

**РАДИОТЕХНИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА,  
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ**

Научная статья

УДК 621.396.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180673>

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ  
СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСА  
ПОЛУНАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Андрей Юрьевич Дмитриевцев<sup>1</sup>, Юрий Трифионович Зырянов<sup>2✉</sup>,

Аят Назар Нури<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Тамбовский государственный технический университет,

Тамбов, Россия

<sup>1</sup>[Dmitrievcev978@gmail.com](mailto:Dmitrievcev978@gmail.com)

<sup>2</sup>[zut-tmb@mail.ru](mailto:zut-tmb@mail.ru) ✉

<sup>3</sup>[ayat\\_nzar@yahoo.com](mailto:ayat_nzar@yahoo.com)

*Аннотация:* В представленной работе авторы разработали алгоритм, который предназначен для диагностирования измерительной системы построенной на кольцевой фазированной антенной решетки (КФАР), в которой в качестве излучателей используются микрополосковые излучатели с экспоненциальным раскрытием щели (излучатель Вивальди), широко используемой в радиотехнических системах,

авиационной и ракетной технике. Главным достоинством излучателей, используемых в КФАР является широкий диапазон частот, в которых может работать данный излучатель, без изменения его геометрических размеров. Рассмотрен упрощенный метод математического расчета диаграммы направленности КФАР. Данный подход позволяет осуществлять расчеты без уменьшения достоверности искомых характеристик объекта исследования, но при этом используемый метод позволяет не затрачивать большого количества вычислительных ресурсов оборудования, на котором производится расчет, в связи со снижением количества действий, необходимых для вычислений. Диагностирование основных параметров проводилось с помощью высокочастотного измерительного оборудования, которое позволяет провести все необходимые измерения, на основании которых можно сделать последующие выводы. В результате анализа измеренных параметров КФАР было произведено сравнение полученных данных, с результатами полунатурного моделирования, что подтвердило работоспособность разработанного подхода. Полученные результаты измерения отличаются в малой степени от результатов моделирования в специальном программном комплексе. Основным преимуществом является возможность анализа основных параметров диагностируемой

КФАР в реальном времени, а также возможность сравнивать их с результатами моделирования в программном комплексе. Благодаря перспективности данного способа контроля, в дальнейшем планируется усовершенствование метода, путем автоматизации снятия характеристик с объекта диагностирования.

**Ключевые слова:** диагностирование измерительной системы, кольцевая фазированная антенная решетка, комплекс высокочастотного оборудования, микрополосковые излучатели

**Для цитирования:** Дмитриевцев А.Ю., Зырянов Ю.Т., Нури А.Н.

Диагностирование измерительной системы с применением комплекса полунатурного моделирования // Труды МАИ. 2024. № 136. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=180673>

**RADIO ENGINEERING, COMPUTER ENGINEERING,  
INSTRUMENTATION AND COMMUNICATIONS**

Original article

**DIAGNOSIS OF THE MEASURING SYSTEM USING THE  
COMPLEX SEMI-NATURAL MODELING**

**Andrey Yu. Dmitrievtsev<sup>1</sup>, Yury T. Zyryanov<sup>2</sup>, Ayat Nazar Nuri<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Tambov State Technical University,

Tambov, Russia

<sup>1</sup>[Dmitrievcev978@gmail.com](mailto:Dmitrievcev978@gmail.com)

<sup>2</sup>[zut-tmb@mail.ru](mailto:zut-tmb@mail.ru) ✉

<sup>3</sup>[ayat\\_nzar@yahoo.com](mailto:ayat_nzar@yahoo.com)

**Abstract:** The article presents an algorithm developed by the authors, intended for the measuring system, constructed on the annular phased antenna array (APAA), diagnosing. The said array employs micro-strip patches with exponential slot opening (Vivaldi emitter) as emitters, widely employed in radio-technical systems, aviation and rocket engineering. The main advantage of the emitters applied in APAA is the wide range of frequencies, in which this emitter is able to operate without changing its geometric dimensions. A simplified method of the APAA directional pattern mathematical calculation of is considered. This approach allows performing calculations without reliability reduction of the sought-for characteristics of the object being studied, but it does not consume herewith a large amount of computing resources of the equipment, on which computations are being performed, due to a decrease in the number of actions required for the computations. The main parameters diagnosing was being performed by high-frequency measuring equipment, which allows conducting all necessary measurements, on which basis subsequent conclusions can be drawn. The results of the APAA measured parameters analysis were compared with the results of semi-natural modeling, which

confirmed the developed approach operability. The obtained measurement results differ to a small extent from the simulation results in a special software package. The main advantage consists in the ability of analyzing the main parameters of the APAA being diagnosed in real time, as well as the ability for comparing them with the simulation results performed in the software package. Due to this control method prospectivity, the authors plan further improvement of the method by automating characterization of the object being diagnosed.

**Keywords:** diagnostics of the measuring system, ring phased array antenna, complex of high-frequency equipment, microstrip emitters

**For citation:** Dmitrievtsev A.Yu., Zyryanov Yu.T., Nuri A.N. Diagnosis of the measuring system using the complex semi-natural modeling. *Trudy MAI*, 2024, no. 136. URL:

<https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180673>

## **Введение**

Диагностирование измерительных систем, является перспективным и востребованным направлением, в связи с бурным развитием радиотехнических систем (РТС) различного назначения, сфера применения которых довольно широка, и охватывает как гражданские сферы, так и военную, что довольно актуально в настоящее время. [1].

Оперативное и качественное диагностирование измерительных систем (определение их технического состояния) в основе которых лежат антенные решетки, или ФАР является перспективным и востребованным аспектом данного направления из-за стремительного распространения данных систем [2-3].

При разработке, тестах, пробных запусках, а так же в процессе эксплуатации фазированных антенных решеток, которые входят в состав радиотехнических систем, основной задачей является поиск возникающих неисправностей, причины их возникновения, и возможные последствия, значение амплитудно-фазового распределения (АФР) [4-6].

При решении проблемы диагностики объекта в большинстве случаев успех будет заключаться от ряда факторов, таких как используемое диагностическое оборудование, от которого напрямую будет зависеть как стоимость осуществляемой диагностики, а так же точность искомых параметров, способа или подхода, который ляжет в основу диагностики исследуемого объекта.

Статистическая теория антенн играет важную роль в оценке работоспособности фазированной антенной решетки через результаты контроля. Это позволяет учитывать влияние случайных факторов на параметры антенной [7]. Например, при анализе результатов контроля

фазированной антенной можно использовать статистические методы для выявления тенденций и прогнозирования возможного ухудшения работоспособности. Таким образом, использование статистической теории антенн позволяет более глубоко и точно прогнозировать поведение фазированной антенной решетки в различных условиях эксплуатации.

Для эффективного контроля и диагностики системы было предложено множество методов, каждый из которых обладает своими уникальными особенностями [8-9]. Чаще всего эти методы делят на "низкочастотные" и "высокочастотные". Низкочастотные методы являются наиболее простыми и заключаются в проверке целостности цепей управления фазовращателями, проверке исправности диодов в полупроводниковых фазовращателях, а также в сопоставлении цифровых кодов и аналоговых сигналов управления с необходимым отклонением луча фазированной антенной решетки.

Важно подчеркнуть, что для работы системы не менее важны и "высокочастотные" методы контроля, которые требуют более сложных технических средств и глубоких знаний специалистов. Эти методы включают в себя анализ воздействия высокочастотных сигналов на элементы системы, проверку пропускной способности различных блоков и корректность передачи данных между ними.

При выборе подходящего метода контроля и диагностики необходимо учитывать особенности конкретной системы, ее назначение и условия эксплуатации. Неверное применение методов может привести к ошибочным результатам и недостоверной информации о состоянии системы, что может повлечь за собой серьезные последствия.

Недостатком этих методов является то, что они не определяют величину амплитудно-фазового распределения, и не дают информацию о возможных неисправностях или изменениях параметров [10]. В статье рассмотрен один из подходов к диагностированию параметров кольцевой фазированной антенной решетки (КФАР) с применением комплекса высокочастотного оборудования (КВО), с последующим сравнением полученных результатов с результатами моделирования исследуемой антенной решетки в программном комплексе, что позволит улучшить качество диагностики [11].

### **Диагностирование параметров измерительной системы с применением комплекса высокочастотного оборудования**

В качестве измерительной системы будем использовать КФАР, в которой в качестве излучателей используются микрополосковые излучатели с экспоненциальным раскрытием щели (излучатель

Вивальди), широко используемой в радиотехнических системах, авиационной и ракетной технике (Рисунок 1). Антенные решетки построенные на данном типе излучателей способны работать в частотах от 300 МГц до 16 ГГц, без изменения физических параметров.



Рисунок 1. Стенд для диагностирования КФАР с применением КВО

Диагностирование параметров проводился с помощью алгоритма, представленного на рисунке 2.

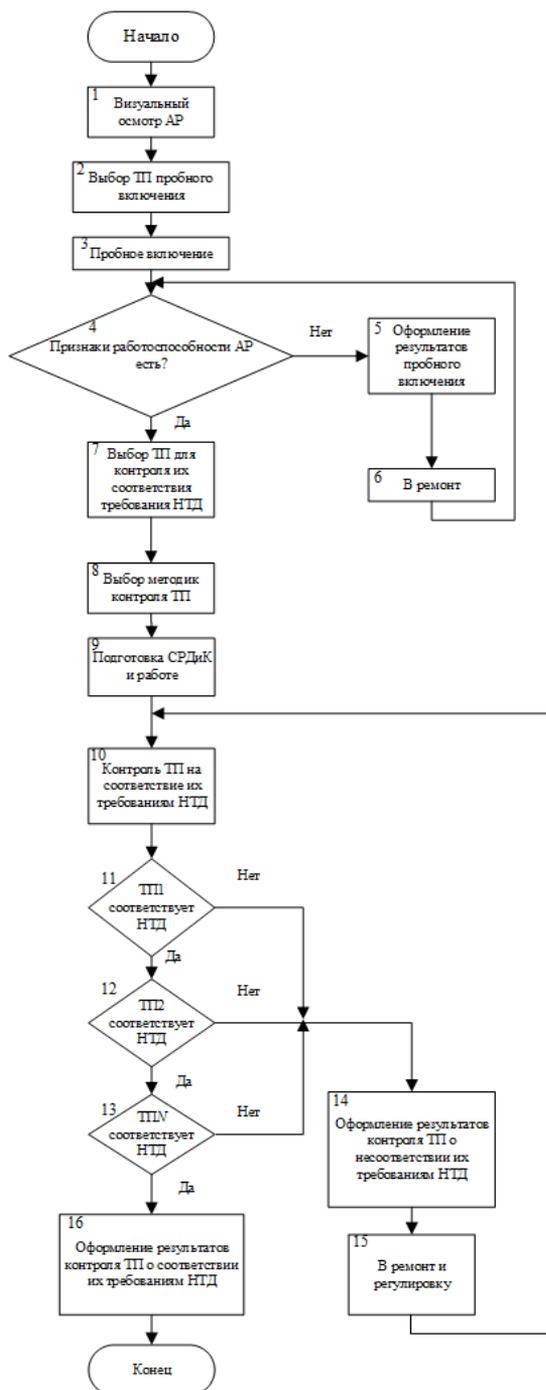


Рисунок 2. Схема алгоритма диагностирования параметров измерительной системы (КФАР), где ТП – технические параметры,

НТД – нормативно-техническая документация, СрТД и К – средства технического диагностирования и контроля.

Алгоритм включает в себя несколько основных этапов. Начальный этап подразумевает визуальный осмотр и пробное включение КФАР, по результатам этого этапа делается заключение о первичных признаках работоспособности. В дальнейшем формируется перечень основных (критически важных) параметров объекта диагностики, которые будут фиксироваться в процессе диагностических мероприятий. При выполнении диагностики возникает необходимость в контроле целого ряда параметров. Эти параметры могут варьироваться от минимального числа до включения всех возможных параметров, подлежащих контролю. Важным этапом после определения контролируемых технических характеристик является их измерение. Это измерение осуществляется с применением специализированного высокочастотного оборудования обеспечивающим точное и надежное определение значений параметров. Кроме того, результаты измерений подлежат анализу и интерпретации, что позволяет сделать выводы о состоянии объекта диагностики и его работоспособности. Контроль не только количественных, но и качественных аспектов отражает полноту оценки. В процессе получения данных с измерительного

оборудования необходимо осуществить сравнение получаемых параметров со значениями, которые характеризуют работоспособность диагностируемого объекта. В связи со всеми выполняемыми операциями в данном этапе, он является самым объемным и трудозатратным, по сравнению с остальными. Финальный этап предназначен для формирования технической документации, в которой описываются все проводимые диагностические мероприятия, фиксируются результаты и делается заключение о состоянии диагностируемого объекта.

Помимо использования данного алгоритма, проведем сравнение параметров, снятых с КФАР, с результатами моделирования в специализированном программном комплексе [12-14]. Данное сравнение позволит определить, находятся ли параметры КФАР в допустимых пределах НТД.

Выбраны наиболее информативные параметры: коэффициент стоячей волны (КСВ) КФАР, ширина диаграммы направленности (ДН) излучателей, и волновое сопротивление КФАР. По НТД эти характеристики должны быть равны: КСВ:  $< 2$  на всем диапазоне рабочих частот, ширина ДН одного излучателя:  $30 \pm 5^\circ$ , волновое сопротивление:  $50 \pm 2$  Ом. При исследовании использовались: векторный анализатор цепей повышенной чувствительности «Обзор-

804», который позволяет в реальном времени определить значения КСВ и волновое сопротивление КФАР; высокочастотный генератор сигнала АКПП 7SG386 и высокочастотный милливольтметр АКПП-2403, которые необходимы для определения диаграммы направленности антенной решетки.

Из-за того, что необходимо учитывать дифракционные явления на поверхности антенны, а также из-за того факта, что при расчете характеристики антенной решетки, необходимо учитывать взаимное влияние излучателей друг на друга, из-за чего анализ одного излучателя нужно производить в комплексе с остальными излучателями. В результате, процесс расчета диаграммы направленности кольцевой решетки становится более сложным и трудоемким, что приводит к увеличению затрачиваемых ресурсов при расчетах [15]. В результате взаимодействия между отдельными излучателями в выпуклой антенной решетке, характеристики таких излучателей, как диаграмма направленности, поляризация, и входное сопротивление, могут существенно отличаться от характеристик изолированного излучателя. Это, в свою очередь, может негативно сказаться на результативности диагностики электрических характеристик проектируемой антенной решетки.

При расчете диаграммы направленности кольцевых фазированных антенных решеток, требуется использование значительных вычислительных ресурсов из-за сложности подобных расчетов из-за большого количества излучателей и их влияния друг на друга. Для упрощения процесса вводятся следующие предположения:

1) Излучающий участок кольцевой антенной решетки с дискретными излучателями заменяется аналогичным с непрерывным распределением тока, соответствующим реальному амплитудному распределению в точках размещения излучателей и с плавным переходом между ними.

2) На излучающем участке элементарные функции аппроксимируют парциальную диаграмму направленности излучателя и амплитудное распределение.

При формировании луча в направлении кольцевой решетки в плоскости дуги, учитывая допущения ДН, следует рассмотреть нормируемый множитель  $K$

$$G_{\kappa}(\varphi) = K \int_{-\beta}^{\beta} I(\alpha) F_{\alpha}(\varphi) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} R[\cos \varphi - \cos(\varphi - \alpha)]\right\} da \quad (1)$$

где  $G_{\alpha}(\varphi)$ - ДН в азимутальной плоскости отдельного излучателя с координатой  $\alpha$ .

Обладая удобным способом для приближенного вычисления диаграммы направленности, метод эквивалентного линейного излучателя представляет собой эффективный подход (1). Уникальность этого метода заключается в использовании диаграммы направленности синфазной линейной антенны для расчета диаграммы направленности кольцевой антенны. Чтобы этот подход был возможен, необходимо провести проекцию амплитудного распределения по кольцу на линейную антенну длиной  $l_{\text{экв}}$ , которая размещена перпендикулярно направлению формируемого луча. Амплитудное распределение в эквивалентной линейной антенне является ключевым этапом этого метода расчета. В дальнейшем анализе будут рассмотрены подробности этого метода, а также его возможные преимущества и ограничения

$$I_{\text{экв}}(y) \approx I\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) G\left(\arcsin \frac{y}{R}\right) \frac{1}{\sqrt{R^2 - y^2}} \quad (2)$$

С учетом этого ДН кольцевой антенны в азимутальной плоскости

$$G(\varphi) = K \int_{-y_2}^{y_1} I_{\text{экв}}(y) \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} y \sin \varphi\right) dy \quad (3)$$

где  $y_1 = y_2 = R \sin \beta$

Для вычисления диаграммы направленности с точностью в несколько процентов, необходимо учитывать область допустимых углов  $\varphi$ , которая определяется неравенством (3):

$$|\varphi| \leq \arccos \left[ 1 - \frac{\lambda}{4R(1 - \cos \beta)} \right] \quad (4)$$

Коэффициент

направленного действия будет рассчитываться по следующей формуле

$$D_{k \max} \approx D_{II} \sum_{n=-N_1}^{N_1} F_{0,n}^2(\varphi_0), \quad (5)$$

где  $D_{II}$  - коэффициент направленного действия излучателя в максимуме его диаграммы направленности;  $G_{0,n}$  - значение диаграммы направленности излучателя с координатой  $\varphi = \alpha_n$  в направлении  $\varphi = \varphi_0$  [19].

На Рисунках 3-5 представлены графики значения КСВ на рабочем диапазоне частот, волнового сопротивления КФАР и диаграммы направленности КФАР. На данных графиках видно, что значение КСВ в рабочем диапазоне частот не превышает значения 1,9, а волновое сопротивление КФАР находится в пределах 48,5-52,3, что является допустимыми значениями по НТД [20].

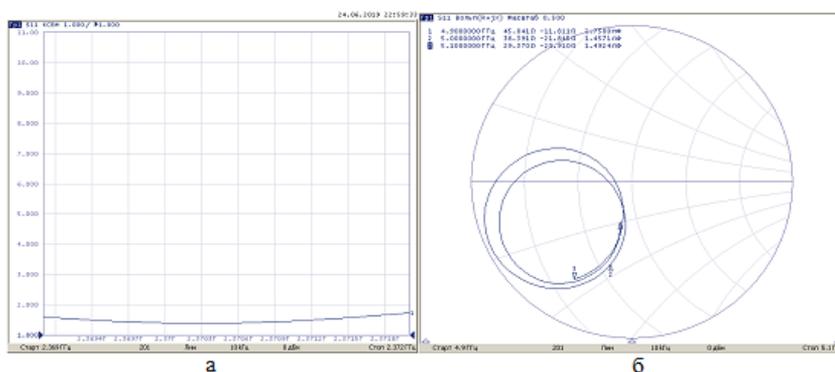


Рисунок 3. (а) - График значения КСВ на рабочем диапазоне частот  
(б) - волновое сопротивление КФАР

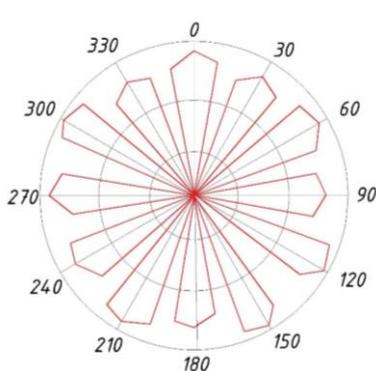


Рисунок 4. Диаграмма направленности в полярной системе координат, на рабочем диапазоне частот полученная с помощью высокочастотного милливольтметра

Проведено сравнение снятых характеристик с результатами моделирования КФАР в специализированном программном комплексе. Для упрощения процесса моделирования было решено уменьшить количество излучателей вдвое, что в свою очередь позволило снизить взаимное влияние излучателей.

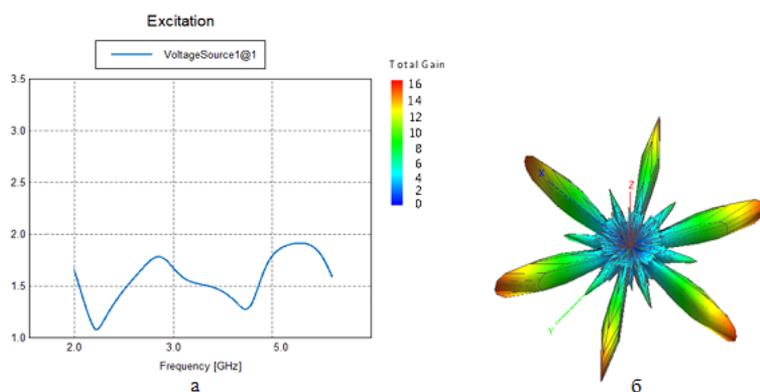


Рисунок 5. (а) – результат измерений коэффициента стоячей волны в диапазоне рабочих частот,  
 (б) – диаграмма направленности КФАР

### Вывод

Исследование результатов показало, что предлагаемый метод обеспечивает возможность оценки технического состояния измерительной системы (КФАР) путем диагностики. Рассмотренный метод расчета диаграммы направленности КФАР, позволяет осуществить расчет без использования значительных мощностей ЭВМ, но без существенного снижения точности электродинамических характеристик. Это позволяет упростить расчет ДН для сравнения с фактической диаграммой полученной в процессе диагностики. По результатам измерений видно, влияние излучателей друг на друга обусловило несимметричность допустимых пределов основных характеристик КФАР, в то время как отсутствие боковых

лепестков объясняется не точностью «ручных» измерений при определении ДН.

Для увеличения точности измерения ДН в процессе диагностики в дальнейших исследованиях планируется использовать автоматизированный поворотный механизм, позволяющий точнее осуществлять поворот КФАР на заданный угол.

Новые решения в области контроля кольцевых фазированных антенных решеток внедряют инновационные методы оценки, которые базируются на электродинамических моделях. Анализ этих моделей и сопоставление с реальными объектами позволяют получить точные данные и улучшить эффективность контроля. Важность использования электродинамических моделей для оценки кольцевых фазированных антенных решеток подтверждается проведенными сравнительными исследованиями с реальными значениями. Электродинамическое моделирование является надежным методом, который позволяет не только оценить текущее состояние антенных решеток, но и прогнозировать их дальнейшее функционирование. В результате, благодаря использованию современных технологий и методов, улучшается качество контроля антенн и повышается их надежность.

## Список источников

1. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. - М.: Радиотехника, 2012. - 744 с.
2. Naumova A., Dmitrievtsev A., Zyryanov Y. Technical Diagnostics of Information and Measurement System Parameters Using a Set of High-frequency Equipment // 2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), 2021, pp. 703-707. DOI: [10.1109/SUMMA53307.2021.9632019](https://doi.org/10.1109/SUMMA53307.2021.9632019)
3. Зырянов Ю.Т., Лебедев В.В., Ледовских Д.Н., Рязанов И.Г. Об одном подходе к формированию смешанной системы управления техническим состоянием радиотехнических средств // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3 (19). С. 49-59.
4. Зырянов Ю.Т., Муромцев Д.Ю., Грибков А.Н. Вероятностное описание потоков однородных событий для оценки надежности систем энергосберегающего управления // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». - Пенза: 2018. Т. 2. С. 339-342.
5. Ратушняк В.Н., Ищук И.Н., Малыков К.А., Зырянов Ю.Т. и др. Основы технической эксплуатации радиотехнических систем

специального назначения. – Красноярск: 2015, Сибирский федеральный университет. – 303 с.

6. Воскресенский Д.И., Канащенкова А.И. Активные фазированные антенные решетки. - М.: Радиотехника, 2004. - 488 с.

7. Ерёменко В.Т., Рабочий А.А., Невров И.И. Техническая диагностика электронных средств. - Орел: Госуниверситет - УНПК, 2012. С. 44-46.

8. Жексенов М.А., Печурин В.А., Волченков А.С. Антенная решетка с печатными излучателями для БПЛА // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: [https://trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2)

9. Пономарев Л.И., Вечтомов В.А., Милосердов А.С. Крупноапертурный излучатель для многолучевой антенны спутниковой связи // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://www.trumymai.ru/published.php?ID=29552>

10. Овчинникова Е.В., Рыбаков А.М. Печатная антенная решетка для бортовой радиолокационной станции сантиметрового диапазона // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29558>

11. Лиепинь У.Р., Свитенко Н.И. Метод измерения диаграмм направленности излучателей в составе ФАР // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 7. С. 10-13.

12. Балагуровский В.А., Кондратьев А.С., Сергеев Е.А., Маничев А.О. Способ определения диаграммы направленности фазированной антенной решётки // Патент № 2343495 Российская Федерация, 10.01.09.
13. Scharfman W.E., August G. Pattern Measurements of Phased Arrayed Antennas by Focussing into the Near Zone. Phased Array Antennas, Artech House, Norwood, Mass., 1972, pp. 344-349.
14. Зырянов Ю.Т., Зебрева М.М., Наумова А.Ю., Муромцев Д.Ю., Чернышов Н.Г., Трапезников Е.В. Особенности аппроксимации законов распределения экспериментальных данных испытаний ИИУС // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 4. С. 205-215.
15. Братчиков А.Н., Васин В.И., Василенко О.О. и др. Активные фазированные антенные решетки / Под ред. Д.И. Воскресенского и А.И. Канащенкова. - М.: Радиотехника, 2004. - 488 с.
16. Бененсон Л.С., Журавлев В.А., Попов С.В., Постнов Г.А. Антенные решетки: методы расчета и проектирования / Обзор зарубежных работ под. ред. Л.С. Бененсона. - М.: Советское радио, 1966. - 367 с.
17. Баланис К.А., Иоанидес П.И. Введение в смарт-антенны. - М.: Техносфера, 2012. - 200 с.

18. Белоусов О.А и др. Применение алгоритмов нечеткой логики в системе управления диаграммообразующим устройством гибридной зеркальной антенны // Программные продукты и системы. 2018. № 4. С. 757-762.

19. Гумаров С.Г., Гетманцев А.Ю. Контроль исправности технических систем (комплексов) полигонов по центрам распределения погрешности // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176850>

20. Фролов А.А., Гирич С.В., Заярный В.П. Моделирование характеристик антенн СВЧ-диапазона // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. № 2 (40). С. 112-114.

## References

1. Voskresenskii D.I. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* (Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 744 p.

2. Naumova A., Dmitrievtsev A., Zyryanov Y. Technical Diagnostics of Information and Measurement System Parameters Using a Set of High-frequency Equipment, *2021 3rd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency*

3. Zyryanov Yu.T., Lebedev V.V., Ledovskikh D.N., Ryazanov I.G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2017, no. 3 (19), pp. 49-59.

4. Zyryanov Yu.T., Muromtsev D.Yu., Gribkov A.N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma «Nadezhnost' i kachestvo»*, Penza, 2018, vol. 2, pp. 339-342.

5. Ratushnyak V.N., Ishchuk I.N., Malykov K.A., Zyryanov Yu.T. et al. *Osnovy tekhnicheskoi ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem spetsial'nogo naznacheniya* (Fundamentals of technical operation of special-purpose radio engineering systems), Krasnoyarsk, 2015, Sibirskii federal'nyi universitet, 303 p.

6. Voskresenskii D.I., Kanashchenkova A.I. *Aktivnye fazirovannye antennye reshetki* (Active phased array antennas), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p.

7. Eremenko V.T., Rabochii A.A., Nevrov I.I. *Tekhnicheskaya diagnostika elektronnykh sredstv* (Technical diagnostics of electronic means), Orel, Gosuniversitet - UNPK, 2012, pp. 44-46.

8. Zheksenov M.A., Pechurin V.A., Volchenkov A.S. *Trudy MAI*, 2011, no.

45. URL: [https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25385&PAGEN\\_2=2](https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25385&PAGEN_2=2)

9. Ponomarev L.I., Vechtomov V.A., Miloserdov A.S. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <https://www.trumymai.ru/eng/published.php?ID=29552>
10. Ovchinnikova E.V., Rybakov A.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29558>
11. Liepin' U.R., Svitenko N.I. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2005, no. 7, pp. 10-13.
12. Balagurovskii V.A., Kondrat'ev A.S., Sergeev E.A., Manichev A.O. *Patent № 2343495 RF*, 10.01.09.
13. Scharfman W.E., August G. *Pattern Measurements of Phased Arrayed Antennas by Focussing into the Near Zone. Phased Array Antennas*, Artech House, Norwood, Mass., 1972, pp. 344-349.
14. Zyryanov Yu.T., Zebreva M.M., Naumova A.Yu., Muromtsev D.Yu., Chernyshov N.G., Trapeznikov E.V. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 2020, no. 4, pp. 205-215.
15. Bratchikov A.N., Vasin V.I., Vasilenko O.O. et al. *Aktivnye fazirovannye antennye reshetki (Active phased array antennas)*, Moscow, Radiotekhnika, 2004, 488 p.
16. Benenson L.S., Zhuravlev V.A., Popov S.V., Postnov G.A. *Antennye reshetki: metody rascheta i proektirovaniya (Antenna arrays: methods of calculation and design)*, Moscow Sovetskoe radio, 1966, 367 p.

17. Balanis K.A., Ioanides P.I. *Vvedenie v smart-antenny* (Introduction to smart antennas), Moscow, Tekhnosfera, 2012, 200 p.
18. Belousov O.A et al. *Programmnyye produkty i sistemy*, 2018, no. 4, pp. 757-762.
19. Gumarov S.G., Getmantsev A.Yu. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176850>
20. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarnyi V.P. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2008, no. 2 (40), pp. 112-114.

Статья поступила в редакцию 06.05.2024

Одобрена после рецензирования 18.05.2024

Принята к публикации 27.06.2024

The article was submitted on 06.05.2024; approved after reviewing on 18.05.2024; accepted for publication on 27.06.2024