

УДК 621.369.67 : 520.8.056

СФОКУСИРОВАННЫЕ АНТЕННЫ-АПЛИКАТОРЫ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ

Ю. Е. Седельников¹, В.С. Кубланов², О.В. Потапова¹¹ Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н.Туполева - КАИ, 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, 10² Уральский Федеральный университет, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Статья поступила в редакцию 19 июня 2018 г.

Аннотация. Статья посвящена использованию метода фокусировки в зоне ближнего излученного поля для построения антенн-апликаторов средств медицинской контактной радиометрии. Дается анализ типовых антенн-апликаторов, изложены основные положения апертурной теории антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля, приводятся данные анализа эффективности их применения в задачах контактной радиотермометрии.

Ключевые слова: сфокусированные антенны, радиотермометрия, излучатели электрического типа, излучатели магнитного типа, эффективность фокусировки.

Abstract. In the article the analysis and assessment were done for using the focused antennas-applicators in diagnostic equipment of radio thermometry. The properties of focused antennas in dissipative medium were described. The most important properties for typical biological mediums are: the absence of expressed effective focusing in transverse direction, existence of optimal aperture size the (order of values is more than several wave-lengths in medium), which provides maximum gain, reducing of focused effect as far as decreasing the focused distance. Approximate model was used for quantitative analysis. Correctness of approximate model at distances more than half boundary of near-field region was showed by electrostatics simulating. We carried out model-based analysis of directional radiation of focused antennas which were placed on the plane or spherical boundary of air-medium. Also we performed the analysis of focusing effect for electrical type radiators (dipoles) and magnetic type radiators (slot radiators). The work shows that using magnetic type radia-

tors is more effective than electrical type radiators for distance from aperture less 1,5...2 wave-lengths in medium. It was showed that focused antennas allow to obtain the greater values of a gain at distances from antenna more than wave-lengths in medium. We considered the focused antennas which placed on the spherical boundary of air-medium.

Key words: focused antennas, radio thermometry, electric type radiators, magnetic type radiators, efficiency of focusing.

1. Введение

После первых основополагающих работ, выполненных в 80-е годы [1-4], методы контактной СВЧ радиотермометрии получили интенсивное развитие как эффективный инструмент медицинской неинвазивной диагностики [5]. К настоящему времени не только выполнено значительной число медико-биологических исследований и технических разработок, но и созданы серийные приборы, внедренные в медицинскую практику [6]¹. Несмотря на достигнутый прогресс, работы по совершенствованию методов и аппаратуры медицинской радиотермометрии продолжают как в направлении создания приемной аппаратуры так и методов обработки данных измерений и их диагностической интерпретации.

Важным элементом радиометрической аппаратуры являются датчики радиояркостной температуры - контактные антенны- аппликаторы. Выполнено значительное число разработок, как в части принципов построения и анализа результатов, так и технических решений - конструкций практических вариантов антенн [7-27]. В ряде работ рассматривались принципиальные вопросы повышения эффективности контактной радиотермометрии: путем выбора типа антенны, размеров апертуры, использования принципа фокусировки [29-32]. Показано, что в ряде случаев предпочтительнее использовать малогабаритные антенны [7,18] с размерами апертуры порядка 0.1 длины волны в воздухе. В то же время результаты работ [29-37] свидетельствуют об эффективности использо-

¹ Некоторые данные о состоянии вопроса и достигнутых результатах можно найти в [7].

вания принципа фокусировки, реализуемого при размерах апертуры не менее нескольких значений длины волны в среде. Целью настоящей работы является сравнительный анализ свойств малогабаритных антенн-аппликаторов и антенн, реализующих принцип фокусировки.

2. Антенны-аппликаторы в задачах СВЧ радиотермометрии

Мощность радиотеплового излучения, регистрируемого радиометрическим приемником, 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.

Рассмотрим общий случай, когда объект с диссипативными свойствами расположен вблизи антенны. Объект и антенну заключим в замкнутую поверхность S (рис. 1).

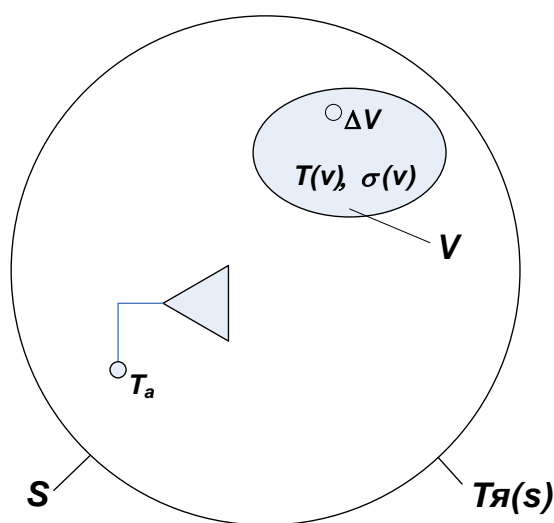


Рис. 1. Расположение объекта с диссипативными свойствами вблизи антенны.

В отсутствие значимых радиоярких аномалий внешнего радиотеплового излучения наибольший интерес для СВЧ радиотермометрии представляет величина контраста ΔT_A антенной температуры, соответствующего наличию малоразмерного радиоконтрастного образования в области V :

$$\Delta T_A = \Delta T \frac{\Delta V}{V} K Y_V(v_0), \quad (1)$$

где

$$KY_V(v_0) = \frac{|E(v_0)|^2 \sigma(v_0)}{\frac{1}{V} \left(\oint_S \frac{|E(s)|^2}{Z_c} ds + \int_V |E(v)|^2 \sigma(v) dv \right)}. \quad (2)$$

Величина $KY_V(v_0)$ имеет физический смысл отношения удельной поглощенной мощности 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 мало-размерного участка объекта пропорционален $KY_V(v_0)$, а пространственная зависимость $KY_V(v_0)$ определяет достижимую точность определения положения аномалии, а также разрешающую способность при наличии нескольких аномалий.

Основными диагностическими показателями являются:

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

- точность определения положения аномалии, определяемая размерами и конфигурацией области наибольшей интенсивности напряженности электрического поля антенны аппликатора 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 и сфокусированных антенн [29-37] неочевиден и требует более детального изучения.

3. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля по монохроматическому сигналу

Область пространства, непосредственно примыкающая к источнику ($r < \lambda/2\pi$), как известно, называется ближней зоной излучения. Электромагнитное поле в указанной области по свойствам и структуре близко к статическим электрическим и магнитным полям и характеризуется, в зависимости от типа источника преобладанием быстро убывающих с расстоянием электрических или магнитных компонент. К ближней зоне примыкает область ближнего излученного поля с верхней границей порядка нескольких размеров апертуры антенны. Особенность электромагнитного поля в указанной зоне заключается в том, что электромагнитные поля элементарных участков апертуры имеют структуру неоднородной сферической волны, а результат интерференции полей от различных участков апертуры сильно отличается от случая дальней зоны, для которой $r > L_{анерт}^2/\lambda$. Наиболее существенным является то, что в указанной зоне возможна трехмерная фокусировка, т.е. формирование электромагнитного поля с выраженным максимумом интенсивности как в направлении вдоль, так и поперек апертуры. Свойства сфокусированных полей в их взаимосвязи с апертурным распределением к настоящему времени детально изучены рядом исследований и обобщены в монографии [36].

Применительно к задачам СВЧ радиотермометрии наиболее существенны следующие свойства сфокусированных антенн [36]:

- выраженная фокусировка в направлении вдоль апертуры имеет место как в средах без потерь, так и диссипативных, даже со значительными потерями вплоть до значений затухания $\alpha\lambda \sim 1 \dots 2$, где α и λ -коэффициент затухания и длина волны в среде соответственно. В поперечном направлении выраженная фокусировка возможна только в средах с умеренным затуханием: $\alpha\lambda < 0,1 \dots 0,2$ (рис. 2-3).

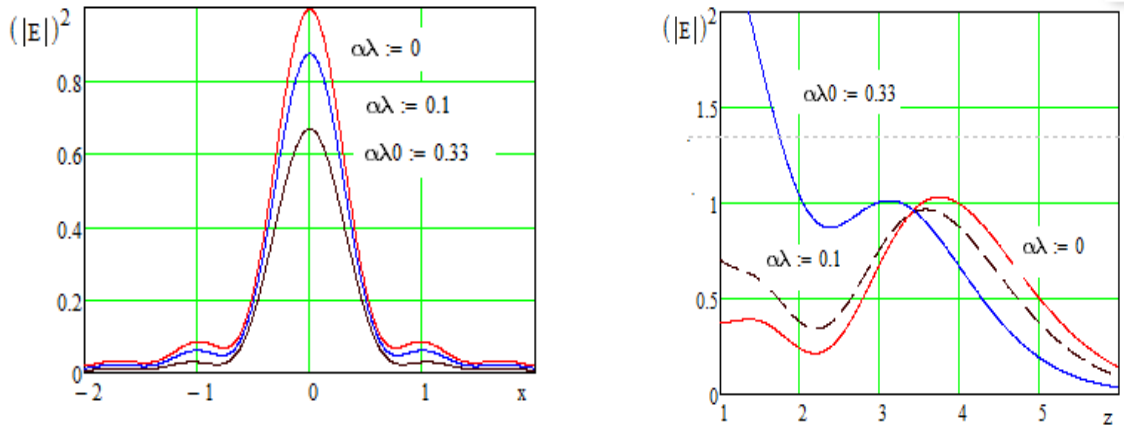


Рис. 2. Распределение $|E|^2$ в направлении вдоль и поперек апертуры при различных значениях затухания в среде. Размер апертуры - 10λ , точка фокуса $(0, 4\lambda)$

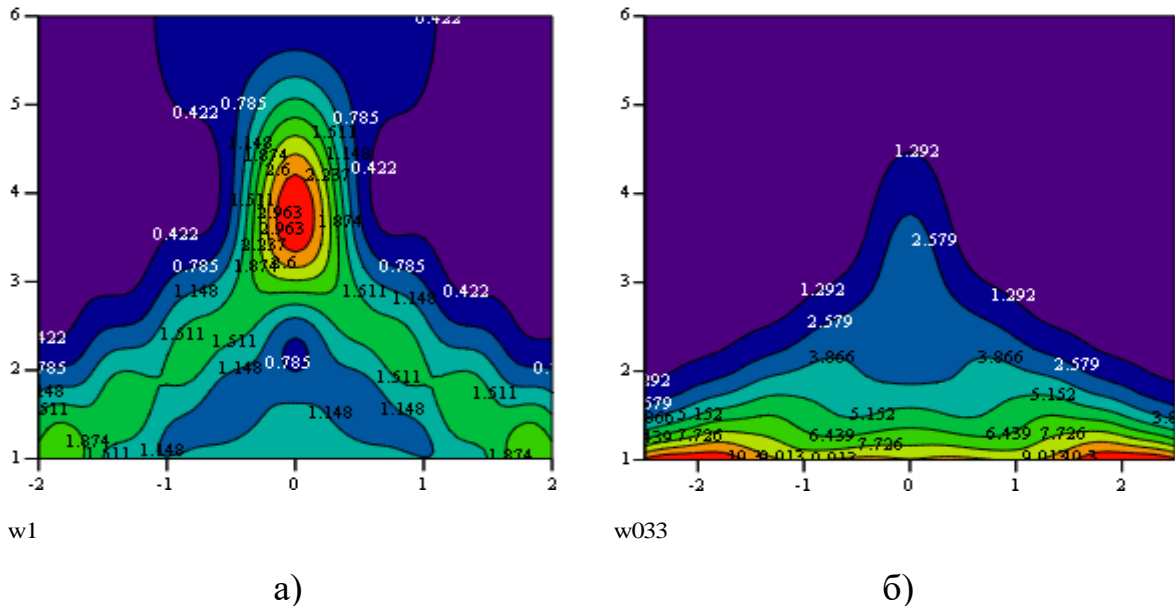


Рис. 3 Пространственное распределение $|E|^2$ для линейной антенны при различных значениях коэффициента затухания в среде.
 а) $\alpha\lambda=0$, б) $\alpha\lambda=0,33$. Размер апертуры - 10λ , точка фокуса $(0, 4\lambda)$.

- значение КНД, помимо электрических размеров апертуры, существенно зависит от расстояния до точки фокуса и коэффициента затухания в среде. Об-

шая тенденция: КНД снижается по мере возрастания потерь в среде и уменьшения фокусного расстояния;

- для заданных фокусного расстояния и коэффициента затухания в среде существует оптимальный размер апертуры, при котором достигается максимум КНД, а дальнейшее увеличение длины антенны влечет снижение КНД (рис. 3).

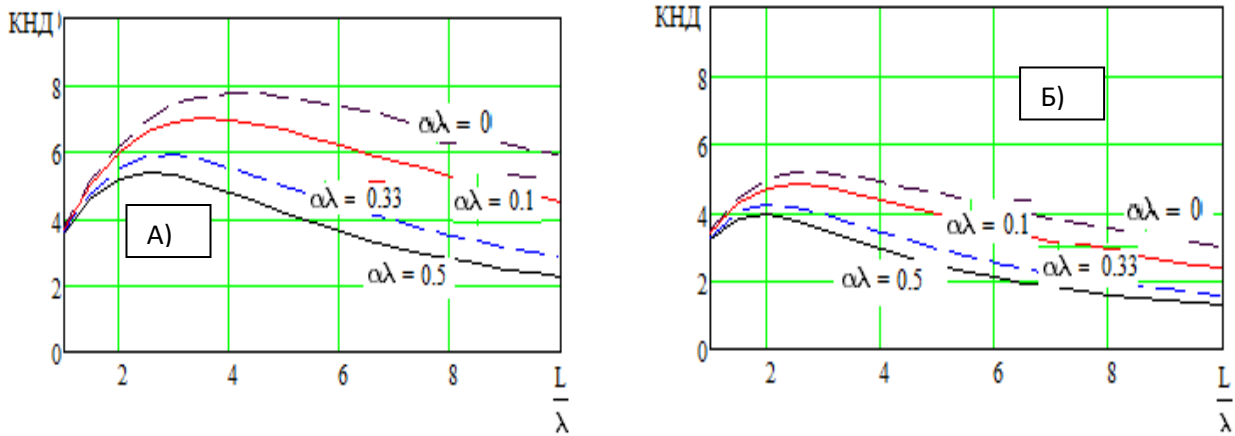


Рис.4. Зависимость КНД от размера апертуры при различных значениях затухания в среде, а) $z_0/\lambda=4$, б) $z_0/\lambda=3$.

- КНД сфокусированной антенны зависит от типа и параметров элементарных источников в апертуре [36-37].

- параметры электромагнитного поля, сфокусированного решеткой излучателей, близки к параметрам непрерывной апертуры равных электрических размеров [36].

Таким образом, в средах со значительным затуханием:

- эффективная фокусировка возможна только в направлении вдоль апертуры;

- максимально возможное значение КНД ограничено и достигается при относительно малых размерах апертуры;

- указанное максимальное значение КНД и оптимальный размер апертуры зависят от коэффициента затухания в среде, фокусного расстояния и параметров элементарного источника в апертуре или ДН излучателя антенной решетки.

4. Антенны, сфокусированные по широкополосному сигналу

В задачах радиометрии осуществляется прием и регистрация «сигнала», соответствующего собственному радиотепловому излучению обследуемого объекта в полосе частот, соответствующей приемному тракту приемника. Принципиальным отличием свойств антенн в составе широкополосных радиосредств является следующее. Любой антенне свойственно наличие частотных изменений характеристик излучения и приема. Для относительно узкополосных радиоустройств этими изменениями в полосе частот, соответствующих спектру радиосигнала, можно пренебречь. По этой причине такие показатели как диаграмма направленности антенны, коэффициент направленного действия и др., как правило, считают постоянными в полосе частот сигнала. Поэтому основные показатели антенн могут рассматриваться для монохроматического сигнала. Для антенн широкополосных радиосредств пренебрегать ими невозможно и приходится считаться с наличием частотной зависимости характеристик направленности: $F(\theta, \varphi, f)$ или, в зоне ближнего излученного поля - пространственных распределений $E(x, y, z, f)$. В этих условиях становится *невозможным* определять свойства антенны в отрыве не только от *спектрального состава* излучаемого радиосигнала, но и способа его *обработки* в приемной аппаратуре.

Действительно, ЭДС, наведенную в антенне широкополосным излучением, со спектром $G(f)$, можно представить как:

$$\text{ЭДС}(f, x, y, z) = E(x, y, z, f)G(f)h_{\delta}(f, x, y, z), \quad (3)$$

где $h_{\delta}(f, x, y, z)$ – действующая высота приемной антенны в угловом направлении на источник излучения. Линейный приемник осуществляет функцию взвешенного суммирования амплитуд колебаний в полосе $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f]$ с частотной характеристикой $K_{np}(f)$. Для рассматриваемого класса задач – радиометрии, пространственная избирательность в режиме приема может определяться значениями полной мощностью результирующего принятого сигнала в полосе частот радиоприема, т.е. с учетом (1) величиной

$$\int_{f_0-\Delta f/2}^{f_0+\Delta f/2} K Y_V(x, y, z, f) df = const \int_{f_0-\Delta f/2}^{f_0+\Delta f/2} |E(v_0)|^2 \sigma(v_0) df, \quad (4)$$

имеющей смысл удельной поглощенной энергии волны, излученной антенной в режиме передачи, в точке (x, y, z) .

В работе [36] проведен анализ наиболее существенных свойств антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля по широкополосному сигналу. Наиболее важным для рассматриваемых задач является то, что при симметричных относительно центральной частоты спектре сигнала и частотной характеристике приемного тракта, пространственное распределение удельной поглощенной энергии в полосе частот приема $[f_0 - \Delta f, f_0 + \Delta f]$ практически совпадает с распределением поглощенной мощности при монохроматическом сигнале с частотой f_0 . Рис. 5 может служить иллюстрацией сказанному.

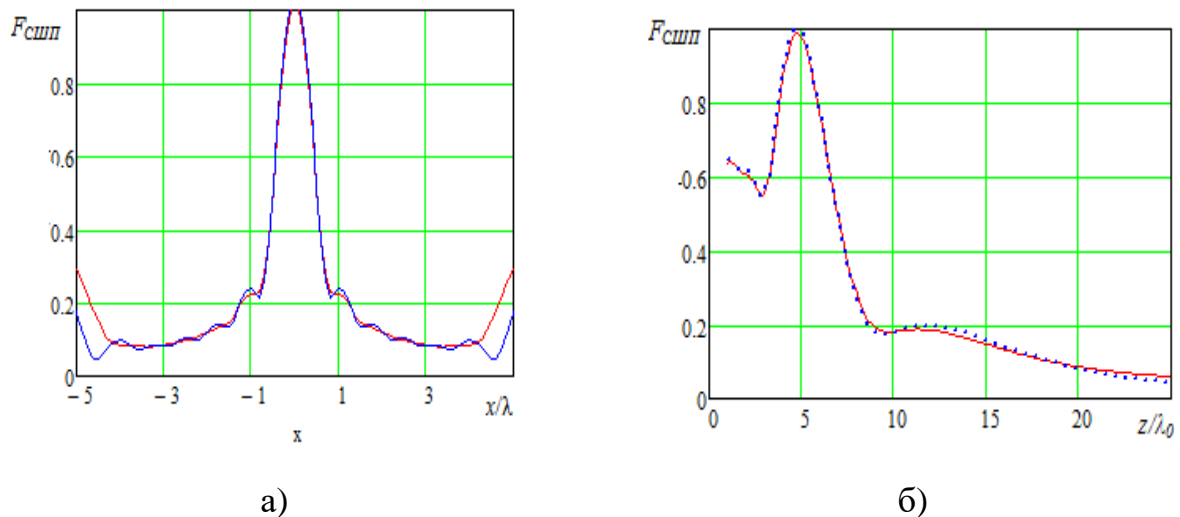


Рис.5. Распределения $|E_{CSPH}^{PRDzn}(\theta, \varphi, \Delta f)|$ линейной сфокусированной антенны в направлениях, параллельном (а) и перпендикулярном (б) апертуре. Спектр – равномерный в полосе частот $2\Delta f/f_0 = 0,5$ и $2\Delta f/f_0 = 0,01$.

Из приведенных данных следует важный практический вывод: поскольку ширина относительной полосы частот в типовых радиометрах диагностического назначения не превышает 50%, а спектр шумового радиотеплового излучения можно считать равномерным в указанной полосе частот, анализ направленных свойств антенн, в том числе сфокусированных, достаточно проводить для монохроматического сигнала в режиме передачи антенны на средней частоте полосы радиоприема.

5. Сфокусированные антенны в типовых биологических средах

Целью рассмотрения является численная оценка эффекта фокусировки в типовых условиях применения в медицинской радиотермометрии. Рассматривается гипотетическая среда с параметрами, близкими к биологическим тканям: $\varepsilon=50$, $\alpha\lambda=0.5$, частота - 500 МГц. Для предварительных оценок рассматривается упрощенная модель в виде сплошной неограниченной среды с системой излучателей различного типа и размеров, образующих сфокусированную антенну.

Модель антенны. Напряженность электрического поля, создаваемого антенной, сфокусированной в точку (x_0, y_0, z_0) , в точке наблюдения (x, y, z) можно представить как суперпозицию парциальных электромагнитных полей $\vec{g}(\xi, \eta, x, y, z)$, создаваемых элементарными источниками в апертуре:

$$\vec{E}(x, y, z) = \int_S \vec{g}(\xi, \eta, x, y, z) j(\xi, \eta) \frac{e^{-jkr(\xi, \eta, x, y, z)}}{r(\xi, \eta, x, y, z)} d\xi d\eta, \quad (5)$$

где $j(\xi, \eta)$ – амплитудно-фазовое распределение излучающих токов, $r(\xi, \eta, x, y, z)$ – расстояние между точкой наблюдения и элементарным источником в апертуре.

$$j(\xi, \eta) = J(x, y) \exp(j\beta R(\xi, \eta, x_0, y_0, z_0)) \quad (6)$$

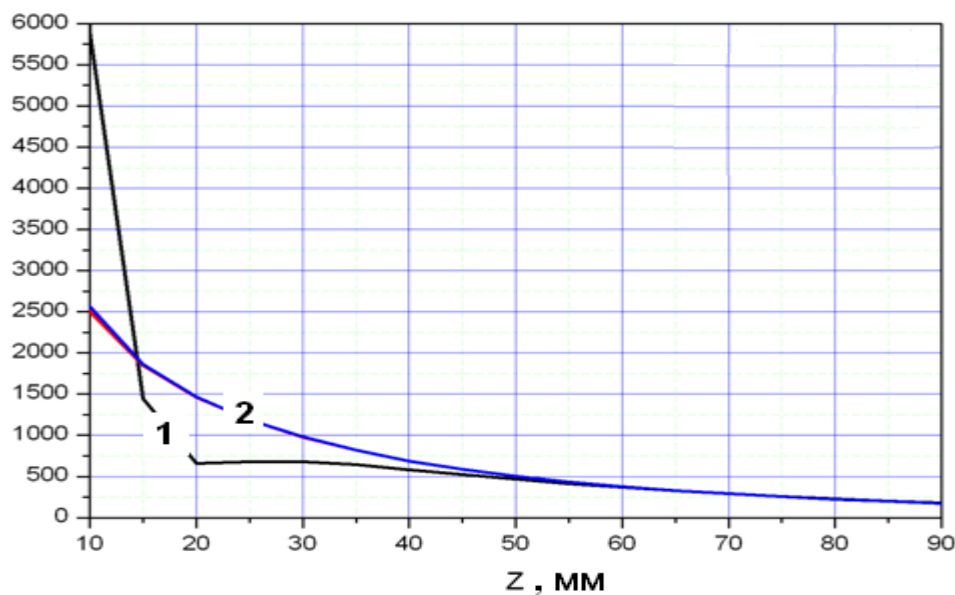
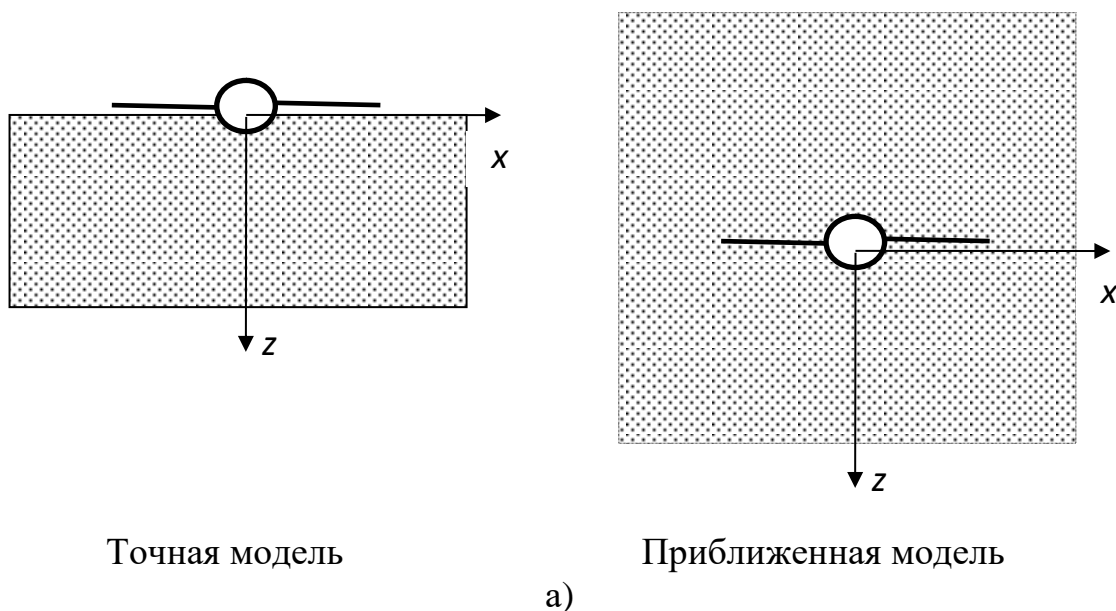
В качестве парциальных электромагнитных полей элементарного источника в апертуре $\vec{g}(\xi, \eta, x, y, z)$ можно использовать классическое представление электромагнитного поля элементарного источника в среде с комплексной диэлектрической проницаемостью. $\varepsilon = \varepsilon + j\sigma/\omega$ источника [38]².

Численное моделирование простейших излучателей показывает, что указанное представление является достаточно корректным вплоть до расстояний до антенны менее 0,1 длины волны в среде (рис. 6, 7). Данные приведены для следующих параметров: частота $f = 600$ МГц, параметры материала $\varepsilon = 45$, $\sigma = 0,5$. Для рис. 7: радиус сферы, на которой располагались излучатели, $R=50$

² Оценки согласно данным представлениям справедливы при удалении точки наблюдения на расстояние порядка долей условной границы ближней зоны [35]. Для получения более строгих результатов следует обратиться к [39] или численным методам вычислительно электродинамики

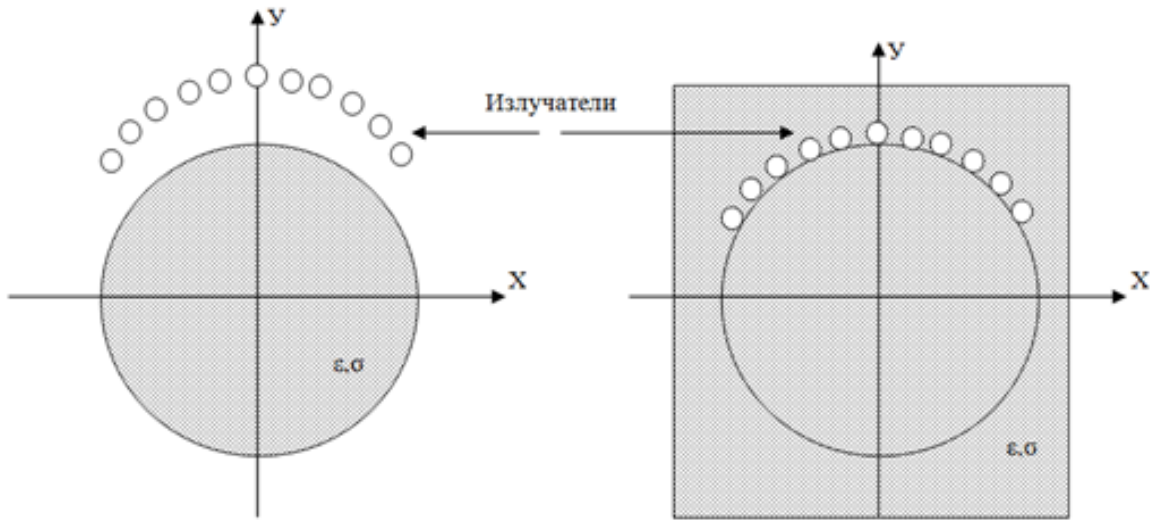
см, отношение радиуса сферы к длине волны $R/\lambda = 2,81$; число излучателей в решетке $n = 11$.

В дальнейшем анализ сфокусированных антенн проводится с использованием указанной модели.



б)

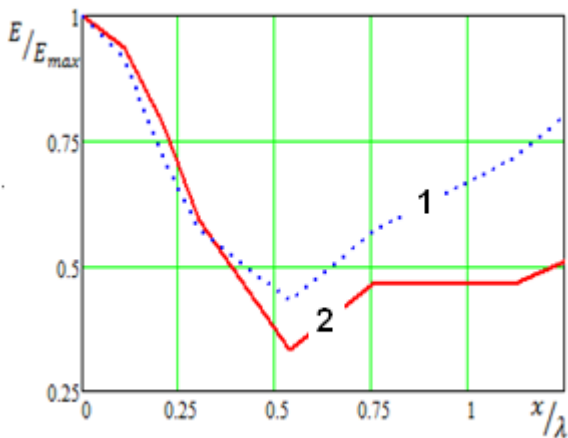
Рис. 6. К верификации модели сфокусированной антенны: а) точная и приближенная модели полуволнового вибратора, б) напряженность электрического поля в поперечном направлении к антенне (кривая 1 рассчитана согласно приближенной модели, кривая 2 – получена методом численного электродинамического моделирования).



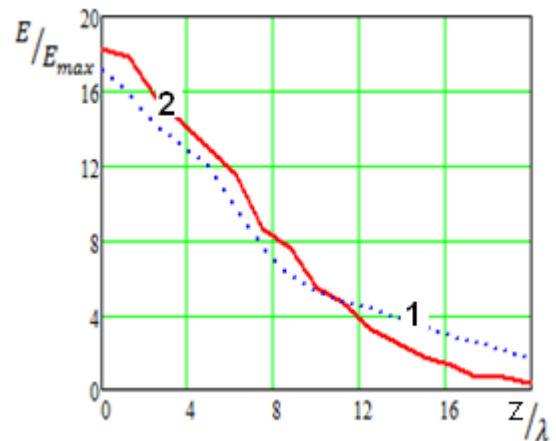
Точная модель

Приближенная модель

а)



б)



в)

Рис. 7. К верификации модели сфокусированной антенны: а) точная и приближенная модели полуволнового вибратора, б) и в) напряженность электрического поля в продольном и в поперечном направлении к антенне (кривая 1 рассчитана согласно приближенной модели, кривая 2 – рассчитана численным методом электродинамического моделирования).

6. Малогабаритные источники электрического и магнитного типа

В ряде работ обсуждается вопрос о предпочтительности использования в задачах контактной радиотермометрии малогабаритных антенн-аппликаторов³ различных типов, а именно электрического, магнитного и комбинированного

³ Указанные антенны действительно являются малогабаритными в том смысле, что их геометрические размеры ($0.05...0.1 \lambda_0$) значительно меньше длины волны в воздухе, хотя их электрические размеры имеют порядок половины длины волны в среде.

типа [16-221, 24-25, 26-27]. В работах [24-25] различные типы антенн-аппликаторов рассматриваются с точки зрения характера электромагнитного поля в среде вблизи апертуры антенны. Одним из заключений является заключение о предпочтительности использования излучателей магнитного типа. Данное мнение аргументировано тем несомненным фактом, что в ближней зоне элементарного излучателя магнитного типа отсутствует радиальная компонента электрического поля и, следовательно, удельное поглощение $\sigma|E|^2$ при равной излучаемой мощности должно быть меньшим по сравнению с источником электрического типа. Отсюда делается заключение о большей глубине проникновения поля в среду. Электродинамический анализ, проведенный для типовых значений параметров биологической среды и частотного диапазона при определенных оговорках, подтверждает этот вывод. Сравнение показателей пространственного распределения полуволнового излучателя в типичных биологических средах ($\epsilon=50$, $\sigma=0,5$ См/м, средняя частота 500 МГц) показывает следующее:

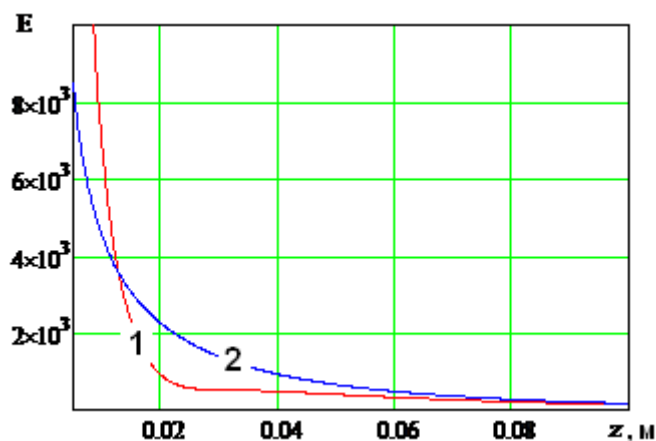


Рис 8. Поперечная зависимость модуля напряженности электрического поля для полуволнового электрического (1) и магнитного (2) вибраторов.

- в ближней зоне модуль напряженности электрического поля полуволнового вибратора значительно превышает аналогичное значение для полуволнового магнитного вибратора (например, щелевого) (рис 8). На рис.9 показано пространственное распределение отношения модулей напряженности электрического поля для полуволнового электрического и магнитного вибраторов;

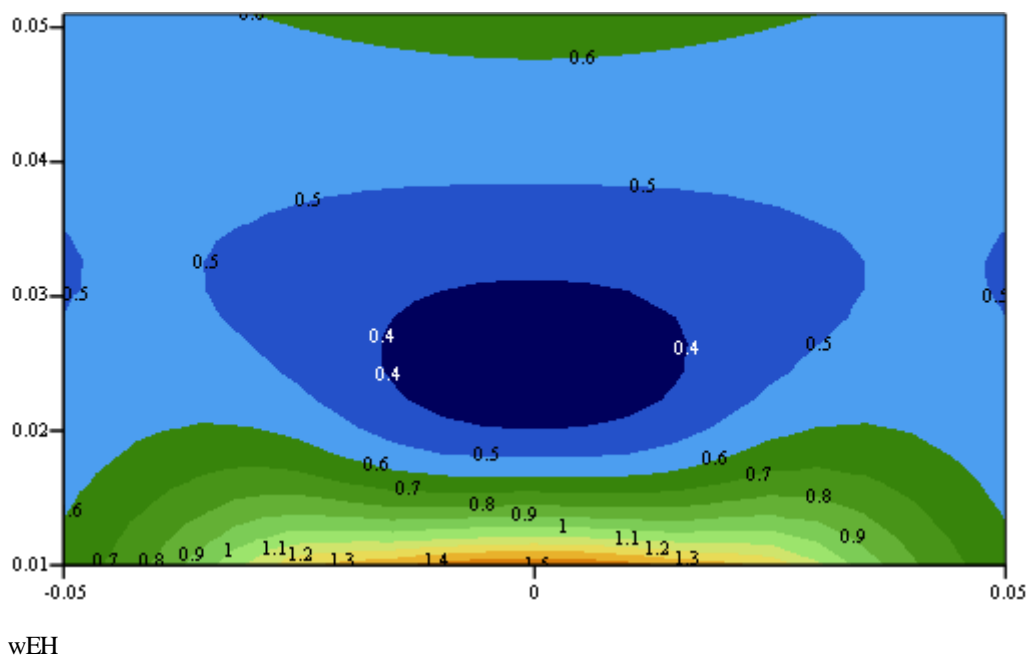


Рис. 9. Отношение модулей напряженности электрического поля электрического и магнитного вибраторов

- для реальных антенн указанная закономерность имеет место при различных электрических размерах излучателя, причем становится менее выраженной с увеличением размера апертуры. Отмеченные различия практически исчезают на расстоянии от апертуры превышающем значение порядка 0,4 длины волны в среде (рис.10):

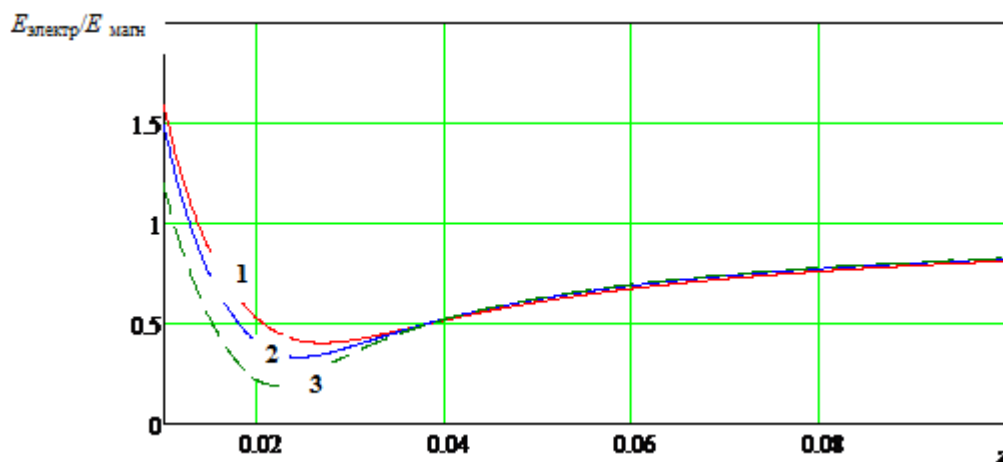


Рис 10. Соотношение модулей напряженности электрического поля при различных размерах апертуры:
1, 2, 3 - размер апертуры $\lambda_{\text{среды}}$, $\lambda_{\text{среды}}/2$, $\ll \lambda_{\text{среды}}$ соответственно.

- различие излучателей электрического и магнитного типа становятся несущественными при расстояниях от апертуры, превышающем величину порядка $2..3$ длины волны в среде (рис. 11).

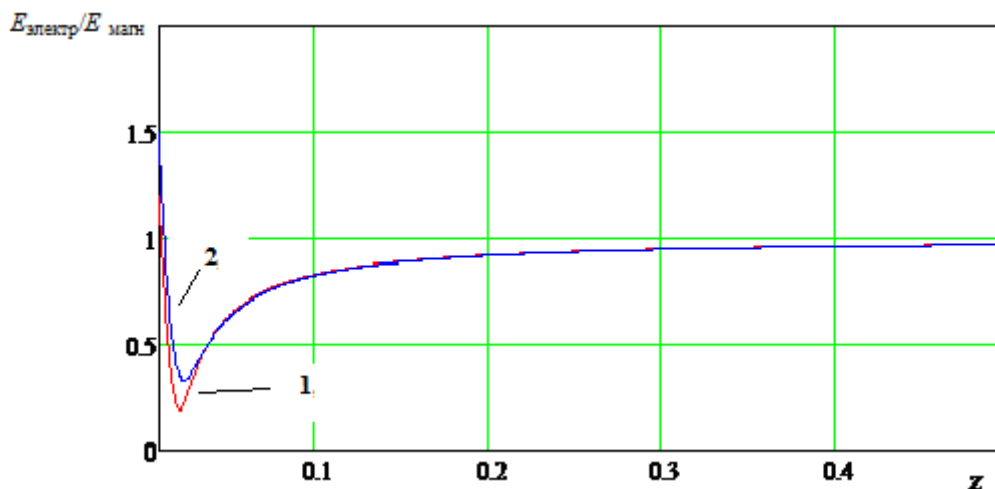


Рис 11. Отношение значений напряженности электрического поля, создаваемого электрическим и магнитным вибраторами, при различных расстояниях от апертуры в направлении нормали. Длина вибратора $0,05 \lambda_{\text{среды}}$, (кривая 1) и полуволновый вибратор (кривая 2).

Таким образом, использование антенны аппликатора магнитного типа в типовых биологических средах с точки зрения «глубины проникновения» предпочтительнее вплоть до расстояний от апертуры порядка $1,5 \dots 2$ длины волны в среде. При большем удалении от апертуры существенного различия не наблюдается. Однако с точки зрения практической реализации антенны аппликаторы магнитного типа неоспоримо уступают излучателям электрического типа. Во-первых, для них труднее обеспечить хорошее согласование с трактом в широкой полосе частот. Во-вторых, при равной длине апертуры антенны магнитного типа, например в виде щелей, имеют большие габаритные размеры ввиду наличия металлического экрана, а также замкнутой полости - резонатора с обратной к объекту стороны. Во-вторых, практические конструкции щелевых антенн, как правило, имеют меньшую по сравнению с вибраторными полосу частот согласования.

Разумный компромисс представляют антенны-аппликаторы, сочетающие свойства электрического и магнитного излучателя, в частности, выполненные в

виде открытого конца металлического волновода [17-18]. В этом случае соотношение амплитуд электрических и магнитных токов определяется электрическими размерами волновода и диэлектрической проницаемостью заполняющего материала. При этом ввиду принципиальной необходимости обеспечения малых геометрических размеров должны использоваться материалы с высоким значением относительной диэлектрической проницаемости - порядка 50 и более. В этом случае отношение амплитуд электрических и магнитных токов в апертуре близко к единице и, как следствие, пространственное распределение электромагнитного поля в среде близко к среднему для электромагнитных полей электрического и магнитного вибраторов.

Другим вариантом является использование широкополосных вибраторов [21, 27], плечи которых выполнены в виде секторных пластин с углом раствора $\varphi_{\text{ант}}$. В этом случае при $\varphi_{\text{ант}} \rightarrow 0$ антенна по свойствам приближается к тонкой проволочной вибраторной антенне, при $\varphi_{\text{ант}} \rightarrow 0$ - к щелевой, т.е. магнитного типа. Таким образом, при $\varphi_{\text{ант}} \approx 90^\circ$ пространственное распределение электромагнитного поля в среде также близко к среднему для случаев полуволнового электрического и магнитного вибраторов, т.е. является величиной порядка квадратного корня значений, представленных на рис. 8⁴. Ожидаемый «выигрыш» при использовании антенн в виде открытого конца волновода или секторного вибратора по сравнению с тонким полуволновым вибратором может составлять величину порядка 1,5 ... 2 на глубине 0,6 ... 0,3 длины волны в биологической среде.

7. Сфокусированные антенны на плоской границе «воздух - среда»

Для получения основных результатов качественного характера достаточно рассмотреть линейную антенну, выполненную из излучателей электрического типа. Как и в предыдущем разделе, приведенные оценки относятся к среде с параметрами типовой биологической среды (среды) ($\epsilon=50$, $\sigma=0,5$ См/м, средняя частота 500 МГц). Сфокусированная антенна представляет собой линейный из-

⁴ Более точная оценка требует детального учета конструкции антенны аппликатора и может быть получена только путем электродинамического моделирования, например как в работе [20, 29]

лучатель с равномерным амплитудным распределением, фазовое - соответствует условию фокусировки в точку, отстоящую на расстояние z_0 в направлении нормали к центру антенны.

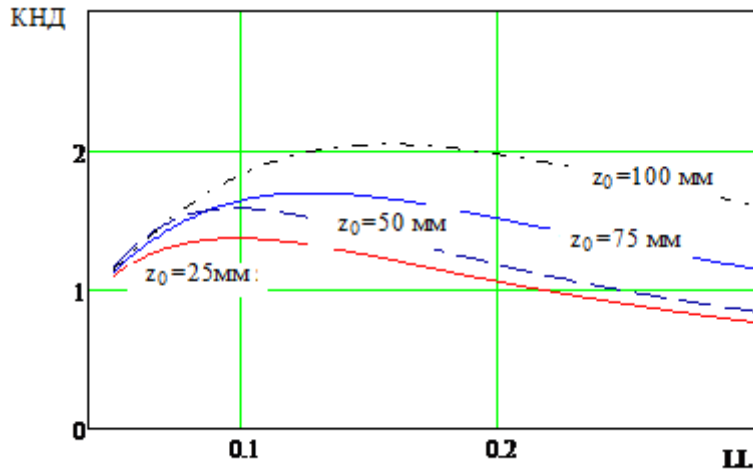


Рис. 12. Относительный КНД в зависимости от длины антенны и фокусного расстояния. Источники электрического типа.

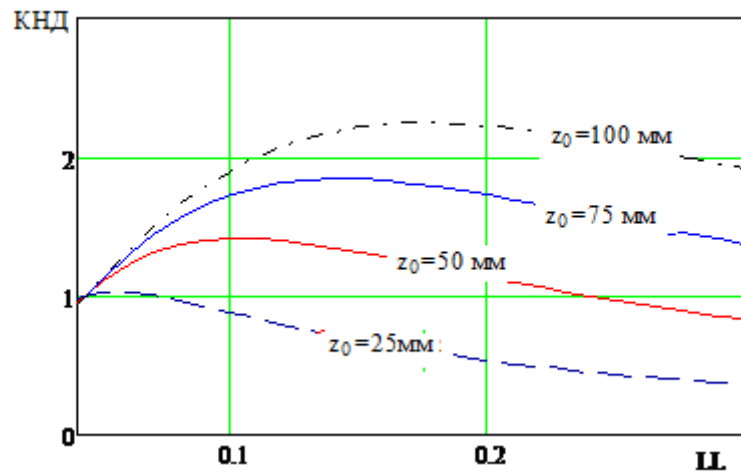
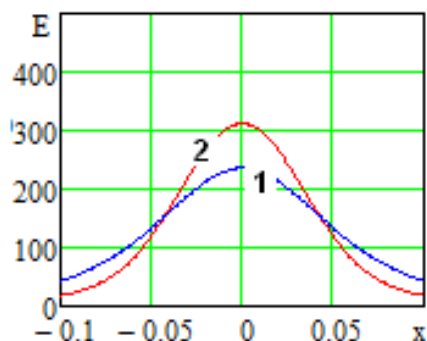


Рис. 13. Относительный КНД в зависимости от длины антенны и фокусного расстояния. Источники магнитного типа.

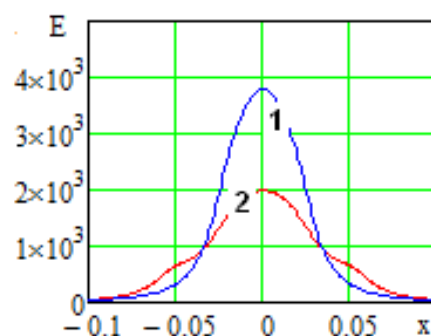
Как известно [36], КНД линейной антенны, сфокусированной в зоне ближнего излученного поля, существенно зависит от ее электрических размеров $L_{\text{ант}}$ и фокусного расстояния z_0 . При этом существуют оптимальный электрический размер, зависящий от величины фокусного расстояния и параметром среды $L_{\text{ант опт}}(z_0, \epsilon, \sigma)$, причем увеличение $L_{\text{ант}}$ сверх оптимального значения не-

целесообразно. На рис. 12, 13 показана зависимость КНД линейной сфокусированной антенн электрического и магнитного типа в зависимости от длины и фокусного расстояния.

Положительный эффект использования принципа фокусировки зависит от положения точки наблюдения и фокусного расстояния. Оценим его для варианта антенны, выполненной из источников электрического типа.

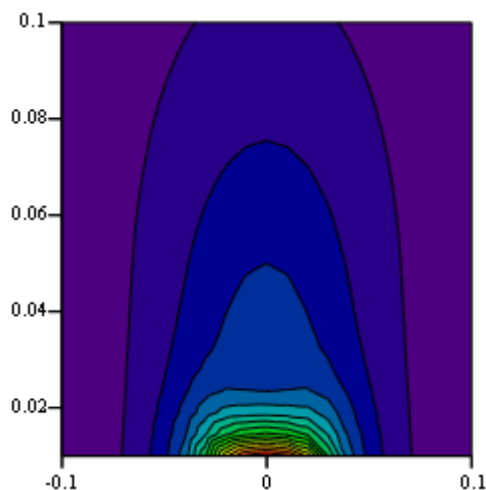


а) фокусное расстояние 75 мм



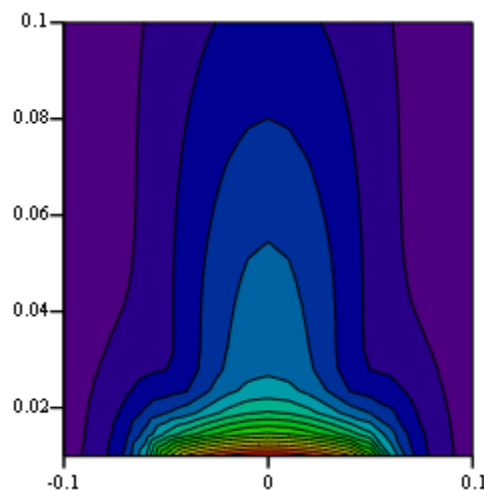
б) фокусное расстояние 12,5 мм

Рис.14. Напряженность электрического поля полуволновой (1) и сфокусированной (2) антенн в фокальной плоскости.



ww0

а) полуволновая антенна



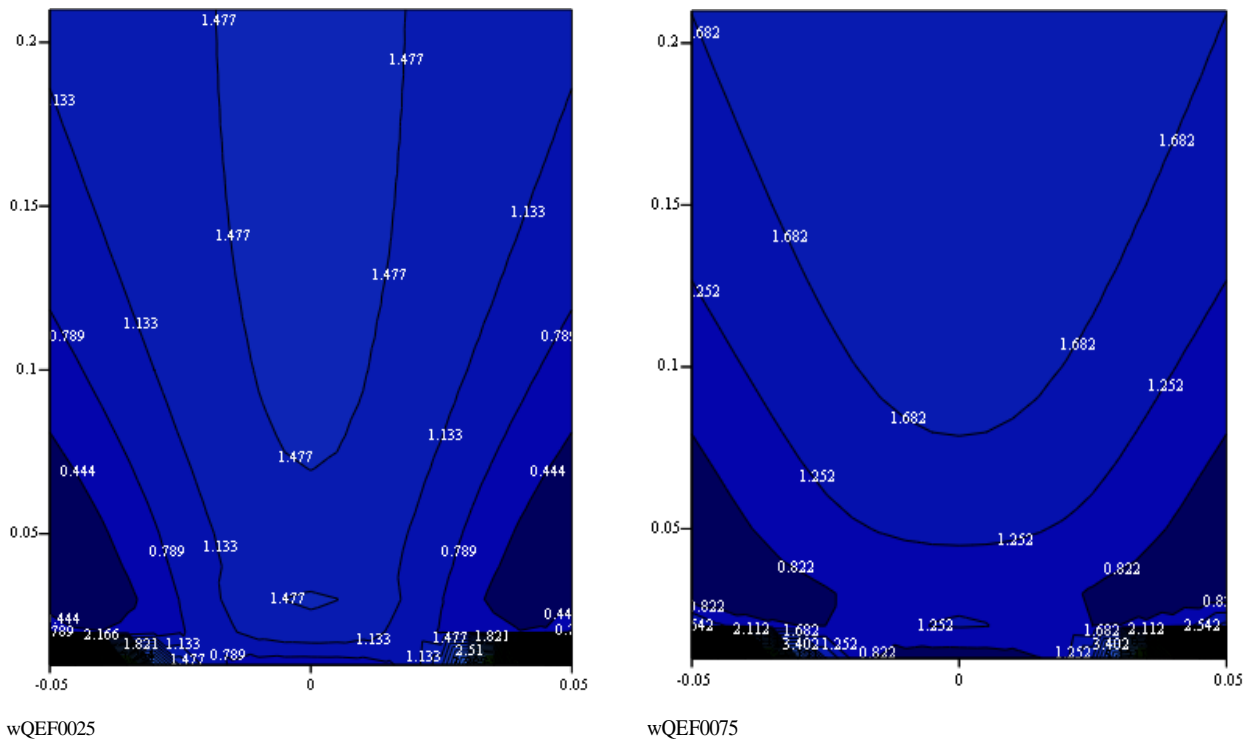
ww

б) сфокусированная антенна длиной 100 мм

Рис. 15. Пространственные распределения напряженности электрического поля.

На рис. 14 показаны пространственное распределение модуля напряженности электрического поля сфокусированной антенны и синфазной полуволновой антенны длиной 100 мм при двух значениях фокусного расстояния. На рис. 15 показаны пространственные распределения модулей напряженности электрического поля для полуволновой и сфокусированной антенн (фокусное расстояние 75 мм).

Рис. 14, 15 иллюстрируют практически важное положение: использование принципа фокусировки становится нецелесообразным при малой глубине точки наблюдения (менее величины порядка 0,2 длины волны в среде). Выигрыш, т.е. увеличение напряженности электрического поля в точке фокусировки проявляется при больших значениях глубины и возрастает с ее увеличением. На рис. 16 показано отношение указанных величин.

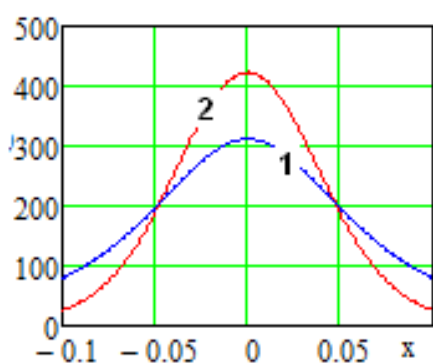


а) фокусное расстояние 25 мм

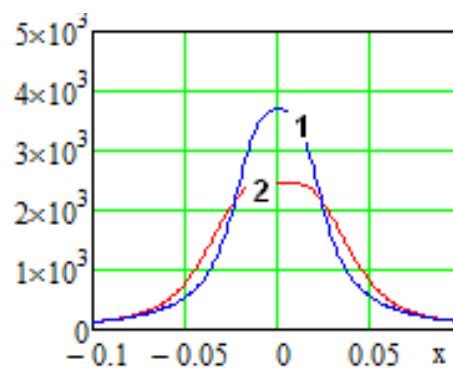
б) фокусное расстояние 75 мм

Рис. 16. Увеличение напряженности электрического поля сфокусированной антенны по сравнению с полуволновым вибратором.

Аналогичные результаты имеют место для излучателей магнитного типа. На рис. 17 - 19 показаны расчетные данные для полуволновой и сфокусированной антенн (фокусное расстояние 75 мм).

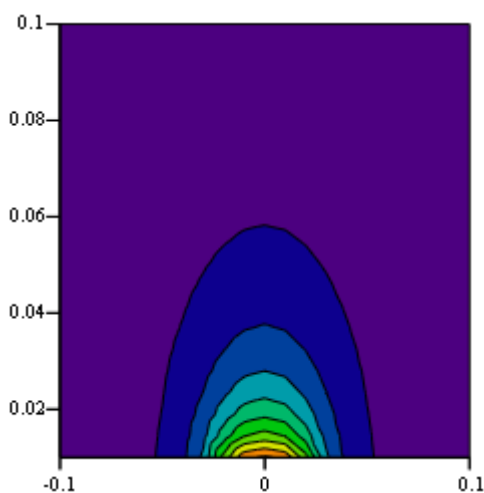


а) фокусное расстояние 75 мм



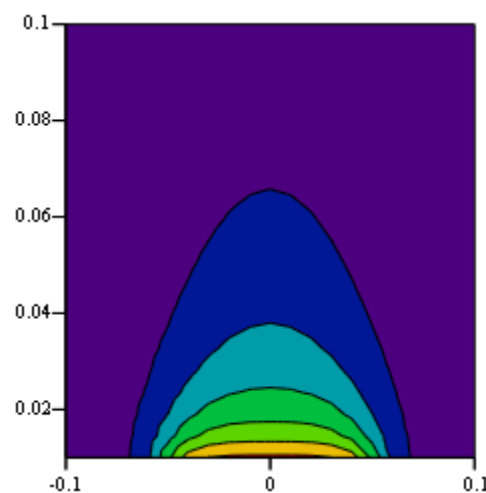
б) фокусное расстояние 12,5 мм

Рис. 17. Напряженность электрического поля полуволновой (1) и сфокусированной (2) антенн в фокальной плоскости.



ww0

а) полуволновая антенна

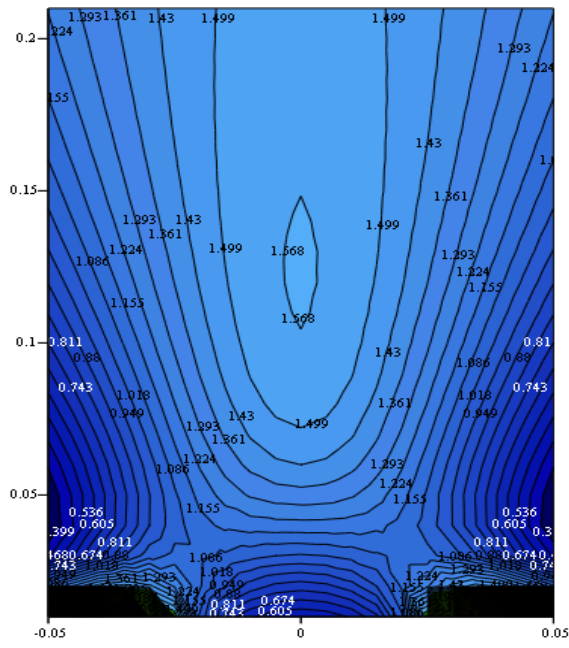


ww1

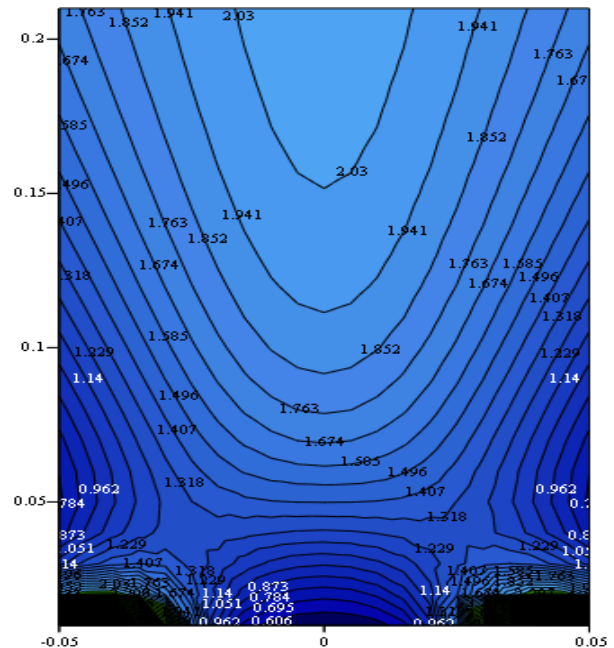
б) сфокусированная антенна
длиной 100 мм

Рис. 18. Пространственные распределения напряженности электрического поля

Сравнение результатов анализа сфокусированных антенн, выполненных на основе излучателей электрического и магнитного типа, показывает предпочтительность использования сфокусированных антенн магнитного типа по сравнению с излучателями электрического типа, как обеспечивающее в режиме излучения большее значение напряженности электрического поля при равной суммарной излучаемой мощности. Указанное свойство в максимальной мере проявляется при достаточно малых значениях фокусного расстояния. По мере удаления точки фокусировки от апертуры различие уменьшается (рис. 20).

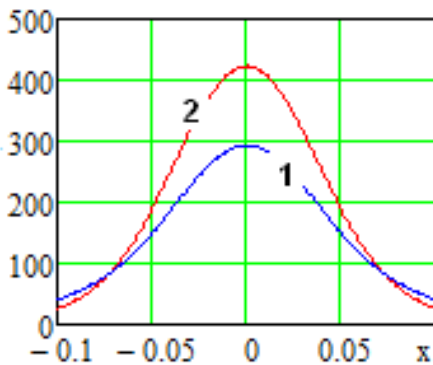


а) фокусное расстояние 25 мм

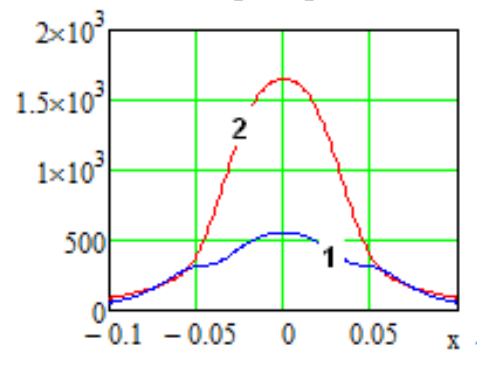


б) фокусное расстояние 75 мм

Рис. 19. Увеличение напряженности электрического поля сфокусированной антенны по сравнению с полуволновым вибратором.



а) фокусное расстояние 75 мм



а) фокусное расстояние 25 мм

Рис. 20. Сравнение сфокусированных антенн выполненных из излучателей электрического (1) и магнитного (2) типа, длина антенны 100 мм.

8. Сфокусированные антенны на сферической границе «воздух - среда»

В большинстве диагностических приложений радиотермометрии, например, при диагностике головного мозга, антенны-аппликаторы располагаются на криволинейной поверхности. Эффективность применения в этих случаях многоэлементных сфокусированных антенн, по крайней мере, неочевидна. Ниже проводится предварительные оценки на основе простейшей модели.

Считаем, что излучатели расположены на поверхности цилиндра из однородного диэлектрика с заданными значениями коэффициентов затухания и фа-

зы. Излучатели образуют антенную решетку, сфокусированную в заданную точку внутреннего объема (x_0, y_0) (рис. 21).

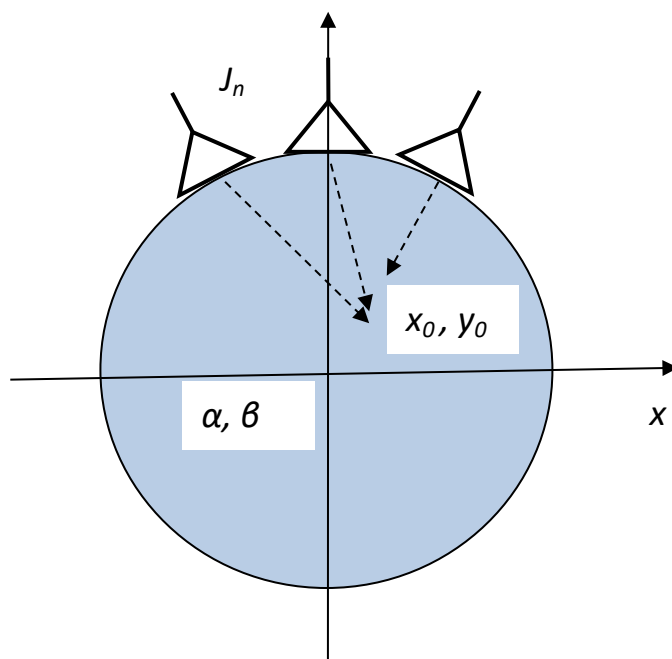
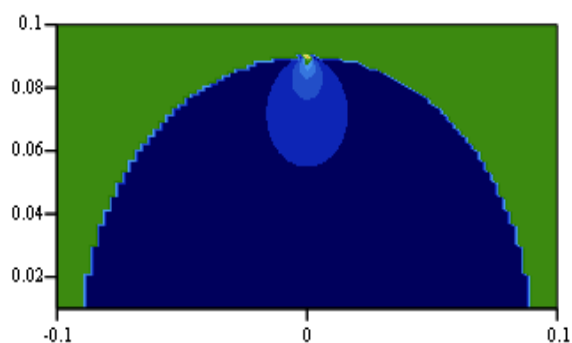
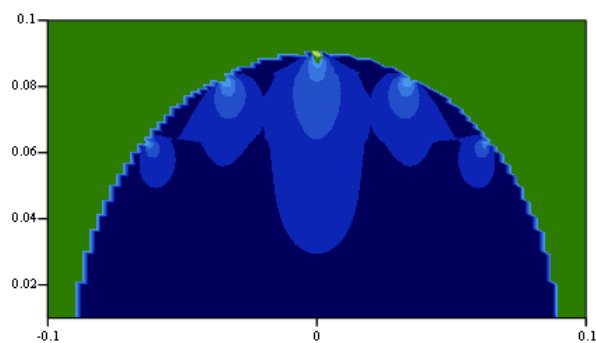


Рис. 21. Модель антенны.



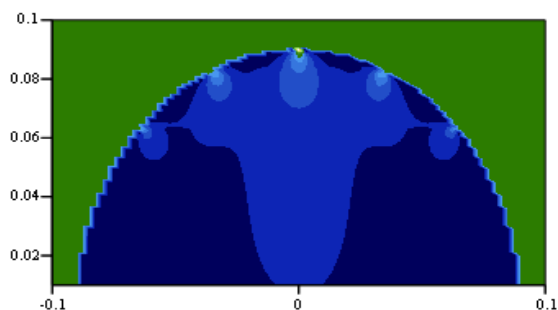
Wcir00ne

а) одиночный излучатель



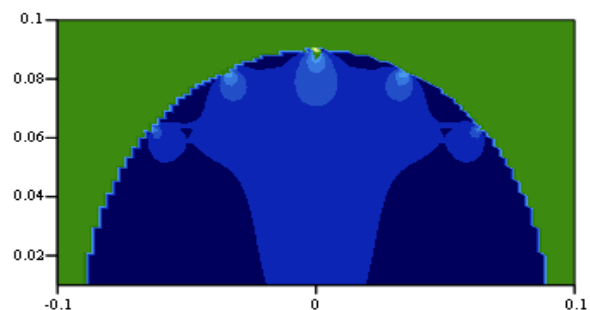
Wcir0725

б) сфокусированная решетка, фокусное расстояние 72,5 мм



Wcir005

в) сфокусированная решетка, фокусное расстояние 50 мм

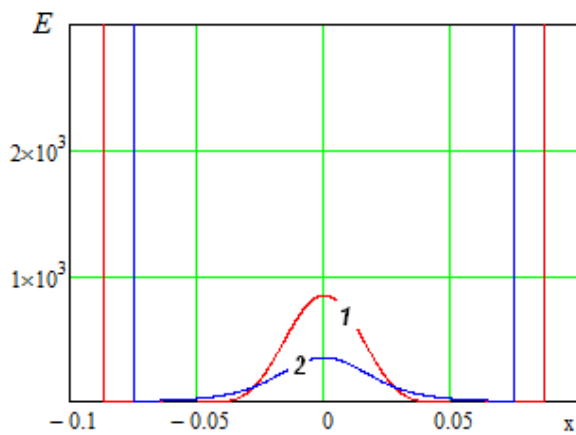


Wcir0025

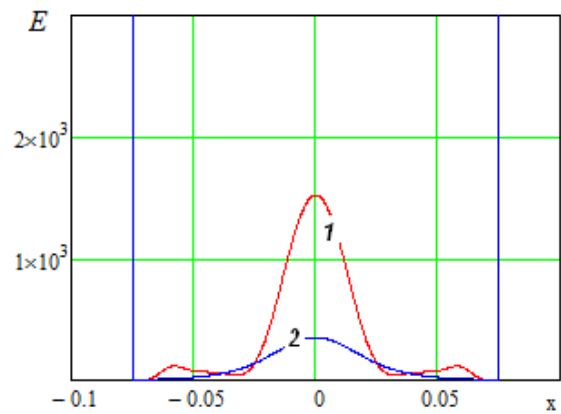
г) сфокусированная решетка, фокусное расстояние 25 мм

Рис 22. Пространственное распределение модуля напряженности электрического поля.

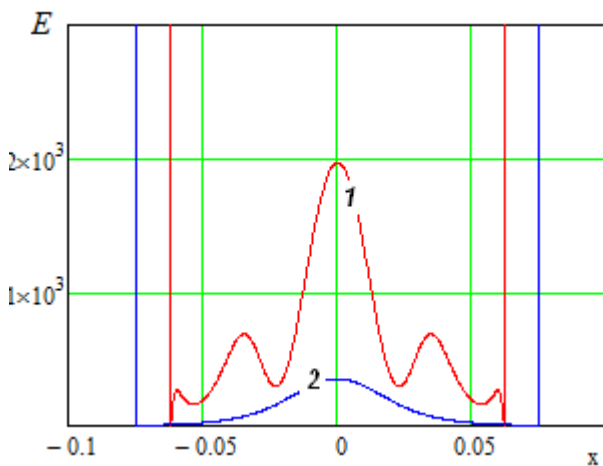
Для получения количественных оценок рассчитывались пространственные распределения напряженности электрического поля, создаваемого одиночным излучателем, и решетки, сфокусированной в точку $(0, y_0)$. Расчеты проводились согласно модели [36]. На рис. 22 сравниваются картины пространственных распределений поля одиночного излучателя и 5-ти элементной сфокусированной решетки из ненаправленных излучателей, расположенных равномерно по азимутальной координате с шагом $22,5^\circ$. Диаметр тела 200 мм, $\alpha\lambda = 0,05$, $\epsilon = 50$, частота 500 МГц, амплитудное распределение в решетке: $(0,25; 0,7; 1; 0,7; 0,25)$.



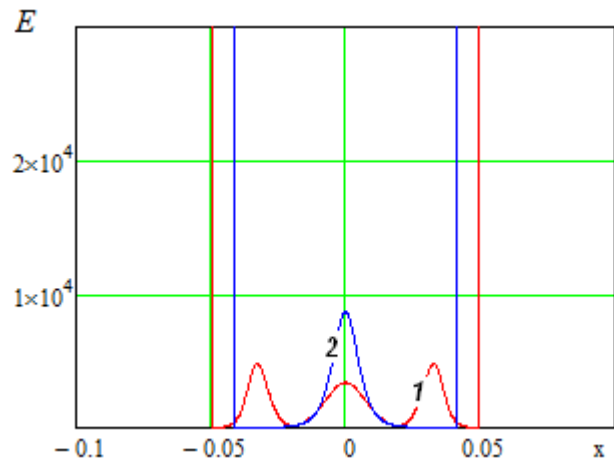
а) фокусное расстояние 72,5 мм



б) фокусное расстояние 65 мм



в) фокусное расстояние 50 мм



г) фокусное расстояние 25 мм

Рис 23. Горизонтальные сечения функции пространственного распределение модуля напряженности электрического поля (кривая 1 – сфокусированная решетка, кривая 2 – одиночный излучатель).

В отличие от случая расположения излучателей на плоской поверхности зависимость параметров сфокусированного поля от амплитудно-фазового апер-

турного распределения и относительного фокусного расстояния имеет более выраженный характер при сохранении основных закономерностей.

На рис. 23 показаны вертикальные сечения функции пространственного распределения по оси симметрии. Диаметр тела, параметры среды, частота и амплитудное распределение такие же, как на рис. 22. Для сравнения показаны аналогичные зависимости для одиночного элемента.

На рис. 24 показано вертикальное сечение функций пространственного распределения по оси симметрии для сфокусированной решетки с различными фокусными расстояниями (75, 65, 50 и 25 мм). Для сравнения показана аналогичная зависимость для одиночного элемента.

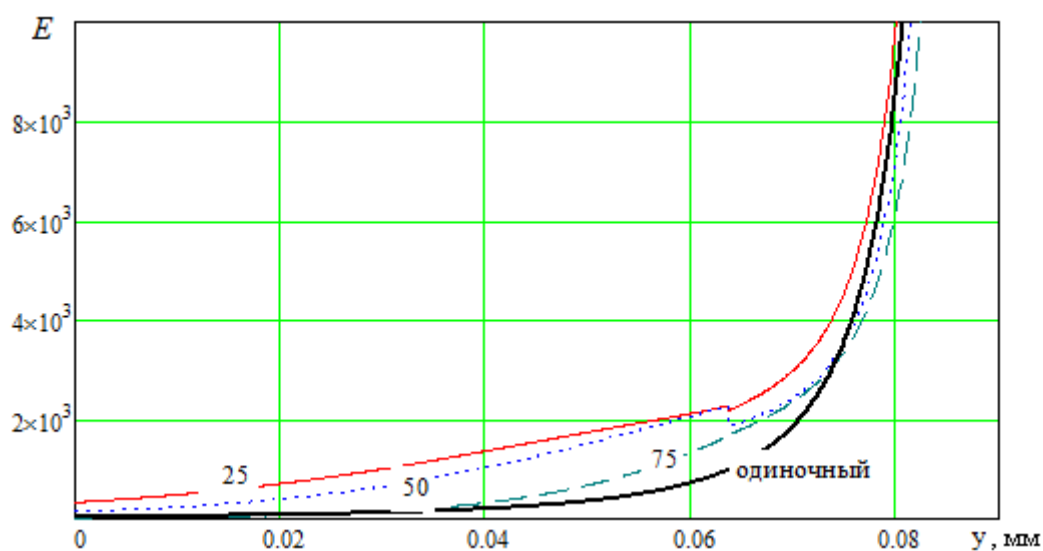


Рис 24. Сечение функции пространственного распределения по оси симметрии при различных значениях фокусного расстояния.

Анализ проведенных оценок в отношении свойств сфокусированных полей и эффективности использования принципа фокусировки, полученных с использованием упрощенной модели в виде сферического объекта с параметрами и размерами, типичными для диагностических задач контактной радиотермометрии, позволяет сделать ряд предварительных выводов:

- как и в случае расположения излучателей на плоской поверхности эффективность фокусировки увеличивается по мере увеличения фокусного расстояния;

- при глубине точки фокуса⁵ порядка 50 мм и менее, увеличение интенсивности поля в точке фокусировки по сравнению с одиночным элементом составляет не менее 4 раз;

- по мере приближения точки фокусировки к внешней границе объекта эффект снижается. При значениях порядка 30 мм сфокусированная антенна не обеспечивает преимуществ по сравнению с одиночным элементом, а при меньших значениях уступает одиночному элементу.

9. Заключение

Использование принципа фокусировки в задачах диагностической радиотермометрии перспективно. В типовых задачах увеличение наблюдаемого контраста радиояркой температуры может составлять до нескольких раз. Наиболее эффективна фокусировка при наблюдении заглубленных образований. В приповерхностном слое фокусировка теряет преимущества и даже проигрывает случаям применения малогабаритных антенн аппликаторов.

Наибольший эффект мог бы достигаться при использовании излучателей магнитного типа. Однако их конструктивные особенности и трудность согласования в широкой полосе частот, скорее всего, не позволят в полной мере реализовать их потенциальное преимущество. Наиболее продуктивным представляется использование сфокусированных антенных решеток, выполненных на основе излучателей, сочетающих свойства источника электрического и магнитного типа, например в виде открытого конца волновода с диэлектрическим заполнением или широкополосных секторных вибраторов.

Результаты проведенных исследований имеют характер оценок и должны уточняться путем использования строгих моделей, в том числе учитывающих многослойную структуру реальных объектов радиометрической контактной диагностики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках базовой части Государственного Задания 8.6872.2017/8.9

⁵ Глубина фокусировки в данной разделе понимается как расстояние от центра окружности (рис. 21).

Литература

1. Barrett A.H., Myers P.C. Subcutaneous temperature: a method of noninvasive sensing // Science. 1975, v. 90. pp. 669-671.
2. Троицкий В.С. К теории контактных радиометрических измерений внутренней температуры тел // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1981. т. 24, № 9, с. 1054-1061.
3. Троицкий В. С., Белов И. Ф., Горбачев В. П. и др. О возможности использования собственного теплового СВЧ радиоизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов. // Успехи физических наук. 1981, т. 134, № 1, с. 155-158.
4. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Вестник АН СССР. Серия физическая. 1983, № 8, с. 118-125.
5. Веснин С.Г. Микроволновая радиотермометрия – национальное достояние России. Издательский дом «Медицинский бизнес». URL: [http:// www. med-business.ru/178.php](http://www.med-business.ru/178.php)
6. Вайсблат А.В. Медицинский радиотермометр РТМ-01-РЭС // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2001, № 8, с. 3-9.
7. Седанкин М. К. Антенны-апликаторы для радиотермометрического исследования тепловых полей внутренних тканей биологического объекта. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: МГТУ им. Э. Баумана. 2013, 247 с.
8. 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.
9. Кубланов В.С. Радиофизический комплекс для функциональных исследований головного мозга // Медицинская техника. 2009, № 3, с. 10-15.
10. Кубланов В.С., Седельников Ю.Е., Азин А.Л., Сысков А.М. Природа флуктуаций собственного электромагнитного излучения головного мозга // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010, №9, с. 45-54.

11. Кубланов В.С., Борисов В.И. СВЧ-радиометры для функциональных исследований головного мозга // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Спецвыпуск. 2012, с. 41-49.
12. Kublanov V.S. Microwave radiation as interface to the brain functional state //6-th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies «BIOSTEC 2013. BIODEVICES». – Portugal: SCITEPRESS. 2013, pp. 318-322.
13. 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, № 2, т. 9, с. 27-43.
14. Седельников 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. Бюл. №25.
15. Кубланов В.С., Сельский А.Г., Коркунов В.Г. Устройство для приема собственного радиотеплового излучения человека. Пат. РФ № 2049424, МПК А61В 5/00. Оpubл. 10.12.1995. Бюл. № 34.
16. Манойлов В. Ф., Назарчук Л. Ю., Яненко А. Ф. Аппликаторная антенна для микроволновой радиометрии. NAUCHEBE.NET. URL: <http://nauchebe.net/2012/03/applikatornaya-antenna-dlya-mikrovolnovoj-radiometrii>
17. Barret I.J. A new microstrip radiator for medical applications //IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1980, v. MTT-28, № 12, pp.1452-1459.
18. Веснин С.Г., Седанкин М.К Миниатюрные антенны-аппликаторы для микроволновых радиотермометров медицинского назначения [электронный ресурс]. Сайт компании ООО «РТМ Диагностика». URL: http://rtmdiagnositics.com/uploads/file/vesnin_miniature_antenna.pdf
19. Веснин С.Г. Антенна аппликатор для неинвазивного измерения температуры внутренних тканей биологического объекта. Патент РФ № 2306099. Оpubл. 31.10.2005.

20. Веснин С.Г. Антенна-аппликатор и устройство для определения температурных изменений внутренних тканей биологического объекта и способы определения температурных изменений и выявления риска рака. Пат. РФ № 2407429.
21. 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. – Italy, ACES. 2017, pp. 118-121.
22. Петросян В.И., Сеницын Н.И., Житенева Э.А. Елкин В. А и др. Устройство для исследования объектов КВЧ- воздействием. Патент РФ №2108058. Оpubл. 10.04.98, Бюл. №10.
23. Петросян В.И., Сеницын Н.И., Елкин В. А и др. Способ исследования объектов КВЧ-воздействием. Патент РФ №2108566, Оpubл. 10.04.98, Бюл. №10.
24. Петросян В. И., Сеницын Н. И., Елкин В. А. Антенны-аппликаторы для резонансной волновой КВЧ/СВЧ – радиоспектроскопии природных образований. // Биомедицинская радиоэлектроника. 1999, № 8, с. 36-41.
25. Елкин В.А., Петросян В.И., Сеницын Н.И., Башкатов О.В. Аппликаторные СВЧ антенны для функциональных биомедицинских и физических исследований [электронный ресурс]. Сайт компании ООО «Телемак». URL: <http://aquatone.ru/d/447480/d/applikatornye--svch--antenny-dlya--funkcionalnyh-biomeditsinskih-i-fizicheskikh-issledovaniy.pdf>
26. Веснин, С.Г., Седанкин М.К. Сравнение антенн-аппликаторов медицинского назначения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2012, № 10, с.63-74.
27. Банников И.А., Ильиных А.Б., Мительман Ю.Е., Борисов В.И. Анализ свойств вибраторной антенны аппликатора в задаче радиометрии головного мозга. // Информационные технологии телекоммуникации и системы управления Сборник докладов. – Екатеринбург: Изд-во: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2016, с. 172-179.

28. Asimakis N.P., Karanasiou I.S. and 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, pp. 83-101.
29. Сельский А.Г. Радиотермометр с фокусированной антенной для неинвазивного измерения температуры внутренних органов человека. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. –М.: ИРЭ АН СССР. 1989.
30. Потапова О.В. Исследование методов сфокусированной апертуры для повышения эффективности СВЧ технологических установок открытого типа: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Казань, КГТУ им.А.Н.Туполева. 1998, 118 с.
31. 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. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr12/6/text.pdf>
32. Потапова О.В., Халикова К.Н. Энергетические показатели сфокусированных антенн в задачах СВЧ технологий // Вопросы электротехнологий. 2016, №2, с.37-45.
33. 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.
34. 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. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/radio/1206.html>
35. Никишина Д.В. Седельников Ю. Е. Анализ фокусирующих свойств антенн в зоне ближнего излученного поля в неоднородных диссипативных средах // Вестник КГТУ. – Казань : Изд-во Казан.гос техн. ун-та. 2013, №2, с. 81-85.

36. Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля . Монография под ред. Ю.Е.Седельникова и Н.А. Тестоедова. – Красноярск: Изд-во СибГАУ. 2015, 322 с.
37. Седельников Ю.Е. Потапова О.В. Коэффициент направленного действия апертурных антенн, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля // Радиотехника. 2015, №7, с.118 – 123.
38. Красюк Н. П., Дымович Н. Д. Электродинамика и распространение радиоволн: Учеб. пособие для радиотехн. специальностей вузов. – М.: Высш. школа. 1974, 536 с.
39. Кинг Р., Смит Г. Антенны в материальных средах: в 2-х кн./ пер. с англ. под ред. В. Б. Штейншлейгера. – М.: Мир. 1984, 416 с.

Для цитирования:

Ю. Е. Седельников, В.С. Кубланов, О.В. Потапова. Сфокусированные антенны-аппликаторы в задачах диагностической радиотермометрии. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 7. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/4/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.7.4