

УДК 621.658.012.531

А.В. Троицкий, ст. преподаватель, канд. техн. наук,**С.Ю. Коваленко, студент****М.С. Козуб, студент***Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: root@sevtu.sebastopol.ua***ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ АНТЕНН****ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТАКТНОЙ РАДИОТЕРМОМЕТРИИ**

Представлены результаты анализа различных конструкций печатных антенн, а также результаты компьютерного моделирования взаимодействия печатной антенны с биологической тканью с точки зрения использования их в системах контактной радиотермометрии.

Ключевые слова: *контактная радиотермометрия, печатная антенна, коэффициент стоячей волны, биологическая ткань.*

Человек излучает, поглощает, отражает и пропускает электромагнитные волны в широком диапазоне частот [1]. При этом их интенсивность зависит от строения тела, температуры, состояния поверхности, а также от биохимических процессов, протекающих в самом объекте. Собственное электромагнитное поле человека и соответствующее электромагнитное излучение обусловлено в основном тепловым движением заряженных частиц (атомов, молекул, ионов), составляющих его организм. Измерение параметров электромагнитного поля человека позволяет получить информацию о его биофизических параметрах и физическом состоянии организма. Спектральное распределение энергии излучения описывается законом Планка. Максимум излучения теплового поля человека находится в средней части инфракрасной области оптического спектра. Однако, измерение теплового излучения тела человека в инфракрасном (ИК) диапазоне позволяет определить истинную температуру только самого верхнего слоя кожи толщиной в доли миллиметра. Для получения большего количества информации о состоянии биологического объекта, переходят к измерению температуры в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне. Это обусловлено тем, что глубина проникновения излучения на этих частотах гораздо больше, и можно измерить СВЧ излучение, исходящее от внутренних структур тела человека.

СВЧ радиотермометрия имеет большие перспективы применения в диагностике различных заболеваний, эндокринологии, онкологии и других областях медицины. В качестве примера можно привести исследования [2], в которых размер и местоположение гематом при черепно-мозговых травмах различной тяжести определяются по температурной асимметрии радиотермометрическим методом, что в свою очередь позволяет проводить операции со значительно меньшими рисками для больного.

Широкое применение СВЧ радиотермометрии в медицинской практике сдерживается тем, что интенсивность теплового излучения тела человека в СВЧ диапазоне на несколько порядков меньше, чем в ИК части спектра, поэтому для регистрации тепловых сигналов в этом диапазоне требуются специальные приборы — радиометры. Для достижения высокой чувствительности порядка $(10^{-14} \dots 10^{-16})$ Вт [3] антенна радиометра, находящаяся в контакте с исследуемой средой слоистой структуры, должна быть хорошо согласована со входом прибора и с исследуемой средой в заданном частотном диапазоне. Кроме этого необходимо, чтобы габаритные размеры сенсора были удобными для работы оператора. Таким образом, проблема выбора конструкции и расчета параметров такой антенны имеет большое техническое и прикладное значение.

В качестве исходных исследуемых моделей были выбраны прямоугольная и дисковая печатные антенны. Для расчета характеристик этих структур, как правило, применяют резонансный и токовый методы [4]. При этом резонансный метод более наглядный и позволяет получить представление о физических процессах, происходящих в достаточно простых структурах.

На первом этапе исследований рассматривалась прямоугольная печатная антенна, изображенная на рисунке 1. Геометрические размеры антенны выбраны такими, что резонатор (антенна) возбуждается на низшем типе волны E_{010} . Высота подложки H должна быть намного меньшей длины волны в диэлектрике. Размер широкой b и узкой a граней прямоугольника при работе в свободном пространстве для настройки в резонанс следует выбирать равными

$$b = 0,48 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}}, \quad a < \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon}},$$

где λ_0 — длина волны в свободном пространстве, ϵ — диэлектрическая проницаемость подложки.

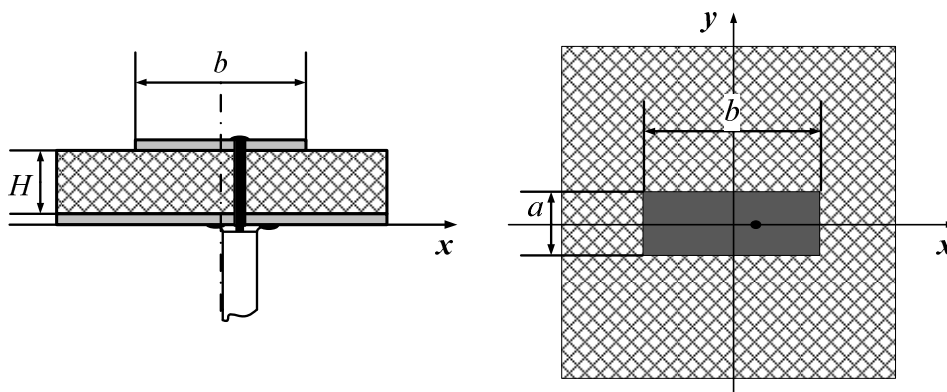
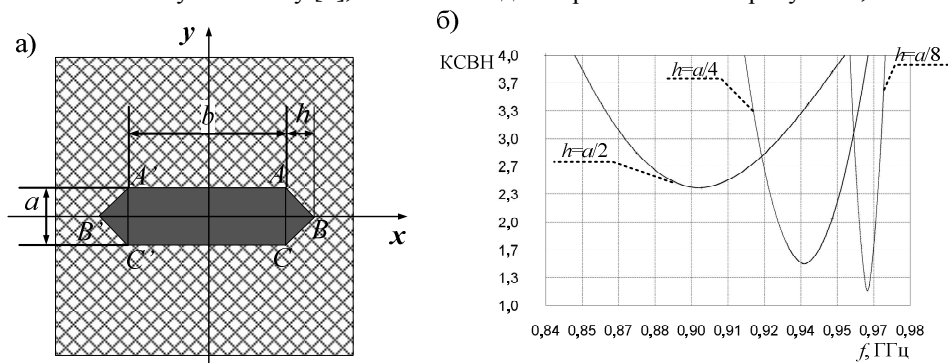


Рисунок 1 — Прямоугольная печатная антенна

Возбуждение резонатора осуществляется коаксиальным кабелем, оплетка которого соединена с нижней металлической пластиной резонатора, а внутренний проводник кабеля вставлен в резонатор параллельно вектору напряженности E_z электрического поля и закорочен на верхнюю пластину. Центральный проводник расположен симметрично относительно широких стенок резонатора, положение его относительно узких стенок значительным образом влияет на входное сопротивление антенны. Таким образом, настроенную в резонанс антенну можно согласовать с фидером путем перемещения вдоль оси x точки подключения центральной жилы коаксиального кабеля.

В результате проведенных расчетов было установлено, что для антенны с размерами $103 \times 52 \times 2$ мм при диэлектрической проницаемости подложки $\epsilon = 2$ на рабочей частоте $f_0 = 1$ ГГц для согласования с фидером с волновым сопротивлением 50 Ом, точка питания имеет координаты $x = 7$ мм, $y = 0$ мм. Ширина рабочей полосы частот Δf по уровню КСВН = 2 в этом случае составляет 7 МГц, при этом на резонансной частоте $f_0 = 1005$ МГц КСВН равен 1,15.

Несмотря на хорошее согласование на рабочей частоте, такая антенна является узкополосной и не может быть применена для работы в качестве сенсора радиометра, ширина спектра входного сигнала которого составляет примерно (30...60) МГц. Расширить рабочую полосу частот можно, применив так называемую гексагональную антенну [4], внешний вид которой показан на рисунке 2, а.

Рисунок 2 — Гексагональная печатная антенна
а — внешний вид; б — частотные характеристики

Геометрические размеры a и b антенны выбирались из тех же соображений, что и для прямоугольной антенны. При этом был введен дополнительный параметр h , который равен высоте треугольника ABC . Результаты исследования влияния значения параметра h на ширину полосы согласования антенны с 50-омным фидером представлены в таблице 1 и изображены на рисунке 2, б.

Таблица 1 — Результаты компьютерного моделирования

Параметр	$h = 0$	$h = a/8$	$h = a/6$	$h = a/4$	$h = a/2$
f_0 , МГц	1005	963	939	924	898
КСВН	1,15	1,2	1,32	1,48	2,41
Δf , МГц	7,3	7,8	17	20	—

По данным, представленным в таблице 1, можно сделать выводы, что при увеличении h резонансная частота антенны уменьшается, согласование с фидером на рабочей частоте ухудшается, о

чем свидетельствует увеличение КСВН. Однако полоса рабочих частот по уровню $КСВН=2$ расширяется с ростом высоты треугольника ABC до $h=a/4$, дальнейшее увеличение приводит к рассогласованию антенны с фидером. Поляризационные и направленные характеристики антенны также сохраняются при увеличении h до значения $h=a/4$, при превышении которого диаграмма направленности приобретает значительную асимметрию, что указывает на возбуждение высших типов волн в структуре. Таким образом, гексагональная антенна имеет значительно более широкую полосу рабочих частот по сравнению с прямоугольной антенной.

При круглой форме диска печатную антенну, показанной на рисунке 3, а, можно рассматривать как цилиндрический резонатор, высота которого равна толщине подложки, которая во много раз меньше длины волны в диэлектрике. При этом радиус диска выбирается так, чтобы что длина его окружности была соизмерима с длиной волны, то есть

$$R \approx \frac{k\lambda_0}{\pi\sqrt{\epsilon}},$$

где $k=0,6\dots 1$ — коэффициент пропорциональности.

При проведении расчетов значение коэффициента пропорциональности было выбрано $k=0,885$. Было найдено, что на рабочей частоте $f_0=1$ ГГц при $\epsilon=2$ радиус диска составил $R=59,7$ мм.

С практической точки зрения представляет интерес исследование характеристик кольцевой антенны, изображенной на рисунке 3, б, которая получается из дисковой при удалении области радиусом r . Питание антенны осуществляется с помощью коаксиального кабеля, при этом входное сопротивление антенны зависит от положения точки подключения центральной жилы.

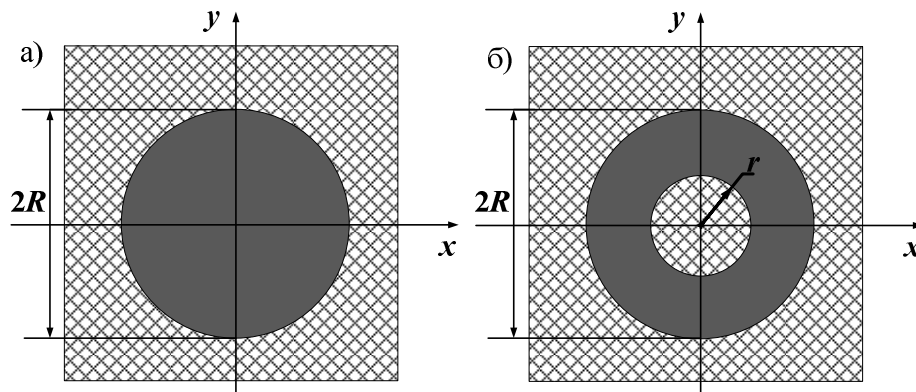


Рисунок 3 — Печатные антенны
а — дисковая; б — кольцевая

В результате компьютерного моделирования в программе *Feko 5.5* были рассчитаны зависимости КСВН от частоты при изменении размера r при оптимальном (с точки зрения согласования с 50-омным фидером) положении точки питания. Основные результаты расчетов при рабочей частоте порядка 1 ГГц представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Результаты расчета частотных характеристик дисковой и кольцевой антенн

Малый радиус	$r=0$	$r=R/20$	$r=R/10$	$r=R/8$	$r=R/5$
f_0 , МГц	1019	995	965	929	876
КСВН	1,05	1,25	1,5	1,92	2,75
Δf , МГц	15	19	42	35	—

Анализ полученных результатов показал, что лучшее согласование на резонансной частоте получено при $r=0$, что соответствует применению дисковой антенны, однако, по уровню $КСВН=2$ полоса рабочих частот минимальна. С увеличением радиуса центральной области кольцевой антенны наблюдается расширение рабочей полосы частот, при этом резонансная частота уменьшается, значение КСВН на резонансной частоте также уменьшается. При приближении радиуса центральной области к значению $R/8$ КСВН на резонансной частоте стремится к 2, дальнейшее увеличение r приводит к рассогласованию антенны с фидером. Уменьшение резонансной частоты с увеличением радиуса центральной области можно объяснить тем, что средний путь тока при этом увеличивается. Было установлено, что использование кольцевой антенны с радиусом центральной области равным $r=R/10$, позволяет получить расширение рабочей полосы частот до 3 раз по сравнению с дисковой антенной.

В результате сравнения характеристик прямоугольной, гексагональной, дисковой и кольцевой печатных антенн было установлено, что наибольшей полосой частот согласования с радиометром, а также с сохранением поляризационных и направленных характеристик, обладает кольцевая антенна, что позволяет использовать её в качестве сенсора для радиотермометрических систем.

Как известно, характеристики таких сенсоров существенно зависят от параметров среды, с которой они взаимодействуют. Исследование этой зависимости является нетривиальной задачей [5], имеющей важное прикладное значение. В настоящей работе исследование влияния биологических тканей на работу сенсоров было проведено путем компьютерного моделирования в программе электродинамического анализа *Feko 5.5*. Дисковая печатная антенна располагалась в контакте с биологической тканью. Биологическая ткань моделировалась трехслойным диэлектриком, параметры которого на частоте 1 ГГц представлены в таблице 3 [6].

Таблица 3 — Параметры биологической ткани на частоте 1 ГГц

Параметр	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Плотность среды ρ , кг/м ³	Удельная проводимость σ , См/м	Толщина слоя l , мм
Жировая ткань	6	920	0,091	4
Кожный покров	50,5	1093	1,35	6
Мышечная ткань	44	1041	1,1	14

Было проведено исследование влияния диэлектрической проницаемости подложки на характеристики антенны. Результаты моделирования представлены в таблице 4, а также отображены на рисунке 4.

Таблица 4 — Влияние материала подложки на характеристики антенны

$\epsilon_{\text{подложки}}$	R , мм	r , мм	h , мм	КСВН	f_0 , МГц	Δf , МГц
2	62	16,2	2	>7	—	—
5	48	14	1,8	6,4	958	—
10	39	13,5	1,6	4,2	976	—
28	33	9	0,8	1,7	934	56
35	25	7	0,8	1,89	1051	16

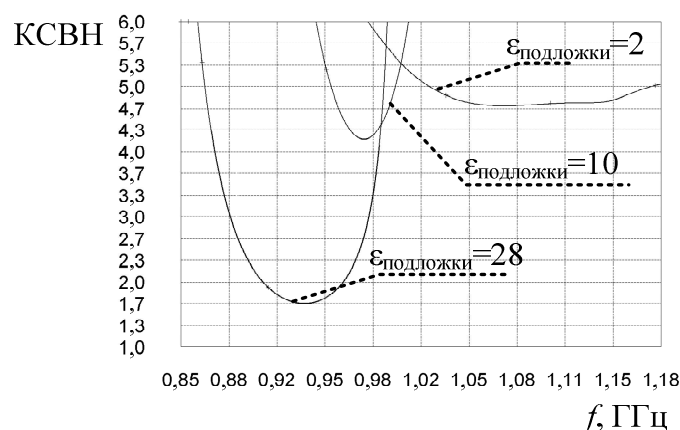


Рисунок 4 — Зависимость КСВН от частоты при контакте исследуемой антенны с биологическими тканями

Изменение диэлектрической проницаемости подложки приводит к изменению длины волны в среде, и, следовательно, требует изменения геометрических размеров антенны. Однако в отличие от работы в свободном пространстве, при контакте со средой с высокой диэлектрической проницаемостью размеры антенны следует изменять значительно медленнее, чем $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{подложки}}}}$.

Анализ результатов моделирования показал, что лучшее согласование было получено при значении диэлектрической проницаемости подложки $\epsilon_{\text{подложки}} = 28$, полоса рабочих частот составила

56 МГц. Резонансная частота в данном случае изменяется сложным образом с ростом $\epsilon_{\text{подложки}}$ при этом для каждого случая размеры антенны были оптимизированы с учетом того, что рабочая частота должна составлять 1 ГГц.

В результате анализа различных конструкций печатных антенн установлено, что в качестве сенсора для систем контактной радиотермометрии предпочтительно использовать кольцевую печатную антенну. Показано, что согласование печатной антенны с фидером определяется как геометрическими размерами самой антенны, так и точкой подключения питания. На основании проведенного моделирования установлено, что биологическая среда с высокой диэлектрической проницаемостью значительно влияет на характеристики антенны. В этом случае требуемое согласование можно обеспечить путем изменения диэлектрической проницаемости подложки и размеров антенны. Установлено, что кольцевая антенна радиусом 33 мм, выполненная на подложке с диэлектрической проницаемостью 28, имеет полосу рабочих частот шириной 56 МГц при контакте со слоистой средой, параметры которой приближены к параметрам биологической ткани.

Дальнейшая работа может быть связана с расширением полосы рабочих частот, например, путем применения связанных резонаторных систем и включения активных элементов, а также разработкой на их основе многодиапазонных антенн. Важным направлением дальнейших исследований является разработка адекватной модели электромагнитного поля вблизи источника теплового излучения, расположенного под слоями биологической ткани.

Библиографический список использованной литературы

1. Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Ю.А. Скрипник, А.Ф. Яненко, В.Ф. Манойлов, Ю.Б. Гимпилевич. — Житомир: Волянь, 2003. — 408 с.
2. Медицинские аспекты тепловизионной и радиотермометрической диагностики [Электронный ресурс]. — Электрон. текстовые данные (43545652 bytes). — Режим доступа: [http://www.radiometry.ru/radio metry/books/upload/31/11020712.pdf](http://www.radiometry.ru/radio%20metry/books/upload/31/11020712.pdf) Monday 15 October 2011_23:18:08.
3. Яненко А.Ф. Микроволновая радиометрия в биологии и медицине: структурные решения, возможности и перспективы использования / А.Ф. Яненко // Вестник национального технического университета Украины "КПИ". Сер. Радиотехника. Радиоприборостроение. — К., 2010. — Вып. 23. — С. 72–82.
4. Панченко Б.А. Микрополосковые антенны / Б.А. Панченко, Е. И. Нефедов. — М.: Радио и связь, 1986. — 144 с.
5. Кинг Р. Антенны в материальных средах: в 2 кн. / Р. Кинг, Г. Смит. — М.: Мир, 1984. — 824 с.
6. Пономаренко Г.Н. Биофизические основы физиотерапии / Г.Н. Пономаренко, И.И. Турковский. — М.: Медицина, 2006. — 176 с.

Поступила в редакцию 30.01.2012 г.

Троїцький О.В., Коваленко С.Ю., Козуб М.С. Дослідження друкованих антен для систем контактної радіотермометрії

Представлено результати аналізу різноманітних конструкцій друкованих антен, а також результати комп'ютерного моделювання взаємодії друкованої антени з біологічною тканиною з точки зору використання їх у системах контактної радіотермометрії.

Ключові слова: контактна радіотермометрія, друкована антена, коефіцієнт стоячої хвилі, біологічна тканина.

Troitsky A.V., Kovalenko S.Y., Kozub M.S. Research of microstrip antennas for contact radiothermometry systems

Analysis results of different models of patch antennas and computer modelling results of interaction patch antenna with biological tissue are given in this article.

Keywords: contact radiothermometry, patch antenna, standing wave ratio, biological tissue.