

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ СФОКУСИРОВАННЫЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ В ЗАДАЧАХ РАДИОСВЯЗИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Д.А. Веденькин

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

Аннотация. В работе обсуждаются широкополосные сфокусированные антенные решетки, функционирующие в зоне ближнего излученного поля. Рассмотрены их основные свойства и способы формирования пространственных распределений заданных типов, а также способы синтеза сфокусированных антенных решеток, в том числе по широкополосному сигналу. Предложены варианты практического применения.

Ключевые слова: фокусировка электромагнитного поля; зона ближнего излученного поля; суммарно-разностная обработка сигналов; неразрушающий контроль.

Введение

Сейчас в самых различных областях науки и техники находят применение антенные системы и комплексы. За более чем столетнюю историю становления и развития теории и техники антенн общество прошло путь от громоздких низкочастотных излучателей до современных антенных систем с размерами в несколько сантиметров и менее. По мере увеличения верхней границы используемых частот также увеличивается рабочий диапазон частот радиотехнических систем. Находят применение системы, функционирующие в относительной полосе частот порядка 10% и более. Повышение потенциала систем радиосвязи и технической диагностики возможно, в том числе, с применением принципов фокусировки электромагнитного поля в конечную область пространства в пределах зоны ближнего излученного поля (ЗБИП) с использованием сфокусированных широкополосных электромагнитных полей (ЭМП) и формированием пространственных распределений ЭМП заданного типа.

Основные свойства ЭМП, сфокусированных в ЗБИП

Векторные потенциалы электромагнитного поля, создаваемые электрическим и магнитным токами в произвольной точке наблюдения определяются выражениями, указанными в [1] и справедливы для любых вариантов взаимного расположения излучателей и точки наблюдения. При этом получить аналитические выражения даже для относительно простых излучающих систем затруднительно. Для преодоления этого затруднения вводятся ряд упрощений, а пространство делится на дальнюю, промежуточную и ближнюю зоны (рис.1). В частности, полагается, что для дальней зоны максимальная фазовая ошибка составляет порядка $\Delta\varphi_{\max} = \pi/8$, тогда граница дальней зоны может быть записана как $r_{\text{дз}} \geq 2D^2/\lambda$. Граница ближней зоны, в которой ЭМП имеет квазистатический характер, составляет $r_{\text{бз}} \approx \lambda/2\pi$. Между этими границами располагается промежуточная зона. Часть промежуточной зоны, непосредственно примыкающую к ближней зоне и имеющую внешнюю границу порядка нескольких размеров апертуры, называют ЗБИП.

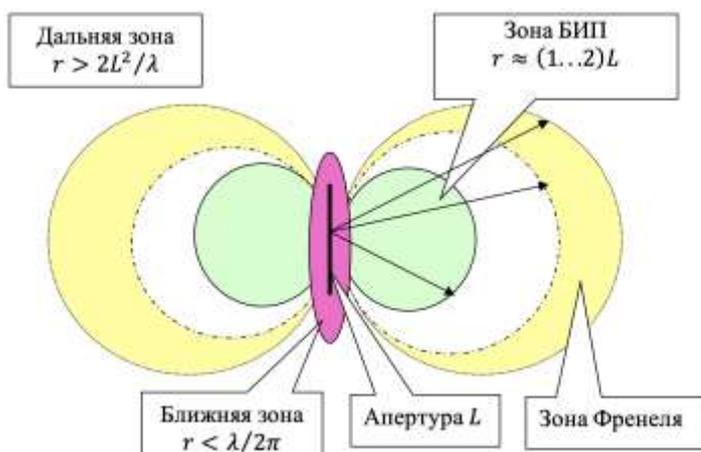


Рис. 1. Зоны излучения для источника конечных размеров

Особенностью ЗБИП является то, что при задании требуемых фазовых распределений излучающих токов возможна концентрация ЭМП в некоторой области конечных размеров (рис. 2), что открывает дополнительные возможности по повышению характеристик систем радиосвязи, технической диагностики, микроволновых технологий и др.

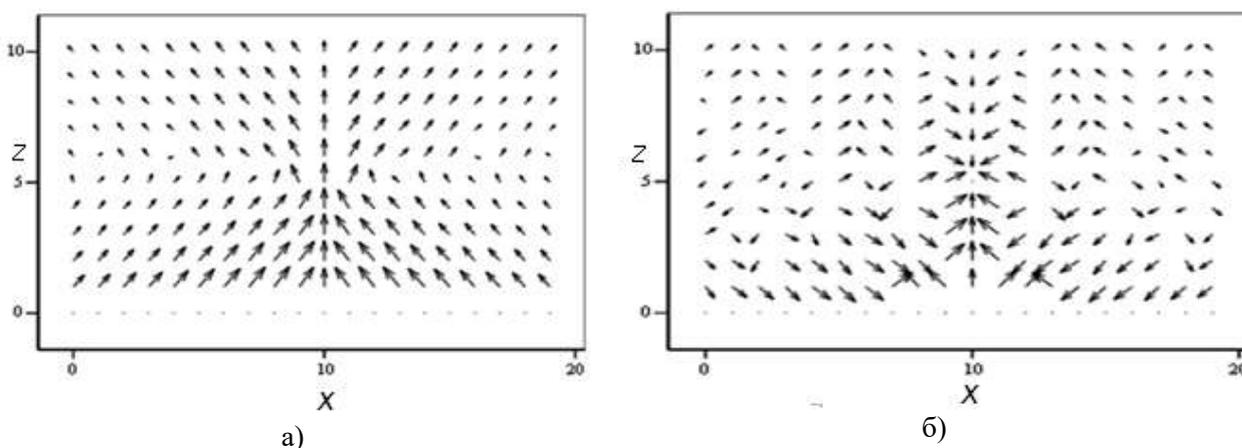


Рис. 2. Пространственное распределение вектора Пойнтинга в окрестности точки фокусировки: а) реальная часть, б) мнимая часть

К основным свойствам сфокусированных ЭМП можно отнести:

- 1) размеры сфокусированной области;
- 2) коэффициент направленного действия (КНД);
- 3) уровни боковых лепестков (УБЛ).

Следует отметить, что в целом свойства сфокусированных ЭМП совпадают с таковыми в дальней зоне (ДЗ), однако имеются и некоторые отличительные особенности, например, конечные размеры области фокусировки, формируемой вдоль оси излучения антенны. Количественные оценки свойств сфокусированных ЭМП приведены в [2]. Аналогично случаю ДЗ, к настоящему времени практически разработана апертурная теория антенн, сфокусированных в ЗБИП, представленная в монографии [3].

Формирование специальных пространственных распределений

Применительно к ДЗ разработаны способы формирования ДН с провалом в некотором направлении, т.н. разностной ДН. У данной ДН существует аналог и в ЗБИП. При этом, ввиду конечных размеров области фокусировки, разностные ДН могут быть сформированы как в продольной, так и в поперечной плоскостях. Для этого необходимо внесение соответствующих фазовых поправок [4]. Результаты формирования разностных распределений показаны на рис. 3.

Используя иные варианты фазовых распределений излучающих токов возможно формирование специальных пространственных распределений, например, с некоторым ненулевым значением амплитуды сфокусированного поля в точке фокусировки и др. Применение специальных пространственных распределений и суммарно-разностной обработки позволит повысить точность средств технической диагностики.

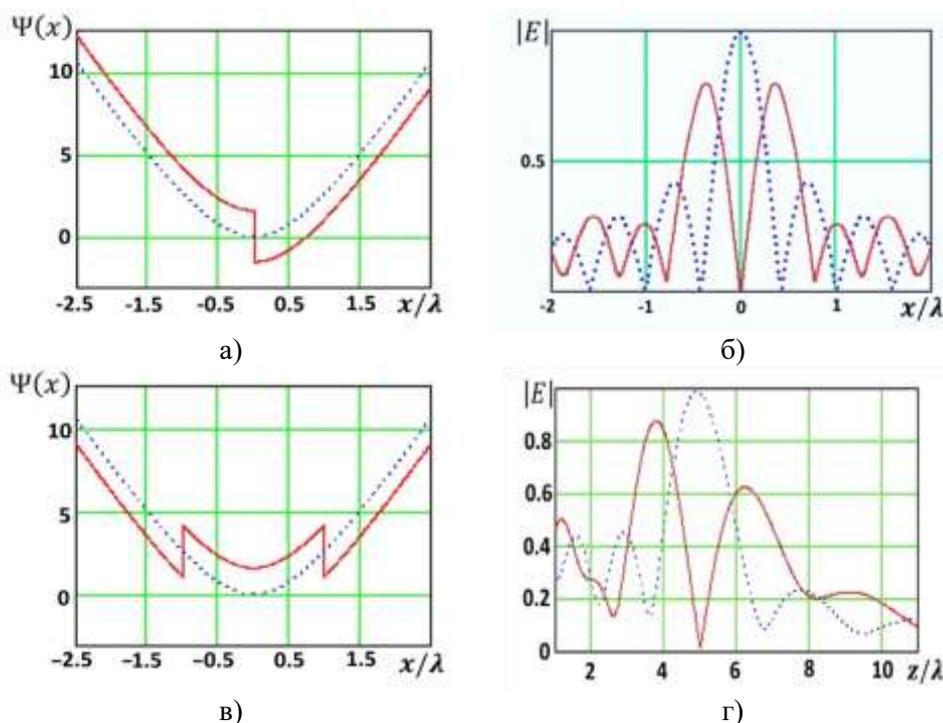


Рис. 3. Формирование разностных распределений: а), в) фазы излучающих токов, б), г) пространственные распределения

Широкополосные сфокусированные антенные решетки

Значительное количество работ по антеннам, сфокусированным в ЗБИП описывает фокусировку монохроматических сигналов (МХС). При этом использование в задачах фокусировки широкополосных сигналов (ШПС) открывает возможность повышения потенциала применения систем радиосвязи и диагностики. В настоящее время практически нет публикаций, посвященных фокусировке ШП ЭМП, за исключением, пожалуй, статьи [5].

Рассмотрим результаты математического моделирования ШП сфокусированной линейной антенной решеткой (АР), состоящей из 15 излучателей, функционирующей в полосе частот $\Delta f = 100\text{МГц}$ и $f_0 = 1,5\text{ГГц}$. Законы распределения энергии в спектрах сигналов представлены на рис. 4.

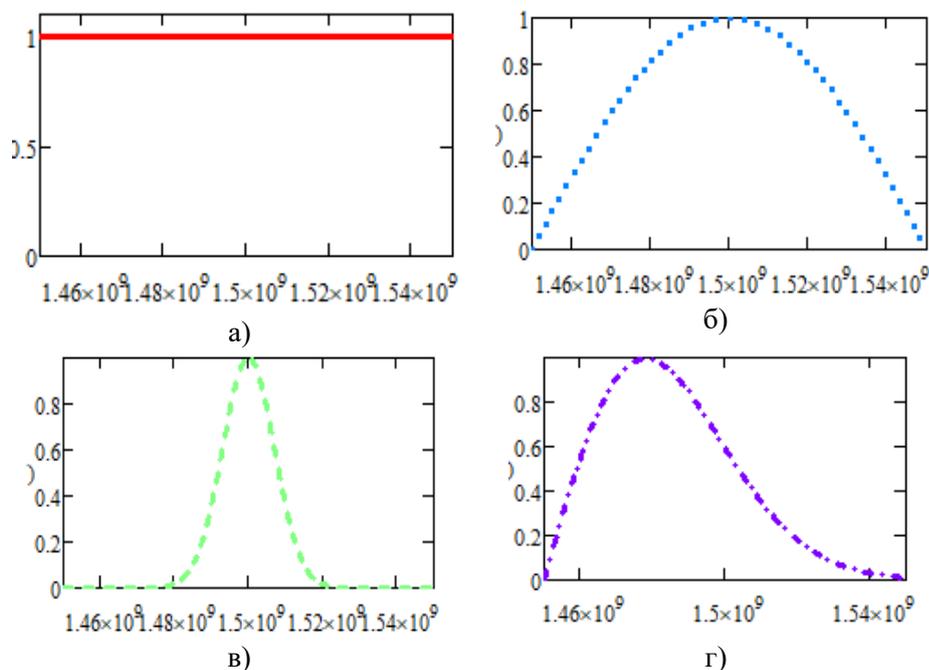


Рис. 4. Спектры фокусируемых ШП сигналов

Для сравнения рассмотрим идентичную АР, сфокусированную по монохроматическому сигналу. Сравнение будем проводить при равенстве излучаемых мощностей. Пространственные распределения напряженности электрического поля (в дБ) приведены на рис. 5. Сплошная кривая ярко-синего цвета соответствует МХС.

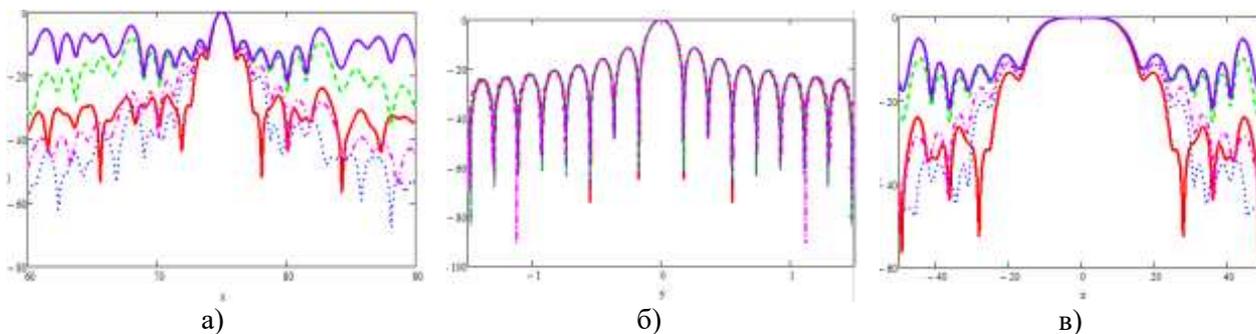


Рис. 5. Пространственные распределения поля

а) вдоль направления на точку фокусировки, б) вдоль горизонтальной оси фокальной плоскости, в) вдоль вертикальной оси фокальной плоскости.

Цвет и тип линии соответствуют спектральным распределениям на рис. 4

Как видно из графиков, представленных на рис. 5 для сфокусированных ШПС характерно значительное снижение УБЛ, по сравнению с МХС. При этом, в окрестности точки фокусировки и ближайших к ней боковых лепестках, пространственные распределения практически идентичны, некоторое различие наблюдается для ШП сигнала с несимметричным спектром. Этот факт означает, что основные свойства ШП сфокусированных полей с симметричным спектром в окрестности точки фокусировки практически не отличаются от случая монохроматического сфокусированного ЭМП.

Широкополосные АР со специальными распределениями ЭМП

Предложенный вариант формирования пространственных распределений разностного типа для МХС и его обобщение в виде специальных пространственных распределений может быть распространено и на ШП сфокусированные ЭМП. Для этого необходимо обеспечить в соответствии с методом, предложенным в [4], фазовые сдвиги по каждой из излучаемых частот спектра. Также как и для МХС, возможно формирование разностных распределений двух типов. Иллюстрирующие графики пространственных распределений монохроматического (синий график) и ШП (красный график) сигналов представлены на рис. 6.

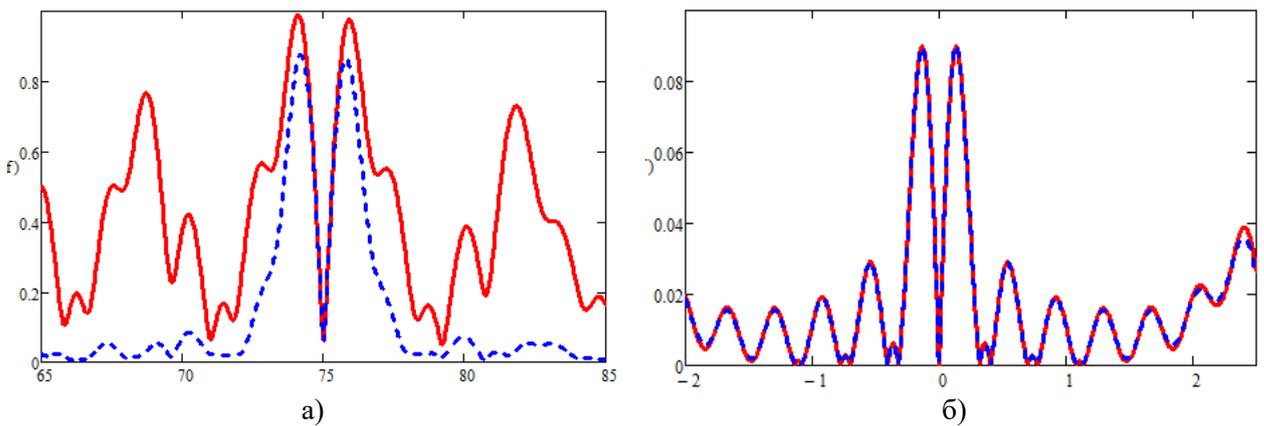


Рис. 6. Разностные пространственные распределения ШПС вдоль: а) направления на точку фокусировки, б) горизонтальной оси фокальной плоскости

Из графиков на рис. 6 видно, что УБЛ разностного пространственного распределения сфокусированного ШПС значительно меньше чем у монохроматического, что означает возможность повышения точности и расширения диапазона однозначности оценки при реализации алгоритмов суммарно-разностной обработки в задачах радиосвязи и диагностики.

Анализ и синтез АР в ЗБИП по МХ и ШП сигналам

Для большинства прикладных радиотехнических задач широко используются АР с фидерной схемой возбуждения и для описания их количественных характеристик достаточно точным способом является матричная модель с поэлементным учетом всех взаимных связей. Рассмотрим АР, в виде соединения конечного числа излучателей и распределительного устройства (РУ), представленную на рис. 7.

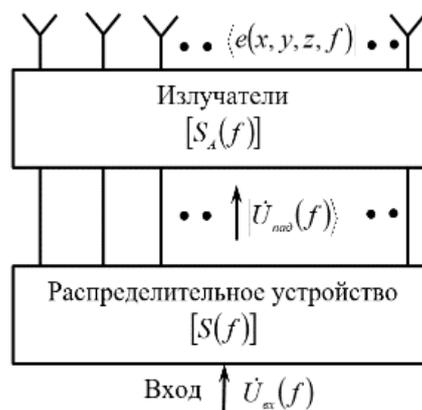


Рис. 7. Модель антенной решетки

Рассмотрим случай МХС с центральной частотой f_0 , формируемого излучателями заданного типа и сфокусированного в заданную область. Требуется найти расположение излучателей и параметры диаграммообразующей схемы по заданной функции пространственного распределения ЭМП $\dot{E}_{MX}^{\text{зад}}(x, y, z, f_0)$. Решение этой задачи существует и может проводиться в два этапа (рис 8).

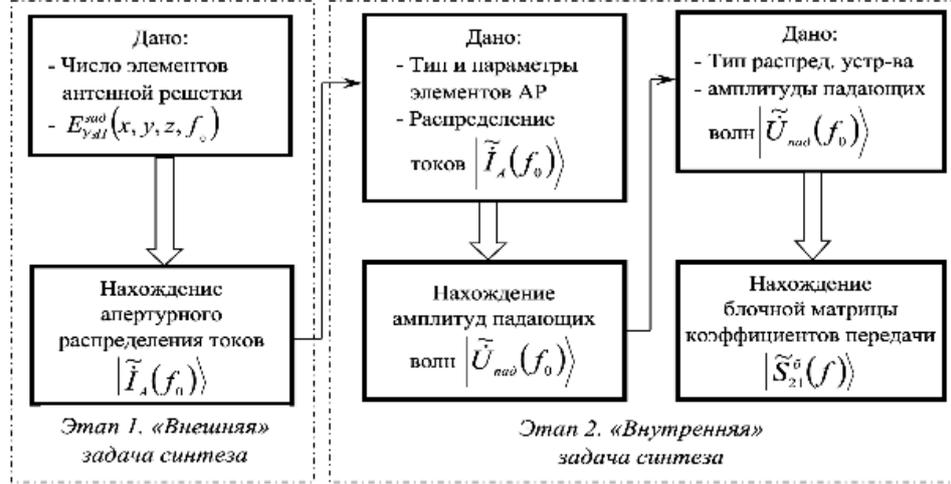


Рис. 8. Решение задачи синтеза для МХС

На первом этапе при заданном типе, числе и расположении излучателей АР, решение «внешней» задачи состоит в определении токов элементов АР, обеспечивающей формирование ЭМП требуемого вида

$$\left\| \dot{E}_{MX}^{\text{зад}}(x, y, z, f_0) - \langle e(x, y, z, f_0) |, \langle \tilde{I}_A(f) \rangle \right\| = \min. \quad (1)$$

На втором этапе задается тип РУ, характеризуемого матрицей рассеяния

$$\left[\dot{S}(f_0) \right] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11}(f_0) & \langle \dot{S}_{21}^{\text{б}}(f_0) \rangle^T \\ \langle \dot{S}_{21}^{\text{б}}(f_0) \rangle & \left[\dot{S}_{22}^{\text{б}}(f_0) \right] \end{bmatrix} \quad (2)$$

Распределительное устройство должно создавать на входах элементов решетки волны с комплексными амплитудами $\langle \tilde{U}_{\text{пад}}(f_0) \rangle$

$$\langle \tilde{U}_{\text{пад}}(f_0) \rangle = \left[1 - \left[\dot{S}_A(f_0) \right] \right]^{-1} \langle \tilde{I}_A(f_0) \rangle. \quad (3)$$

Требуется найти такие параметры РУ $\langle \tilde{S}_{21}^{\text{б}}(f_0) \rangle$, которые бы обеспечивали выполнение равенства

$$\langle \tilde{U}_{\text{пад}}(f_0) \rangle = \left[\dot{E} - \left[\dot{S}_A(f_0) \right] \right]^{-1} \langle \tilde{S}_{21}^{\text{б}}(f_0) \rangle U_{\text{вх}}. \quad (4)$$

Решение для (4) существует для любого типа РУ и является единственным, что означает возможность для МХС решения обратной задачи путем разбиения её на два этапа.

Перейдем к случаю ШПС. В конечном счете задача синтеза ставится как нахождение параметров РУ *совместно* с системой излучателей по заданным значениям функции пространственного распределения ЭМП в режиме приема или передачи. Функции $\dot{E}_{\text{шп}}(x, y, z)$ определяются параметрами матрицы рассеяния РУ $[\dot{S}(f)]$, а также частотной зависимостью матрицы рассеяния системы входов излучателей $[S_A(f)]$. Традиционный подход к решению задачи синтеза с разбиением на два этапа требует нахождение оптимального комплексного апертурного распределения $|\tilde{I}_A(f)\rangle$, обеспечивающего формирование пространственного распределения $\dot{E}_{\text{шп}}(x, y, z)$ близкого к заданному пространственному распределению $\dot{E}_{\text{шп}}^{\text{зад}}(x, y, z)$ путем минимизации по всем возможным апертурным распределениям.

$$\left\| \int_{f_1}^{f_2} \sum_{n=1}^N \dot{I}_n(f) e_n(x, y, z, f) K(f) df - \dot{E}_{\text{шп}}^{\text{зад}}(x, y, z) \right\| \rightarrow \min_{|\dot{I}_A(f)\rangle} \quad (5)$$

где $K(f)$ – частотная характеристика.

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

$$\dot{I}_n(f) = \sum_{m=1}^M \dot{Y}_{nm} \dot{y}_m(f), \quad (6)$$

с последующим нахождением коэффициентов разложения \dot{Y}_{nm} .

Тогда

$$\left\| \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \dot{Y}_{nm} \dot{g}_{nm}(x, y, z) - \dot{E}_{\text{шп}}^{\text{зад}}(x, y, z) \right\| \rightarrow \min_{\dot{Y}_{nm}} \quad (7)$$

где

$$\dot{g}_{nm}(x, y, z) = \int_{f_1}^{f_2} \dot{y}_m(f) \dot{e}_n(x, y, z, f) K(f) df. \quad (8)$$

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

$$|\tilde{I}_A(f)\rangle = \dot{e}_n(x_0, y_0, z_0, f) / \sqrt{\sum_{n=1}^N \|\dot{e}_n(x_0, y_0, z_0, f)\|^2}. \quad (9)$$

Следующим шагом является нахождение требуемых амплитуд падающих волн на входах элементов АР

$$|\tilde{U}_{\text{пад}}(f)\rangle = [\dot{E} - [\dot{S}_A(f)]]^{-1} |\tilde{I}_A(f)\rangle. \quad (10)$$

Полученные значения должны быть обеспечены выбором типа РУ и параметров $[\dot{S}(f)]$. Тогда

$$|\tilde{U}_{\text{пад}}(f)\rangle = [\dot{E} - [\dot{S}_{22}(f)][\dot{S}_A(f)]]^{-1} [\tilde{S}_{21}(f)] U_{\text{вх}}(f). \quad (11)$$

В общем случае, решение задачи нахождения параметров РУ неизвестно, причем точного решения, скорее всего, не существует. Для практических задач можно предложить следующий подход: при выбранном типе и структуре РУ рассматривается его матрица рассеяния, как зависящая от K параметров, обозначаемых $\langle V | = (V_1, V_2, \dots, V_K)$.

Конкретные значения параметров $\langle V |$ определяются по критерию:

$$|\tilde{U}_{\text{пад}}(f)\rangle - U_{\text{пад}}[S(f, \langle V |)] \rightarrow \min_{\langle V |}. \quad (12)$$

Более рациональным и при этом более простым в реализации представляется подход, основанный на принципах конструктивного синтеза. Способ решения подобной задачи показан на рис. 9.



Рис. 9. Решение задачи конструктивного синтеза

Будем считать, что структура РУ выбрана. Тогда в задаче синтеза заданными являются тип и параметры элементов АР, а также тип РУ, матрица рассеяния которого однозначно определяется параметрами вектора $\langle V |$, тогда

$$[\dot{S}] = [S(f, |V\rangle)]. \quad (13)$$

Задача синтеза в этом случае состоит в нахождении параметров РУ $\langle V |$, обеспечивающих формирование характеристики пространственного распределения $\dot{E}_{\text{сум}}(x, y, z, |V\rangle)$, максимально приближающейся к заданному пространственному распределению $\dot{E}_{\text{сум}}^{\text{зад}}(x, y, z)$

$$\|\dot{E}_{\text{сум}}(x, y, z, |V\rangle) - \dot{E}_{\text{сум}}^{\text{зад}}(x, y, z)\| \rightarrow \min. \quad (14)$$

Нахождение параметров РУ $\langle V |$ согласно (14) может быть осуществлено с использованием известных алгоритмов поиска локального экстремума функции нескольких переменных. Решение в данном случае облегчается наличием априорной информации – возможностью выбора начальной точки – значений параметров $\langle V |$, соответствующих распределению значений $|\tilde{I}_A(f)\rangle$ согласно критерию «токовой» модели для центральной частоты заданной полосы частот ШПС.

Практические приложения АР, сфокусированных по ШПС

Рассмотренные свойства АР, сфокусированных в ЗБИП по ШПС, открывают новые возможности по повышению потенциала средств и систем радиосвязи, технической диагностики и микроволновых технологий. К основным вариантам практического применения можно отнести:

- 1) организация связи с удаленным корреспондентом, находящимся в заданной области пространства;
- 2) формирование виртуальных целей;
- 3) пеленгация объектов, находящихся в зоне работы средств радиоразведки;
- 4) формирование прицельных по пространству помех;
- 5) повышение точности и разрешающей способности средств технической диагностики;
- 6) реализация адаптивных принципов функционирования микроволновых технологических и биомедицинских комплексов.

Выводы

В работе представлены основные свойства ШП сфокусированных ЭМП, приведены способы формирования специальных пространственных распределений, сфокусированных ШП ЭМП. Предложены варианты практического применения ШП АР, сфокусированных в ЗБИП. Показано, что в задаче синтеза антенной решетки в ЗБИП по ШПС разбиение её на этапы «внешней» и «внутренней» задач возможно, но является, в общем случае, нецелесообразным. Наиболее рациональный путь состоит в использовании принципов конструктивного синтеза.

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/>.

Список литературы

1. Неганов В.А. Электродинамика и распространение радиоволн: учебное пособие / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский и др.; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 744 с.
2. Веденькин Д.А. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля / Д. А. Веденькин, Ю. Е. Седельников // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 131-146. – DOI 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146. – EDN UEXGUJ.
3. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля. Основы теории и технические приложения / под общ. ред. Ю.Е. Седельникова и Н.А. Тестоедова. – Красноярск: Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т, 2015. - 308 с.

4. Vedenkin, D. Increasing the Accuracy Characteristics of Focused Electromagnetic Devices for Non-Destructive Testing and Technical Diagnostics by Implementing Sum–Difference Signal Processing / D. Vedenkin, O. Morozov, Sedelnikov Y, Agliullin T, Nasybullin A. // *Electronics*. – 2023. – 12. – № 2. – 436. <https://doi.org/10.3390/electronics12020436>
5. Седельников Ю. Е. Антенные решетки, сфокусированные по широкополосному сигналу / Ю. Е. Седельников, Д. А. Веденькин // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. – 2015. – Т. 18, № 3-1. – С. 23-30. – EDN VIDJPX.

WIDEBAND FOCUSED ANTENNA ARRAYS IN RADIO COMMUNICATIONS AND TECHNICAL DIAGNOSTICS

D.A. Vedenkin

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

Annotation. The paper discusses broadband focused antenna arrays operating in the near-radiated field zone. Their main properties and methods for forming spatial distributions of given types, as well as methods for synthesizing focused antenna arrays, including using a broadband signal, are considered. Options for practical application are proposed.

Keywords: electromagnetic field focusing; near radiated field zone; sum–difference signal processing; non-destructive testing.

Статья отправлена в редакцию 06 июня 2024 г.