



Научная статья / Original Article

УДК 621.396.6

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188273>

EDN: <https://www.elibrary.ru/QEVNRU>

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ И ЗОНДИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В ПРОЦЕССЕ ДИАГНОСТИКИ И КОНТРОЛЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

А.Д. Егоров✉

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиотехники», г. Москва, Россия

✉ egorovxxx@mail.ru

Цитирование: Егоров А.Д. Моделирование взаимодействия излучателей линейной антенной решетки и зондирующего устройства в процессе диагностики и контроля амплитудно-фазового распределения // Труды МАИ: электрон. журнал. № 148. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=188273>

Аннотация. Рассмотрены вопросы учета взаимодействия излучателей испытуемой линейной антенной решетки и зондирующего устройства при измерении амплитудно-фазового распределения вдоль раскрыва линейной антенной решетки. Показано, что использование расчетной модели, построенной в САПР электродинамического уровня, позволяет выбрать взаимное положение излучателей, обеспечивающих их минимальное рассогласование на основе результатов численного эксперимента. Оценена избирательность различных типов зондирующих устройств. Приведено сравнение результатов численного моделирования и измерений.

Ключевые слова: линейная антенная решетка; амплитудно-фазовое распределение; электродинамическое моделирование; зондирующее устройство.

SIMULATING INTERACTION OF LINEAR ANTENNA ARRAY ELEMENTS AND PROBE DEVICE IN PROCESS OF DIAGNOSTICS AND CHECKING OF AMPLITUDE AND PHASE DISTRIBUTION

A.D. Yegorov✉

Joint Stock Company «All Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering»,
Moscow, Russia

✉ egorovxxx@mail.ru

Abstract. The many modern mobile radars used antenna system with mechanical rotation in the azimuthal plane. This antenna system has to have radiation pattern with fixed narrow beam in horizontal plane. For antenna array this radiation pattern can be formed with dividing system used and antenna elements, printed on the common circuit board, without fed lines and connectors between divider and radiators. Scanning in vertical plane for this radar system performed by used linear phase shifts between rows of antenna array. The problem of measure of the amplitude-phase distribution for antenna rows is consider.

This paper describing questions interaction between linear antenna array elements during testing and the probe device at measurement of the amplitude-phase distribution along a of linear array are considered. It is shown that use of the calculation model constructed in a CAD of electrodynamic level allows to choose mutual position of the radiators providing their matching on the basis of results of a numerical experiment. Two methods of measurement of the amplitude-phase distribution along a of linear array are compared. The first method used moving probe device along linear antenna array. In the second method probe device have number radiators, equal number of testing linear array elements. During measure one of probe device radiator connected to measure device with use controlling commutator.

Is show that use probe device with controlling commutator allows to reduce significantly measure time. The selectivity of the various types probe device with different mutual positions is estimated. Comparison results of numerical modeling and measurements is given.

Keywords: linear antenna array; amplitude-phase distribution; electrodynamic modeling; probe device.

Введение

В большинстве современных, производимых серийно, мобильных РЛС обзора используются антенны с механическим вращением (гибридные зеркальные антенны, плоские антенные решетки со сканированием в

угломестной плоскости), архитектура которых требует формирования фиксированной диаграммы направленности в азимутальной плоскости. Для плоских антенных решеток такая диаграмма направленности может быть сформирована с использованием пассивных систем деления мощности – диаграммообразующих схем (ДОС), представляющих собой линейную АР. Сканирование в вертикальной плоскости в таких антенных системах осуществляется при помощи изменения линейного наклона фазового распределения между этажами решетки – ДОС строк фазированной антенной решетки (ФАР).

Чаще всего мобильные РЛС обзора с ФАР используют L и S диапазоны частот, что позволяет достигать компромисса между ограничениями размера раскрыва ФАР и точностью определения угловых координат цели. Другой особенностью применения данных частотных диапазонов является всепогодная независимость использующих их РЛС.

Наиболее перспективной технологией изготовления ДОС строк ФАР в L и S диапазонов частот является технология большеразмерных печатных схем, разработанная в свое время в АО «ВНИИРТ» [1], [2], позволяющая на единой печатной плате формировать топологию проводников системы деления мощности и излучателей без использования дополнительных соединителей между ними. Погонные диссипативные потери мощности в названных частотных диапазонах относительно невелики, а использование параллельных схем деления мощности позволяет избегать паразитного частотного сканирования максимумом формируемой диаграммы направленности, характерного для волноводно-целевых антенн. Применение печатной технологии обеспечивает высокую повторяемость электрических параметров ДОС строк в процессе серийного изготовления.

В процессе серийного изготовления ДОС по технологии большеразмерных печатных схем актуальной является задача контроля АФР, формируемого схемой деления мощности ДОС, конструкция которой не предоставляет прямого доступа ко входам делителя. Оптимальным решением проблемы контроля АФР ДОС является измерение распределения электрического поля в ее ближней зоне с

последующим алгоритмическим восстановлением комплексных амплитуд падающих волн во входном сечении ее излучателей.

Целью данной статьи является рассмотрение частной задачи о взаимодействии излучателей испытываемой ДОС и зондирующего устройства, возникающей в процессе выполнения измерений, в результате решения которой должно быть выбрано оптимальное взаимное названных излучателей.

Еще недавно решение подобной задачи требовало проведения натурального эксперимента с приложением значительных усилий, связанных с изготовлением макета и проведением большого числа измерений. В настоящее время существует целый ряд систем автоматизированного проектирования, построенных с использованием строгих электродинамических методов моделирования, таких как ANSYS HFSS, CST Studio Suite, Altair FEKO и других, позволяющих максимально учитывать конструктивные особенности моделируемых устройств. Применение таких систем позволяет перейти от натурального эксперимента к эксперименту численному и существенно сократить затраты сил и времени.

Методы измерения и восстановления АФР ДОС

Методам диагностики и контроля ФАР посвящена обширная библиография, перечисление основных работ которой далеко выходит за рамки данной статьи.

В качестве обзорных работ по методам измерений, применительно к задаче контроля АФР ДОС, хотелось бы упомянуть монографию [3] и статьи [4], [5].

В патенте [6] предложен способ контроля работоспособности антенной решетки, основанный на измерении распределения поля, создаваемого испытываемой ЛАР, при помощи подвижного измерительного зонда, перемещаемого вдоль ее оси по фиксированным позициям, расположенным над излучателями испытываемой ЛАР. Для калибровки такой измерительной системы используется калибровочная антенная решетка (КАР), тип и расположение излучателей которой полностью идентичны излучателям испытываемой ЛАР. При этом каждый излучатель КАР имеет свой независимый вход, подключенный к внешнему соединителю. В режиме калибровки каждый из входов КАР последовательно подключается к измерительному прибору, который измеряет комплексные амплитуды откликов зонда на возбуждение одного из излучателей КАР во всех

положениях зонда над каждым излучателем КАР. Не используемые в процессе измерений входы КАР нагружаются на согласованные нагрузки. По результатам калибровочных измерений формируется квадратная матрица, столбцами которой являются вектора комплексных амплитуд откликов зонда во всех его рабочих положениях на возбуждение соответствующего излучателя КАР. Данную матрицу в дальнейшем будем называть матрицей разрешения зондирующего устройства или просто матрицей разрешения.

Тогда процесс восстановления сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{A} = \mathbf{V} \quad , \quad (1)$$

где $\mathbf{K}$ – измеренная при помощи КАР матрица разрешения;

$\mathbf{V}$ – измеренный вектор комплексных позиционных откликов зонда над каждым излучателем испытываемой ЛАР;

$\mathbf{A}$ – искомый комплексный вектор амплитуд падающих волн во входном сечении излучателей испытываемой ЛАР.

Решение системы уравнений вида (1), в том числе при плохой обусловленности матрицы системы, вызванной наличием измерительных шумов, подробно рассмотрено в работе [7].

К достоинствам метода измерения с использованием подвижного зонда следует отнести его универсальность, связанную с возможностью выбора произвольного шага перемещения зонда и его информативность, позволяющую уменьшать шаг измерений и восстанавливать АФР падающих волн на входах излучателей путем решения переопределенной системы уравнений вида (1) [7].

К недостаткам данного метода следует отнести конструктивную сложность прецизионного механизма перемещения зонда и высокие временные затраты на проведение измерений, связанные с позиционированием зонда.

При серийном производстве ДОС гораздо более эффективной оказалась измерительная установка с коммутируемым зондом, представляющим из себя решетку излучателей, расположенных с тем же шагом, что и излучатели испытываемой ЛАР, входы которых охвачены электронной системой коммутации,

позволяющих подключать их либо к измерительному прибору, либо к согласованной нагрузке.

Время проведения измерений при использовании установки с коммутируемым зондом сокращается в десятки раз, по сравнению с использованием подвижного зонда.

Краткий обзор технологии большеразмерных печатных плат

Технологическое оборудование, разработанное и используемое в АО «ВНИИРТ», позволяет, в настоящее время, изготавливать печатные платы длиной до 4 м. В качестве материала для таких печатных плат, формирующих рисунок топологии проводников ДОС, используются гибкие фольгированные диэлектрики – однослойный стеклотекстолит или лавсан.

Конструкция полосковой линии с использованием таких печатных плат представлена на рисунке 1, где 1 - печатно-полосковая плата, формирующая топологию проводников ДОС (W - ширина полоскового проводника); 2 - крышки-экраны полосковой линии, которые, в свою очередь, могут быть печатными платами на твердом диэлектрике – стеклотекстолите; 3 - диэлектрические слои заполнителя, поддерживающие печатно-полосковую плату. Материал заполнителя, для снижения потерь и уменьшения влияния неоднородности диэлектрика на электрическую длину полосковой линии, имеет низкое значение диэлектрической проницаемости $\epsilon_r = 1,04 \dots 1,08$. Слои полосковой структуры могут соединяться между собой как с помощью клеевой, так и бесклеевой технологии.

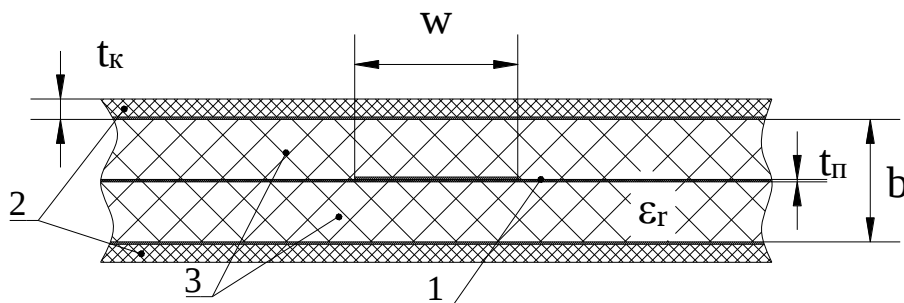


Рисунок 1 - Конструкция полосковой печатной линии

В качестве примера на рисунке 2 представлена топология проводников ДОС ФАР S диапазона частот. ДОС представляет собой ЛАР, состоящую из 20 директорных излучателей, расположенных с шагом 85 мм, объединенных

параллельной развязанной схемой деления мощности. Расположение резисторов в кольцевых делителях мощности 1:2 и шлейфовых нагрузках на рисунке не показано.

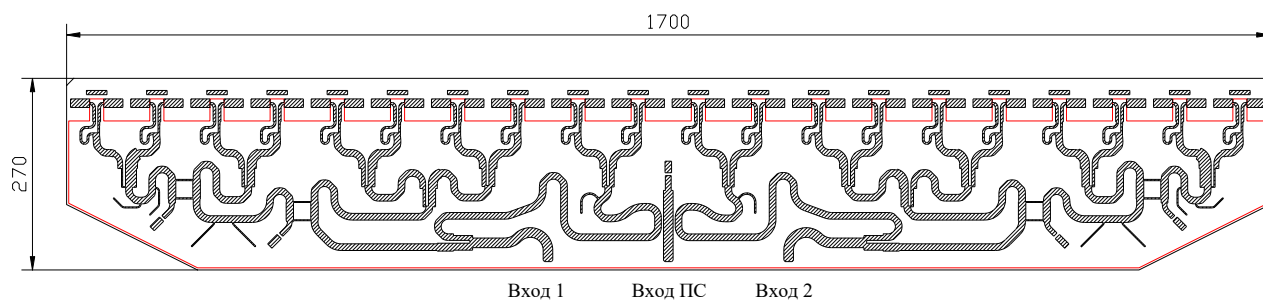


Рисунок 2 - Топология проводников ДОС ФАР S – диапазона

ДОС реализована на подвешенной полосковой линии с базой $b=10$ мм. Толщина подложки печатной платы t_p около 0,1 мм. Печатная плата удерживается в симметричном положении относительно экранов с помощью листов заполнителя из пенополиэтилена с низким значением диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Погонные потери в полосковой линии составляют около 0,4 дБ/м в рабочем диапазоне частот. Экраны полосковой линии образованы фольгированным слоем крышек ДОС, которые также представляют собой печатные платы. В области излучателей фольга на крышках повергнута химическому травлению для формирования топологии экранов излучателей ДОС. Схема деления мощности ДОС разделена на две подрешетки, для обслуживания каждой из которых используется свой приемо-передающий модуль. Использование двух приемо-передающих модулей в каждой строке такой ФАР обеспечивает требуемый уровень мощности на передачу, а также формирование суммарно-разностных и вспомогательных ДН на прием в цифровом виде. Управление положением луча на передачу осуществляется посредством фазовращателей.

ДОС имеет дополнительный вход ввода-выхода контрольного сигнала, обозначенный на рисунке 2 как «Вход ПС», соединенный с двухсторонним направленным ответвителем, позволяющий в технологическом режиме осуществлять измерение и подстройку амплитудно-фазового распределения (АФР) в вертикальной плоскости ФАР на прием и передачу.

Построение модели печатных излучателей и результаты моделирования

На рисунке 3 приведена топология центральной платы и платы-крышки печатных излучателей, разработанных по технологии ДОС на основе полосковой печатной линии, рисунок 1. Излучатель, изображенный на рисунке 3а директорного типа, с одним активным и одним пассивным вибраторами. Возбуждение активного вибратора осуществляется при помощи симметрирующего устройства в виде «У-колена», расположенного ниже линии экрана ДОС. Конструкция излучателя соответствует заявленной в патенте [8].

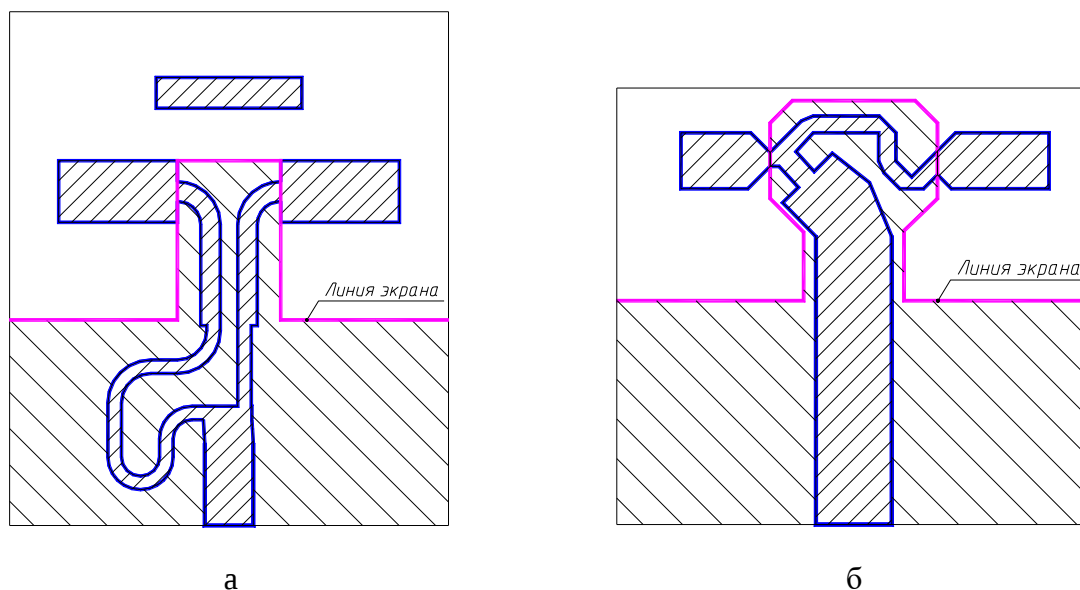


Рисунок 3 - Топология проводников излучателей

На рисунке 3б представлена топология оригинального вибраторного излучателя, конструкция которого защищена патентом [9]. Симметрирующее устройство данного вибратора располагается непосредственно вблизи его плеч и прикрывается экраном специальной, «молотковой» формы, напечатанным на крышках излучателя.

Расчетные 3-D модели излучателей в разрезе приведены на рисунке 4.

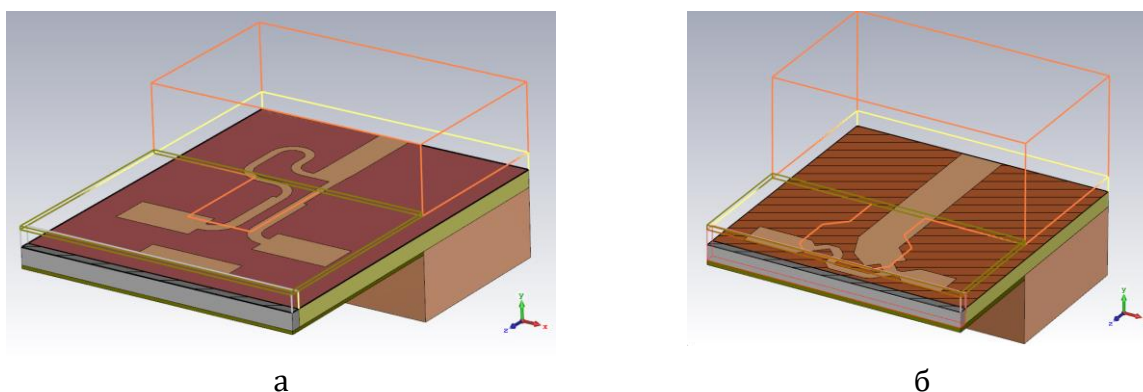


Рисунок 4 - 3-D Модели излучателей в разрезе

Для моделирования излучателей использовались следующие исходные данные.

База полосковой линии составляла 10 мм.

Крышки излучателей выполнены из фольгированного стеклотекстолита толщиной 1 мм для директорного излучателя и 1,5 мм для вибраторного. Центральная плата из однослойного стеклотекстолита толщиной 0,12 мм. Диэлектрическая проницаемость материала 4,2, толщина фольги 35 мкм.

В качестве заполнителя, расположенного между крышками и центральной платой, используется листовой пенополиэтилен, толщиной 5 мм с $\epsilon=1,045$.

Вдоль кромки излучателя расположен диэлектрический слой толщиной 3 мм с $\epsilon=2,9$, имитирующий заливочный компаунд. Шаг излучателей по оси X составляет 85 мм.

С целью сокращения вычислительных затрат при выполнении разбиения модели на конечные элементы экраны излучателей выполнены в виде сплошных брусков прямоугольной формы из идеально проводящего металла.

Для моделирования использовался поддиапазон S-диапазона частот, выделенный правительством РФ для служб воздушной радионавигации и радиолокации.

На рисунке 5 приведена расчетная 3-D модель учета взаимодействия излучателей испытуемой АР и ЗУ вибраторного типа при боковом расположении зонда.

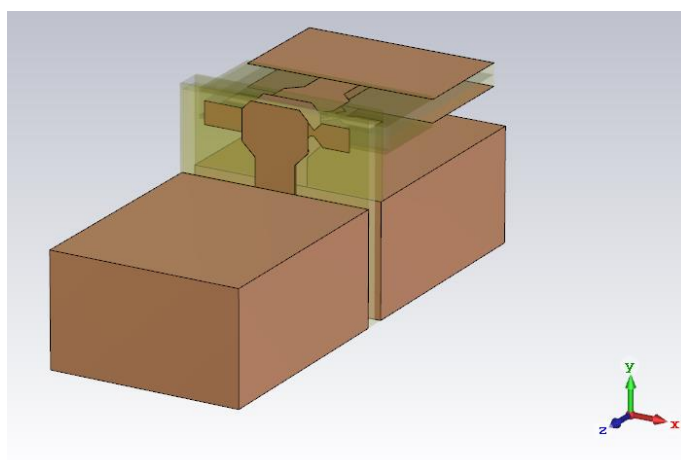


Рисунок 5 - Модель взаимодействия излучателей при боковом расположении зонда

Граничные условия, наложенные на моделируемую структуру – вдоль оси X – периодические. Вдоль осей Y, Z – открытая излучающая структура, дополненная элементами свободно пространства – open (add space).

Использование периодических граничных условий вдоль оси X означает переход к рассмотрению излучателей в составе бесконечно длинных линейных АР, исключая тем самым влияние краевых эффектов.

Варьируемыми параметрами при моделировании являются расстояния по оси Z , отсчитываемое от внешней поверхности крышки испытуемого излучателя, и расстояние по оси Y , отсчитываемое от плоскости экрана излучателя.

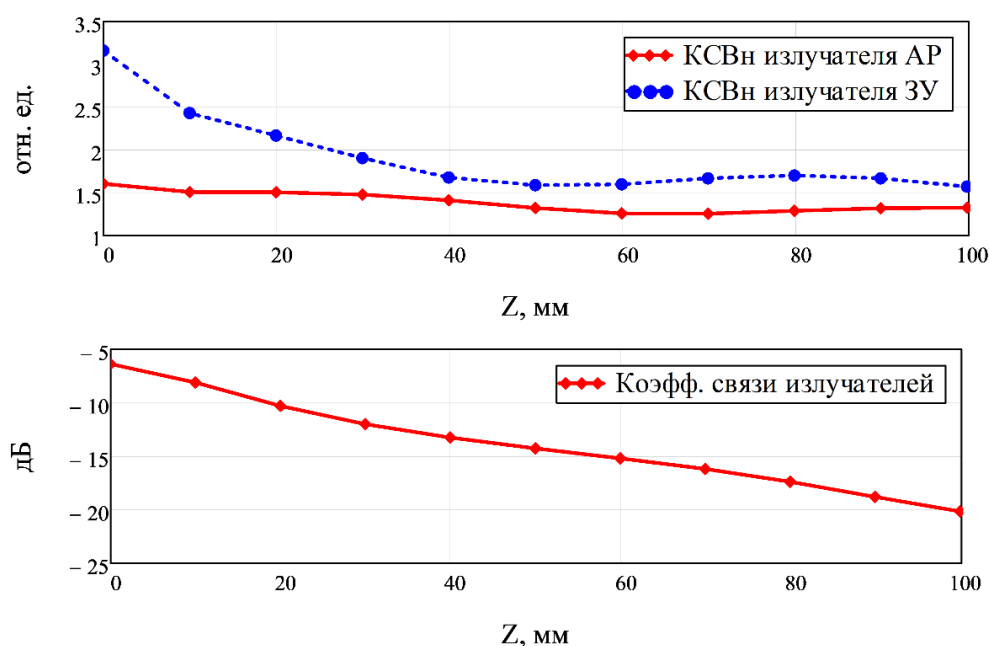


Рисунок 6 – Зависимость параметров излучателей от их взаимного положения для бокового расположения зонда

На рисунке 6 представлены зависимости КСВн и коэффициентов связи излучателей при изменении расстояния между ними по координате Z и фиксированном положении $Y=25$ мм.

Расчет выполнялся на средней частоте рабочего диапазона.

По результатам моделирования, оптимальным, с точки зрения рассогласования излучателей, следует считать расстояние между ними, лежащее в интервале от 40 до 60 мм. Амплитуда коэффициентов связи между излучателями в дБ, практически линейно зависит от расстояния между ними.

На рисунке 7 приведены зависимости КСВн и коэффициентов связи излучателей при изменении расстояния между ними по координате Y и

фиксированном положении $Z=40$ мм, построенные на средней частоте рабочего диапазона.

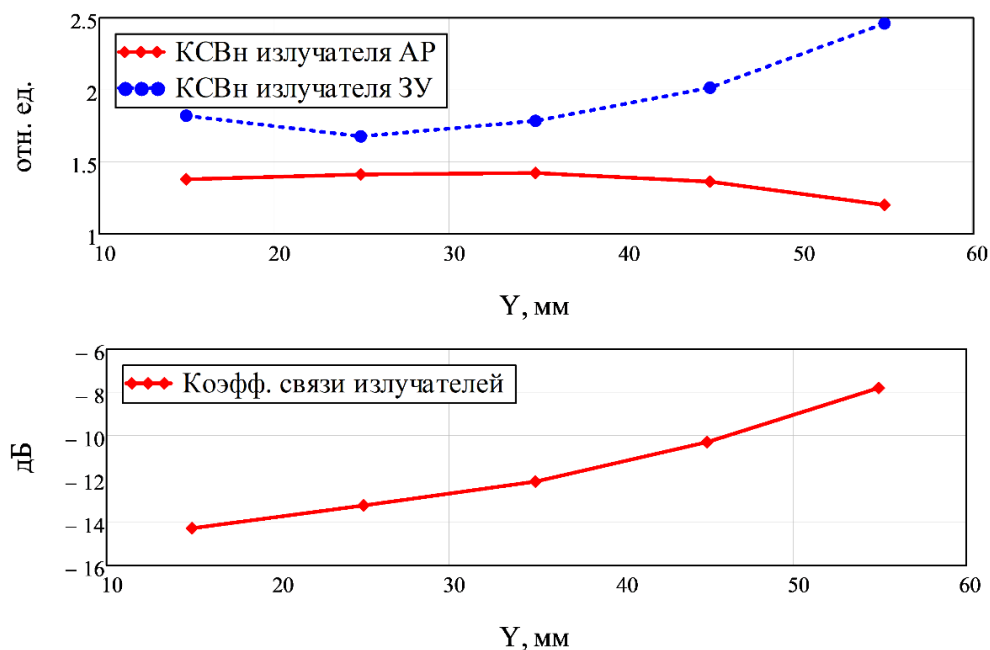


Рисунок 7 – Зависимость параметров излучателей от их взаимного положения для бокового расположения зонда

Полученные результаты, как уже отмечалось ранее приведены на средней частоте рабочего диапазона. Как показали результаты численного эксперимента, частотная зависимость КСВн и коэффициентов связи излучателей очень слаба в пределах рабочего диапазона частот, и не влияет на характер зависимостей, приведенных на рисунках 6,7.

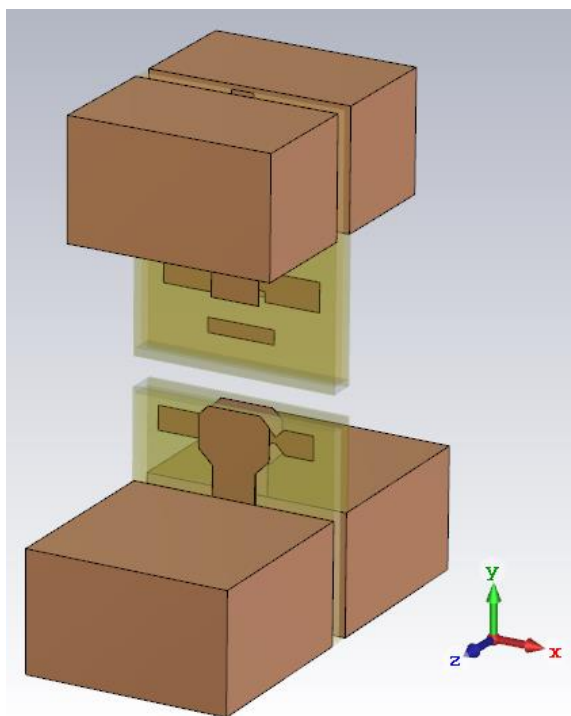


Рисунок 8 - Модель взаимодействия излучателей при оппозитном расположении зонда

Аналогичным образом может быть рассмотрена модель взаимодействия излучателей испытуемой АР и ЗУ при их оппозитном расположении. В качестве излучателя АР используем директорный излучатель, рисунок 4а, в качестве излучателя ЗУ – вибраторный излучатель, рисунок 4б. Расчетная 3-D модель такой системы приведена на рисунке 8. Варьируемым параметром при моделировании являлось расстояние между торцами излучателей.

На рисунке 9 представлены зависимости КСВн излучателей и коэффициентов связи от расстояния между ними на средней частоте рабочего диапазона. При оппозитном расположении излучателей связь между ними является более сильной, чем при боковом расположении зонда. Оптимальным, с точки зрения взаимного рассогласования излучателей, представляется расстояние между ними, лежащее в диапазоне от 10 до 15 мм.

Частотными зависимостями КСВн и коэффициентов связи, в пределах рабочего диапазона частот, как и в предыдущем случае, можно пренебречь.

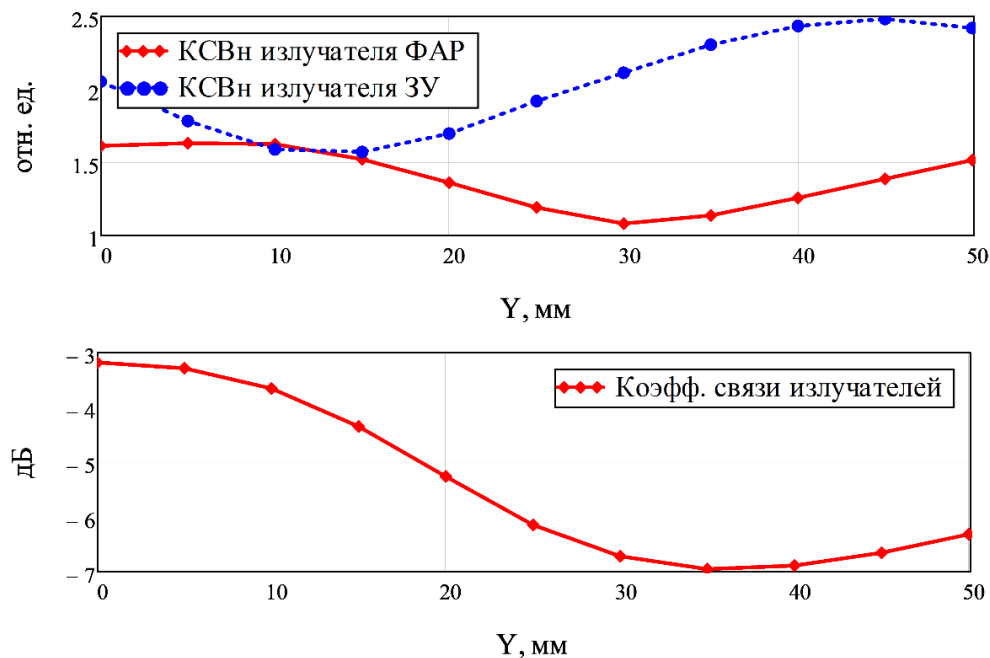


Рисунок 9 -- Зависимость параметров излучателей от их взаимного положения для оппозитного расположения зонда.

Существенным параметром измерительной системы, который может быть оценен на расчетной модели излучателя, является избирательность зонда.

Под избирательностью зонда понимается его способность избирательно принимать сигнал преимущественно от того излучателя, на позиции которого он в данный момент находится. Математическое определение величины избирательности зонда приведено в работе [10].

На рисунке 10 представлены расчетные 3-D модели для оценки избирательности ЗУ при боковом расположении зонда относительно испытуемой ДОС, применительно к использованию коммутируемого зонда, рисунок 10а, и подвижного зонда, рисунок 10б.

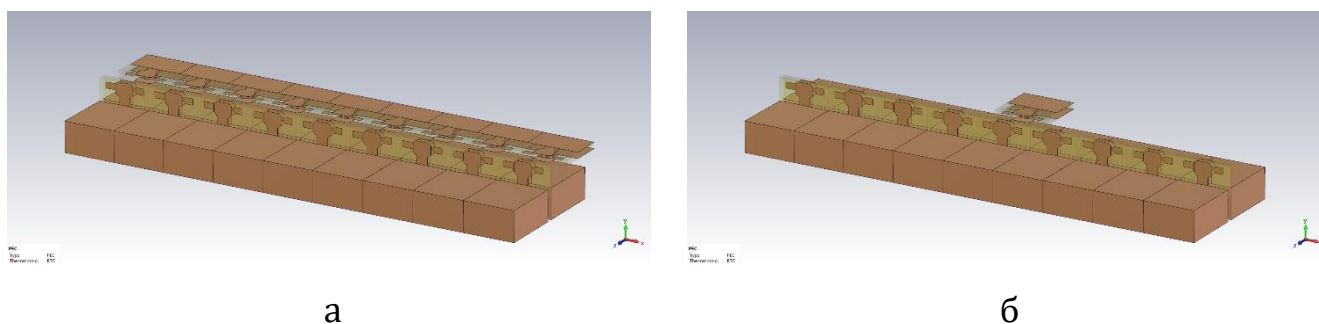


Рисунок 10 - Модель для оценки избирательности зонда

Модель испытуемой АР представляет собой 9 элементную решетку конечных размеров. Аналогичный размер имеет также решетка зондов для случая коммутируемого ЗУ, рисунок 10а. Активный излучатель ЗУ занимает центральную позицию – номер 5. Остальные излучатели коммутируемого ЗУ нагружаются на согласованные нагрузки. Размер АР, состоящей из 9 элементов, является достаточным для устранения влияния краевых эффектов на центральный излучатель АР. Расстояния между излучателями АР и ЗУ, выбранные для расчета $Z=40$ мм и $Y=25$ мм.

На рисунке 11 представлены амплитуды коэффициентов связи активного излучателя зонда со всеми излучателями фрагмента испытуемой АР, для случаев использования коммутируемого и подвижного зонда. Из приведенных графиков видно, что существенными являются лишь связи активного излучателя зонда с ближайшими соседями слева и справа излучателя испытуемой АР, в позиции которого находится зонд. Далее коэффициенты связи быстро убывают и влияние остальных излучателей испытуемой АР не должно вносить существенного вклада в результаты измерений позиционного отклика активного излучателя зонда.

Коэффициенты связи с ближайшими соседями для случаев коммутируемого и подвижного зондов практически одинаковы, таким образом пассивные излучатели коммутируемого ЗУ, нагруженные на согласованную нагрузку, не оказывают существенного влияния на результаты измерений.

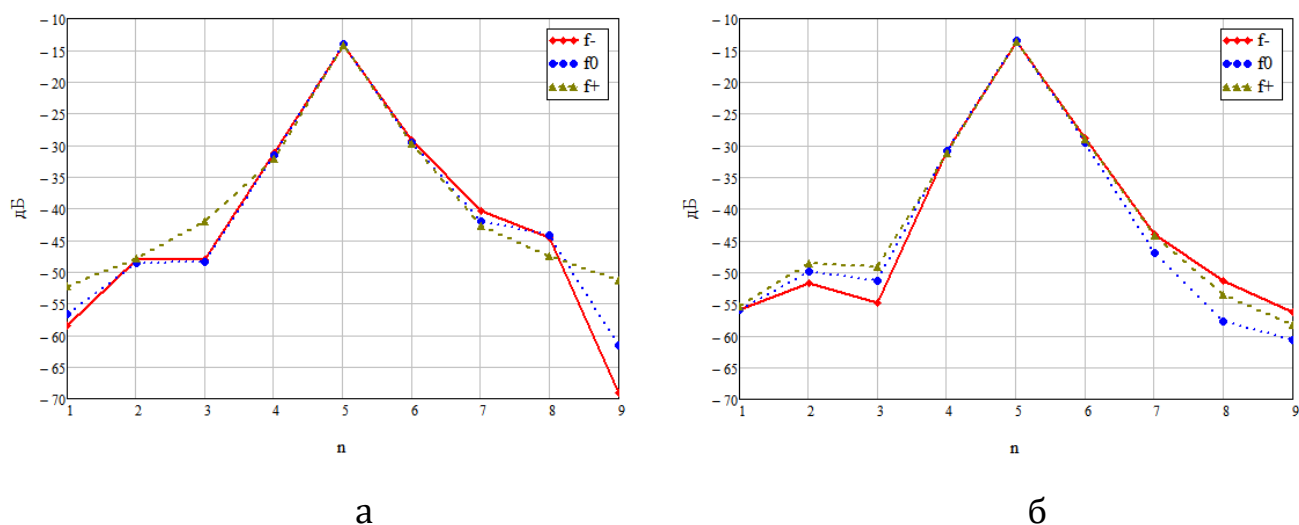


Рисунок 11 - Избирательность ЗУ при его боковом положении

Сравним полученные результаты моделирования избирательности ЗУ с результатами измерений, полученными в процессе калибровки измерительной установки при помощи КАР. При измерениях использовалось ЗУ с коммутируемым зондом, состоящая из 44 излучателей. Аналогично, КАР также содержит 44 излучателя. Тип излучателя ЗУ и КАР – печатный вибратор, топология проводников которого приведена на рисунке 3б.



Рисунок 12 - Взаимное расположение ЗУ (снизу) и КАР при измерениях.

Расположение излучателей ЗУ по отношению к излучателям КАР – боковое, рисунок 12, размеры, определяющие взаимное положение близки к оптимальным, обеспечивающим минимальное взаимное рассогласование излучателей, в соответствии с рисунками 6, 7.

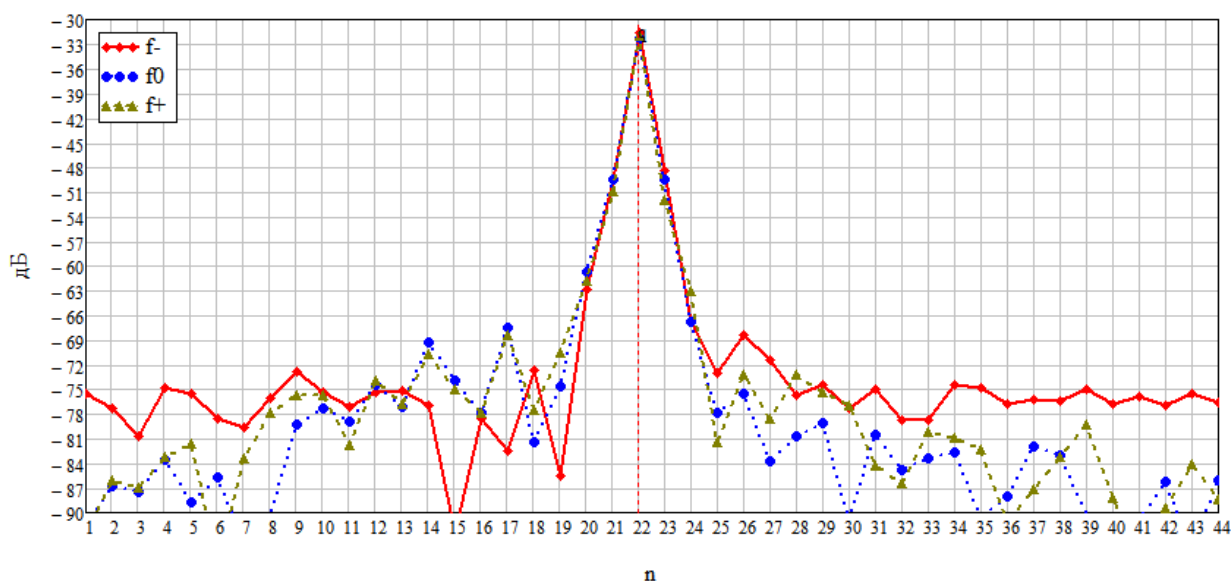


Рисунок 13 - Позиционные отклики на возбуждение 22-го излучателя

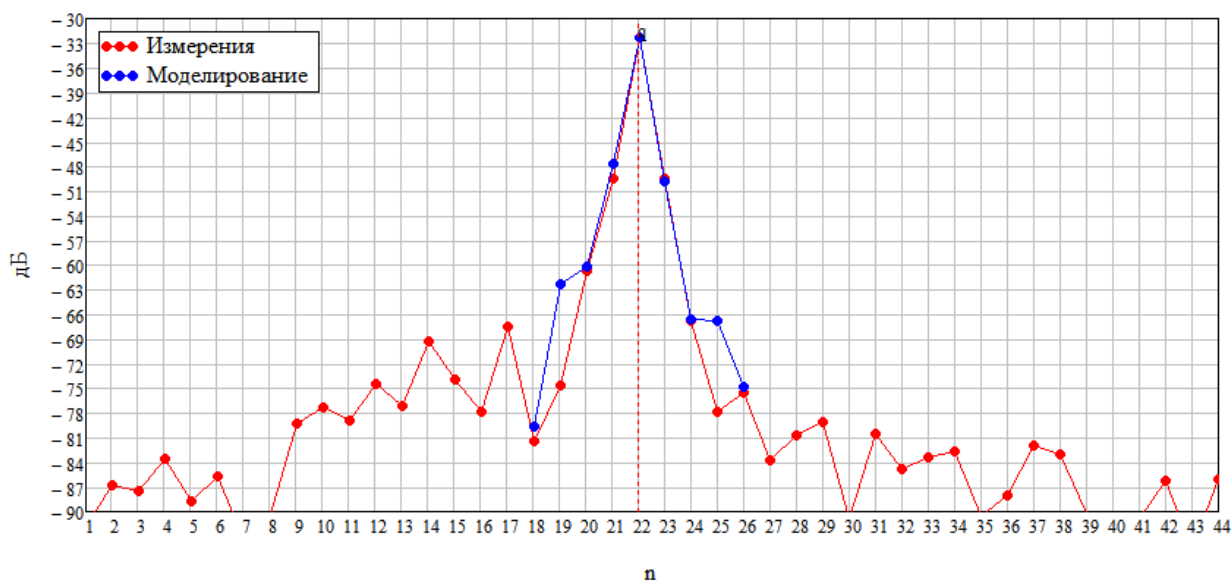


Рисунок 14 - Позиционные отклики на возбуждение 22-го излучателя, центральная частота рабочего диапазона

На рисунке 13 представлено измеренное распределение амплитуд позиционных откликов всех излучателей коммутируемого ЗУ при возбуждении 22-го излучателя КАР, расположенного в ее центре. Результаты измерений получены в диапазоне рабочих частот испытуемого устройства, на крайних и средней частотах. Из приведенных графиков видно, что сколь-либо существенный

вклад в результаты измерений отклика в позиции активного излучателя ЗУ вносят лишь ближайшие соседи испытуемого излучателя АР слева и справа. Коэффициенты связи с ближайшими двумя соседями слева и справа носят детерминированный характер, имеют слабую частотную зависимость. Остальные коэффициенты связи активного излучателя ЗУ с излучателями КАР имеют низкий уровень, случайный характер и могут рассматриваться в качестве измерительных шумов.

На рисунке 14 приведен график измеренных амплитуд, рисунок 13, на центральной частоте рабочего диапазона с наложением на него результатов моделирования избирательности ЗУ. Максимальное значение коэффициента связи, полученное при моделировании перенесено в позицию 22, результаты моделирования ортонормированы к максимуму измеренной амплитудной зависимости. Из приведенного графика наглядно видно близкое совпадение расчетных и измеренных коэффициентов связи излучателей.

Заключение

В работе приведены результаты анализа взаимодействия излучателей ДОС строки ФАР при проведении контроля ее АФР в процессе изготовления, с излучателями зондирующего устройства подвижного и коммутируемого типа.

Построена расчетная модель взаимодействия излучателей ЗУ и испытуемой АР, позволяющая по результатам численного эксперимента выбрать взаимное расположение и расстояние между излучателями, оптимальное для проведения измерений, с точки зрения минимального взаимного рассогласования излучателей.

Показано, что при боковом и оппозитном расположении излучателей может быть подобрано такое взаимное положение и расстояние между излучателями, чтобы величина КСВн испытуемого излучателя не превышала 1,5, а КСВн зонда не превышал 2.

Установлено, что при боковом расположении зонда относительно испытуемой АР достигается лучшая избирательность зонда, чем при оппозитном расположении излучателей. Избирательность излучателя коммутируемого зонда практически не отличается от избирательности подвижного зонда.

Приведено сравнение результатов моделирования и измерения избирательности зонда.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. Демидов В.В., Егоров А.Д., Инденбом М.В. Печатно-полосковые вибраторные фазированные антенные решетки L- и S- диапазонов// Антенны. 2001. № 9 (55).
2. Инденбом М.В. Антенные решетки подвижных обзорных РЛС. М.: Радиотехника, 2015. - 416 с.
3. Шитиков А.М., Темченко В.С., Гиголо А.И., Добычина Е.М. Диагностика и калибровка цифровых, активных и пассивных фазированных антенных решеток. - М.: Изд-во МАИ, 2023. - 208 с.
4. Курочкин А.П. Антенные измерения-97 // Антенны. 1997. № 1 (38). 5-24
5. Курочкин А.П. Теория и техника антенных измерений // Антенны. 2009. № 7 (146).
6. А.с. № 1215062 А SU МПК G01R29/10. Способ контроля работоспособности антенной решетки/ Бондаренко Б.Ф., Гузеев И.В., Демидов В.В., Пинский С.К., Шлогин И.П., от 11.04.84.
7. Гармаш В.Н., Малаксинов Н.П., Пузанков В.Ф. Численные методы решения некоторых задач восстановления характеристик излучающих систем по измеренным полям в дальней и ближней зонах. Сб. научно-методических статей по прикладной электродинамике. М., «Высшая школа», 1983 г. с. 98-130.
8. Патент № 1022242 (РФ). Заяв: 21.09.1981. Симметричный полосковый вибратор (его варианты). Бондаренко Б.Ф., Завислов В.П., Инденбом М.В.
9. А.с. № 1256113 (СССР). МКИ H01Q/38. Симметричный полосковый вибратор. Львов В.Е., Петухов В.К.

10. Гузеев И.В., Демидов В.В., Шлогин И.П. К теории многоэлементного дистанционного зонда. Вопросы радиоэлектроники, серия ОТ, 1982, вып. 12, с. 44-54.

References

1. Demidov V.V., Egorov A.D., Indenbom M.V. Pechatno-poloskovye vibratornye fazirovannye antennye reshetki L- i S- diapazonov (The printing strip dipole phased antenna array of L- and S-of bands) // Antenny. 2001. № 9 (55).

2. Indenbom M.V. Antennye reshetki podvizhnykh obzornykh RLS. (Antenna arrays of mobile survey radar stations.) M.: Radiotekhnika, 2015. - 416 s.

3. Shitikov A.M., Temchenko V.S., Gigolo A.I., Dobychina E.M. Diagnostika i kalibrovka tsifrovyykh, aktivnykh i passivnykh fazirovannykh antennoykh reshetok. (Diagnostics and calibration of the digital, active and passive phased antenna arrays.) - M.: Izd-vo MAI, 2023. - 208 s.

4. Kurochkin A.P. Antennye izmereniya-97 (Antenna measurements-97) // Antenny. 1997. № 1 (38). 5-24

5. Kurochkin A.P. Teoriya i tekhnika antennoykh izmerenii (Theory and technology of antenna measurements) // Antenny. 2009. № 7 (146).

6. A.s. № 1215062 A SU MPK G01R29/10. Sposob kontrolya rabotosposobnosti antennoi reshetki (Method of serviceability check of antenna array) / Bondarenko B.F., Guzeev I.V., Demidov V.V., Pinskiy S.K., Shlogin I.P., ot 11.04.84.

7. Garmash V.N., Malakshinov N.P., Puzankov V.F. Chislennyye metody resheniya nekotorykh zadach vosstanovleniya kharakteristik izluchayushchikh sistem po izmerennym polyam v dal'nei i blizhnei zonakh. (Numerical methods of the solution of some problems of restoration of characteristics of the radiating systems of the measured fields in distant and near zones.) Sb. nauchno-metodicheskikh statei po prikladnoi elektrodinamike. M., «Vysshaya shkola», 1983 g. s. 98-130.

8. Patent № 1022242 (RF). Zayav: 21.09.1981. Simmetrichnyi poloskovyi vibrator (ego varianty). (Symmetric strip vibrator (its options).) Bondarenko B.F., Zavislov V.P., Indenbom M.V.

9. A.s. № 1256113 (SSSR). MKI H01Q/38. Simmetrichnyi poloskovyi vibrator. (Symmetric strip vibrator.) L'vov V.E., Petukhov V.K.

10. Guzeev I.V., Demidov V.V., Shlogin I.P. К теории многоэлементного дистанционного зонда. (To the theory of the multielement remote probe.) Voprosy radioelektroniki, seriya OT, 1982, вып. 12, s. 44-54.

Информация об авторе

Алексей Дмитриевич Егоров, заместитель начальника отделения АО «ВНИИРТ», г. Москва, Россия; SPIN-код: 9794-5040; e-mail: egorovxxx@mail.ru

Information about the author

Aleksey D. Yegorov, deputy head of compartment JSC «All Russian Scientific Research Institute of Radio Engineering», Moscow, Russia; SPIN-код: 9794-5040; e-mail: egorovxxx@mail.ru

Получено 11 февраля 2026 ● Принято к публикации 01 июня 2026 ● Опубликовано 25 июня 2026
Received 11 February 2026 ● Accepted 01 June 2026 ● Published 25 June 2026
