

УДК 621.391

Прямые и обратные задачи для широкополосных антенных решеток, функционирующих в зоне ближнего излученного поля

Веденькин Д. А., Седелников Ю. Е.

Постановка задачи: в настоящее время все более широкое применение в задачах радиосвязи, микроволновых технологиях и радиоволновом контроле находят широкополосные сфокусированные антенны. При этом вопросы, связанные с решением задачи синтеза, не могут быть решены с использованием тех же подходов, как и для монохроматического сигнала. Неизбежным для задачи синтеза по широкополосному сигналу является нахождение параметров распределительного устройства совместно с системой излучателей и с учётом функции, характеризующей пространственное распределение электромагнитного поля при том или ином варианте функционирования. **Целью работы** является рассмотрение принципов построения антенных решеток, как наиболее перспективных для практического использования, в составе аппаратуры приема или передачи широкополосных электромагнитных полей в зоне ближнего излученного поля. **Используемые методы:** решение задачи реализации конструктивного синтеза основано на известных принципах электродинамики и классической теории антенн. **Новизна** заключается в предложении к использованию принципов конструктивного синтеза широкополосных сфокусированных антенных решеток с учетом требуемой реализации пространственного распределения сфокусированного поля и варианта функционирования. **Результат:** предложенный вариант конструктивного синтеза широкополосных сфокусированных антенных решеток позволяет реализовать более рациональный путь при нахождении параметров распределительного устройства и системы излучателей сфокусированной антенной решетки с учетом функции пространственного распределения сфокусированного поля. **Практическая значимость:** заключается в использовании более эффективной концепции конструктивного синтеза с рассмотрением модели антенной решетки относительно «конструктивных» параметров, характеризующих матрицу рассеяния распределительного устройства и последующей оптимизации данных параметров.

Ключевые слова: конструктивный синтез, широкополосный сигнал, сфокусированная антенная решетка, зона ближнего излученного поля.

Актуальность

Начиная с начала XXI века вновь пробуждается интерес к антеннам, формирующим электромагнитные поля в зоне ближнего излученного поля. К первым работам, посвященным эффекту фокусировки, можно отнести [1, 2]. В дальнейшем проводится значительное число исследований, посвященных различным аспектам теории и практики сфокусированных антенн. Эти результаты становятся востребованными в таких развивающихся областях как неразрушающий контроль, микроволновые технологии, медицинские приложения, системы радиосвязи и радиоэлектронной борьбы. Исследования, выполненные в по-

Библиографическая ссылка на статью:

Веденькин Д. А., Седелников Ю. Е. Прямые и обратные задачи для широкополосных антенных решеток, функционирующих в зоне ближнего излученного поля // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 71-85. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-071-085

Reference for citation:

Vedenkin D. A., Sedelnikov Y. E. Direct and inverse problems for broadband antenna arrays operating in the near-radiated field zone. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 71-85 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-071-085

следние два десятилетия, фактически создали основу апертурной теории антенн в зоне ближнего излученного поля и представлены в обобщенном виде в монографии [3]. Подавляющее число работ, выполненных в этом направлении, относится к случаю монохроматического поля.

Использование широкополосных сигналов открывает дополнительные возможности улучшения показателей радиоэлектронной аппаратуры в задачах радиосвязи и радиоволновой диагностики. Поэтому возникает естественный интерес к рассмотрению задач фокусировки широкополосных полей. В ряде публикаций [4, 5] рассмотрен ряд наиболее важных их свойств. Целью работы является рассмотрение принципов построения антенных решеток, как наиболее перспективных для практического использования, в составе аппаратуры приема или передачи широкополосных электромагнитных полей в зоне ближнего излученного поля.

Начнем с уточнения ряда исходных положений. Во-первых, речь идет о возбуждении электромагнитных полей требуемой конфигурации в зоне ближнего излученного поля – области, ограниченной снизу границей ближнего реактивного поля и ограниченной сверху величиной, соизмеримой с геометрическими размерами апертуры [6]. Во-вторых, отнесем к категории «широкополосное электромагнитное поле» случаи излучения и (или) приема электромагнитных колебаний, когда отличием пространственных распределений поля для различных частотных составляющих спектра «сигнала» нельзя пренебречь. В-третьих, как известно [4, 7, 8], трактовка параметров результирующего поля излучения для широкополосных сигналов в отличие от монохроматического сигнала становится неоднозначной в зависимости от спектра сигнала и способа его «использования» в заданной области пространства.

Как и в случае дальней зоны, свойства электромагнитных полей в указанной зоне характеризуются, в общем случае, комплексной векторной функцией пространственного распределения $\vec{E}_{\text{смп}}(x, y, z)$. При этом, в отличие от дальней зоны, в данном случае предпочтительнее использование декартовой системы координат и соответствующих ей ортов. Это связано с тем, что в зоне ближнего излученного поля функция пространственного распределения зависит от выбора начала координат. При представлении в декартовой системе изменение положения начала координат не приводит к изменению формы пространственного распределения. Аналогичная ситуация имеет место и в дальней зоне. В сферической системе изменение положения начала координат приводит к изменению только фазовой диаграммы направленности.

Как и в случае дальней зоны, характеристики пространственного распределения поля в режимах приема и передачи широкополосного сигнала в общем случае не совпадают. Это обстоятельство, ни в коей мере, не противоречит принципу взаимности и связано с различным, в общем случае, «использованием» составляющих спектра.

В режиме приема в результате фильтрации излученного поля, «принимаемого» в полосе частот $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f]$ в точке (x, y, z) линейным приемником

с частотной характеристикой $K_{np}(f)$, пространственное распределение сфокусированного поля рассматривается как:

$$\left| \dot{E}_{сшп}^{ПРМ}(x, y, z) \right|^2 = \left| \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} \dot{E}(x, y, z) G(f) K_{np}(f) df \right|^2 \quad (1)$$

и, следовательно, оказывается различным для разных способов приема, отличающихся выбором функции $K_{np}(f)$.

В режиме передачи вид характеристики сфокусированного электромагнитного поля также зависит от способа «использования» энергии поля, т.е. от функции, выполняемой с использованием сфокусированного электромагнитного поля. В задачах типа СВЧ-нагрева ею характеризуется мера поглощения электромагнитной энергии в точке (x, y, z) при излучении поля со спектром $G(f)$:

$$\left| \dot{E}_{сшп}^{ПРДэл}(x, y, z) \right|^2 = \left| \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} \dot{E}(x, y, z, f) df \right|^2. \quad (2)$$

В общем случае характеристика пространственного распределения в режиме передачи может определяться как результат «приема» электромагнитного поля со спектром $G(f)$ устройством с действующей высотой приемной антенны $h_{нрм}(f)$ и частотной характеристикой $K_{np}(f)$:

$$\left| \dot{E}_{сшп}^{ПРД}(x, y, z) \right|^2 = \left| \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} \dot{E}(x, y, z, f) h_{нрм}(f) G(f) K_{np}(f) df \right|^2. \quad (3)$$

Таким образом, для тех или иных ситуаций антенна должна создавать (возбуждать) электромагнитное поле с заданной пространственной конфигурацией, в частности с максимальным значением функции пространственного распределения $\left| \dot{E}_{сшп}^{ПРД}(x, y, z) \right|^2$ или $\left| \dot{E}_{сшп}^{ПРМ}(x, y, z) \right|^2$ в точке фокусировки с координатами (x_0, y_0, z_0) .

Антенные решетки в зоне ближнего излученного поля

Для большинства прикладных задач типа радиоволновой диагностики наиболее приемлемым типом антенны являются антенные решетки с фидерной схемой возбуждения. Для описания их количественных характеристик достаточно точным способом является использование матричной модели с поэлементным учетом внешних и внутренних взаимных связей [9].

Рассмотрим антенную решетку в виде соединения конечного числа излучателей и распределительного устройства, модель которой представлена на рис. 1.



Рис. 1. Модель антенной решетки

Согласно матричной модели система излучателей характеризуется матрицей рассеяния системы входов $[\dot{S}_A(f)]$ и функциями пространственного распределения $\langle \dot{e}(x, y, z, f) |$, соответствующими единичному значению тока излучателей. Для монохроматического сигнала с частотой f поле решетки представляется как:

$$\dot{E}(x, y, z, f) = \langle \dot{e}(x, y, z, f) |, \dot{I}_A(f) \rangle, \quad (4)$$

где $|\dot{I}_A(f)\rangle$ – вектор-столбец комплексных амплитуд токов излучателей. Значения токов определяются матрицей рассеяния входов излучателей $[\dot{S}_A(f)]$ и амплитудами падающих волн $|\dot{U}_{nad}(f)\rangle$:

$$|\dot{I}_A(f)\rangle = [[1] - [\dot{S}_A(f)]] \dot{U}_{nad}(f), \quad (5)$$

где $[1]$ – единичная матрица.

Свойства распределительного устройства полностью определяются его матрицей рассеяния:

$$[\dot{S}(f)] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11}(f) & |\dot{S}_{21}^\sigma(f)\rangle^T \\ |\dot{S}_{21}^\sigma(f)\rangle & [\dot{S}_{22}^\sigma(f)] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где блочная матрица $|\dot{S}_{21}^\sigma(f)\rangle$ описывает коэффициенты передачи от входа распределительного устройства к его выходам, $[\dot{S}_{22}^\sigma(f)]$ – блочная матрица рассеяния системы выходов распределительного устройства, а $\dot{S}_{11}(f)$ – входной коэффициент отражения распределительного устройства.

$$|\dot{U}_{nad}(f)\rangle = [\dot{E} - [\dot{S}_{22}^\sigma(f)][\dot{S}_A(f)]]^{-1} \cdot |\dot{S}_{21}^\sigma(f)\rangle \cdot \dot{U}_{ex}(f). \quad (7)$$

Характеристики электромагнитного поля, соответствующие излучению или приему широкополосного сигнала, в зависимости от смысла задачи определяются соответственно значениями $\dot{E}(x, y, z, f)$ для каждой из частот спектра $G(f)$ соотношениями (1-3).

Анализ и синтез антенной решетки в зоне ближнего излученного поля по монохроматическому и широкополосному сигналам

Синтез по монохроматическому сигналу

Рассмотрим случай узкополосного (монохроматического) сигнала с центральной частотой f_0 , формируемого излучателями заданного типа и сфокусированного в заданную область пространства. Требуется найти расположение излучателей и параметры распределительного устройства по заданной функции пространственного распределения электромагнитного поля $\dot{E}_{y3П}^{зад}(x, y, z, f_0)$. В случае монохроматического сигнала решение существует и может проводиться в два этапа – соответственно «внешней» и «внутренней» задачам синтеза. Совокупность шагов по решению задач синтеза представлена на рис. 2.

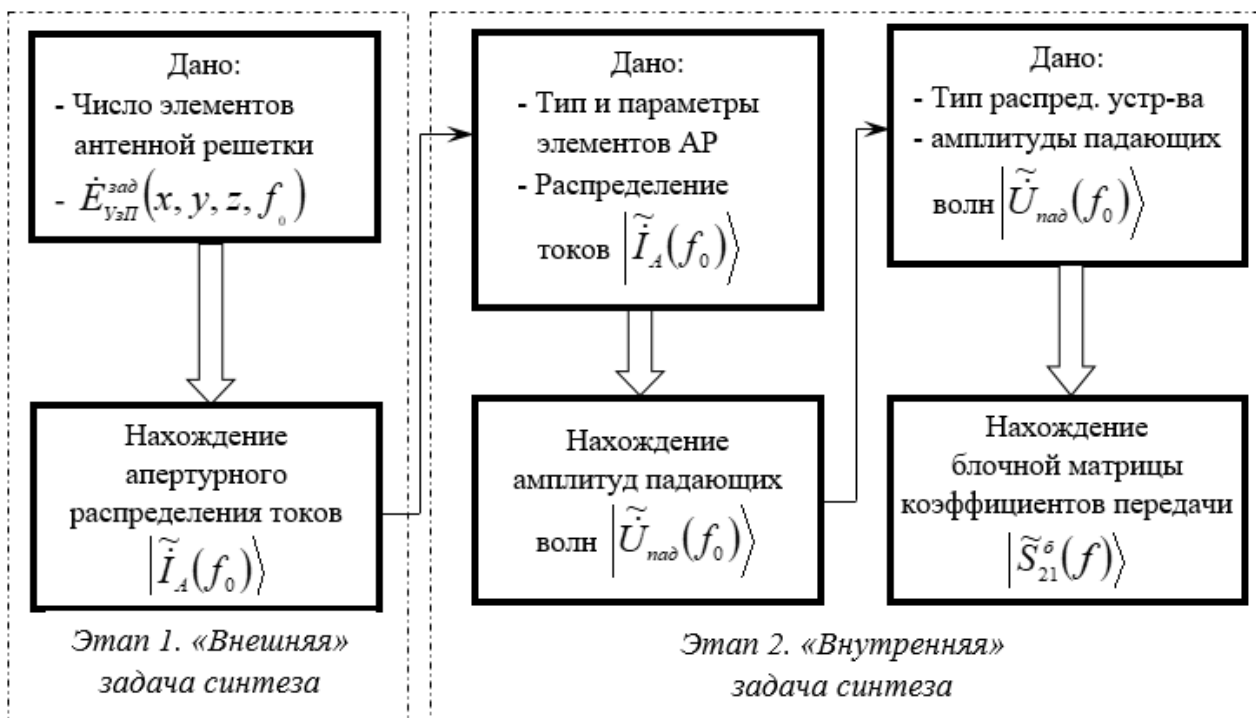


Рис. 2. Решение задачи синтеза для случая узкополосного сигнала

На первом этапе при заданных типе, числе и расположении излучателей решетки решение «внешней» задачи состоит в определении токов элементов антенной решетки, обеспечивающих формирование электромагнитного поля требуемой конфигурации:

$$\left\| \dot{E}_{y3П}^{зад}(x, y, z, f_0) - \langle e(x, y, z, f_0), |\tilde{I}_A(f_0)\rangle \right\| = \min. \quad (8)$$

На втором этапе задается тип распределительного устройства, характеризуемого матрицей рассеяния

$$[\dot{S}(f_0)] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11}(f_0) & |\dot{S}_{21}^{\sigma}(f_0)\rangle^T \\ |\dot{S}_{21}^{\sigma}(f_0)\rangle & [\dot{S}_{22}^{\sigma}(f_0)] \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Распределительное устройство должно создавать на входах элементов решетки волны с комплексными амплитудами $\left| \tilde{U}_{nad}(f_0) \right\rangle$

$$\left| \tilde{U}_{nad}(f_0) \right\rangle = [1 - [\dot{S}_A(f_0)]]^{-1} \left| \tilde{I}_A(f_0) \right\rangle. \quad (10)$$

Требуется найти такие параметры распределительного устройства $\left| \tilde{S}_{21}^{\sigma}(f) \right\rangle$, которые бы обеспечивали выполнение равенства

$$\left| \tilde{U}_{nad}(f_0) \right\rangle = [\dot{E} - [\dot{S}_{22}^{\sigma}(f_0)]] [\dot{S}_A(f_0)]^{-1} \left| \tilde{S}_{21}^{\sigma}(f_0) \right\rangle \cdot \dot{U}_{ex}. \quad (11)$$

В случае если распределительное устройство представляет собой делитель развязанного типа для которого $[\dot{S}_{22}^{\sigma}(f_0)] = 0$, то решение будет тривиальным: элементы матрицы рассеяния $\left| \tilde{S}_{21}^{\sigma}(f) \right\rangle$ с точностью до постоянного множителя равны

$$\left| \tilde{S}_{21}^{\sigma}(f) \right\rangle = \frac{\left| \tilde{U}_{nad}(f_0) \right\rangle}{\sum \left| \tilde{U}_{nadm}(f_0) \right\rangle^2} \quad (12)$$

В частности, для случая применения неразвязанного параллельного делителя типа «елочка» решение для $\left| \tilde{S}_{21}^{\sigma}(f) \right\rangle$ предложено в работе [10]. При этом оно существует в любом случае и является единственным. Аналогичным образом могут быть получены и решения для других типов делителей. Таким образом, для случая монохроматического сигнала решение обратной задачи существует всегда, а его решение можно проводить с разбиением на два этапа соответственно «внешней» и «внутренней» задачам.

Синтез по широкополосному сигналу

Перейдем к случаю широкополосного сигнала. Задача синтеза, в конечном счете, состоит в нахождении параметров распределительного устройства совместно с системой излучателей по заданным значениям функции, характеризующей пространственное распределение электромагнитного поля в режиме приема или передачи (1-3), согласно их заданным значениям. Функции $\dot{E}_{сшп}(x, y, z)$ определяются параметрами матрицы рассеяния распределительного устройства $[\dot{S}(f)]$, а также частотной зависимостью матрицы рассеяния системы входов излучателей $[\dot{S}_A(f)]$. Решение задачи синтеза в этом случае существенно усложняется. При разбиении на два этапа для решения «внешней» задачи синтеза требуется нахождение оптимального апертурного распределения $\left| \tilde{I}_A(f) \right\rangle$, обеспечивающего формирование пространственного распределения $\dot{E}_{сшп}(x, y, z)$ близкого к заданному распределению $\dot{E}_{сшп}^{зад}(x, y, z)$ путем минимизации по всем возможным апертурным распределениям:

$$\left\| \int_{f_1}^{f_2} \sum_{n=1}^N \dot{I}_n(f) \cdot \dot{e}_n(x, y, z, f) \cdot K(f) df - \dot{E}_{\text{СШП}}^{\text{зад}}(x, y, z) \right\| \rightarrow \min_{|\dot{I}_A(f)|}. \quad (13)$$

Нахождение функции оптимального амплитудно-фазового распределения $\dot{I}_n(f)$ можно осуществить традиционным образом, представляя $\dot{I}_n(f)$ в виде разложения по некоторым базисным функциям $\dot{y}_m(f)$, записанного в виде

$$\dot{I}_n(f) = \sum_{m=1}^M \dot{Y}_{nm} \dot{y}_m(f), \quad (14)$$

с последующим нахождением коэффициентов разложения \dot{Y}_{nm} . Тогда выражение (13) может быть представлено в следующем виде

$$\left\| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \dot{Y}_{nm} \dot{g}_{nm}(x, y, z) - \dot{E}_{\text{СШП}}^{\text{зад}}(x, y, z) \right\| \rightarrow \min_{\dot{Y}_{nm}}, \quad (15)$$

где

$$\dot{g}_{nm}(x, y, z) = \int_{f_1}^{f_2} \dot{y}_m(f) \dot{e}_n(x, y, z, f) K(f) df. \quad (16)$$

С практической точки зрения важным является частный случай концентрации электромагнитного поля в точке фокусировки с координатами (x_0, y_0, z_0) , для которой решение «внешней» задачи синтеза упрощается и может быть представлено в виде

$$\left| \tilde{\dot{I}}_A(f) \right\rangle = \frac{\tilde{\dot{e}}_n(x_0, y_0, z_0, f)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N \|\dot{e}_n(x_0, y_0, z_0, f)\|^2}}. \quad (17)$$

Следующим шагом является нахождение требуемых амплитуд падающих волн на входах элементов антенной решетки:

$$\left| \tilde{\dot{U}}_{\text{над}}(f) \right\rangle = \left[\dot{E} - \left[\dot{S}_A(f) \right] \right]^{-1} \left| \tilde{\dot{I}}_A(f) \right\rangle. \quad (18)$$

Полученные значения должны быть обеспечены путем выбора типа распределительного устройства и параметров $[S(f)]$. Тогда:

$$\left| \tilde{\dot{U}}_{\text{над}}(f) \right\rangle = \left[\dot{E} - \left[\dot{S}_{22}^{\sigma}(f) \right] \left[\dot{S}_A(f) \right] \right]^{-1} \left| \tilde{\dot{S}}_{21}^{\sigma}(f) \right\rangle \cdot \dot{U}_{\text{ex}}(f). \quad (19)$$

В общем случае решение задачи нахождения параметров распределительного устройства неизвестно, причем точного решения, скорее всего, не существует. В частности подход, описанный в [11] не допускает его распространения на случай заданной матрицы рассеяния в полосе частот. Для практического использования можно предложить следующий подход: при выбранном типе и структуре распределительного устройства рассматривается его матрица рассеяния, как зависящая от K параметров, обозначаемых $\langle V | = (V_1, V_2, \dots, V_K)$ с последующим выбором конкретных значений согласно критерию:

$$\left\| \tilde{\dot{U}}_{\text{над}}(f) - \dot{U}_{\text{над}}[S(f, \langle V |)] \right\| \rightarrow \min_{\langle V |}. \quad (20)$$

Более рациональным, и при этом более простым в реализации, представляется подход, основанный на принципах конструктивного синтеза [12-14]. Способ решения задачи конструктивного синтеза показан на рис. 3.

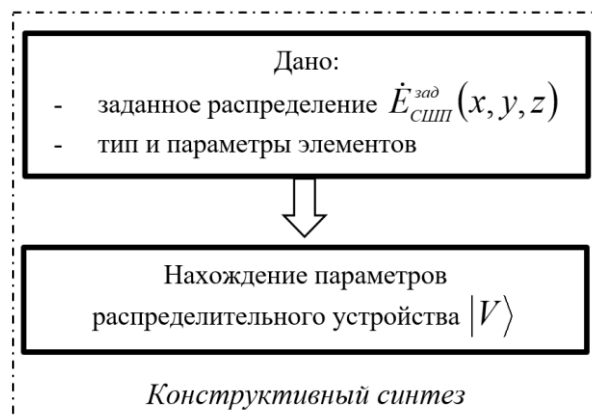


Рис. 3. Решение задачи синтеза для широкополосного сигнала

Будем считать, что тип (структура) делителя выбрана. В этом случае в задаче синтеза заданными являются тип и параметры элементов решетки и тип делителя, матрица рассеяния которого однозначно определяется параметрами $\langle V| = (V_1, \dots, V_k)$, тогда

$$[\dot{S}] = [\dot{S}(f, |V\rangle)] \quad (21)$$

Задача синтеза в этих условиях состоит в нахождении параметров делителя $|V\rangle$, обеспечивающих формирование характеристик пространственного распределения $\dot{E}_{сшп}(x, y, z, |V\rangle)$, максимально приближающейся к заданному $\dot{E}_{сшп}^{зад}(x, y, z)$:

$$\|\dot{E}_{сшп}(x, y, z, |V\rangle) - \dot{E}_{сшп}^{зад}(x, y, z)\| = \min, \quad (22)$$

где $\dot{E}_{сшп}(x, y, z)$ пространственное распределение, соответствующее представлениям (1), (2), (3) или иным аналогичным, в зависимости от смысла конкретной задачи.

Нахождение параметров делителя $|V\rangle$ согласно критерию (22) может быть осуществлено с использованием известных алгоритмов поиска локального экстремума функции нескольких переменных [15]. Решение в данном случае облегчается наличием априорной информации – возможностью выбора начальной точки – значений параметров $|V\rangle$ соответствующих распределению значений $|\tilde{I}_A(f_0)\rangle$ согласно использованию «токовой» модели (4) для центральной частоты f_0 заданной полосы частот широкополосного сигнала.

Подведем итог. В задаче синтеза антенной решетки в зоне ближнего излученного поля по широкополосному сигналу распределение её на этапы «внешней» и «внутренней» задач возможно, но является, в общем случае, нецелесообразным. Наиболее рациональный путь состоит в использовании принципов конструктивного синтеза.

Иллюстрирующие примеры

В качестве первого примера рассматривается «внешняя» задача формирования в зоне ближнего излученного монохроматического поля сфокусированных пространственных распределений суммарного и разностного типов. Формирование суммарного распределения обеспечивается выбором фаз токов решетки согласно условию $|\dot{E}(x_0, y_0, z_0)| \rightarrow \max$. Возбуждение полей разностного типа осуществляется также выбором фаз возбуждения элементов решетки, как решения задачи синтеза по заданной антисимметричной функции пространственного распределения поля. Здесь возможно формирование полей двух типов соответственно антисимметричному распределению в направлении вдоль и поперек апертуры [16].

На рис. 4 показаны расчетные огибающие амплитудно-фазового распределения решетки и пространственные распределения суммарного и разностного типов соответственно. Число излучателей – 20 шт., шаг решетки – $0,5\lambda$, точка фокусировки – 5λ .

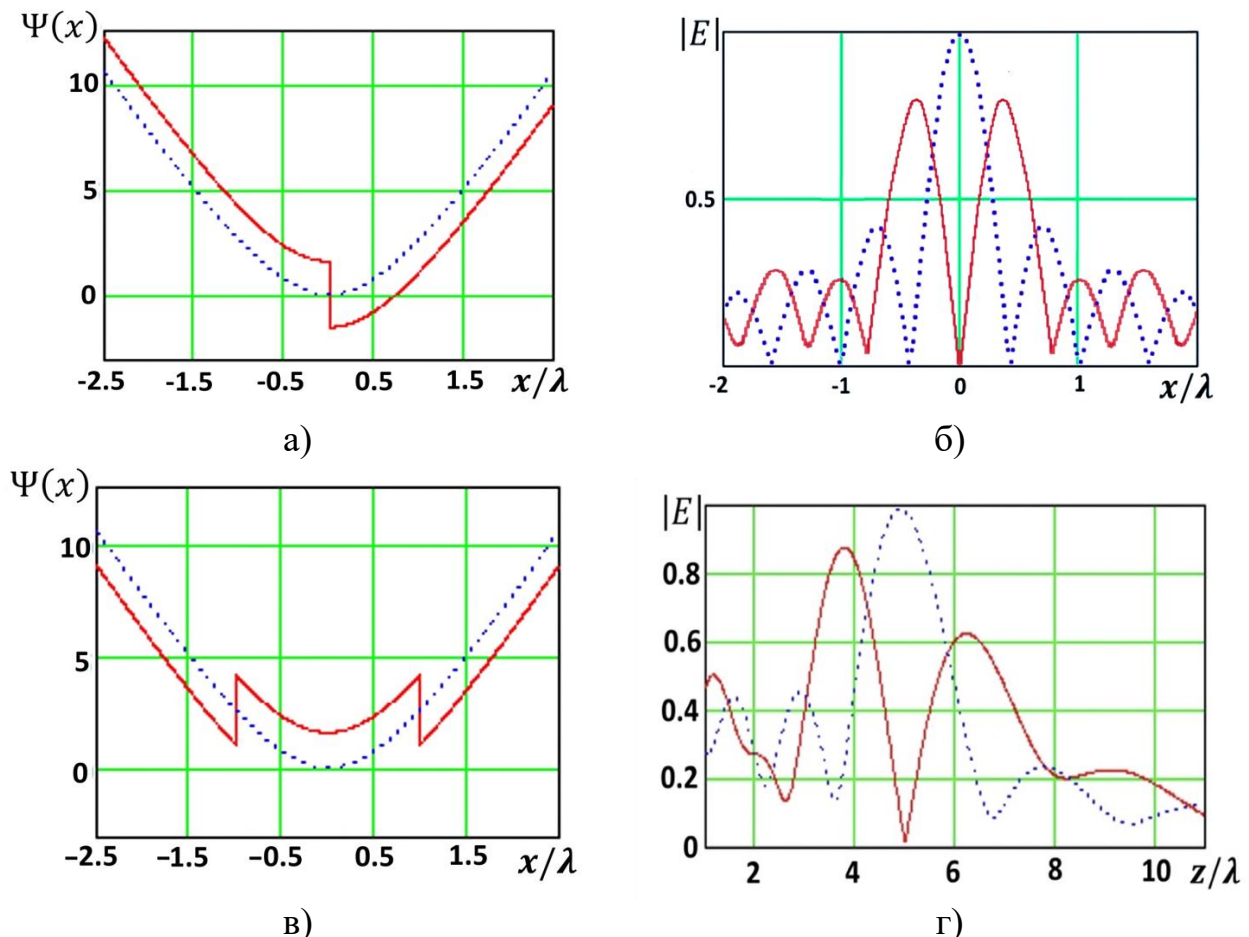


Рис. 4. Фазовые распределения: а) – первого типа $\Psi_1(x, z_0)$, в) – второго типа $\Psi_2(x, z_0)$, б) и г) – соответствующие им функции сфокусированного пространственного распределения. (- -) – суммарное, (—) – разностное распределения

В качестве второго иллюстрирующего примера рассмотрим задачу расчета антенной решетки, состоящей из 5 вибраторных излучателей и распредели-

тельного устройства (Рис. 5). Антенна должна обеспечивать в режиме передачи фокусировку электромагнитного поля сигнала с равномерным спектром в полосе частот $[0.75f_0, 1.5f_0]$ согласно критерию (2) в точке фокусировки, находящейся на нормали к апертуре на расстоянии $2\lambda_0$, шаг решетки – $0,7\lambda_0$. Распределительное устройство развязанного типа с параметрами $|S_{21}^e(f_0)|$ равными (0,48 0,48 0,677 0,48 0,48). Требуемая фокусировка обеспечивается выбором электрических длин отрезков фидерных линий (l_1, l_2, l_3) .

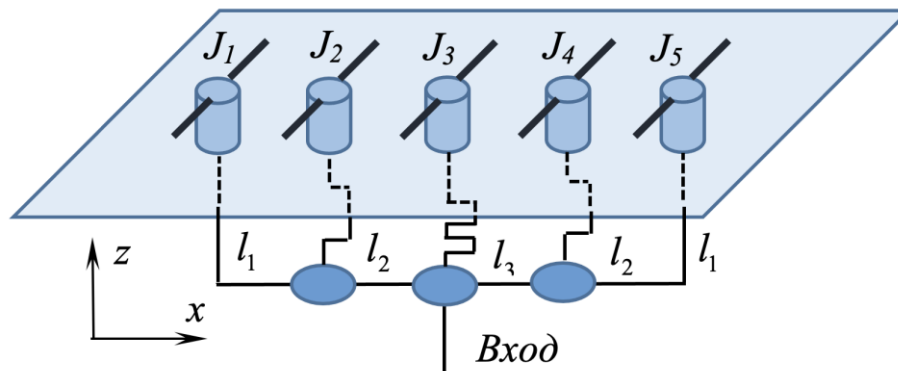


Рис. 5. Антенная решетка с распределительным устройством

Решение осуществляется путем локального перебора значений параметров – электрических длин линий $2\pi \cdot l_k$ с начальным приближением $2\pi \cdot r_{k0}$, где r_{k0} – расстояние от k -го излучателя до точки фокусировки. Результаты оптимизации приведены в таблице 1 и на рис. 6.

Таблица 1 – Результат оптимизации

| Номер излучателя | $2\pi \cdot l_k$ начальные параметры | $2\pi \cdot l_k$ оптимизированные параметры |
|------------------|--------------------------------------|---|
| 1 | 0,441 | 0,338 |
| 2 | 0,119 | 0,178 |
| 3 | 0 | 0 |
| 4 | 0,119 | 0,178 |
| 5 | 0,441 | 0,338 |

В качестве третьего примера рассмотрим линейную антенную решетку из 9 излучателей, с шагом расположения излучателей $0,75\lambda$, сфокусированную на глубину 5λ , показанную на рис. 7.

Ширина области фокусировки для монохроматического электромагнитного поля на расстоянии 5λ составляет порядка $0,95\lambda$. Требуется за счет выбора амплитудно-фазового распределения токов антенной решетки увеличить ширину сфокусированной области в три раза – до размеров порядка 3λ . Решение задачи синтеза осуществляется прямым численным методом оптимизации. Результаты представлены на рис. 8, ширина сфокусированной области расширена в 3,06 раза.

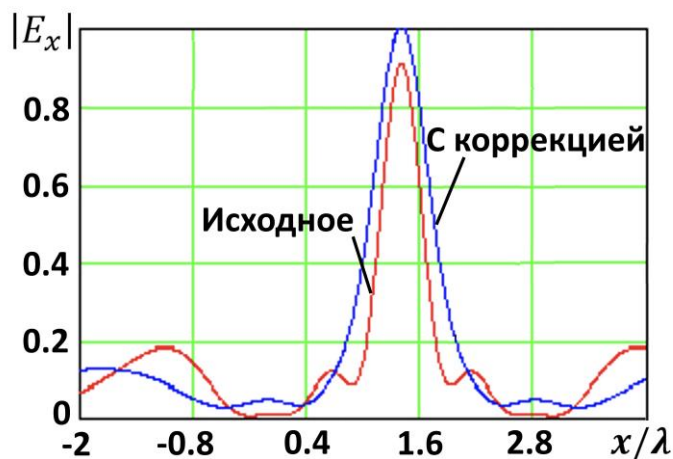


Рис. 6. Пространственное распределение сфокусированного поля в фокальной плоскости $z_{\text{фок}} = 2\lambda_0$

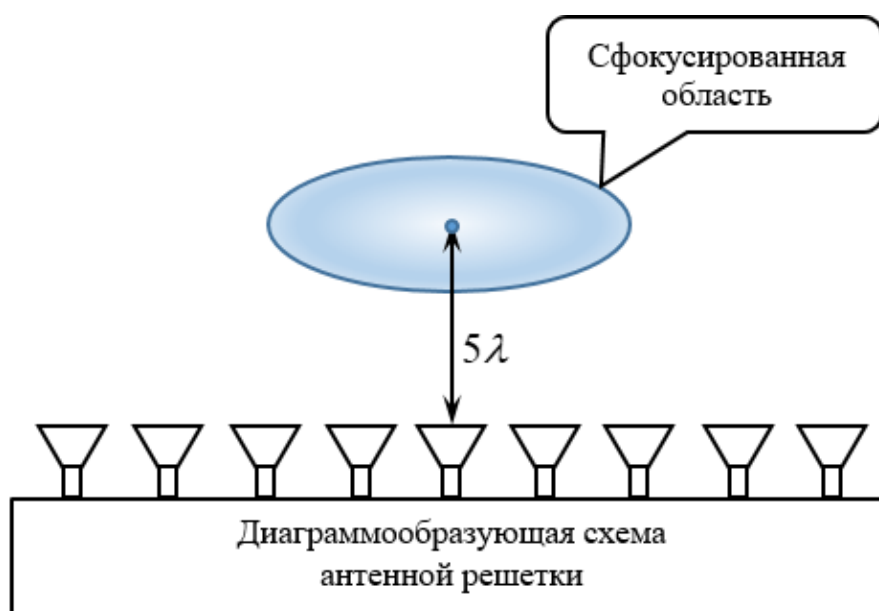


Рис. 7. Модель сфокусированной антенной решетки

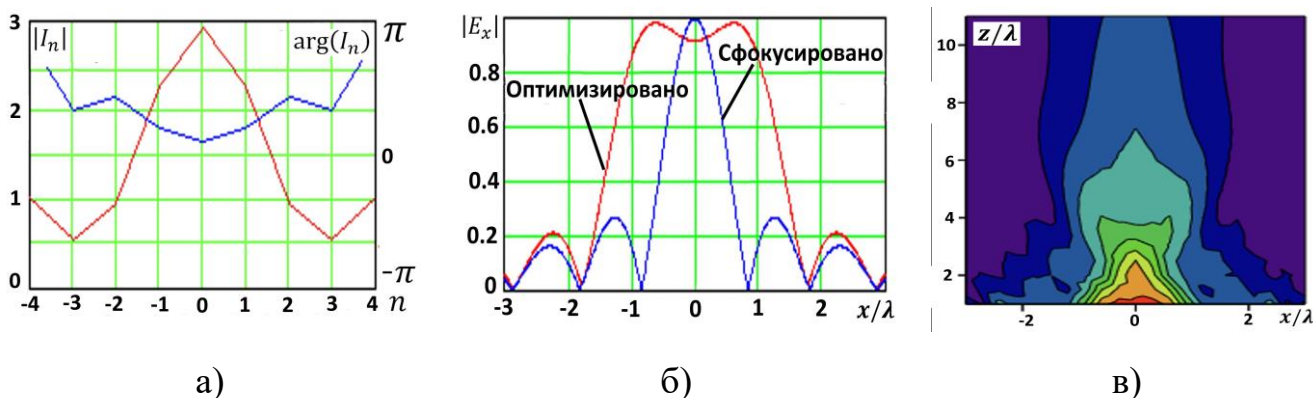


Рис. 8. Синтез пространственного распределения. а) – огибающая токов излучателей, б) – распределение в фокальной плоскости, в) – пространственное распределение

Заключение

Задача синтеза антенной решетки в зоне ближнего излученного поля по широкополосному сигналу имеет ряд существенных отличий от аналогичных, соответствующих случаю монохроматического сигнала. Разбиение на этапы «внешней» и «внутренней» задач, в большинстве практических приложений нецелесообразно. Наиболее эффективно использование концепции «конструктивного синтеза» с рассмотрением модели антенны относительно тех или иных «конструктивных» параметров, характеризующих матрицу рассеяния распределительного устройства и последующей оптимизацией относительно указанных параметров. Важно подчеркнуть и то, что решение задач синтеза по широкополосному сигналу требует в обязательном порядке наличия данных как о частотных свойствах диаграмм направленности элементов решетки, так и матриц рассеяния системы их входов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке программы ПРИОРИТЕТ-2030 и за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10059, <https://rscf.ru/project/23-79-10059/>.

Литература

1. Wehner R. S. Limitations of Focused Aperture Antennas // The RAND corp., Santa Monica, Calif., Res. Memo. RM-262, U.S. Air Force Project Ran 4 October, 1949.
2. Vickmore R. W. On focusing electromagnetic radiators // Canadian Journal of Physics. 1957. Vol. 35. № 11. P. 1292-1298.
3. Седельников Ю. Е., Тестоедов Н. А., Веденькин Д. А., Данилов И. Ю., Потапова О. В., Романов А. Г., Фадеева Л. Ю., Чони Ю. И. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля / Монография под ред. Ю. Е. Седельникова и Н. А. Тестоедова. Красноярск: Сибирский государственный аэрокосмический университет, 2015. 308 с.
4. Седельников Ю. Е., Веденькин Д. А. Антенные решетки, сфокусированные по широкополосному сигналу // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2015. Т. 18. № 3-1. С. 23-30.
5. Седельников Ю. Е., Кубланов В. С., Потапова О. В. Сфокусированные антенны-аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 7. doi: 10.30898/1684-1719.2018.7.4.
6. Хансен Р. К. Сканирующие антенные системы / пер. с англ. под ред. Г. Т. Маркова и А. Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1966. 536 с.
7. Овчаров А. П., Седельников Ю. Е. Антенные решетки для сверхширокополосных радиосредств // Антенны. 2013. № 11 (198). С. 29-36.
8. Иммореев И. Я. Широкополосность фазированных антенных решеток // Проблемы антенной техники / под ред. Л. Д. Бахраха, Д. И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989. С. 66-87.
9. Сазонов Д. М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. М.: Радиотехника, 2015. 144 с.

10. Седельников Ю. Е. К расчету распределительных устройств антенных решеток // Антенны. Связь. 1974. Т. 19. С. 21-29.
11. Мишустин Б. А. Синтез реактивного многополюсника по заданной матрице рассеяния // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1968. Т. XI. № 12. С. 128.
12. Андреев В. А., Маторин А. В., Поповкин В. И., Седельников Ю. Е. Определение параметров управляющих устройств антенной решетки по заданной диаграмме направленности // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 3. С. 473-484.
13. Чаплин А. Ф. Анализ и синтез антенных решеток. Вища школа. Львов: Издательство при Львовском университете, 1987. 180 с.
14. Никитин В. В., Французов А. Д. Синтез конструкции антенной решетки // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 38–42.
15. Прокопенко Н. Ю. Методы оптимизации: учебное пособие. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2018. 118 с.
16. Vedenkin, D., Morozov, O., Sedelnikov, Y., Agliullin, T., Nasybullin, A. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum-Difference Signal Processing // Electronics. 2023. Vol. 12. № 2. p. 436. doi: 10.3390/electronics12020436.

References

1. Wehner R. S. Limitations of Focused Aperture Antennas // The RAND corp., Santa Monica, Calif., Res. Memo. RM-262, U.S. Air Force Project Ran 4 October, 1949.
2. Bickmore R. W. On focusing electromagnetic radiators // Canadian Journal of Physics, 1957, Vol. 35, no. 11, P. 1292-1298.
3. Sedelnikov Yu. E., Testoedov N. A., Vedenkin D. A., Danilov I. Yu., Potapova O. V., Romanov A. G., Fadeeva L. Yu., Choni Yu. I. *Antenny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polja. Monografija* [Antennas focused in the zone of the near radiated field. Monography]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University Publ., 2015. 308 p. (in Russian).
4. Sedelnikov Yu. E., Vedenkin D. A. Antennnye reshetki, sfokusirovannye po shirokopolosnomu signalu [Antenna arrays focused by broadband signals]. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2015, vol. 18, no. 3-1, pp. 23-30 (in Russian).
5. Sedelnikov Yu. E., Kublanov V. S., Potapova O. V. Focused antennas applicators for tasks of diagnostic radio thermometry. *Journal of Radio Electronics*, 2018, no. 7, p. 7. doi: 10.30898/1684-1719.2018.7.4 (in Russian).
6. Hansen R. C. *Microwave scanning antennas: Volume 1 – Apertures*. New York and London, Academic Press, 1964. 524 p.
7. Ovcharov A. P., Sedelnikov Yu. E. Antennnye reshetki dlja sverhshirokopolosnyh radiosredstv [Antenna arrays for ultra-wideband radios]. *Antenny*, 2013, no. 11 (198), pp. 29-36 (in Russian).

8. Immoreev I. Ya. Shirokopolosnost' fazirovannyh antennyh reshetok [Broadband phased array antennas]. *Problemy antennoj tehniki*, edited by L. D. Bakhrakh and D. I. Voskresenskij. Moscow, Radio and communication, 1989, pp. 66-87 (in Russian).

9. Sazonov D. M. *Mnogojelementnye antennye sistemy. Matrichnyj podhod* [Multi-element antenna systems. Matrix approach]. Moscow, Radiotekhnika, 2015, 144 p. (in Russian).

10. Sedelnikov Y. E. K raschetu raspredelitel'nyh ustrojstv antennyh reshetok [To the calculation of distribution devices of antenna arrays]. *Antenny. Svyaz*, 1974, vol. 19. pp. 21-29 (in Russian).

11. Mishustin B. A. Sintez reaktivnogo mnogopoljuskika po zadannoj matrice ras-sejanija [Synthesis of a reactive multiport network using a given scattering matrix]. *Proceedings of the Russian Universities: Radiophysics*, 1968, vol. XI, no. 12, p. 128 (in Russian).

12. Andreev V. A., Matorin A. V., Popovkin V. I., Sedelnikov Y. E. Opredelenie parametrov upravljajushhih ustrojstv antennoj reshetki po zadanoj diagramme napravlenosti [Determination of parameters of antenna array control devices based on a given radiation pattern]. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 1976, vol. 21, no. 3, pp. 473-484 (in Russian).

13. Chaplin A. F. *Analiz i sintez antennyh reshetok* [Analysis and synthesis of antenna arrays]. Vishha shkola, Lvov, Izdatelstvo pri Lvovskom universitete, 1987. 180 p. (in Russian).

14. Nikitin V. V., Francuzov A. D. Sintez konstrukcii antennoj reshetki [Synthesis of antenna array design]. *Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronics*, 2018, no. 1, pp. 38-42 (in Russian).

15. Prokopenko N. Yu. *Metody optimizacii* [Optimization methods]. Nizhnij Novgorod, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, 2018. 118 p. (in Russian).

16. Vedenkin, D., Morozov, O., Sedelnikov, Y., Agliullin, T., Nasybullin, A. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum-Difference Signal Processing. *Electronics*, 2023, vol. 12, no 2, pp. 436. doi: 10.3390/electronics12020436.

Статья поступила 22 февраля 2024 г.

Информация об авторах

Веденькин Денис Андреевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость, сети и системы передачи данных. E-mail: denis_ved@mail.ru

Седельников Юрий Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Радиофотоники и микроволновых технологий.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ. Область научных интересов: антенны, СВЧ устройства, электромагнитная совместимость. E-mail: sedhome2013@yandex.ru
Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

Direct and inverse problems for broadband antenna arrays operating in the near-radiated field zone

D. A. Vedenkin, Y. E. Sedelnikov

Purpose. Currently, broadband focused apertures are increasingly used in radio communications, microwave technologies and radio wave control. At the same time, issues related to solving the synthesis problem cannot be solved using the same approaches as for a monochromatic signal. Inevitable for the problem of synthesis using a broadband signal is the determination of the parameters of the distribution device together with the system of emitters, taking into account the function that characterizes the spatial distribution of the electromagnetic field under one or another operating option. **The purpose of the present paper** is to consider the principles of constructing antenna arrays, as the most promising for practical use, as part of equipment for receiving or transmitting broadband electromagnetic fields in the near-radiated field zone. **Methods.** The solution to the problem of implementing constructive synthesis is based on the well-known principles of electrodynamics and classical antenna theory. **Novelty.** is to propose the use of the principles of constructive synthesis of broadband focused antenna arrays, taking into account the required implementation of the spatial distribution of the focused field and the operating option. **Results.** The proposed version of the constructive synthesis of broadband focused antenna arrays makes it possible to implement a more rational way when finding the parameters of the distribution device and the emitter system of the focused antenna array, taking into account the spatial distribution function of the focused field at the near-radiated field zone. **Practical relevance** is consists in using a more effective concept of constructive synthesis with consideration of the antenna array model relative to the “design” parameters characterizing the scattering matrix of the switchgear and subsequent optimization of these parameters.

Key words: constructive synthesis, broadband signal, focused antenna array, near radiated field zone, broadband focused antenna array.

Information about Authors

Denis Andreevich Vedenkin – Ph.D. of Engineering Sciences. Docent. Associate Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Research interests: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility, networks and data transmission systems. E-mail: denis_ved@mail.ru

Yury Evgenyevich Sedelnikov – D.Sc. of Engineering Sciences. Full Professor. Professor at the Department of Radiophotonics and Microwave Technologies. Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI. Research interests: antennas, microwave devices, electromagnetic compatibility. E-mail: sedhome2013@yandex.ru

Address: 420111, Russia, Kazan, str. Karl Marx, 10.