

На правах рукописи



Павлов Иван Дмитриевич

**ВЛИЯНИЕ НЕИДЕНТИЧНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК СПИРАЛЬНЫХ
АНТЕНН МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ОШИБКИ
ПЕЛЕНГАЦИИ ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ**

Специальность 2.2.14 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Омск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет», (ОмГТУ) и в акционерном обществе «Центральное конструкторское бюро автоматики», (АО «ЦКБА»)

Научный руководитель: **Козлов Александр Геннадьевич,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиотехнических устройств и систем диагностики ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Овчинникова Елена Викторовна,**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиофизики, антенн и микроволновой техники ФГБОУ ВО «Московский Авиационный институт (национальный исследовательский университет)»;

Гафаров Евгений Раисович,
кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Защита диссертации состоится «24» июня 2025 г. В 09 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.01, созданного на базе ФГАОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники <https://postgraduate.tusur.ru/urls/yqoi7gix>

Автореферат разослан «___» мая 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.415.01
доктор физико-математических наук, профессор



А.Е. Мандель

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Пассивные пеленгационные системы применяются во многих важных областях, к примеру, в радионавигации и радиомониторинге. Среди указанных систем широкий спектр представляют системы, реализующие фазовый метод. Существенным достоинством фазовых пеленгационных систем является возможность обеспечения высокой точности пеленгации в заданном угловом секторе. Одной из основных причин, ухудшающих качество работы любой пеленгационной системы, в том числе и фазовой, являются ошибки пеленгации. Исходя из этого исследование ошибок пеленгации и разработка способов их уменьшения являются актуальными задачами, решение которых позволит улучшить качество работы этой системы. Любая фазовая пеленгационная система содержит как минимум два приемных канала. Приемный канал может иметь различные конфигурации, но его неотъемлемой частью является антенна. Каждый из составных элементов приемного канала вносит свой вклад в его отличие от других каналов в рамках одной системы, антенна в данном случае не исключение. Взаимное отличие приемных каналов приводит к ошибкам пеленгации. Исходя из этого можно отметить, что исследование влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом является актуальной задачей, поскольку по результатам такого исследования будет возможно разработать способ, позволяющий уменьшить указанное влияние и, следовательно, улучшить качество работы всей фазовой пеленгационной системы. Кроме того, к актуальным задачам можно отнести разработку и улучшение конструкции антенн, применяемых в составе фазовых пеленгационных систем. Указанные улучшения конструкции должны быть направлены на снижения влияния антенн на ошибки пеленгации.

Степень проработанности темы. Пассивные системы радиомониторинга, реализующие фазовый метод пеленгации, известны с 50-х годов прошлого века. Развитие компонентной базы и вычислительной техники позволило расширить частотные диапазоны подобных систем и улучшить качество их работы. Расширение частотных диапазонов, а также ужесточение требований к качеству работы потребовало проведения соответствующих исследований как в части приема и обработки сигналов, так и в части организации антенных систем. Поскольку в настоящей работе рассматривается влияние антенн, то остановимся только на работах, освещающих этот вопрос. В работах Денисова В.П., Дубинина Д.В, Виноградова А.Д., Уфаева В.А., Mingjian Li рассматриваются вопросы организации антенных систем фазовых пеленгаторов (форма, количество антенных элементов, их взаимное расположение). Также оценивается влияние антенных систем на ошибки и точность фазовых пеленгаторов. Вместе с тем в указанных работах не рассматривается влияние именно антенн, более того в большинстве работ антенны рассматриваются как условные точки (фазовые центры) безотносительно их свойств. Такой

подход удобен при отработке типов антенных систем, однако на практике необходимо учитывать характеристики каждой антенны в отдельности. Так, в монографии Денисова В.П., Дубинина Д.В. отмечается, что причиной ошибок пеленгации, в том числе, является неидентичность приемных каналов, в которые входят и антенны. Из этого следует, что антенны как часть приемного канала могут вызывать ошибки пеленгации. Но в явном виде ни в одной из вышеприведенных работ влияние антенн на ошибки пеленгации не рассматривается, что делает исследование этого вопроса актуальным.

В работах Денисова В.П., Дубинина Д.В., Виноградова А.Д., Mingjian Li рассматриваются или системы, исследуемые на практике, или моделирование систем с указанием типа антенн. Несмотря на это отдельный вклад антенн в ошибки пеленгации авторами также не выделяется. Кроме того, работы, опубликованные указанными авторами, описывают пеленгационные системы в основном сантиметрового диапазона длин волн. Исходя из этого можно отметить, что вопрос влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом в миллиметровом диапазоне длин волн освещен недостаточно.

Еще один аспект, который необходимо упомянуть, это модель, описывающая антенну, с помощью которой возможно будет оценивать ее влияние на работу фазовой пеленгационной системы. В качестве такой модели можно предложить, например, матричную, поскольку в рамках указанной модели антенна рассматривается, как преобразователь электромагнитной волны свободного пространства в электромагнитную волну в линии передачи, характеризуемый матрицей рассеяния. Это позволяет объединить в рамках одной модели как характеристики согласования, так и характеристики излучения. Наиболее полно указанная модель освещена в работах автора Everett G. Farr. Но в указанных работах не освещен вопрос применения предлагаемой модели. В этой связи применение матричной модели для исследования влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом является актуальной задачей.

Цель работы: Уменьшение ошибок пеленгации фазовым методом, возникающих по причине неидентичности характеристик спиральных антенн миллиметрового диапазона и их конструктивного исполнения.

Для достижения поставленной цели были определены следующие **задачи:**

1. Рассмотреть существующие модели антенн, выбрать наиболее подходящую для исследования влияния антенны на ошибки пеленгации фазовым методом.
2. Доработать выбранную модель антенны с целью ее практического применения для исследования влияния антенны на ошибки пеленгации фазовым методом.
3. Разработать антенну миллиметрового диапазона, подходящую для применения в составе фазового пеленгатора.

4. Используя разработанную модель, исследовать влияние разработанной антенны на ошибки пеленгации фазовым методом.

5. Основываясь на результатах проведенного исследования, предложить способ настройки антенной системы фазового пеленгатора, позволяющий уменьшить ошибки пеленгации.

Научная новизна

1. Разработан способ сравнения параметров однотипных спиральных антенн, предусматривающий сравнение соответствующих им наборов матриц. Указанные матрицы формируются из комплексного коэффициента отражения, пространственных отсчетов коэффициента усиления и отсчетов фазовых диаграмм направленности для двух ортогональных поляризации. Для определения количественной разницы между сравниваемыми антеннами использована абсолютная разность L норм соответствующих им матриц.

2. Предложен способ формирования антенной системы фазового пеленгатора. Указанный способ предполагает подбор антенн по принципу наименьшей абсолютной разности L норм соответствующих им матриц рассеяния. Применение указанного способа в рассматриваемом случае позволяет снизить максимальный уровень ошибок пеленгации с 1° до $0,75^\circ$ (при максимально допустимом значении $0,8^\circ$).

3. Установлено, что размещение плоского спирального излучателя на одном уровне с краем проводящего корпуса (допустимая просадка платы в рассмотренном случае не более $0,3$ мм), позволяет уменьшить ширину пространственного диапазона изменения положения фазового центра (в рассмотренном случае с $4,3$ мм до $3,7$ мм) и максимальный уровень ошибок пеленгации по сравнению со случаем установки излучателя внутрь корпуса (на $0,8$ мм ниже края в рассмотренном случае). Снижение максимального уровня ошибок пеленгации составило $0,3^\circ$ с 1° до $0,7^\circ$ (при максимально допустимом значении $0,8^\circ$).

Практическая значимость работы

1. Применена на практике матричная модель антенны. С использованием указанной модели исследовано влияния антенны миллиметрового диапазона на ошибки пеленгации фазовым методом.

2. Предложена конструкция широкополосной малогабаритной спиральной антенны миллиметрового диапазона длин волн (получен патент РФ). Конструкция антенны отработывалась для применения в составе блока фазового пеленгатора пассивной системы радиомониторинга. В результате антенна используется в указанном блоке.

3. Предложенный способ сравнения параметров однотипных спиральных антенн является основой для создания технологии формирования антенных систем фазовых пеленгаторов.

Методы исследования

Для решения поставленных задач применялись общие положения электродинамики, теории антенн и матричной алгебры.

Электродинамическое моделирование осуществлялось в программной среде ANSYS HFSS методом конечных элементов.

Практические значения характеристик согласования были получены с помощью векторного анализатора цепей. Экспериментальные значения характеристик излучения были получены путем измерений в дальней зоне в безэховой камере АО «Центральное конструкторское бюро автоматики». Коэффициент усиления измерялся методом трех антенн. Сечения фазовых диаграмм направленности были получены с помощью измерительного комплекса фирмы «Трим» «ТМСА40Д17».

Положения, выносимые на защиту

1. Ошибки пеленгации фазовым методом, возникающие из-за неидентичности параметров спиральных антенн, могут быть минимизированы путем подбора антенн, для которых абсолютная разность L норм соответствующих им матриц рассеяния имеет минимальное значение.

2. Установка плоского спирального излучателя на одном уровне с краем цилиндрического проводящего корпуса (допустимая просадка внутрь корпуса не более 0,3 мм) позволяет уменьшить ошибки пеленгации фазовым методом по сравнению со случаем, когда излучатель установлен внутрь корпуса (на 0,8 мм ниже края в рассмотренном случае). Снижение максимального уровня ошибок пеленгации составило $0,3^\circ$ с 1° до $0,7^\circ$.

3. Формирование антенной системы фазового пеленгатора путем подбора антенн по принципу наименьшей абсолютной разности L норм соответствующих им матриц рассеяния позволило снизить максимальный уровень ошибок пеленгации с 1° до $0,75^\circ$ (при максимально допустимом значении $0,8^\circ$).

Степень достоверности результатов

Достоверность приведенных положений основана на соответствии результатов электродинамического моделирования, выполненного для антенны и системы, построенной на ее основе, и практических экспериментов, выполненных с указанной антенной и блоком фазового пеленгатора.

Внедрение результатов работы

Разработанная спиральная антенна миллиметрового диапазона длин волн используется при серийном производстве блоков фазового пеленгатора (акт об использовании антенны АО «ЦКБА»). Предложенный способ компоновки однотипных антенн по степени схожести

соответствующих им матриц рассеяния применяется при формировании антенных систем блоков фазовой пеленгации, серийно производимых АО «ЦКБА».

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. IX, X, XI, и XII – Всероссийская научно-технические конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», г. Санкт-Петербург, 2019, 2021, 2022, 2023;
2. Региональная молодежная научно-практическая конференция «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника» (НИР-21), г. Омск, 2021.
3. Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн», г. Санкт-Петербург, 2021;
4. Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2021;
5. IX Всероссийская научно-техническая конференция «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем» (СВЧ-2022), г. Омск, 2022.
6. Всероссийская научно-техническая конференция «Антенны и распространение радиоволн», г. Санкт-Петербург, 2023;

Публикации

Основные теоретические и практические результаты диссертации опубликованы в 15 работах, из которых: 4 – статьи в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК, 10 – публикации в сборниках всероссийских и международных конференций, 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора

Все работы, связанные с исследованием влияния антенны на ошибки пеленгации фазовым методом, а также с формированием и применением матричной модели антенны для указанного исследования предложены и выполнены автором самостоятельно. Разработка исходной конструкции малогабаритной спиральной антенны миллиметрового диапазона выполнена в соавторстве с коллегами из АО «Центральное конструкторское бюро автоматики». Доработка конструкции указанной антенны в части способа установки излучателя в корпус выполнена автором самостоятельно.

Структура и объем диссертации

Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и приложения. Общий объем диссертации 154 страницы, включая 41 рисунок, 9 таблиц, список цитируемых источников из 168 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы диссертационной работы, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы научная новизна, положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы. Также приведена информация о внедрении и апробации результатов работы.

В первом разделе рассматриваются типы моделей антенн, среди которых модели, построенные на основе эквивалентной схемы, матричные модели и модели, описывающие антенну с помощью аналитических выражений. Среди указанных типов необходимо определить наиболее подходящий для исследования влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом. Модель, применяемая для такого исследования, должна учитывать как характеристики согласования, так и пространственные зависимости характеристик излучения. Кроме того, она должна быть применима для антенн различных типов.

Проведенный обзор источников показал, что из трех основных типов моделей наиболее применимой для исследования влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом является матричная. Поскольку она в отличие от двух других типов моделей позволяет учитывать и характеристики согласования, и пространственные зависимости характеристик излучения, кроме того, обладает достаточно широкой применимостью. Основным результатом раздела является обоснование применения матричной модели антенны для исследования влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом.

Во втором разделе вводится матрица рассеяния антенны. Указанная матрица имеет ряд особенностей, отличающих ее от матриц рассеяния СВЧ устройств, для которых процесс излучения не является основным. Указанные особенности состоят в следующем:

- в силу отсутствия у антенны явно заданного второго разъема для определения комплексного коэффициента передачи вводится пространственная отсчетная плоскость;
- одному направлению должны соответствовать две пространственные отсчетные плоскости, это нужно для того, чтобы была возможность описывать произвольно поляризованную электромагнитную волну (раскладывая вектор напряженности на ортогональные составляющие);
- поскольку характеристикам излучения антенны свойственна пространственная зависимость, то для исчерпывающего описания антенны потребуется набор пространственных отсчетных плоскостей и соответствующих им матриц.

Проиллюстрировать указанные особенности можно с помощью рисунка 1.

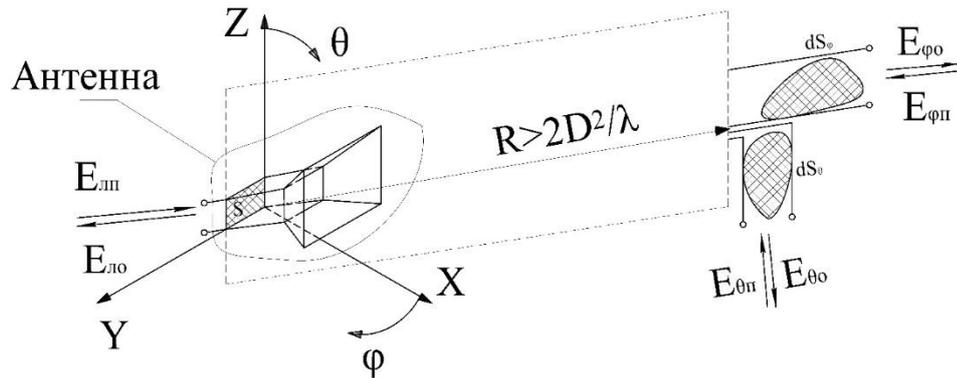


Рисунок 1 – К пояснению применения аппарата матриц рассеяния для описания антенн

На рисунке 1 схематично отмечены пространственные отсчетные плоскости, а также отсчетная плоскость, размещенная в разьеме антенны. С учетом того, что одному пространственному направлению соответствуют две отсчетных плоскости, формируемая матрица будет соответствовать шестиполусному (или трехпортовому) устройству. Также на рисунке 1 обозначены падающие и отраженные волны для каждой отсчетной плоскости. Важно еще раз отметить, что количество матриц, характеризующих одну антенну, будет равным количеству пространственных направлений, задающих отсчетные плоскости.

Далее приведен общий вид матрицы (1), характеризующий антенну для одного пространственного направления.

$$\begin{pmatrix} \dot{E}_{ло} \\ \dot{E}_{\theta o} \\ \dot{E}_{\phi o} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} & \dot{S}_{13} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} & \dot{S}_{23} \\ \dot{S}_{31} & \dot{S}_{32} & \dot{S}_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \dot{E}_{лн} \\ \dot{E}_{\theta n} \\ \dot{E}_{\phi n} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь $\dot{E}_{лн}$ характеризует падающую волну в линии передачи, а $\dot{E}_{ло}$ соответственно отраженную. $\dot{E}_{\theta n}$ и $\dot{E}_{\phi n}$ характеризуют падающую волну пространственных отсчетных плоскостей, определенных для одного направления в пространстве. $\dot{E}_{\theta o}$ и $\dot{E}_{\phi o}$ характеризуют отраженную волну этих пространственных отсчетных плоскостей.

Рассмотрим физический смысл коэффициентов, входящих в матрицу (1).

$$\dot{S}_{11} = \frac{\dot{E}_{ло}}{\dot{E}_{лн}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\phi n}=0} - \text{комплексный коэффициент отражения, определенный для}$$

отсчетной плоскости в разьеме антенны, связывает между собой падающую и отраженную волны, определяемые в отсчетной плоскости разьема антенны. Коэффициент является комплексным и может быть записан в показательной форме $K_o e^{i\Phi}$.

$\dot{S}_{21} = \frac{\dot{E}_{\theta o}}{\dot{E}_{\theta n}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\varphi n}=0}$ - комплексный коэффициент передачи, определенный между пространственной отсчетной плоскостью dS_{θ} и отсчетной плоскостью в разьеме антенны. Как и коэффициент отражения, его можно записать в показательной форме $K_{\Pi\theta} e^{i\Phi_{\theta}}$, где $K_{\Pi\theta}$ - модуль данного коэффициента, а Φ_{θ} - фазовый сдвиг, возникающий между падающей волной отсчетной плоскости разьема антенны и отраженной волной пространственной отсчетной плоскости. Практическое измерение коэффициента передачи затруднительно из-за необходимости разнесения блоков измерительного устройства (векторный анализатор) на расстояние дальней зоны. Указанное затруднение можно обойти, выразив модуль комплексного коэффициента передачи через характеристику антенны, для которой существуют отработанные методики измерения. Такой характеристикой является коэффициент усиления.

Удобство использования коэффициента усиления состоит в том, что для определения его значения существуют разработанные методики, кроме того, его значение в отличие от коэффициента передачи не зависит от расстояния r . По этим причинам в дальнейшей записи матриц, характеризующих антенну, вместо комплексного коэффициента передачи $K_{\Pi\theta} e^{i\Phi_{\theta}}$, будет записываться комплексное число вида $\sqrt{G_{\theta}} e^{i\Phi_{\theta}}$, где G_{θ} - коэффициент усиления антенны, а Φ_{θ} - фазовый сдвиг, возникающий между падающей волной отсчетной плоскости разьема антенны и отраженной волной пространственной отсчетной плоскости. Для практического определения значения коэффициента усиления использовался метод трех антенн. Определение значений фазового сдвига осуществлялось с помощью измерительного комплекса с опорным фазовым каналом. В настоящей работе использовался измерительный комплекс фирмы «Трим» «ТМСА40Д17». Стоит также отметить, что пространственная зависимость Φ_{θ} будет являться фазовой диаграммой направленности антенны.

$\dot{S}_{31} = \frac{\dot{E}_{\varphi o}}{\dot{E}_{\varphi n}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\varphi n}=0}$ - комплексный коэффициент передачи, определенный между пространственной отсчетной плоскостью dS_{φ} и отсчетной плоскостью в разьеме антенны. По физическому смыслу соответствует вышеописанному коэффициенту \dot{S}_{21} . Разница заключается в том, что \dot{S}_{31} определен для ортогональной пространственной отсчетной плоскости.

$$\dot{S}_{12} = \frac{\dot{E}_{\theta o}}{\dot{E}_{\theta n}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\varphi n}=0} - \text{комплексный коэффициент передачи между отсчетной}$$

плоскостью в разьеме антенны и пространственной отсчетной плоскостью dS_{θ} . В силу того, что антенна в общем случае является взаимным устройством, указанный коэффициент численно и по смыслу соответствует \dot{S}_{21} . Иначе говоря, равенство $\dot{S}_{12} = \dot{S}_{21}$ выполняется в силу принципа взаимности.

$$\dot{S}_{22} = \frac{\dot{E}_{\theta o}}{\dot{E}_{\theta n}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\varphi n}=0} - \text{комплексный коэффициент отражения, соответствующий}$$

пространственной отсчетной плоскости dS_{θ} . Указанный коэффициент устанавливает связь между падающей и отраженной волной пространственной отсчетной плоскости. Физический смысл указанного коэффициента состоит в том, чтобы характеризовать рассеяние антенной электромагнитной волны, падающей на нее с направления, для которого определена пространственная отсчетная плоскость. С помощью данного коэффициента можно характеризовать взаимное влияние антенн. Практическое определение указанного коэффициента возможно, но затруднительно в силу сложности и трудоемкости известных методик. В первом приближении взаимным влиянием антенн можно пренебречь, если они достаточно разнесены в пространстве, и применены иные способы уменьшить указанное влияние, например, радиопоглощающий материал. Такая ситуация имеет место в случае фазового пеленгатора, поскольку для обеспечения заданной точности длины фазометрических баз составляют несколько длин волн, а антенная платформа закрывается радиопоглощающим материалом. С учетом этого можно принять коэффициенты отражения пространственных отсчетных плоскостей равными нулю. Кроме того, указанное допущение позволит несколько упростить итоговый набор матриц антенны. Причины, рассмотренные в настоящем пункте справедливы и для \dot{S}_{33} .

$$\dot{S}_{32} = \frac{\dot{E}_{\varphi o}}{\dot{E}_{\theta n}} \Big|_{\dot{E}_{\theta n}=0, \dot{E}_{\varphi n}=0} - \text{комплексный коэффициент передачи между пространственными}$$

отсчетными плоскостями. Поскольку введение двух ортогональных пространственных отсчетных плоскостей, соответствующих одному направлению, является формальным приемом, позволяющим учесть поляризационные свойства антенны, то допустимо условиться, что между ними отсутствует взаимная передача мощности. Иначе говоря, отсутствует физический процесс, описываемый данным коэффициентом, это означает что комплексный коэффициент \dot{S}_{32} равен нулю.

$$\dot{S}_{13} = \frac{\dot{E}_{\text{ло}}}{\dot{E}_{\text{фн}}} \Big|_{\dot{E}_{\text{лн}}=0, \dot{E}_{\text{θн}}=0} - \text{комплексный коэффициент передачи между отсчетной}$$

плоскостью в разьеме антенны и пространственной отсчетной плоскостью dS_{φ} . Физический смысл и численное значение указанного коэффициента в силу принципа взаимности совпадает с \dot{S}_{31} . Отличается только направлением распространения мощности.

$$\dot{S}_{23} = \frac{\dot{E}_{\text{θо}}}{\dot{E}_{\text{фн}}} \Big|_{\dot{E}_{\text{лн}}=0, \dot{E}_{\text{θн}}=0} - \text{комплексный коэффициент передачи между пространственными}$$

отсчетными плоскостями, численно и по смыслу соответствующий \dot{S}_{32} .

$$\dot{S}_{33} = \frac{\dot{E}_{\text{фо}}}{\dot{E}_{\text{фн}}} \Big|_{\dot{E}_{\text{лн}}=0, \dot{E}_{\text{θн}}=0} - \text{комплексный коэффициент отражения, соответствующий}$$

пространственной отсчетной плоскости dS_{φ} . По своему физическому смыслу данный коэффициент аналогичен \dot{S}_{22} . Отличие состоит в том, данный коэффициент определяется отношением напряженностей падающей и отраженной волны, которые поляризованы ортогонально тем, что определяют \dot{S}_{22} .

С учетом физического смысла и способов получения практических значений коэффициентов матрица (1) примет вид (5)

$$\left(\begin{array}{ccc} K_o \cdot \frac{2 \cdot R \cdot \sqrt{Z}}{d \cdot \sqrt{60 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)} \cdot \pi} e^{i\Phi} & \sqrt{G_{\theta}} e^{i\Phi_{\theta}} & \sqrt{G_{\varphi}} e^{i\Phi_{\varphi}} \\ \sqrt{G_{\theta}} e^{i\Phi_{\theta}} & 0 & 0 \\ \sqrt{G_{\varphi}} e^{i\Phi_{\varphi}} & 0 & 0 \end{array} \right)_{(\theta, \varphi)} \quad (5)$$

Для нахождения L норм матриц вида (5) используется предварительная запись комплексных коэффициентов в матричной форме.

Для исследования влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом необходимо определить взаимную неидентичность антенн, входящих в приемные каналы. Для этого каждой из сравниваемых антенн можно поставить в соответствие набор матриц вида (5). Для сравнения матриц и соответствующих им антенн использована норма матрицы, в частности, одна из легко

вычисляемых норм – L норма, определяемая как максимальная из сумм, полученных путем сложения модулей элементов столбцов матрицы. Основными результатами второго раздела являются проработка способа формирования матриц рассеяния антенны и предложение использовать указанные матрицы для количественного определения взаимной неидентичности однотипных антенн.

В третьем разделе рассматривается разработка и исследование широкополосной антенны миллиметрового диапазона. Указанная антенна разрабатывалась для применения в составе фазового пеленгатора.

Результаты электродинамического моделирования и практических измерений с одним из серийных образцов антенны можно обобщить следующим образом:

- КСВН в требуемом диапазоне частот не более 1,8, при максимально допустимом 2,5;
- коэффициент эллиптичности в требуемом диапазоне частот не менее 0,64 при минимально допустимом 0,6;
- минимальное значение коэффициента усиления в требуемом диапазоне частот 2,4 дБи при минимально требуемом 0 дБи;
- наименьшее значение ширины диаграммы направленности по уровню половинной мощности в требуемом диапазоне частот 47° при требовании не менее 45° ;
- наибольшее значение уровня бокового излучения в процентах от максимального 14, при наибольшем допустимом 20.

Процесс разработки включал в себя выбор и обоснование типа излучающей структуры, разработку согласующего и симметрирующего устройства, а также отработку их совместного размещения в корпусе.

Общий вид сформированной электродинамической модели приведен на рисунке 2.

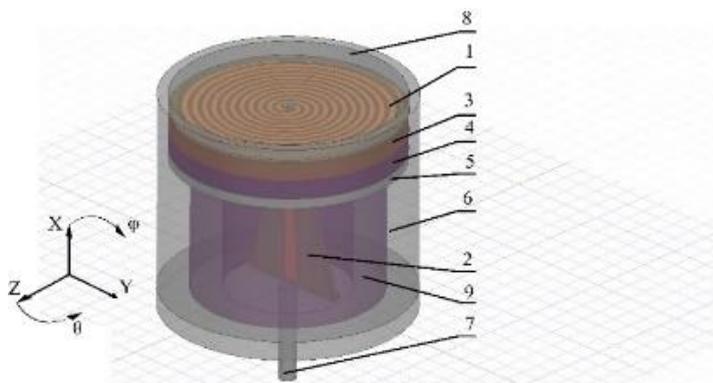


Рисунок 2 – Общий вид модели антенны: 1 – плата с излучающей структурой; 2 – плата согласующего и симметрирующего устройства; 3 – диэлектрическое основание платы с

излучающей структурой; 4 – радиопоглощающий материал; 5 – плоский проводящий экран; 6 – проводящий цилиндрический корпус антенны; 7 – коаксиальная линия; 8 – фторопластовая крышка (диск), 9 – радиопоглощающий материал

Результаты электродинамического моделирования антенны показали, что сформированная модель соответствует выдвинутым требованиям. Исходя из этого было принято решение об изготовлении макетного образца. Общий вид одного из серийных образцов показан рисунке 3.



Рисунок 3 – Общий вид серийного образца: а) без защитной крышки; б) с защитной крышкой

Результаты электродинамического моделирования и практических измерений с серийным образцом приведены далее на рисунках 4, 5.

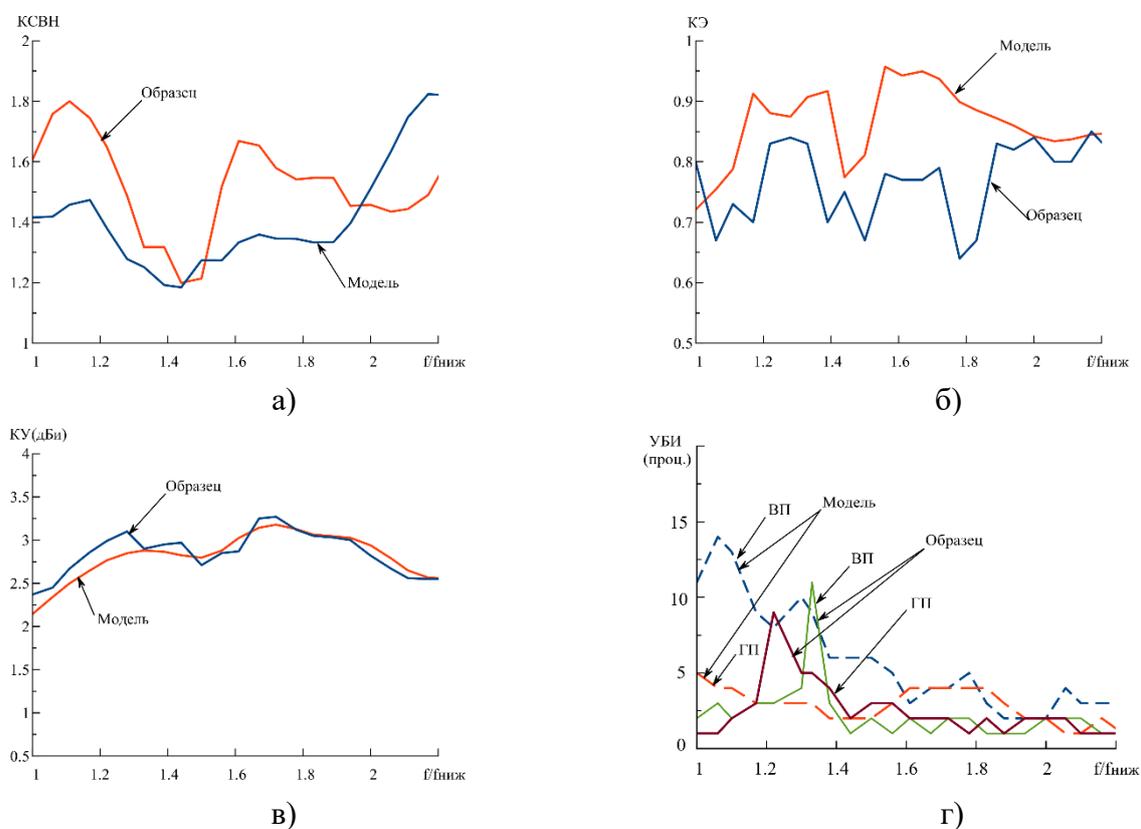


Рисунок 4 – Результаты электродинамического моделирования и практических измерений с серийным образцом: а) частотные зависимости КСВН серийной антенны и модели; б) частотные зависимости коэффициента эллиптичности серийной антенны и модели; в)

частотные зависимости коэффициента усиления серийной антенны и модели; г) частотные зависимости уровня бокового излучения серийной антенны и модели, полученные для вертикальной и горизонтальной поляризации

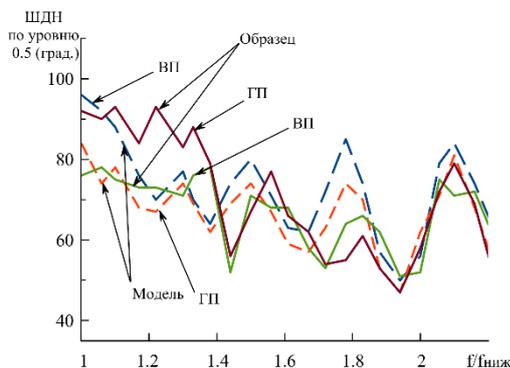


Рисунок 5 – Частотные зависимости ширины диаграмм направленности по уровню половинной мощности при вертикальной и горизонтальной поляризации для серийной антенны и модели

Приведенные результаты показывают, что разработанная антенна соответствует требованиям. Исходя из этого разработанная антенна была принята для серийного производства, кроме того, с ее применением было осуществлено исследование влияния антенн на ошибки пеленгации фазовым методом.

В четвертом разделе исследуется влияние спиральной антенны миллиметрового диапазона на ошибки пеленгации фазовым методом. Предлагается способ уменьшения указанного влияния, а также оптимизируется конструкция разработанной антенны в части способа установки излучателя в корпус.

Для исследования влияния антенны на ошибки пеленгации фазовым методом использована серия из четырех антенн, а также фазометрическая база блока фазового пеленгатора. Общий вид фазометрической базы и связанной системы координат приведены на рисунке 6.

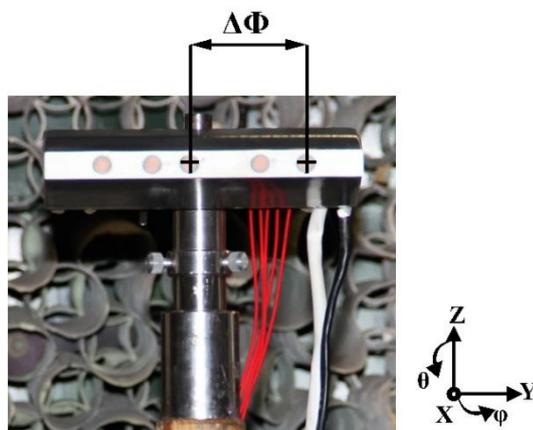


Рисунок 6 – Общий вид фазометрической базы и связанной системы координат

Для серии из четырех антенн (далее они обозначены номерами с 1 по 4) были определены наборы матриц рассеяния для следующих пространственных направлений: $\theta = 90^\circ, \varphi = -15^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = -10^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = -5^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = 5^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = 10^\circ$; $\theta = 90^\circ, \varphi = 15^\circ$ Для каждой из полученных матриц была определена L норма. Указанные нормы сведены в таблицу 1.

Таблица 1 L нормы антенн 1, 2, 3 и 4

$\varphi, ^\circ$	L норма антенна 1	L норма антенна 2	L норма антенна 3	L норма антенна 4
-15	59,3	60,7	66,3	54,2
-10	60,7	62,3	66,1	55,3
-5	60,9	62,4	67,3	55,5
0	61,2	62,8	67,4	56,4
5	61,1	63	67,5	56,2
10	60,4	61,7	66,7	55,1
15	59,5	61,3	65,7	55

L нормы, приведенные в таблице, характеризуют набор матриц для четырех рассматриваемых антенн. L нормы, соответствующие матрицам антенны 3, заметно отличаются от L норм, соответствующих матрицам других антенн. Для того, чтобы определить указанные отличия количественно, были найдены значения абсолютных разностей полученных L норм, указанные значения сведены в таблицу 2.

Таблица 2 Абсолютные разности L норм пар антенн 1-2 и 3-4

$\varphi, ^\circ$	L норма антенны 1 – L норма антенны 2	L норма антенны 3 – L норма антенны 4
-15	1,4	12,1
-10	1,6	10,8
-5	1,5	11,8
0	1,6	11
5	1,9	11,3
10	1,3	11,6
15	1,8	10,7

Приведенные в таблице 2 абсолютные разности L норм позволяют сгруппировать рассматриваемые антенны по две. Первая пара (антенны 1 и 2) характеризуется меньшей по сравнению со второй (антенны 3 и 4) абсолютной разностью L норм. Указанные абсолютные разности L норм позволяют количественно оценить неидентичность серийных антенн и сделать предположение о том, что применение в составе фазометрической базы пары антенн 3 и 4 приведет к повышению уровня ошибок пеленгации по сравнению со случаем использования пары антенн 1 и 2. Выдвинутое предположение было проверено в фазометрической базе, приведенной на рисунке 6 (длина указанной базы составляла $9,5\lambda$). В указанную базу по очереди устанавливались сформированные пары антенн. С каждой из установленных пар было определено направление на источник излучения и соответствующие ошибки пеленгации в секторе углов φ от минус 15° до 15° с шагом в один градус. Пространственные зависимости ошибок пеленгации для двух рассмотренных случаев приведены на рисунке 7. Зависимость с

квадратными маркерами соответствует случаю, когда в фазометрическую базу установлена пара антенн 1 и 2, зависимость с треугольными маркерами соответствует случаю, когда в фазометрическую базу установлена пара антенн 3 и 4.

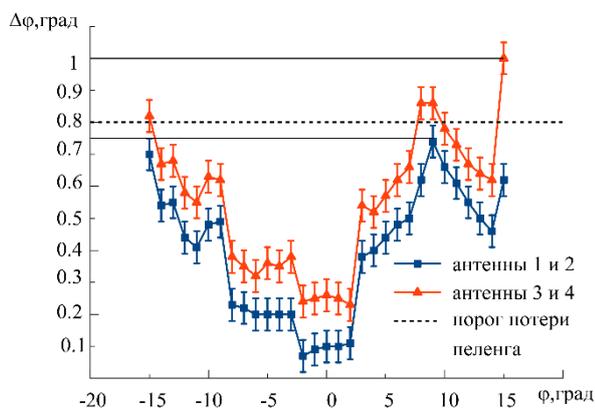


Рисунок 7 – Пространственные зависимости ошибок пеленгации, полученные при использовании двух рассматриваемых пар антенн

Приведенные на рисунке 7 пространственные зависимости ошибок пеленгации, полученные для пар антенн 1,2 и 3,4, отличаются. В большинстве точек рассматриваемого углового диапазона разница между уровнями ошибок для двух рассматриваемых случаев находится в промежутке значений от 0,05 до 0,1 градуса. На границах рассматриваемого углового диапазона ошибки пеленгации возрастают, наибольшая разница двух рассматриваемых случаев составляет 0,5 градуса при значении угла $\varphi = 15^\circ$. Полученные результаты позволяют сделать два основных вывода:

- первый вывод состоит в том, что рассмотренный эксперимент показывает на практике, как неидентичность антенн фазометрической базы пеленгатора приводит к повышению уровня ошибок пеленгации. Из этого также следует, что для улучшения качества работы всей пеленгационной системы необходимо добиваться наибольшей идентичности антенн в приемных каналах;

- ко второму выводу можно отнести то, что предлагаемый во втором разделе настоящей работы способ матриц рассеяния позволяет сравнивать серийные антенны между собой и комплектовать их друг с другом с целью уменьшения ошибок пеленгации.

Оптимизация конструкции разработанной антенны состояла в определении лучшего положения спирального излучателя в корпусе. Сравнимые положения схематично приведены на рисунке 8.

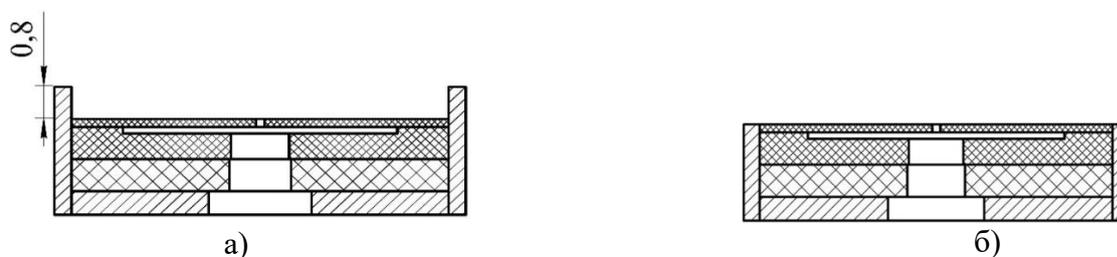


Рисунок 8 – Варианты установки платы излучателя: а) излучатель установлен внутрь корпуса антенны, б) излучатель установлен на одном уровне с краем корпуса

При первоначальной разработке антенны излучатель был помещен внутрь корпуса, поскольку такое расположение позволяет установить защитную крышку (рис. 2 поз.8), не выступающую за габариты корпуса. Электродинамическое моделирование и практические измерения, проведенные в третьем разделе, показали, что антенна с таким вариантом установки излучателя соответствует требованиям. Но вопрос влияния способа установки излучателя в корпус на работу пеленгатора не выяснялся. Для того, чтобы определить это, было проведено исследование, описанное в настоящем разделе.

Предварительная оценка наиболее подходящего способа установки излучателя в корпус антенны была выполнена с помощью электродинамического моделирования. В рамках указанного моделирования рассматривались варианты установки излучателя в корпус. Исходным был вариант, приведенный на рисунке 8а (возвышение края корпуса над плоскостью излучателя составляло 0,8 мм), в конечном варианте излучатель был размещен на одном уровне с краем корпуса. Все промежуточные варианты находились между исходным и конечным, с равным шагом в 0,1 мм. Всего было рассмотрено 9 вариантов. В качестве критерия для предварительной оценки был использован диапазон изменения пространственного положения фазового центра антенны в зависимости от частоты. Наилучшим вариантом считался тот, при котором диапазон изменения пространственного положения фазового центра в зависимости от частоты минимален. В результате проведенного электродинамического моделирования был определен наилучший вариант, который соответствует представленному на рисунке 3 б.

Исследование проводилось с двумя серийными антеннами, взятыми без предварительного подбора. С помощью фазометрической базы, в которую указанные антенны были установлены, было определено направление на источник излучения, а также ошибки пеленгации. После этого антенны были доработаны таким образом, что излучатель каждой из них оказался на одном уровне с краем корпуса (торец корпуса был проточен). Далее с использованием доработанных антенн была получена пространственная зависимость ошибок пеленгации. Зависимости, полученные до и после доработки, приведены на рисунке 9.

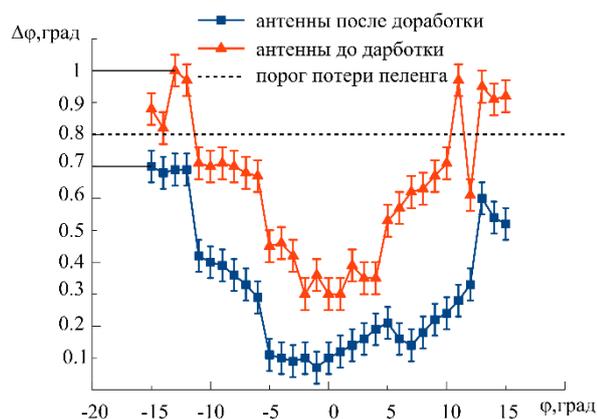


Рисунок 9 – Ошибки пеленгации, полученные до и после доработки антенн

Приведенные на рисунке зависимости отличаются во всем рассматриваемом угловом диапазоне углов. Уровень ошибок пеленгации, полученный с доработанными антеннами, меньше по сравнению со случаем, когда антенны не были доработаны. Исходя из полученных результатов конструкция антенны в части способа установки излучателя в корпус была изменена. Изменить также пришлось и защитную крышку: в новом варианте она не вставляется в корпус, а надевается на него, выходя за габариты. С учетом уменьшения ошибок пеленгации это представляется допустимым решением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решение поставленных задач позволило сформулировать основные результаты:

1. Рассмотрены существующие модели антенн, определены три основных:

- модели на основе эквивалентной схемы;
- матричные модели;
- модели, предполагающие формирование аналитического выражения.

Среди указанных моделей наиболее подходящей для достижения поставленной цели является матричная, поскольку она позволяет учитывать как характеристики согласования, так и характеристики излучения антенны.

2. Доработана матричная модель антенны. Ее практическое формирование предполагает измерение комплексного коэффициента отражения, а также пространственной зависимости коэффициента усиления антенны и фазовой диаграммы направленности. С использованием указанных характеристик формируется набор матриц, соответствующих антенне. Для каждой из серии антенн, планируемых к применению в составе фазового пеленгатора, формируется указанный набор матриц. Путем сравнения L норм матриц разных антенн определяются такие, у которых L нормы отличаются меньше всего.

3. Разработана антенна миллиметрового диапазона, исследованы ее характеристики, оптимизирована конструкция. Применение антенны с оптимизированной конструкцией позволяет в рассмотренном случае снизить ошибки пеленгации с 1° до $0,7^\circ$ при допустимом уровне ошибок в $0,8^\circ$.

4. Исследование, проведенное с разработанной антенной, показало, что неидентичность антенн в рамках одной фазометрической базы приводит к увеличению ошибок пеленгации. Применение матриц рассеяния позволило количественно определять неидентичность антенн.

5. Возможность количественно оценивать неидентичность антенн позволила предложить способ их подбора в антенную систему фазового пеленгатора по критерию наименьшей взаимной неидентичности. Предложенный способ подбора дает возможность формировать антенную систему пеленгатора, что позволяет снизить ошибки пеленгации. В рассмотренном случае максимальный уровень ошибок пеленгации был снижен с 1° до $0,75^\circ$ при допустимом уровне ошибок в $0,8^\circ$.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК

1. Павлов И.Д. Электродинамическое моделирование и расчет широкополосной малогабаритной антенны миллиметрового диапазона / И.Д. Павлов // Омский научный вестник. – 2017. – №5 (155). – С. 152-158.

2. Кот М.А. Определение влияния цепей управления полупроводниковыми элементами коммутации на высокочастотные цепи антенно-согласующих устройств / М.А. Кот, И. Д. Павлов // Техника радиосвязи. – 2019. – №3(42). – С. 44-51.

3. Павлов И.Д. Сверхширокополосная диэлектрическая стержневая антенна / И.Д. Павлов, Я.В. Караев, М.А. Кот // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2020. – №2. – С. 38-45.

4. Павлов И.Д. Исследование влияния антенных элементов миллиметрового диапазона на ошибки пеленгации фазовым методом / И.Д. Павлов // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2023. – №2. – С. 25-36.

Доклады в сборниках трудов региональных и Всероссийских конференций

5. Павлов И.Д. Широкополосная диэлектрическая стержневая антенна / И.Д. Павлов // Сборник докладов VIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2019. – С. 583-588.

6. Кот М.А. Исследование влияния цепей управления полупроводниковыми элементами коммутации на высокочастотные цепи антенно-согласующих устройств / М.А. Кот, И. Д. Павлов

// Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь». – 2019. – С. 157-162.

7. Павлов И.Д. Матричная модель антенно-фидерного устройства / И.Д. Павлов // Материалы региональной молодежной научно-практической конференции «Нанотехнологии. Информация. Радиотехника (НИР-21)». – 2021. – С. 30-34.

8. Павлов И.Д. Применение матричного подхода к описанию антенны для определения ее влияния на точность пеленгации фазовым методом / И.Д. Павлов // Сборник докладов X Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2021. – С. 135-139.

9. Павлов И.Д. Исследование влияния антенной платформы фазового пеленгатора на ошибки пеленгации / И.Д. Павлов // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн». – 2021. – С. 93-94.

10. Павлов И.Д. Исследование влияния антенных элементов на ошибки пеленгации фазовым методом / И.Д. Павлов // Материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – 2021. – С. 112-115.

11. Павлов И.Д. Электродинамическое моделирование влияния технологической неидентичности антенн на ошибки пеленгации фазовым методом / И.Д. Павлов // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Обмен опытом в области создания сверхширокополосных радиоэлектронных систем (СВЧ-2022)». – 2022. – С. 138-143.

12. Павлов И.Д. Оптимизация положения плоского спирального излучателя в корпусе антенны, применяемой в составе фазового пеленгатора / И.Д. Павлов // Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2022. – С. 287-291.

13. Павлов И.Д. Соосный коаксиально-волноводный переход миллиметрового диапазона / И.Д. Павлов, И.О. Прокаев // Сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – 2023. – С. 165-169.

14. Павлов И.Д. Исследование положения фазового центра спиральной антенны миллиметрового диапазона / И.Д. Павлов // Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции «Антенны и распространение радиоволн». – 2023. – С. 45-47.

Патенты

15. Спиральная антенна: пат. 2673319 Российская Федерация: МПК H01Q1/00/ Кохнюк Д.Д., Боровик И.А., Федоров Я.В., Павлов И.Д., Звягинцев И.Н., Волчонков В.В.; заявитель и патентообладатель АО «ЦКБА». – № 2018101611; заявл. 16.01.2018; опубл. 23.11.2018, Бюл. № 33 – 8 с.