

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию
Манаенкова Евгения Васильевича
на тему: Малобааритные фазированные антенные решетки Ka-диапазона
по специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии
на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Диссертационная работа посвящена исследованию характеристик фазированных антенных решеток (ФАР) проходного типа в суммарно-разностными характеристиками, конкретно решению задачи повышения точности пеленгования воздушных радиолокационных целей (далее – целей) РЛС с ФАР со сравнительно небольшим числом (порядка 200) элементов.

Тематика оценки точности моноимпульсного пеленгования РЛС с ФАР является в настоящее время актуальной, что подтверждается наличием недавних публикаций [1]. Данная тема особенно актуальна для РЛС с небольшой дальностью действия, в которых используются ФАР сравнительно небольших размеров, что при отсутствии специальных мер приводит к большой погрешности измерения угловых координат целей. Проходные ФАР имеют свои особенности, так что исследование точности пеленгации таких ФАР является актуальной технической задачей, имеющей важное техническое значение.

В первой главе приведено описание объекта исследования – проходной ФАР круговой поляризации Ka-диапазона длин волн на основе феррито-диэлектрических излучателей-фазовращателей на эффекте Фарадея, расположенных в круглой апертуре по треугольной сетке, возбуждаемой четырехэлементным облучателем с суммарно-разностным устройством, выполняющим одновременно функции поляризатора и разделителя сигналов приема и передачи. Описаны достоинства данного построения ФАР, реализованного с использованием большого числа оригинальных технических решений, защищенных патентами с участием автора данной диссертационной работы. В главе дан подробный анализ факторов, влияющих на точность установки лучей ФАР данного типа, а также их классификация. Показано каким образом минимизируется влияние факторов схемотехнической и алгоритмической природы и выделены в качестве объекта исследования электродинамические факторы, влияющие на точность установки лучей и ошибки пеленгования.

Вторая глава работы посвящена построению математических моделей для исследования характеристик ФАР рассматриваемого типа. Выведены формулы для расчета

Отдел документационного
обеспечения МАИ
05 04 20 21 г.

распределения поляризованных составляющих электромагнитного поля, создаваемого четырехэлементным облучателем круговой поляризации, на внутренней стороне проходной ФАР по известным диаграммам направленности его элементов и комплексным амплитудам их возбуждения; соотношения для их переноса на излучающую апертуру ФАР и расчета на их основе и известных диаграмм излучающих элементов диаграммы направленности ФАР с целю. Рассмотрены соотношения, описывающие поляризационную структуру электромагнитной волны, отраженной от цели, и выведены формулы для расчета амплитуд принятых волн на выходах облучателя, т.е. для диаграммы направленности ФАР в режиме приема с учетом невзаимного характера фазовращателей на основе эффекта Фарадея.

Приведены результаты численного моделирования (входящих в модель в качестве известных величин) диаграмм направленности четырехэлементного облучателя, выполненные с учетом конструктивных факторов и взаимной связи его элементов с использованием коммерческой программы для электродинамического моделирования антенн и устройств СВЧ. Показано соответствие диаграмм направленности облучателя требованиям, обеспечивающим необходимое распределение поля в апертуре ФАР.

Аналогичным образом выполнено моделирование проходного полотна ФАР как периодической структуры с использованием упрощенной модели излучателя-фазовращателя в виде диэлектрического стержня, металлизированного в области расположения фазовращателя и повторяющего геометрию условно приемного и передающего излучателей ФАР. Получены характеристики, показывающие эффекты резонансного снижения коэффициента передачи проходного полотна ФАР при некоторых углах сканирования внутри заданного однолучевого сектора сканирования $\pm 45^\circ$, влияющие, в частности, на точность пеленгации.

На основе построенной модели с использованием идеализированной диаграммы направленности излучающего элемента ФАР выполнено моделирование суммарной и разностной диаграмм направленности ФАР при сканировании. Выявлены эффекты искажения разностной диаграммы направленности при сканировании, приводящие к ошибкам пеленгации цели.

Третья глава посвящена теоретическому исследованию и оценке точности пеленгования с использованием суммарно-разностных диаграмм направленности. На основе известных общетеоретических соотношений выведены конкретные соотношения для потенциальной точности пеленгования (шумовой ошибки) РЛС с ФАР с суммарно-

разностными диаграммами и апертурой круглой и прямоугольной формы. Проведено их сопоставление с потенциальной точностью пеленгования при оптимальном алгоритме пеленгования с такой же формой и размерами апертуры ФАР и показано их практическое совпадение. Выполнены расчеты среднеквадратической потенциальной ошибки пеленгования для ФАР с суммарно-разностными характеристиками от отношения сигнал-шум при различных размерах круглой апертуры.

В данной главе получены соотношения для ошибки пеленгования, обусловленной ошибками амплитуды и фазы сигналов в суммарно-разностном устройстве. Отдельно рассмотрены случаи амплитудных и фазовых ошибок коэффициентов передачи суммарно-разностного устройства и амплитудных и фазовых ошибок коэффициентов передачи проходных элементов полотна ФАР. Соотношения конкретизированы для параметрического семейства амплитудных распределений; рассчитаны графики зависимостей ошибки пеленгации от величины амплитудной ошибки вычитаемых сигналов в разностном канале и среднеквадратической ошибки фазы проходных элементов ФАР.

Четвертая глава посвящена экспериментально-теоретическому исследованию точности пеленгования и коррекции угловой ошибки рассматриваемой проходной ФАР.

В данной главе приведены схема измерительной установки, описание макета ФАР и некоторые результаты измерения его характеристик направленности, таких как суммарная и разностная диаграммы направленности для двух углов сканирования, зависимости параметров диаграммы направленности макета ФАР от угла сканирования и диаграмма направленности интегрированного элемента полотна ФАР.

Для лучшей интерпретации экспериментальных данных проведено моделирование влияния краевых эффектов на положение нуля разностной диаграммы направленности на двух моделях. Первая представляет собой 20-элементную щелевую антенную решетку на проводящей полуплоскости. Расчеты для этой модели выполнены по соотношениям, приведенным в известной монографии Уэйта [2]. Вторая модель представляет собой 15-элементную линейную антенную решетку диэлектрических стержневых излучателей над плоским проводящим экраном прямоугольной формы. Модель построена и рассчитана с использованием коммерческой программы для электродинамического моделирования антенн и устройств СВЧ. Результаты моделирования сопоставлены с результатами экспериментального исследования.

В результате статистической обработки экспериментальных данных о направлении нуля разностной диаграммы направленности ФАР при различном значении постоян-

ной фазовой подставки в фазовом распределении построена линейная зависимость, определяющая зависимость среднего значения ошибки направления нуля от угла сканирования, а также ее среднеквадратическое отклонение в предположении, что отклонения положения нуля от среднего значения при различных значениях фазовой подставки являются случайной величиной. В алгоритме обработки используется соотношение максимумов разностной диаграммы направленности для каждого угла сканирования. В результате автору удалось аппроксимировать детерминированную составляющую ошибки установки направления нуля разностной диаграммы направленности при сканировании, которая может быть исключена при работе РЛС, а также оценить среднеквадратическую ошибку положения нуля, которая в конечном счете и будет определять точность пеленгации при большом уровне отношения сигнал-шум.

В результате, в работе, как теоретически, так и экспериментально, показана возможность реализации точности установки нуля разностной диаграммы направленности ФАР в требуемом направлении порядка $1/50$ от ширины суммарной диаграммы направленности при использовании предложенного корректирующего алгоритма. Это соответствует повышению на порядок исходной точности установки нуля в секторе сканирования до 45° от нормали, что указывает на большую практическую значимость полученных автором результатов. Насчитанные в главе 3 графики зависимостей ошибки пеленгации от величины амплитудной ошибки вычитаемых сигналов в разностном канале и среднеквадратической ошибки фазы проходных элементов ФАР могут быть использованы при проектировании проходных ФАР с суммарно-разностным облучателем как справочный материал.

Научные положения диссертационной работы достоверны и обоснованы (с оговоркой, приведенной ниже в замечаниях).

К новым результатам можно отнести

- получены соотношения для потенциальной точности пеленгования (шумовой ошибки) РЛС с ФАР с суммарно-разностными диаграммами и апертурой круглой и прямоугольной формы;

- показано, что потенциальная точность пеленгования РЛС с ФАР с суммарно-разностными диаграммами и апертурой круглой и прямоугольной формы равна потенциальной точности пеленгования при оптимальном алгоритме пеленгования, практически реализуемом только в цифровых ФАР;

- получены выражения для ошибки пеленгования, обусловленной ошибками амплитуды и фазы в суммарно-разностном устройстве;
- получены выражения для ошибки пеленгования, обусловленной случайными ошибками фазы проходных элементов ФАР;
- предложена и реализована методика калибровки проходной ФАР, позволяющая выделить и компенсировать детерминированную ошибку положения нуля разностной диаграммы направленности при сканировании и оценить среднеквадратическую ошибку положения нуля разностной диаграммы направленности.

В то же время в работе могут быть отмечены недостатки:

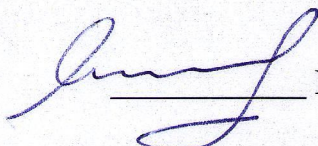
- обзор литературы, приведенный во введении, к сожалению, не является развернутым и аналитическим; в нем отсутствует одна из основополагающих работ, определяющая потенциальную точность пеленгации и точность пеленгации при амплитудном моноимпульсном методе [3];
- приведенные в главе 2 результаты моделирования диаграммы направленности ФАР выполнены только при идеализированной диаграмме направленности элементов;
- изложение материала в главе 4 не позволяет досконально разобраться в полученных результатах и методике обработки экспериментальных результатов; в частности, не понятно каким образом из экспериментальных данных получено отношение амплитуд A_2/A_1 (стр. 152), используемое при обработке результатов;
- методика оценки среднеквадратического разброса начальной фазы фазовращателей на основании оценки среднеквадратической ошибки положения нуля разностной диаграммы направленности недостаточно обоснована; предполагается, что разброс фаз фазовращателей является единственным источником ошибки положения нуля, тогда как на него также влияют многократные отражения между приемными и передающими излучателями, содержащими в себе неслучайную составляющую;
- без определения и разъяснения используются не общепринятые термины: «согласованная поляризация» в главе 2, «диаграмма направленности интегрированного элемента полотна ФАР» в главе 4;
- много описок и технических неточностей (для примера: излишние знаки суммы в формуле (2.75); обозначение θ одновременно для угла места и угла возвышения на соседних графиках без соответствующего пояснения (рис. 4.6 – 4.11); сбой нумерации формул: после (4.4) следует (5.1), а затем после (5.5) снова (4.6) и т.д.);

В целом диссертация является завершенной научно-исследовательской работой. Ее автор проявил себя научным работником, способным самостоятельно ставить и решать теоретические и практические задачи в области антенной техники. Сильной стороной работы является большое количество защищенных патентами с участием автора технических решений, заложенных в конструкции ФАР, а также использование результатов работы в ОКР серийно выпускаемых изделий.

Основные результаты диссертации опубликованы в журнале «Антенны» и «Успехи современной радиоэлектроники». Автореферат соответствует основному содержанию, тезисам и выводам диссертации.

Таким образом, диссертация Манаенкова Евгения Васильевича на соискание ученой степени кандидата наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение задачи о повышении точности пеленгации с использованием проходных ФАР с суммарно-разностными характеристиками, имеющей существенное значение для радиолокации, а также изложены новые технические решения по построению, моделированию и калибровке проходных ФАР, имеющие существенное значение для данного вида техники, что соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник, к.т.н., с.н.с.


Инденбом М.В.
02.04.21

Подпись Инденбома М.В. заверяю

1-й заместитель генерального директора
АО "Всероссийский НИИ радиотехники",

Бояринцев А.В.



Адрес: 105082, Москва, ул. Б. Почтовая, 22
Телефон: +7(916)188-2231. E-mail: mindenbom@mail.ru

^[1] М.В. Ратынский, В.И. Порсев. Моноимпульсная пеленгация в РЛС с цифровыми ФАР. М.: Радиотехника. 2019. 160 с.

^[2] Уэйт Д.Р. Электромагнитное излучение из цилиндрических систем / М.: Сов. радио. 1963.

^[3] Brennan L.E. Angular accuracy of a phased array radar. IRE Trans. AP-9. May 1961. Pp. 268-275.