

УДК 615.47:621 37/39

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СТАТИСТИЧЕСКОЙ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ В БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЯХ

С. И. Винокурова, Л. С. Павлова

Рассмотрен метод статистической регуляризации для восстановления температурного профиля биологических тканей по собственному СВЧ излучению на нескольких частотах в применении к модели биологического объекта как плоскостлой среды с учетом переотражений электромагнитного излучения на границах тканей. Проведено исследование влияния вариации толщин слоев в трехслойной модели биологического объекта на матрицу связи радиояростной температуры с температурой слоев и зависимости погрешностей восстановления от объема априорной информации. Показана возможность обнаружения температурных аномалий с помощью многочастотной СВЧ радиотермометрии.

В настоящее время получили развитие методы определения внутренних температур биологических объектов с помощью радиометрии — измерения интенсивности собственного СВЧ излучения [1–3]. В этих работах рассматривается радиометрический метод для определения интегральных температур биологических тканей. Однако в ряде медицинских исследований, например для контроля степени нагрева злокачественных новообразований при гипертермии, представляет интерес профиль распределения температур по глубине. Задача восстановления профиля сводится, во-первых, к выбору модели с учетом заданного объема априорной информации и, во-вторых, к выбору способа решения.

Вопрос восстановления температурного профиля биологических тканей с использованием многочастотного радиометрического метода и применением статистической регуляризации впервые рассматривался в работе Эденхофера [4]. В этой работе для описания теплового излучения использовалась теория переноса без учета отражений и интерференции на границах биологических тканей.

В настоящей работе ставится задача оценки возможности восстановления профиля многочастотным радиометрическим методом с применением статистической регуляризации при введении температурных аномалий. Оцениваются погрешности восстановления при различных объемах априорной информации. Задача решается применительно к модели биологического объекта как плоскостлой среды с учетом переотражений на границах тканей.

Спектральная плотность мощности радиотеплового излучения неравномерно нагретой в направлении оси z среды определяется выражением [5]

$$T_{\text{я}\omega} = \int_0^{\infty} T(z) Q(z, \omega) dz, \quad (1)$$

где $T(z)$ — термодинамическая температура, $Q(z)$ — тепловые потери в среде вспомогательной плоской волны единичной мощности.

Тепловые потери в неоднородной среде находятся по выражению

$$Q(z) = \text{Re}(E(z)H^*(z)), \quad (2)$$

Для плоскостой среды в предположении изотермичности каждого из n слоев выражение (1) может быть переписано в виде

$$T_{яj} = \sum_{i=1}^n Q_{ji} T_i, \quad j=1, 2, \dots, m; \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

где Q_{ji} — доля потерь поля излучения антенны при работе ее в активном режиме на j -й длине электромагнитной волны единичной мощности в i -м слое, т. е. коэффициенты Q_{ji} матрицы связи (матрицы передачи) радиояростной температуры с температурой слоев T_i характеризуют вклад того или иного слоя в излучение на данной частоте. Система уравнений (3) является исходной для оценок профиля температуры среды по n точкам из данных измерений яркостных температур на m длинах волн.

Элементы матрицы передачи Q_{ji} найдены из решения электродинамической задачи распространения электромагнитных волн в системе из n слоев с учетом отражения на границах слоев и интерференции [6, 7].

Решение системы проводится путем обращения матрицы Q . Вследствие наличия ошибок измерения величины радиояростных температур отличаются от значений $T_{яj}$ на величину δ_j . Уравнения (3) примут вид

$$T_{яj} = \sum_{i=1}^n T_i Q_{ji} + \delta_j, \quad j=1, 2, \dots, m, \quad (4)$$

где δ_j — ошибки измерения величины $T_{яj}$, имеющие случайный характер. Вследствие плохой обусловленности системы уравнений (3) наличие ошибок в измерениях яркостных температур приводит к значительным погрешностям оценок температур слоев T_i . В связи с этим применяется метод статистической регуляризации [8]. В качестве регуляризованного решения $\varphi^c = \langle T \rangle$ выбирается решение уравнения

$$(L^*L + S^2C^{-1}) \varphi^c = L^*g, \quad (5)$$

где g_j — величины, измеряемые с равной абсолютной точностью и пропорциональные величинам $T_{яj}$, L — соответствующая матрица с матричными элементами $L_{ji} = (S/S_j) Q_{ji}$, L^* — транспонированная матрица, S — среднегеометрическая ошибка измерения $T_{я}$, S_j — среднеквадратичная ошибка измерения величины $T_{яj}$, C — ковариационная матрица, содержащая априорную информацию о температурном профиле.

Средний квадрат ошибки восстановления

$$\sigma_i^2 = S^2 ((L^*L + S^2C^{-1})^{-1})_{ii}. \quad (6)$$

Рассмотрим решение задачи восстановления температурного профиля на примере трехслойной модели биологической структуры, состоящей из мускулов, жира и кожи. Каждый слой будем предполагать изотермическим с температурой, равной средней температуре ткани соответствующего слоя.

Температуры соседних слоев, в первом приближении, будем считать независимыми. Величины радиояростных температур на трех длинах волн могут быть получены из решения прямой задачи для принятой модели.

Для выбора матрицы передачи Q производился расчет коэффициентов Q_{ji} при вариации толщин слоев кожи и жира в предположении, что мускульный слой полубесконечный, так как внутренние органы близки по своим электрофизическим свойствам к мускулам. При этом использовались данные электрофизических параметров, взятые из работы [9]. Расчеты производились на частотах 0,915; 1,5; 10 ГГц (32,8; 20; 3 см) при вариациях кожи от 1 до 4 мм и жира от 5 до 30 мм. На рис. 1 представлены результаты расчета коэффициентов для случая среды, согласованной с антенной. Из рис. 1 видно, что вклад в величину по-

терь, а следовательно, и в излучение, зависит от длины волны. При этом с уменьшением длины волны кожа дает наибольший вклад в излучение, а вклад мышц незначителен. С увеличением длины волны возрастает вклад в излучение мышц. Чем больше толщина кожи, тем больше ее вклад в излучение во всех случаях. Увеличение толщины слоя жира, несмотря на его хорошую прозрачность (по сравнению с мускулами и кожей), существенно вносит изменение в долю излучения, вносимую мускулами.

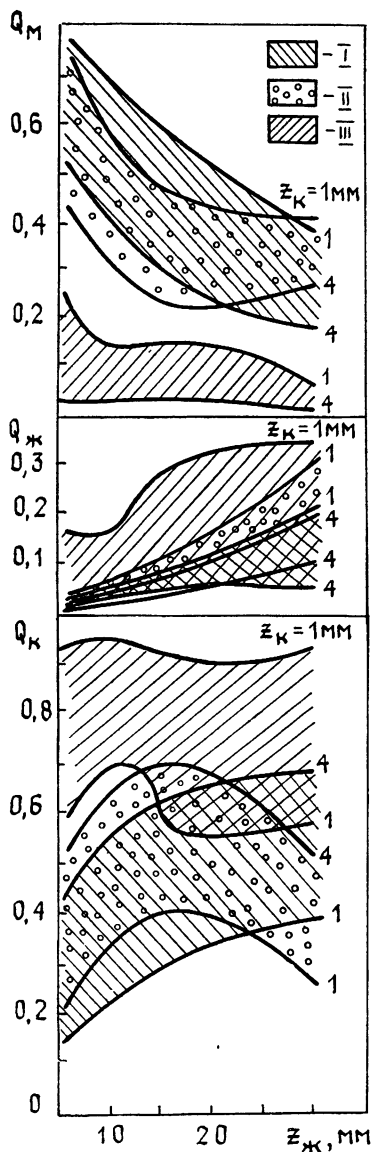


Рис. 1.

Рис. 1. Расчетные зависимости коэффициентов матрицы передачи для длин волн I—33 см, II—20 см, III—3 см при различных толщинах кожи z_k .

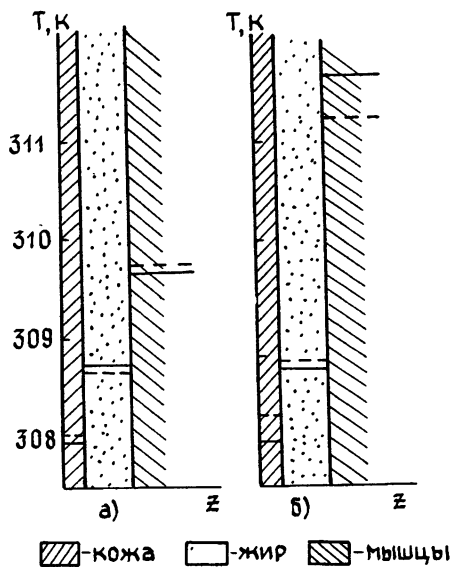


Рис. 2.

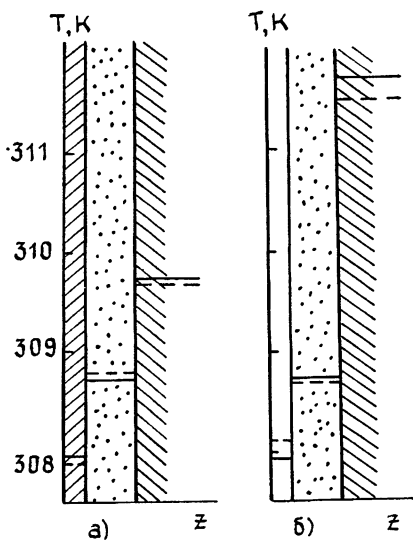


Рис. 3.

Эффективность применения метода статистической регуляризации к решению данной задачи проанализирована с помощью машинного эксперимента. При проведении машинного эксперимента величины коэффициентов матрицы передачи Q выбираются для толщин слоев $\Delta z_{\text{кожи}} = 2 \text{ мм}$, $\Delta z_{\text{жира}} = 5 \text{ мм}$, $\Delta z_{\text{мышц}} > 30 \text{ мм}$, что соответствует характерным величинам толщин слоев конечностей среднего человека. Сред-

ние температуры слоев принимались равными: $T_1=309,7$ — мышцы; $T_2=308,7$ — жир, $T_3=308,2$ К — кожа и среднеквадратичные отклонения температур 0,3 К. Ковариационная матрица принята чисто диагональной, так как предполагается, что средние температуры слоев независимы. Диагональные члены этой матрицы C_1, C_2, C_3 равны дисперсиям температур для слоя мускулов, жира и кожи соответственно. В случае, когда априорно предполагается наличие аномалии в том или ином слое, дисперсия температуры в этом слое выбиралась больше, чем в двух других слоях. Погрешности измерений радиоярких температур принимались равными 0,1 К.

Машинный эксперимент проводился по следующей схеме.

1. Рассчитывалась матрица Q для нескольких случаев: при условии согласования антенны со средой, согласования с кожей и без согласования.

2. Рассчитывались по выражению (3) яркие температуры для частот 0,915; 1,5 и 10 ГГц.

3. Яркие температуры «зашумливались» случайными числами, и по вышеизложенному методу статистической регуляризации восстанавливались температуры слоев при отсутствии аномалии.

При тех же условиях рассматривалась задача с введением аномалии. Температурная аномалия вводилась в мускулы в виде повышения температуры на 2 К.

На рис. 2, 3 приводятся примеры восстановления профиля температур. Результаты, представленные на рис. 2, соответствуют случаю, когда априорных данных о наличии температурной аномалии нет, дисперсии температур слоев равны между собой и составляют 0,09 К². Результаты, представленные на рис. 3, соответствуют случаю, когда априорно предполагается наличие аномалии в мускульном слое. Величина дисперсии температур в коже и жире остается неизменной, а в мускульном слое полагается равной 0,25 К².

На рис. 2а, 3а приведены результаты восстановления профиля при отсутствии аномалии в слоях, на рис. 2б, 3б — результаты восстановления профиля при введении аномалии в мускульный слой. Сплошной линией показаны первоначально заданные температуры, пунктиром — восстановленные значения температур.

Анализ результатов расчета показывает, что при отсутствии априорной информации о наличии аномалии в мускульном слое абсолютная погрешность ее восстановления составляет 0,45 К, при наличии априорной информации — 0,15 К. Проведены оценки среднеквадратичной погрешности восстановления σ_1 профиля температуры в мускульном слое в зависимости от объема априорной информации. Результаты представлены на рис. 4. Из рассмотрения графика видно, что при принятых погрешностях измерения радиоярких температур среднеквадратичное отклонение восстановленных температур колеблется в пределах 0,1—0,35 К и величина его тем меньше, чем с меньшим разбросом априорно известны термодинамические температуры биологической структуры.

В работе также сравнивались ошибки восстановления температурного профиля методом статистической регуляризации (стохастическим методом) с ошибками, возникающими при использовании классического метода наименьших квадратов (МНК):

$$T = (L^*L)^{-1}L^*T_n, \quad (7)$$

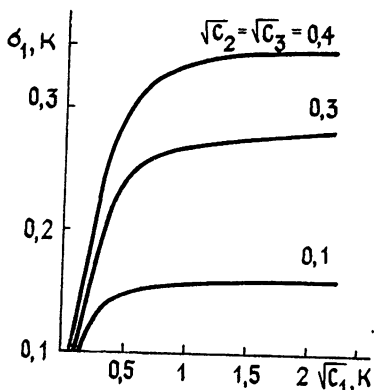


Рис. 4.

Полученные результаты по величине абсолютной и среднеквадратичной погрешностей при применении статистического и МНК методов по слоям представлены в табл. 1.

Таблица 1

	Способ восстановления	кожа	жир	мышцы
Абсолютная погрешность восстановления (К)	статистический	0,3	0,03	0,45
	МНК	4	39	3,23
Среднеквадратичная ошибка восстановления (К)	статистический	0,128	0,298	0,134
	МНК	6,04	55,2	1,7

Из таблицы видно, что при использовании статистического метода регуляризации погрешности восстановления существенно уменьшаются.

Таким образом, в работе проанализирована матрица передачи Q для трехслойной модели биологической ткани при вариации толщины слоев. Показана возможность восстановления профиля температур и обнаружения аномалии в глубинном слое биологической ткани многократным радиометрическим способом с применением метода статистической регуляризации. Исследованы погрешности восстановления температурного профиля от объема априорной информации.

Авторы благодарны В. М. Полякову за полезное обсуждение результатов и А. С. Шмаленюку за любезно предоставленные программы расчета матрицы передачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barret A, Myers P, Sadowsky N. — Radio Sci., 1977, 12, № 69, p. 1675.
2. Троицкий В. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 9, с 1054
3. Павлова Л. С и др. Тезисы докладов на XIV Всесоюзном съезде акушеро-гинекологов. — М., 1983, с. 652.
4. Edenhofer E. — International URSI Symposium 1980, Munchen (1980), p. 321, с./1 — 321 с/3.
5. Левин М. Л., Рытов С. М. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике — М: Наука, 1967. — 308 с
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. 2-е изд. перераб. и дополн. — М: Наука, 1973. — 342 с.
7. Шмаленюк А. С. Препринт ИРЭ АН СССР № 2(357). — М., 1983
8. Турчин В. Ф., Козлов В. П., Малкевич М. С — УФН, 1970, 102, вып. 3, с 345.
9. Johnson C. C., Guy A. W. — Proc IEEE, 1972, 60, № 6, p. 692.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
9 июля 1984 г.

USING OF STOCHASTIC INVERSION METHOD FOR THE BIOLOGICAL TISSUE TEMPERATURE PROFILE RETRIEVAL

S. I. Vinokurova, L. S. Pavlova

The method of stochastic inversion is examined aiming at biological tissues subcutaneous temperature profile retrieval, using passive microwave emission at some frequencies concerning the biological object model as a stratified medium and taking into account reemitted electromagnetic radiation at the intermediate boundary layers. The influence of layer thickness variation in a three-layer biological object on radio brightness temperature-layer temperature connection matrix and the dependence of reconstruction drawbacks from the amount of the a priori information are investigated. The possibility of temperature anomalies location by the use of multispectral microwave radiometry is shown.