

Многолучевая диэлектрическая линза миллиметрового диапазона

Л. М. Любина, М. И. Сугак, Д. С. Кутвин, В. А. Сучков, К. С. Комаров

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Lmlyubina@etu.ru

Аннотация. Представлены результаты численного и экспериментального исследования многолучевой линзы мм-диапазона, установленной на проводящей поверхности и выполненной с применением технологии 3D печати. Акцент делается на применение высокотехнологических методов изготовления антенны при значительном ослаблении требований к качеству диаграммы направленности (прежде всего УБЛ). Подробно рассмотрен случай пятилучевой диэлектрической линзы.

Ключевые слова: многолучевая антенная решетка, линзовая антенна, технология 3D печати

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В современных радиосистемах, в таких приложениях как: автомобильные радары, интернет вещей, охрана периметра, системы специального назначения и т.п., велика потребность в сканирующих или многолучевых компактных антенных решетках [1–3]. Как следствие, в настоящее время получили широкое развитие различные адаптивные антенны и антенные решетки, с электронным сканированием луча, однако в них, в ряде случаев, критичным является наличие активных управляющих элементов, что существенно повышает стоимость. В связи с этим, в ряде случаев, многолучевые антенные решетки с переключением луча, или параллельной обработкой в каналах, оказываются предпочтительнее. Использование мм-диапазона частот способствует уменьшению габаритных размеров антенн, однако в верхней его части, в свою очередь, могут возникнуть существуют проблемы с дальностью распространения сигнала.

Цель данной работы: электродинамическое моделирование, разработка и экспериментальное исследование низкопрофильной многолучевой антенной решетки мм-диапазона, установленной на проводящей плоской поверхности носителя и ориентированной на изготовление методами 3D-печати. В данной работе акцент делался на применение высокотехнологических методов изготовления антенны при значительном ослаблении требований к качеству диаграммы направленности (прежде всего УБЛ).

Известны различные конструкции, например [4], многолучевых линзовых систем, работающих в СВЧ диапазоне. Обладающие наилучшими полосовыми и энергетическими характеристиками объемные линзы Люнеберга [5, 6] с рупорными облучателями не всегда применимы, ввиду своих массогабаритных характеристик. Несколько меньшими габаритами обладает, например, рассматриваемая в [7] четырехлучевая линзовая антенна, выполненная методом лазерной резки из акрилового стекла с печатными элементами в роли облучателей. Также известны конструкции, в которых сама антенная решетка

выполняется полностью по печатной технологии, в том числе, с применением матрицы Батлера в качестве диаграммо-образующей схемы [8]. Низкопрофильные решения для размещения на проводящей подстилающей поверхности носителя также известны [9], однако в виду широкого распространения и низкой стоимости изготовления конструкций по технологии 3D-печати [5], [9] представляет интерес изготовление полностью диэлектрической многолучевой антенной решетки, когда усеченная фокусирующая линза, и система облучателей выполнены из диэлектрика (рис. 1).



Рис. 1. Макет многолучевой печатной диэлектрической линзовой антенны

II. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В качестве облучателя антенны в рамках данной работы был выбран диэлектрический резонатор (ДР), в простейшем случае – в виде параллелепипеда, установленный на проводящем экране, с коаксиально-штыревым возбуждением, вид и габаритные размеры его приведены на рис. 2. В качестве диэлектрика при проектировании выбран материал NIPS с характеристиками: $\epsilon=2.5$ и $\text{tg}\delta=0.0025$.

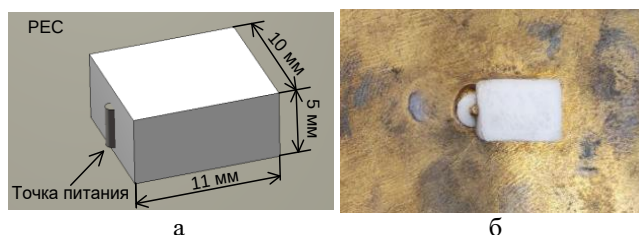


Рис. 2. Вид диэлектрического резонатора а) электродинамическая модель; б) макет

Электродинамическое моделирование, как и экспериментальное исследование показали, что для ДР такого рода, сравнительно легко удастся достичь согласован по критерию $S_{11} < -10$ дБ в полосе частот от 30 до 40 ГГц (рис. 3). Расчетная ДН на центральной частоте рабочего диапазона приведена на рис. 4.

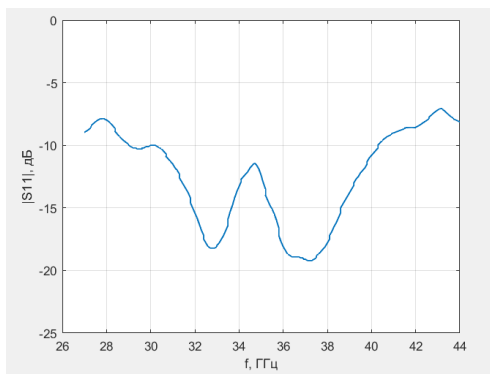


Рис. 3. Измеренная частотная зависимость S_{11} прямоугольного диэлектрического резонатора

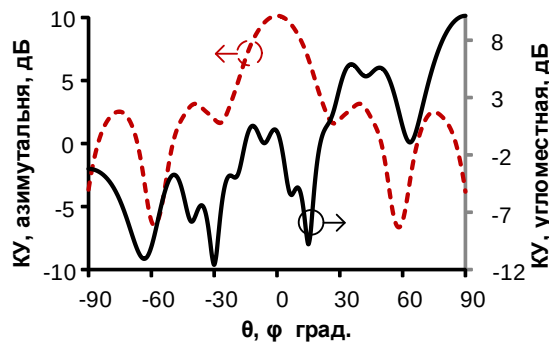


Рис. 4. ДН прямоугольного диэлектрического резонатора на частоте 35 ГГц

Из рис. 4 видно, что характеристики данного прямоугольного ДР в качестве облучателя оставляют желать лучшего. Однако, как показывает опыт, до некоторой степени, этот вопрос решается оптимизацией геометрии.

Синтез фокусирующей линзы проводился для ДР по рис. 2 на расстоянии в 68 мм от раскрыва облучателя методом итерационной коррекции состоявшегося фазового распределения в плоскости по двум координатам. Таким образом были получены два варианта геометрии усеченной фазокорректирующей диэлектрической линзы: с коррекцией фазы в азимутальной и угломерной плоскостях, выполненной со стороны ближайшей к облучателю поверхности линзы (рис. 5а) и с коррекцией на противоположной поверхности линзы (рис. 5б). Сравнение расчетной ДН на центральной частоте и частотных зависимостей КУ в полосе рабочих частот для этих двух конструкций при использовании прямоугольного ДР в качестве облучателя приведены на рис. 6 и рис. 7 соответственно, поперечные размеры линз (раскрывы) составляют 80×20 мм.

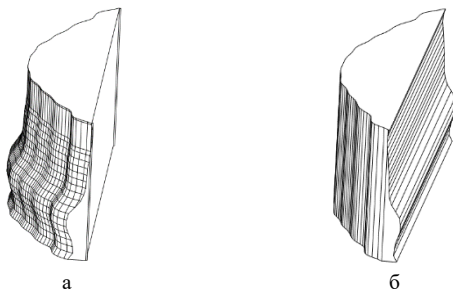
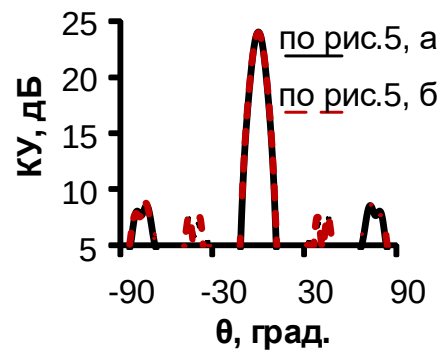
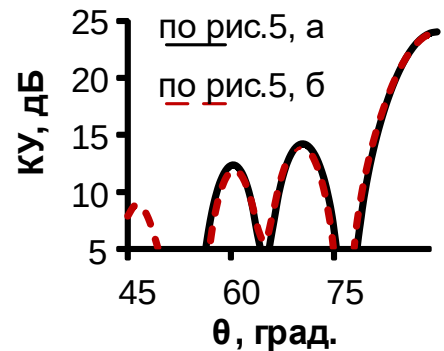


Рис. 5. Модель фазокорректирующей линзы а) с коррекцией фазы в азимутальной и угломерной плоскостях выполненной со стороны ближайшей к облучателю поверхности линзы; б) с коррекцией в азимутальной и угломерной плоскостях на противоположных поверхностях линзы



а



б

Рис. 6. Численные ДН при использовании прямоугольного диэлектрического резонатора в качестве облучателя и различных фокусирующих линз а) в азимутальной плоскости; б) в угломерной плоскости

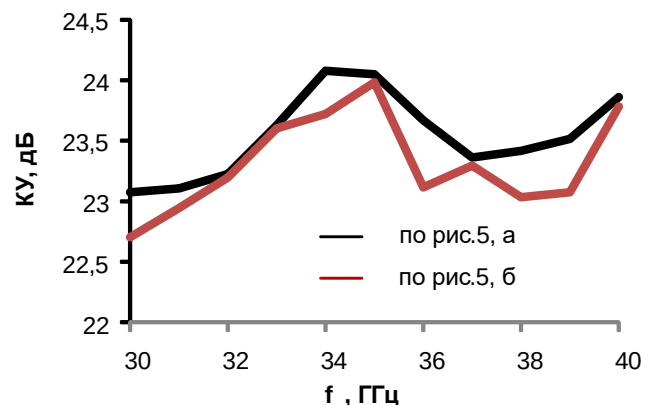


Рис. 7. Численные частотные зависимости КУ при использовании различных фокусирующих линз

При переходе к многолучевой конструкции, с пятью близкорасположенными облучателями взаимное влияние диэлектрических резонаторов несколько ухудшает качество ДН с точки зрения максимального КУ и УБЛ, в связи с чем форма облучателя была изменена на трапецидальную (рис. 1). Уровень развязки между элементами АР в данном случае не хуже 20 дБ на центральной частоте рабочего диапазона (рис. 8).

ДН и частотные зависимости КУ для каждого луча приведены на рис. 9 – рис. 10.

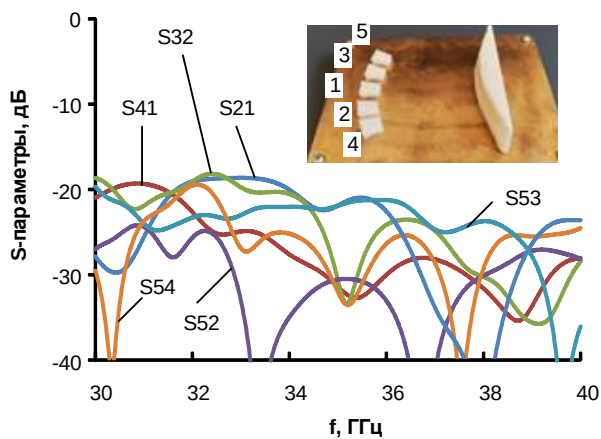


Рис. 8. Численные частотные зависимости S-параметров 5-элементной печатной антенны

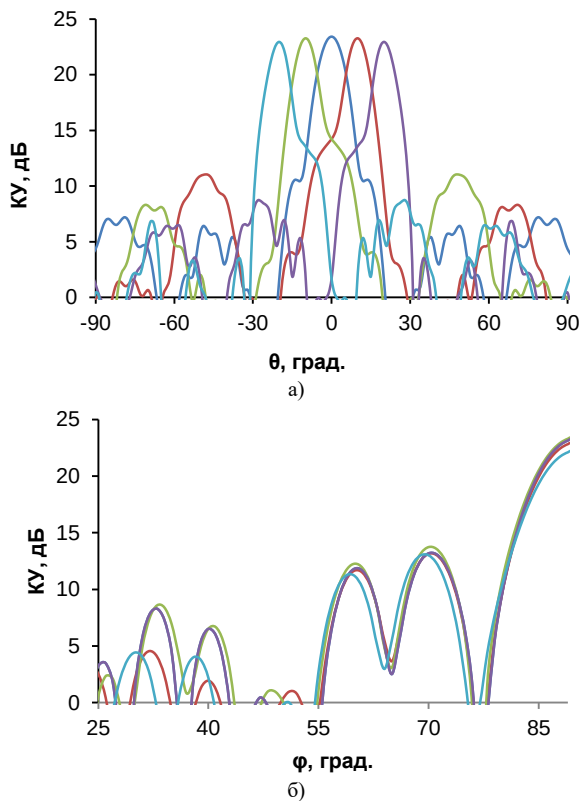


Рис. 9. Расчетные ДН пятилучевой печатной диэлектрической антенны а) в азимутальной плоскости; б) в угломестной плоскости

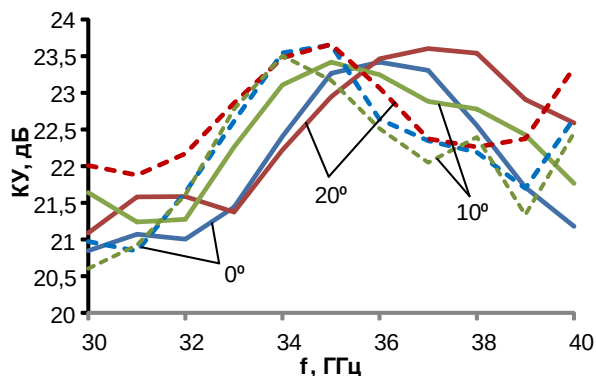


Рис. 10. Численные частотные зависимости КУ 5-лучевой печатной антенны при облучении прямоугольными (пунктирные линии) и трапециевидными (сплошные линии) диэлектрическими резонаторами для различных углов отклонения луча

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

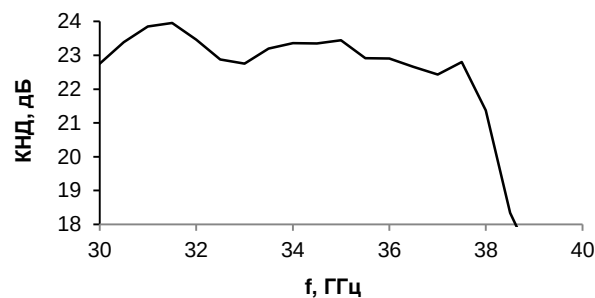


Рис. 11. Измеренная частотная зависимость КНД 5-лучевой печатной антенны при облучении центральным трапециевидным диэлектрическим резонатором

В настоящее время экспериментальные результаты получены для одного (центрального) канала исследуемой АР. На рис. 11 приведена экспериментальная частотная зависимость КНД. Приведенные данные свидетельствуют, что в раскрыве линзы присутствует заметная фазовая ошибка, причины и способы её устранения являются следующими этапами данного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Сети 6G. Путь от 5G к 6G глазами разработчиков. От подключенных людей и вещей к подключенному интеллекту. / пер. с англ. В. С. Яценкова. М.: ДМК Пресс, 2022. 624 с.
- [2] J. Thornton and K.-C. Huang, *Modern Lens Antennas for Communications Engineering*, Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.
- [3] T. Chaloun et al., "Electronically Steerable Antennas for Future Heterogeneous Communication Networks: Review and Perspectives," in *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 2, no. 4, pp. 545-581, Oct. 2022.
- [4] Беляев М.П., Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Рогозин Р.Е. Исследование многолучевых линзовых антенн на основе параллельных печатных плат // *Вестник ВГТУ*. 2021. №3.
- [5] Обзор конструкций линзовых антенн Лüneберга, изготовленных методами 3D-печати /Д.В. Кусайкин, И.В. Григорьев, Д.В. Денисов, П.А. Туральчук // *Изв. вузов России. Радиоэлектроника*. 2024. Т. 27, № 2. С. 6–36.
- [6] O. Ryazantsev, Y.P. Salomatov, V.S. Panko and M.I. Sugak, "Flat-layered spherical lens antenna system in conditions of slant polarized feeder radiation," 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON), Moscow, Russia, 2016, pp. 1-3.
- [7] Теоретическое и экспериментальное исследование четырехлучевой линзовой антенны мм-диапазона / С.В. Балландович, Е.А. Смирнова, Г.А. Костиков, А.В. Кочетов, М.И. Сугак // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2017. Т. 1. С. 336-339.
- [8] Горбачев А.П., Паршин Ю.Н. Печатная дипольная 8-лучевая антенная решетка с диаграммообразующей матрицей Батлера на связанных полосковых линиях // *Вопросы радиоэлектроники*. 2019. № 4. С. 65-70.
- [9] Исследование печатной цилиндрической линзы Лüneберга / А.А. Кузиков, Р.С. Орехов, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак // *Электроника и микроэлектроника СВЧ*. 2018. Т. 1. С. 426-430.