

УДК 621.396.67

Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников

Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь

Поступила 06.06.2019

Принята к печати 05.08.2019

В настоящее время в системах спутниковой и космической связи и радиоастрономии широко используются зеркальные антенные системы. Развитие данных отраслей требует разработки новых эффективных антенных систем. Возможным техническим решением для создания эффективной зеркальной антенны является «гибридная» схема, когда адаптивная фазированная антенная решетка используется в качестве облучателя. Данная работа посвящена разработке внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи. Целью работы являлась разработка оптимальной конструкции облучателя с выбором элемента решетки и проведением экспериментальных исследований выбранного конструктивного элемента.

В качестве инструмента выбора конфигурации облучателя использован метод восстановления волнового фронта. Идея его использования заключается в воспроизведении облучателем электромагнитного поля падающей плоской волны с целью равномерного засвета апертуры зеркала антенны.

Для выбора конструктивного элемента облучателя рассмотрены несколько антенн: патч-антенна, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Определены требования к элементу фазированной антенной решетки. Проведено моделирование облучателя на основе перечисленных конструктивных элементов и проведена оптимизация геометрии облучателя по критерию максимального усиления.

Максимальное усиление достигнуто конструкцией облучателя на основе конических спиральных антенн и составило 30,8 дБ, что для рассматриваемого раскрытия зеркала 2,4 м близко к традиционным фокусным схемам. Полученные результаты позволяют создать адаптивную антенную систему с возможностью компенсировать отклонения формы зеркала от теоретического профиля, а также фазовые искажения в атмосфере изменением весовых коэффициентов решетки.

Ключевые слова: параболическая зеркальная антенна, фазированная антенная решетка, метод восстановления волнового фронта, патч-антенна, спиральная антенна.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Адрес для переписки:

Д.В. Довкша
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Address for correspondence:

D.V. Douksha
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Для цитирования:

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников
Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи.

Приборы и методы измерений.

2019. – Т. 10, № 3. – С. 233–242.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

For citation:

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov
[Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna].

Devices and Methods of Measurements.

2019, vol. 10, no. 3, pp. 233–242 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov

Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus

Received 06.06.2019

Accepted for publication 05.08.2019

Abstract

Mirror antenna systems are widely used in satellite and space communication systems and radio astronomy. Development of these areas requires new efficient antenna systems' design. Possible technical solution for creating an effective mirror antenna is a “hybrid” scheme, when an adaptive phased antenna array is used as an irradiator. This paper is devoted to the development of an out-of-focus irradiator based on a phased antenna array for a space communications' parabolic reflector antenna. The aim of the work is to develop an optimal design of the irradiator with the choice of the structural element of the antenna array and experimental studies of the selected structural element.

The wavefront recovery method was used as a tool for selecting the irradiator configuration. The idea of this method use is to reproduce the electromagnetic field of an incident plane wave with an irradiator in order to uniformly illuminate the aperture of the antenna mirror.

In order to select the structural element of the irradiator several antennas were considered: a patch antenna, a flat spiral antenna, a conical spiral antenna. The requirements for the phased antenna array element were defined. The irradiator based on the above mentioned was simulated and the irradiator geometry was optimized according to the maximum gain criterion.

The maximum gain was achieved for the irradiator based on conical spiral antennas and amounted to 30.8 dB, which for the considered mirror aperture of 2.4 m is close to traditional focal schemes. The results obtained make it possible to create an adaptive antenna system able to compensate for the deviations of the mirror's shape from the theoretical profile, as well as phase distortions in the atmosphere by changing the lattice weights coefficients.

Keywords: parabolic mirror antenna, phased antenna array, wavefront recovery method, patch antenna, spiral antenna.

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Адрес для переписки:

Д.В. Довкша
Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, г. Минск 220064, Беларусь
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Address for correspondence:

D.V. Douksha
Belarusian State University,
Kurchatova str., 5, Minsk 220045, Belarus
e-mail: d.dovksha@gmail.com

Для цитирования:

Д.В. Довкша, С.В. Лешкевич, В.А. Саечников
Разработка внефокусного облучателя на основе фазированной антенной решетки для параболической зеркальной антенны космической связи.
Приборы и методы измерений.
2019. – Т. 10, № 3. – С. 233–242.
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

For citation:

D.V. Douksha, S.V. Liashkevich, V.A. Saetchnikov
[Development of an out-of-Focus Irradiator Based on a Phased Antenna Array for a Space Communications' Parabolic Reflector Antenna].
Devices and Methods of Measurements.
2019, vol. 10, no. 3, pp. 233–242 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-3-233-242

Введение

В настоящее время в системах спутниковой и космической связи и радиоастрономии широко используются зеркальные антенные системы. С увеличением апертурных размеров зеркал и переходом на более высокочастотные диапазоны усиливаются требования к точности изготовления зеркал, увеличивается влияние ветровых и температурных деформаций [1–3]. При этом для облегчения веса и уменьшения парусности конструкций зачастую используются сеточные антенны, зеркала которых имеют невысокую жесткость. В конечном счете отклонение формы зеркала от теоретического профиля уменьшает эффективность антенной системы [4]. Также к внешним факторам, уменьшающим эффективность, относятся большая насыщенность окружающего пространства радиосигналами помех и случайные фазовые ошибки, возникающие при прохождении радиоволн через неоднородную атмосферу. Решение перечисленных выше проблем возможно на основе адаптивных фазированных антенных решеток (ФАР) по аналогии с оптикой, где адаптивные системы давно и успешно используются для компенсации фазовых искажений сигнала в атмосфере и повышения предела разрешения оптических систем [5].

Теории адаптивных антенных систем посвящено множество работ [6–8]. Практика их применения широко рассматривается в открытых источниках мировой технической литературы. Таким образом, принципиальные вопросы построения адаптивных ФАР остаются актуальными и в наши дни.

Возможным техническим решением для создания эффективной зеркальной антенны является «гибридная» схема, когда адаптивная ФАР используется в качестве внефокусного облучателя [9–11]. «Гибридная» схема антенны сочетает в себе достоинства высокоэффективных зеркальных антенн и ФАР, позволяет формировать перестраиваемые диаграммы направленности специальной формы и обеспечивать пространственную фильтрацию сигналов и помех. Проведенные оценки показали, что такая схема антенны конкурентоспособна и применение антенной решетки со сравнительно небольшим числом элементов в комплексе может показать лучшие результаты по сравнению с традиционными схемами [12].

Целью данной работы являлась разработка оптимальной конструкции облучателя параболической зеркальной антенны на основе ФАР с определением конфигурации антенной решетки методом восстановления волнового фронта (ВВФ) [13, 14], выбором конструктивного элемента решетки и проведением его экспериментальных исследований. Организация облучателя в виде ФАР позволяет повысить эффективность антенны при небольшом количестве (до 10) элементов.

Определение конфигурации облучателя методом восстановления волнового фронта

При проектировании облучателя использовался метод ВВФ [5]. Физический смысл этого метода заключается в следующем: если облучатель, работающий в режиме передачи, воспроизведет вблизи фокальной плоскости антенны поле, образовавшееся при падении плоской волны, то такой облучатель обеспечит равномерное распределение поля на апертуре зеркала и ВВФ будет близок к плоскому.

Облучение зеркала плоской волной моделировалось в программном пакете *HFSS* 13.0. На схеме облучения (рисунок 1) изображено зеркало раскрытом 2,4 м, падающая плоская волна напряженностью 1 В/м, а также положение максимума (фокуса) и минимума дифракции на антенной оси *OZ*.

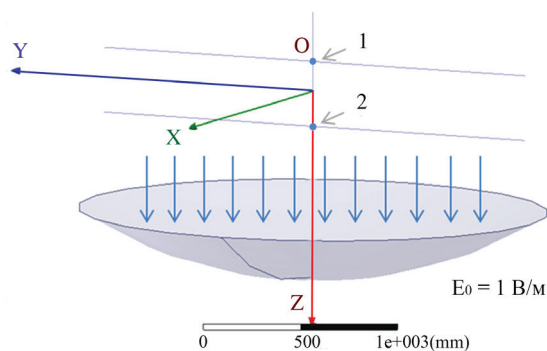


Рисунок 1 – Схема облучения зеркала: 1 – положение максимума дифракции (фокус); 2 – положение минимума дифракции

Figure 1 – Scheme of mirror irradiation: 1 – position of the diffraction maximum (focus); 2 – position of the diffraction minimum

Распределение интенсивности поля вдоль оси *OZ* антенной системы и вблизи фокальной плоскости перпендикулярно оси *OZ* представлено на рисунках 2а и 2б соответственно.

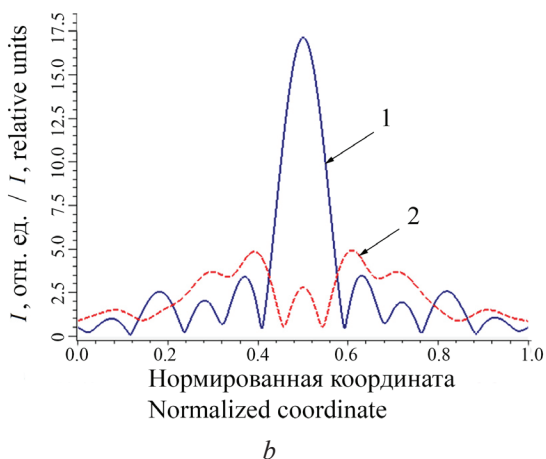
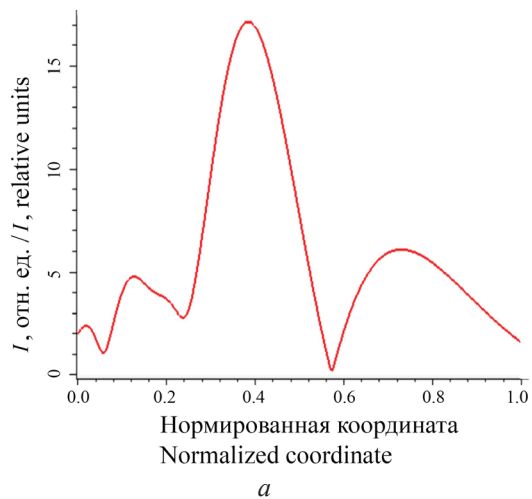


Рисунок 2 – График распределения поля: *a* – вдоль оси *OZ* антенной системы; *b* – вблизи фокальной плоскости антенны (1 – в фокальной плоскости; 2 – в плоскости дифракционного минимума)

Figure 2 – Field distribution diagram: *a* – along the *OZ* axis of the antenna system; *b* – near the focal plane of the antenna (1 – in the focal plane; 2 – in the plane of the diffraction minimum)

Максимум интенсивности поля на рисунке 2*a* соответствует фокусу параболического зеркала, а минимумы – минимумам дифракции.

Принцип действия зеркальной антенны с внефокусным размещением облучателя заключается в воспроизведении фронта волны не в фокальной плоскости (сплошная линия на рисунке 2*b*), где поле сильно неоднородно, а в плоскости дифракционного минимума (прерывистая линия на рисунке 2*b*). В этой плоскости располагается фазированная антенная решетка, обеспечивающая оптимальный засвет апертуры зеркала и корректность восстановления волнового фронта.

Математическая модель

В конструктивном отношении антенная решетка может быть представлена как набор однородных точечных источников. Для математического описания метода ВВФ в программном пакете *MATLAB* был реализован алгоритм для плоского случая, заключающийся в переборе возможных положений источников вдоль выделенного участка прямой. Далее с помощью метода наименьших квадратов находилась оптимальная конфигурация их положений, реализующая минимальную суммарную ошибку в восстановленном поле по отношению к исходному (полученному в *HFSS* при облучении зеркала плоской волной).

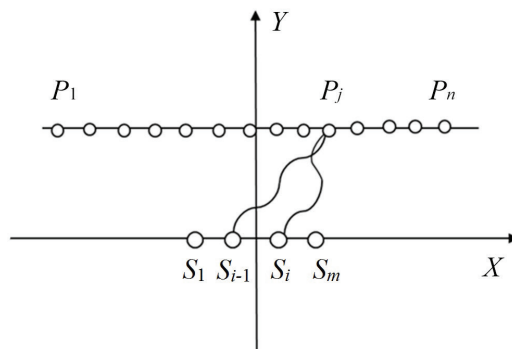


Рисунок 3 – Схема-пояснение к алгоритму восстановления волнового фронта: P_j – точки расчета интенсивности поля ($j = 1, 2, \dots, n$); S_i – положения точечных источников ($i = 1, 2, \dots, m$)

Figure 3 – Schematic explanation of the wavefront recovery algorithm: P_j – field intensity calculation points ($j = 1, 2, \dots, n$); S_i – the positions of point sources ($i = 1, 2, \dots, m$)

Напряженность поля, созданная i -м источником в точке P_j (рисунок 3) вычислялась по формуле:

$$E_{ij} = \frac{E_{0i}}{r_{ij}} \cos(\omega t + kr_{ij} + \varphi_{0i}), \quad (1)$$

где ω – циклическая частота волны; k – волновое число; r_{ij} – расстояние от источника S_i до точки P_j ; φ_{0i} – начальная фаза i -го источника.

Суммарная напряженность в точке P_j , созданная всеми источниками, вычислялась по формуле:

$$E_j = \sum_i E_{ij}. \quad (2)$$

Интенсивность I_j в точке P_j пропорциональна квадрату напряженности. Алгоритм восстановления волнового фронта состоял из трех этапов:

1. Рассчитывалась интенсивность вдоль выделенного участка прямой в точках дискретизации P_j для начальной конфигурации положений источников.

2. Изменялось положение источников, после чего повторно рассчитывалась интенсивность согласно пункту 1.

3. Повторялся пункт 2, пока не была найдена оптимальная конфигурация положений с учетом минимального отклонения восстановленной интенсивности от исходной.

На рисунке 4 представлены графики исходного и восстановленного полей в зависимости от пространственной координаты r вдоль оси, проходящей через дифракционный минимум перпендикулярно антенной оси OZ . Видно, что значения интенсивностей восстановленного и исходного полей достаточно близки.

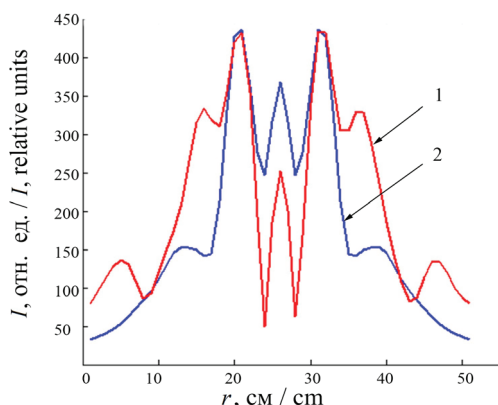


Рисунок 4 – Результат восстановления интенсивности поля: 1 – интенсивность, полученная при облучении зеркала плоской волной, рассчитанная в HFSS; 2 – восстановленная интенсивность, полученная с помощью точечных источников

Figure 4 – Result of restoring of the field intensity: 1 – intensity obtained by irradiating a mirror with a plane wave, calculated in HFSS; 2 – the recovered intensity obtained with the help of point sources

Определение требований к элементу решетки

Определяющими факторами в выборе элемента решетки являлись полуширина главного лепестка диаграммы направленности (ДН) и возможность работы с круговой поляризацией излучения. На ширину главного лепестка непосредственно оказывают влияние волновые размеры антенны. Физически это объясняется характером интерференции волн от элементов

антенны. Из анализа влияния волновых размеров антенны (L/λ) на форму ее ДН для наиболее простого случая – непрерывной линейной антенны длиной L , следует, что ширина главного лепестка ДН у синфазных антенн обратно пропорциональна волновым размерам антенны:

$$2\theta_{0,5}^0 \approx C_{0,5}^0 \frac{\lambda}{L}, \quad (3)$$

а для антенны бегущей волны – обратно пропорциональна корню волновых размеров:

$$2\theta_{0,5}^0 \approx C_{0,5}^0 \sqrt{\frac{\lambda}{L}}. \quad (4)$$

Из вышеизложенного следует, что ширина главного лепестка антенны бегущей волны слабее зависит от волновой длины антенны. Графическое пояснение представлено на рисунке 5.

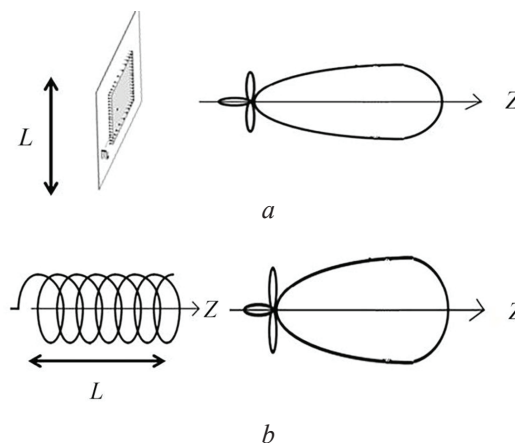


Рисунок 5 – Влияние волновых размеров на форму диаграммы направленности для: *a* – синфазной антенны; *b* – антенны бегущей волны

Figure 5 – The effect of wave dimensions on the shape of the radiation pattern for: *a* – common-mode antenna; *b* – traveling wave antennas

В качестве конструктивного элемента антенной решетки рассмотрены такие антенны как: патч-антенна, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Проведен электродинамический расчет данных типов антенн методом конечных элементов в программе Ansoft HFSS. 3D модели антенн представлены на рисунке 6. Во всех моделях используется воздушное диэлектрическое заполнение и частота возбуждения 1,7 ГГц (L -диапазон спутниковой связи).

Рассчитанные ДН и частотные зависимости обратных потерь для трех рассмотренных типов конструктивного элемента представлены на рисунке 7.

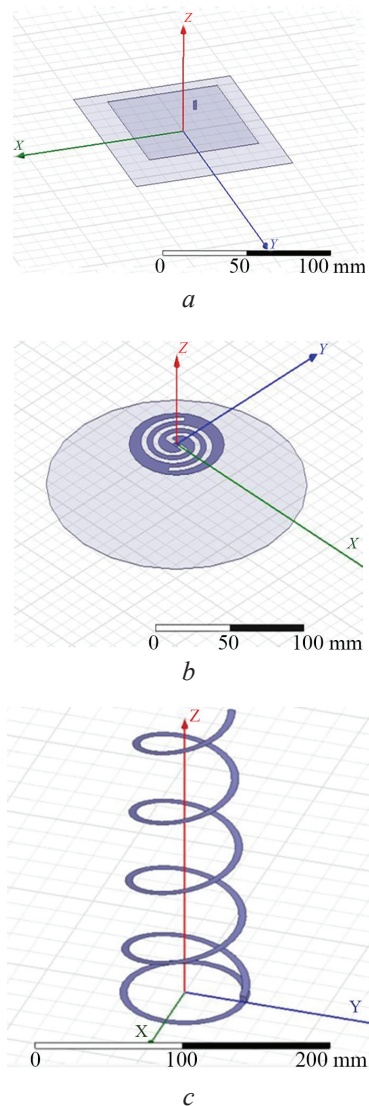


Рисунок 6 – 3D модели антенн: *a* – патч-антенна; *b* – щелевая спиральная антенна; *c* – коническая спиральная антенна

Figure 6 – 3D antenna models: *a* – patch antenna; *b* – slot spiral antenna; *c* – conical spiral antenna

Для анализа эффективности рассмотрены требования к ДН промоделированных антенн. По проведенным оценкам оптимальная полуширина ДН элемента составила 20° . В случае патч-антенны и плоской спиральной антенны, которые являются синфазными, вычисленные полуширины ДН составили около 35° , что значительно превосходит оптимальные 20° . Основным способом повышения направленности излучения является увеличение волновых размеров антенны. Однако такое увеличение размеров приведет к невозможности размещения элементов в составе решетки и, следовательно, к невыполнению условий ВВФ.

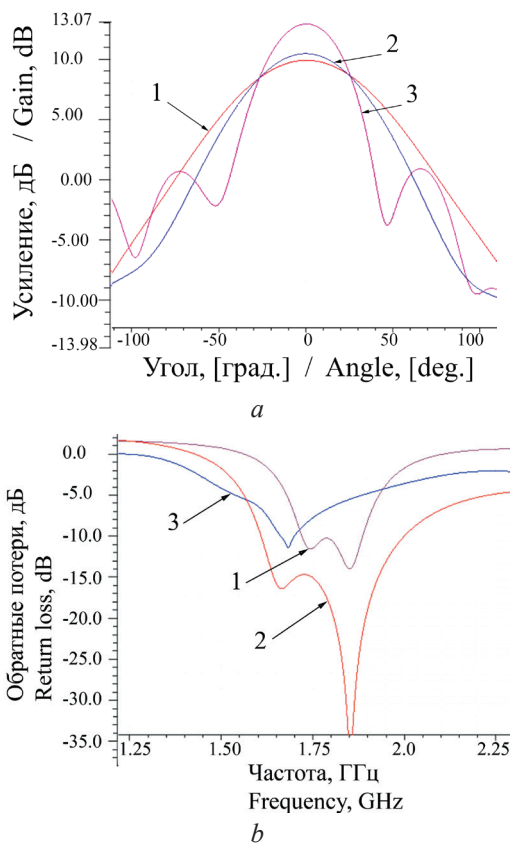


Рисунок 7 – Коэффициент усиления (*a*) и частотная зависимость обратных потерь (*b*) для трех вариантов антенн в прямоугольной системе координат: 1 – патч антенна; 2 – щелевая спиральная антенна; 3 – коническая спиральная антенна

Figure 7 – Gain (*a*) and frequency dependence of return loss (*b*) for three antenna variants in a rectangular coordinate system: 1 – patch antenna; 2 – slit helical antenna; 3 – conical helical antenna

В случае конической спиральной антенны используется режим осевого излучения, или режим бегущей волны, который позволяет существенно сузить полуширину главного лепестка ДН до оптимальных 20° за счет больших продольных размеров антенны. Габариты элементов по ширине позволяют разместить элементы в узлах решетки, обеспечив корректность ВВФ.

Конструктивные параметры рассмотренной спиральной антенны следующие: размер первого витка – 20,38 см, второго – 21,95 см, третьего – 23,5 см, четвертого – 25,1 см; расстояние между витками – 6 см. Коэффициент усиления и ширина рабочей полосы, полученные при моделировании, составили 10,6 дБ и 500 МГц соответственно. Волновое сопротивление – 100 Ом.

Таким образом, с точки зрения требований к ДН оптимальной из рассмотренных вариантов

является коническая спиральная антенна из 4 витков и с полушириной ДН 20° . К преимуществам конической спиральной антенны можно отнести также круговую поляризацию излучения.

Моделирование

Рассмотрим возможные конструкции антенной решетки на основе перечисленных выше конструктивных элементов (рисунок 8).

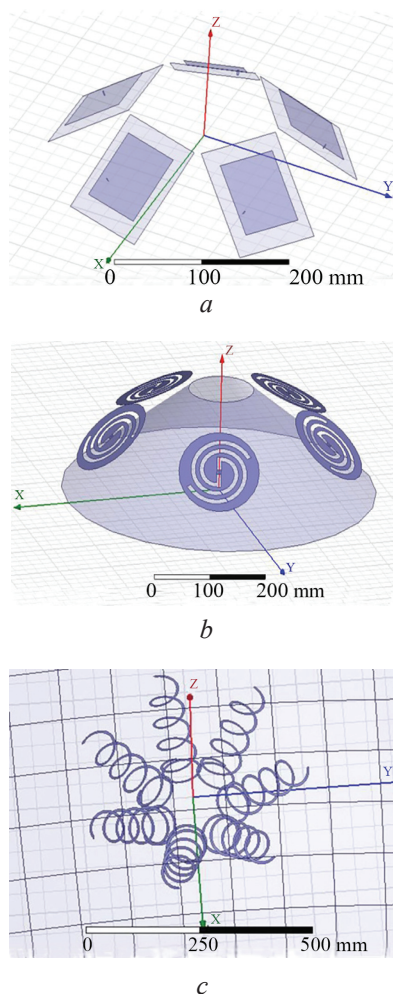


Рисунок 8 – Конструкция антенной решетки-облучателя на основе: *a* – патч-антенн; *b* – плоских спиральных антенн; *c* – конических спиральных антенн

Figure 8 – Antenna array design based on: *a* – patch antennas; *b* – slot spiral antennas; *c* – conical spiral antennas

В первом случае была промоделирована система из пяти патч облучателей и проведен ее расчет. В результате выбраны параметры решетки, такие как: расстояние до зеркала вдоль оси антенной системы, угол наклона элементов, расстояние между элементами. Проведена про-

граммная оптимизация параметров по критерию максимума коэффициента усиления. Схема разработанной конструкции приведена на рисунке 8*a*. Полученный коэффициент усиления составил 29,7 дБ.

Во втором случае рассмотрена решетка из пяти плоских спиральных антенн и металлического экрана (юбки) в форме усеченного конуса. Возможный вид конструкции облучателя представлен на рисунке 8*b*. Полученный коэффициент усиления данной конструкции оказался равен 30,5 дБ.

В третьем случае рассмотрена конструкция облучателя на основе конических спиральных антенн (рисунок 8*c*). Исходя из результатов моделирования оптимальный результат по засвету апертуры зеркала (рисунок 9*b*) и максимальное усиление (рисунок 9*a*) обеспечил именно этот вариант конструкции.

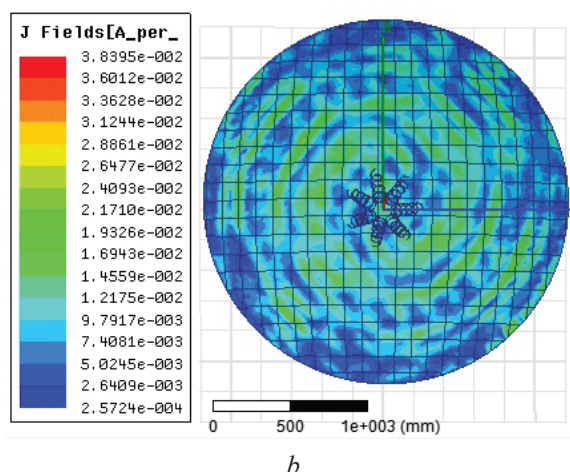
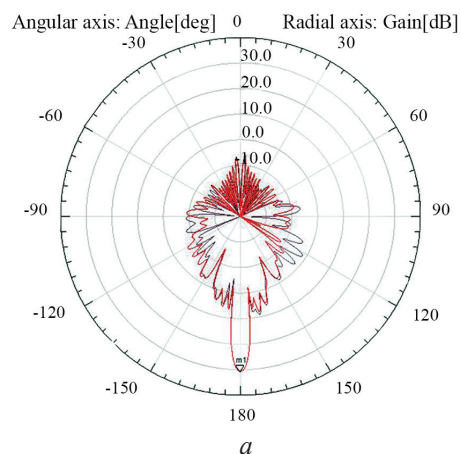


Рисунок 9 – Диаграмма направленности системы с облучателем на основе спиральных антенн (*a*) и засвет апертуры зеркала (*b*)

Figure 9 – The radiation pattern of a system with an irradiator based on spiral antennas (*a*) and the light of the mirror aperture (*b*)

Таким образом, приведенная конструкция облучателя на основе спиральных антенн равномерно засвечивает апертуру зеркала; оценка коэффициента усиления антенной системы составляет 30,8 дБ, что для данного размера зеркала (2,4 м) близко к традиционным антенным схемам.

Результаты измерений конического спирального облучателя

Экспериментальные измерения проводились в безэховой камере с использованием анализатора сигналов (*Signal analyzer KEITHLEY 2810*). Оборудование подключалось по схеме, изображенной на рисунке 10. В качестве приемной антенны использовалась исследуемая коническая спираль. Общий вид экспериментального образца представлен на рисунке 11. Передающей антенной служил эталонный рупорно-линзовый облучатель (измерительная антенна П6-23), работающий в том же частотном диапазоне, что и спиральный элемент. Исследуемый приемный элемент закреплялся на опорно-поворотном устройстве, позволяющем снимать диаграммы направленности в горизонтальной и вертикальной плоскостях в секторе углов от 0 до 180°. Изменяя положения приемного элемента в горизонтальной и вертикальной плоскости, производились замеры уровня принимаемого сигнала в децибелах по отношению к одному милливатту.

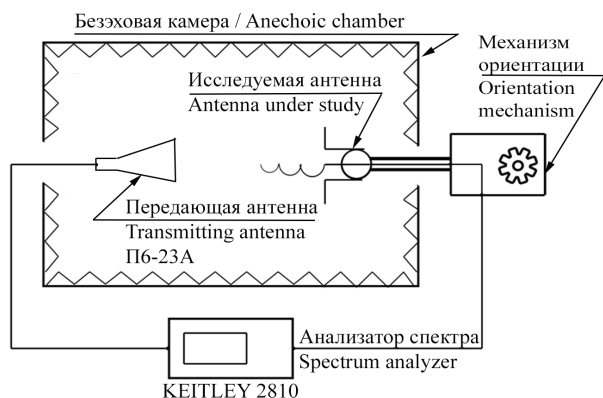


Рисунок 10 – Схема подключения оборудования для экспериментальных измерений

Figure 10 – Connection diagram of equipment for experimental measurements

Результат измерения диаграммы направленности и обратных потерь исследуемого элемента представлены на рисунке 12.

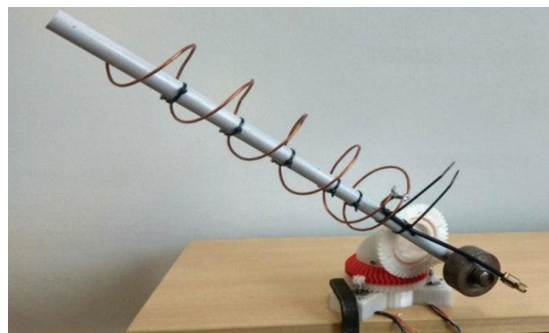


Рисунок 11 – Фото изготовленного экспериментального образца спирального элемента

Figure 11 – Photo of an experimental sample made of a spiral element

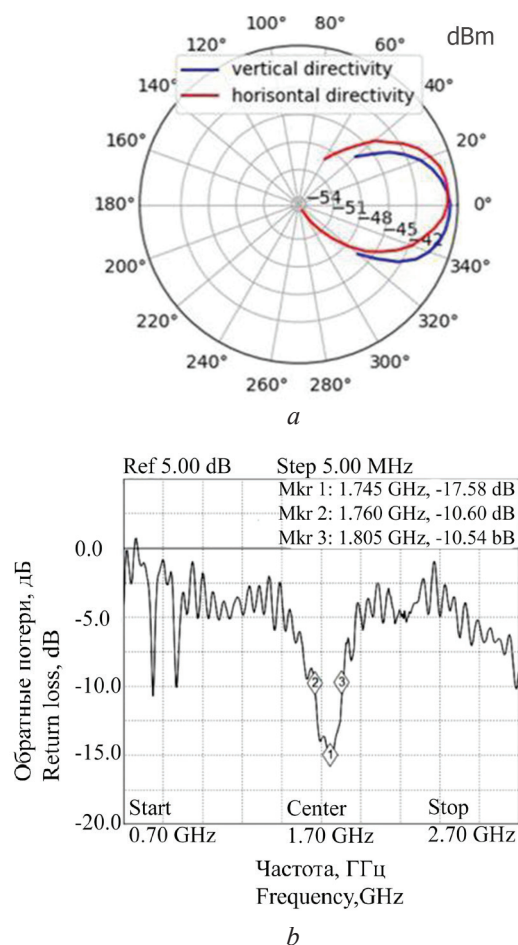


Рисунок 12 – Диаграмма направленности в горизонтальной (красным цветом) и вертикальной (синим цветом) плоскостях на частоте 1,7 ГГц (a) и обратные потери для спиральной антенны-облучателя (b)

Figure 12 – Radiation pattern in the horizontal (red) and vertical (blue) planes at a frequency of 1.7 GHz (a) and return loss for a spiral antenna feed (b)

Экспериментально измеренные диаграмма направленности и частотная зависимость

обратных потерь для спирального элемента достаточно близки к результатам теоретического электродинамического расчета. Ширина рабочей полосы по уровню минус 10 дБ составила 150 МГц. Сужение полосы, в сравнении с теоретической, обусловлено потерями при согласовании кабеля сопротивлением в 50 Ом с антенной сопротивлением в 100 Ом. Спиральный элемент технологичен в изготовлении, обладает хорошими диапазонными свойствами, простотой конструкции и настройки.

Заключение

Предложена новая схема облучения зеркала внефокусной кольцевой антенной решеткой, которая позволяет компенсировать отклонение формы зеркала от идеальной путем выбора весовых коэффициентов антенной решетки и тем самым повысить эффективность антенной системы в целом. Рассмотрены возможные конструктивные элементы фазированной антенной решетки: патч, плоская спиральная антенна, коническая спиральная антенна. Проведено программное моделирование антенной системы, состоящей из параболического зеркала и фазированной антенной решетки в качестве внефокусного облучателя (для трех различных вариантов конструкций). Проведена оптимизация геометрии облучателя по критерию максимального усиления.

По результатам измерений выбран оптимальный вариант облучателя на основе конических спиральных антенн. Такая конструкция обеспечивает наиболее равномерный засвет и усиление в 30,8 дБ, что для данного размера зеркала (2,4 м) близко к традиционным антенным схемам.

Список использованных источников

1. Галимов, Г.К. Антенны радиотелескопов, систем космической связи и РЛС / Г.К. Галимов. – М.: Адвансед Солюшнз. – 2013. – 392 с.

2. W.A. van Cappellen. APERTIF: Phased array feeds for the wester-bork synthesis radio telescope / W.A. van Cappellen, L. Bakker // 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. – Waltham, MA. – 2010. – P. 640–647.

DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613297

3. Ivashina, M.V. Off-axis beam performance of Focal Plane Arrays for the Westerbork Synthesis

Radio Telescope – Initial results of a prototype system / M.V. Ivashina [et al.] // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. – Charleston, SC. – 2009. – P. 1–4.

DOI: 10.1109/APS.2009.5171751

4. Гиммельман, В.Г. Система адаптации панелей зеркала космического телескопа / В.Г. Гиммельман, Я.Ю. Федоров, С.С. Щесняк // Сибирский государственный университет науки и технологий. Решетневские чтения. – 2016. – № 20. – С. 98–100.

5. Ермолаева, Е.В. Адаптивная оптика / Е.В. Ермолаева, В.А. Зверев, А.А. Филатов // СПб: НИУ ИТМО. – 2012. – 297 с.

6. Robert A. Monzingo. Introduction to Adaptive / R.A. Monzingo, T.W. Miller // SciTech Publishing. – 2004. – 543 p.

7. Allen Ben. Adaptive Array Systems: Fundamentals and Applications / Ben Allen, M. Ghavamiu // London: John Wiley & Sons. – 2005. – 290 p.

8. Пистолькорс, А.А. Введение в теорию адаптивных антенн / А.А. Пистолькорс, О.С. Литвинов. – М.: Наука. – 1991. – 200 с.

9. Летунов, А.А. Синтез гибридной зеркальной антенны для систем наземной спутниковой связи / А.А. Летунов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2015. – № 4. – С. 107–113.

DOI: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.107-113

10. Тяпкин, В.Н. Алгоритмы адаптации многолучевых антенн, построенных на базе гибридно-зеркальных антенн / В.Н. Тяпкин, Д.Д. Дмитриев, А.С. Першин // Сибирский федеральный университет. – 2013. – № 6(7). – С. 835–844.

11. Пономарев, О.П. Гибридные зеркальные антенны на основе зеркал с круговым профилем для многофункциональных радиолокационных станций / О.П. Пономарев, Н.Н. Смирнов, С.М. Клишин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2010. – № 2(97). – С. 23–30.

12. Зельчан, А.Д. Оценка эффективности применения фазированной решетки в качестве облучателя зеркальной антенны, предназначенной для приема сигналов студенческого спутника / А.Д. Зельчан [и др.] / Минск: VII Белорусский космический конгресс. – 2017. – Т. 2. – С. 118–121.

13. Дмитриев, В.Г. Нелинейная оптика и обращение волнового фронта / В.Г. Дмитриев. – М.: Физматлит. – 2003. – 256 с.

14. Хашимов, А.Б. Регуляризирующие схемы в задачах восстановления поля излучения антенн по измерениям в ближней зоне / А.Б. Хашимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 70–80.

References

1. Galimov G.K. *Antenny radioteleskopov, sistem kosmicheskoy svyazi i RLS* [Radiotelescope antenna, space communication systems and radar]. Galimov, Moscow, Advanced Solyushnz Publ., 2013, 392 p.
2. W.A. van Cappellen, L. Bakker. APERTIF: Phased array feeds for the wester-bork synthesis radio telescope // 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, 2010, pp. 640–647. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613297
3. Ivashina M.V., Iupikov O.A., Maaskant R., W.A. van Cappellen, Bakker L., Oosterloo T. Off-axis beam performance of Focal Plane Arrays for the Westerbork Synthesis Radio Telescope – Initial results of a prototype system // 2009 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Charleston, SC, 2009, pp. 1–4. DOI: 10.1109/APS.2009.5171751
4. Gimmelman V.G., Fedorov I.I., Shchesniak S.S. [Adaptation system for space telescope surface boards] *Sibirskij gosudarstvennyj universitet nauki i tekhnologii. Reshetnevskie chteniya*. [Reshetnev Siberian State University of Science and Technology], 2016, no. 20, pp. 98–100 (in Russian).
5. Ermolaeva E.V., Zverev V.A., Filatov A.A. *Adaptivnaya optika* [Adaptive optics]. St. Petersburg: NIU ITMO Publ., 2012, 297 p.
6. Robert A. Monzingo, Thomas W. Miller Introduction to Adaptive Arrays. SciTech Publishing, 2004, 543 p.
7. Allen Ben, Ghavamiu M. Adaptive Array Systems: Fundamentals and Applications. London, John Wiley & Sons Publ., 2005, 290 p.
8. Pistolkors A.A., Litvinov O.S. *Vvedenie v teoriyu adaptivnykh anten* [Introduction to the adaptive arrays theory], Moscow, Nauka Publ., 1991, 200 p.
9. Letunov A.A., Belousov O.A., Kolmykov R.Yu., Kolmykova A.S., Kurnosov R.Yu. [Synthesis of Hybrid Reflector Antenna for Terrestrial Satellite Communication System]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Tambov State Technical University], 2015, no. 4(58), pp. 107–113 (in Russian). DOI: 10.17277/voprosy.2015.04.pp.107-113
10. Tyapkin V.N., Dmitriev D.D., Pershin A.S. [The Adaptive Algorithm Multibeam Antenna, Built on the Hybrid-Reflector]. *Sibirskij federal'nyj universitet* [Antenna. Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies], 2013, no. 6(7), pp. 835–844 (in Russian).
11. Ponomarev O.P., Smirnov N.N., Klishin S.M. [Hybrid antennas based on circular reflectors for the multifunction radars]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Journal of the St. Petersburg Polytechnic University/Scientific and technical statements. Series “Computer science. telecommunications. control”], 2010, no. 2(97), pp. 23–30 (in Russian).
12. Zelchan A.D., Zolotova A.V., Leshkevich S.V., Saechnikov V.A. Evaluation of the effectiveness of the use of a phased array as an irradiator of a mirror antenna designed to receive signals from a student satellite. VII Belarusian Space Congress. Minsk-2017, vol. 2, pp. 118–121 (in Russian).
13. Dmitriev V.G. *Nelinejnaya optika i obrashchenie volnovogo fronta* [Nonlinear optics and wavefront reversal]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 256 p.
14. Khashimov A.B. [Regularization techniques for reconstruction of antenna radiated field by near field measurements]. *Vestnik YUUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”* [Bulletin of the South Ural State University Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”], 2014, vol. 14, no. 2, pp. 70–80 (in Russian).