

4. Eder J., Olivotto G. E., Gruber W. A Data Warehouse for Event Logs. *Proceedings of First International Conference on Engineering and Deployment of Cooperative Information Systems (EDCIS 2002). Lecture Notes in Computer Science*. China, Beijing, 2002, vol. 2480, pp. 1–15.
5. La Rosa M., Dumas M., ter Hofstede A., Mendling J. Congurable Multi-Perspective Business Process Models. *Information Systems*, 2011, no. 36 (2), pp. 313–340.
6. Mamaliga. T. *Realizing a Process Cube Allowing for the Comparison of Event Data. Master's thesis*. Eindhoven University of Technology, 2013.
7. Ribeiro J. T. S., Weijters A. J. M. M. Event Cube: Another Perspective on Business Processes. *Proceedings of 19th International Conference on Cooperative Information Systems. Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Springer-Verlag, 2011, vol. 7044, pp. 274–283.
8. van der Aalst W. M. P. Process Cubes: Slicing, Dicing, Rolling Up and Drilling Down Event Data for Process Mining. *Proceedings of Asia Pacific Conference on Business Process Management (AP-BPM 2013). Lecture Notes in Business Information Processing*, Berlin, Springer-Verlag, 2013, vol. 159, pp. 1–22.
9. van der Aalst W. M. P. *Process Mining: Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Springer, 2010. 349 p.
10. XES. Available at: <http://www.xes-standard.org> (accessed 1 December 2013).

УДК 621.391.677: 519.711.3

ПОСТРОЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕРКАЛЬНОЙ ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ

Шишов Максим Владимирович, аспирант, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: admin@r4f.su

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Якимов Александр Николаевич, доктор технических наук, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: admin@r4f.su

Для исследования излучения зеркальной параболической антенны (ЗПА) методом математического моделирования необходимо построить её геометрическую модель, заменяющую излучающую поверхность антенны многогранником. При этом поле излучения модели антенны представляется как суперпозиция полей, формируемых токами, протекающими по граням модели с учетом амплитуд и фаз волн, распространяющихся от этих граней. Отличие многогранника от параболоида приводит к возникновению фазовых ошибок, минимизация которых является важной задачей. Авторами предложен алгоритм построения геометрической модели излучающей поверхности ЗПА, основанный на методе триангуляции Делоне, позволяющем произвести дискретизацию излучающей поверхности антенны в виде совокупности равносторонних плоских треугольных конечных элементов; получить совокупности узловых точек, образующих эти конечные элементы и, соответственно, координаты узлов. Этих данных оказывается достаточно для проведения расчета как полей, формируемых конечными элементами излучающей поверхности антенны, так и для нахождения их суперпозиции с учетом пространственной ориентации этих элементов и векторного характера электромагнитного поля. Дана оценка погрешности представленной модели. Предложенный алгоритм, основанный на методе триангуляции Делоне, обеспечивает выполнение требования к максимально допустимой фазовой ошибке при минимальных вычислительных затратах. Это позволяет использовать модель не только при расчете характеристик излучения ЗПА, но и для оценки влияния внешних воздействий на конструкцию антенны конечно-элементным методом.

Ключевые слова: излучающая поверхность, модель, антенна, триангуляция, конечный элемент, пространственная ориентация, суперпозиция, электромагнитное поле, фазовая ошибка, погрешность

**BUILDING GEOMETRICAL MODEL OF RADIATION
OF THE MIRROR PARABOLIC ANTENNA**

Shirshov Maksim V., post-graduate student, Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: admin@r4f.su

Yurkov Nikolay K., D.Sc. (Engineering), Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Yakimov Aleksandr N., D.Sc. (Engineering), Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: admin@r4f.su

To investigate the radiation antenna parabolic mirror (PAD) mathematical modeling, it is necessary to construct a geometric model, replacing the antenna radiating surface polyhedron. The field radiation pattern of the antenna is represented as a superposition of fields generated by currents flowing along the edges of the model taking into account the amplitudes and phases of these faces propagating waves. Unlike polyhedron from parabolic leads to phase errors, minimization of which is an important task. The authors propose an algorithm for constructing a geometric model of the radiating surface of PAD based on Delaunay triangulation method, which made possible the sampling of the radiating surface of the antenna, get together nodal points forming the finite elements of the surface in the form of equilateral triangles and flat, respectively, the coordinates of these points. This data is sufficient to perform the calculation as fields formed end surface of the antenna radiating elements, and to locate them in view of the spatial superposition of these elements and the orientation of the vector nature of the electromagnetic field. The estimation error of the presented model. The proposed algorithm based on Delaunay triangulation method, ensures that the requirements for the maximum allowable phase error with minimal computational cost. This enables not only to use the model for calculating specula radiation characteristics of a PAD, but also to evaluate the effect of external influences on the antenna structure finite element method.

Keywords: radiation surface, model, antenna, triangulation, finite element, spatial orientation, superposition, electromagnetic field, phase error, error

Введение. Рассматриваемая зеркальная параболическая антенна (ЗПА) состоит из параболического зеркала и закрепленного в его фокусе рупорного облучателя. Физическое моделирование такой антенны для достижения наилучших электрических характеристик сопряжено с большими материальными и временными затратами. Поэтому перспективным оказывается использование математического моделирования излучения такой антенны.

Построение геометрической модели зеркала антенны сводится к дискретному представлению излучающей поверхности. В связи с необходимостью обеспечения адекватности математической модели линейные размеры дискретных элементов должны быть сравнимы с длиной излучаемых электромагнитных волн [13].

В связи с этим в сверхвысоком частотном диапазоне волн при формировании геометрической модели зеркала ЗПА требуются десятки тысяч дискретных элементов её излучающей поверхности, для каждого из которых необходимо решать интегральную задачу излучения с учетом амплитуд и фаз возбуждающих источников, а также векторного характера формируемого поля.

Из-за большого объема требуемых при этом вычислений целесообразно представление излучающей поверхности в виде многогранника с гранями в виде плоских элементов первого порядка. Отличие этого многогранника от параболоида приводит к возникновению фазовых сдвигов полей, создаваемых отдельными гранями модели излучающей поверхности антенны. При этом результирующее поле излучения антенны является суперпозицией полей, формируемых отдельными гранями с учетом их амплитуд и фаз [2, 5].

При построении геометрической модели излучающей поверхности параболической антенны перспективным оказывается использование метода триангуляции Делоне, обеспечивающего деление этой поверхности на равносторонние плоские треугольные конечные элементы [1, 8].

Целью данной статьи является исследование возможностей метода триангуляции Делоне для построения геометрической модели зеркала ЗПА в виде многогранника с плоскими треугольными гранями и максимально возможным шагом дискретизации при заданной предельно допустимой фазовой ошибке.

Постановка задачи. Алгоритм построения геометрической модели параболической антенны состоит из трёх основных шагов:

- разбиение параболической поверхности на кольцевые зоны;
- триангуляция кольцевых зон;
- объединения элементов дискретизации кольцевых зон в единую модель.

Рассмотрим алгоритм построения геометрической модели ЗПА (рис. 1), излучающая поверхность которой описывается формулой [8]:

$$z = (x^2 + y^2)/4f ,$$

где x, y, z – пространственные координаты, а f – фокусное расстояние. В результате построения геометрической модели излучающая поверхность разбивается на равносторонние или близкие к равносторонним треугольники. В силу криволинейности параболического профиля, эта равносторонность достигается лишь внутри кольцевых зон, определяемых равномерным шагом разбиения параболического профиля в одном из его главных сечений.

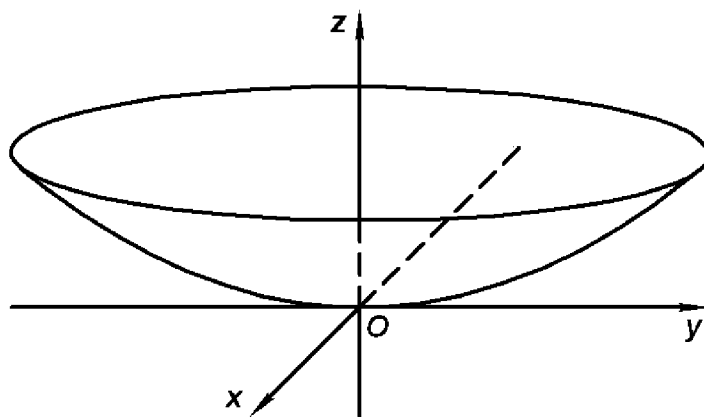


Рис. 1. Зеркало параболической антенны

Требования к шагу дискретизации обусловлены тем, что в ЗПА максимальная фазовая ошибка, вызванная отклонениями профиля зеркала от параболоида, не должна превышать $\lambda/16$ [5]. Для выполнения этого требования введем ряд ограничений:

- линейный размер шага дискретизации не должен превышать длину волны, так как проведенные растровым методом исследования показали, что при большем чем λ шаге дискретизации диаграмма направленности модели антенны значительно отклоняется от рассчитанной для гладкого параболоида [13];
- размеры сторон треугольных элементов дискретизации должны быть равны между собой или близки, так как есть риск вырождения решения [10].

При растровом методе излучающая поверхность зеркала, описываемая формулой параболоида, в программных пакетах или с помощью специально разработанных программ разбивается на прямоугольные дискретные элементы взаимно перпендикулярными плоскостями, параллельными осям Ox и Oy декартовой системе координат с шагом $\Delta L = 0,5\lambda$. Треугольные элементы дискретизации получаются в результате их последующего деления пополам [13].

Опыт проведения вычислительных экспериментов показал, что при отклонениях размеров сторон треугольников до 41 % решение не вырождается.

Построение модели. Для обеспечения разбиения излучающей поверхности антенны на треугольники выбираем уровни сечения параболоида исходя из рекомендованного для растровой дискретизации шага ΔL , длина которого составляет [2]:

$$\Delta L = 0,5 \cdot \lambda,$$

где λ – длина волны электромагнитных колебаний, формируемых зеркалом антенны.

В векторной интерпретации эта кривая сечения параболоида представляет собой годограф векторной функции \mathbf{r} скалярных аргументов x , y , и z . Учитывая, что параболическое зеркало относится к осесимметричным излучателям, целесообразно осуществлять равномерное разбиение относительно центра параболы, совмещенного с центром декартовой системы координат (рис. 2). Интервал равномерного разбиения функции при этом определяется как разность $\Delta \mathbf{r}$ радиусов-векторов узловых точек при равномерной дискретизации этой кривой

$$\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_{k-1},$$

где $k = 1, 2, \dots, K$; K – максимальный порядковый номер индекса радиуса-вектора узловой точки сечения параболоида в полупространстве zOx с положительной координатой x . При этом индекс $k - 1 = 0$ соответствует координатам $x = 0, z = 0$.

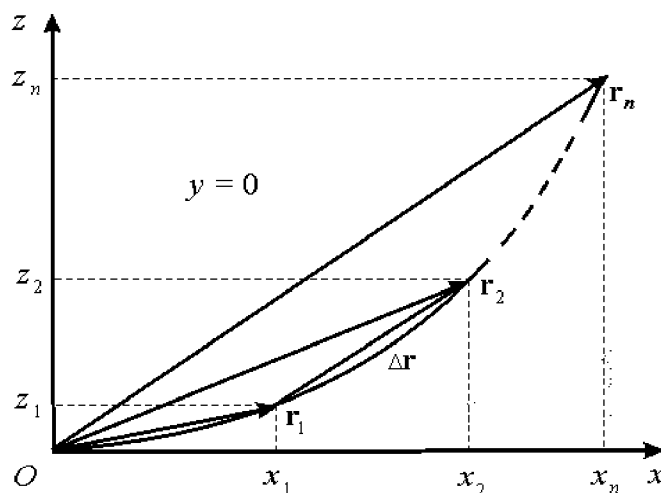


Рис. 2. Дискретизация параболического профиля в сечении xOz

Получим равномерную линейную дискретизацию годографа векторной функции, описывающей параболический профиль (см. рис. 2), в декартовой системе координат. Тогда шаг дискретизации ΔL будет равным [5]

$$\Delta L = |\Delta \mathbf{r}| = \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (z_k - z_{k-1})^2}. \quad (1)$$

Так как в плоскости xOz сечение параболоида описывается уравнением:

$$z = x^2 / (4 \cdot f), \quad (2)$$

то $z_k = x_k^2 / (4 \cdot f)$; $z_{k-1} = x_{k-1}^2 / (4 \cdot f)$.

Используем полученное значение x_k в плоскости координат xOy как радиус окружности при построении многогранника [3]:

$$x = x_k \cdot \cos(\alpha), \quad y = x_k \cdot \sin(\alpha), \quad (3)$$

где α – угол относительно оси Ox , образованный вращением радиуса-вектора \mathbf{r} вокруг оси Oz , необходимый для определения координат узловых точек граней многогранника:

$$\alpha = 360^\circ / (4 \cdot 2^k). \quad (4)$$

В результате получаем массив координат узловых точек, определяющих геометрию параболоида и составляющих основу сетки с узловыми точками, размещенными на его поверхности. Далее, используя алгоритм, соединяющий треугольники в единую поверхность, производим «сшивание» этой поверхности (рис. 3).

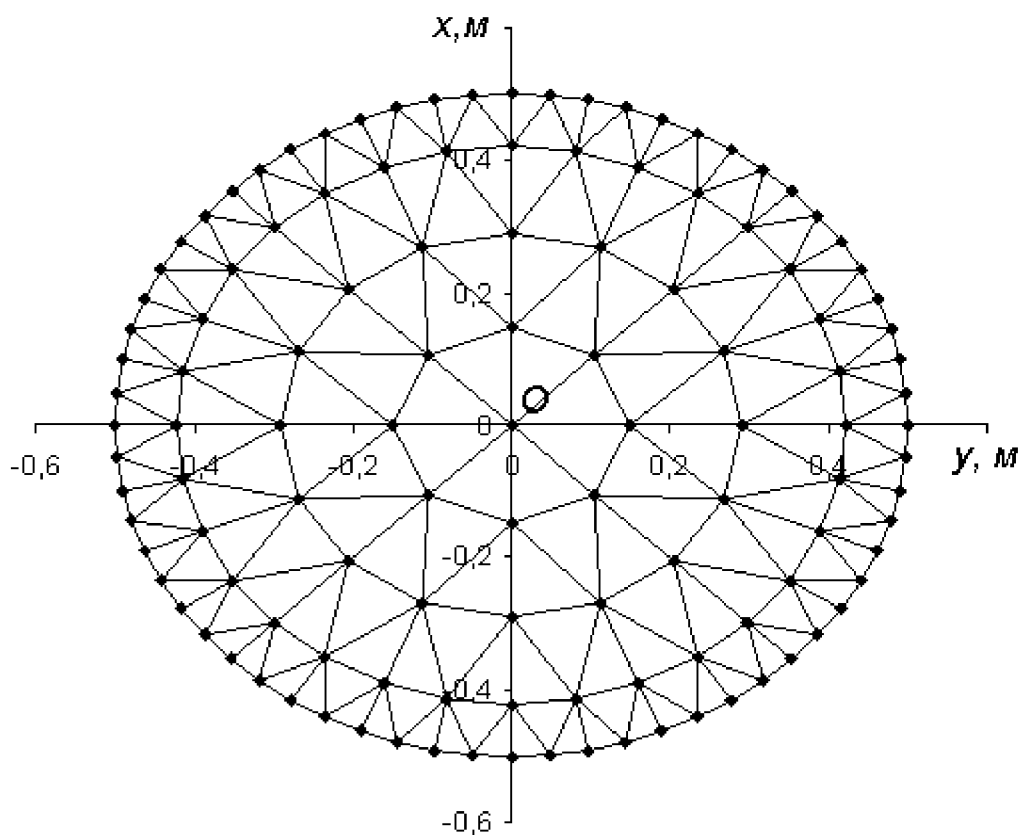


Рис. 3. Результат дискретизации излучающей поверхности антенны в декартовой системе координат

Таким образом, предложенный в данной работе алгоритм позволяет произвести дискретизацию излучающей поверхности параболической антенны, получить совокупности узловых точек, образующих конечные элементы этой поверхности в виде равнобедренных треугольников и, соответственно, координаты этих точек. Этих данных оказывается достаточно для проведения расчета как полей, формируемых поверхностными токами конечных элементов излучающей поверхности антенны, так и их суперпозиции с учетом пространственной ориентации этих элементов и векторного характера электромагнитного поля.

Анализ точности модели. Оценим точность построения геометрической модели в рамках теории геометрической оптики по отклонению треугольных граней от параболоида в их центроидах по ходу парциального луча излучения ЗПА.

Центроид M , являющийся центром излучающего элемента дискретизации антенны, определим по пересечению медиан AA' и BB' (рис. 4) [7].

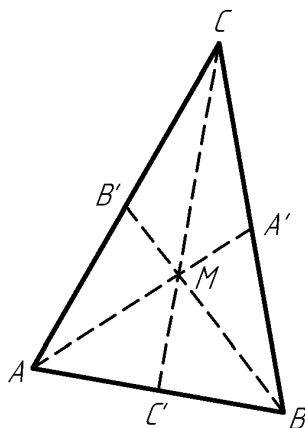


Рис. 4. К определению центроида

Точки A' и B' определяются полусуммами координат вершин треугольника ABC :

$$\begin{aligned}
 x_{A'} &= (x_C + x_B)/2, & y_{A'} &= (y_C + y_B)/2, & z_{A'} &= (z_C + z_B)/2, \\
 x_{B'} &= (x_C + x_A)/2, & y_{B'} &= (y_C + y_A)/2, & z_{B'} &= (z_C + z_A)/2.
 \end{aligned}$$

Координаты центроида M для каждого дискретного элемента определяются путем совместного решения уравнений, описывающих прямые AA' и BB' , исходя из координат точек A, A' и B, B' .

$$\begin{cases}
 (x_M - x_A)/(x_{A'} - x_A) = (y_M - y_A)/(y_{A'} - y_A) = (z_M - z_A)/(z_{A'} - z_A), \\
 (x_M - x_B)/(x_{B'} - x_B) = (y_M - y_B)/(y_{B'} - y_B) = (z_M - z_B)/(z_{B'} - z_B).
 \end{cases} \quad (5)$$

В результате решения системы уравнений (5) получим координаты y_M, x_M, z_M точки M :

$$\begin{aligned}
 y_M &= \frac{(x_B - x_A) \cdot (y_{A'} - y_A) \cdot (y_{B'} - y_B) + y_A \cdot (x_{A'} - x_A) \cdot (y_{B'} - y_B)}{(x_{A'} - x_A) \cdot (y_{B'} - y_B) - (x_{B'} - x_B) \cdot (y_{A'} - y_A)} - \\
 &\quad - \frac{y_B \cdot (x_{B'} - x_B) \cdot (y_{A'} - y_A)}{(x_{A'} - x_A) \cdot (y_{B'} - y_B) - (x_{B'} - x_B) \cdot (y_{A'} - y_A)};
 \end{aligned}$$

$$x_M = (y_M - y_A) \cdot (x_{A'} - x_A) / (y_{A'} - y_A) + x_A;$$

$$z_M = (x_M - x_A) \cdot (z_{A'} - z_A) / (x_{A'} - x_A) + z_A.$$

Погрешность модели определяется разностью хода парциального луча при отражении от дискретного элемента модели и параболического зеркала. Так как отраженные лучи направлены параллельно оси Oz [3], то погрешность определяется суммой отрезков MS и ES (рис. 5).

Точка S на поверхности параболического зеркала является результатом пересечения прямой, проходящей через точки F и M , с сечением параболоида в плоскости xOz . Координаты этой точки могут быть определены из системы уравнений:

$$\begin{cases} (x_S - x_F) / (x_M - x_F) = (y_S - y_F) / (y_M - y_F) = (z_S - z_F) / (z_M - z_F); \\ z_S = x_S^2 / (4 \cdot z_F), \end{cases} \quad (6)$$

где x_F, y_F, z_F – координаты точки F (фокусное расстояние).

В результате решения системы уравнений (6) получаем точку S отражения парциального луча от поверхности параболического зеркала антенны с координатами x_S, y_S, z_S с использованием следующих формул:

$$z_{1M} = \sqrt{x_M / (4 \cdot F)}; \quad \Omega = 0,5 \cdot (z_M - F) / z_{1M};$$

$$x_S = (\sqrt{x_M \cdot F + \Omega^2} + (\Omega / z_{1M})) / z_{1M};$$

$$y_S = y_M \cdot (x_S / x_M); \quad z_S = x_S^2 / (4 \cdot F).$$

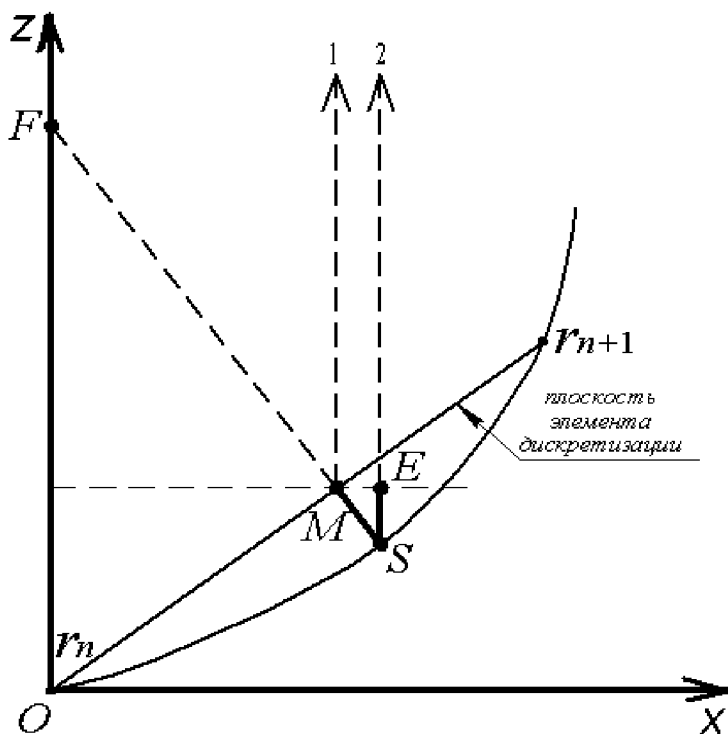


Рис. 5. Определение разности хода парциального луча

Так как парциальный луч отражается от параболического зеркала параллельно оси Oz , то координаты точки E (см. рис. 5) можно определить следующим образом. Точка E лежит в одной плоскости с точкой S параллельной плоскости xOz , а также лежит в одной плоскости с точкой M параллельной плоскости xOy , следовательно, координаты точки E являются проекциями точек E, M и составляют:

$$x_E = x_S; y_E = y_S \text{ и } z_E = z_M.$$

Дополнительный фазовый набег электромагнитной волны $\Delta\rho$ в центроидах элементов дискретизации определяется суммой отрезков MS и SE :

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{MS} + \Delta\rho_{SE}, \quad (7)$$

где $\Delta\rho_{SE}, \Delta\rho_{SE}$ – отрезки прямых, описывающие дополнительный фазовый набег.

$$\Delta\rho_{MS} = \sqrt{(x_M - x_S)^2 + (y_M - y_S)^2 + (z_M - z_S)^2};$$

$$\Delta\rho_{SE} = \sqrt{(x_E - x_S)^2 + (y_E - y_S)^2 + (z_E - z_S)^2}.$$

Из теории антенн [3] следует, что фазовая ошибка не должна превышать $\Delta\rho_{\max} = \lambda/16$.

Модельные расчёты погрешности, связанной с дискретизацией задачи, были произведены для ЗПА с диаметром 1 метр, фокусным расстоянием 0,3125 метра и электромагнитной волны длиной 3 см.

Результаты расчета дополнительного фазового набега электромагнитной волны $\Delta\rho$ в центроидах элементов дискретизации при заданных условиях представлены на рис. 6.

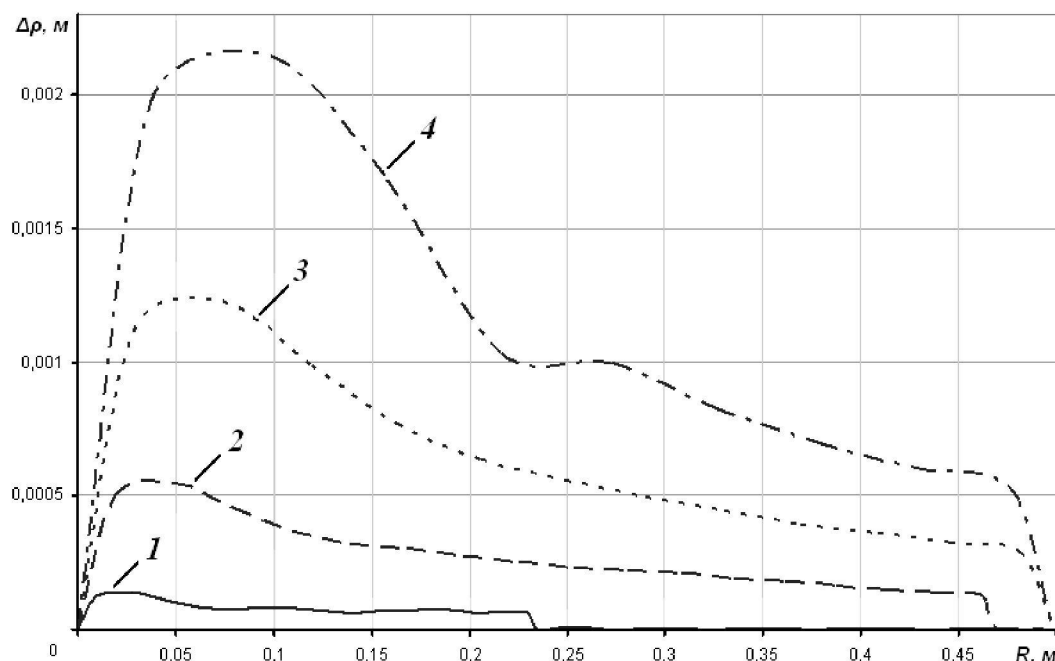


Рис. 6. Зависимость дополнительного фазового набега $\Delta\rho$ в центроидах элементов дискретизации от расстояния R

Здесь $R = \sqrt{x_m^2 + y_m^2}$ – расстояние от оси Oz до центроидов элементов дискретизации в плоскости xOy , $\Delta\rho$ определено согласно уравнению (7).

На рис. 6 кривые 1, 2, 3 и 4 показывают зависимости дополнительного фазового набега $\Delta\rho$ в центроидах элементов дискретизации от расстояния R при шаге дискретизации ΔL , равном $0,5\lambda$, λ , $1,5\lambda$ и 2λ соответственно.

Для заданной длины волны $\lambda = 3$ см максимально допустимая фазовая ошибка $\Delta\rho_{\max} = \lambda/16 \approx 0,0019$ м. Из приведенных зависимостей (см. рис. 6) данному требованию не удовлетворяет лишь кривая 4, соответствующая шагу дискретизации $\Delta L = 2\lambda$.

Заключение. Таким образом, приемлемым шагом дискретизации можно считать $\Delta L = 1,5\lambda$. Это менее жесткое требование к шагу дискретизации, чем при растровом методе [2]. Предложенный алгоритм построения геометрической модели излучающей поверхности зеркальной параболической антенны, основанный на методе триангуляции Делоне, позволяет использовать модель не только при расчете характеристик излучения зеркальной параболической антенны [2, 5], но и для оценки влияния внешних воздействий на конструкцию антенны конечно-элементным методом, если элементы дискретизации излучающей поверхности антенны являются гранями объемных элементов дискретизации конструкции зеркала антенны [4, 6, 9, 11, 12, 14, 15].

Список литературы

1. Балухов О. Н. Построение геометрической модели антенны с использованием триангуляции Делоне / О. Н. Балухов, А. Н. Якимов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2009. – № 1. – С. 109–117.
2. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ : учеб. для вузов / Д. И. Воскресенский, В. И. Гостюхин, В. М. Максимов, Л. И. Пономарев ; под ред. Д. И. Воскресенского. – Москва : Радиотехника, 2006. – 376 с.
3. Вуд П. Анализ и проектирование зеркальных антенн : пер. с англ. / П. Вуд. – Москва : Радио и связь, 1984. – 208 с.
4. Горбалысов М. С. Моделирование влияния тепловых воздействий на характеристики излучения зеркальной антенны / М. С. Горбалысов // Надежность и качество – 2013 : труды Международного симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 1 – С. 92–95.
5. Драбкин А. Л. Антенно-фидерные устройства / А. Л. Драбкин, В. Л. Зузенко, А. Г. Кислов. – Москва : Сов. радио, 1974. – 536 с.
6. Лунин Л. С. Особенности численного моделирования датчиков на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) методом конечных элементов / Л. С. Лунин, В. Ф. Катаев, И. В. Крейс // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 3. – С. 39–47.
7. Понарин Я. П. Элементарная геометрия : в 2 т. / П. Я. Понарин. – Москва : МЦНМО, 2004. – Т. 1: Планиметрия, преобразования плоскости. – 312 с.
8. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение / А. В. Скворцов. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2002. – 128 с.
9. Камаев В. А. Автоматизированный расчет вариантов электрической составляющей электромеханического привода зеркальных антенн / В. А. Камаев, А. Д. Чивилёв // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 1. – С. 139–147.
10. Сабоннадьер Ж. К. Метод конечных элементов и САПР : пер. с фр. / Ж. К. Сабоннадьер, Ж. Л. Кулон. – Москва : Мир, 1989. – 190 с.
11. Старченко И. Б. Адаптивное управление гидроакустическими системами / И. Б. Старченко, И. А. Кириченко, В. Л. Сахаров, П. С. Голосов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2013. – № 3. – С. 26–33.

12. Шишулин Д. Н. Исследование влияния вибраций на параболическую антенну в ANSYS // Надежность и качество – 2013 : труды Международного симпозиума : в 2 т. / под ред. Н. К. Юркова. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2013. – Т. 1 – С. 231–232.

13. Якимов А. Н. Проектирование микроволновых антенн с учетом внешних воздействий : моногр. / А. Н. Якимов. – Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 260 с.

14. Maksimov E. Yu. A finite-element model of the thermal influences on a microstrip antenna / E. Yu. Maksimov, N. K. Yurkov, A. N. Yakimov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, № 2, May. – P. 207–212.

15. Shishulin D. N. Modeling the Radiation of a Mirror Antenna taking Vibration Deformations into Account / D. N. Shishulin, N. K. Yurkov, A. N. Yakimov // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 56, № 11, February. – P. 1280–1284.

References

1. Balukov O. N., Yakimov A. N. Postroenie geometricheskoy modeli anteny s ispolzovaniem triangulyatsii Delone [Building a geometric model of the antenna using Delaunay triangulation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. The Volga region. Engineering Sciences], 2009, no. 1, pp. 109–117.

2. Voskresenskiy D. I., Gostyukhin V. I., Maksimov V. M., Ponomarev L. I. *Antenny i ustroystva SVCh* [Antennas and microwave devices]. Moscow, Radiotekhnika, 2006. 376 p.

3. Vud P. *Analiz i proektirovanie zerkalnykh antenn* [Analysis and design of reflector antennas]. Moscow, Radio i svyaz, 1984. 208 p.

4. Gorbalysov M. S. Modelirovanie vliyaniya teplovykh vozdeystviy na kharakteristiki izlucheniya zerkalnoy anteny [Modeling the influence of thermal effects on the radiation characteristics of a reflector antenna]. *Nadezhnost i kachestvo – 2013: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality – 2013: Proceedings of the International Symposium], in 2 vol. Penza, Penza State Univ. Publ., 2013, vol. 1, pp. 92–95.

5. Drabkin A. L., Zuzenko V. L., Kislov A. G. *Antenno-fidernye ustroystva* [Antenna-feeder devices]. Moscow, Sovetskoe radio, 1974. 536 p.

6. Lunin L. S., Kataev V. F., Kreys I. V. Osobennosti chislennogo modelirovaniya datchikov na osnove poverkhnostnykh akusticheskikh voln (PAV) metodom konechnykh elementov [Peculiarities of numerical modeling of sensors based on surface acoustic waves (SAW) finite element method]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2011, no. 3, pp. 39–47.

7. Ponarin Ya. P. *Elementarnaya geometriya* [Elementary geometry], in 2 vol. Moscow, 2004. T. 1: Planimetriya, preobrazovaniya ploskosti [Vol. 1: Planimetry, transformation of the plane]. 312 p.

8. Skvortsov A. V. *Triangulyatsiya Delone i ee primenenie* [Delaunay triangulation and its application]. Tomsk, Tomsk Univ. Publ., 2002. 128 p.

9. Kamaev V. A., Chivilev A. D. Avtomatizirovannyi raschet variantov elektricheskoy sostavlyayushchey elektromekhanicheskogo privoda zerkalnykh antenn [Automated calculation of variations of the electric component of an electromechanical drive of reflector antennas]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 1, pp. 139–147.

10. Sabonnader Zh. K., Kulon Zh. L. *Metod konechnykh elementov i SAPR* [The finite element method and CAD]. Moscow, Mir, 1989. 190 p.

11. Starchenko I. B., Kirichenko I. A., Sakharov V. L., Golosov P. S. Adaptivnoe upravlenie gidroakusticheskimi sistemami [Adaptive control of hydroacoustic systems]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2013, no. 3, pp. 26–33.

12. Shishulin D. N. Issledovanie vliyaniya vibratsiy na parabolicheskuyu antenu v ANSYS [Research of influence of vibrations on antenna dish in ANSYS]. *Nadezhnost i kachestvo – 2013: trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and quality – 2013: Proceedings of the International Symposium], in 2 vol. Penza, Penza State Univ. Publ., 2013, vol. 1, pp. 231–232.

13. Yakimov A. N. *Proektirovanie mikrovolnovykh antenn s uchetom vneshnikh vozdeystviy* [Design of microwave antennas taking into account external influences]. Penza, Penza State Univ. Publ., 2004. 260 p.

14. Maksimov E. Yu., Yurkov N. K., Yakimov A. N. A finite-element model of the thermal influences on a microstrip antenna. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 2, May, pp. 207–212.

15. Shishulin D. N., Yurkov N. K., Yakimov A. N. Modeling the Radiation of a Mirror Antenna taking Vibration Deformations into Account. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 56, no. 11, February, pp. 1280–1284.

УДК 004.94, 519.872

**ДЕТЕРМИНИРОВАННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ
КЛАСТЕРОВ ГРИД-СИСТЕМЫ ДЛЯ СРАВНЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭВРИСТИК
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАНИЙ**

Гаевой Сергей Владимирович, аспирант, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: gaevserge@mail.ru

Аль-Хадша Фарес Али Хуссейн, аспирант, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: alhadsha@mail.ru

Фоменков Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, e-mail: saf@vstu.ru

Лукьянов Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, Волгоградский государственный технический университет, 400005, Российская Федерация, г. Волгоград, пр. Ленина, 28

В работе осуществлено прогнозирование выполнения заданий на вычислительной Грид-системе (Grid-системе), которая состоит из набора кластеров. Для достижения этой цели авторами была разработана детерминированная имитационная модель. В рамках этой модели кластерная система была представлена в виде системы массового обслуживания (СМО). Каждое из них имеет набор следующих параметров: ширина – количество вычислительных машин, необходимое для выполнения работы; длина – время выполнения задания; площадь (сложность) – произведение длины и ширины. Неограниченная по размеру очередь позволяет выполнить все поступающие на вход системы задания.

Такой подход позволяет определить среднюю длину очереди, среднее время ожидания задания и т.д. В настоящее время авторами исследуются методы оптимизации распределения работы между кластерами. Предполагается, что задание выполняется внутри только одного (любого) кластера GRID-системы. Каждый кластер имеет свой собственный входящий поток заданий от пользователей, отделов, организаций и т.п. Межкластерные соединения позволяют кластерам выполнять задания друг друга.

Процедура выбора кластера для исполнения задания требует введения некоторых критериев. В общем случае не существует ответа на вопрос «Какой критерий выбора кластера следует использовать?», нет и аналитического решения. Поэтому целесообразно промоделировать реальные кластеры и испытать различные способы распределения заданий. Из этих способов нужно выбрать оптимальные решения, удовлетворяющие заданным требованиям.

Авторами построена детерминированная имитационная модель для такой вычислительной системы, предложены эвристики для распределения заданий между кластерами Грид-системы и произведено сравнение эффективности этих эвристик для конкретного случая.

Ключевые слова: Грид-системы, брокер заданий, имитационное моделирование, детерминированная имитационная модель, распределение заданий, эвристики распределения заданий, системы массового обслуживания, вычислительный кластер, parallel workloads