

УДК 621.391

Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля

Веденькин Д. А., Седелников Ю. Е.

Постановка задачи: Рассматривается задача радиоволнового контроля неметаллических материалов. В основу положен метод эхолокации, осуществляемой с использованием антенной системы, сфокусированной в зоне ближнего излученного поля. Даются краткие сведения о наиболее существенных свойствах сфокусированных электромагнитных полей. Наряду с традиционными сфокусированными полями предложено использовать сфокусированные поля разностного типа, аналогичные по ряду свойств излучениям с диаграммой направленности разностного типа. Совместное использование в радиоволновой эхолокационной диагностике сфокусированных полей суммарного и разностного типов позволяет повысить точность определения координат дефекта, а также существенно ослабить негативное влияние наличия боковых лепестков. **Целью работы** является выявление основных свойств электромагнитных полей, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля с выработкой на их основе предложений по формированию распределения сфокусированного электромагнитного поля разностного типа в продольном и поперечном направлениях относительно линейной антенной решетки. **Используемые методы:** решение задачи формирования разностных сфокусированных распределений основано на известных принципах электродинамики и апертурной теории антенн. **Новизна:** впервые предложены принципы формирования и использования распределений сфокусированных электромагнитных полей в продольном и поперечном направлениях относительно линейной антенной решетки. **Результат:** показана практическая возможность реализации разностных сфокусированных распределений электромагнитного поля в продольном и поперечном направлениях относительно линейной сфокусированной антенной решетки и их использования в задаче радиоволнового контроля. **Практическая значимость:** Использование распределений сфокусированного электромагнитного поля разностного типа позволяет при суммарно-разностной обработке сигналов повысить точность определения координат объекта, снизить негативное влияние сигналов, принятых по боковым лепесткам сфокусированного поля.

Ключевые слова: фокусировка электромагнитного поля, суммарно-разностная обработка сигналов, зона ближнего излученного поля, радиоволновая диагностика, область фокусировки, разностное распределение поля.

Введение

Диагностика различных материалов и изделий средствами неразрушающего контроля является неотъемлемой частью производственных процессов в самых различных областях техники. Теория и техника неразрушающего контроля продолжает развиваться как в части совершенствования аппаратурной составляющей, так и путем совершенствования методов обработки данных физических измерений и интерпретации их результатов [1]. В этих целях используется широкий спектр физических явлений, в том числе волновые процессы. В

Библиографическая ссылка на статью:

Веденькин Д. А., Седелников Ю. Е. Сфокусированные антенны в задачах неразрушающего радиоволнового контроля // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 131-146. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146

Reference for citation:

Vedenkin D. A., Sedelnikov Y. E. Focused antennas in non-destructive radio wave testing. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 2, pp. 131-146 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-131-146

последнее время внимание специалистов все чаще обращается на использование электромагнитных волновых процессов, являющиеся основой радиоволновых методов диагностики [2]. В частности, в последние годы выполнено большое число работ, посвященных радиоволновым методам контроля материалов, в том числе композитных [3-6]. Прогресс в радиолокации, а также в задачах неразрушающего акустического контроля, в немалой степени обязан широкому использованию антенных решеток, в том числе фазированных, с синтезированной апертурой (англ. Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)), а также сфокусированных [7-9]. В технике акустического неразрушающего контроля решетки излучателей широко применяются на практике уже в настоящее время. Их использование в радиоволновом контроле представляется весьма многообещающим, в том числе в ближнепольной эхолокационной диагностике. В настоящей работе рассматриваются свойства сфокусированных антенных решеток и пути улучшения показателей радиоволнового контроля за счет их использования. Рассматривается классический вариант эхолокационной диагностики, основанный на излучении электромагнитной волны в обследуемую область, приеме и регистрации волн, отраженных имеющимися нерегулярностями. В радиоволновой диагностике, в отличие от средств акустического контроля, более распространено и даже предпочтительнее применение относительно узкополосных электромагнитных колебаний.

1. Фокусировка в зоне ближнего излученного электромагнитного поля

Принцип эхолокационной радиоволновой диагностики, как и классических задач радиолокации, основан на явлении рассеяния электромагнитных волн, распространяющихся в пространстве, различного рода неоднородностями. В отличие от классических задач радиолокации, при радиоволновом контроле распространение радиоволн и рассеяние их нерегулярностями, как правило, имеет место не в дальней зоне излучения, а на расстояниях от антенн, соизмеримых с их геометрическими размерами. Эта область пространства называется зоной ближнего излученного поля. Электромагнитные поля в этой зоне обладают рядом свойств, существенно отличающихся от классического случая дальней зоны. Рассмотрение возможностей повышения технических показателей и информативности радиоволновой эхолокационной диагностики с использованием антенных решеток целесообразно предварить краткими сведениями о наиболее существенных свойствах электромагнитных полей в указанных областях пространства.

Согласно классическим представлениям [10], электромагнитное поле, создаваемое источником конечных электрических размеров L/λ , в зависимости от положения точки наблюдения имеет различную структуру (рис. 1).

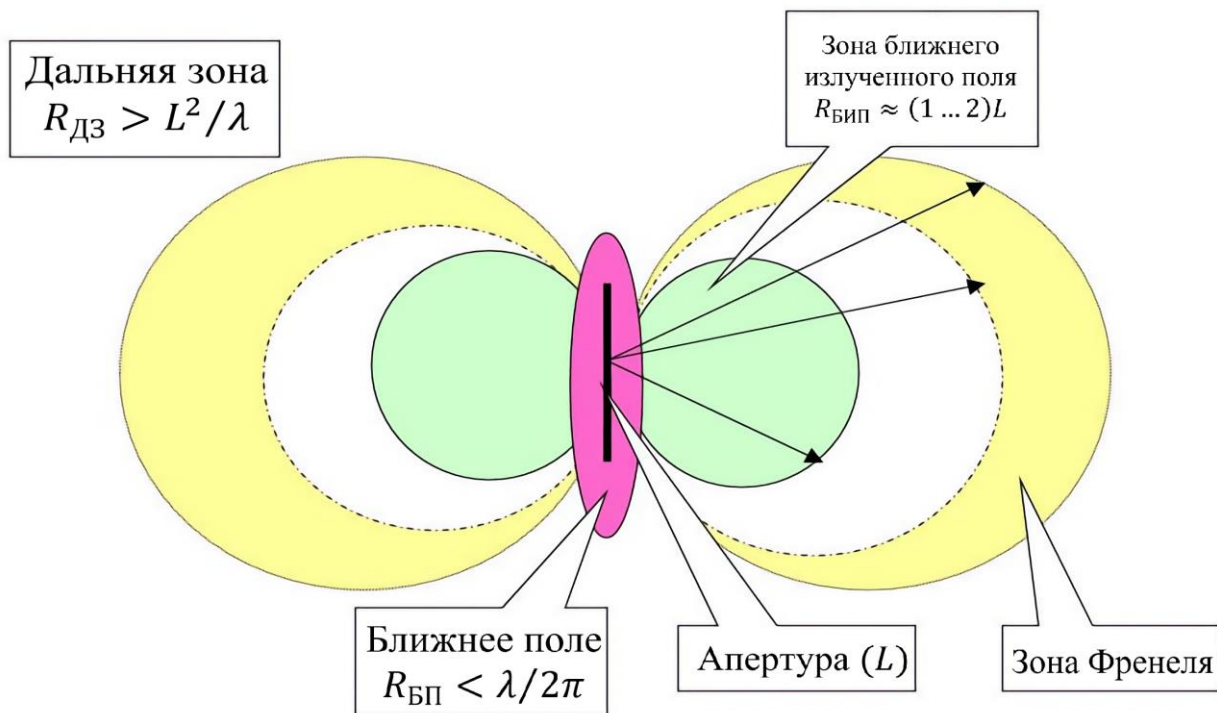


Рис. 1. Зоны излучения источника конечных размеров

В дальней зоне электромагнитное поле представляет собой неоднородную сферическую волну, характеризуемую монотонным убыванием амплитуды и обладающего угловой зависимостью $E(\theta, \varphi) \cdot \frac{\exp[-j(\alpha + j\beta)kr]}{r}$. Для многих практических задач антенной реализуется направленное излучение, когда амплитудная диаграмма направленности $F_{АМПД}(\theta, \varphi) = const|E(\theta, \varphi)|$ по форме представляет собой выраженный пик с максимумом в направлении (θ_0, φ_0) . В пространственном распределении $|E(\theta, \varphi)|$ неизбежно присутствуют «всплески» меньшей интенсивности – боковые лепестки. В большинстве практических задач радиосвязи используются электромагнитные поля дальней зоны. Электромагнитное поле, возбуждаемое направленной антенной, можно рассматривать как сфокусированное в заданном направлении (θ_0, φ_0) , рис.2.

Область, заключенная между условной границей ближней зоны и расстоянием порядка размера апертуры антенны называют зоной ближнего излученного поля (рис. 1). Как показано в [10] сфокусированное поле по форме также представляет выраженный пик, окруженный всплесками меньшей интенсивности, аналогичными боковым лепесткам диаграммы направленности в дальней зоне.

В целях наглядности в дальнейшем ограничимся случаем линейной антенны (рис. 2,а) заданной электрической длины L/λ , сфокусированной в точку $(0, z_0/\lambda)$, где λ – длина волны.

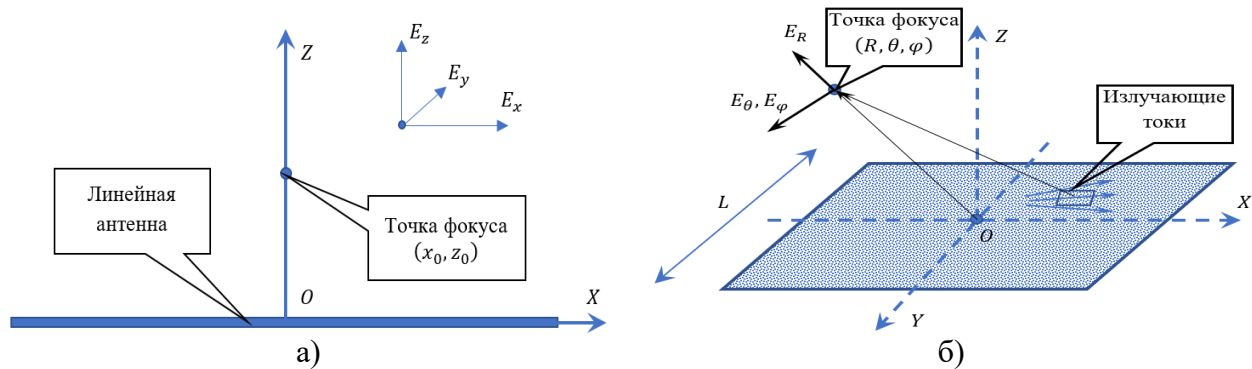


Рис. 2. Линейная (а) и плоская (б) апертуры, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля

Расчеты распределения электромагнитного поля в дальней зоне и в зоне ближнего излученного поля проводились с использованием модельного представления электромагнитного поля в зоне ближнего излученного поля [10] в среде Mathcad. Результаты показаны на рис. 3 и 4.

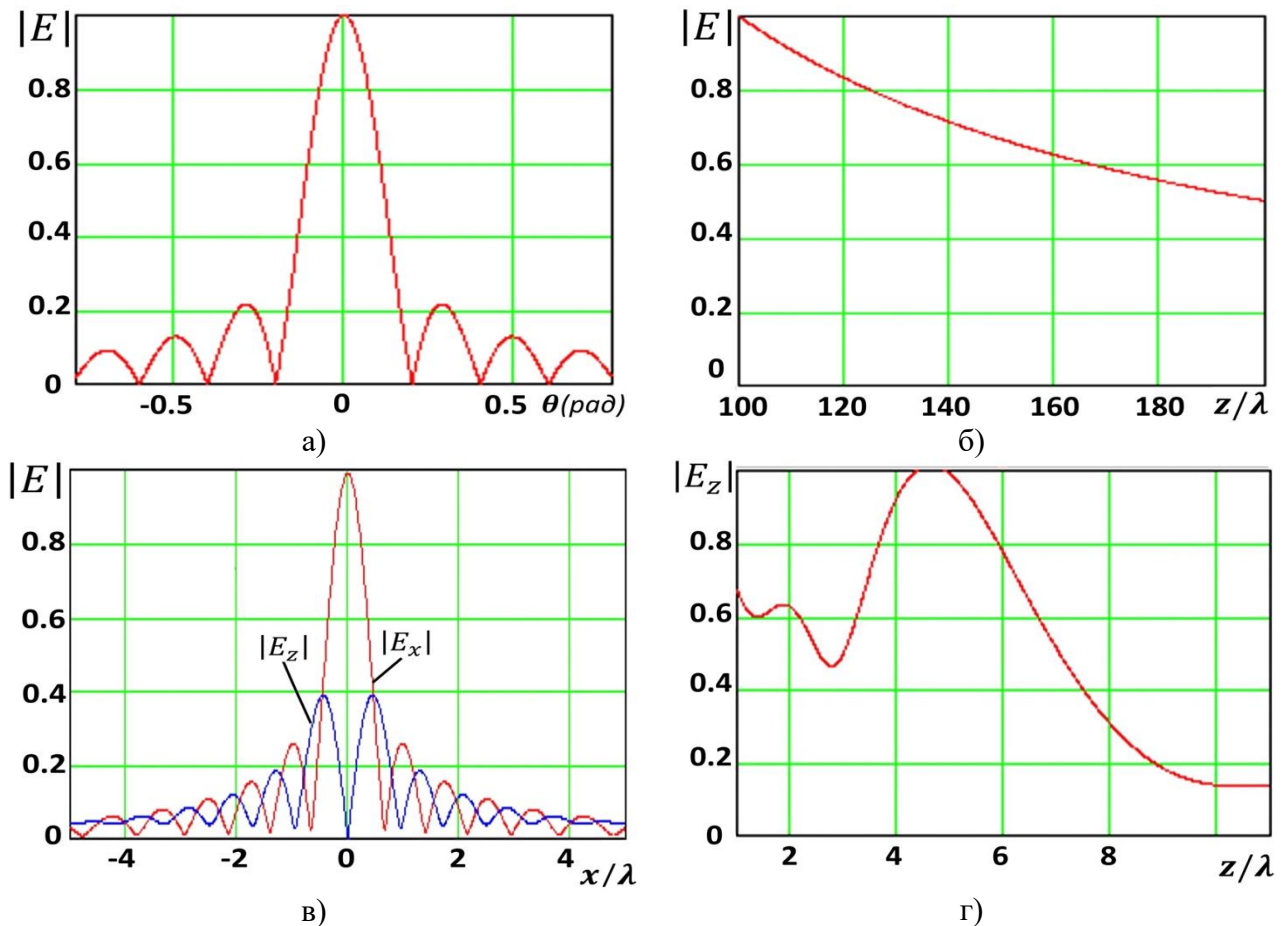


Рис. 3. Пространственное распределение напряженности электрического поля линейной антенны длиной 10λ в дальней зоне и сфокусированной на расстоянии $z_0 = 5\lambda$: а) и б) – нормированные угловая и поперечная зависимости компоненты $|E_x|$ в дальней зоне, в) и г) – зависимость нормированных значений компонент напряженности электрического поля в зоне ближнего излученного поля

Сфокусированные электромагнитные поля в указанной области, являющиеся результатом интерференции неоднородных сферических волн, излучаемых элементарными участками области токов, обладают рядом уникальных свойств, существенно отличающих их от свойств полей дальней зоны. Прежде всего, это возможность осуществления фокусировки линейной антенной не только в поперечном, но и продольном направлениях и трехмерной фокусировки полей двумерной, в частности плоской, апертурой. Угловое распределение напряженности поля в дальней зоне и пространственное распределение в окрестности фокуса в значительной мере имеют сходство (рис. 4).

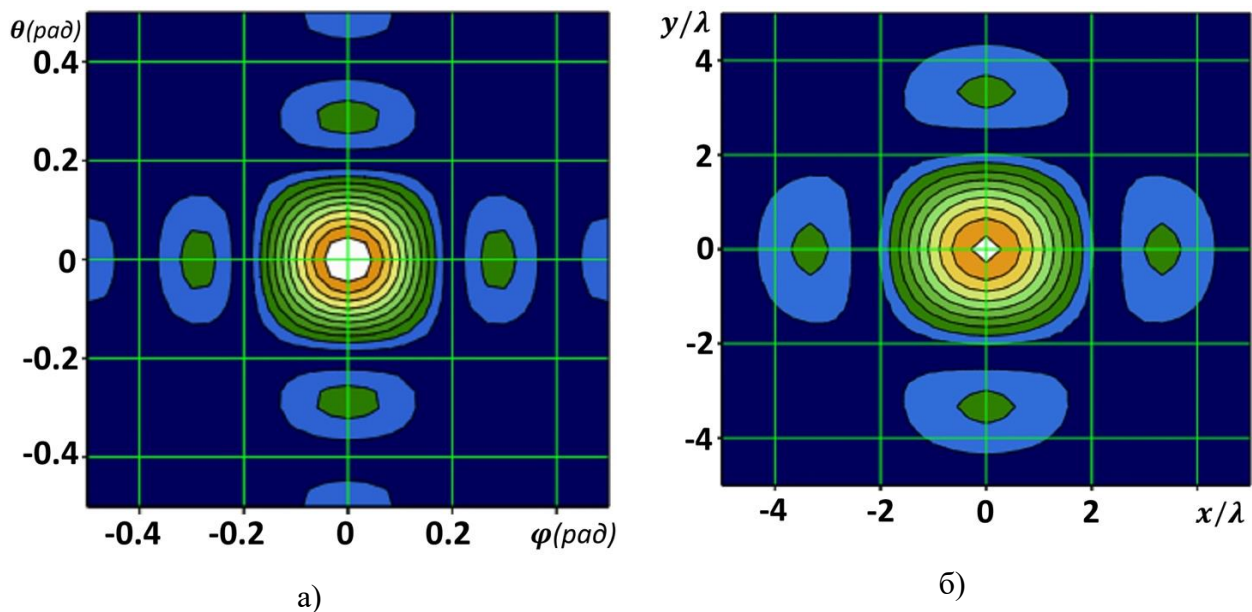


Рис. 4. Нормированное распределение напряженности электрического поля а) $E(\theta, \varphi)$ в дальней зоне, б) в фокальной плоскости. Антенна – квадрат со стороной 10λ , фокусное расстояние – 5λ

Напряженности поля в дальней зоне и пространственного распределения поля в зоне ближнего излученного поля, а также принципы локации в дальней зоне и в зоне ближнего излученного поля аналогичны.

2. Принцип и особенности эхолокационной диагностики в зоне ближнего излученного поля

При проведении эхолокационной диагностики в зоне ближнего излученного поля, аналогично случаям радиолокации в дальней зоне, производится сканирование некоторой части пространства. В дальней зоне – путем перемещения направленного потока электромагнитных волн в угловых направлениях, например, путем поворота главного луча диаграммы направленности (ДН) антенны. Максимальный отраженный сигнал имеет место при наличии отражающего объекта в пределах главного луча диаграммы направленности. Аналогично осуществляется эхолокационная диагностика и в зоне ближнего излученного поля: заданную область пространства сканируют сфокусированной областью с

максимальной интенсивностью излучаемого поля. Сканирование осуществляется: в продольном направлении E_x (рис. 2) – путем механического перемещения антенной решетки, либо путем электронного управления фазами возбуждения ее элементов, аналогично фазированной антенной решетке (ФАР) [10]. В поперечном направлении E_z – путем перемещения точки фокусировки за счет изменения фаз возбуждения элементов. В этих случаях отраженный сигнал также будет максимален, когда отражающий объект (неоднородность) окажется в сфокусированной области пространства. Таким образом, факт наличия неоднородности проявляет себя отраженным сигналом, а положение сфокусированной области позволяет определить ее пространственные координаты. Принципиальным отличием эхолокации, осуществляемой в зоне ближнего излученного поля, является то, что дальность до обнаруживаемой нерегулярности может быть определена при зондировании даже немодулированным, монохроматическим сигналом, что абсолютно невозможно для однопозиционной радиолокации в дальней зоне. Для оценки реальных возможностей эхолокации на основе принципа фокусировки необходимо рассмотреть основные свойства сфокусированных электромагнитных полей.

3. Основные свойства сфокусированных электромагнитных полей

По форме пространственные распределения напряженности электрического поля в дальней зоне в направлениях параллельно апертуре антенны и сфокусированного поля в фокальной плоскости выглядят довольно близкими (рис. 4). Однако, при детальном рассмотрении обнаруживаются и важные отличия, причем весьма существенные для эхолокационной диагностики. Рассмотрим наиболее важные из свойств сфокусированных электромагнитных полей.

Размеры сфокусированной области в фокальной плоскости. В радиолокации эта величина лимитирует, при использовании антенны с электрическими размерами L/λ , возможность углового разрешения близких объектов, а также точности определения координат в поперечном направлении на удалении R . Как известно из классической теории антенн, в дальней зоне это величина порядка $\Delta_{дз} \approx R\lambda/L$. В зоне ближнего излученного поля для среды без потерь электрические размеры сфокусированного пятна при фокусировке в точку, находящуюся на расстоянии z_0 относительно центра линейной антенны (рис. 2, а), определяются, в основном, величиной относительного фокусного расстояния z_0/L . Кроме того, минимальное значение этой величины, составляет около половины длины волны (в [9] приводится значение $\Delta_{nonep} \approx [0,43 + 0,4(z_0/L)]\lambda$). В реальных диссипативных средах, представляющих интерес для применения методов радиоволновой эхолокации, возможности фокусировки в зоне ближнего излученного поля дополнительно ограничены коэффициентом затухания электромагнитных волн в среде – α , причем возможность фокусировки сохраняется в продольном направлении вплоть до значений $\alpha\lambda = 1,5 \dots 2$.

Размеры сфокусированной области в поперечном направлении. Фокусировка в поперечном направлении (рис. 3, г) имеет место только в зоне ближнего излученного поля, т.е. при удалении точки наблюдения на расстояние не более величины порядка размеров апертуры антенн. Размер сфокусированной области в поперечном направлении также определяется значением относительного фокусного расстояния и при этом оказываются значительно большими аналогичного значения в продольном направлении, и, при этом быстро увеличивается при удалении от апертуры. В работе [9] приводится значение $\Delta_{\text{прод}} \approx [1,25 + 7(z_0/L)^2] \lambda$. В средах с потерями свойство фокусировки в продольном направлении деградирует по мере возрастания коэффициента затухания α и утрачивается при величине $\alpha\lambda > 0,15 \dots 0,2$.

Коэффициент направленного действия. В случаях эхолокации в дальней зоне интенсивность волны, отраженной малоразмерной неоднородностью, зависит от коэффициента направленного действия излучающей антенны. Согласно классическим представлениям величина КНД антенны зависит от ее электрических размеров – пропорциональна L/λ для линейных и $(L/\lambda)^2$ для плоских антенн. Таким образом, в средах без потерь и в отсутствии погрешностей возбуждающих токов антенны, КНД неограниченно возрастает при увеличении ее электрических размеров антенны. В зоне ближнего излученного поля интенсивность отраженной волны также зависит от степени концентрации электромагнитного поля в сфокусированной области, характеризуемой значением коэффициента направленного действия $\text{КНД}_{\text{фок}}$. Характер поведения этой величины существенно отличается от случая дальней зоны, где максимальное значение для линейной антенны составляет $2L/\lambda$. КНД в зоне ближнего излученного поля всегда имеет конечное значение ограниченное величиной относительного фокусного расстояния z_0/L . В средах без потерь $\text{КНД}_{\text{фок}}$ линейной антенны всегда меньше значения для дальней зоны и снижается по мере уменьшения фокусного расстояния [10]. В средах с потерями $\text{КНД}_{\text{фок}}$ дополнительно снижается по мере роста коэффициента затухания, сохраняя возможность фокусировки вплоть до значений $\alpha\lambda$ порядка 1...2. Для каждого значения фокусного расстояния величина $\text{КНД}_{\text{фок}}$ не может превышать максимально возможного значения и, следовательно, существует ограничение целесообразного электрического размера антенны [10].

Уровни боковых лепестков. В традиционной радиолокации фактором, ограничивающим обнаружение малоразмерного объекта и измерение его координат, является наличие излучения антенной электромагнитных волн в направлениях вне главного луча диаграммы направленности антенны. В классической апертурной теории антенн установлены закономерности, определяющие уровни боковых лепестков, и имеются четкие условия их снижения. В этих целях апертурные распределения должны иметь характер спадающих к краям апертуры. При этом, путем формирования требуемого амплитудного распределения и ценой ослабления направленности, можно реализовать излучение со сколь угодно

низким уровнем боковых лепестков диаграммы направленности антенны. Распределение интенсивности сфокусированного электромагнитного поля в окрестности фокуса, т.е. уровней боковых лепестков, имеет иной характер. Во-первых, уровни боковых лепестков имеют тенденцию к возрастанию по мере уменьшения фокусного расстояния. Во-вторых, что более существенно, зависимость уровней боковых лепестков от характера амплитудного распределения токов в апертуре имеет, по сравнению с полем в дальней зоне, менее выраженный характер. Так, при использовании антенн со спадающими амплитудными распределениями токов эффект снижения уровней боковых лепестков выражен в значительно меньшей степени. Уровень боковых лепестков имеет, ориентировочно, значение порядка -10 дБ или несколько менее (рис. 5) и не может быть существенно снижен традиционным способом, т.е. выбором соответствующего амплитудного распределения токов в апертуре [10].

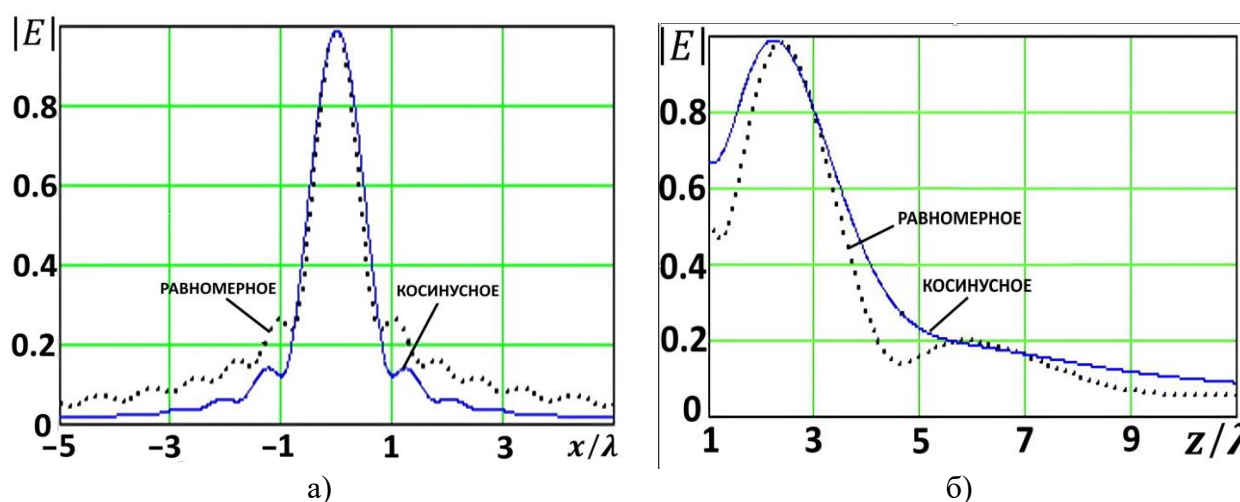


Рис. 5. Распределение модуля напряженности электрического поля в направлениях а) - продольном и б) поперечном относительно апертуры для равномерного и косинусного амплитудных распределений.

Размер антенны $L/\lambda = 10$, относительное фокусное расстояние $z_0/L = 0,25$

Это обстоятельство, а также факт ограничения размеров сфокусированной области, очевидно, снижает возможность раздельного наблюдения малоразмерных отражающих объектов при близком их расположении с более крупными нерегулярностями. Кроме того, точность определения координат также не всегда может быть достаточной вследствие ограниченных размеров области фокусировки. Для ослабления негативного влияния этих свойств могут быть применены некоторые подходы, используемые в моноимпульсной радиолокации.

4. Формирование в зоне ближнего излученного поля пространственных распределений разностного типа

В целях улучшения показателей точности и углового разрешения в моноимпульсной радиолокации используются антенны с диаграммами суммарного и разностного типа. «Суммарная» диаграмма направленности $F_{\Sigma}(\theta, \varphi)$ имеет вид острого пика в некотором заданном направлении (θ_0, φ_0) и симметрична относительно него. «Разностная» диаграмма направленности имеет нулевой провал в направлении (θ_0, φ_0) и антисимметрична относительно него.

В зоне ближнего излученного поля также возможно формирование «разностных» пространственных распределений, причем двух типов. Распределение первого типа аналогично случаю дальней зоны. Пространственное распределение его также антисимметрично относительно продольных координат и имеет нулевой провал в точке фокусировки. Способ его формирования аналогичен случаю дальней зоны: фазовое распределение для двух половин симметричной апертуры отличается на 180° :

$$\Psi_1(x, z_0) = \begin{cases} 2\pi(\sqrt{x^2 + z_0^2} - z_0), & x \geq 0, \\ 2\pi(\sqrt{x^2 + z_0^2} - z_0) \pm \pi, & x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Сфокусированное пространственное распределение поля второго типа не имеет аналога в поле излучения в дальней зоне. Пространственное распределение напряженности поля в направлении нормали к антенне $E(0, z)$ описывается функцией с нулевым значением в точке фокусировки и противофазными значениями в точках $z \pm \Delta$, расположенных по разные стороны от точки фокусировки.

Для формирования разностных распределений второго типа в апертуре формируется два противофазных участка, расположенных в центральной и периферийной частях апертуры:

$$\Psi_2(x, z_0) = \begin{cases} 2\pi(\sqrt{x^2 + z_0^2} - z_0), & a(z_0, L) \leq |x| \leq L, \\ 2\pi(\sqrt{x^2 + z_0^2} - z_0) \pm \pi, & |x| < a(z_0, L). \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 6, а и б, в приведены фазовые распределения $\Psi_1(x, z_0)$ и $\Psi_2(x, z_0)$ и соответствующие им суммарно-разностные распределения напряженности электрического поля линейной антенны из изотропных элементарных излучателей с равномерным амплитудным распределением, для случая $L = 20\lambda$, и координат точки фокусировки $(0, 5\lambda)$. Значение модуля напряженности поля в точке фокусировки $x/\lambda = 0$ (кривая 1), соответствующего суммарному распределению, максимально, в то время как значение, соответствующее разностному распределению, равно нулю. Аналогичная картина наблюдается и для поперечного направления, показанного на рис. 6, г. В точке фокусировки с координатой $z/\lambda = 5$ (кривая 1), значение напряженности поля, соответствующего суммарному распределению, максимально, а значение, соответствующее разностному распределению, равно нулю.

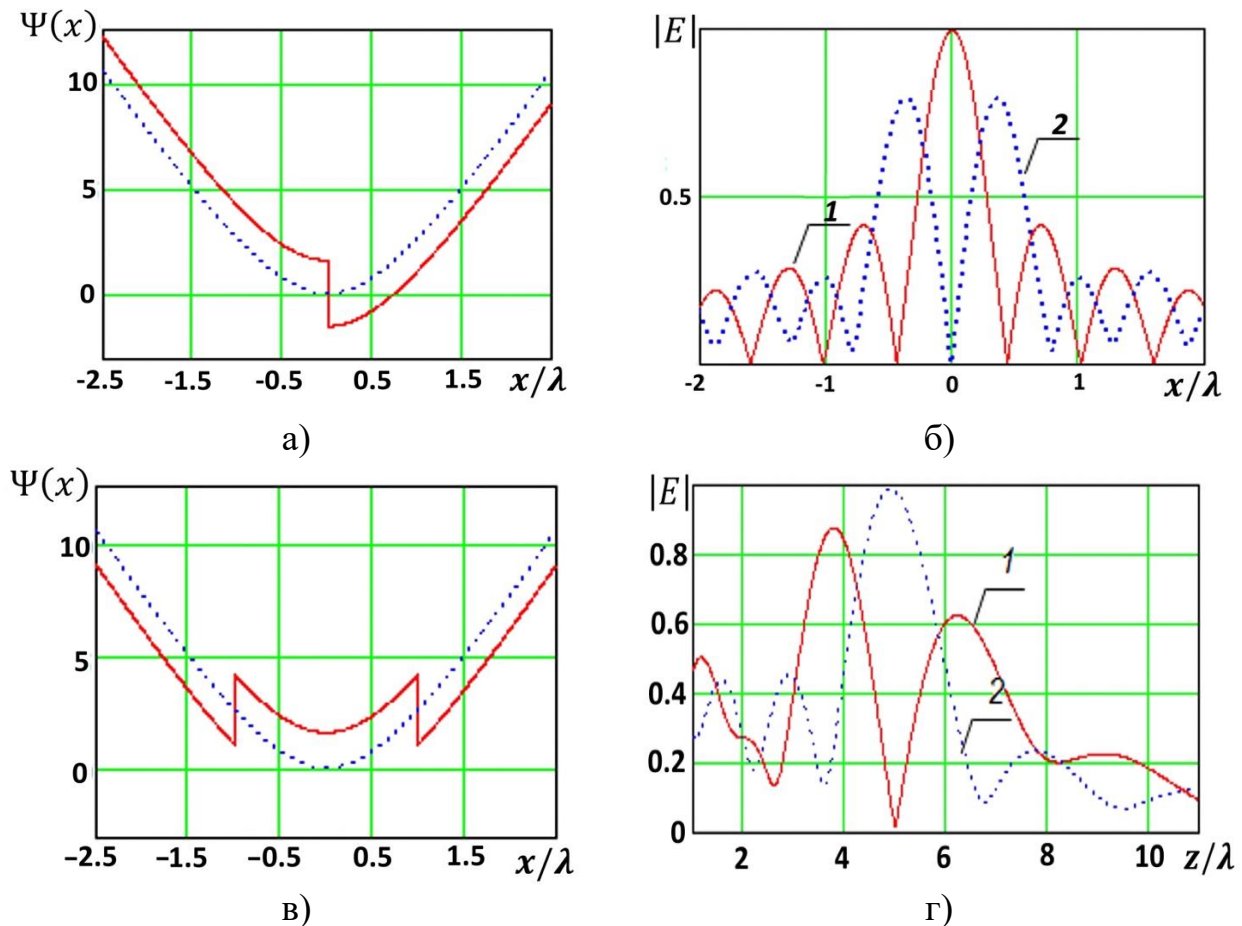


Рис. 6. Фазовые распределения токов вдоль апертуры: а) – первого типа $\Psi_1(x, z_0)$, в) – второго типа $\Psi_2(x, z_0)$ б) и г) – соответствующие им функции пространственного распределения напряженности сфокусированного поля, 1 – суммарное распределение, 2 – разностное распределение

5. Использование пространственных распределений разностного типа в задачах радиоволнового контроля

Повышение точности определения координат объекта локации. В радиолокации широко используются системы, использующие антенны с диаграммами суммарного и разностного типов. Сигналы, принимаемые антеннами с суммарной диаграммой направленности, служат целям обнаружения объекта локации. Сигналы с антенны с разностной диаграммой направленности используются для измерения угловых координат (или, соответственно, для организации автоматического сопровождения цели). Предпочтение измерению угловых координат с использованием диаграммы направленности разностного типа определяется тем, что в окрестности направления на цель крутизна разностной диаграммы направленности максимальна в то время, как для суммарной диаграммы направленности она имеет нулевое значение.

Возможность и целесообразность осуществления эхолокации в зоне ближнего излученного поля с формированием пространственных распределений суммарного и разностного типов определяется теми же факторами, что и

радиосредствах моноимпульсной локации в дальней зоне. В виду аналогии вида функций пространственного распределения $E_{\text{фок_пл}}(x, y)$ в фокальной плоскости и угловой зависимости в дальней зоне $E_{\text{дз}}(x, y)$ возможность повышения точности измерения координат определяется тем же факторами, что и в задачах радиолокации в дальней зоне. Однако, для эхолокации в зоне ближнего излученного поля имеет место важное принципиальное отличие. Оно состоит в возможности формирования разностного пространственного распределения второго типа с нулевым провалом в точке фокусировки и антисимметричной амплитудной зависимостью в направлении нормали к антенне. Это создает возможность более точного определения координат и в поперечном направлении. Отличие в использовании свойств разностных распределений первого и второго типов заключается, главным образом в том, что в равных условиях крутизна разностного распределения в поперечном направлении значительно меньше аналогичного значения в направлении вдоль апертуры и, следовательно, измерение поперечной координаты уступает по точности измерению координат в фокальной плоскости [11].

Например, в условиях использования антенны с данными согласно рис. 6 крутизна функции разностного пространственного распределения в фокальной плоскости почти в 5 раз больше аналогичного значения для поперечного направления. Тем не менее, использование распределений разностного типа целесообразно, т.к. позволяет существенно повысить точность определения всех трех пространственных координат, причем даже при использовании немодулированного зондирующего сигнала.

Обработка с подавлением приема по боковыми лепесткам. Использование сфокусированных антенн с пространственными распределениями суммарного и разностного типов позволяет, аналогично случаям радиолокации в дальней зоне, осуществить обработку с подавлением приема по боковым лепесткам. Существо метода обработки принятых сигналов с подавлением боковых лепестков состоит в следующем. Для заданного пространственного положения точки фокусировки (\vec{r}_ϕ) последовательно во времени осуществляется прием, соответствующий формированию двух пространственных распределений суммарного и разностного типа – $E_\Sigma(\vec{r}, \vec{r}_\phi)$ и $E_\Delta(\vec{r}, \vec{r}_\phi)$. Далее отраженный сигнал считается принятым (соответствует основному пику пространственного распределения суммарного типа), если его амплитуда $|U_\Sigma|$ превышает значение, соответствующее приему с использованием сфокусированного пространственного распределения разностного типа $|U_\Delta|$:

$$|U_{\Sigma-\Delta}| = \begin{cases} U_\Sigma, & |U_\Sigma| \geq |U_\Delta|, \\ 0, & |U_\Sigma| \leq |U_\Delta|. \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 7 представлены иллюстрирующие результаты обработки с использованием разностных пространственных распределений.

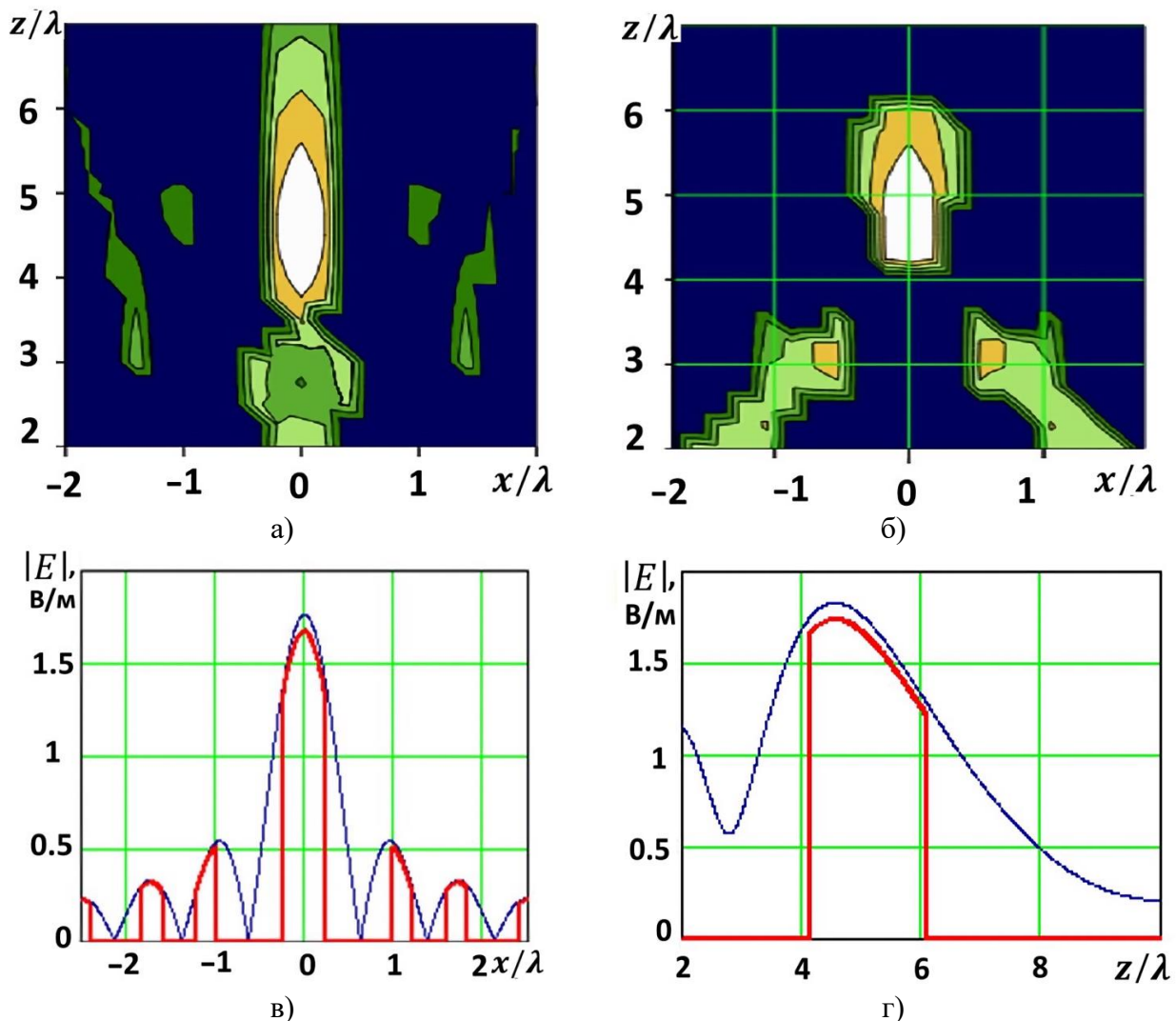


Рис. 7. Результаты обработки в соответствии с алгоритмом (4): пространственные распределения (а, б), сечения в поперечном (в) и продольном (г) относительно апертуры направления. Синяя линия – распределение суммарного типа, красная линия – результат суммарно-разностной обработки. Размер антенны 10λ , фокусное расстояние – 5λ

Совместное использование пространственных распределений суммарного и разностного типа позволяет, в сравнении с традиционными случаями синфазной и сфокусированной апертуры, повысить точность определения пространственного положения малоразмерной нерегулярности за счет уменьшения эффективных размеров области сфокусированного поля; а также исключить или, по крайней мере, существенно ослабить влияние других нерегулярностей, локализованных вблизи области сфокусированного поля. Иллюстрацией достигаемых эффектов может служить рис. 8.

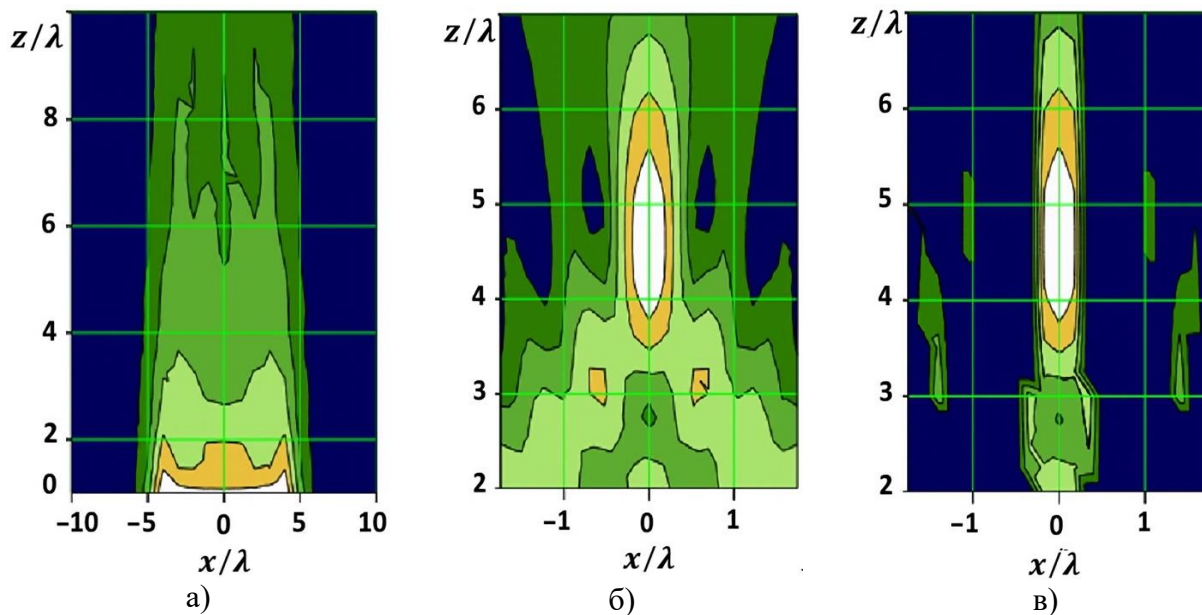


Рис. 8. Пространственные распределения в области ближнего излученного поля при синфазном возбуждении (а), сфокусированное (б) и результирующее (в) при разностном распределении первого типа

Заключение

В статье показана возможность использования сфокусированных электромагнитных полей разностного типа, аналогичных разностной диаграмме направленности антенны в дальней зоне. Как и в задачах эхолокации в дальней зоне, это позволяет не только повысить точность определения координат отражающего объекта, но и ослабить негативные влияния приема отраженных сигналов вследствие наличия боковых лепестков функции распределения сфокусированного поля. В заключение отметим, что в статье впервые предложены принципы формирования разностных распределений, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля электромагнитных полей для линейной антенной решетки, показана практическая возможность реализации таких разностных распределений и их использования в задачах радиоволнового контроля.

Более подробно со свойствами сфокусированных электромагнитных полей можно познакомиться в книге [10].

Работа выполнена на кафедре радиофотоники и микроволновых технологий КНИТУ-КАИ при финансовой поддержке программы ПРИОРИТЕТ-2030.

Литература

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль: Справочник в 8 томах. 2-е изд. М.: Машиностроение, 2008.
2. Матвеев В.И. Радиоволновый контроль / под общ. ред. В.В. Ключева Российское общество по неразрушающему контролю и технической диагностике (РОНКТД). М.: Спектр, 2011. 181 с.
3. Zhen L., Zhaozong M. A Review of Radio Frequency Non-destructive Testing for Carbon-fibre Composites // Measurement Science Review. 2016. Vol. 16. № 2. P. 68–76.

4. Михайлов В. В., Понькин В. А. Перспективы совершенствования систем радиоволнового контроля радиофизических характеристик покрытий и материалов // Радиотехника. 2014. № 9. С. 80–83.

5. Басков К.М., Политико А.А., Семененко В.Н., Чистяев В.А., Акимов Д.И., Краснолобов И.И. Радиоволновой контроль параметров образцов многослойных стенок радиопрозрачных укрытий. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. DOI 10.30898/1684-1719.2019.11.12 (дата обращения: 18 марта 2023).

6. Авдеев В. П., Распопов А. В., Меркулов Д. В. Измерительный комплекс радиоволновой экспресс–диагностики материалов и изделий // Инновационные научные исследования: теория, методология, практика. Сборник статей XVIII международной научно-практической конференции (Пенза, 27 августа 2019 г.). Пенза. 2019. С. 69–73.

7. Базулин Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные антенные решетки // Дефектоскопия. 2013. № 7. С. 51–75.

8. Воронков В.А., Воронков И.В., Козлов В.Н., Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов // В мире неразрушающего контроля. 2011. № 1 (51). С. 64–69.

9. Низамутдинов Р.Р. Исследование характеристик линейных сфокусированных антенн для радиоволновых технологических и диагностических устройств. дис. канд. техн. наук. 05.12.07. Казань. 2011. 155 с.

10. 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. Сиб. Гос. аэрокосм. ун–т. 2015. 308 с.

11. Бартон Д., Вард Г. Справочник по радиолокационным измерениям / пер. с англ. под ред. М.М. Вейсбейна. М.: Сов. Радио. 1976. 392 с.

References

1. Klyuev V. V. *Nerazrushaiushchii kontrol'* [Non–destructive testing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. (in Russian).

2. Matveev V. I. *Radiovolnovyi kontrol'* [Radio wave control]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 181 p. (in Russian).

3. Zhen L., Zhaozong M. A Review of Radio Frequency Non–destructive Testing for Carbon–fibre Composites. *Measurement Science Review*, 2016, vol.16, no.2, pp. 68–76.

4. Mikhailov V. V., Ponkin V. A. Perspektivy sovershenstvovaniia sistem radiovolnovogo kontroliia radiofizicheskikh kharakteristik pokrytii i materialov [Prospects for improving systems of radio–wave control of radio–physical characteristics of coatings and materials]. *Radiotekhnika*, 2014, no. 9, pp. 80–83 (in Russian).

5. Baskov K. M., Politiko A. A., Semenenko V. N., Chistiaev V. A., Akimov D. I., Krasnolobov I. I. *Radiovolnovoi kontrol' parametrov obraztsov*

mnogosloinykh stenok radioprozrachnykh ukrytii [Radio wave control of the parameters of samples of multilayer walls of radio transparent shelters]. *Journal of radioelectronics*, 2019, no. 11. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/12/text.pdf> (accessed 18 March 2023) (in Russian).

6. Avdeev V. P., Raspopov A. V., Merkulov D. V. Izmeritel'nyi kompleks radiovolnovoï ekspress–diagnostiki materialov i izdelii [Measuring complex for radio wave express diagnostics of materials and products]. *Innovatsionnye nauchnye issledovaniia: teoriia, metodologiya, praktika. Sbornik statei XVIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of XVIII International Scientific and Practical Conference Innovative scientific research: theory, methodology, practice]. Penza, 27 August 2019, pp. 69–73 (in Russian).

7. Bazulin E. G. Sravnenie sistem dlja ul'trazvukovogo nerazrushajushhego kontrolja, ispol'zujushhiih antennye reshetki ili fazirovannye antennye reshetki [Comparison of systems for ultrasonic non–destructive testing using antenna arrays or phased antenna arrays]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, no. 7, pp. 51–75 (in Russian).

8. Voronkov V. A., Voronkov I. V., Kozlov V. N., Samokrutov A. A., Shevaldykin V. G. O primenimosti tekhnologii antenykh reshetok v reshenii zadach UZK opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov [On the applicability of antenna array technology in solving the problems of ultrasonic testing of hazardous production facilities]. *V mire nerazrushajushchego kontrolia*, 2011, vol. 51, no. 1, pp. 64–69 (in Russian).

9. Nizamutdinov R. R. *Issledovanie harakteristik linejnykh sfokusirovannykh antenn dlja radiovolnovykh tehnologicheskikh i diagnosticheskikh ustrojstv*. Diss. kand. tehn. nauk [Study of the Characteristics of Linear Focused Antennas for Radio Wave Technological and Diagnostic Devices. Ph.D. Tesis]. Kazan, KSTU named after A. N. Tupolev, 2011. 155 p. (in Russian).

10. Sedel'nikov Iu. E., Testodov N. A., Veden'kin D. A., Danilov I. Iu., Potapova O. V., Romanov A. G., Fadeeva L. Iu., Choni Iu. I. *Antenny, sfokusirovannye v zone blizhnego izluchennogo polja. Moonografija* [Antennas focused in the zone of the near radiated field. Monography]. Krasnoyarsk, Sib. State. Aerospace University Publ., 2015, 308 p. (in Russian).

11. David K. Barton, Harold R. Ward *Handbook of Radar Measurements*. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1976. 392 p.

Статья поступила 17 апреля 2023 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

Адрес: 420111, Россия, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10.

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.

Focused antennas in non-destructive radio wave testing

D. A. Vedenkin, Y. E. Sedelnikov

Purpose. The problem of radio wave control of non-metallic materials is considered. It is based on the method of echolocation carried out using an antenna system focused in the zone of the near radiated field. Brief information about the most essential properties of focused electromagnetic fields is given. Along with the traditional focused fields, it is proposed to use focused fields of the difference type, similar in a number of properties to radiation with a difference type radiation pattern. The joint use of focused fields of the sum and difference types in radio wave echolocation diagnostics makes it possible to increase the accuracy of determining the coordinates of a defect, as well as significantly reduce the negative effect of the presence of side lobes of focused fields. **The purpose of the present paper** is to identify the main properties of electromagnetic fields focused in the zone of the near radiated field with the development on their basis of proposals for the formation of the distribution of the focused electromagnetic field of the difference type in the longitudinal and transverse directions relative to the linear antenna array. **Methods.** There has been proposed the solution of the problem of formation of difference focused distributions is based on the well-known principles of electrodynamics and aperture theory of antennas. **Novelty.** Elements of novelty is presented for the first time, the principles of formation and use of distributions of focused electromagnetic fields in the longitudinal and transverse directions relative to a linear antenna array. **Practical relevance.** The use of distributions of a focused electromagnetic field of a difference type allows, in the case of sum-difference signal processing, to increase the accuracy of determining the coordinates of an object, to reduce the negative effect of signals received through the side lobes of a focused field.

Key words: electromagnetic field focusing, sum-difference signal processing, near radiated field zone, radio wave diagnostics, radio wave control, focusing area, difference field distribution.

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

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

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.