

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ РАДИОТЕРМОГРАФИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ ВЫЧИТАНИЯ ТОКОВ В ПРИЕМНЫХ КОНТАКТНЫХ АНТЕННАХ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭТИХ ТОКОВ

Ю. Н. Барабанен, К. М. Бограчев

Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 125009, Москва, ул. Моховая 11, корп.7

Статья поступила в редакцию 30 сентября 2018 г.

Аннотация. Предложен метод повышения помехозащищенности радиотермографии биологических объектов. Метод использует вычитание токов в приемных контактных антеннах, наведенных падающим тепловым электромагнитным излучением из биологического объекта и возможно излучением того же диапазона частот из свободного пространства. Приемные антенны расположены около поверхности объекта в зоне ее ближнего поля. В общем случае антенны могут быть произвольными телами с заданной комплексной диэлектрической проницаемостью и представлять собой в совокупности, например, дифракционную решетку конечных размеров. Под действием падающего на антенны электромагнитного теплового излучения из объекта, и возможно из свободного пространства, в них возбуждаются электрические токи. Возбужденные в антеннах токи вследствие волнового взаимодействия антенн являются самосогласованными и удовлетворяют системе уравнений, которая в случае антенн в виде тонких проволочных приемных вибраторов-диполей, настроенных, возможно с малой расстройкой, на половину длины волны в биологическом объекте, упрощается до системы алгебраических уравнений. Показано, что волновое взаимодействие приемных вибраторов-диполей на близких расстояниях, малых по сравнению с их длиной, носит резонансный характер. Вследствие этого разность токов, наведенных в близко расположенных вибраторах-диполях падающим тепловым излучением из биологического объекта, возрастает пропорционально

отношению длины вибраторов к расстоянию между ними. Такая же формула применима и в случае, когда токи в полуволновых приемных вибраторах наводятся электромагнитной помехой, падающей из свободного пространства. В результате оказывается, что отношение разности токов в этих вибраторах, наведенных тепловым излучением из биологического объекта, и разности токов, наведенных электромагнитным излучением из свободного пространства, равно отношению длины волны в свободном пространстве к длине волны в объекте, что в случае головного мозга человека и гигагерцового диапазона частот составляет около шести единиц.

Ключевые слова: радиотермография, биологические объекты, помехозащищенность.

Abstract. A method is suggested for improving the immunity for radiothermography of biological objects. The method uses the subtraction of currents in receiving antennas. These currents are excited by thermal radiation of biological object and probably by the same frequency range radiation from outside of the object. The receiving antennas are placed near the object surface. Under incidence of the electromagnetic radiation in antennas are excited electric currents. These excited currents are self consistent because of antennas wave coupling, and satisfy a set of equations which in the case of antennas in the form of thin wire vibrator-dipoles tune to half wavelength becomes a set of algebraic equations. It is shown that wave coupling between receiving vibrator-dipoles at near distances, small in comparison with their length, has resonant property and therefore the difference of currents excited in such vibrator-dipoles by incident thermal radiation from biological object increases in the ratio of vibrator-dipole length to distant between them. The similar formula is applicable also in the case when currents in half wavelength vibrator-dipoles are excited by electromagnetic radiation from outside the biological object, propagating in free space. In result one gets that relation between the difference of currents excited in receiving vibrator-dipoles by biological object thermal radiation and the difference of currents excited by electromagnetic radiation from outside the

object is equal to ratio of wavelength in free space to wavelength in the object medium. This ratio in the case of human head brain and GGz radiation frequency range is about 6.

Key words: radiothermography, biological objects, immunity.

1. Введение

Последнее тридцатилетие прошлого века ознаменовано введением в практику нейрофизиологии и клинической медицины неинвазивного метода радиотермографии, осуществляющего пассивное дистанционное зондирование биологических тканей их собственным тепловым излучением в микроволновом диапазоне электромагнитных волн [1]. С помощью 12-канального радиотермографа получены важные результаты при исследовании теплового возбуждения в коре головного мозга больных с эпилептогенными очагами при функциональных тестах с оценкой области локализации основных источников тепла вблизи борозды коры головного мозга [2]. Известны применения одноканального многочастотного радиометра для мониторинга глубинной температуры головного мозга новорожденных [3]. Следует обратить внимание на то, что радиотермография биологических тканей использует контактные приемные антенны, почти соприкасающиеся с поверхностью зондируемого объекта и измеряющие, как часто полагают, среднюю мощность выходящего из объекта теплового излучения в виде так называемой радиояркостной температуры. При обработке результатов этих измерений предполагают, что регистрируется интегральное излучение из некоторой цилиндрической области под апертурой антенны. Тем самым не ставится задача о восстановлении латерального распределения температуры объекта вдоль элементарных внутренних слоев, параллельных его поверхности. Как было явно осознано за два последних десятилетия, контактная антенна находится в области действия ближних тепловых полей поверхности нагретого объекта, имеющих вид экспоненциально затухающих неоднородных волн, согласно предсказанию [4].

Показано [5], что латеральная параллельная поверхности объекта компонента волнового вектора неоднородной волны теплового излучения, определяющая ее затухание, задается размером апертуры антенны, чем можно воспользоваться при восстановлении глубинного распределения температуры по измеренной радиояркостной температуре. Следующий принципиальный шаг в этом направлении был сделан в работе [6], согласно которой дифракция волны теплового излучения на латеральном градиенте температуры изменяет латеральную компоненту ее волнового вектора. В результате был сформулирован метод восстановления латерального распределения температуры внутри биологического объекта на основе измерения распределения потока энергии выходящего теплового микроволнового излучения вдоль плоскости, расположенной в свободном пространстве параллельно поверхности нагретого объекта в зоне ее ближнего поля [7]. Перечисленные методы радиотермографии страдают тем недостатком, что не нацелены непосредственно на восстановление 3D локализации области повышенной температуры внутри биологического объекта. Вследствие важности такой 3D локализации при исследовании, напр., коры головного мозга в 2011 году были получены новые научные результаты в ближнеполевой радиотермографии, позволяющие подойти к созданию ближнеполевого интерференционного радиотермографа на основе интерференционно-экстремальных свойств передаточной функции его приемного антенного устройства с учетом волнового взаимодействия отдельных антенн многоканального приема [8]. В этой работе впервые введены в рассмотрение по аналогии с оптикой [9] функция авто-интерференции изолированного приемного вибратора-диполя и функция кросс-интерференции двух вибраторов-диполей. Показано [8,10,11], что в основе сканирования 3D локального изменения внутренней температуры биологического объекта одним приемным вибратором–диполем лежат экстремальные свойства его функции авто-интерференции при изменении относительного расположения области

локального изменения температуры объекта и положения контактного вибратора- диполя около поверхности объекта. Найден фактор волнового взаимодействия двух приемных полуволновых вибраторов-диполей. Показана опасность зафиксировать ложные цели в многоканальной радиотермографии, если не учитывается волновое взаимодействие между принимающими вибраторами-диполями.

Метод расчета волнового взаимодействия полуволновых приемных вибраторов-диполей работы [8] обобщен в работах [12-15] на случай диэлектрических и проводящих тел произвольного размера и формы, что позволяет рассмотреть, например, случай кольцевых контактных приемных антенн. Полученные в недавно опубликованной совместной работе [16] руководителя проекта новые результаты о волновом взаимодействии магнитных элементов микронного размера позволяют рассмотреть случай магнитных контактных миниатюрных антенн теплового излучения.

Таким образом, одноканальный прием теплового излучения позволяет определить 3D положение области локального изменения температуры объекта на основе экстремально – интерференционных свойств передаточной функции антенны, но это требует времени сканирования. С другой стороны, многоканальный прием не требует времени сканирования, но связан с учетом взаимодействия антенн. Возникает проблема соединения преимуществ этих двух видов приема в радиотермографии, которая решена в работе [17].

Следует отметить, что существенная трудность пассивной радиотермографии связана с проблемой помехозащищенности принимающих тепловое излучение из объекта контактных антенн, работающих в гигагерцовом диапазоне длин волн. Обычно эта проблема решается практически путем использования радио-экранирующей камеры. В настоящем отчете аналитически развивается метод увеличения помехозащищенности радиотермографии биологических объектов путем использования высокочастотных резонансных свойств симметричных 2D кластеров

контактных антенных вибраторов. Метод основан на вычитании токов в приемных контактных антеннах с учетом взаимодействия этих токов, наведенных падающим тепловым излучением из биологического объекта и возможно излучением того же диапазона частот из свободного пространства.

2. Взаимодействующие приемные антенны около поверхности биологического объекта

На рис.1 представлена схема приема микроволнового теплового излучения биологического объекта приемными антеннами, расположенными около поверхности объекта в зоне ее ближнего поля. На рисунке изображены для простоты две антенны в виде тонких параллельных между собой и поверхности объекта проволочных приемных вибраторов-диполей.

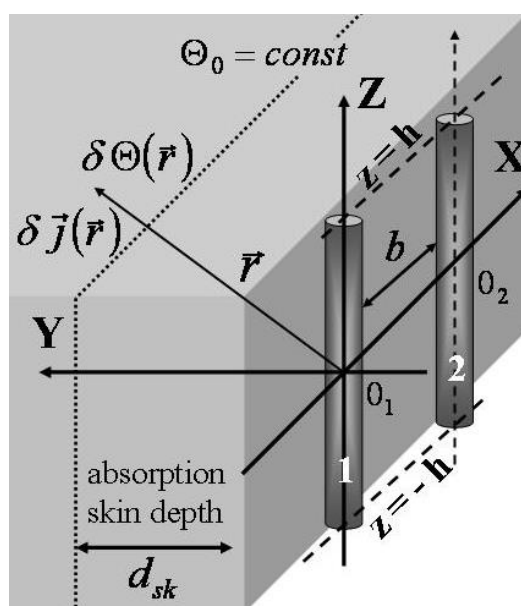


Рис.1. Схематическое изображение приема теплового излучения биологического объекта (серая область; точечная линия символически отмечает скин-слой поглощения толщиной d_{sk}) двумя вибраторами-диполями длины $2h$ и с расстоянием b между ними. Величины Θ_0 и $\delta\Theta(\vec{r})$ обозначают однородную составляющую и локальную объемную вариацию температуры объекта, которой соответствует случайная плотность электрического тока $\delta\vec{j}(r)$.

В общем случае антенны могут быть произвольными телами с заданной комплексной диэлектрической (или магнитной) проницаемостью на частоте

принимаемого электромагнитного излучения и представлять собой в совокупности, например, дифракционную решетку конечных размеров. Под действием падающего на антенны из объекта электромагнитного теплового излучения в них возбуждаются электрические токи с плотностями $\vec{J}^{(q)}(\vec{r})$, где q это номер антенны. Возбужденные в антеннах токи вследствие волнового взаимодействия антенн являются самосогласованными и удовлетворяют выведенной в [8,12,16] системе уравнений вида

$$J_{\alpha}^{(q)}(\vec{r}) = J_{q\alpha}(\vec{r}) + \int d\vec{r}' \int d\vec{r}'' T_{q\alpha\beta}(\vec{r}, \vec{r}') G_{\beta\gamma}^0(\vec{r}', \vec{r}'') \sum_{q' \neq q} J_{\gamma}^{(q')}(\vec{r}'') \quad (1)$$

В этой системе уравнений $T_{q\alpha\beta}(\vec{r}, \vec{r}')$ представляет тензорный T - оператор рассеяния электрического поля изолированной q -ой антенной, $G_{\alpha\beta}^0(\vec{r}', \vec{r}'')$ - тензорная функция Грина биологического объекта и неоднородные члены $J_{q\alpha}(\vec{r})$ это токи, возбуждаемые падающим полем в изолированных антеннах. В случае тонких проволочных приемных вибраторов-диполей, настроенных (возможно с малой расстройкой) на половину длины волны в биологическом объекте, система уравнений (1) упрощается [8,12,16] до системы алгебраических уравнений. В данном случае основной величиной является полный ток $I^{(q)}(z)$ в z -сечении q -го вибратора. При этом ток $I_q(z)$ в сечении изолированного q -го вибратора связан с падающим на него электрически полем $E_z^{(0)}(z)$ соотношением

$$\frac{4\pi\omega}{ic^2} I_q(z) = \int_{-h}^h dz' t_q(z, z') E_z^{(0)}(z') \quad (2)$$

В нем $t_q(z, z')$ обозначает оператор рассеяния q -го изолированного вибратора, задаваемый равенством

$$\frac{ic^2}{4\pi\omega} t_q(z, z') = \frac{1}{Z_1} \psi(z) \psi(z') \quad (3)$$

Здесь функция $\psi(z) = \cos k'_1 z$, где $k'_1 = 2\pi / \lambda_1$ - вещественная часть волнового числа и λ_1 - волновое число внутри объекта, причем $2h \approx \lambda_1 / 2$, при малой отстройке вибратора; ω - круговая частота излучения. Величина Z_1 в правой части (3) имеет смысл входного импеданса изолированного вибратора. Подстановка (3) в (2) позволяет переписать выражение для тока в сечении изолированного q -го вибратора в удобном для дальнейшего виде

$$I_q(z_q) = \frac{1}{Z_1} \psi(z_q) I_q; I_q = a_q = \int_{-h}^h dz_q \psi(z_q) E_z^0(z_q) \quad (4)$$

Удобство представления (4) состоит в том, что самосогласованные токи $I^{(q)}(z_q)$ в сечениях взаимодействующих вибраторов имеют аналогичное представление

$$I^{(q)}(z_q) = \frac{1}{Z_1} \psi(z_q) I^{(q)} \quad (5)$$

с амплитудами $I^{(q)}$, удовлетворяющими системе уравнений

$$\sum_{q'=1}^N (\delta_{qq'} - a_{qq'}) I^{(q')} = a_q; \quad q = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Фактор $a_{qq'}$ волнового взаимодействия двух вибраторов-диполей q и q' вычисляется способом работы [8]. Значение фактора a_{12} волнового взаимодействия вибраторов-диполей 1 и 2 существенно зависит от их взаимной ориентации. В простейшем случае двух параллельных вибраторов, как на рис.1, график поведения фактора a_{12} как функции расстояния между вибраторами приведен на рис.2, и аналитически этот фактор дается уравнением

$$\frac{i\omega\varepsilon'}{4\pi} Z_1 a_{12} = \int_{-h}^h dz_1 \psi(z_1) \left(k_1'^2 + \frac{\partial^2}{\partial z_1^2} \right) \int_{-h}^h dz_2 G_0(z_1, z_2) \psi(z_2) \quad (7)$$

Здесь $G_0(z_1, z_2) = \exp(ik'_1 R_{12}) / (-4\pi R_{12})$, где $R_{12}^2 = b^2 + (z_1 - z_2)^2$ и b

расстояние между вибраторами (Рис. 1).

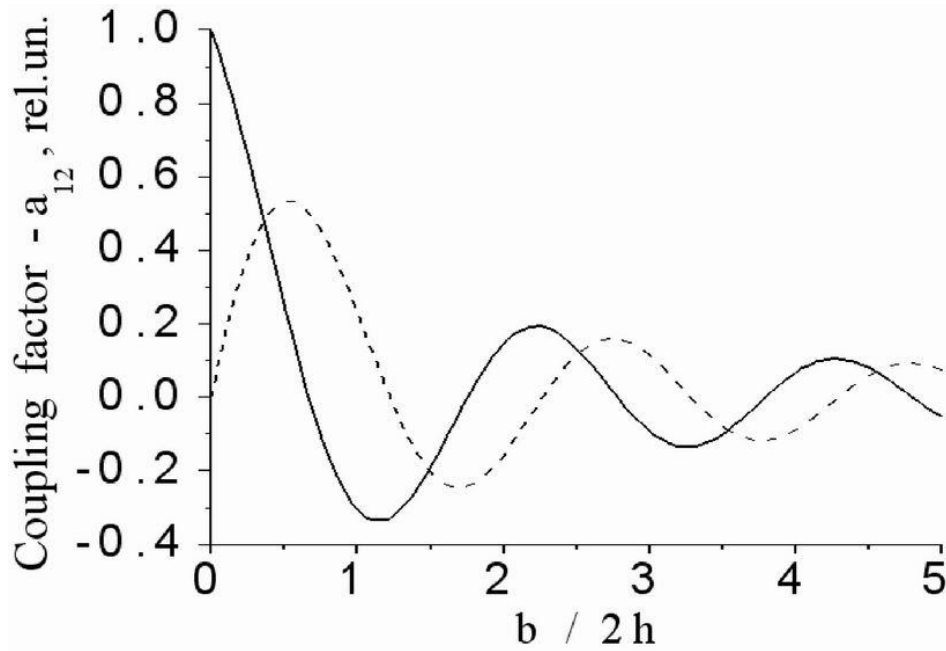


Рис.2. Зависимость вещественной части (сплошная кривая) и мнимой части (пунктирная кривая) фактора взаимодействия a_{12} двух параллельных одинаково расположенных полуволновых $2h = \lambda_1/2$ приемных вибраторов-диполей от нормированного расстояния $b/2h$ между ними.

Интеграл в правой части (7) преобразуется интегрированием по частям, в результате чего уравнение (7) сводится к виду, удобному для вычислений

$$\frac{\omega \varepsilon'}{k_1'} Z_1 a_{12} = f(x_+) + f(x_-) - 2f(x_0) \quad (8)$$

Здесь функция $f(x)$ выражается через интегральный косинус и синус как $f(x) = Ci(x) + i Si(x)$, и параметры x_{\pm} и x_0 имеют вид

$$x_{\pm} = n\pi \left(\pm 1 + \sqrt{1 + \frac{b^2}{4h^2}} \right); \quad x_0 = n\pi \frac{b}{2h} \quad (8.1)$$

Интегральный косинус и синус определяются формулами

$$Si(x) = \int_0^x dt \frac{\sin t}{t}; \quad Di(x) = \int_0^x dt \frac{1 - \cos t}{t} \quad (8.2)$$

и соотношением $Di(x) = \ln x + C - Ci(x)$, где $C \approx 0.5772$ постоянная Эйлера. При малом расстоянии b между вибраторами фактор их волнового взаимодействия дается простой асимптотикой

$$a_{12}|_{b/2h \rightarrow 0} \approx -1 - i\pi \frac{b k'_1 / \omega \varepsilon'}{h Z_1} \quad (9)$$

Входной импеданс Z_1 полуволнового изолированного вибратора дается выражением [8] вида

$$\frac{\omega \varepsilon'}{k'_1} Z_1 = Di(2\pi n) - i Si(2\pi n) \quad (10)$$

Для вибратора со слабой расстройкой, когда разность $2h - (\lambda_1/2)$ по модулю мала, импеданс Z_1 может быть вычислен методом работы [18] и представлен в виде

$$\frac{Z_R}{Z_1} = \frac{1}{1 - i \frac{\omega - \omega_R}{\Delta \omega_R}}; \frac{\Delta \omega_R}{\omega_T} = \frac{Di(2\pi)}{2\pi \ln(1/k'_1 a)}; \omega_T = \frac{c\pi}{2h\sqrt{\varepsilon'}}; \quad (11)$$

$$\frac{\omega_R}{\omega_T} = 1 - \frac{Si(2\pi)}{2\pi \ln(1/k'_1 a)}; Z_R = Di(2\pi) \frac{k'_1}{\omega \varepsilon'}$$

Как видно из первого уравнения (11), зависимость импеданса Z_1 изолированного вибратора от частоты излучения ω имеет резонансный характер с резонансной частотой ω_R и полушириной резонанса $\Delta \omega_R$. При условии $\omega = \omega_T$ вибратор становится точно настроенным на половину длины волны в объекте, $2h = \lambda_1/2$, и импеданс принимает значение из уравнения (10). Следует отметить, что уравнения (11) получены в приближении [18] большого логарифма $\ln(1/k'_1 a)$, так что частоты ω_R и ω_T близки между собой. Величина Z_R представляет значение импеданса на резонансной ω_R частоте.

3. Токи в близко расположенных вибраторах

Рассмотрим решение системы уравнений (6) для двух параллельных контактных вибраторов. В этом случае решение имеет вид

$$I^{(1)} = \frac{a_1 + a_{12}a_2}{1 - a_{12}^2}; I^{(2)} = \frac{a_2 + a_{12}a_1}{1 - a_{12}^2} \quad (12)$$

Разность амплитуд токов в двух взаимодействующих вибраторах согласно (12) равна

$$I^{(1)} - I^{(2)} = \frac{1}{1 + a_{12}}(a_1 - a_2) \quad (13)$$

Так как согласно (4) разность амплитуд токов, наведенных в двух изолированных вибраторах, дается выражением $I_1 - I_2 = a_1 - a_2$, то из (13) следует

$$\frac{I^{(1)} - I^{(2)}}{I_1 - I_2} = \frac{1}{1 + a_{12}} \quad (14)$$

где справа выступает фактор усиления $1/(1 + a_{12})$ вследствие волнового взаимодействия вибраторов. Согласно асимптотике (9) этот фактор может заметно возрасть при сближении вибраторов как

$$\left(\frac{I^{(1)} - I^{(2)}}{I_1 - I_2} \right)_{\frac{b}{h} \rightarrow 0} \approx \frac{i}{2\pi} Di(2\pi) \frac{Z_1}{Z_R} \frac{2h}{b} \quad (15)$$

то есть в отношении $2h/b$ длины вибраторов к расстоянию между ними. Выступающая в правой части (13) разность амплитуд токов в изолированных вибраторах может быть оценена с учетом (4) как (см. Рис.1)

$$a_1 - a_2 \approx -b \int_{-h}^h dz \psi(z) \frac{\partial E_z^{(0)}(z, x=0)}{\partial x} \approx -k_1' b a_1 \quad (16)$$

Здесь при получении второго равенства учтено, что действующее на контактные вибраторы выходящее из объекта тепловое излучение

$E_z^{(0)}(z, x)$ распространяется в объекте с волновым числом внутри объекта k'_1 , и произведена оценка $\partial E_z^{(0)}(z, x=0) / \partial x \approx k'_1 E_z^{(0)}(z, x=0)$. Подстановка (16) в (13) дает

$$I^{(1)}(z) - I^{(2)}(z) \approx -\frac{i}{2} Di(2\pi) \frac{Z_1}{Z_R} I_1(z) \quad (17)$$

Это означает, что разность токов, наведенных во взаимодействующих контактных близко расположенных вибраторах выходящим из объекта тепловым излучением, имеет порядок величины тока, наведенного этим излучением в изолированном контактном вибраторе. Чтобы пояснить физический смысл этого результата, отметим, что аналогичная разность токов в изолированных вибраторах дается согласно (4) и (16) выражением

$$I_1(z) - I_2(z) \approx -\pi \frac{b}{2h} I_1(z) \quad (18)$$

то есть является малой величиной порядка $b/2h$ отношения расстояния между вибраторами к их длине. Возрастание разности токов (17) взаимодействующих вибраторов происходит вследствие резонансного характера их волнового взаимодействия на близких расстояниях.

До сих пор речь шла о токах, наведенных в контактных вибраторах выходящим из объекта тепловым излучением. Учтем теперь возможность воздействия на эти контактные вибраторы помех в виде электромагнитного излучения того же диапазона частот, распространяющегося в свободном пространстве с волновым числом $k = \omega/c = 2\pi/\lambda$. Разность амплитуд токов, наведенных такой помехой во взаимодействующих контактных вибраторах, дается тем же самым уравнением (13). Однако оценку (16) для разности амплитуд токов в изолированных вибраторах надо теперь заменить на

$$(a_1 - a_2)_{free} \approx -b \int_{-h}^h dz \psi(z) \left(\frac{\partial E_z^{(0)}(z, x=0)}{\partial x} \right)_{free} \approx -k b a_1 \quad (19)$$

В результате получаем оценку для отношения разности токов, наведенных тепловым излучением из объекта $(I^{(1)} - I^{(2)})_{body}$ и помехой $(I^{(1)} - I^{(2)})_{free}$ в контактных вибраторах

$$\frac{(I^{(1)} - I^{(2)})_{body}}{(I^{(1)} - I^{(2)})_{free}} \approx \frac{k'_1}{k} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \approx \frac{38}{7} \approx 5.6 \quad (20)$$

В правой части этого равенства стоит отношение длины волны в свободном пространстве к длине волны в объекте, что в случае головного мозга человека оценивается величиной 5.9 (см. Введение).

4. Заключение

Аналитически разработан метод увеличения помехозащищенности радиотермографии биологических объектов. Метод основан на вычитании токов в приемных контактных полуволновых вибраторах–диполях с учетом резонансного на малых расстояниях между вибраторами взаимодействия этих токов, наведенных падающим тепловым излучением из биологического объекта и, возможно, излучением того же диапазона частот из свободного пространства. Показано, что разность токов, наведенных во взаимодействующих контактных близко расположенных вибраторах (расстояние между вибраторами меньше их длины) выходящим из объекта тепловым излучением, имеет порядок величины тока, наведенного этим излучением в изолированном контактном вибраторе. Чтобы пояснить физический смысл этого результата, отметим, что аналогичная разность токов в изолированных вибраторах является малой величиной порядка отношения расстояния между вибраторами к их длине. Возрастание разности токов взаимодействующих вибраторов происходит вследствие резонансного характера их волнового взаимодействия на близких расстояниях между вибраторами. Показано также, что разность токов, наведенных в близко расположенных резонансных контактных вибраторах тепловым излучением из

биологического объекта, превышает разность токов, наведенных внешней электромагнитной помехой, в число, равное отношению длины волны в свободном пространстве к длине волны в объекте. Это число в случае головного мозга человека составляет величину 5.6.

Работа выполнена по госзаданию № г.р.АААА-А16-116042610067-4 от 26.04.2016 (Исследования физических полей биообъектов с использованием инновационных радиофизических методов).

Литература

1. Godik E.E., Gulyev Yu.V. Functional imaging of the human body *IEEE Eng. Med. Biol.* 1991. Vol. 10. № 4. P. 21.
2. Anzimirov V.L., Arkhipova N.A., Pasechnik V.I., Yanovich V.I. Investigation of thermal excitation in human head brain core at functional tests by method of dynamic multichannel radiothermography *Biomed. Radioelektron.* 2000, № 8, P. 22.
3. Hand J.W., Van Leeuwen G.M.L., Miszushina S., Van de Kamer J.B., Maruyama K., Siguira T., Azzopardi D.V., A.D. Monitoring of deep brain temperature in infants using multi-frequency microwave radiometry and thermal modeling. *Advances Phys. Med. Biol.*, 2001, V. 46, № 7, pp.1885-1900.
4. Rytov S.M. Theory of electric fluctuations and thermal radiation. Moscow: Akad. Nauk SSSR, Moscow, 1953.
5. Reznik A.N. Quasistatic field of thermal radiation in theory of contact radiothermography. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Radiofiz.* 1991, Vol.34, pp.512.
6. Gulyaev Yu.V., Barabanenkov Yu.N., Barabanenkov M.Yu., Nikitov S.A. Optical theorem for electromagnetic field scattering by dielectric structures and energy emission from the evanescent wave. *Phys. Rev.E*, 2005, V. 72,

- pp.026602-1-026602-12.
7. Barabanenkov Yu.N., Bograchev K.M., Yanovich A.V. The near-field thermal microwave radiation response of a biological object to local change of the lateral temperature distribution *Journal of Communication Technology and Electronics*. 2010, Vol.55, No. 10, pp.1132-1142.
 8. Yu.N. Barabanenkov, Barabanenkov M.Yu., Cherepenin V.A. Near-field coherent effects at thermal microwave radiation receiving on coupled linear wire antennas. *Journal of Radio Electronics*. 2011, № 12, pp.1-52.
 9. Born M., Wolf E. Principles of Optics - New York: Pergamon Press, 1964.
 10. Ю.Н. Барабаненков, М.Ю. Барабаненков, К.М.Бограчев. Метод 3D локации области изменения температуры биологического объекта на основе интерференционно-экстремальных свойств передаточной функции контактной приемной антенны ближнеполевого радиотермографах. *VI Всероссийская научно-техническая конференция "Радиолокация и радиосвязь"* 19-22 ноября 2012, Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Доклады. 2012, том.2., pp. 213-217.
 11. Barabanenkov Yu.N., Barabanenkov M.Yu., Cherepenin V.A. Analytic model for near-field interference 3D radiothermography of biological tissue local temperature variation at radiation receiving on coupled liner wire antennas *Progress In Electromagnetic Research Symposium*. Abstract. Moscow, Russia, August 19-23, 2012, P. 819.
 12. Yu.N. Barabanenkov, M.Yu. Barabanenkov. Quasi-separable T-scattering operator approach to local field direct calculations in multiple scattering problems. *Journal of Radio Electronics*. 2013, № 4, pp.1-52.
 13. Ю.Н. Барабаненков, М.Ю. Барабаненков. Квази-сепарабельный T-оператор рассеяния для задач многократного рассеяния электромагнитных волн в микроструктурированных композитных материалах *VI Всероссийская научно-техническая конференция "Радиолокация и радиосвязь"* 19-22 ноября 2012, Москва, ИРЭ им. В.А.

- Котельникова РАН. Доклады, 2012, том.2, pp. 208-212.
14. Barabanenkov Yu.N., Barabanenkov M.Yu., Lisenkov I. Dyson equation technique for homogenized electromagnetic crystal with unit cell formed by not small coupled nonmagnetic scatterers *Progress In Electromagnetic Research Symposium. Abstract. Moscow. Russia. August 19-23, 2012*, pp. 814.
 15. Barabanenkov M.Yu., Barabanenkov Yu.N., Nikitov S.A. Virtual singular scattering of electromagnetic waves in transformation media concept *Proc. Advanced Electromagnetic Symposium (AES2012)*. Paris. France. 16-19 April 2012, Zouhdi Eds. S. and Begaud X., University Paris-Sud & Telecom ParisTech pp. 368-376.
 16. Barabanenkov Yu.N, Osokin S., Kalyabin D., Nikitov S. Radiation losses and dark mode for the spin-wave propagation through a discrete magnetic microwaveguide. *Physical Review B*. 2016, V.94, pp. 184409-1-184409-11.
 17. Барабаненков Ю.Н., Бограчев К.М. Сведение обратной задачи многоканальной радиотермографии биологического объекта при волновом взаимодействии контактных антенн к аналогичной задаче с независимыми антеннами. Институт Радиотехники и Электроники им. В.А.Котельникова РАН. IV *Всероссийская Микроволновая Конференция*. 23-25 ноября 2016 г.- Москва, Доклады. pp. 349-353.
 18. Leontovich M.A, Levin M.L. To theory of oscillation excitation in vibrator antennas *Journ. Thechn. Phys.* 14, 481, 1944.

Для цитирования:

Ю.Н.Барабаненков, К.М.Бограчев. Метод повышения помехозащищенности радиотермографии биологических объектов путем вычитания токов в приемных контактных антеннах с учетом взаимодействия этих токов. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. № 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/oct18/3/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.10.3