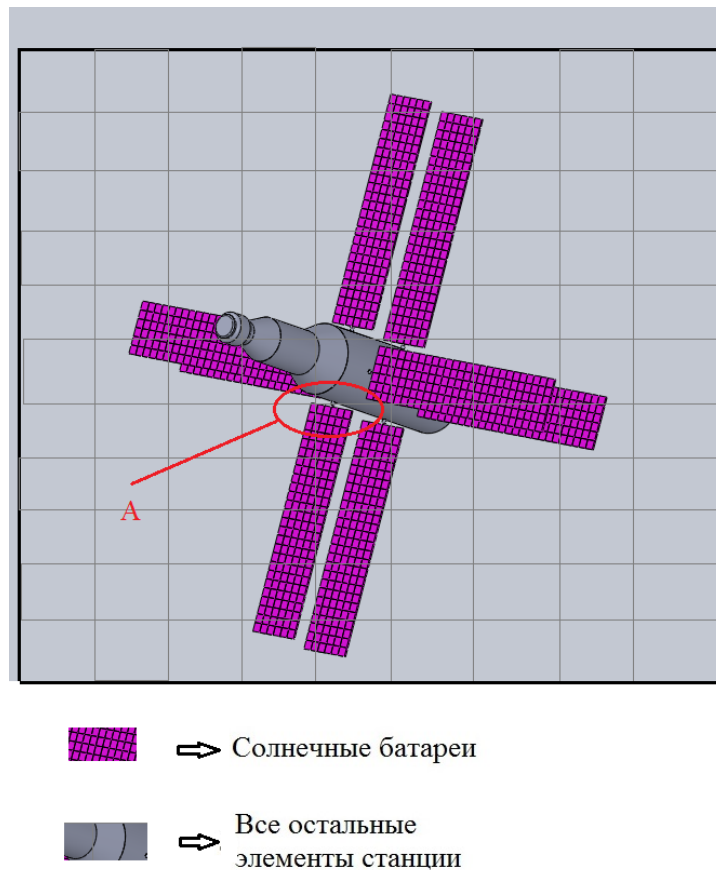
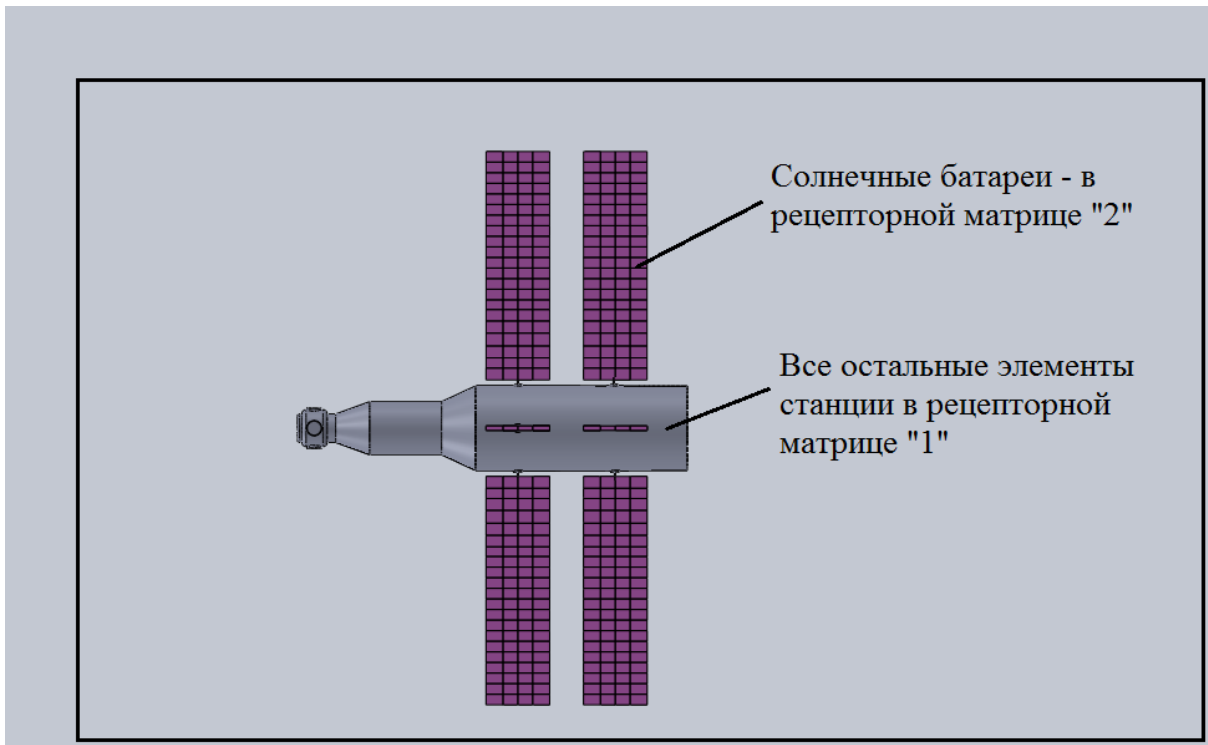


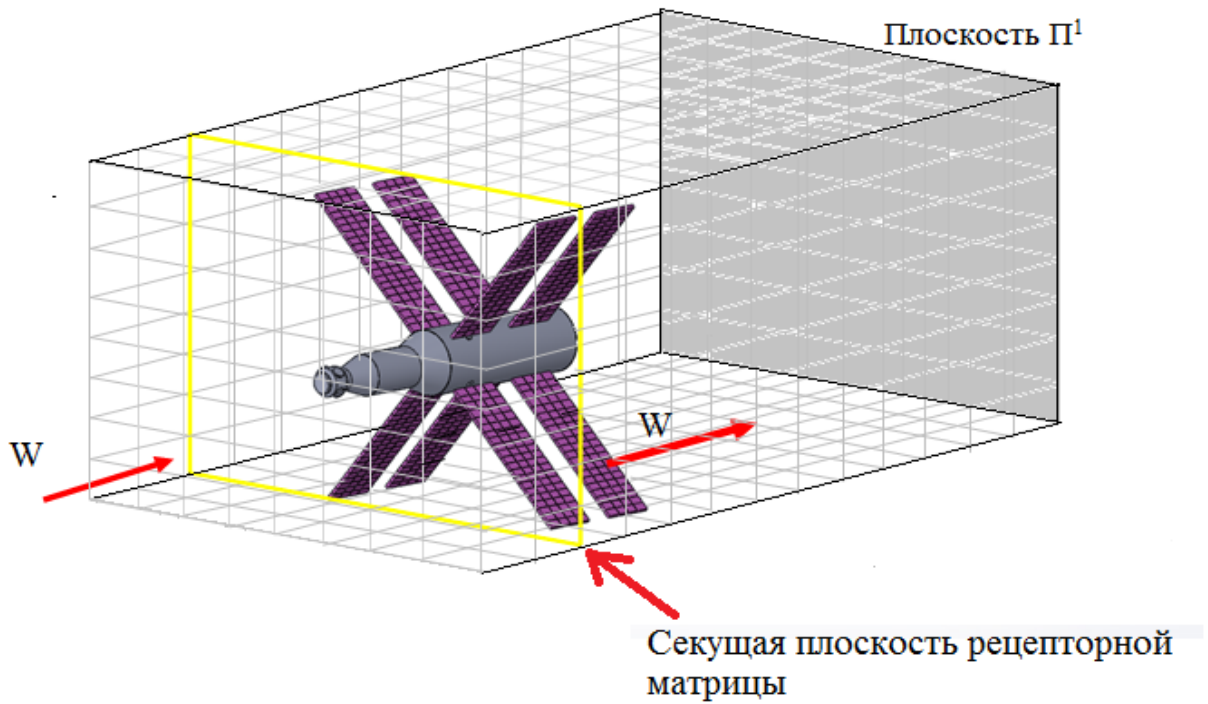
Рисунок 7 - Представление КЛА рецепторной матрицей

Особенностью нашего подхода – рецепторная матрица будет многозначной. Конкретно она будет трехзначной – «0» - свободное пространство, «1» - пространство, занятое космической станцией, «2» - пространство, занятое солнечными батареями (рисунок 8 а). В этом случае КЛА будет представлена в рецепторной матрице так, как показано на рисунке 8 б.

Использование рецепторной геометрической модели позволяет произвести над ней следующие операции. Задав положение поля рецепторов в виде некоторого среза рецепторной матрицы (как это показано на рисунке 8 б) при каждом конкретном положении среза мы получим образ КЛА, примерный вид которого показан на рисунке 9 а.

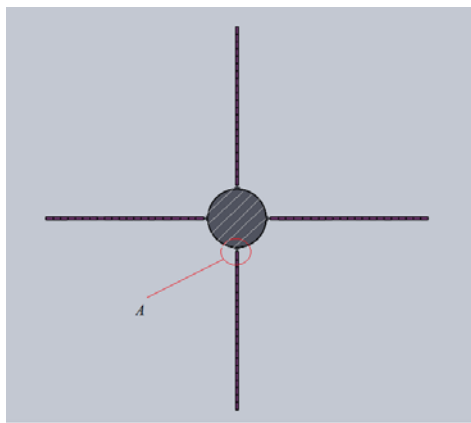




a)



б)

Рисунок 8 - Представление КЛА многозначной рецепторной матрицей



 Солнечные батареи
 Все остальные элементы станции

a)

A (Увеличено)								
0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	0	1	1	1	1	1
0	0	0	0	2	2	0	1	1
0	0	0	0	2	2	0	0	0
0	0	0	0	2	2	0	0	0
0	0	0	0	2	2	0	0	0

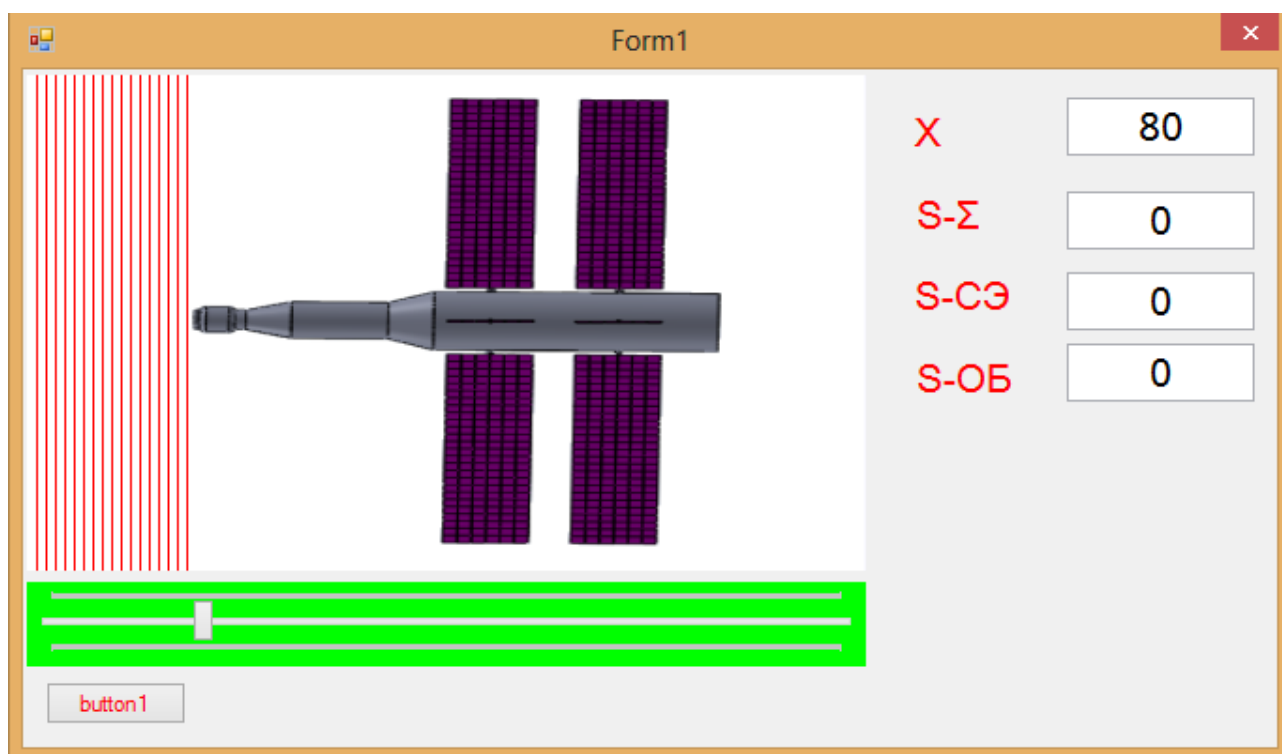
б)

Рисунок 9 - Изображение КЛА на срезе рецепторной матрицы (*a*) и фрагмент рецепторной матрицы в зоне А (*б*)

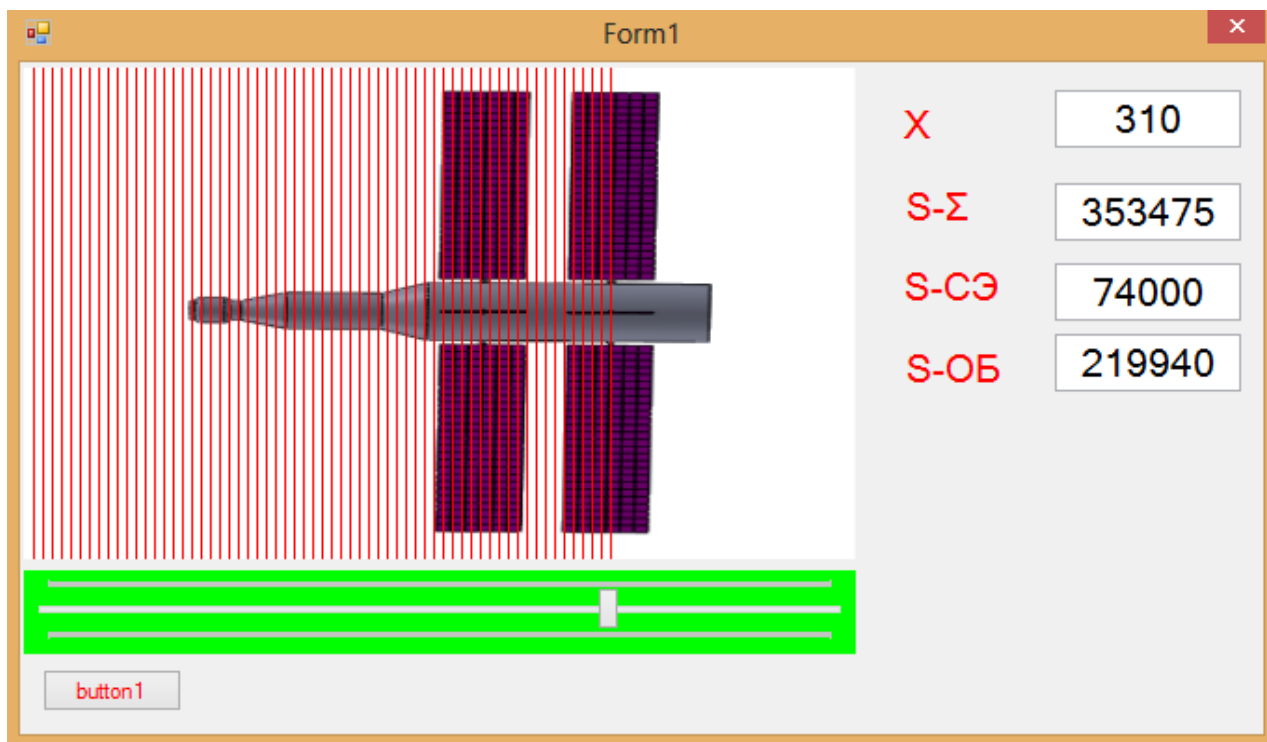
В итоге мы, проецируя срез каждой матрицы на некоторую плоскость проекций Π' , получим суммарный образ совокупности определенных единиц – нулей, единиц или двоек. Он будет похож на графический образ, представленный на рис. 10. Это плоская рецепторная матрица, в которой «0» – проекция свободного пространства, «1» – проекции корпуса космической станции при данной ее ориентации и «2» - проекции всех солнечных батарей.

Одно из положительных свойств рецепторных геометрических моделей – возможность быстрого расчета сумм значений рецепторов. Имея матрицу типа 2 мы можем рассчитать суммарное значение «двоек» и тем самым, эффективную площадь солнечных батарей при некоторой совокупности конструктивных параметров X . Проводя такой расчет для совокупности значений X и совокупности и вычисляя в

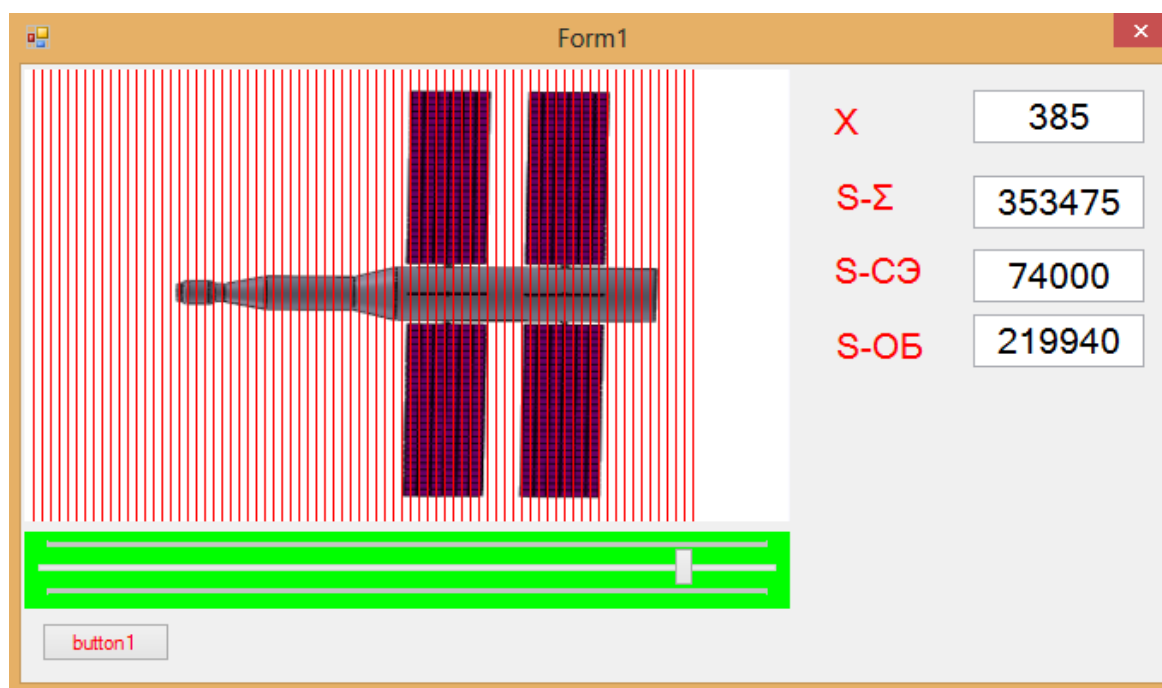
Работа программного комплекса происходит следующим образом. После ввода информации о геометрических размерах станции и солнечных батарей (в параметрическом виде) начинается послойное сканирование сечений (рисунок 11). При этом из 3D матрицы, в которую погружен весь наш объект (КЛА), в каждом слое формируется 2D матрица, вид которой ранее был показан на рисунке 10. При этом в каждом сечении (срезе) рецепторной матрицы вычисляются площади текущего сечения солнечных батарей, эффективная (накопленная) площадь сечений солнечных батарей и накопленная площадь сечений корпуса космической станции (хотя этот параметр для нас практического значения не имеет). На рисунке 11 *a* видно, что секущая плоскости еще не дошли до модели КЛА, поэтому все площади сечений равны нулю.



a)



б)



в)

Рисунок 11 - Сканирование 3D модели КЛА для вычисления площадей сечений солнечных батарей и корпуса КЛА

На рисунке 11 б видно, что секущая площадь проходит уже по самому КЛА, пересекая при этом как солнечные батареи, так и корпус КЛА, поэтому в каждом сечении площади среза получают конкретные вычисленные значения, которые визуализируются в соответствующих окнах программы. И, наконец, на рисунке 11 в видно, что секущая плоскость полностью прошла через всю 3D модель КЛА, поэтому как текущие, так и накопленные суммы площадей в окнах программы больше изменяться не будут. Таким образом, мы решили поставленную задачу - определили суммарную видимую площадь (с определенного ракурса) как копуса космической станции, так и ее солнечных батарей.

Правда на рисунке 11 секущая плоскость перемещалась ортогонально положению станции, что на практике бывает лишь в том случае, если станцию строго ориентирована по направлению "на Солнце". Но ничто нам не мешает изменить ориентацию станции по направлению к Солнцу и провести такое же исследование (риунок 12).

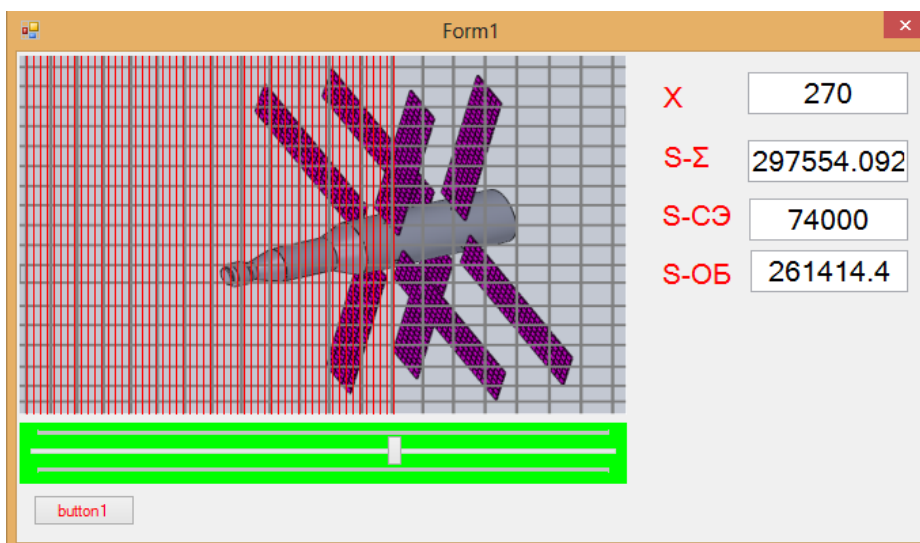


Рисунок 12 - Расчет эффективных площадей КЛА при его произвольном положении относительно направления солнечных лучей

Анализ полученных результатов

Проведение описанного расчета при заданной исходной геометрии КЛА и его ориентации относительно Солнца позволяет построить график изменения эффективных площадей по дистанции сканирования сечений. Примерный вид такого графика представлен на рисунке 13. Вся его площадь и есть эффективная площадь солнечных батарей КЛА при его конкретном конструктивном исполнении и конкретной ориентации относительно Солнца. Сравнивая такие графики можно оптимизировать расположение солнечных батарей на КЛА.

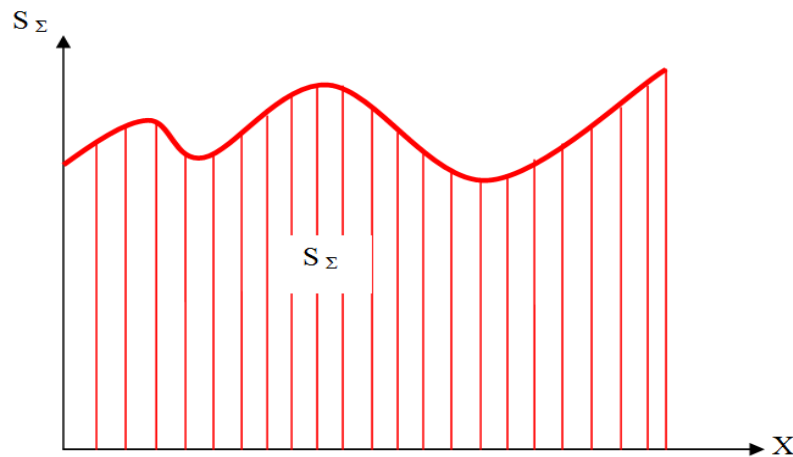


Рисунок 13 - График изменения суммарной эффективной площади солнечных батарей КЛА в зависимости от допустимых конструктивных решений X

Нерешенным вопросом и, соответственно дальнейшим направлением исследований, в настоящее время является формирование блока решений, позволяющих на основании графика суммарных площадей формировать конкретные рекомендации по изменению конструктивных параметров (прежде всего расположения солнечных

батарей) КЛА. Все это позволит добавить проектный модуль компоновки солнечных батарей в современные системы автоматизации проектирования КЛА [10 - 13]

Хотя рецепторные геометрические модели в силу своей дискретности являются приближенными, исследование их точности в трудах Корн, Ситу Лина и Ньи Ньи Хтуна показало, что в реальных расчетах возможно обеспечение точности примерно в 1 см^2 при продолжении вычислительного процесса 5...10 минут.

Выводы и рекомендации

Предложен метод, позволяющий на основании рецепторной геометрической модели производить расчет эффективной площади солнечных батарей космического летательного аппарата (КЛА) при различной совокупности его конструктивных параметров (геометрических форм) и ориентации относительно направления потока энергии. Разработаны математические модели и создан программный комплекс на языке C#, позволяющий производить такие расчеты и визуализировать полученные результаты. В результате работы этого программного комплекса при любой заданной геометрической форме КЛА и любой его ориентации относительно направления солнечных лучей возможно вычисление суммарной эффективной площади солнечных батарей с учетом их взаимного затенения и затенения корпусом КЛА. Как дальнейшее направление исследований представляет практический интерес разработка блока решений, позволяющих на основании графика суммарных площадей формировать конкретные рекомендации по изменению конструктивных параметров

Библиографический список

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В. и др. Солнечная энергетика. - М.: Изд. дом МЭИ, 1996. - 276 с.
2. Мхитарян Е.М. Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников.- Киев, Наук. думка, 1999. - 321 с.
3. Грилихес В.А. Солнечные космические энергостанции. - Л., Изд-во Наука, 1986. - 286 с.
4. Хейфец А.Л. Расчет продолжительности инсоляции средствами 3D моделирования пакета AutoCAD // Вестник УГТУ-УПИ. Строительство и образование. 2004. Вып. 7. № 11 (41). С. 211-214.
5. Хейфец А.Л. Система автоматизированного расчета продолжительности инсоляции // Вестник Южно-Уральского университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. Вып. 14 (86). С. 51-54.
6. Штейнберг А.Я. Расчет инсоляции зданий. - Киев, Будивельник, 1975. - 120 с.
7. Гусев Н.М. Естественное освещение зданий. - М.: Госстройиздат, 1961. - 218 с.
8. Зозулевич Д.М. Машинная графика в автоматизированном проектировании. – М.: Машиностроение, 1976. – 240 с.
9. Герасименко Е.П., Зозулевич Д.М. Методы формирования трехмерных рецепторных матриц на ЭВМ. // В кн.: Вычислительная техника в машиностроении. – Минск. ИТК АН БССР, 1971. – с. 24 – 31.

10. Медведский А.Л., Рабинский Л.Н., Курбатов А.С. Геометрическое моделирование авиационно-ракетных изделий // Прикладная геометрия. 2009. Вып. 11. № 22. С. 79-87.
11. Волошин В.В. Автоматизация проектирования летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1991. – 256 с.
12. Маркин Л.В. Геометрическое моделирование задач автоматизации размещения // Прикладная геометрия, инженерная графика, компьютерный дизайн. 2007. № 1 (11). С. 9-18.
13. Осин М.И. Методы автоматизированного проектирования летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1984. – 168 с.