

## **БЛИЖНЕПОЛЕВАЯ МИКРОВОЛНОВАЯ ТЕРМОТОМОГРАФИЯ БИОТКАНЕЙ С ДИФРАКЦИЕЙ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БОКОВОМ ГРАДИЕНТЕ ТЕМПЕРАТУРЫ**

*Барабаненков Ю.Н.*

*Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН*

*E-mail: barab624@mail.ru*

*Выводится система уравнений для решения обратной задачи о восстановлении коэффициентов разложения Фурье температуры поглощающей нагретой среды как функции координат вдоль элементарных слоев среды, параллельных ее поверхности. Эти коэффициенты выражаются диагонально через известные из эксперимента коэффициенты аналогичного разложения теплового потока энергии около малой приемной сканирующей антенны или ячейки сканирующей дифракционной решетки как функции смещения вдоль поверхности среды в зоне ближнего поля поверхности.*

Существует актуальная проблема пассивного зондирования биологических тканей по их собственному тепловому излучению в микроволновом диапазоне длин волн. В ИРЭ РАН на протяжении ряда лет проводилось изучение температурных реакций головного мозга человека с помощью многоканального радиотермографа РАСКАТ в диапазоне 38 см, разработанного совместно с НПО ВЕГА-М [1]. Инициатором и руководителем этих работ акад. Ю.В. Гуляевым несколько лет назад была поставлена задача об использовании представлений оптики ближних полей [2] при извлечении информации из радиометрических измерений собственного теплового излучения нагретого объекта с целью повышения разрешающей способности метода при восстановлении пространственного распределения температуры объекта. Как известно, наличие составляющей ближнего поля в тепловом электромагнитном излучении поглощающего диэлектрического тела было предсказано теоретически в 1953 г. С.М. Рытовым [3]. Рытов разработал дифракционную теорию теплового излучения с учетом эффектов ближних полей (неоднородных волн). В 90-х годах минувшего столетия эта теория привлекла активное внимание французских исследователей, предсказавших существование длинномасштабной пространственной когерентности в ближнем поле светового теплового излучения в свободное пространство из непрозрачного материала, поддерживающего резонансные поверхностные волны, такие как поверхностные плазмоны и поверхностные поляритоны [4]. Непосредственное развитие идеи Рытова о ближнеполевой составляющей в тепловом микроволновом излучении поглощающего диэлектрического тела получили в работах группы К.П. Гайковича [5-8]. Гайкович и др. рассмотрели тепловое излучение неоднородно нагретой по глубине воды и показали, что при определенном выборе размера апертуры приемной антенны и ее высоты над поверхностью воды основной вклад в принятое тепловое радиоизлучение дает его ближнеполевая составляющая. При этом удается восстановить глубинный профиль температуры в приповерхностном слое, толщина которого меньше толщины скин-слоя.

Существенным ограничением работ [5-8] является предположение об одномерном распределении температуры исследуемого объекта по глубине, что не позволяет

рассматривать вопрос о восстановлении распределения температуры вдоль слоев (боковых градиентов), параллельных поверхности объекта, как, например, в экспериментах [1]. Цель нашей работы – сформулировать способ восстановления боковых градиентов температуры, используя идею о дифракции теплового излучения на профиле бокового градиента температуры нагретого тела в соответствии с теорией Ван-Циттерта-Цернике о степени когерентности света от протяженного некогерентного квазимонохроматического источника ( см., напр., [9]). В этой теории излучение источника дифрагирует на его апертуре и наблюдение частично-когерентного поля излучения производится в зоне Фраунгофера источника. В нашем случае роль апертуры источника играет боковая неоднородность в распределении температуры нагретого излучающего тела и наблюдение частично- когерентного теплового излучения производится в области ближнего поля источника. При этом размеры источника, приемного устройства, и расстояние между ними сравнимы с длиной волны излучения в среде в выделенном диапазоне микроволн.

### 1. Сканирующая антенна или дифракционная решетка

Согласно интуитивному представлению мы предполагаем, что периодическое боковое распределение температуры может быть восстановлено с помощью малой антенны, перемещаемой вдоль поверхности среды в зоне ближнего поля поверхности (рис. 1).

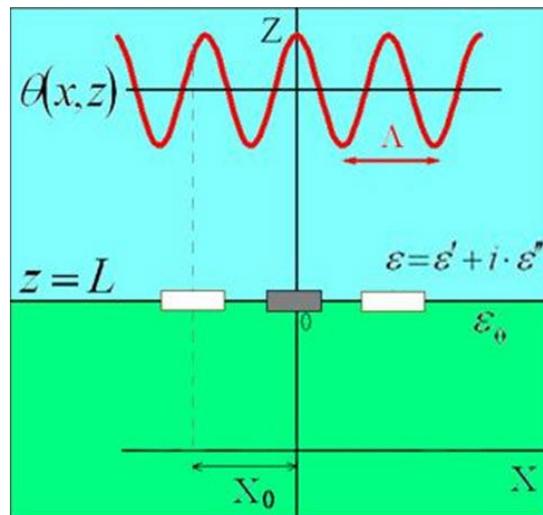
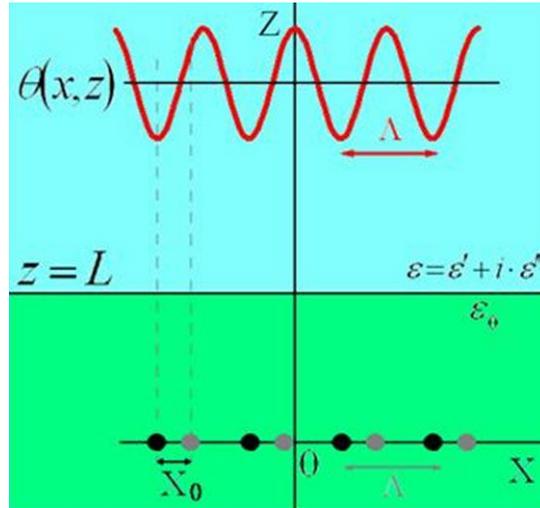


Рис.1. Сканирование антенной в плоскости  $z = L$

При этом поток энергии теплового излучения на антенну измеряется как функция положения антенны. Вместо малой антенны может быть использована дифракционная решетка с измерением потока энергии через ее ячейку в зависимости от смещения решетки вдоль поверхности ( рис. 2). Антенна и дифракционная решетка характеризуются операторными коэффициентами прохождения волны, действующими в пространстве поперечных оси  $Z$  компонент волновых векторов.



**Рис.2.** Сканирование дифракционной решеткой в плоскости  $Z = 0$

## 2. Функциональные уравнения обратной задачи

Теоретическая основа для интуитивного представления относительно сканирующей антенны или дифракционной решетки дается следующей фундаментальной формулой для нормальной к поверхности тела  $Z$ - компоненты спектральной плотности вектора Пойнтинга выходящего из среды теплового излучения в виде ряда Фурье в зависимости от смещения  $X$  антенны или решетки вдоль поверхности нагретого тела

$$P_z(x, \omega) = -\sum_n P_n(\omega) \exp(i g_n x) \quad (1)$$

со свойством коэффициентов разложения  $\overline{P}_{-n} = \overline{P}_n^*$ . Температура тела  $\Theta(x, z)$  в энергетических единицах также представляется в каждом слое среды рядом Фурье типа (1) как функция  $X$  с коэффициентами разложения  $\Theta_n(z)$ , являющимися функциями глубины слоя. Таким образом, числа  $g_n = 2\pi n/\Lambda$ , где  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , это обратные периоды бокового распределения температуры в каждом слое и  $\Lambda$  - основной период. Для простоты рассматривается двумерная модель теплового излучения полубесконечной нагретой среды. Между коэффициентами разложения локального потока энергии в ряд Фурье (1) в зависимости от смещения антенны или решетки и коэффициентами разложения температуры в слое среды в зависимости от координаты вдоль слоя существуют диагональные функциональные уравнения

$$P_n(\omega) = \int_L^\infty dZ F_n(Z) \Theta_n(Z) \quad (2)$$

где среда расположена в полупространстве  $z > L$  и тепловое излучение выходит из среды в отрицательном направлении оси  $Z$ . Дальнейшая проблема связана с оптимальным асимптотическим приближением для производящих функций  $F_n(Z)$ .

### 3. Структура производящих функций

Производящие функции  $F_n(Z)$  описывают выход теплового излучения из нагретой среды в виде убывающих неоднородных волн  $\exp(-i\gamma(k_x)z + ik_x x)$ . Продольное волновое число  $\gamma(k_x) = (k_1^2 - k_x^2)^{1/2}$  каждой такой волны имеет комплексное значение вследствие комплексности волнового числа  $k_1$  поглощающей среды и возможно большого значения бокового волнового числа  $k_x \approx g_n$  при большом боковом градиенте распределения температуры. Если период бокового распределения температуры значительно меньше длины волны в среде, то волна теплового излучения, распространяющегося в среде, является сильно неоднородной и выход ее из среды оказывается затрудненным, как показывает следующий пример.

#### 3. Упрощенная обратная задача со сканирующей дифракционной решеткой

Рассмотрим упрощенную обратную задачу о восстановлении второй гармоники бокового распределения температуры при сканировании дифракционной решеткой с нитяными направляющими [10]. В этом случае уравнение обратной задачи (2) для  $n = 2$  после некоторых упрощений принимает вид

$$P_2(\omega) = \frac{1}{2} \exp(-2g_1 L) T(g_1) \times \int_L^\infty dZ \exp(-2\gamma''(g_1)Z) \Theta_2(Z) \quad (3)$$

где два штриха означают мнимую часть. Фактор эффективности выхода  $T(g_1)$  имеет острый пик (рис. 3) при  $g_1 = k_1' + 0$ , то есть при стремлении аргумента к вещественной части волнового числа в среде со стороны неоднородных волн  $g_1 > k_1'$ . Полуширина этого максимума оценивается мнимой частью  $k_1''$  волнового числа в среде. При независимости амплитуды боковой второй гармоники температуры от глубины уравнение обратной задачи (3) с максимальным фактором эффективности сводится к элементарному алгебраическому виду  $\bar{P}_2/P_0 \approx (\varepsilon''/\varepsilon')^{1/2} \Theta_2/\Theta_0$ ,

где через  $P_0$  обозначен поток энергии теплового излучения из среды в свободное пространство по закону Кирхгофа.

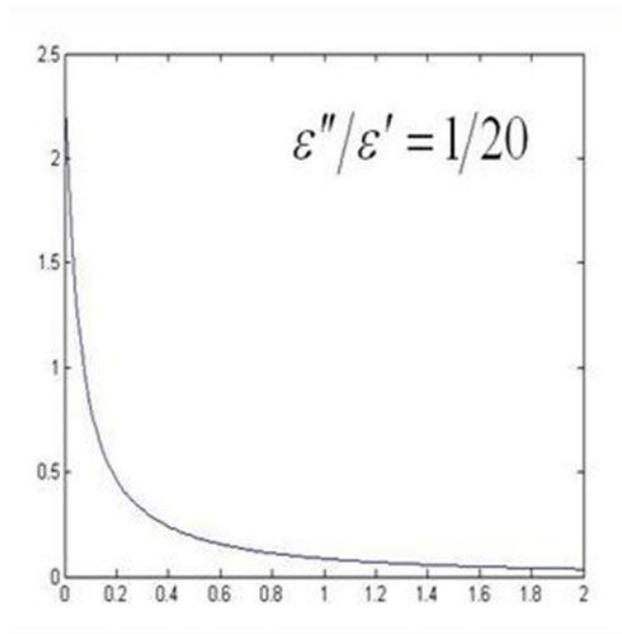


Рис.3. Зависимость  $\epsilon'^{3/2} T(g_1)$  от  $(g_1 / k_1')^2 - 1$

#### 4. Заключение

Кратко изложена теоретическая основа для наглядного представления о том, что периодическое боковое распределение температуры вдоль элементарных слоев нагретого биологического объекта может быть восстановлено с помощью малой антенны или дифракционной решетки, перемещаемой вдоль поверхности объекта в зоне ближнего поля его поверхности. Получена система уравнений обратной задачи восстановления боковых гармоник пространственного распределения температуры, которая сводится к алгебраическим уравнениям при независимости амплитуд этих боковых гармоник от глубины расположения элементарного слоя. На частном примере проверено соотношение общего характера, что с наибольшей величиной сигнала теплового излучения восстанавливается боковая гармоника распределения температуры, пространственный период которой порядка половины длины волны в среде.

Работа поддержана грантом РФФИ 09-02-00920, а также программой фундаментальных исследований ООФ РАН “Пассивная многоканальная радио- и акустотермография человека в ближней зоне”.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Анзимиров В.Л., Архипова Н.А., Пасечник В.И., Янович А.В. Исследование теплового возбуждения в коре головного мозга при функциональных тестах методом динамического многоканального радиотепловидения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2000. № 8. С. 22-30.

2. Near- Field Optics, edited by S. Jutamulia (SPIE Press, New York, 2002), p. MS172.
3. Рытов С.М. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. М.: АН СССР, 1953, 232 с.
4. Carminati R. , Greffet J.J. Near-field effect in spatial coherence of thermal sources. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82, P. 1660-1663.
5. Gaikovich K.P., Reznik A.N., Valks V.L., Yurasova N.V.// Phys. Rev. Lett. New effect in near-field thermal emission. 2002. V. 88, P. 104302- 1-104302-4.
6. Резник А.Н., Юрасова Н.В. Ближнеполевая СВЧ томография биологических сред. // ЖТФ. 2004. Т. 74. С. 108 – 116.
7. Резник А.Н., Юрасова Н. В. Обнаружение квазистационарного теплового поля. // Известия вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. С. 1039-1045.
8. Гайкович К.П., Резник А.Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения. //Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72. С. 792-796.
9. Борн М. , Вольф Э. Основы Оптики, М.: Наука, 1970, 856 с
10. Gulyaev Yu.V., Varabanenkov Yu.N., Varabanenkov 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, P. 1-1- 1-12.