

**Мотайленко Лилия Владимировна** – e-mail: l.motailenko@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; к.т.н.; доцент.

**Бруттан Юлия Викторовна** – e-mail: bruttan@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; к.т.н.; доцент.

**Тимофеева Ольга Николаевна** – e-mail: on.timofeeva@pskgu.ru; Отделение информационно-коммуникационных технологий, образовательный департамент, Передовая инженерная школа гибридных технологий в станкостроении Союзного государства; старший преподаватель.

**Khrishkevich Georgy Andreevich** – Pskov State University; e-mail: georggalileo21@mail.ru; Pskov, Russia; phone: +79212153944; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; research engineer; assistant; postgraduate student.

**Andreev Dmitry Anatolyevich** – e-mail: d.andreev@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Motaylenko Lilia Vladimirovna** – e-mail: l.motailenko@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Bruttan Iuliia Victorovna** – e-mail: bruttan@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Timofeeva Olga Nikolaevna** – e-mail: on.timofeeva@pskgu.ru; Department of information and communication technologies, educational department, Advanced engineering school of hybrid technologies in the machine tool industry of the Union state; senior lecturer.

УДК 621.396.677

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-76-85

**К.М. Занин**

### **АЛГОРИТМ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ПРОФИЛИРОВАННОГО РЕФЛЕКТОРА ЗЕРКАЛЬНОЙ АНТЕННЫ В ЗАДАЧАХ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*При построении комплексов спутниковой связи, размещаемых на борту спутников-ретрансляторов, требуется обеспечение заданного ее качества в пределах установленной зоны обслуживания на поверхности Земли. Рабочая область в таких задачах может иметь сложную форму границы. Для покрытия заданной территории применяют бортовые антенные системы (АС), которые реализуют контурную диаграмму направленности (ДН), так как качество связи напрямую связано с параметрами главного лепестка ДН. Формируемая ДН должна учитывать данный фактор, и, как следствие, главный ее лепесток должен быть максимально приближен по форме к контуру границы обслуживаемой территории. Одним из возможных вариантов построения АС с контурной ДН является использование зеркальной антенны (ЗА) с одиночным облучателем и рефлектором с профилированной поверхностью, закон профилирования которой определяется формой границы обслуживаемой территории. Необходимость моделирования и анализа ожидаемых параметров ДН таких антенн требует представления профилированного рефлектора в виде объемной модели, которая используется в качестве исходных данных для пакетов электродинамического моделирования. Построение объемной модели заключается в представлении результатов решения уравнения, описывающего форму рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах. Проведенный анализ информации, доступной из открытых источников, показал, что в литературе недостаточно подробно рассмотрены вопросы синтеза объемных фигур с учетом особенностей проектирования ЗА. Целью работы являлось построение объемной модели профилированного рефлектора в задачах электродинамического моделирования с учетом особенностей построения ЗА. Для достижения поставленной цели решена задача разработки соответствующего алгоритма. В ходе проведенных исследований разработан алгоритм представления профилированного реф-*

лктора ЗА, позволяющий построить соответствующую объемную модель, которая может быть использована в задачах электродинамического моделирования. Представленный алгоритм преобразует результаты решения уравнения, содержащего информацию о форме рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия.

*Объемная модель; зеркальная антенна; профилированный рефлектор.*

**K.M. Zanin**

## **AN ALGORITHM FOR FORMING A PROFILED REFLECTOR OF A REFLECTOR ANTENNA IN PROBLEMS OF ELECTRODYNAMIC MODELING**

*When design satellite communication complexes that are placed on board space satellites, it is required to ensure a given communication quality within the established service area. The workspace in such tasks can have a complex border shape. To cover a given area, on-board antenna systems are used, which implement a contour pattern. The quality of communication is directly related to the parameters of the main lobe of the directional pattern. The directional pattern should take this factor into account, and the main lobe should be as close in shape as possible to the contour of the border of the serviced area. One of the possible options for design an antenna system with a contour pattern is the use of a reflector antenna. The antenna has a single source and a reflector with a profiled surface. The law of profiling the reflector surface is determined by the shape of the boundary of the serviced area. At the antenna design stage, it becomes necessary to model and analyze the parameters of the radiation pattern. This requires a 3D model of a profiled reflector. This 3D model is used as input data for electrodynamic modeling programs. The construction of a 3D model consists of solving the equation that describes the reflector and forming the results of solving the equation in the form of a solid. The analysis of the published articles showed that currently the issues of forming 3D models, taking into account the design features of reflector antennas, are not considered in sufficient detail. The goal of the work was to build a 3D model of a profiled reflector for electrodynamic modeling, taking into account the features of the construction of reflector antennas. To achieve this goal, the task of developing an appropriate algorithm has been solved. In the course of the conducted research, an algorithm for forming a profiled reflector has been developed, which allows creating an appropriate 3D model that can be used in electrodynamic modeling tasks. The developed algorithm converts the results of solving an equation containing information about the shape of the reflector into a discontinuous surface on which boundary conditions can be set.*

*3d model; reflector antenna; profiled reflector.*

**Введение.** При построении комплексов спутниковой связи, размещаемых на борту спутников-ретрансляторов, требуется обеспечение заданного ее качества в пределах установленной зоны обслуживания на поверхности Земли. Рабочая области в таких задачах может иметь сложную форму, которая не описывается простыми геометрическими фигурами, с границей в виде окружности или эллипса. Для покрытия заданной территории применяют бортовые антенные системы (АС) космических аппаратов, которые реализуют контурную диаграмму направленности (ДН) [1–7], так как качество связи напрямую связано с параметрами главного лепестка ДН. Снижение уровня ДН в пределах рабочей области приводит к уменьшению скорости передачи информации или к полному отсутствию возможности установки соединения между абонентами. В свою очередь излучение бортовой антенны за пределы установленной зоны обслуживания, с учетом коммерческого характера услуг связи, влечет за собой трату ресурсов радиоканала на неучтенный трафик. Формируемая ДН должна учитывать данные факторы, и, как следствие, главный ее лепесток должен быть максимально приближен по форме к контуру границы обслуживаемой территории.

Одним из возможных вариантов построения АС с контурной ДН является использование зеркальной антенны (ЗА) с одиночным облучателем и рефлектором с профилированной поверхностью, закон профилирования которой определяется формой границы обслуживаемой территории [8–15].

Необходимость моделирования и анализа ожидаемых параметров диаграммы направленности (ДН) ЗА при проектировании требует представления профилированного рефлектора в виде объемной модели, которая используется в качестве исходных данных для пакетов электродинамического моделирования, таких как «САПР GAMMA», «FEKO», «ANSYS HFSS», «CST Studio Suite» и др.

Данная объемная модель строится на основе результата синтеза ЗА, которым является уравнение поверхности рефлектора. Построение объемной модели заключается в представлении результатов решения уравнения в виде поверхности без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах.

В современной литературе описано множество способов синтеза объемной фигуры, например «blender python api», «Vpython», «OpenGL» и др. Однако данные подходы не учитывают особенностей проектирования ЗА. К таким особенностям можно отнести необходимость наиболее точного повторения заданной формы рефлектора, которая определяет распределение фаз (ФР) на апертуре ЗА и, как следствие, параметры ДН [16, 17]. Также необходимо учитывать значения дифракционных потерь, которые возникают вследствие дифракции электромагнитного поля на острых гранях рефлектора.

Проведенный анализ информации, доступной из открытых источников, показывает, что в литературе недостаточно подробно рассмотрены данные вопросы.

Целью работы является построение объемной модели профилированного рефлектора в задачах электродинамического моделирования с учетом особенностей построения ЗА.

Для достижения поставленной цели решается задача разработки соответствующего алгоритма.

**Алгоритм представления профилированного рефлектора ЗА.** Для представления профилированного рефлектора установлены следующие исходные данные:

- ♦ определена Декартова система координат, связанная с рефлектором ЗА, у которой ось  $z$  направлена в сторону его геометрической оси;
- ♦ использовано известное уравнение  $z = f(x, y)$ , описывающее поверхность рефлектора;
- ♦ задана длина волны  $\lambda$  на средней рабочей частоте.

Построение объемной модели профилированного рефлектора выполнено численными методами. Поэтому на первом шаге сформирована координатная сетка  $(x, y)$  с числом строк  $N$  и столбцов  $M$ . Определены номера строк  $n \in [0, N - 1]$  и номера столбцов  $m \in [0, M - 1]$ . В задачах электродинамического моделирования шаг координатной сетки  $d$  по строкам и столбцам в значительной степени определяет сложность объемной фигуры и, как следствие, требования к объему вычислительных ресурсов. Поэтому значение  $d$  необходимо выбирать как можно большим. С другой стороны, шаг сетки  $d$ , определяющий точность формирования поверхности, зависит в АС от рабочего сектора углов  $\Delta\theta$

$$d \leq \frac{\lambda}{1 + \sin(\Delta\theta)}.$$

Формула определяет условие отсутствия дифракционных максимумов в рабочем секторе углов. Поэтому значение  $d$  выбирается, исходя из компромисса между данными условиями, и может составлять от  $\lambda/4$  до  $\lambda/2$  в общем случае.

При задании координатной сетки необходимо учитывать возможность замощения синтезируемой поверхности без пропусков. Для этого могут быть использованы правильные треугольники или шестиугольники. В данном исследовании поверхность рефлектора разделена на шестиугольники, а координатная сетка в соответствии с этим задана формулами:

$$\begin{aligned} x_{n,m} &= d \cdot m - \frac{d \cdot (M - 1)}{2} + (-1)^n \cdot \frac{d}{4}, \\ y_n &= -d \cdot n + \frac{d \cdot (N - 1)}{2}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом (1) координаты узлов поверхности рефлектора имеют вид:  $x_{n,m}$ ,  $y_n$ ,  $z_{n,m} = f(x_{n,m}, y_n)$ . Пример возможного варианта координатной сетки и взаимного положения узлов поверхности приведен на рис. 1 и 2 соответственно.

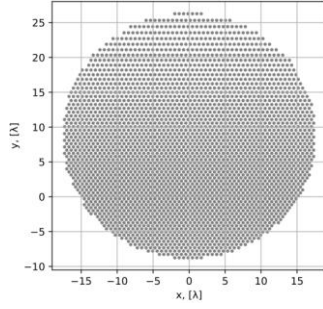


Рис. 1. Координатная сетка

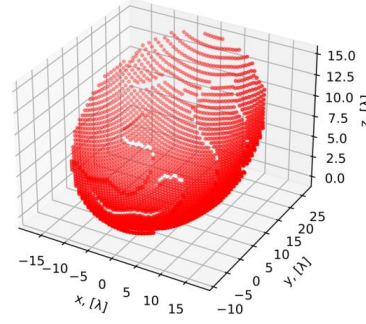


Рис. 2. Узлы поверхности рефлектора

Для замощения полученной фигуры шестиугольниками необходимо определить координаты их вершин. В заданной системе координат положение вершин шестиугольников можно вычислить следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{n,m}^{(i)} &= x_{n,m} + R \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right), \\ y_n^{(i)} &= y_n + R \cdot \cos\left(\frac{\pi}{3} \cdot i\right), \\ z_{n,m}^{(i)} &= f(x_{n,m}^{(i)}, y_n^{(i)}), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R = \frac{d}{2 \cdot \cos(\frac{\pi}{6})}$  – радиус окружности, описанной вокруг шестиугольника,  $i \in [0, 5]$  – номер вершины шестиугольника. Результаты вычислений с помощью (2) и форма полученной поверхности рефлектора, состоящей из шестиугольников, приведены на рис. 3 и 4 соответственно. Поверхность рефлектора на рис. 4 приводится для контроля промежуточного результата вычислений, вопросы же ее построения будут рассмотрены далее.

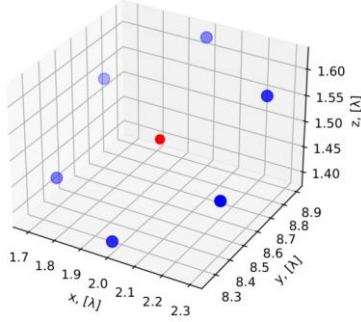


Рис. 3. Вершины шестиугольника



Рис. 4. Поверхность рефлектора, состоящая из шестиугольников

Полученная поверхность рефлектора не является замкнутой, что обуславливается заданным уравнением  $z = f(x, y)$ . Следовательно, результат электродинамического моделирования такой ЗА будет некорректным. Для устранения данного недостатка предлагается дополнить поверхности каждого из шестиугольников до объемных фигур (элементов рефлектора), что позволит построить замкнутую поверхность, на которой могут быть заданы граничные условия.

Пусть обратную поверхность таких элементов описывает уравнение  $z = f'(x, y)$ , которое является более простым в сравнении с  $z = f(x, y)$ , а также выполняется неравенство

$$z_{n,m}^{(i)} \geq f'(x_{n,m}^{(i)}, y_n^{(i)}) + h, \quad (3)$$

где  $h$  – минимальная толщина рефлектора.

Результаты вычислений с помощью (2) и (3) приведены на рис. 5. Объемная модель рефлектора, состоящая из объемных фигур, показана на рис. 6.

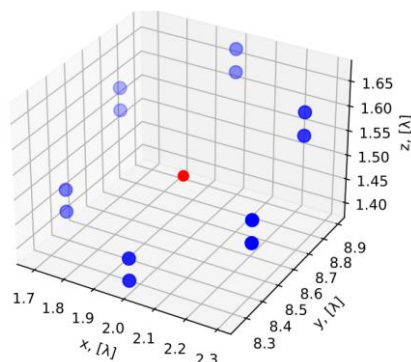


Рис. 5. Вершины объемного элемента рефлектора



Рис. 6. Поверхность рефлектора, состоящая из объемных фигур

Рабочая поверхность построенной объемной фигуры соответствует поверхности рефлектора, показанной на рис. 4, а также является замкнутой, и на ней могут быть заданы граничные условия. Синтезированная объемная модель может использоваться в задачах электродинамического моделирования в качестве исходных данных. Однако совокупность большого количества криволинейных поверхностей, полученных согласно уравнениям  $z = f(x, y)$  и  $z = f'(x, y)$ , сложна в машинной обработке при электродинамическом моделировании и сложна в производстве. Также большое количество острых граней способствует росту дифракционных потерь, которые возникают вследствие дифракции электромагнитного поля.

Для устранения указанных недостатков принято решение объединить некоторые вершины шестиугольников следующим образом. Поверхность каждого шестиугольника разделена на локально плоские участки путем замощения треугольниками. Такая поверхность имеет больше степеней свободы для редактирования в сравнении с аналитической поверхностью в общем случае.

Грани, показанные на рис. 6, имеют малое распределение высот дислокаций для большинства элементов рефлектора и порядка  $4\lambda/10$  для элементов, в окрестности которых ФР на апертуре изменяется на значение, близкое к 360 градусов. В работах [18–20] проведен анализ влияния геометрических искажений раскрыва АС на параметры ДН, и показано, что искажения, не превышающие  $\pm\lambda/24$ , не оказывают существенного влияния на параметры ДН. С учетом этого выбран порог, при превышении которого относительная дислокация элементов сохраняется, а в противоположном случае выполняется объединение вершин образующих его шестиугольников путем приравнивания их координаты  $z^{(i)}$  среднему арифметическому с соседними вершинами. Примеры элементов рефлектора с разделенными и объединенными вершинами приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Для построения объемных моделей элементов рефлектора, показанных на рис. 7, 8, необходимо описать поверхности каждого из них определенным образом. Результат описания должен восприниматься программами электродинамического моделирования как твердое тело. Подобным свойством обладают объемные модели, описанные с помощью форматов «\*.step», «\*.iges», «\*.stl», «\*.obj» и др. В данной работе использован формат «\*.stl», так как он имеет упрощенную структуру и может быть сформирован с помощью большинства языков программирования, у которых реализована возможность работы со строковыми переменными. Элемент структуры файла «\*.stl» имеет вид:

```

facet normal 0 0 0
  outer loop
    vertex - x1 y1 z1
    vertex - x2 y2 z2
    vertex - x3 y3 z3
  endloop
endfacet,

```

где  $x_1 y_1 z_1$ ;  $x_2 y_2 z_2$ ;  $x_3 y_3 z_3$  – координаты вершин треугольников, образующих поверхности элемента рефлектора. На рабочей и обратной стороне элемента рефлектора таких треугольников выделено по шесть. Внутри группы из шести треугольников каждый из них имеет общую вершину с координатами  $x_{n,m}$ ,  $y_n$ ,  $z_{n,m} = f(x_{n,m}, y_n)$  и  $x_{n,m}$ ,  $y_n$ ,  $z'_{n,m} = f'(x_{n,m}, y_n)$  для рабочей и обратной поверхностей рефлектора соответственно (см. рис. 7, 8). Сопрягающиеся грани элементов рефлектора представляют собой четырехугольники, где каждый из них разделен на два треугольника, координаты вершин которых вычислены ранее. Таким образом, каждый элемент рефлектора описывается совокупностью из двадцати четырех треугольников, заданных с помощью известной структуры «\*.stl» файла.

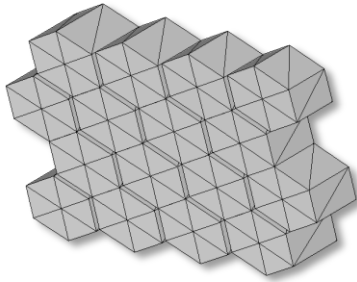


Рис. 7. Элементы рефлектора с разделенными вершинами

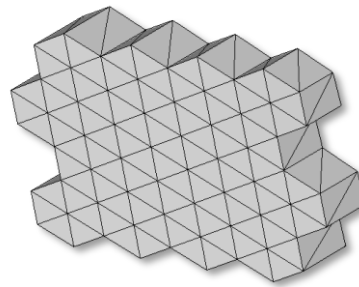


Рис. 8. Элементы рефлектора с объединенными вершинами

Применяя данный подход ко всем элементам рефлектора, получена его объемная модель, которая показана на рис. 9.

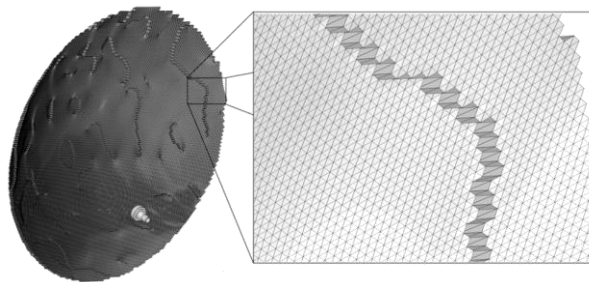


Рис. 9. Объемная модель ЗА со сглаженным рефлектором

Объемная модель ЗА, показанная на рис. 9, имеет на 93% меньшую площадь дислокаций элементов рефлектора по сравнению с исходной фигурой. Полное устранение дислокаций элементов рефлектора приводит к существенному искажению требуемого ФР и, соответственно, к ухудшению параметров ДН. Также на поверхности данной модели могут быть заданы граничные условия, и путем электродинамического моделирования рассчитаны параметры ДН.

Описанную последовательность действий можно обобщить блок-схемой, приведенной на рис. 10.

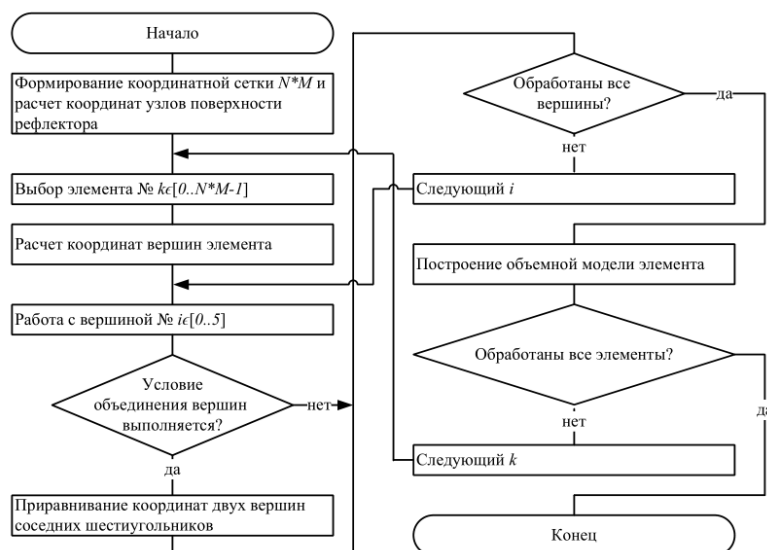


Рис. 10. Блок-схема алгоритма представления профилированного рефлектора

В работе [21] проведена верификация данного алгоритма. В ней для ЗА методами электродинамического моделирования рассчитана ДН. Результаты расчетов показали, что ожидаемые параметры ДН и параметры ДН, полученные при моделировании, не имеют значительных отличий ни в части коэффициента направленного действия, ни в части формы сечения главного лепестка.

**Выводы.** Исследованный алгоритм представления профилированного рефлектора ЗА позволяет построить соответствующую объемную модель, которая может быть использована в задачах электродинамического моделирования в качестве исходных данных. Алгоритм учитывает особенности построения ЗА и состоит из следующих основных шагов:

- ◆ формирование координатной сетки, в соответствии с которой будут расположены элементы рефлектора ЗА;
- ◆ расчет координат вершин элементов рефлектора;
- ◆ уменьшение площади взаимной дислокации элементов путем объединения близко расположенных вершин;
- ◆ формирование файла, содержащего информацию о совокупности поверхностей, образующих элементы рефлектора ЗА.

Представленный алгоритм преобразует результаты решения уравнения, содержащего информацию о форме рефлектора, в поверхность без разрывов, на которой могут быть заданы граничные условия в используемых программных пакетах электродинамического моделирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2015. – Vol. 63, No. 4. – P. 1234-1246. – DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
2. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2020. – Vol. 11, No. 68. – P. 7682-7687. – DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
3. Калошин В.А., Фролова Е.В. Синтез трехзеркальной системы с заданной формой главного зеркала по фазовому фронту и закону отображения // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 887-890. – DOI:10.1134/S0033849419080072.

4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes // *IEEE Antennas and wireless propagation letters*. – 2018. – Vol. 17, No. 7. – P. 1171-1175. – DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications // *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*. – 2021. – P. 658-661. – DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
6. Мануилов Б.Д., Баишлы П.Н., Безуглов Ю.Д. Алгоритм управления многофункциональными антенными решетками на основе метода парциальных диаграмм // *Антенны*. – 2005. – № 9. – С. 72-81.
7. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн. – М.: Советское радио, 1980. – 295 с.
8. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. – М.: Наука, 1985. – 336 с.
9. Узолин Е.Ю., Крюков И.Г. Синтез профиля поверхности рефлекторов однозеркальных контурных антенн с использованием полиномов Цернике // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2012. – № 3. – С. 92-95.
10. Банков С.Е., Калошин В.А., Фролова Е.А. Оптимизация планарных зеркальных систем по совокупности показателей качества // *Радиотехника и электроника*. – 2014. – Т. 59, № 11. – С. 1090-1101. – DOI: 10.7868/S0033849414100027.
11. Калошин В.А., Попов А.П. О синтезе двухзеркальных антенн по амплитудной диаграмме направленности // *Радиотехника и электроника*. – 1982. – № 6. – С. 1110-1119.
12. Rafael A. Penchel, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics // *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*. – 2016. – P. 1-9. – DOI: 10.1155/2016/4715681.
13. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam // *Ural mathematical journal*. – 2017. – Vol. 3, No. 2. – P. 143-151. – DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
14. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections // *IEEE Antennas and propagation Society International Symposium*. – 1992 Digest. – P. 363-366. – DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
15. Шишлов А.В. Зеркальные антенны с контурными диаграммами направленности – эффективность и предельные возможности // *Радиотехника*. – 2006. – № 4. – С. 45-50.
16. Мищенко Е.Н., Мищенко С.Е. Рекуррентный алгоритм вычисления радиальных функций полиномов Цернике // *Вестник РГУПС*. – 2017. – № 1. – С. 121-127.
17. Безуглов Д.А., Забродин Р.А. Методика аппроксимации гибкого адаптивного зеркала ограниченным числом полиномов Цернике // *Оптика атмосферы и океана*. – 2006. – Т. 19, № 9. – С. 810-814.
18. Венецкий А.С., Калошин В.А. Фазовое, лучевое и амплитудное распределение поля в осесимметричной двухзеркальной телескопической системе при смещении облучателя из фокуса // *Доклады VI Всеросс. конф. «Радиолокация и радиосвязь»*. – М., 2012. – Т. 2. – С. 250-254.
19. Габриэлян Д.Д., Занин К.М., Федоров Д.С. Математическая модель излучающего раскрыва фазированной антенной решетки при наличии погрешностей установки антенных элементов // *Антенны*. – 2023. – № 2. – С. 52-58. – DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202302-06>.
20. Занин К.М. Математическая модель излучающего раскрыва фазированной антенной решетки, имеющей геометрические искажения апертуры // *Сб. трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь» (RLNC\*2023)*. – Т.4. – С. 93-102.
21. Занин К.М., Габриэлян Д.Д., Кузнецов Ю.В., Мищенко С.Е. Профилирование рефлектора зеркальной антенны для формирования заданного контура главного лепестка диаграммы направленности // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2024. – № 4. – С. 169-181. – <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-4-169-181>.

## REFERENCES

1. Florencio R., Encinar J.A., Boix R.R., Losada V., and Toso G. Reflectarray antennas for dual polarization and broadband telecom satellite applications, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2015, Vol. 63, No. 4, pp. 1234-1246. DOI: 10.1109/TAP.2015.2391279.
2. Daniel R. Prado, Manuel Arrebola, Marcos R. Pino, George Goussetis. Contoured-Beam Dual-Band Dual-Linear Polarized Reflectarray Design Using a Multiobjective Multistage Optimization, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2020, Vol. 11, No. 68, pp. 7682-7687. DOI: 10.1109/TAP.2020.2993014.
3. Kaloshin V.A., Frolova E.V. Sintez trekhzernkal'noy sistemy s zadannoy formoy glavnogo zerkala po fazovomu frontu i zakonu otobrazheniya [Synthesis of a three-mirror system with a given shape of the main mirror along the phase front and the law of mapping], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2019, Vol. 64, No. 9, pp. 887-890. DOI: 10.1134/S0033849419080072.

4. JiXiang Wan, Tao Yan, Feng Wang. A Hybrid Reflector Antenna for Two Contoured Beams With Different Shapes, *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2018, Vol. 17, No. 7, pp 1171-1175. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2836927.
5. Zhenqin Zheng, Long Zhang, Xianting Xie, Qingwei Ji, Hui Chen, Chunxu Mao. Single-Feed Reflectarray Antenna with Eight Beams for Satellite Communications, *IEEE 4th International Conference on Electronic Information and Communication Technology*, 2021, pp. 658-661. DOI: 10.1109/ICEICT53123.2021.9531087.
6. Manuilov B.D. Bashly P.N. Bezuglov Yu.D. Algoritm upravleniya mnogofunktsional'nykh antennymi reshetkami na osnove metoda partial'nykh diagramm [Algorithm for controlling multifunctional antenna arrays based on the method of partial diagrams], *Antenny* [Antennas], 2005, No. 9, pp. 72-81.
7. Zelkin E.G., Sokolov V.G. Metody sinteza antenn [Methods of antenna synthesis]. Moscow: Sovetskoe radio, 1980, 295 p.
8. Vorontsov M.A., Shmal'gauzen V.I. Printsipy adaptivnoy optiki [Principles of adaptive optics]. Moscow: Nauka, 1985, 336 p.
9. Uzun E.Yu., Kryukov I.G. Sintez profilya poverkhnosti reflektorov odnozerkal'nykh konturnykh antenn s ispol'zovaniem polinomov Tsernike [Synthesis of the surface profile of reflectors of single-mirror contour antennas using Zernike polynomials], *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics], 2012, No. 3, pp. 92-95.
10. Bankov S.E., Kaloshin V.A., Frolova E.A. Optimizatsiya planarnykh zerkal'nykh sistem po sovokupnosti pokazateley kachestva [Optimization of planar reflector systems for a set of quality indices], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2014, Vol. 59, No. 11, pp. 1090-1101. DOI: 10.7868/S0033849414100027.
11. Kaloshin V.A., Popov A.P. O sinteze dvukhzerkal'nykh antenn po amplitudnoy diagramme napravlenosti [On the synthesis of two-mirror antennas based on the amplitude radiation pattern], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1982, No. 6, pp. 1110-1119.
12. Rafael A. Pencil, José R. Bergmann, Fernando J. S. Moreira. Shaping Single Offset Reflector Antennas Using Local Axis-Displaced Confocal Quadrics, *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2016, pp. 1-9. DOI: 10.1155/2016/4715681.
13. Semenov B.V., Chernykh N.I., Pleshchev V.M. New method of reflector surface shaping to produce a prescribed contour beam, *Ural mathematical journal*, 2017, Vol. 3, No. 2, p. 143-151. DOI: 10.15826/umj.2017.2.015.
14. Poulton G.T., Hay S.G. Shaped reflector synthesis by successive projections, *IEEE Antennas and propagation Society International Symposium*, 1992 Digest, pp. 363-366. DOI: 10.1109/APS.1992.221924.
15. Shishlov A.V. Zerkal'nye anteny s konturnymi diagrammami napravlenosti – effektivnost' i predel'nye vozmozhnosti [Reflector antennas with contoured beams: efficiency and limiting capability], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 2006, No. 4, pp. 45-50.
16. Mishchenko E.N., Mishchenko S.E. Rekurrentnyy algoritm vychisleniya radial'nykh funktsiy polinomov Tsernike [Recurrent algorithm for calculation of the radial functions of Zernike polynomials], *Vestnik RGUPS* [Bulletin of the Rostov State University of Railways], 2017, No. 1, pp. 121-127.
17. Bezuglov D.A., Zabrodin R.A. Metodika approksimatsii gibkogo adaptivnogo zerkala ograniченным chislom polinomov Tsernike [Methodology for approximating a flexible adaptive mirror by a limited number of Zernike polynomials], *Optika atmosfery i okeana* [Optics of the Atmosphere and Ocean], 2006, Vol. 19, No. 9, pp. 810-814.
18. Venetskiy A.S., Kaloshin V.A. Fazovoe, luchevoe i amplitudnoe raspredelenie polya v osesimmetrichnoy dvukhzerkal'noy teleskopicheskoy sisteme pri smeshchenii obluchatelya iz fokusa [Phase, radial and amplitude distribution of the field in an axisymmetric two-reflector telescopic system when the irradiator is displaced from focus], *Doklady VI Vseross. konf. «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»* [Reports of the VI All-Russia conference "Radar and radio communication"]. Moscow, 2012, Vol. 2, pp. 250-254.
19. Gabriel'yan D.D., Zanin K.M., Fedorov D.S. Matematicheskaya model' izluchayushchego raskryva fazirovannoy antennoy reshetki pri nalichii pogreshnostey ustanovki antennoykh elementov [Mathematical model of phased array antenna aperture in the presence of errors in the position of antenna elements], *Antenny* [Antennas], 2023, No. 2, pp. 52-58. DOI: <https://doi.org/10.18127/j03209601-202302-06>.

20. *Zanin K.M. Matematicheskaya model' izluchayushchego raskryva fazirovannoy antennoy reshetki, imeyushchey geometricheskie iskazheniya apertury* [Mathematical model of the aperture field of a phased antenna array in the presence of geometric distortions of the aperture], *Sb. trudov XXIX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz'» (RLNC\*2023)* [Reports of XXIX International Scientific Conference «Radiolocation, navigation, communication» (RLNC\*2023)], 2023, Vol. 4, pp. 93-102.
21. *Zanin K.M., Gabriel'yan D.D., Kuznetsov Yu.V., Mishchenko S.E. Profilirovanie reflektora zerkal'noy antennoy dlya formirovaniya zadannogo kontura glavnogo lepesta diagrammy napravlenosti* [Shaping of contoured-beam antenna main lobe by profiling of reflector antenna], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2024, No. 4, pp. 169-181. Available at: <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2024-4-169-181>.

**Занин Константин Михайлович** – ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»; e-mail: [konstantinzanin@rambler.ru](mailto:konstantinzanin@rambler.ru); г. Ростов-на-Дону, Россия; тел.: 88632018463; аспирант; руководитель группы.

**Zanin Konstantin Mikhailovich** – FSUE “Rostov-on-Don Research Institute of Radio Communication”; e-mail: [konstantinzanin@rambler.ru](mailto:konstantinzanin@rambler.ru); Rostov-on-Don, Russia; phone: +78632018463; postgraduate student, head of group.

УДК 004.8

DOI 10.18522/2311-3103-2024-6-85-96

**Е.В. Лищенко, Э.В. Мельник, А.С. Матвиенко, А.Ю. Будко**

# **МЕТОД ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДАННЫХ ГЛОБАЛЬНОЙ ГЕОПРИВЯЗКИ\***

Рассмотрена проблема, связанная с определением текущих координат подвижного объекта в условиях нестабильного сигнала от глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы подвижные объекты находят все более широкое применение практически во всех отраслях промышленности, сельского хозяйства, на транспорте, решая разнообразные задачи наблюдения, разведки, мониторинга состояния контролируемых объектов, проведение поисково-спасательных операций, доставки грузов и много другое. При этом успешность выполнения заданий во многом зависит от того, насколько точно и эффективно работает его бортовая навигационная система в режиме реального времени. Существующие решения бортовых систем позиционирования предполагают использование инерциальных и глобальных навигационных спутниковых систем. Для первого типа характерно наличие эффекта дрейфа ввиду использования гироскопов и акселерометров. Для систем, использующих данные от ГСП сложности связаны с частичной или полной потерей сигнала. В настоящей работе описан метод сохранения заданной точности пространственного позиционирования подвижного объекта в условиях частичного или полного отсутствия данных от ГСП объекта. Данный метод основан на комбинации алгоритмов компьютерного зрения обработки кадров видеопотока от бортовой системы технического зрения (СТЗ) подвижного объекта, с целью обеспечения точности позиционирования в условиях частичного или полного отсутствия данных от спутниковых систем навигации. На основании передоложенного метода разработан алгоритм, предназначенный для автоматизированного определения координат подвижного объекта в условиях отсутствия данных привязки к карте местности от глобальных систем позиционирования (ГСП). Проведены эксперименты, которые подтвердили эффективность работы алгоритма в части сокращения временных затрат на описание и сопоставление ключевых точек и повышения точности сопоставления изображений. С использованием разработанного алгоритма была решена задача сопоставления спутниковых снимков, которая является важным этапом задачи позиционирования подвижного объекта без использования данных глобальной геопривязки.

Компьютерное зрение; подвижный объект; бортовая подсистема позиционирования; система технического зрения; карта местности; искусственный интеллект; электронографическая карта местности.

---

\* Исследование выполнено при поддержке гранта № 4Л/22-04-ПИШ.