

Научная статья

УДК 621.396.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182671>

КАЛИБРОВКА АКТИВНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

Александр Олегович Стакозов¹✉, Владимир Степанович Темченко²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹stakozov990@mail.ru✉

²vstemchenko@gmail.com

Аннотация. В статье представлены результаты калибровки, реализуемые на основе численного моделирования многоэлементной активной фазированной антенной решетки (АФАР), состоящей из линейных излучателей, предназначенной для работы в современных радиотехнических системах в составе спутников систем, реализующих дистанционное зондирование Земли, корабельных комплексах морского базирования, авиационных комплексах, включающих управляемые летательные аппараты, использующие системы связи, радиолокации, радионавигации, госопознавания и радиоэлектронной борьбы. Результаты моделирования калибровки линеек ППМ АФАР полученных на основе предложенного метода, который основан на использовании на известных

характеристиках калиброванной эталонной (бездефектной) антенны, полностью совпадающей с размещением и типом излучателей на апертуре аттестованной ФАР. Указанный подход позволяет определить техническое состояние тестируемой АФАР на основе сравнения с эталонной ФАР, включающее оценку согласования распределительной схемы питания, характеристик аттенюаторов и фазовращателей, определение неисправных приемопередающих модулей (ППМ) тестируемой АФАР с коррекцией характеристик элементов и узлов. Решение задачи калибровки предложенным методом позволяет повысить точность калибровки за счет снижения влияния характеристик зонда-регистратора (ЗР) при измерения поля в ближней зоне указанных АФАР. Разработанная программа моделирования приведена в Приложении 1 позволяет учитывать амплитудные и фазовые ошибки для произвольного распределения излучателей как для линейной ФАР, так двумерной ФАР с произвольной формой апертуры, а также позволяет учитывать ошибки ЗР при проведении измерений в БЗ.

Ключевые слова: методы калибровки фазированной антенной решетки, результаты численного моделирования, точность калибровки, зонд-регистратор

Для цитирования: Стакозов А.О., Темченко В.С. Калибровка активной фазированной антенной решетки в безэховой камере на основе измерений излучателей в ближней зоне // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182671>

Original article

CALIBRATION OF ACTIVE ELECTRONICALLY SCANNED ARRAY ANTENNA IN ANECHOIC CHAMBER BASED ON MEASUREMENTS OF THE CHARACTERISTICS OF RADIATORS IN THE NEAR FIELD ZONE

Alexandr O. Stakozov¹, **Vladimir S. Temchenko²**

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹stakozov990@mail.ru

²vstemchenko@gmail.com

Abstract. A phased array antenna is composed of element antennas and some electronic components. Parameters of electronic components vary with temperature, drift over time or suffer from aging effects, there is amplitude and phase errors when excite element antennas or do the add operation. To realize good performance of a phase array, calibration method is applied to compensate the errors. While the details and extent of this calibration vary from system to system, virtually all of them require that each element`s amplitude, phase (or time delay), and even polarization are set correctly to achieve the desired beam pattern. The article presents the calibration results implemented on the basis of numerical modeling of a multi-element active electronically scanned array (AESA) consisting of linear radiators designed to work in modern radio engineering systems. The results of modeling the calibration of the AESA transmit/receive modules (TRM) kit obtained on the basis of the proposed method, which is based on the use of a calibrated

reference antenna with known characteristics, which completely coincides with the placement and type of emitters on the aperture of a certified AESA. This approach makes it possible to determine the technical condition of the tested AESA based on comparison with the reference AESA, including an assessment of the alignment of the power distribution circuit, the characteristics of attenuators and phase shifters, the determination of faulty TRM of the tested AESA and with correction of the characteristics of this elements. The solution of the calibration problem by the proposed method allows to increase the accuracy of calibration by reducing the influence of the characteristics of the A phased array antenna is composed of element antennas and some electronic components. Parameters of electronic components vary with temperature, drift over time or suffer from aging effects, there is amplitude and phase errors when excite element antennas or do the add operation. To realize good performance of a phase array, calibration method is applied to compensate the errors. While the details and extent of this calibration vary from system to system, virtually all of them require that each element`s amplitude, phase (or time delay), and even polarization are set correctly to achieve the desired beam pattern. The article presents the calibration results implemented on the basis of numerical modeling of a multi-element active electronically scanned array (AESA) consisting of linear radiators designed to work in modern radio engineering systems. The results of modeling the calibration of the AESA transmit/receive modules (TRM) kit obtained on the basis of the proposed method, which is based on the use of a calibrated reference antenna with known characteristics, which completely coincides with the placement and type of emitters on the aperture of a certified AESA. This approach makes

it possible to determine the technical condition of the tested AESA based on comparison with the reference AESA, including an assessment of the alignment of the power distribution circuit, the characteristics of attenuators and phase shifters, the determination of faulty TRM of the tested AESA and with correction of the characteristics of this elements. The solution of the calibration problem by the proposed method allows to increase the accuracy of calibration by reducing the influence of the characteristics of the probe antenna when measuring the field in the near field zone of the specified AESA. Based on the simulation results the amplitudes of the tested and reference AESA were compared.

Keywords: phased array calibration methods, numerical simulation results, calibration accuracy, probe antenna

For citation: Stakozov A.O., Temchenko V.S. Calibration of active electronically scanned array antenna in anechoic chamber based on measurements of the characteristics of radiators in the near field zone. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182671>

Введение

В последние десятилетия усилие разработчиков направлено на проектирование и разработку широкополосных активных фазированных антенных решеток (АФАР), включая их предварительную диагностику и калибровку. В современных радиотехнических системах АФАР используют в составе спутниковых систем дистанционного зондирования Земли, в корабельных комплексах морского

базирования, авиационных комплексах, включающих управляемые летательные аппараты, использующие системы связи, радиолокации, радионавигации, госопознавания, радиоэлектронной борьбы [1-5]. Организация процедуры калибровки как в безэховой камере, так и на открытых полигонах проведение измерений в соответствии с предложенным алгоритмом может различаться для отдельных ФАР, находящихся в различных эксплуатационных условиях [6-10].

Процедуры диагностики АФР могут использоваться как при передаче калибровочного сигнала самой решеткой, включая ее оптимизацию [11,12]., а также при приеме такого сигнала от наземного источника [13-15].

В работах [16-18] рассмотрены варианты калибровки АФАР с большим числом элементов и могут применяться для калибровки при частичном или полном отказе устройства управления амплитудой части излучателей тестируемой (ТФАР) в процессе разработки, изготовления, настройки и эксплуатации ТФАР. При решении задачи калибровки используют данные комплексных амплитуд напряжений возбуждения излучателей и данные измерений, полученных в тех же точках БЗ при излучении сигналов бездефектной (эталонной) калиброванной АФАР, размещаемой на месте тестируемой АФАР и конструктивно полностью совпадающей с ней. Особенности калибровки тестируемой АФАР и бездефектной АФАР подробно рассмотрены в работах [19-20]. Такой подход позволяет повысить точность решения задачи калибровки многоэлементной ТФАР, основанную на снижении ошибок зонда по фазе и амплитуде при регистрации полей в ближней зоне как ТФАР, так и

эталонной калиброванной КФАР, реализуемое за счет уменьшения влияния характеристик зонда регистратора на полевые характеристики указанных ФАР.

В работе [21] на основе метода распознавания со сжатием рассмотрен подход, позволяющий существенно сократить число элементов подлежащей калибровке АФАР, которая сводится к разреженной ФАР.

В [22] представлены результаты моделирования диаграммы обратного рассеяния (ДОР) линейной АФАР L-диапазона при облучении волной X-диапазона. На основе численного моделирования моделированием определены особенности ДОР системы излучения из щелевых металлодиэлектрических неоднородных излучателей, размещаемой вдоль носка подвижной консоли крыла летательного аппарата. Рассмотрены особенности расчета характеристик рассеяния АФАР L-диапазона при использовании частотно-селективных структур (ЧСС), реализуемых на основе полосно-заграждающего пространственного фильтра. Оценено влияние ЧСС на характеристики согласования излучающих элементов.

Активное использование ФАР в составе указанных систем ставит перед разработчиками новые задачи, в частности, разработку оптимальных методов калибровки перспективного класса АФАР среди уже существующих вариантов [23,24]. При определении метода решения задачи диагностики при проведении измерений важными являются: выбор режима работы тестируемой АФАР; число ее элементов определяющее время диагностики, включающее длительность цикла измерений, что позволяет сохранить ресурс ее элементной базы и обеспечить достоверность диагностики. Важным также являются вычислительные затраты;

стоимость аппаратной реализации и выбор безэховой зоны при проведении измерений тестируемой и эталонной АФАР. Результаты решения задачи диагностики позволяет оценить техническое состояние тестируемой АФАР и определить насколько ее характеристики и параметры отличаются от требуемых, например, от бездефектной (эталонной) АФАР. Это может быть обусловлено изменением характеристик или отказом как одиночных, так и групп излучателей подрешетках АФАР, включающих управляемые фазовращатели (ФВ), переключатели и электронные устройства управления. Надежность работы АФАР определяется стабильностью параметров ее элементной базы: усилителей (аттенюаторов), одиночных и групп управляемых фазовращателей, а также структурой распределительной системой возбуждения ее элементов и другими факторами. Для решения задачи калибровки АФАР используются измерения поля излучения антенны, проводимые в ближней зоне (БЗ) в безэховой камере (БЭК). Для этого на основе проведенных измерений необходимо определить с заданной точностью амплитуду и фазу ее элементов, однако значительные разности амплитуд и фаз между каналами ФАР, могут происходить поскольку характеристики ее элементной базы зависят от частоты и температуры и обычно дрейфуют во времени, поэтому для надежной работы АФАР необходимо периодически калибровать [25]. При выборе метода решения задачи диагностики важными являются: структура и режим работы АФАР в процессе проводимых измерений; время диагностики, включающее длительность цикла измерений и вычислительные затраты, стоимость его аппаратной реализации. Результаты решения задач диагностики позволяют

оценить техническое состояние тестируемой ФАР и определить насколько характеристики и параметры тестируемой АФАР отличаются от бездефектной (эталонной) АФАР. Это может быть обусловлено изменением характеристик тестируемой АФАР, в частности, отказом одиночных, групп излучателей и излучателей в подрешетках ФАР, включающих управляемые фазовращатели (ФВ), переключатели и электронные устройства управления. Важным условием получения точных данных об источнике излучения, является выполнение калибровки всей системы АФАР в целом [26,27].

В некоторых случаях невозможно обеспечить калибровку всей системы АФАР в полевых условиях, из-за опасности быть обнаруженным [28], для калибровки системы внутри самой АФАР используется система внутренней калибровки антенны, однако стоимость такой системы весьма значительна [29].

Задача калибровки включает определение неисправных линеек ППМ АФАР, а также коррекцию или замену характеристик элементов и узлов ППМ, включающих распределительную систему питания, аттенюаторы и фазовращатели. Результатом калибровки является сравнение указанных характеристик с эталонной ФАР при проверке и настройке тестируемой ФАР. Важны также ошибки, обусловленные характеристиками программно-аппаратного стенда при проведении специализированных измерений [30]. В настоящее время для проведения калибровки тестируемой ФАР используют только амплитуду или мощность излучаемого или принимаемого сигнала, такой подход позволяет существенно

упростить программно аппаратный комплекс для измерения параметров антенн [31, 32].

Целью работы является новый метод калибровка активной ТФАР, позволяющих повысить точность калибровки на основе измерений характеристик линеек излучателей при учете характеристик зонда регистратора при определении поля излучения в выбранных точках поверхности сканирования в БЗ ФАР.

1. Постановка задачи. Калибровка тестируемой АФАР на основе предложенного метода

Разработанный метод включает решение задачи калибровки, которая сводится к нахождению распределения амплитуды и фазы линеек диэлектрических излучателей ТФАР, геометрия и конструкция которой представлена на рис. 1. Поскольку в настоящее время технология изготовления линеек излучателей в модуле отработана, то есть амплитуда и фаза в каждой из линеек постоянна, но отличны от других линеек [29,30].

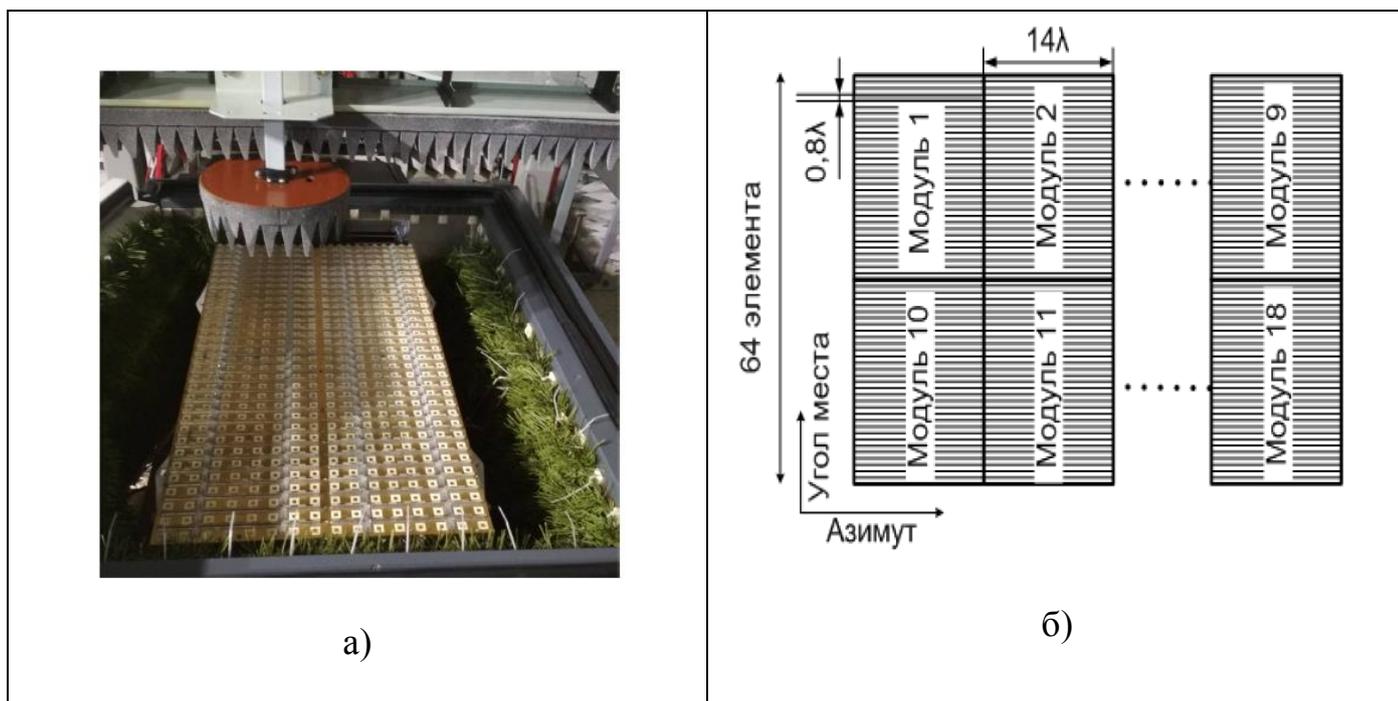


Рисунок 1. Многоэлементная решетка печатных излучателей использовалась для предварительной калибровки при тепловых испытаниях: а) решетка полностью; б) структура и размеры ее модулей, включающих линейки излучателей.

Один антенный модуль (АМ) при испытании состоял из 32 линеек излучателей, а затем для формирования заданной ДН при обзоре поверхности Земли предполагалось использовать 64 линейки каждая из которых может излучать и принимать две ортогональные поляризации (рис. 1а). Возбуждение АМ на каждой поляризации осуществляется двумя независимыми блоками, которые подключены к левой и правой половинам АМ. Расстояние между линейками составляет порядка $0,8\lambda$, общая длина АФАР $L_y = 25,6\lambda$, а длина каждой линейки $L_x = 14,3\lambda$.

В некоторых режимах требуется возможность быстрого переключения положения луча антенны во время съемки. Поэтому многие современные РСА строятся на основе активных фазированных антенных решеток (АФАР). Цифровые АФАР (ЦАФАР) дают ещё большие возможности для формирования ДН антенны,

однако в настоящее время отсутствует отечественная элементная база (ЭБ) для их создания, приобретение импортной ЭБ в настоящее время значительно затруднено и поэтому требует больших финансовых ресурсов.

Исследуемая АФАР (рис. 2) представляет собой решетку из 18 модулей. В свою очередь, каждый модуль состоит из 64 линеек АФАР с цифровым выходом каждая. Активные элементы этой АФАР может обеспечивать сканирование в угломестной плоскости и азимутальной плоскости представляют собой излучающие линейки длиной 18λ и шириной $0,8\lambda$ [21].

Предложенный новый подход позволяет осуществлять калибровку тестируемой АФАР как в режиме передачи, так и приема при этом излучающим элементом является линейка излучателей и любой ее отказ приводит к изменению характеристик АФАР.

Рассматриваемый в [20] подход имеет существенный недостаток, во-первых, использует при калибровке двух соседних излучателей установленных в противофазе при этом для уменьшения ошибки калибровки требуется применение дискретных фазовращателей с разрядностью не менее 5.

В отличие от указанного метода в [20] предложенный метод основан на знании амплитуды и фазы каждого излучателя эталонной (калиброванной) КФАР и последующем использовании данных, полученных в БЗ на том же измерительном стенде со сканирующим ЗР при одинаковой геометрии измерений и направлен на повышение достоверности калибровки указанных ФАР. Предложенный метод проведен для излучателей с равномерным распределением излучателей линейки

модулей КФАР, так и ТФАР (рис. 2). Метод калибровки, представленный в [31] имеет функциональные ограничения и может быть использован только для излучателей модулей с законом распределения косинус на пьедестале.

Предложенный метод, направлен на повышение достоверности калибровки многоэлементной активной антенной решетки. позволяет оценить техническое состояние тестируемой ФАР и определить насколько характеристики и параметры тестируемой АФАР отличаются от бездефектной АФАР.

Метод позволяет определить амплитуды и фазы источников возбуждения каждого из дефектных и потенциально дефектных линеек излучателей, включающих распределительную систему питания линеек, условия согласования с ЗР, а также поляризацию излучателей ТФАР и реализуется на основе регистрации неподвижным зондом поля излучения таких источников в ближней зоне при последовательном изменении фазы линеек на 180 градусов. На основе предложенного метода точность определения амплитуды и фазы линеек тестируемой антенны не зависит от ошибок зонда регистратора и определяется лишь взаимным влиянием соседних излучателей.

2. Постановка задачи калибровки тестируемой ФАР.

В этом разделе на основе предложенного подхода рассмотрено решение задачи калибровки, которая сводится к определению распределения амплитуды и фазы излучателей на примере плоской ТФАР, содержащей N -линеек излучателей, координаты которых определяются вектором \mathbf{r}_n , представленным в (1)., геометрия ТФАР представлена на рисунке 2.

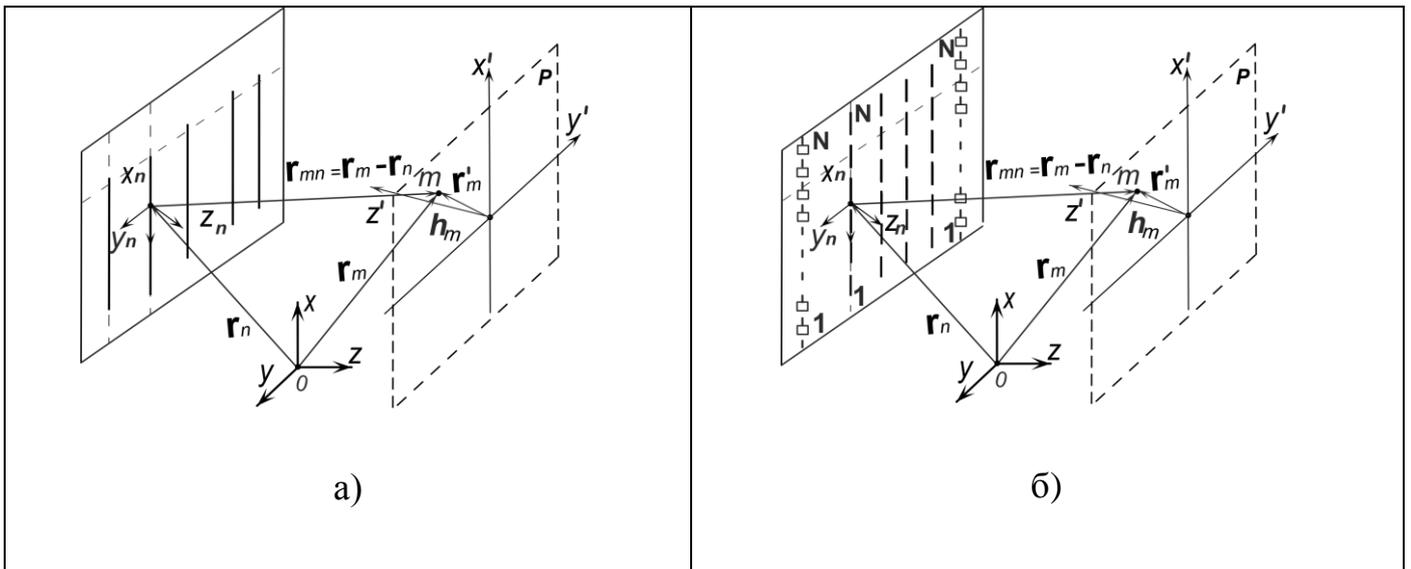


Рисунок 2. Геометрия структуры N линеек при проведении регистрации поля излучения ближней зоне точке m а); координаты излучателей линейки модуля ФАР \mathbf{r}_n для всех N линеек модуля ТФАР б).

$$\mathbf{r}_n = x_n \mathbf{x}_0 + y_n \mathbf{y}_0 + z_n \mathbf{z}_0, \quad (1)$$

где \mathbf{r}_n – координата линейки излучателей n -го модуля ФАР $n = 1, 2, \dots, N$; \mathbf{x}_0 , \mathbf{y}_0 и \mathbf{z}_0 – единичные орты.

Прежде чем приступить к решению задачи диагностики ТФАР приведем данные значений амплитуды и фазы каждого излучателя эталонной КФАР, полученные для линейной КФАР и рассчитанную на их основе ее диаграмму направленности ДН с использованием разработанной программы, представленной в Приложении 1. Отметим, что программа является универсальной поскольку позволяет учитывать амплитудные и фазовые ошибки для произвольного распределения как для линейной ФАР, так двумерной ФАР с произвольной формой апертуры. Кроме того позволяет учитывать ошибки ЗР при проведении измерений.

Обозначим комплексную амплитуду (КА) возбуждения n -ой линейки излучателей на апертуре ФАР в виде $a_n^{T(K)}(\mathbf{r}_n)$. Верхние индексы в указанных характеристиках T и K относятся как к ТФАР, так и КФАР соответственно. Расстояние между n -ой линейки излучателей ФАР и точкой измерений m определим в виде [20, 21].

$$r_{mn} = |\mathbf{r}_{mn}| = \left[(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2 + (z_m - z_n)^2 \right]^{0,5}, \quad (2)$$

где $\mathbf{r}_{mn} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n$ – вектор, определяющий направление на точку m .

Возможные ошибки при решении задачи калибровки включают: теоретические ошибки, определяемые точностью приближения электродинамической модели линеек модуля ТФАР, включающей распределительную систему их питания и условия согласования приемника с ЗР, а также поляризацию излучателей линеек [20,21]. При обработке данных, полученных при измерениях поля излучения ФАР ЗР расположенным в точке m плоскости P , используем вектор $\mathbf{r}'_m = x'_m \mathbf{x}_0 + y'_m \mathbf{y}_0$; $\mathbf{r}'_m \in P$; $\mathbf{r}_{mn} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_n$ (рис. 2 и 3).

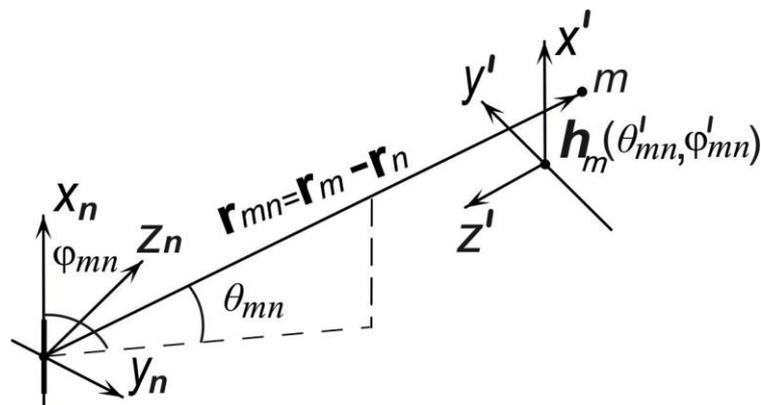


Рисунок 3. Геометрия задачи калибровки ФАР в сферической системе координат

Для регистрации ортогональных компонент поляризации поля излучения линеек ТФАР и КФАР в предложенном методе используем в режиме приема два независимых ЗР с векторными характеристиками $\mathbf{h}_1(r'_m)$ и $\mathbf{h}_2(r'_m)$, при этом полагаем, что расстояние до плоскости сканирования P соответствует расстоянию до ДЗ одиночного n -го излучателя для каждой из линеек указанных ФАР (рис. 1 б).

При решении задачи калибровки учитываем, что излучатели каждой из линеек эталонной ТФАР имеет известную одинаковую амплитуду a_n^T и одинаковую фазу φ_n^T , отличные от соответствующих равных амплитуд a_n^K и фаз φ_n^K КФАР, которые являются неизвестными ($n = 1, 2, \dots, N$). Равенство амплитуд и фаз линеек указанных ФАР обусловлено разработанной технологией их производства, но при установке их в модуль ФАР характеристики распределительной системы питания линеек отличаются. Изменяя амплитуды a_n^T и фазы φ_n^T линеек ТФАР на основе разработанного алгоритма используя известные значения амплитуд a_n^K и фаз φ_n^K линеек эталонной КФАР решим прямую задачу калибровки. Для этого используем данные измерения поля излучения указанных ФАР в локальной сферической системе координат, представленную на рис. 3, включающую векторные характеристики излучения n -ой линейки в виде ее нормированной ДН $\dot{\mathbf{F}}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ и характеристик зонда $\mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$, определяющего поляризацию и амплитуду регистрируемого поля в точке m линеек КФАР и ТФАР. По результатам численного моделирования было рассчитано поле на плоскости измерений, располагающейся на

расстоянии $5 \lambda_0$ от плоскости апертуры ТФАР и КФАР $d_x = \lambda_0/2$. Схема измерений (см.рис. 4).

3. Влияние характеристик зонда-регистратора на результаты калибровки ТФАР

Для регистрации ортогональных компонент поляризации поля излучения линеек ТФАР и КФАР в предложенном методе используем в режиме приема два независимых ЗР с векторными характеристиками $\mathbf{h}_1(r'_m)$ и $\mathbf{h}_2(r'_m)$, при этом полагаем, что расстояние до плоскости сканирования P соответствует расстоянию ДЗ одиночного n -го излучателя линеек указанных ФАР (рис. 1 б). При решении задачи калибровки учитываем, что излучатели каждой из линеек эталонной ТФАР имеет известную одинаковую амплитуду a_n^T и одинаковую фазу φ_n^T , отличные от соответствующих равных амплитуд a_n^K и фаз φ_n^K КФАР, которые являются неизвестными ($n = 1, 2, \dots, N$). Равенство амплитуд и фаз линеек указанных ФАР обусловлено разработанной технологией их производства, но при установке их в модуль ФАР характеристики распределительной системы питания линеек отличаются. Изменяя амплитуды a_n^T и фазы φ_n^T линеек ТФАР на основе разработанного алгоритма используя известные значения амплитуд a_n^K и фаз φ_n^K линеек эталонной КФАР решим прямую задачу калибровки. Для этого используем данные измерения поля излучения указанных ФАР в локальной сферической системе координат, представленную на рис. 2, включающую векторные характеристики излучения n -ой линейки в виде ее нормированной ДН $\mathbf{f}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$ и

характеристик зонда $\mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$, определяющего поляризацию и амплитуду регистрируемого поля в точке m линеек КФАР и ТФАР.

Тогда напряжение на входе приемника при регистрации полей ТФАР и КФАР с учетом характеристик ЗР в режиме приема в точке m с учетом согласования импеданса зонда и нагрузки в порту приемника на основе (1) и (2) может быть представлено в виде соответствующих значений [21].

$$u_m^{T(K)} = \sum_{n=1}^N a_n^{T(K)} F_{mn} \mathbf{f}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \cdot \mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}) + \varepsilon, \quad (3)$$

где $a_n^{T(K)}$ – комплексная амплитуда возбуждения напряжения n -ой линейки модуля ТФАР и КФАР соответственно; $F_{mn} = \frac{\exp(ik_0 r_{mn})}{r_{mn}}$ – функция Грина свободного пространства; ε – уровень аддитивных шумов приемника и ошибок измерений.

Отметим, что соотношение (3) справедливо для каждого из независимых зондов с векторными характеристиками $\mathbf{h}_1(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$ и $\mathbf{h}_2(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$ и становится более простым для плоской ФАР, включая поляризационные характеристики излучателей ТФАР и КФАР, что справедливо антенн, имеющих одинаковую конструкцию, включая излучатели.

Комплексная амплитуда (КА) \dot{a}_n^T возбуждения n -го излучателя ТФАР, как отмечено выше, может быть определена на основе известной амплитуды \dot{a}_n^K КФАР, которая включает также компенсацию взаимовлияния излучателей в указанной антенных решетках. Как следует из скалярного произведения (3) величина $\dot{u}_m^{T(K)}$ обусловлена как ортогональными компонентами векторной ДН $\mathbf{f}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn})$, так и

ортогональными компонентами $\mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$. Не нарушая общности будем рассматривать решение задачи калибровки ограничиваясь одним из независимых зондом, например, $\mathbf{h}_1(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$. Отметим, что указанные компоненты $\mathbf{f}_n(\mathbf{r}_{mn}, \theta_{mn}, \varphi_{mn})$ и $\mathbf{h}_1(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$ содержат как основные f_n^O, h_1^O , так и кросс-поляризационные f_n^C, h_1^C составляющие, произведение которых в (3) представим в виде

$$\mathbf{f}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \cdot \mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}) = f_n^O(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) h_1^O(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}) f_n^C(\mathbf{r}_{m,n}, \theta_{mn}, \varphi_{mn}) h_1^C(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}), \quad (4)$$

Подставляя (4) в результат регистрации поля в (3), получим напряжение в порту приемника

$$\dot{i}_{Om}^{T(K)} = \sum_{n=1}^N \dot{a}_n^{T(K)} F_{mn} f_n^O(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) h_1^O(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}), \quad (5)$$

$$\dot{i}_{Om}^{T(K)} = \sum_{n=1}^N \dot{a}_n^{T(K)} F_{mn} f_n^C(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) h_1^C(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn}). \quad (6)$$

При регистрации сигнала на выходе ЗР уровень кроссполяризационной (КП) компоненты h_1^C по сравнению с уровнем основной компоненты (ОК) h_1^O мал и на практике не превышает $-(25..30)$ дБ, кроме того, для ряда антенн уровень КП компоненты f_n^C значительно меньше f_n^O . Это позволяет при решении задачи калибровки ТФАР исключить из результатов обработки измерений сигнал $\dot{i}_{Om}^{T(K)}$ и использовать результат регистрации основной компоненты (5), исключая уравнение (6).

4. Калибровка тестируемой ФАР на основе данных измерений калиброванной ФАР в ближней зоне

В этом разделе на основе нового метода рассмотрим решение задачи калибровки на примере линейных излучателей ТФАР состоящей из N -элементов каждая рис. 1 и рис. 2 ТФАР.

Разработанный метод использует дополнительную априорную информацию базы данных измерений в БЗ эталонной КФАР и измерений ТФАР. Предложенный новый метод решение задачи калибровки при использовании эталонной КФАР позволяет уменьшить влияние ЗР на регистрацию комплексных сигналов линеек КФАР и ТФАР в плоскости сканирования в БЗ. Это обусловлено тем, что в предложенном методе исключено обращение матрицы измерений и использовано простое вычитание комплексных сигналов КФАР и ТФАР.

Для решения задачи калибровки использован новый подход диагностики ТФАР, реализуемой на основе метода сжатия с преобразованием. Решение задачи калибровки N -элементной ТФАР в предложенном методе реализуется в регистрации напряжений (5) в точках, координаты которых определяются вектором \mathbf{r}'_m (рис. 1). При этом результат регистрации представим в виде суммы комплексных напряжений в порту приемника согласно Приложению 2 (рис. П1-П6), выделив из него вклад s -тых излучателей КФАР, подлежащего тестированию, при этом $s(j1 - j4) \in m$, точка регистрации m принадлежит плоскости сканирования $x', y', z' = 0$ (рис. 2 и рис. П1).

$$\dot{u}_{\Sigma 1}^K(\mathbf{r}'_m) = u_{\Sigma 1}^K \exp i \varphi_{\Sigma 1}^K = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^N \dot{u}_n^K + \sum_{s=j1}^{j4} \dot{u}_s^K, \quad (7)$$

Аналогично представим результат регистрации комплексных напряжений, определяемых полем излучения ТФАР в тех же точках (рис. П2-П6)

$$\dot{u}_{\Sigma 1}^T(\mathbf{r}'_m) = u_{\Sigma 1}^T \exp i \varphi_{\Sigma 1}^T = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^N \dot{u}_n^T + \sum_{s=j1}^{j4} \dot{u}_s^T, \quad (8)$$

В (7), (8) $\dot{u}_{\Sigma 1}^K, \exp i \varphi_{\Sigma 1}^K$; $\dot{u}_{\Sigma 1}^T, \exp i \varphi_{\Sigma 1}^T$ – амплитуда и фаза напряжений, полученных при проведении измерений.

При этом в (7) и (8) выполняется равенство сумм $\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^N \dot{u}_s^T = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^N \dot{u}_s^K$, поскольку в ТФАР

число N и координаты линеек излучателей совпадают с числом N координатами КФАР. Затем для решения задачи калибровки линеек на основе (7) и (8) формируем разностное напряжение в виде:

$$\dot{u}_{g1}(\mathbf{r}'_m) = u_{\Sigma 1} \exp i \varphi_{\Sigma 1} = u_{0\Sigma} \exp i \varphi_0 + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq s}}^N (\dot{u}_s^K - \dot{u}_s^T) + \sum_{s=j1}^{j4} (\dot{u}_s^K - \dot{u}_s^T), \quad (9)$$

полей КФАР и ТФАР при аналогичных условиях проведения измерений.

Предложенный подход решения задачи калибровки ТФАР включает этап совместной обработки результатов регистрации напряжений, представленный ниже.

Согласно этому при измерении поля излучения КФАР предварительно осуществляют выбор точки измерений $m \in P$ (рис. 2), а затем в указанной точке проводят ряд дополнительных измерений, используемых для формирования базы данных разностного напряжения (9). Напряжения регистрируются зондом в

выбранной точке m , при излучении всех N элементов КФАР, но при этом дополнительно изменяют фазу одного из них, например, s -го излучателя на $\Delta\varphi_s^K$.

Затем на основе сравнения восстановленного значения амплитуды (ВЗА) излучателя КФАР с известным значением, полученным с учетом взаимного влияния взаимного соседних излучателей и ошибкой регистрации, выбирают указанное значение фазы. Для совместной обработке разностных напряжений (10) и (11) дополнительное значение фазы линеек ТФАР выбирают равной $\Delta\varphi_s^T$, а КФАР – равной $\Delta\varphi_s^K$. Учитывая, что расстояние между излучающими линейками в модулях ФАР соответствует расстоянию $0,7\lambda$ взаимным влиянием соседних линеек можно пренебречь.

С учетом выбора дополнительной фазы для одинаковых номеров линеек излучателей КФАР и ТФАР формируют разностное напряжение. В частности, при изменении фазы КФАР получим

$$\dot{u}_{g3}(\mathbf{r}'_m) = u_{\Sigma 3} \exp i\varphi_{\Sigma 3} = u_{0\Sigma} \exp i\varphi_0 + u_s^K \exp i(\varphi_s^K + \Delta\varphi_s^K) - u_s^T \exp i\varphi_s^T. \quad (10)$$

Отметим, что значительные по амплитуде неинформативные слагаемые $U_{\Sigma 0} \exp i\varphi_0$ в (9), (10) и (11), определяемые суммарным полем $N-1$ линеек в точке m , сохраняют свое значение при изменении фазы s -го элемента как ТФАР, так и КФАР и вычитаются при формировании итоговых разностей (12) и (13). Аналогично на основе данных регистрации поля излучения ТФАР, полученных при измерениях в одинаковых условиях в точке $m \in P$, формируют разностное напряжение, но при этом в отличие от (9) дополнительно изменяют фазу s -ой линейке ТФАР на $\Delta\varphi_s^T$

$$\dot{u}_{g2}(\mathbf{r}'_m) = U_{\Sigma 2} \exp i \varphi_{\Sigma 2} = u_{0\Sigma} \exp i \varphi_{0\Sigma} + u_s^K \exp i \varphi_s^K - u_s^T \exp i (\varphi_s^T + \Delta \varphi_s^T). \quad (11)$$

Таким образом, при решении задачи калибровки проводят N дополнительных измерений КФАР, это во-первых, позволяет определить амплитуду и фазу любой линейки ТФАР, при этом существенно, что точность решения задачи предложенным подходом, незначительно зависит от характеристик зонда. Во-вторых, в отличие от традиционного метода, нет необходимости формировать и осуществлять обращение матрицы измерений, что сводит указанную задачу к плохо обусловленной и требует процедуры регуляризации [13].

Для поредения параметров линейки ТФАР используем знания разностных напряжений (9), (10) и (11) и сформируем итоговые разности напряжений (12) и (13), необходимые для совместной обработки при решении задачи калибровки. Для ТФАР указанная разность представима в виде

$$\begin{aligned} u_{\Sigma 2} \exp i \varphi_{\Sigma 2} - u_{\Sigma 1} \exp i \varphi_{\Sigma 1} &= u_s^T \exp i \varphi_s^T - \\ - u_s^T \exp i (\varphi_s^T + \Delta \varphi_s^T) &= u_s^T \exp i \varphi_s^T (1 - \exp i \Delta \varphi_s^T). \end{aligned} \quad (12)$$

Итоговую разность напряжений аналогично формируют для КФАР

$$\begin{aligned} u_{\Sigma 1} \exp i \varphi_{\Sigma 1} - u_{\Sigma 3} \exp i \varphi_{\Sigma 3} &= u_s^K \exp i \varphi_s^K - \\ - u_s^K \exp i (\varphi_s^K + \Delta \varphi_s^K) &= u_s^K \exp i \varphi_s^K (1 - \exp i \Delta \varphi_s^K). \end{aligned} \quad (13)$$

Отметим, что выбор номера s -го излучателя КФАР в (13) соответствует номеру линейки излучателя ТФАР в (11), а изменение его фазы, как отмечено выше

$$\Delta \varphi_s^T = \Delta \varphi_s^K \neq 0.$$

После простых преобразований с учетом (12) и (13) получим соотношение, связывающее амплитуду и фазу возбуждения s -го излучателя ТФАР и КФАР

$$\frac{(U_{\Sigma 2} \exp i \varphi_{\Sigma 2} - U_{\Sigma 1} \exp i \varphi_{\Sigma 1})}{(U_{\Sigma 1} \exp i \varphi_{\Sigma 1} - U_{\Sigma 3} \exp i \varphi_{\Sigma 3})} = \frac{U_s^T}{U_s^K} \exp i (\varphi_s^T - \varphi_s^K) = \frac{a_s^K}{a_s^T} \exp i (\varphi_s^T - \varphi_s^K), \quad (14)$$

затем на основе (14) получим амплитуду возбуждения s -го излучателя ТФАР

$$a_s^T = a_s^K \sqrt{\frac{U_{\Sigma 2}^2 + U_{\Sigma 1}^2 - 2U_{\Sigma 1}U_{\Sigma 2} \cos(\varphi_{\Sigma 2} - \varphi_{\Sigma 1})}{U_{\Sigma 1}^2 + U_{\Sigma 3}^2 - 2U_{\Sigma 1}U_{\Sigma 3} \cos(\varphi_{\Sigma 3} - \varphi_{\Sigma 1})}}, \quad (15)$$

а значение фазы φ_s^T указанного излучателя ТФАР определяется соотношением

$$\varphi_s^T = \arctg \frac{U_{\Sigma 2} \sin \varphi_{\Sigma 2} - U_{\Sigma 1} \sin \varphi_{\Sigma 1}}{U_{\Sigma 2} \cos \varphi_{\Sigma 2} - U_{\Sigma 1} \cos \varphi_{\Sigma 1}}. \quad (16)$$

Существенным, что в предложенном подходе решение задачи калибровки результат, полученный на основе совместной обработки (12) и (13), исключает влияние характеристик ЗР, это позволяет с высокой точностью определить амплитуду (15) и фазу (16) излучателей ТФАР. Этот вывод следует из независимости отношения комплексных амплитуд $\dot{U}_s^T / \dot{U}_s^K = \dot{a}_s^T / \dot{a}_s^K$ указанных ФАР, полученным в (14), поскольку его числитель и знаменатель согласно (3) или (5) при $n = s$ содержит одинаковые множители $\mathbf{f}_n(\theta_{mn}, \varphi_{mn}) \cdot \mathbf{h}_m(\theta'_{mn}, \varphi'_{mn})$.

Отметим, что результат калибровки определяется с учетом компенсации взаимного влияния излучателей КФАР. Кроме того, наряду с результатами, полученными (15) и (16) для определения характеристик ТФАР, разработанный подход позволяет на основе проведенных измерений определить реальную величину фазы s -го излучателя КФАР

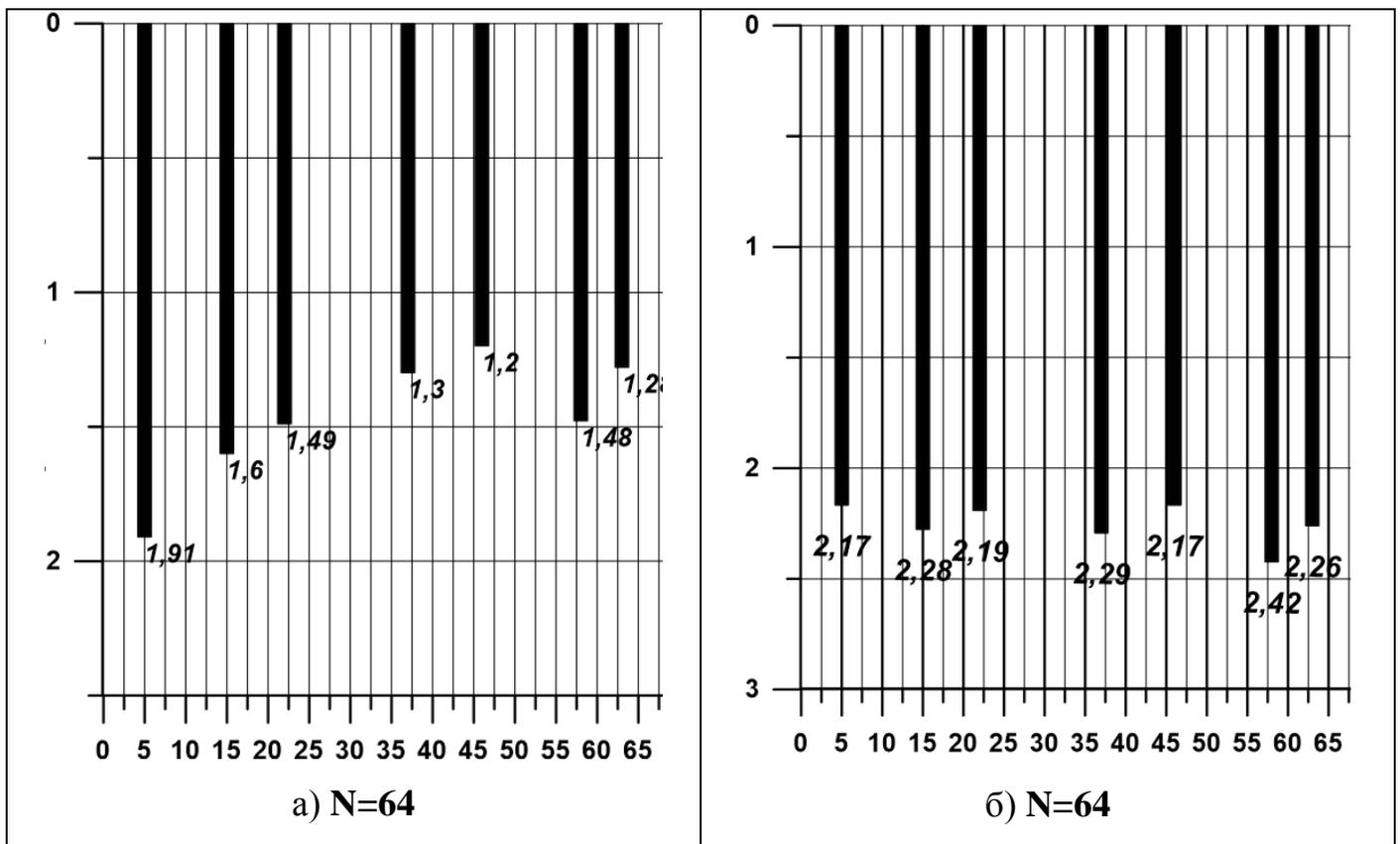
$$\varphi_s^K = \arctg \frac{U_{\Sigma 1} \sin \varphi_{\Sigma 1} - U_{\Sigma 3} \sin \varphi_{\Sigma 3}}{U_{\Sigma 1} \cos \varphi_{\Sigma 1} - U_{\Sigma 3} \cos \varphi_{\Sigma 3}}. \quad (17)$$

Сравнение известной величины фазы КФАР φ_s^K с измеренной $\varphi_s'^K$, полученной на основе (17), позволяет оценить как оптимальность выбора изменения фазы $\Delta\varphi_s^K$ при проведении дополнительных измерений, также оценить влияние результата вычитания высокого уровня неинформативных напряжений $u_{0\Sigma} \exp i\varphi_0$, входящих в суммы измеренных напряжений (9), (10) и (11) при формировании итоговых разностей в (12) и (13). Кроме того, отличие реальной величины фазы ТФАР φ_s^K от измеренной φ_q^K позволят предварительно оценить вклад уровня ошибок измерений и отношения сигнал-шум при проведении тестирования в реальной установке измерений. Сравнение точности определения комплексных амплитуд АФАР с линейными излучателями в предложенном подходе проведена для двух значений дополнительной фазы $\Delta\varphi_s^T = \{\pi; 0,75\pi\}$.

На рисунках №№ 5 и 6 представлены разности нормированных амплитуд (РА) $|a_{ТЗ} - a_T|, \%$ для линейной АФАР с равномерным законом распределения. Такой подход с учетом выбора дополняющей фазы Δ_{B_s} позволит оценить влияние на результаты определения амплитуд Δ_{3P}^a и фаз Δ_{3P}^B излучателей ТФАР характеристики ЗР, для этого при решении задачи калибровки были выбраны излучатели №№ 5; 15; 22; 37; 46; 58; 64. Значения амплитуд $a_{ТЗ}$, a_T – амплитуд и фаз тестируемой АФАР с учетом дополняющей фазы Δ_{B_s} при наличии ошибок ЗР по фазе Δ_{3P}^B и амплитуде Δ_{3P}^a соответственно.

На рисунке 5 представлены относительные значения $|a_{T3} - a_T|, \%$ для линейной АФАР с равномерным законом распределения амплитуд, которые получены при использовании значения фазы (ЗФ) $\Delta_{Bs} = \pi$, в отсутствии шума: а) нормированных амплитуд a_K КФАР; б) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 0$; в) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 5\%$; г) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$; д) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 10\%$.

Значения амплитуд a_{T3} , a_T – амплитуд и фаз тестируемой АФАР с учетом дополняющей фазы Δ_{Bs} при наличии ошибок ЗР по фазе Δ_{3P}^B и амплитуде Δ_{3P}^a соответственно.



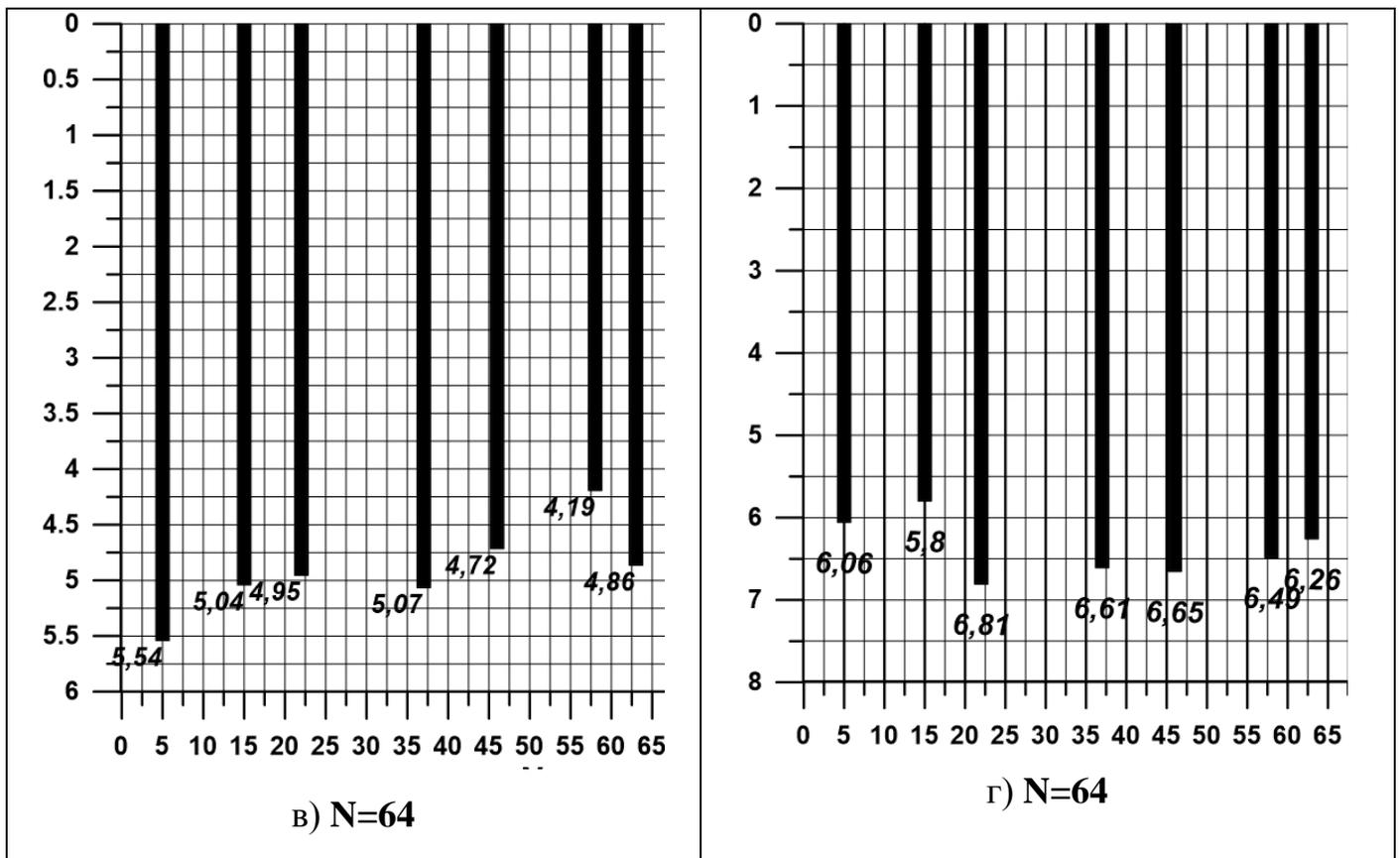


Рисунок 5. Зависимости относительных значения $|a_{T3} - a_T|, \%$ для линейной АФАР с равномерным законом распределения амплитуд.

На рисунке 6 представлены *нормированные зависимости* $|a_{T3} - a_T|, \%$, с равномерным законом распределения полученные при дополнительном значении фазы (ДЗФ) $\Delta_{B_s} = 0.75\pi$, в отсутствии шума: а) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 0$; б) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 5\%$; в) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$; г) ошибка ЗР по фазе $\Delta_{3P}^B = 11,25^\circ$ и амплитуде $\Delta_{3P}^a = 10\%$.

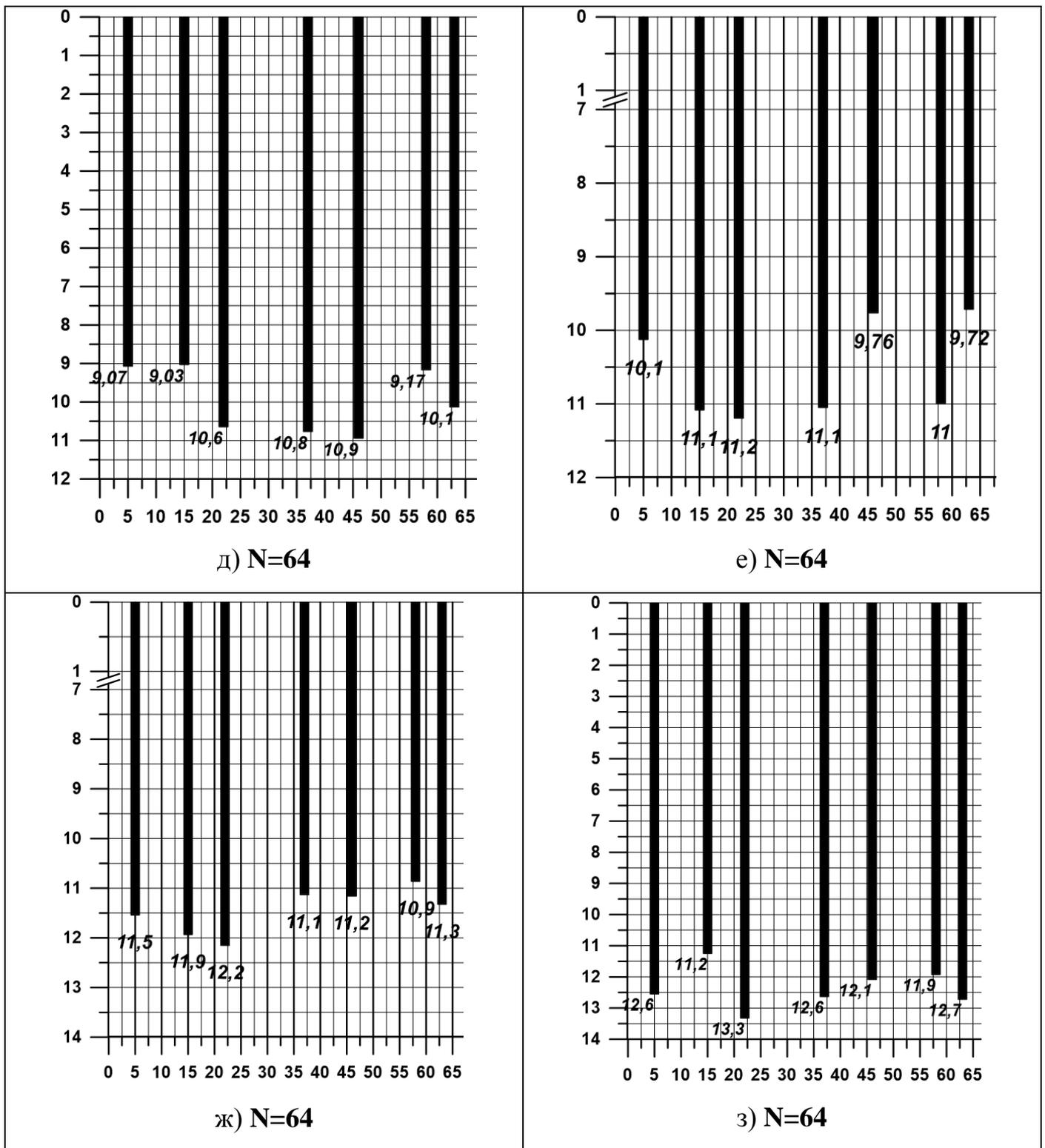


Рисунок 6. Зависимости относительных значения $|a_{ГЗ} - a_T|, \%$ для линейной АФАР с равномерным законом распределения амплитуд.

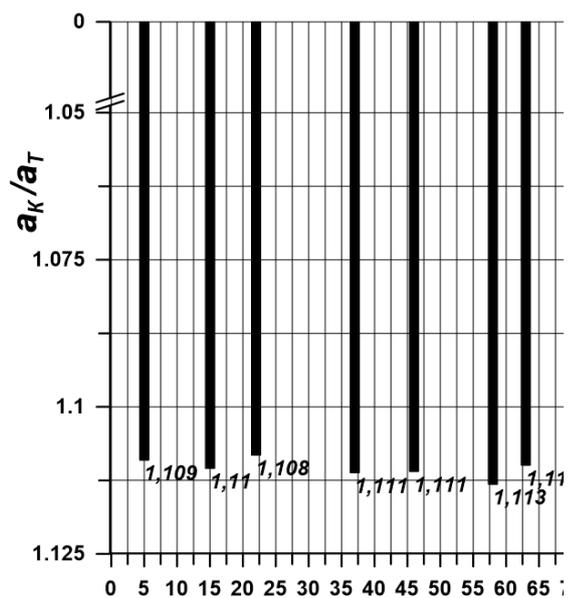


Рисунок 7. Зависимость относительного значения амплитуды калиброванной ФАР к амплитуде восстановленных значений тестируемой ФАР согласно (14).

Приложение 1.

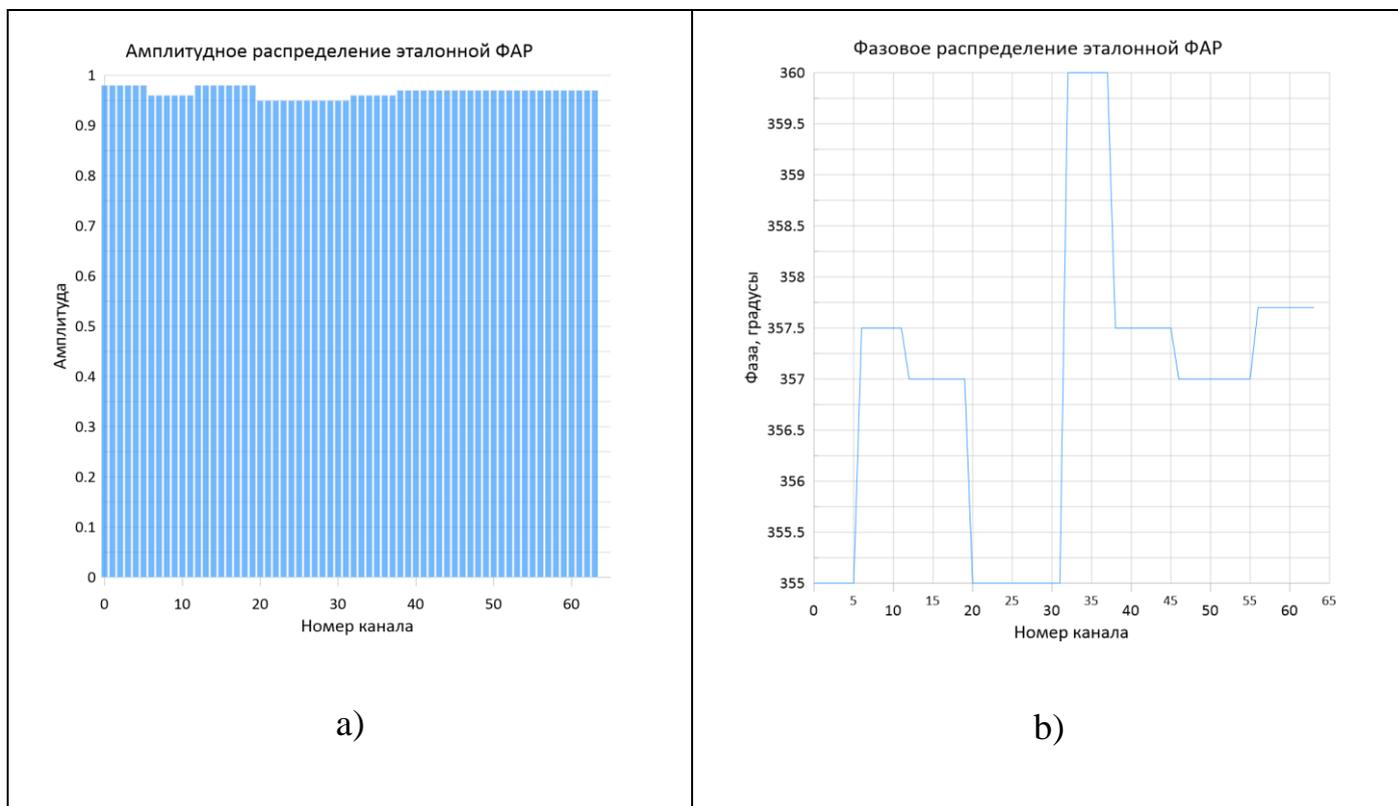


Рисунок П1. Зависимость исходного амплитудного а) и фазового распределения б) при моделировании характеристик эталонной ФАР с учетом незначительных ошибок регистрации.

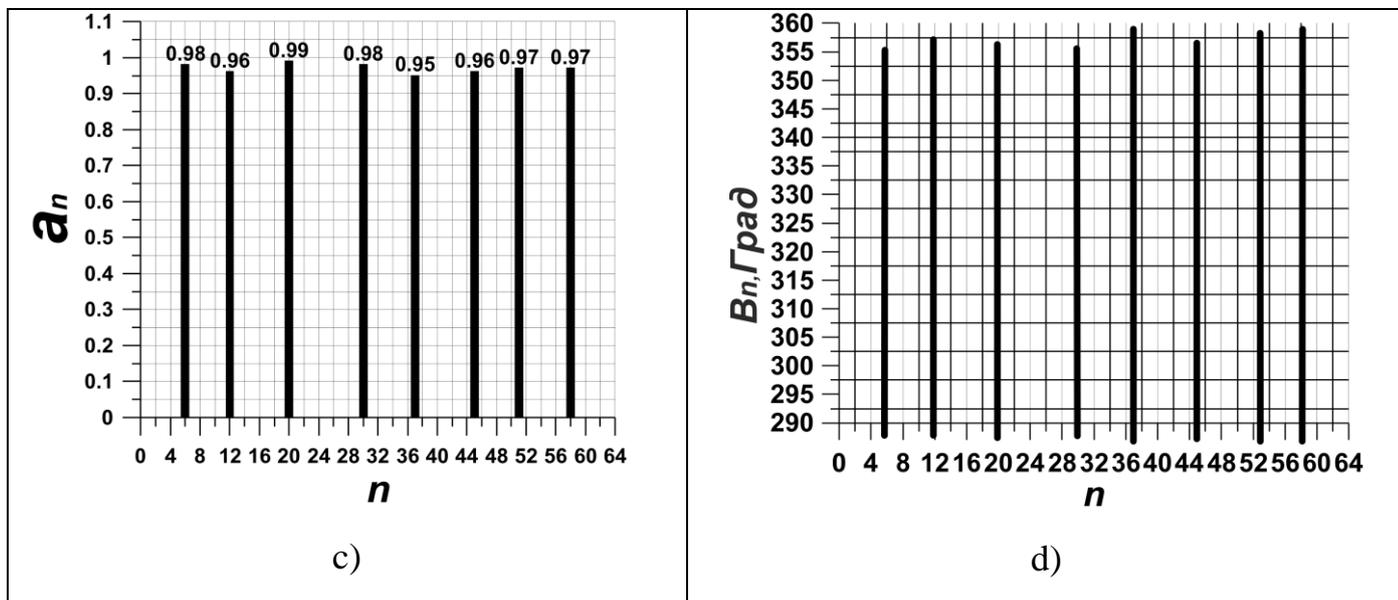
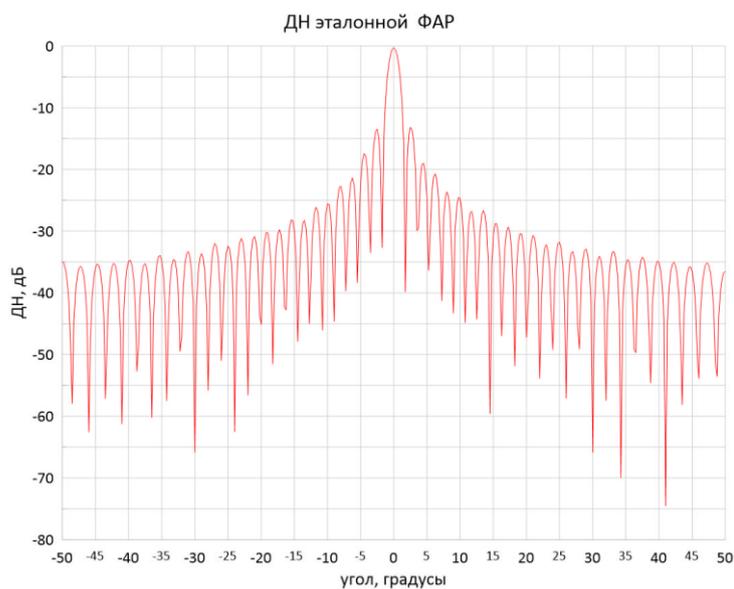


Рисунок П2. Зависимость выборок амплитудного с) и фазового распределения d) при моделировании характеристик эталонной ФАР согласно непрерывному распределению в соответствии с рисунком П1.



к)

Рисунок П3. Диаграмма направленности эталонной ФАР с непрерывным распределением амплитуды и фазы согласно рисунку П1

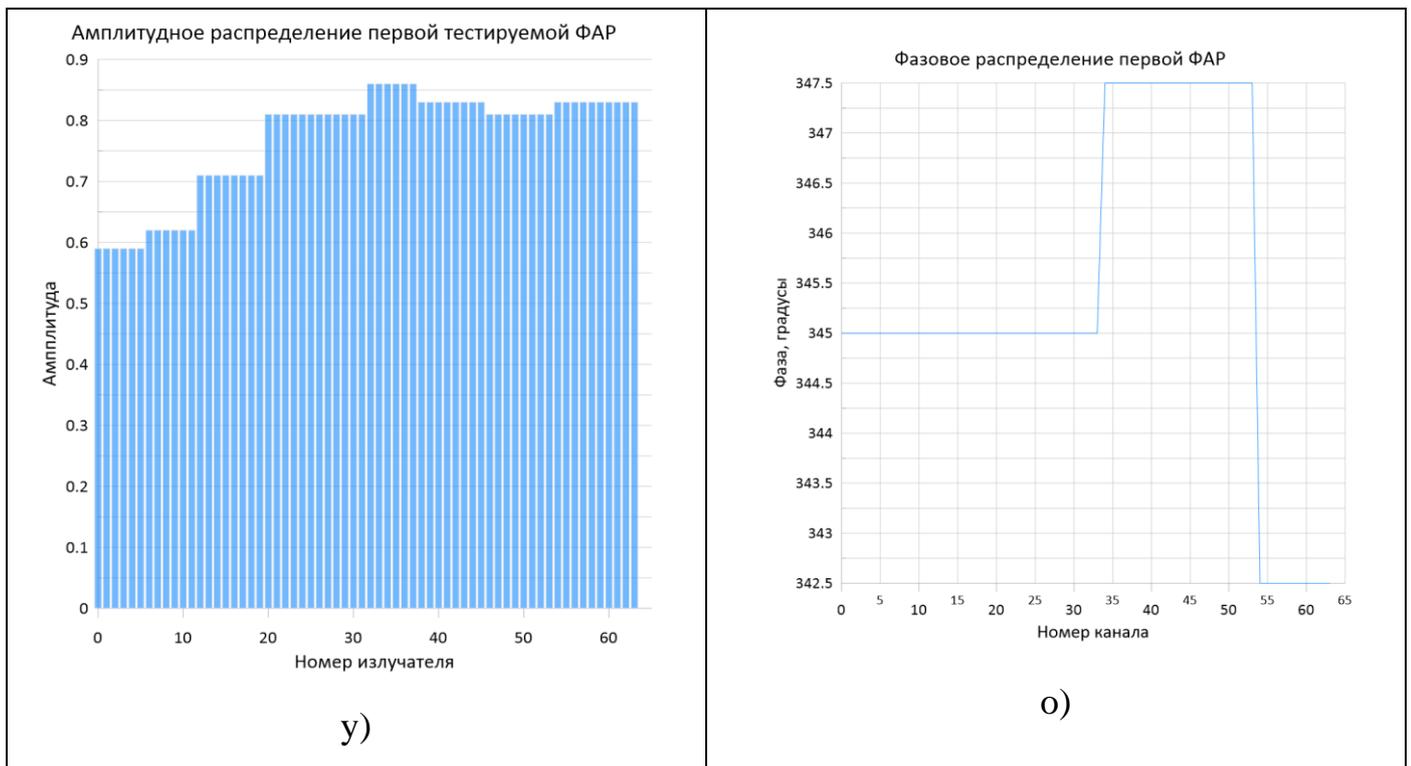


Рисунок П4. Зависимость исходного амплитудного у) и фазового распределения о) при моделировании характеристик первой тестируемой ФАР с учетом ошибок согласования с характеристиками ЗР .

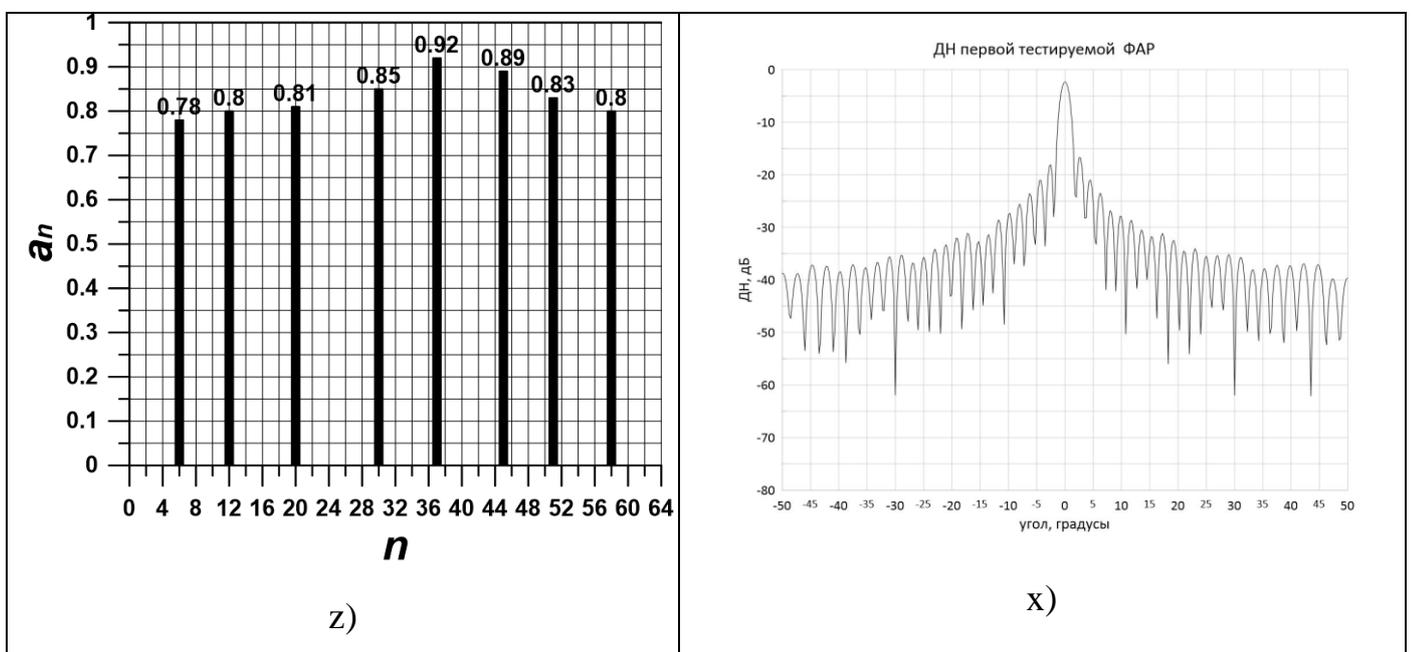


Рисунок П5. Зависимость выборок амплитудного z) и фазового распределения x) при моделировании характеристик первой ТФАР согласно непрерывному распределению в соответствии с рисунком П4.

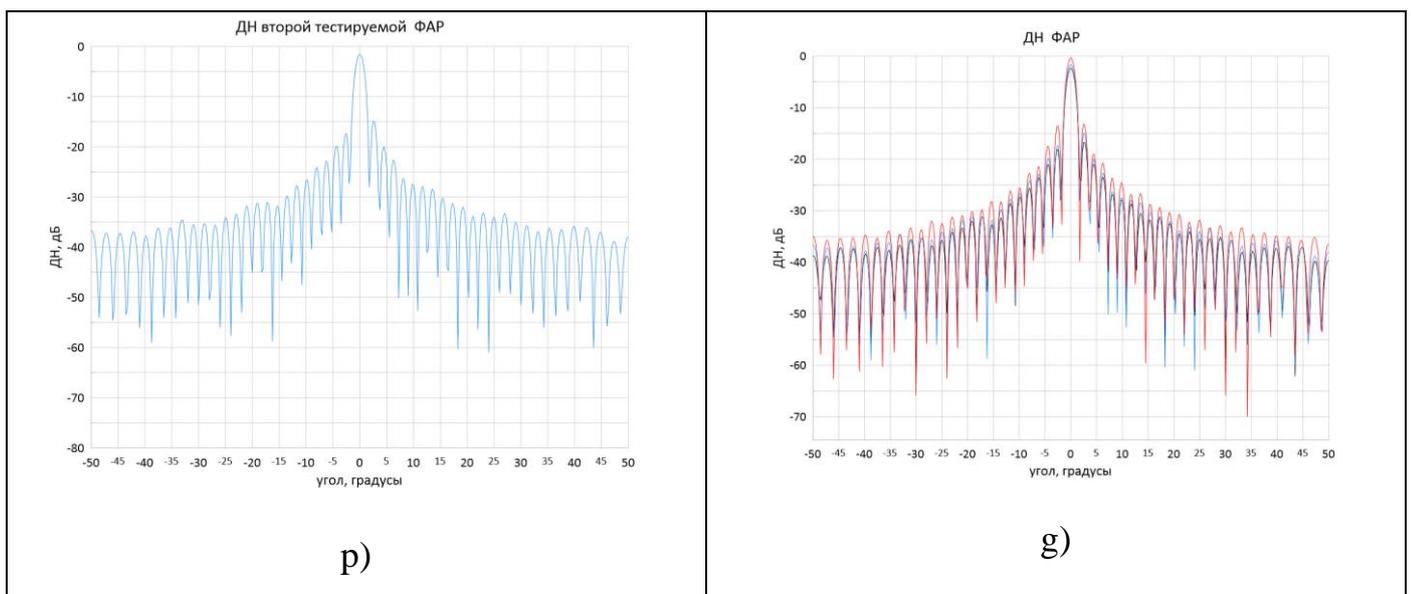
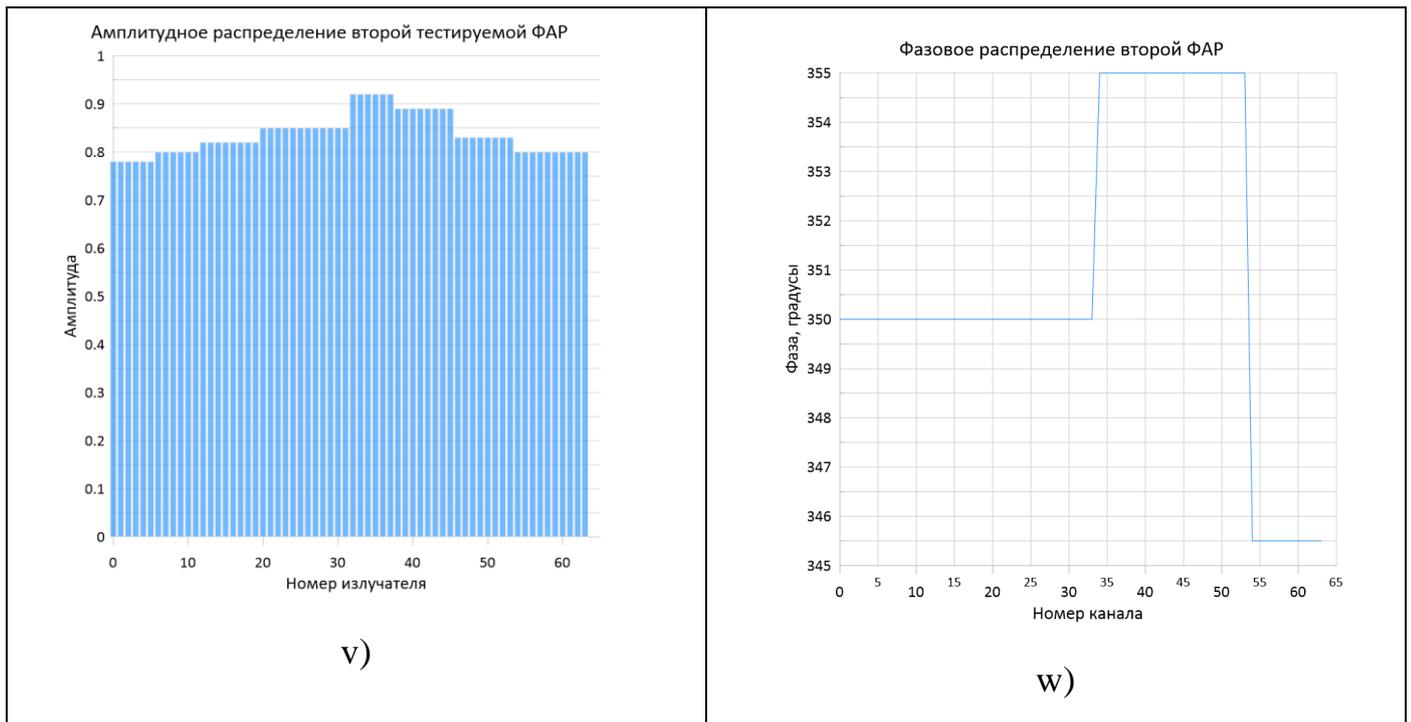


Рисунок Пб. Зависимость выборок амплитудного v) и фазового распределения w) при моделировании характеристик второй тестируемой ФАР согласно непрерывному распределению в соответствии с рисунком П1, ДН ТФАР p); и ДН трех указанных ФАР g).

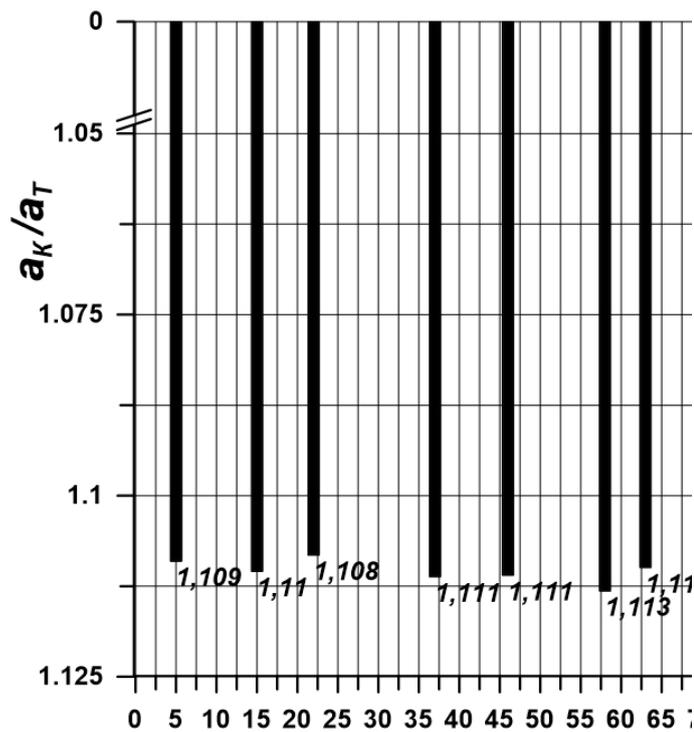


Рисунок П7. Представлены зависимости с равномерным законом распределения нормированных амплитуд калиброванной АФАР и ТФАР согласно предложенному методу.

Заключение

1. Проведено численное моделирование определения указанных излучателей ТФАР при решении задачи калибровки. По результатам моделирования проведено сравнение нормированных амплитуд ТФАР и КФАР, полученных на основе предложенного подхода с учетом исключения влияния ЗР [13].
2. Предложенный подход решения задачи калибровки ТФАР, реализован на основе дополнительных измерений КФАР и ТФАР с равномерным распределением амплитуд на апертуре антенн и последующей совместной обработке данных полей излучения указанных ФАР, регистрируемых в БЗ. Такой подход позволяет

уменьшить влияние характеристик ЗР, что обеспечивает с высокой точностью определение амплитуды и фазы излучателей ТФАР

3. Результаты определения амплитуд ТФАР приведены с учетом погрешностей по фазе и амплитуде ЗР для двух значений дополняющей фазы $\Delta_{Bs} = \{\pi; 0,75\pi; \}$ при наличии ошибок ЗР по фазе Δ_{3P}^B и амплитуде Δ_{3P}^a , но при значении фазы $\Delta_{Bs} = 0,75\pi$ взаимное влияние соседних излучателей при дополнительных измерениях будет меньшим, чем при значении равно $\Delta_{Bs} = \pi$, особенно для равномерного распределения амплитуд для линейной ФАР.

Список источников

1. Сколник М. Справочник по радиолокации (в 2-х кн.). Пер. с англ. и ред. В.С. Вербы. – М.: Техносфера, 2014. Кн. 1 – 671 с.: Кн. 2 – 680 с.
2. Расторгуев В.В., Нуждин В.М., Коновальцев А.В., Ананенков А.Е., Марин Д.В. К вопросу о расширении возможностей использования бортовых радиолокационных систем // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74827>
3. Глушков А.Н., Моисеев С.Н., Испулов А.А., Филиппов А.В., Николаев С.В. Способ оценки точности юстировки бортовых локационных систем воздушных судов // Труды МАИ. 2022. № 127. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=170346>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-16)
4. Kurganov V.V., Djigan V.I. Permutation of Phase Shifter Control Codes to Increase Efficiency of Antenna Array Calibration // 2020 IEEE Conference of Russian Young

Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus), IEEE, 2020. DOI: [10.1109/eiconrus49466.2020.90](https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.90)

5. Djigan V.I., Kurganov V.V. Antenna Array Calibration Algorithm without Access to Channel Signals // Radioelectronics and Communications Systems, 2020, vol. 63 (1), pp. 1–14. DOI: [10.3103/s073527272001001x](https://doi.org/10.3103/s073527272001001x)

6. Kuznetsov G.Y., Miloserdov M.S., Temchenko V.S., Kovalenko A.I., Vnotchenko S.L., Riman V.V. Antenna beam broadening optimization in space-borne SAR with AESA // International Conference on Radar Systems, Radar – 2017. DOI: [10.1049/cp.2017.0489](https://doi.org/10.1049/cp.2017.0489)

7. Cheng-Nan Hu. A Novel Method for Calibrating Deployed Active Antenna Arrays
Replace this line with your paper identification Number // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1650-1657. DOI: [10.1109/TAP.2015.2398119](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2398119)

8. Gupta I.J., Baxter J.R., Ellingson S.W., Hyung-Geun Park, Hyun Seo Oh, Mun Geon Kyeong. An experimental study of antenna array calibration // IEEE Transactions on antennas and propagation, 2003, vol. 51, no. 3, pp. 664-667. DOI: [10.1109/tap.2003.809870](https://doi.org/10.1109/tap.2003.809870)

9. Tengbo C., Lu Z., Hailong D. An amplitude-phase measurement method of phased array antenna based on self-calibration RF channel // 10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), 2018. DOI: [10.1109/iccsn.2018.8488296](https://doi.org/10.1109/iccsn.2018.8488296)

10. Salas-Natera M.A., Rodríguez-Osorio R. M., L de Haro. Procedure for Measurement, Characterization and Calibration of Active Antenna Arrays // IEEE Transactions on

- instrumentation and measurement, 2013, vol. 62, no. 2, pp. 377-391. DOI: [10.1109/TIM.2012.2217662](https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2217662)
11. Bucci O.M., Migliore M.D., Panariello G. Accurate diagnosis of conformal arrays from near-field data using the matrix method // IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 2005, vol. 53, no. 3, pp. 1114-1120. DOI: [10.1109/tap.2004.842656](https://doi.org/10.1109/tap.2004.842656)
12. Cheng-Nan Hu, Alfred Tsai, Philip Lo. The Genetic Algorithm for 5G MIMO Auto-calibration // Photonics and Electromagnetics Research Symposium, Xiamen, China, 2019. DOI: [10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021532](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021532)
13. Shipley C., Woods D. Mutual coupling-based calibration of phased array antennas // Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology, 2000. DOI: [10.1109/past.2000.8590125](https://doi.org/10.1109/past.2000.8590125)
14. Ciattaglia M. A technique for on site calibration of active phased arrays using two probes // 2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST), 11-14 October 2022. DOI: [10.1109/PAST49659.2022.9975010](https://doi.org/10.1109/PAST49659.2022.9975010)
15. Закиров Р.Г. Оптимизация алгоритмов диагностики состояния бортового радиоэлектронного оборудования // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53665>
16. Liu H., Zhao L., Li Y., Jing X., Truong T.-K. A Sparse-Based Approach for DOA Estimation and Array Calibration in Uniform Linear Array // Sensors Journal, 2016, vol. 16, no. 15, pp. 6018–6027. DOI: [10.1109/jsen.2016.2577712](https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2577712)
17. Schuss J., Sikina T, Hilliard J., Makridakis P., Upton J., Yeh J. Large Scale Phased Array Calibration // 2016 IEEE International Symposium on Phased Array

Systems and Technology (PAST), 18-21 October 2016, Waltham. DOI: [10.1109/PAST43306.2019.9020941](https://doi.org/10.1109/PAST43306.2019.9020941)

18. Ruoxin Li, Jianbo Zhang, Chengguo Li, Yan Li, Buning Tian. An accurate mid-field calibration technique for large phased array antenna // 2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), 16-19 October 2017. DOI: [10.1109/APCAP.2017.8420685](https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420685)

19. Гиголо А.И., Стакозов А.О., Темченко В.С. Способ калибровки фазированной антенной решетки. Патент на изобретения RU 2797790 С1, 08.06.2023, Бюлл. № 16.

20. Гиголо А.И., Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Новый метод калибровки фазированной антенной решетки на основе данных измерения поля в ближней зоне // Антенны. 2022. № 4. С. 33-45. DOI: [10.18127/j03209601-202204-04](https://doi.org/10.18127/j03209601-202204-04)

21. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Радиолокационные системы специального и гражданского назначения 2015-2017: монография / Под ред. Ю.И. Белого. – М.: Радиотехника, 2016. С. 578–593.

22. Гринев А.Ю., Волков А.П., Мосейчук Г.Ф., Синани А.И. Полосно-заграждающие частотно-селективные структуры для контроля диаграммы обратного рассеяния линейной АФАР L-диапазона // Антенны. 2016. № 10. С. 60-70.

23. Коротецкий Е.В., Шитиков А.М., Денисенко В.В. Методы калибровки фазированных антенных решеток // Радиотехника. 2013. № 5. С. 95-103.

24. Шитиков А.М. Сравнение методов обработки сигнала при калибровке цифровых приемных ФАР // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 4. С. 40-46.

25. Orlov D.V., Kuznetsov G.Y., Miloserdov M.S., Temchenko V.S., Gigolo A.I., Kovalenko A.I. Main features of digital phased array antenna measurement in the receiving mode // Conference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves. DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792775](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792775)
26. Ильин Е.В., Милосердов М.С, Темченко В.С. Печатная логопериодическая фазированная антенная решетка L-диапазона, размещенная в ограниченном объеме // Антенны. 2013. № 3. С. 14-21.
27. Migliore M.D. A Compressed Sensing Approach for Array Diagnosis From a Small Set of Near-Field Measurements // Transactions on Antennas and Propagation, 2011, vol. 59, no. 6, pp. 2127-2133. DOI: [10.1109/TAP.2011.2144556](https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2144556)
28. Kuznetsov, G.Y., Miloserdov, M.S., Gigolo A.I. Temchenko V.S. A New Approach to Antenna Array Calibration Using Compressive Sensing // Conference: 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021. DOI: [10.1109/RSEMW52378.2021.9494143](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494143)
29. Карасев М.С., Далингер А.Г., Шацкий С.В., Щеголев С.А., Адиатулин А.В. Приемо-передающий модуль АФАР X-диапазона с внутренней калибровкой приемника и функцией проверки приемного и передающего каналов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. С. 156–158.
30. Kuwahara Y. Phased array antenna with temperature compensating capability // Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology, 1996. DOI: [10.1109/past.1996.565885](https://doi.org/10.1109/past.1996.565885)

31. Long R., Ouyang J., Yang F., Han W., Zhou L. Fast Amplitude-Only Measurement Method for Phased Array Calibration // *Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 65, no. 4, pp. 1815–1822. DOI: [10.1109/tap.2016.2629467](https://doi.org/10.1109/tap.2016.2629467)
32. Kaan T., Murat S.A., Kemal Y. Consideration of environmental and functional factors in calibration of antenna integrated active phased array transmitters // *International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 18-21 October 2016, Waltham. DOI: [10.1109/ARRAY.2016.7832558](https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832558)

References

1. Skolnik M.I., ed. *Radar handbook*, N.Y.: McGraw-Hill Education Publ., 2008, 1328 p.
2. Rastorguev V.V., Nuzhdin V.M., Konoval'tsev A.V., Ananenkov A.E., Marin D.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74827>
3. Glushkov A.N., Moiseev S.N., Ispulov A.A., Filippov A.V., Nikolaev S.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 127. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=170346>. DOI: [10.34759/trd-2022-127-16](https://doi.org/10.34759/trd-2022-127-16)
4. Kurganov V.V., Djigan V.I. Permutation of Phase Shifter Control Codes to Increase Efficiency of Antenna Array Calibration, *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)*, IEEE, 2020. DOI: [10.1109/eiconrus49466.2020.90](https://doi.org/10.1109/eiconrus49466.2020.90)
5. Djigan V.I., Kurganov V.V. Antenna Array Calibration Algorithm without Access to Channel Signals, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2020, vol. 63 (1), pp. 1–14. DOI: [10.3103/s073527272001001x](https://doi.org/10.3103/s073527272001001x)

6. Kuznetsov G.Y., Miloserdov M.S., Temchenko V.S., Kovalenko A.I., Vnotchenko S.L., Riman V.V. Antenna beam broadening optimization in space-borne SAR with AESA, *International Conference on Radar Systems, Radar – 2017*. DOI: [10.1049/cp.2017.0489](https://doi.org/10.1049/cp.2017.0489)
7. Cheng-Nan Hu. A Novel Method for Calibrating Deployed Active Antenna Arrays
Replace this line with your paper identification Number, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1650-1657. DOI: [10.1109/TAP.2015.2398119](https://doi.org/10.1109/TAP.2015.2398119)
8. Gupta I.J., Baxter J.R., Ellingson S.W., Hyung-Geun Park, Hyun Seo Oh, Mun Geon Kyeong. An experimental study of antenna array calibration, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2003, vol. 51, no. 3, pp. 664-667. DOI: [10.1109/tap.2003.809870](https://doi.org/10.1109/tap.2003.809870)
9. Tengbo C., Lu Z., Hailong D. An amplitude-phase measurement method of phased array antenna based on self-calibration RF channel, *10th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN)*, 2018. DOI: [10.1109/iccsn.2018.8488296](https://doi.org/10.1109/iccsn.2018.8488296)
10. Salas-Natera M.A., Rodríguez-Osorio R.M., L de Haro. Procedure for Measurement, Characterization and Calibration of Active Antenna Arrays, *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, 2013, vol. 62, no. 2, pp. 377-391. DOI: [10.1109/TIM.2012.2217662](https://doi.org/10.1109/TIM.2012.2217662)
11. Bucci O.M., Migliore M.D., Panariello G. Accurate diagnosis of conformal arrays from near-field data using the matrix method, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2005, vol. 53, no. 3, pp. 1114-1120. DOI: [10.1109/tap.2004.842656](https://doi.org/10.1109/tap.2004.842656)

12. Cheng-Nan Hu, Alfred Tsai, Philip Lo. The Genetic Algorithm for 5G MIMO Auto-calibration, *Photonics and Electromagnetics Research Symposium*, Xiamen, China, 2019. DOI: [10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021532](https://doi.org/10.1109/PIERS-Fall48861.2019.9021532)
13. Shipley C., Woods D. Mutual coupling-based calibration of phased array antennas, *Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*, 2000. DOI: [10.1109/past.2000.8590125](https://doi.org/10.1109/past.2000.8590125)
14. Ciattaglia M. A technique for on site calibration of active phased arrays using two probes, *2022 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 11-14 October 2022. DOI: [10.1109/PAST49659.2022.9975010](https://doi.org/10.1109/PAST49659.2022.9975010)
15. Zakirov R.G. Trudy MAI. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53665>
16. Liu H., Zhao L., Li Y., Jing X., Truong T.-K. A Sparse-Based Approach for DOA Estimation and Array Calibration in Uniform Linear Array, *Sensors Journal*, 2016, vol. 16, no. 15, pp. 6018–6027. DOI: [10.1109/jsen.2016.2577712](https://doi.org/10.1109/jsen.2016.2577712)
17. Schuss J., Sikina T, Hilliard J., Makridakis R., Upton J., Yeh J. Large Scale Phased Array Calibration, *2016 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 18-21 October 2016, Waltham. DOI: [10.1109/PAST43306.2019.9020941](https://doi.org/10.1109/PAST43306.2019.9020941)
18. Ruoxin Li, Jianbo Zhang, Chengguo Li, Yan Li, Buning Tian. An accurate mid-field calibration technique for large phased array antenna, *2017 Sixth Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 16-19 October 2017. DOI: [10.1109/APCAP.2017.8420685](https://doi.org/10.1109/APCAP.2017.8420685)

19. Gigolo A.I., Stakozov A.O., Temchenko V.S. *Patent na izobreteniya RU 2797790 C1*, 08.06.2023, Byull. no. 16.
20. Gigolo A.I., Kuznetsov G.Yu., Temchenko V.S. *Antenny*, 2022, no. 4, pp. 33-45. DOI: [10.18127/j03209601-202204-04](https://doi.org/10.18127/j03209601-202204-04)
21. Kuznetsov G.Yu., Temchenko V.S. *Radiolokatsionnye sistemy spetsial'nogo i grazhdanskogo naznacheniya 2015-2017* (Radar-tracking systems of special and civil appointment 2015-2017), Moscow, Radiotekhnika, 2016, pp. 578–593.
22. Grinev A.Yu., Volkov A.P., Moseichuk G.F., Sinani A.I. *Antenny*, 2016, no. 10, pp. 60-70.
23. Korotetskii E.V., Shitikov A.M., Denisenko V.V. *Radiotekhnika*, 2013, no. 5, pp. 95-103.
24. Shitikov A.M. *Radiotekhnika*, 2019, vol. 83, no. 4, pp. 40-46.
25. Orlov D.V., Kuznetsov G.Y., Miloserdov M.S., Temchenko V.S., Gigolo A.I., Kovalenko A.I. Main features of digital phased array antenna measurement in the receiving mode, *Sonference Proceedings - 2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves*. DOI: [10.1109/RSEMW.2019.8792775](https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792775)
26. Il'in E.V., Miloserdov M.S., Temchenko V.S. *Antenny*, 2013, no. 3, pp. 14-21.
27. Migliore M.D. A Compressed Sensing Approach for Array Diagnosis From a Small Set of Near-Field Measurements, *Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, vol. 59, no. 6, pp. 2127-2133. DOI: [10.1109/TAP.2011.2144556](https://doi.org/10.1109/TAP.2011.2144556)
28. Kuznetsov, G.Y., Miloserdov, M.S., Gigolo A.I. Temchenko V.S. A New Approach to Antenna Array Calibration Using Compressive Sensing, *Conference: 2021 Radiation and*

Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2021. DOI:
[10.1109/RSEMW52378.2021.9494143](https://doi.org/10.1109/RSEMW52378.2021.9494143)

29. Karasev M.S., Dalinger A.G., Shatskii S.V., Shchegolev S.A., Adiatulin A.V. *Elektronika i mikroelektronika SVCh*, 2019, vol. 1, pp. 156–158.

30. Kuwahara Y. Phased array antenna with temperature compensating capability, *Proceedings of International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, 1996. DOI: [10.1109/past.1996.565885](https://doi.org/10.1109/past.1996.565885)

31. Long R., Ouyang J., Yang F., Han W., Zhou L. Fast Amplitude-Only Measurement Method for Phased Array Calibration, *Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, vol. 65, no. 4, pp. 1815–1822. DOI: [10.1109/tap.2016.2629467](https://doi.org/10.1109/tap.2016.2629467)

32. Kaan T., Murat S.A., Kemal Y. Consideration of environmental and functional factors in calibration of antenna integrated active phased array transmitters, *International Symposium on Phased Array Systems and Technology (PAST)*, 18-21 October 2016, Waltham. DOI: [10.1109/ARRAY.2016.7832558](https://doi.org/10.1109/ARRAY.2016.7832558)

Статья поступила в редакцию 12.07.2024

Одобрена после рецензирования 19.07.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 12.07.2024; approved after reviewing on 19.07.2024; accepted for publication on 25.10.2024