

## МУЛЬТИСФОКУСИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С ФОРМИРУЮЩИМИ ИЗЛУЧЕНИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ ПО МЕТОДУ ИЛЬИНА-МОРОЗОВА

*Д.А. Веденькин*

Казанский национальный исследовательский технический университет  
им. А.Н. Туполева-КАИ  
Российская Федерация, 420111, г.Казань, ул. К.Маркса, 10

**Аннотация.** Рассмотрены способы формирования мультисфокусированного излучения в антенных решетках, функционирующих в зоне ближнего излученного поля. Показано, что метод Ильина-Морозова по преобразованию одночастотного излучения в двухчастотное обладает рядом достоинств и является более предпочтительным. Представлены результаты моделирования.

**Ключевые слова:** мультисфокусировка, сфокусированные антенные решетки, метод Ильина-Морозова, область фокусировки.

### Введение

Начиная со второй половины 40-х годов XX в. и по настоящее время ведутся научные исследования эффекта трехмерной фокусировки электромагнитного излучения в некоторой области пространства. Известна работа [1], в которой впервые были рассмотрены ограничения, накладываемые на сфокусированные в зоне ближнего излученного поля электромагнитные волны. В работе [2] рассмотрены свойства сфокусированных электромагнитных полей. Существенный вклад в развитие теории сфокусированных антенных решеток внес известный советский ученый Я.С. Шифрин, который в одной из своих работ [3] рассматривал сфокусированные поля в зоне ближнего излученного поля, сформированные случайными антенными решетками. В настоящее время активно ведутся исследования в области сфокусированных антенных решеток и рассматриваются некоторые прикладные аспекты их применения на кафедре Радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ под руководством проф. Ю.Е. Седельникова. Особо следует подчеркнуть монографию [4], в которой обобщены результаты исследований антенн и антенных решеток, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля, а также их технических приложений.

Однако следует отметить, что несмотря на более чем семидесятилетнюю историю становления и развития теории сфокусированных антенн и антенных решеток, вопросы формирования нескольких областей фокусировки одновременно не рассматривались. Поэтому настоящую статью мы посвятим данному аспекту.

### 1. Принципы организации мультисфокусированного излучения

В современных реалиях наблюдается тенденция к использованию радиотехнических устройств, функциональное назначение которых заключается в формировании распределения электромагнитного поля на расстояниях близких к геометрическим размерам апертуры. К ним можно отнести радиотехнические средства медицинской диагностики, промышленности и сельского хозяйства, радиолокации, телекоммуникационные технологии и многое другое. СВЧ-энергия, ставшая традиционным методом воздействия на материалы и вещества, позволяет расширить круг технологических задач, как, например, разогрев и сушка.

Одним из вариантов реализации мультисфокусированного излучения является способ, при котором все излучатели антенной решетки делятся на группы по числу сфокусированных областей, формируя таким образом несколько локальных максимумов напряженности электромагнитного поля. Иллюстрация подобной идеи представлена на рис.1.

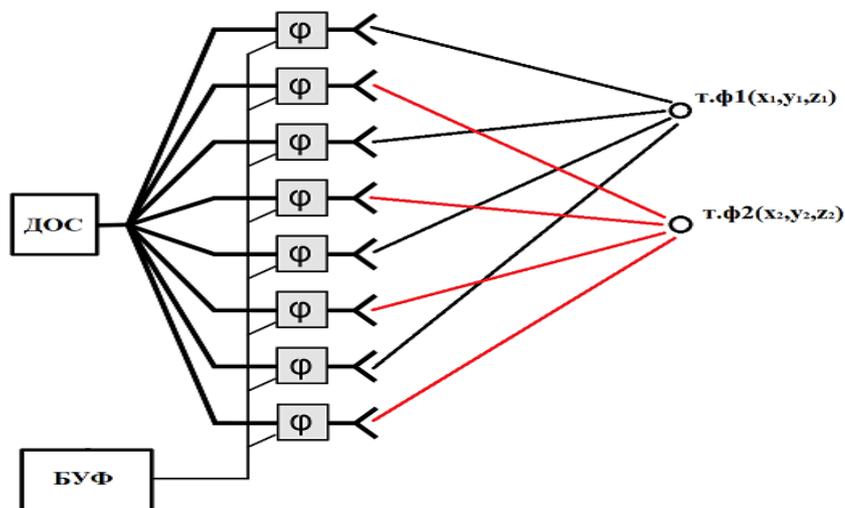


Рис.1. Принцип организации мультисфокусированного излучения (ДОС – диаграммообразующая схема, БУФ – блок управления фазами)

При кажущейся простоте подобному решению присущ ряд недостатков. К одному из них можно отнести фактическое разделение единой антенной решетки на ряд отдельных антенных «подрешеток» с меньшим числом излучателей в каждой. Уменьшение числа излучателей неизбежно приведет к снижению эффективности фокусировки и увеличению размеров сфокусированных областей. Иллюстрирующие графики представлены на рис.2.

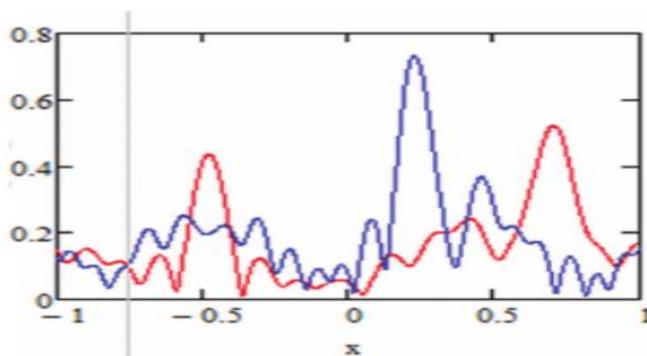


Рис.2. Напряженности ЭМ поля при реализации единственной (синяя линия) и двойной (красная линия) фокусировок

Как видно из графиков, представленных на рис. 2, значения напряженностей электромагнитного поля мультисфокусированного излучения меньше, а поперечные размеры области фокусировки больше, что хорошо согласуется с результатами, отраженными в [4]. Ко второму недостатку относится сложность эффективной и относительно компактной реализации диаграммообразующей схемы особенно при решении задачи адаптивного управления значениями частот, излучаемых отдельными элементарными излучателями. К третьему ограничению можно отнести необходимость отдельной стабилизации значений частот формирующего излучения, что приведет к усложнению оборудования.

Одним из вариантов преодоления указанных недостатков и ограничений является организация многочастотного излучения с использованием метода Ильина-Морозова [5]. В этом случае каждый из элементов антенной решетки излучает многочастотное излучение, параметры которого подобраны таким образом, чтобы сформировать две независимые друг от друга области фокусировки. Структурная схема подобной антенной решетки представлена на рисунке 3, блок преобразователей частоты по методу Ильина-Морозова находится в фазирующем блоке и на рисунке не показан.

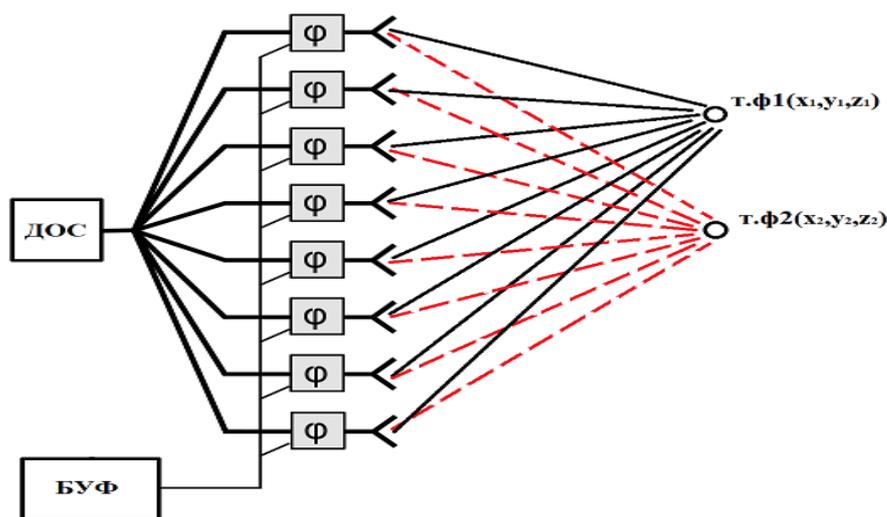


Рис. 3. Мультифокусированная антенная решетка с многочастотным излучением.

Отметим, что метод Ильина-Морозова к настоящему моменту широко применяется в самых различных областях радиотехники. Несомненными достоинствами применения способа преобразования одночастотного излучения в двухчастотное являются постоянство амплитуд двухчастотного излучения и значения частот, симметричных относительно центральной частоты с высокой степенью спектральной чистоты. Всё это позволяет значительно повысить эффективность генераторного и диаграммообразующего оборудования, устройств поддержания стабильности частот.

## 2. Математическое моделирование мультифокусированной антенной решетки

Способ формирования двухчастотного излучения по методу Ильина-Морозова хорошо известен и описан во многих научных трудах, например, [6]. Рассмотрим модель линейной сфокусированной антенной решётки со следующими параметрами:

- количество излучателей – 6 и 11,
- значения частот двухчастотного излучения - 0,95 ГГц и 1,05 ГГц.

Согласно «токовой» модели значения напряженностей электромагнитного поля могут быть оценены по формуле

$$E(x, y, z) = \sum_{n=1}^{NN} \left[ \frac{I_0 * e^{-j*k_1*(R_{\Phi i} - R_i(x, y, z))}}{R(x, y, z)} \right],$$

где  $I_0$  – ток,  $R_{\Phi i}$  – расстояние от  $i$ -го излучателя до точки фокусировки,  $R_i(x, y, z)$  – расстояние от  $i$ -го излучателя до точки наблюдения.

Некоторые результаты моделирования представлены на рисунках 4 и 5.

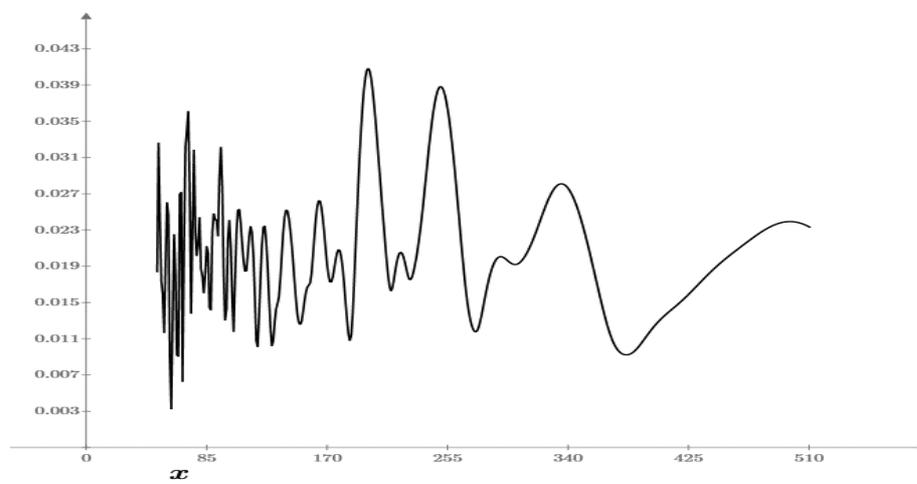


Рис. 4. Эффект двойной фокусировки многочастотного излучения на дальностях 200 и 250 м для антенной решетки из 6 излучателей

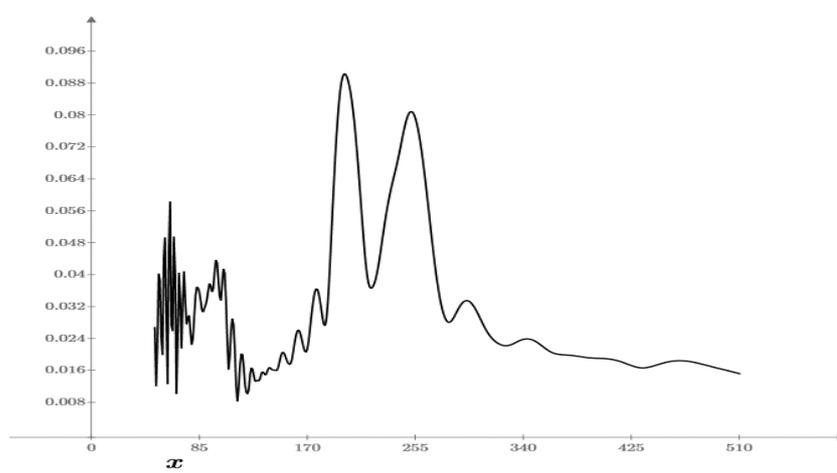


Рис.5. Эффект двойной фокусировки многочастотного излучения на дальностях 200 и 250 м для антенной решетки из 11 излучателей

Как видно из графиков, представленных на рисунках 4 и 5, отдельные области фокусировки имеют четко выраженные обособленные границы, сравнимые по амплитуде и размерам.

### Заключение

Возможность формирования мультисфокусированного излучения открывает перед учеными и специалистами новые возможности по формированию пространственно-распределенных электромагнитных полей с адаптивным управлением числа, местоположения и размеров сфокусированных областей. Автор выражает благодарность коллективу кафедры РФМТ КНИТУ-КАИ и лично проф. Ю.Е. Седелникову за обсуждение и ценные советы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wehner, R.S.* Limitations of Focused Aperture Antennas, October 1949.
2. *Sherman, J.W.* Properties of Focused Apertures in the Fresnel Region, IEEE Trans. Antennas and Propagation. - 1962. - V. 10. - №4. – Pp.399-408.
3. *Шифрин, Я.С.* Поле случайных антенных решеток в зоне Френеля / Я.С. Шифрин, В.А. Назаренко // Радиотехника и электроника. - 1991. - Т.31. - С.52-62.
4. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля : монография / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова, Н.А. Тестоедова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. –Красноярск. - 2015. –308 с.
5. *Ильин, Г.И., Морозов, О.Г.* Патент №: SU 1338647. «Способ преобразования одночастотного когерентного излучения в двухчастотное».
6. *Нургазизов, М.Р.* Оптико-электронные системы измерения мгновенной частоты радиосигналов СВЧ-диапазона на основе амплитудно-фазового модуляционного преобразования оптической несущей /дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук // КНИТУ-КАИ, Казань, 2014 г.

## MULTI-FOCUSED ANTENNA ARRAYS WITH SHAPING RADIATION OBTAINED BY THE IL'IN-MOROZOV'S METHOD

*D.A. Vedenkin*

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI  
10, K.Marx, Kazan, 420111, Russian Federation

**Abstract.** Methods for the formation of multi-focused radiation in antenna arrays operating in the near-field radiated field are considered. It is shown that the Il'in-Morozov's method for converting single-frequency radiation into two-frequency radiation has a number of advantages and is more preferable. The simulation results are presented.

**Keywords:** multifocusing, focused antenna arrays, Il'in-Morozov's method, focusing area.

Дата поступления статьи в редакцию 15.12.2021