

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.11>

УДК 621.369.67: 616-71

СФОКУСИРОВАННЫЕ АНТЕННЫ В ЗАДАЧАХ КОНТАКТНОЙ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ

Ю. Е. Седельников, О. В. Потапова, А. Р. Садыков, В. А. Скачков

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

Статья поступила в редакцию 21 февраля 2021 г.

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможности применения антенных решеток в задачах радиотермометрии. Рассмотрены варианты диаграммообразующих схем для реализации метода фокусировки в антенных решетках. Дается анализ современной элементной базы и возможности ее применения в настоящей задаче.

Ключевые слова: антенна-аппликатор, радиотермометрия, ранняя диагностика, сфокусированные антенны, излучатели электрического типа, излучатели магнитного типа, эффективность фокусировки, цифровая обработка, диаграммообразующая схема.

Abstract. The article is devoted to the study of the possibility of using antenna arrays in the problems of radiothermometry. It considers variants of diagram-forming schemes for realization of the focusing method in antenna arrays. The analysis of modern element base and possibility of its application in the present problem is given.

Key words: applicator antenna, radiothermometry, early diagnosis, focused antennas, electric-type radiators, magnetic-type radiators, efficiency of focusing, digital processing, diagram-forming scheme.

Введение

Методы контактной СВЧ радиотермометрии зарекомендовали себя как эффективный инструмент медицинской неинвазивной диагностики [1].

Несмотря на значительный достигнутый прогресс, как аппаратура, так и методы обработки данных измерений и их диагностической интерпретации продолжают совершенствоваться [2-4].

Важным элементом радиометрической аппаратуры являются датчики радиояркостной температуры – контактные антенны-аппликаторы. К настоящему времени выполнено значительное число работ, в том числе в части построения практических вариантов антенн [5-18].

В ряде работ рассматривалась возможность повышения эффективности контактной радиотермометрии путем использования принципа фокусировки антенн [19-28]. Показано что выполнение антенн-аппликаторов на основе принципа сфокусированной апертуры при радиоприеме в области ближнего излученного поля обещает заметное улучшение основных параметров аппаратуры контактной радиометрии. Однако вопросы практической реализации сфокусированных антенн-аппликаторов к настоящему времени почти не изучены. Целью настоящей работы является частичное восполнение этого пробела.

1. Основные требования к электрическим показателям антенн-аппликаторов

При измерениях в задачах медицинской радиотермометрии антенна-аппликатор располагается на поверхности биологического объекта.

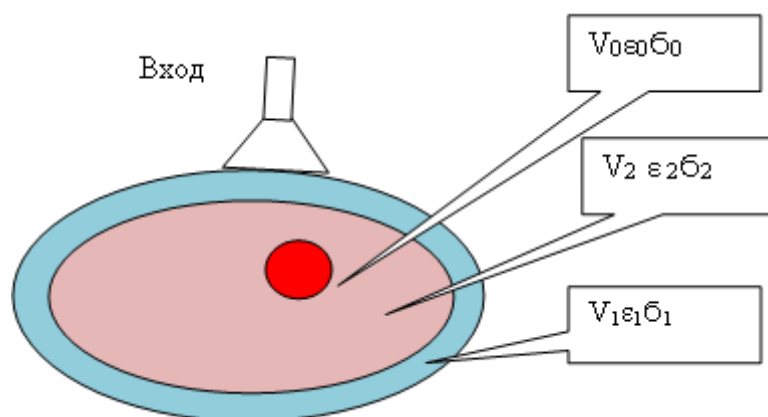


Рис.1. Упрощенная модель объекта измерений. Радиометр, подключенный к антенне, регистрирует собственное радиотепловое излучение объекта.

Мощность радиотеплового излучения, регистрируемого радиометрическим приемником (без учета потерь в антенно-фидерном тракте), определяется как $kT_A\Delta f$, где k – постоянная Больцмана, Δf – полоса частот, T_A – значение антенной температуры, зависящее от пространственного распределения интенсивности радиотеплового излучения и электродинамических свойств антенны. Наличие малоразмерной радиояркой аномалии с радиоконтрастом ΔT приводит к изменению антенной температуры¹

$$\Delta T_A = \Delta T \frac{\Delta V}{V} K_{UV}(v_0),$$

где величина $K_{UV}(v_0)$ имеет физический смысл отношения удельной поглощенной мощности (в режиме передачи) в точке v_0 объема V к среднему значению мощности источника, отнесенной к объему V . Указанная величина является аналогом коэффициента усиления антенны для зоны ближнего излученного поля в границах диссипативного объекта и в полной мере характеризует пространственные свойства антенны в составе радиометрической аппаратуры. Наблюдаемый контраст малоразмерного участка объекта пропорционален $K_{UV}(v_0)$ а пространственная зависимость $K_{UV}(v_0)$ определяет достижимую точность определения положения аномалии, а также разрешающую способность при наличии нескольких аномалий.

Вопрос интерпретации результатов радиометрических измерений² в данной работе не рассматривается. Отметим лишь, что основными диагностическими показателями являются:

- возможность обнаружения температурной аномалии – достигаемой степенью концентрации напряженности электрического поля антенны (в режиме передачи) в окрестности расположения аномалии. Соответственно, глубина обнаружения определяется степенью убывания интенсивности электромагнитного поля по мере распространения в среде;

- точность определения положения аномалии, определяемая размерами

¹ Для простоты дано без учета влияния потерь в антенне и фидере.

² Например, [4]

и конфигурацией области наибольшей интенсивности напряженности электрического поля антенны аппликатора, также в режиме передачи.

Поэтому малогабаритные антенны-аппликаторы [7,18] обеспечивают хорошие показатели пространственного разрешения в направлении вдоль апертуры на малой глубине и, соответственно, возможность обнаружения приповерхностных аномалий, т.к. в режиме передачи имеют место преобладающие значения напряженности электрического поля $|E|$ в непосредственной окрестности антенны. Ввиду относительно малых электрических размеров антенны излучение в диссипативную среду происходит в широком секторе углов, что имеет следствием меньшие значения $|E(x, y, z)|$ по сравнению с апертурами больших электрических размеров, особенно сфокусированных в заданную точку среды.

Использование принципа фокусировки означает такое выполнение антенны, при котором электромагнитное поле, создаваемое ею в режиме передачи, характеризуется меньшей концентрацией поля вблизи антенны при повышении напряженности электрического поля в фокальной области на некотором удалении от апертуры.

Вопрос о предпочтительности использования малогабаритных антенн [18] с электрическими размерами порядка половины длины волны в среде или сфокусированных антенн [29-37], имеющих большие геометрические размеры неочевиден и требует более детального изучения.

Для достижения наиболее эффективного обнаружения малоразмерного радиоконтрастного образования антенна-аппликатор должна обеспечить по возможности полное удовлетворение следующих требований к пространственному распределению напряженности электрического поля, которое указанная антенна создавала бы в режиме передачи:

1) Максимальный вклад радиоконтрастного образования в суммарное значение принимаемой мощности радиотеплового шума:

$$\frac{\int_{V_0} |E(v)|^2 \sigma(v) dv}{\int_{V_1+V_2+V_0} |E(v)|^2 \sigma(v) dv} \rightarrow \max$$

2) Минимальный вклад в суммарное значение принимаемой мощности радиотеплового шума поверхностного слоя объекта (кожа, подкожно жировой слой, кость черепа):

$$\frac{\int_{V_1} |E(v)|^2 \sigma(v) dv}{\int_{V_1+V_2+V_0} |E(v)|^2 \sigma(v) dv} \rightarrow \min$$

3) Кроме того, поскольку мощность шума на входе приемника пропорциональна температуре, определяемой как:

$$T_{\text{вх}} = K_{\text{АнтФид}} T_A + (1 - K_{\text{АнтФид}}) T_{\text{внеш}}$$

где $T_{\text{внеш}}$ – средняя температура окружающего пространства, $K_{\text{АнтФид}}$ – произведение коэффициента передачи фидера на КПД антенны, т.е. антенна и фидер должны обладать минимальными потерями.

Требования 1-2 могут выполняться с использованием принципа сфокусированной антенной решетки при надлежащем выборе ее параметров и типа элемента. Принцип фокусировки и основные свойства сфокусированных полей к настоящему времени неплохо изучены и представлены в ряде работ, например, [28]. Возможности выполнения требования 3 зависят от ряда факторов и определяются схемой построения, ее типом и параметрами, а также элементной базой антенной решетки. Обсуждение этих вопросов является одной из главных целей данной работы. Предварительно, имеет смысл кратко напомнить основные положения теории сфокусированных антенн.

2. Сфокусированные антенны в диссипативных средах

В режиме передачи принцип фокусировки состоит в синфазном суммировании электромагнитных полей, излученных отдельными участками апертуры, в заданной области пространства. Общие свойства электромагнитных полей сфокусированных антенн описаны в [28]. Для рассматриваемой задачи наиболее существенными из них являются следующие:

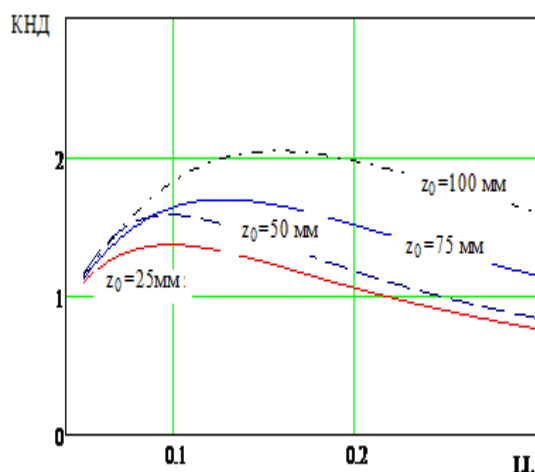
- В зоне ближнего излученного поля, т.е. на расстояниях от антенны, не превышающих величину порядка ее размера трехмерная фокусировка

осуществима двумерной апертурой с соответствующими параметрами амплитудно-фазового распределения;

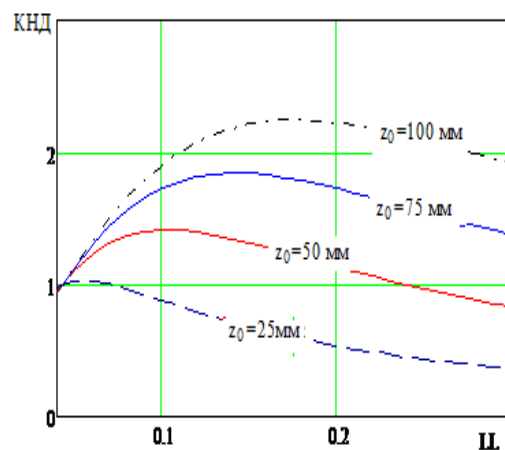
– Для заданного фокусного расстояния существует предельное значение коэффициента направленного действия, достижимого при оптимальном размере антенны и форме апертурного распределения;

– В диссипативных средах эффективная трехмерная фокусировка возможна лишь при умеренных значениях коэффициента затухания (порядка $\alpha l < (0.2...0.3)^3$). При больших значениях коэффициента затухания свойство фокусировки электромагнитного поля сохраняется только в направлениях параллельных апертуре антенны;

– Максимально достижимое значение коэффициента направленного действия сфокусированной антенны в средах с потерями снижается по мере возрастания коэффициента затухания в среде. Наглядной иллюстрацией сказанного служит Рис. 2. Параметры среды - $\epsilon=50$, $\beta=0.5$ См\м, средняя частота 500 МГц). Длина антенны - в метрах.



Источники электрического типа



Источники магнитного типа.

Рис. 2. Относительный КНД линейной антенны в зависимости от ее длины и z_0 - фокусного расстояния.

³В типичных биологических средах и полосах частот указанная величина, как правило, значительно больше.

– По мере уменьшения фокусного расстояния КНД сфокусированной антенны снижается и ее использование становится нецелесообразным (Рис. 3)

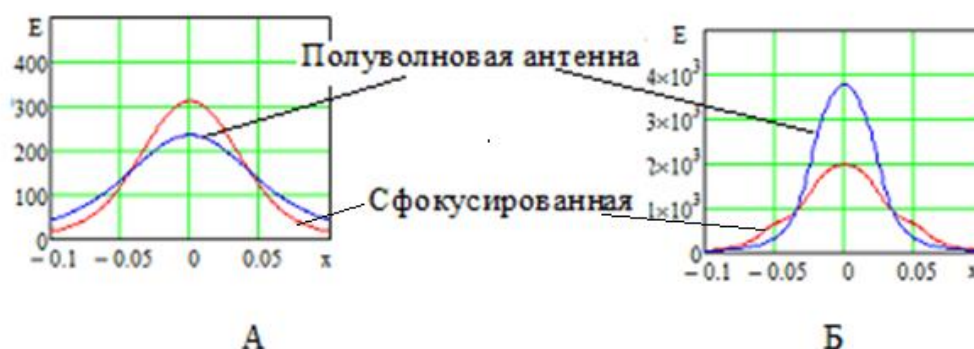


Рис. 3. Напряженность электрического поля полуволновой (синяя) и сфокусированной антенн. А) фокусное расстояние 75 мм, Б) - 12.5 мм. Среда $\epsilon=50$ $\beta=0.5$.

– эффективность использования принципа фокусировки зависит также от типа элемента сфокусированной антенны.

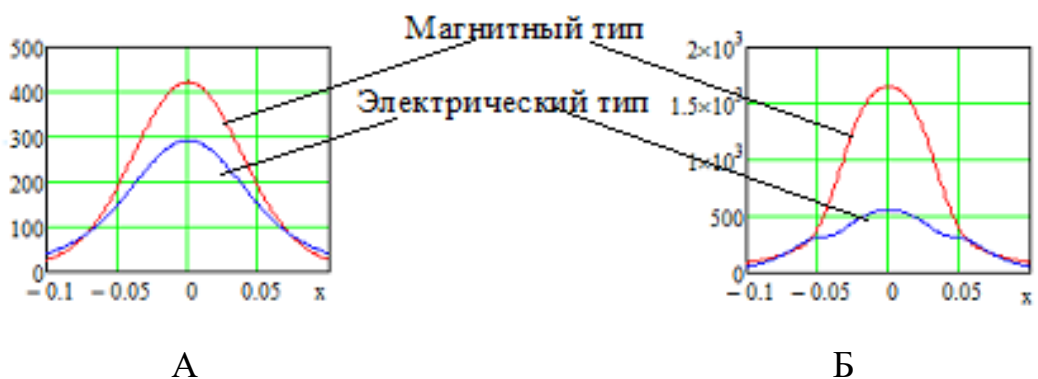


Рис. 4. Сравнение сфокусированных антенн, выполненных из излучателей электрического (синяя линия) и магнитного типа. Длина антенны 100мм. А) фокусное расстояние 75 мм, Б) 25мм.

Приведенные данные относятся к линейной антенне. Для плоских антенн эти закономерности сохраняются, а значение «выигрыша» по сравнению с ненаправленным излучателем соответствует примерно квадрату значений для линейных антенн равных геометрических размеров.

3. Сфокусированные антенны в задаче СВЧ радиотермометрии

В задачах СВЧ радиотермометрии измерение интенсивности собственного радиотеплового излучения производится радиометрической

аппаратурой, осуществляющей операцию $\int_0^T |s(t)|^2 dt = c \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} |G(f)|^2 df$, где $s(t)$ и $G(f)$ - принимаемый «сигнал» и его спектр. Поэтому свойства фокусировки должны рассматриваться в полосе частот $2\Delta f$, соответственно полосе частот радиометра, а значит рассматриваться с использованием усредненного в полосе частот значения квадрата модуля напряженности поля. В рассматриваемых случаях все зависимости, относящиеся к свойствам пространственных распределений сфокусированных полей в зоне ближнего излученного поля, должны характеризоваться как:

$$E_{\text{изм}}(x, y, z) = \text{const} \int_{f_0-\Delta f}^{f_0+\Delta f} |E(x, y, z, f)|^2 df$$

В работе [28] показано, что для случаев радиометрических измерений указанные зависимости практически совпадают с аналогичными для монохроматического сигнала на средней частоте полосы $2\Delta f$. Это, в частности, означает, что для практических оценок свойств сфокусированного поля можно ограничиться рассмотрением их на центральной частоте рабочей полосы.

Подробный анализ свойств сфокусированных антенн проведен в работах [23, 26, 28-30]. К числу наиболее важных можно отнести следующие положения:

- 1) Существует оптимальный размер апертуры, при котором КНД сфокусированной антенны достигает максимального значения (рис.5). Для типичных биологических тканей и диапазона частот оптимальный линейный размер апертуры зависит от глубины расположения точки фокусировки (рис. 6) и составляет величину от 0,06 до 0,5 значений длины волны в воздухе.
- 2) В задачах диагностики биологических сред эффективность фокусировки определяется значением КНД. Использование плоских апертур позволяет заметно увеличить его (Рис.7).

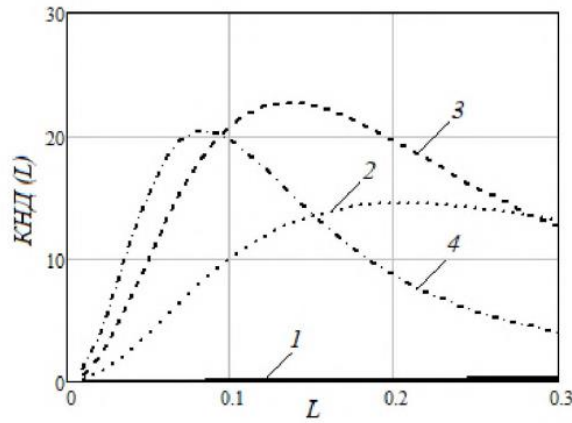


Рис. 5. Зависимость КНД от размера апертуры. $z_0=0,05$ м, кривая 1 - среда без потерь, кривая 2 - кортикальная кость, кривая 3 - белое вещество мозга, кривая 4 - спинномозговая жидкость.

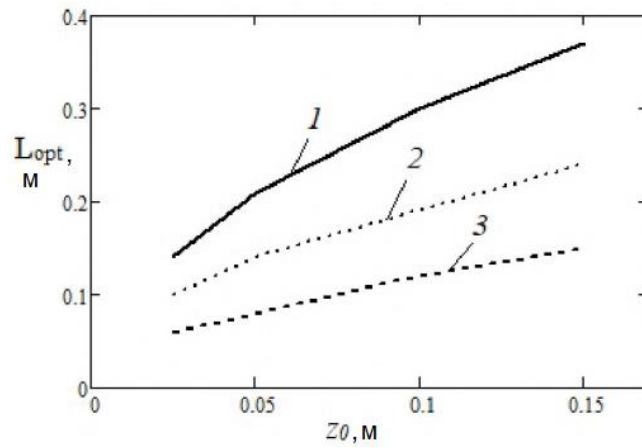


Рис. 6. Зависимость оптимального размера апертуры от глубины расположения точки фокусировки. Кривая 1 - кортикальная кость, кривая 2 и 3 - белое вещество мозга и спинномозговая жидкость соответственно. Частота - 600 МГц.

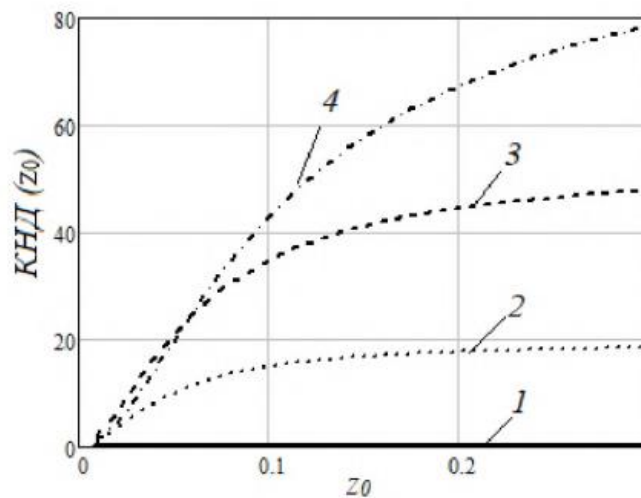


Рис. 7. Зависимость КНД от глубины расположения точки фокусировки. Кривая 1 - среда без потерь, кривая 2 - кортикальная кость, кривая 3 - белое вещество мозга, кривая 4 - спинномозговая жидкость. Частота - 600 МГц.

3) Для типовых биологических сред и диапазона частот минимальная глубина точки фокусировки составляет величину порядка условной границы ближней зоны, а максимальное значение определяется оптимальным выбором электрических размеров антенны. При этом при малых расстояниях до точки фокусировки использование принципа сфокусированной апертуры утрачивает смысл, т.к. показывает даже худшие результаты по сравнению простейшим полуволновым излучателем (Рис. 8)

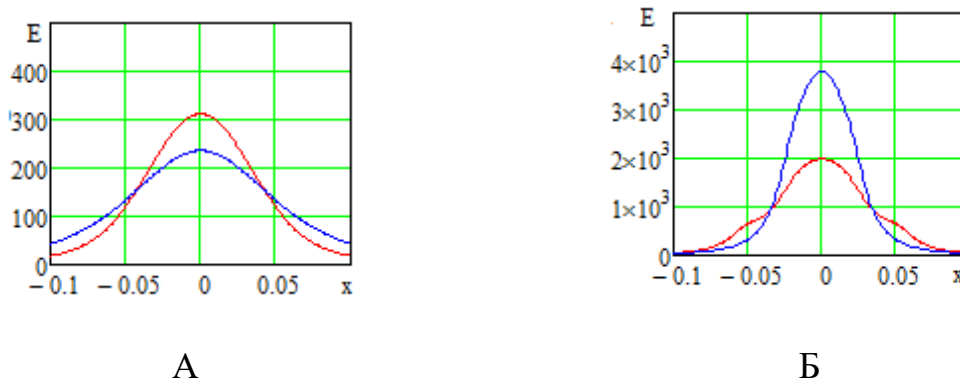


Рис.8. Напряженность электрического поля полуволновой (синяя) и сфокусированной антенн. А) фокусное расстояние 75 мм, Б) - 12.5 мм.

Таким образом, для использования в задачах медицинской радиотермометрии, при типичных параметрах радиометров и диапазоне частот, использование принципа фокусировки позволяет увеличить значение наблюдаемого контраста малоразмерного образования при его локализации на глубинах до 10 и более раз. Размеры апертуры антенны должны составлять величину порядка 20...150 мм. Кроме того, числу дополнительных достоинств использования принципа сфокусированной антенны следует отнести возможность оперативного управления значением фокусного расстояния и размерами апертуры.

4. Реализация сфокусированных антенн для задач медицинской радиотермометрии

В предыдущем разделе было показано, что использование антенн-аппликаторов, выполненных согласно принципу фокусировки, в зоне ближнего излученного поля, открывает возможность заметного улучшения их технических характеристик, непосредственно влияющих на диагностические

показатели аппаратуры медицинской радиотермометрии. Вопросы его практической реализации освещены явно недостаточно.

Для радиометрической аппаратуры диапазона частот порядка 500...1000 МГц наиболее реалистичным представляется реализация сфокусированной антенны в виде антенной решетки из малогабаритных излучателей, согласованных со стандартным фидером 50 Ом в достаточно широкой полосе частот. Ниже рассматривается возможность реализации сфокусированных антенн на основе использования элементной базы - существующей либо ожидаемой в ближайшей перспективе. Упрощенная схема такой антенны показана на рисунке 9.

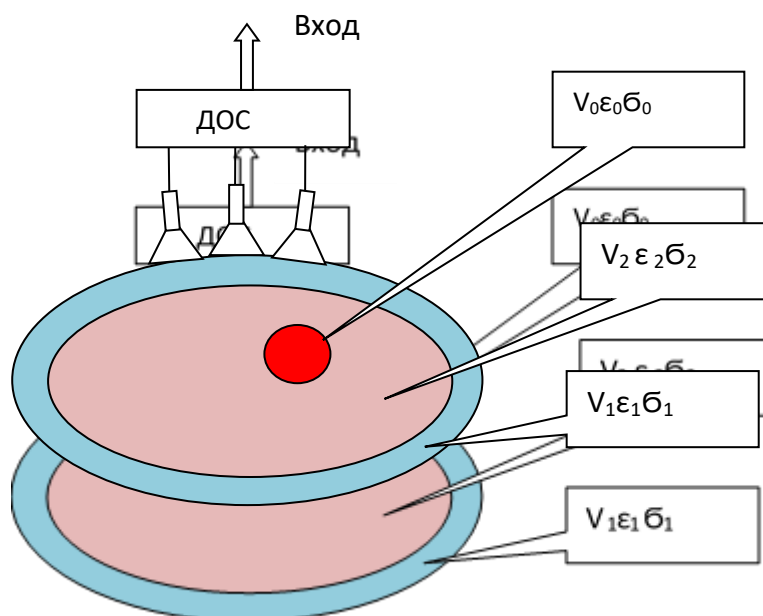


Рис. 9. Упрощенная схема антенной решетки.

Реализация ее требует решения двух задач:

– выбор и реализация схемы антенны, в том числе диаграммообразующей схемы (ДОС - Рис. 9). Требование к ним – обеспечение фокусировки излучения в заданную точку биологического объекта (в режиме передачи согласно принципу взаимности - в действительности фокусировку собственного радиотеплового излучения, соответствующего заданной точке внутреннего объема объекта обследования);

– выбор типа и параметров излучателя решетки, обеспечивающего его

согласование в требуемой полосе частот при требуемых свойствах создаваемого поля ближней зоны и физических габаритах.

Рассмотрим возможные варианты схем построения антенной решетки с их достоинствами и недостатками.

1. Вариант пассивной ФАР (Рис.10)

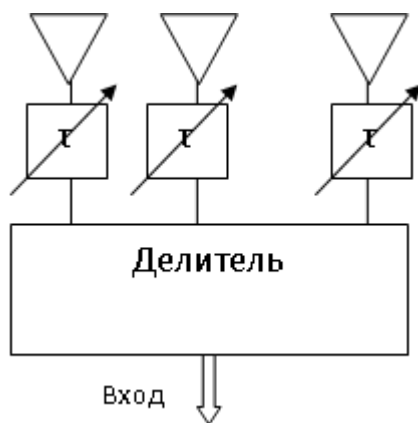


Рис. 10. Пассивная широкополосная ФАР.

Отличие от классической схемы ФАР состоит в том, что требуемое фазовое распределение в апертуре обеспечивается электронно-управляемыми линиями задержки. Использование классического варианта с управляемыми фазовращателями, как правило, исключено из-за недопустимости «сбросов» фазы, равных $2\pi m$ ($m=\pm 1, 2, \dots$).

Основной принципиальный недостаток состоит в наличие потерь в фазовращателях и соединительных кабелях. Это приведет к заметному снижению реальной чувствительности радиометра, т.к. шумовая температура антенной системы в целом составляет $T_A = K_{АФС}T_{Я} + (1 - K_{АФС})T_{ОКР}$, где $K_{АФС} = \text{КПД}$. При суммарных потерях порядка 2 дБ регистрируемый шум объекта будет снижен по сравнению с одиночной идеальной антенной по крайней мере на 30%. Кроме того, для типичного для радиотермометрии диапазона частот 500...1000 МГц габариты устройств фазировки могут оказаться неприемлемо большими.

2. Устройство формирования «лучей» со сменными фазирующими секциями (Рис.11)

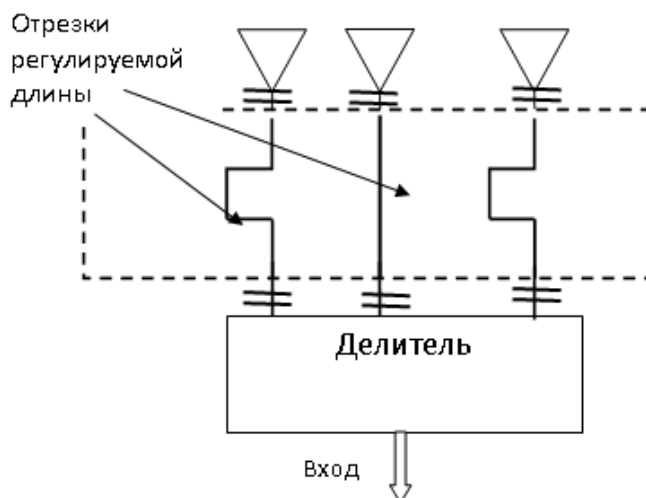


Рис.11 Антенна со сменными фазирующими секциями.

По принципу действия антенна аналогична предыдущему варианту. Отличие состоит в том, что фокусировка в различные участки обследуемого объекта осуществляется путем использования сменных фазирующих секций, функционально представляющих каждая набор кабелей требуемой электрической длины. В указанной схеме исключаются управляемые фазовращатели, т.е. обеспечивается более высокий КПД системы. Недостатком является значительное увеличение времени диагностики, а также трудно выполнимые высокие требования к механическим свойствам электрических соединителей.

3. Активная приемная ФАР

По принципу действия аналогична варианту пассивной ФАР (Рис. 10). Вследствие применения на выходе антенн широкополосных малошумящих усилителей (Рис. 12)⁴ в указанной схеме не происходит существенного снижения показателей чувствительности, связанного с потерями в фазовращателях, делителе и кабелях.

К числу наиболее существенных недостатков следует отнести некоторую

⁴ На Рис. 10 в каждом из модулей условно не показаны каскады, обеспечивающие модуляцию входного «сигнала»

сложность обеспечения идентичности МШУ в составе каждого из приемных элементов.

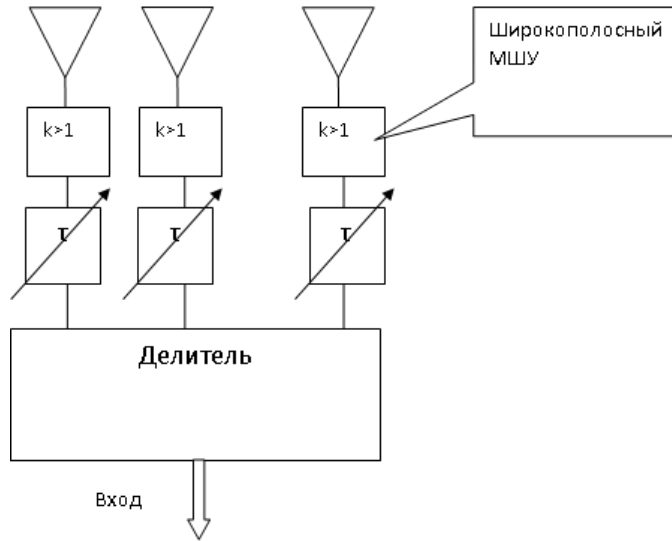


Рис. 12. Активная широкополосная ФАР.

4. Многоэлементная решетка с синтезированной апертурой

Приемный излучатель со встроенным МШУ последовательно устанавливается в N различных точках на поверхности обследуемого объекта. Электромагнитные колебания, «принятые» в каждом из положений запоминаются и обрабатываются совместно таким образом, чтобы результат их взвешенного суммирования соответствовал N элементной антенной решетке с совпадающими координатами и апертурными параметрами.

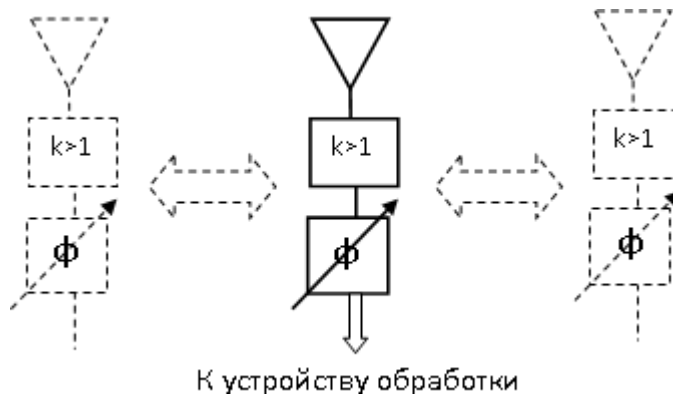


Рис. 13. Виртуальная антенная решетка с синтезированной апертурой. Каскад, обеспечивающий модуляцию входного «сигнала» условно не показан.

Достоинствами этого варианта является отсутствие потерь в делителе и

фидере, а также отсутствие аналоговых или дискретных фазизирующих устройств. Основной недостаток - усложнение приемной аппаратуры, примерный состав которой показан ниже [28].

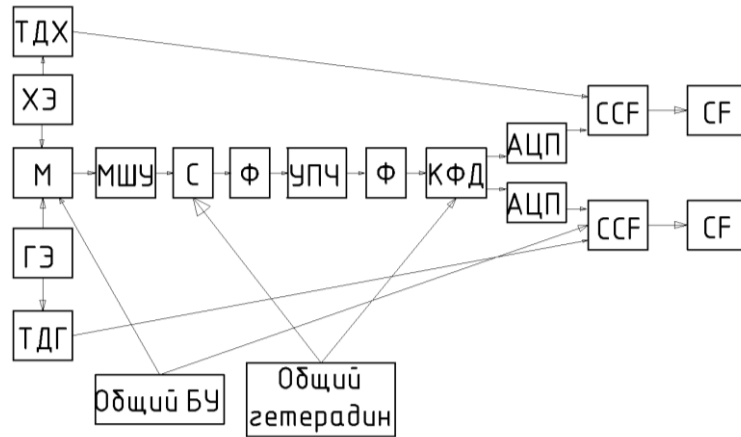


Рис. 14. Схема радиометра с виртуальной синтезированной антенной [28].

5. Цифровая сфокусированная приемная антенная решетка

Принцип работы аналогичен предыдущему варианту. Основное отличие состоит в том, что принятое электромагнитное колебание после усиления несколькими каскадами МШУ подается на быстродействующий АЦП. Цифровой образ колебания поступает в вычислитель с достаточно высоким быстродействием, который реализует операцию фокусировки, производя в цифровой форме суммирование принятых колебаний $s_k(t)$ с дополнительной временной задержкой τ_k , требуемой для фокусировки приема из заданной точки объекта:

$$s_{\text{сум}}(t) = \sum_{k=1}^M s_k(t + r_{k0(R)}/V)$$

где $r_{k0}(m)$ - расстояние от k -й точки расположения приемной антенны до точки фокусировки, V - фазовая скорость волн в среде. После суммирования «сигналов» от M приемных элементов выполняется операция оптимальной фильтрации⁵

⁵ Для наглядности приведена упрощенная трактовка. В действительности процедура радиоприема несколько более сложна в соответствии с принципом работы модуляционного или корреляционного радиометра.

$$S(m) = \int_0^T |s_{\text{сум}}(t)|^2 dt$$

При достаточных быстродействии и объеме памяти вычислительной части аппаратуры возможна реализация как физически присутствующей многоэлементной антенны, так и виртуальной.

5. Возможности аппаратурной реализации

Возможность аппаратурной реализации антенной системы с сфокусированной антенной решеткой определяется:

- возможностью создания антенн-аппликаторов, отвечающих требованиям по широкополосности и обладающих приемлемо малыми габаритами.
- степенью разработанности и наличием элементной базы для построения антенн по схемам ФАР, АФАР и ЦАР.

Выполнение элемента антенной решетки

В литературе описан ряд вариантов, обладающих приемлемыми характеристиками широкополосности и согласования [6-12]. Необходимым условием для любых вариантов с антенной решеткой является малый размер апертуры элемента - порядка $\lambda_{\text{возд}} \setminus 10$.

Для измерения температуры внутренних тканей биологических объектов в известных системах радиотермометрии применяются различные типы антенн-аппликаторов [30]. Широко используются вибраторные антенны, у которых вибраторы изготовлены из тонкой пружинной проволоки [31]. Подобные антенны могут быть снабжены проводящими штырями, контактирующими с кожей человека, при этом высота l , количество n штырей и расстояние между ними определяется из соотношений $n > (l/d)$, где, $0.75 < l/d < 1.4$. Такие антенны хорошо прилегают к телу, просты в изготовлении и, главное, они почти не влияют на температуру кожи пациента в процессе измерения. К сожалению, подобные антенны обладают низкой помехозащищенностью и высоким уровнем поглощения электромагнитного поля в коже.

Наиболее приемлемыми с точки зрения габаритных размеров являются антенны в виде открытого конца волновода, заполненного диэлектриком [9,10],

а также недавно предложенная авторами щелевая антенна в запердельном волноводе [32]. Для реализации виртуальной сфокусированной антенной решетки габаритные ограничения практически отсутствуют, и могут быть использованы любые варианты антенн-аппликаторов, адаптированных для данного вида диагностики, например, [12,13,16,18].

Построение сфокусированной антенной решетки

С принципиальной точки зрения реализуемы все перечисленные выше варианты построения антенной решетки. Для практической реализации рассмотренные варианты далеко не равноценны. При оценке предпочтения при выборе того или иного варианта следует учитывать ряд факторов. Наиболее значимыми из них являются наличие, электрические характеристики и габариты элементов антенн, а именно делителей, фазовращателей, малошумящих усилителей, аналого-цифровых преобразователей.

Построение делителя дециметрового диапазона частот не представляет принципиальных трудностей. Типы их, методы проектирования и оптимизации хорошо известны. Вопросы состояния управляющей элементной базы требуют дополнительного обсуждения. Проведем анализ представленных выше вариантов 1-5.

1. Вариант пассивной ФАР

Промышленностью производятся электрически управляемые фазовращатели как дискретного, так аналогового типов. Данные о типичных характеристиках фазовращателей компании «RF-Lambda» приведены в таблице 1.

Таблица 1

Наименование	Диапазон частот, ГГц	Вносимые потери, дБ	Шаг, °	Тип
RVPT0501GBC	0.5 – 1	4	30	Аналоговый
RVPT0501GAC	0.5 – 1	3	15	Аналоговый
RFPSHT0001D6	0.01 – 1	2	5.6	Цифровой
RFPSHT0001N6	0.01 – 1	4	5.6	Цифровой

Указанные элементы предназначены для формирования заданного фазового сдвига на определенной фиксированной частоте в пределах $[0...360^0]$. Для обеспечения требуемой *временной задержки* наличие сбросов фазы неприемлемо. Это означает необходимость использования каскадного соединения двух или более фазовращателей $[0...360^0]$, что чревато существенным снижением КПД. Помимо управляющих элементов дополнительные потери вносят соединительные коаксиальные кабели. Например, у СВЧ кабеля КС18А-11-13 производства «Микран» вносимые потери составляют 1.6 дБ/м.

Из приведенных данных следует, что дальнейшее рассмотрение применения в данном круге задач пассивной ФАР нецелесообразно, хотя бы из-за высоких потерь в тракте предшествующему входу радиометрического приемника.

2. Устройство формирования «лучей» со сменными фазирующими секциями

В данном варианте отсутствует основной недостаток предыдущего варианта антенны, а именно низкий КПД антенно-фидерной системы. Потери в этом случае могут быть на уровне нескольких десятых долей. Однако существующие разъемные соединения, как правило, не предназначены для многократных операций «соединение - разъединение».

В определенной мере этот недостаток может быть устранен применением коаксиальных фазовращателей, производимых АО «Микран». Указанные фазовращатели изначально предназначены для подстройки и регулировки электрической длины линии передачи в радиоэлектронных системах связи, где требуется высокая точность по значению фазы. Фазовращатели позволяют в диапазоне от 0 до 20 ГГц изменять электрическую длину линии передачи с небольшим шагом, сохраняя уровень КСВН и вносимых потерь. В этом случае, как и при сменных фазирующих секциях, оперативность фокусировки невелика, так как настройка фаз производится вручную.

3. Активная приемная ФАР

В активной приемной ФАР наличие потерь в фазовращателях и кабелях становится несущественным, так как указным элементам предшествуют каскады предварительного усиления. Основным требованиями к МШУ являются достаточная широкополосность и низкий уровень собственного шума. Другим принципиальным показателем являются геометрические размеры, определяющие возможность встраивания в габариты элемента решетки.

В настоящее время МШУ представлены в широкой номенклатуре. Среди отечественных производителей можно отметить «Микран», «НПО КВАНТ», «НПП Исток им. Шокина». Среди лидеров рынка можно выделить «Amphenol», «Qorvo», «Toshiba», «Analog Devices» и др.

Характеристики некоторых МШУ представлены в таблице 2.

Таблица 2.

Наименование	Диапазон частот	Усиление, дБ	Коэффициент шума, дБ
ADL5523 «AnalogDevices»	400МГц – 4ГГц	Не менее 21,5	0,8
МШУ50/1 «Микран»	100кГц – 6 ГГц	Не менее 30	4

Немаловажным обстоятельством является невысокая стоимость таких МШУ. Так, средняя цена микросхемы (не считая отладочной платы) от «AnalogDevices» не превышает 10\$.

Из сказанного следует, что построение активной сфокусированной антенны для задач радиотермометрии вполне возможно на основе существующей элементной базы.

4. Многоэлементная решетка с синтезированной апертурой

Перечисленное выше в полной мере относится к варианту антенны в виде виртуальной антенной решетки. Создание ее также вполне возможно уже на основе существующей элементной базы. Однако реализация этого варианта

требует заметного усложнения аппаратурной части радиометрической системы, обсуждение чего выходит за рамки данной работы.

5. Цифровая сфокусированная приемная антенная решетка

Построение приемной системы на основе цифровой антенной решетки относится к числу наиболее перспективных направлений. В его основе - преобразование входного аналогового сигнала в цифровой и проведение всей дальнейшей обработки уже в цифровом виде. Элемент антенной решетки, как физически представленной, так и виртуальной, представляет собой антенну-аппликатор, МШУ, присоединенный к ее выходу и преобразователь принятого «сигнала» в цифровую форму

Хорошим решением с точки зрения построения программируемых радиосистем являются современные средства прямого преобразования. Приемник прямого преобразования непосредственно демодулирует ВЧ-сигнал на частоте несущей. Преимущество такого решения – в сокращении числа компонентов в схеме за счет исключения из нее каскадов промежуточной частоты (ПЧ). Также при исключении из схемы каскадов промежуточной частоты и прямом преобразовании сигнала на нулевую ПЧ можно избежать проблем зеркального канала приема, присущих супергетеродинным архитектурам [29].

Цифровую часть сфокусированной антенной решетки можно представить в двух вариантах реализации:

- 1). Принятое электромагнитное колебание после усиления несколькими каскадами МШУ поступает на IQ-демодулятор (квадратурный демодулятор), где переносится на нулевую частоту и затем на АЦП (Рис.15 а)
- 2). Без переноса на нулевую частоту: «сигнал» поступает сразу на АЦП (Рис. 15б).

Для большинства «радиотехнических» применений ЦАР полоса частот сигнала значительно меньше значения центральной частоты и оправдана «оцифровка» его после его переноса на промежуточную частоту. В типичных приложениях радиотермометрии, как видно из Рис. 15, перенос «сигнала» на

нулевую частоту ненамного снижает требования к АЦП, но ведет к дополнительному усложнению приемного устройства.

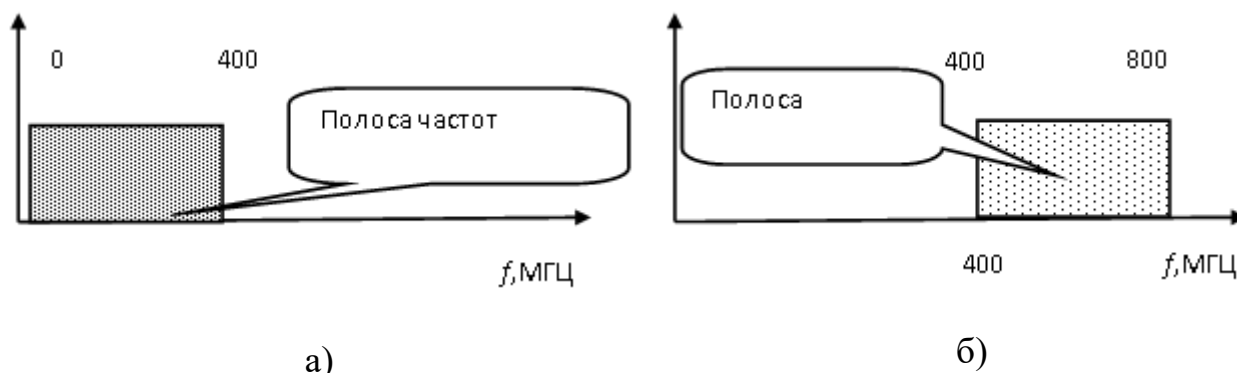


Рис. 15 Спектры для частотного диапазона, обычно используемого в радиотермометрической диагностике. а) - «сигнал» для оцифровки после переноса на промежуточную частоту, равную $(f_{\text{ниж}} + f_{\text{верх}})/2$, б) - при непосредственном преобразовании.

При преобразовании в цифровую форму быстродействие (в соответствии с теоремой Котельникова – не менее $2f_{\text{верх}}$) должно быть не хуже примерно 1 ГГц в схеме с преобразованием частоты и порядка 1.5...2 ГГц при непосредственном преобразовании. В настоящее время ведущие мировые производители, например, Analog Devices (<https://www.analog.com/en/parametricsearch/10826#/>) предлагают быстродействующие АЦП с частотой дискретизации до 10 ГГц, а также IQ-демодуляторы. Таким образом, реализация антенны в виде цифровой антенной решетки вполне возможна на основе существующей элементной базы, причем с далеко не рекордными показателями.

Заключение

Использование принципа сфокусированной апертуры позволяет заметно улучшить показатели радиометрической аппаратуры, применяемой для задач неинвазивной диагностики. При типично используемых радиометрах нижней части дециметрового диапазона повышение контраста малоразмерных образований может достигать значений не менее нескольких раз. Вполне реалистичным представляется использование принципа синтезированной

апертуры в приемной активной антенной решетке. Необходимая элементная база существует уже сегодня и представлена на рынке различными отечественными и зарубежными производителями.

Несомненно, перспективным представляется использование принципа сфокусированной цифровой приемной антенной решетки с синтезированной апертурой. Современное состояние цифровой элементной базы позволяет в полной мере осуществить ее практическую реализацию. В среднесрочной перспективе можно ожидать общедоступных цифровых процессоров и АЦП с требуемыми параметрами.

Литература

1. Веснин С.Г. Микроволновая радиотермометрия – национальное достояние России [электронный ресурс]. Сайт издательского дома «Медицинский бизнес». <http://www.medbusiness.ru/178.php>
2. Гуляев Ю.В., Леушин В.Ю., Гудков А.Г., Щукин С.И. и др. Приборы для диагностики патологических изменений в организме человека методами микроволновой радиометрии. *Нанотехнологии: разработка, применение, XXI век*. 2017. Т.9. №2. С.27-43.
3. Кубланов В.С., Борисов В.И. СВЧ-радиометры для функциональных исследований головного мозга. *Известия высших учебных заведений*. 2012. № 7. С.41-49.
4. Кубланов В.С., Довгопол С.П., Азин А.Л. Исследование функционального состояния головного мозга методами многоканальной СВЧ-радиотермографии. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 1998. №3. С. 42-49.
5. Седелников Ю.Е., Никишина Д.В., Халикова К.Н. Антенна-аппликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Пат. РФ № 2562025. Оpubл. 10.09.2015. Бюлл. №25.
6. Кубланов В.С., Сельский А.Г., Коркунов В.Г. Устройство для приема собственного радиотеплового излучения человека. Патент 2049424 (RU), МПК⁷ А61В 5/00. Оpubл. 10.12.1995. Бюлл. №34.

7. Манойлов В.Ф., Назарчук Л.Ю., Яненко А.Ф. Аппликаторная антенна для микроволновой радиометрии [электронный ресурс]. <http://nauchebe.net/2012/03/applikatornaya-antenna-dlya-mikrovolnovoj-radiometrii/>
8. Barret I.J. al. A new microstrip radiator for medical applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1980.Vol.MTT-28. No.12. P.1452-1459.
9. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Миниатюрные антенны-аппликаторы для микроволновых радиотермометров медицинского назначения [электронный ресурс]. Сайт компании «РТМ Диагностика» http://rtmdiagnosics.com/uploads/file/vesnin_miniature_antenna.pdf
10. Веснин С.Г. Антенна аппликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта (Варианты). Заявка: 2005133624/14, 31.10.2005
11. Веснин С.Г. Антенна-аппликатор и устройство для определения температурных изменений внутренних тканей биологического объекта и способы определения температурных изменений и выявления риска рака. Патент РФ №2407429. 2008.
12. Panchenko V.A., Kublanov V.S., Baranov S.A., Borisov V.I., Sedelnikov Y.E. Antenna for contact microwave radiometers for monitoring of the brain microwave radiation. *2017 International Applied Computational Electromagnetic Society Symposium – ACES 2017*. Italy, 2017. P.118-121.
13. Петросян В.И., Сеницын Н.И., Елкин В. А и др. Устройство для исследования объектов КВЧ-воздействием. Патент №2108058 на изобретение 10.04.98. Бюлл. №10.
14. Петросян В.И., Сеницын Н.И., Елкин В. А и др. Способ исследования объектов КВЧ-воздействием. Патент №2108566 на изобретение 10.04.98. Бюлл. №10.

15. Петросян В. И., Сеницын Н. И., Елкин В. А. Антенны-апликаторы для резонансной волновой КВЧ/СВЧ – радиоспектроскопии природных образований. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 1999. № 8. С. 36-41.
16. Елкин В.А., Петросян В.И., Сеницын Н.И., Башкатов О.В. Апликаторные СВЧ антенны для функциональных биомедицинских и физических исследований [электронный ресурс].
<http://aquatone.su/d/447480/d/applikatornye--svch--antenny-dlya--funkcionalnyh-biomedicinskih-i-fizicheskikh-issledovaniy.pdf>
17. Веснин С.Г., Седанкин М.К. Сравнение антенн-апликаторов медицинского назначения. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2012. №10. С.63-74.
18. Банников И.А., Ильиных А.Б., Мительман Ю.Е., Борисов В.И. Анализ свойств вибраторной антенны апликатора в задаче радиометрии головного мозга. В сборнике докладов «Информационные технологии телекоммуникации и системы управления». 2016. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. Екатеринбург. 2016. С.172-179.
19. Asimakis N.P., Karanasiou I.S., Uzunoglu N.K. Non-invasive microwave radiometric system for intracranial applications: a study using the conformal L-notch microstrip patch antenna. *Progress in Electromagnetic Research*. 2011. Vol.117. P.83-101.
20. Сельский А.Г. *Радиотермометр с фокусированной антенной для неинвазивного измерения температуры внутренних органов человека*. Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Москва, ИРЭ АН СССР. 1989.
21. Потапова О.В. *Исследование методов сфокусированной апертуры для повышения эффективности СВЧ технологических установок открытого типа*. Диссертация на соискание. уч. степ. канд. техн. наук. Казань, 1988. 118 с.

22. Потапова О.В., Халикова К.Н. Энергетические показатели сфокусированных антенн в задачах СВЧ технологий. *Вопросы электротехнологий*. 2016. №2. С.37-45.
23. Седельников Ю.Е., Никишина Д.В., Потапова О.В., Халикова К.Н.. Оценка влияния возмущающих факторов на эффективность фокусировки электромагнитного поля в задачах СВЧ технологий. *Вопросы электротехнологий*. 2016. №4. С.46-53
24. Седельников Ю.Е., Потапова О.В. Сфокусированные антенны в задачах медицинской радиотермометрии. *Инженерный журнал: Наука и инновации* [электронное научно-техническое издание]. 2014. №2(26). С.1-12. <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/1206.html>
25. Кубланов В.С., Потапова О.В., Седельников Ю.Е., Сысков А.М. Совершенствование характеристик СВЧ-радиотермографов в медицинских задачах. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2012. №4. <http://jre.cplire.ru/jre/apr12/6/text.pdf>
26. Седельников Ю.Е., Кубланов В.С., Потапова О.В. Сфокусированные антенны-апликаторы в задачах диагностической радиотермометрии. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2018. №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.7.4>
27. Никишина Д.В. Седельников Ю.Е. Анализ фокусирующих свойств антенн в зоне ближнего излученного поля в неоднородных диссипативных средах. *Вестник КГТУ*. 2013. №2. С.81-85.
28. *Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля*. Монография под ред. Седельникова Ю.Е., Тестоедова Н.А. Красноярск, издательство СибГАУ. 2015. 322 с
29. Плющев В.А., Сидоров И.А. СВЧ-радиометрические системы с синтезированной апертурой [электронный ресурс]. https://rtj.mirea.ru/upload/medialibrary/859/12-plysheev_sidorov.pdf

30. Сони Р., Ньюман Э. Многостандартные и многодиапазонные системы на основе приемников прямого преобразования. *Беспроводные технологии*. 2009. №2(15).
31. Седанкин М.К. *Антенны-аппликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта*. Диссертация на соискание уч. степ. канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2013. 247 с.
32. Седельников Ю.Е., Скачков В.А., Садыков А.Р. Антенна-аппликатор для измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Заявка на изобретение 2020109529 от 03.03.2020.

Для цитирования:

Седельников Ю.Е., Потапова О.В., Садыков А.Р., Скачков В.А. Сфокусированные антенны в задачах контактной радиотермометрии. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.11>