

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.371:551.46 + 551.526 + 615.47

В. Л. Вакс, К. П. Гайкович, д-р физ.-мат. наук,
А. Н. Резник, д-р физ.-мат. наук, Н. В. Юрасова,
Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород

БЛИЖНЕПОЛЬНАЯ ПОДПОВЕРХНОСТНАЯ СВЧ РАДИОТЕРМОМЕТРИЯ*

В тепловом радиоизлучении поглощающей среды обнаружен эффект ближнего поля. Эффект заключается в том, что эффективная глубина формирования принимаемого излучения d_{eff} оказывается меньше, чем толщина скин-слоя и зависит от размера D приемной антенны и ее высоты h над поверхностью среды. Зависимость $d_{eff}(D, h)$ была получена в результате измерений излучения температурно-стратифицированной водной среды на длине волны 31 см с использованием специально разработанной электрически малой антенны. Эффект использован как основа нового метода восстановления подповерхностного профиля температуры.

Введение

СВЧ радиометрические измерения теплового излучения широко используются для подповерхностной диагностики сред. В задачах определения температуры такие измерения находят вне конкуренции среди прочих дистанционных (неинвазивных) методов. В основе радиометрического метода лежит тот факт, что интенсивность теплового излучения пропорциональна средневзвешенной температуре в слое толщиной d_{eff} , в котором это излучение формируется. Изменение d_{eff} позволяет восстанавливать подповерхностный температурный профиль $T(z)$. Для этой цели ранее использовалась только зависимость d_{eff} от длины волны λ , т. е. восстановление $T(z)$ осуществлялось по данным измерений теплового излучения на нескольких длинах волн. Такой подход применялся в медицинских исследованиях, в диагностике плазмы, водной среды, грунта и т. д.

В [1] теоретически было показано, что ближнепольный (квазистационарный) компонент теплового излучения должен существенно влиять на интенсивность сигнала, измеряемого радиометром, если антенна имеет малые электрические размеры

*Результаты данной статьи получены по программе государственного контракта № 107-3 (00-П) и при поддержке РФФИ, грант № 01-02-16432.

$D \ll \lambda$ и расположена на высоте $h \ll \lambda$ над излучающей поверхностью. В этом случае d_{eff} определяется не только λ , но также и параметрами антенны D, h . Таким образом, появляется новая возможность управления величиной d_{eff} путем изменения параметров D и h . В данной статье представлены разработанная радиометрическая система для ближнепольных измерений, результаты исследования ближнепольных эффектов в тепловом излучении и восстановления подповерхностного температурного профиля среды по данным ближнепольных радиометрических измерений.

Измерения

Тепловое излучение измерялось радиометром на рабочей частоте $\nu_0 = 950$ МГц с шириной полосы приема $\Delta\nu = 200$ МГц и с уровнем флуктуационной чувствительности $\delta_T = 0,05$ К при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с. Ключевым элементом приемной системы служила электрически малая антенна с размером $D = 1$ см ($D/\lambda = 0,03$), показанная на рис. 1. Она состоит из двух синфазных диполей, соединенных с симметричной полосковой линией, работающей как согласующий резонатор (прототип такой антенны описан в [2]). В качестве исследуемой среды была выбрана вода. В случае, когда антенна находилась в контакте с водной поверхностью ($h = 0$), она была согласована с входом радиометра так, что коэффициент отражения R , усредненный по частотной полосе приема радиометра $\Delta\nu$, не превосходил 0,03 (рис. 2).

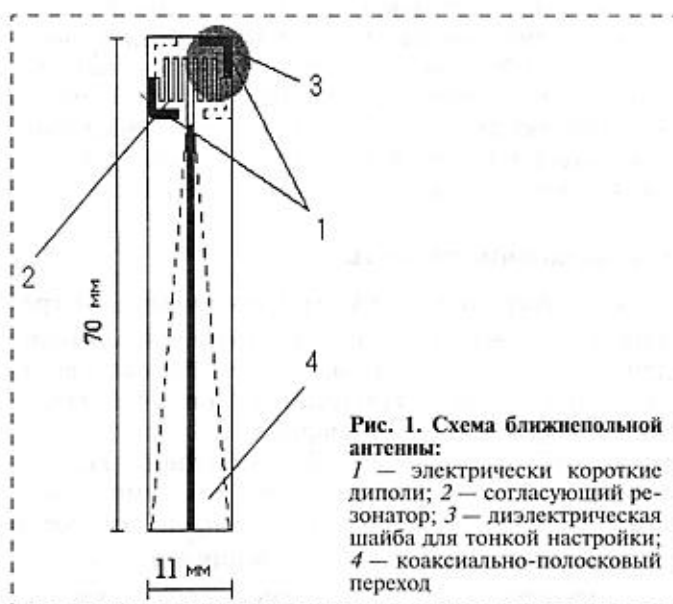


Рис. 1. Схема ближнепольной антенны:
1 — электрически короткие диполи; 2 — согласующий резонатор; 3 — диэлектрическая шайба для тонкой настройки; 4 — коаксиально-полосковый переход

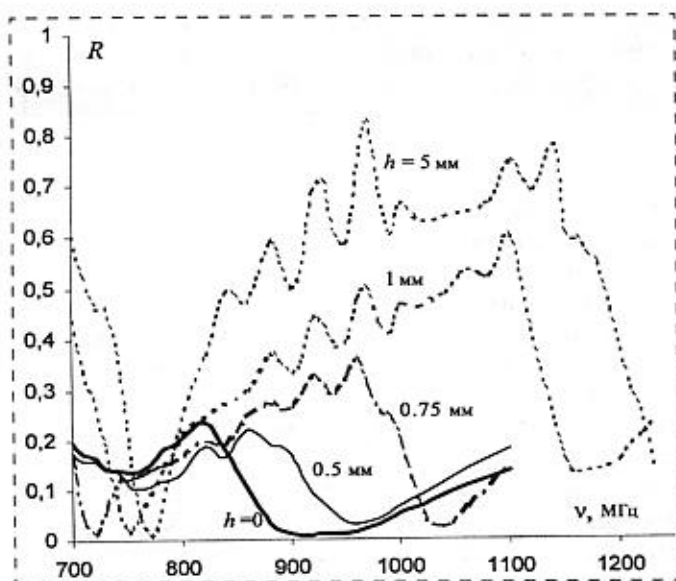


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения антенны для различных высот над поверхностью водной среды

Коэффициент отражения R , КПД η и чувствительность δT_b антенн были исследованы в зависимости от частоты и диэлектрических параметров измеряемой среды. Поскольку диэлектрические параметры воды сильно зависят от температуры и солености, исследовалась зависимость характеристик антенны от этих величин. Установлено, что коэффициент отражения антенны практически не зависит от температуры и солености воды в полосе частот радиометра $\nu_0 \pm \Delta\nu/2$. КПД антенны при $h = 0$ составил $\eta = 0,85$. Увеличение высоты приводит как к рассогласованию антенны (возрастанию R), так и к уменьшению η . Порог чувствительности к температурным вариациям возрастает от 0,06 К при $h = 0$ до 1 К при максимально возможной для измерений высоте $h_{\max} = 2,5$ мм. Дальнейшее уменьшение чувствительности при $h > h_{\max}$ сделало невозможными измерения на таких высотах. Таким образом, в отличие от аналогичных систем активной локации, известных как ближнепольные микроскопы, согласованная высокоэффективная антенна является необходимым компонентом ближнепольной радиометрической системы.

Ближнепольные эффекты

Для измерений d_{eff} путем использования нагревателя на поверхности и охладителя у дна цилиндрического сосуда создавался устойчивый квазилинейный профиль $T(z)$ (рис. 3). При этом удалось достичь значения стационарного градиента температуры $dT/dz = 2,5$ К/см. Для линейного $T(z)$ получено простое выражение для измеряемой яркостной температуры: $T_b = T(z = -d_{\text{eff}})$, которое и было использовано для определения d_{eff} . Поскольку диэлектрическая проницаемость воды ϵ удовле-

творяет условию $|\epsilon| \gg 1$, для волновой компоненты теплового излучения значение d_{eff} равно значению толщины скин-слоя $d_{sk} = \lambda / (4\pi \text{Im} \sqrt{\epsilon})$. Для ближнепольного компонента имеем $d_{\text{eff}}(D, h) < d_{sk}$. В наших измерениях было получено, что $d_{\text{eff}}(d = 1 \text{ см}, h = 0) \approx 0,5 d_{sk}$.

Выражение для эффективной яркостной температуры принимаемого на длине волны λ излучения может быть представлено в компактном виде:

$$T_b(h, D) = \int_{-\infty}^0 T(z) K(h, D, z) dz, \quad (1)$$

где h — высота антенны над поверхностью среды; D — эффективный размер антенны. Ядро K можно представить как сумму вкладов квазистационарного и волнового компонентов поля. Квазистационарный компонент преобладает, когда $D \ll \lambda$ и $h \ll \lambda$. В этом случае глубина слоя, который дает основной вклад в значение измеряемого теплового излучения в (1) (эффективная глубина формирования яркостной температуры)

$$d_{\text{eff}} = \left| \int_{-\infty}^0 z K(h, D, z) dz \right|,$$

может быть много меньше, чем величина скин-слоем поглощения d_{sk} . Волновой компонент доминирует, когда $D \geq \lambda$ или $h \geq \lambda$, тогда $d_{\text{eff}} \rightarrow d_{sk}$. В произвольном случае, когда принимаемое излучение включает оба компонента, d_{eff} будет зависеть от высоты антенны и ее размера, т. е.

$$d_{\text{eff}} = d_{\text{eff}}(h, D) < d_{sk}.$$

Интегральное уравнение (1) использовалось в [4] для вычислений яркостной температуры в целях постановки и численного моделирования решения обратной задачи восстановления температурного профиля по известной зависимости $T_b(D)$ или $T_b(h)$. Оно также используется ниже для расчетов T_b по известному профилю $T(z)$ для сравнения с экспериментальными результатами.

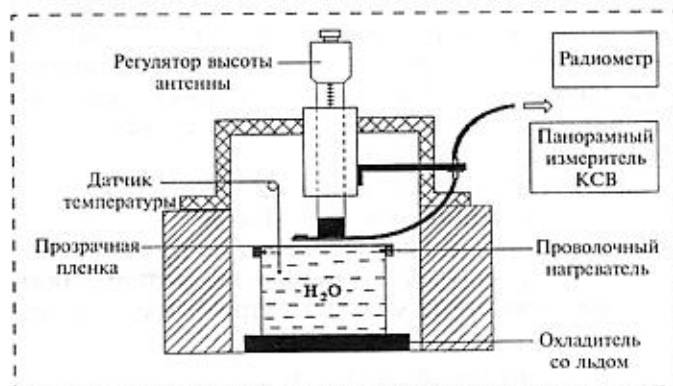


Рис. 3. Схема измерительной установки

Измерения температурно-стратифицированной водной среды проводились при трех значениях солености S : 0 , $1,8 \cdot 10^{-3}$ и $5,0 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Значение солености $S = 1,8 \cdot 10^{-3}$ г/см³ является некоторой особой точкой, поскольку при этом значении на данной частоте толщина скин-слоя воды практически не зависит от температуры и среда может рассматриваться как однородная по диэлектрическим свойствам.

Вычисления T_b при других S также проводились в приближении однородной среды с постоянным по глубине значением диэлектрической проницаемости воды для температуры $T(z = -d_{eff})$. Самый существенный результат измерений состоит в том, что была зарегистрирована зависимость яркостной температуры T_b и эффективной толщины d_{eff} от размера и высоты антенны, и эти зависимости оказались в хорошем соответствии с вычисленными теоретически на основе (1) (см., в частности, рис. 4, а). Вычисленная и определенная по экспериментальным данным зависимость эффективной толщины

d_{eff} от солености воды при контактных измерениях ($h = 0$) вместе с аналогичной зависимостью скин-слоя поглощения d_{sk} представлены на рис. 4, б. Существенное различие между d_{eff} и d_{sk} является наиболее очевидным проявлением ближнеполюсного эффекта. Эти экспериментальные результаты доказывают наличие ближнеполюсной компоненты в принимаемом тепловом излучении среды [3].

Восстановление подповерхностного температурного профиля

Обнаруженная зависимость $d_{eff}(D, h)$ может быть использована для развития новых методов радиотепловой диагностики среды. В данной статье представлены первые результаты восстановления подповерхностного профиля температуры водной среды по измеренной зависимости $d_{eff}(D)$. Яркостная температура воды измерялась с использованием двух антенн размером $D = 1$ и 4 см в процессе нагревания водной поверхности проволочным нагревателем (рис. 5). Дополнительно к этим изме-

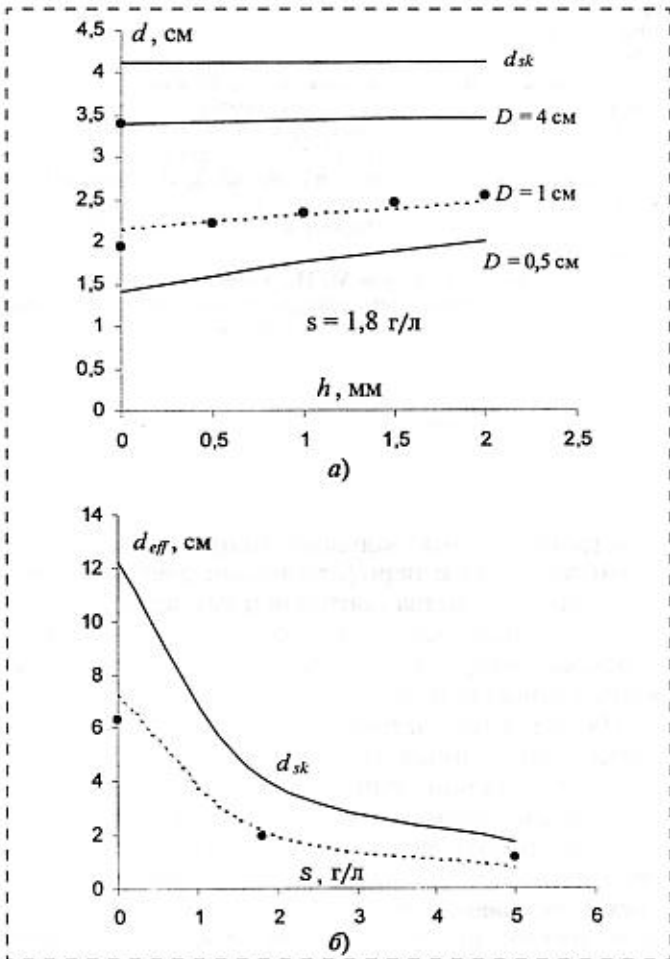


Рис. 4. Эффективная толщина d_{eff} : а — в зависимости от высоты антенны при различных размерах антенны (кружки — измерения; линии — результаты расчетов); б — измеренная (кружки) и рассчитанная (пунктир) зависимости от солености S воды (сплошная линия — вычисленная зависимость толщины скин-слоя поглощения)

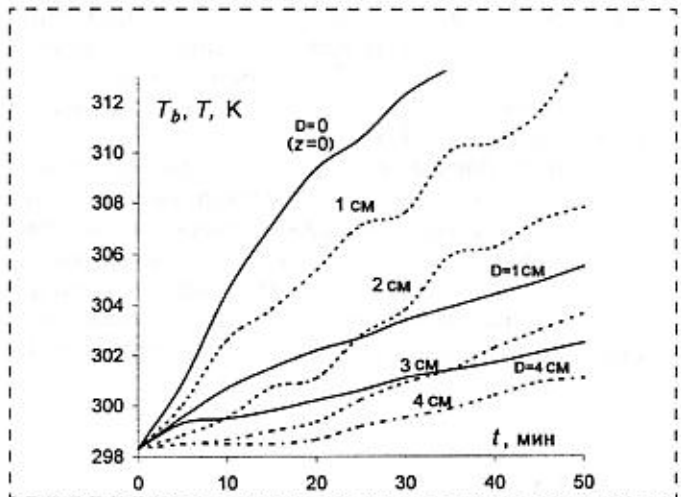


Рис. 5. Измерения динамики яркостной температуры (сплошные линии) и прямые измерения динамики температуры на различных уровнях в толще воды (пунктир)

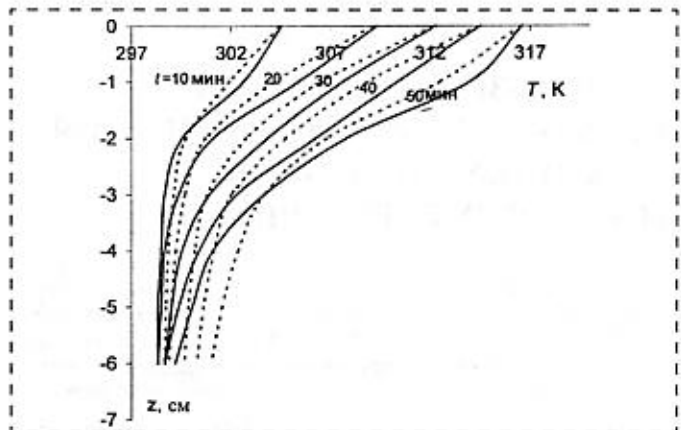


Рис. 6. Профили $T(z)$, восстановленные с интервалом 10 мин по измерениям $T_b(D)$ — пунктирные линии; профили $T(z)$, измеренные контактным термометром — сплошные

рениям (рис. 6) для восстановления профиля использовались прямые измерения поверхностной температуры воды $T(z=0)$ в качестве данных при нулевом размере антенны $D=0$, поскольку $T_b(D=0) = T(z=0)$. Алгоритм и программа для восстановления $T(z)$ из решения интегрального уравнения (1) был разработан на основе теории некорректных обратных задач Тихонова [4]. Восстановленные профили $T(z)$ в процессе нагревания поверхностного слоя воды показаны на рис. 6 вместе с профилями, полученными путем контактных измерений температуры. Можно видеть, что точность восстановления $T(z)$ составила $\sim(0,5-1)$ К при $0 < z < d_{sk} \approx 4$ см.

Заключение

Дальнейшее развитие предлагаемого подхода может быть связано с увеличением чувствительности радиометрической системы на высотах антенны $h > h_{\max}$ (в наших измерениях $h_{\max} = 2,5$ мм), а также с уменьшением размера антенн (в область размеров $D < 1$ см). Для увеличения высоты необходимо добиться согласования антенны на произвольной высоте, что не является принципиальной проблемой. Однако КПД электрически малых антенн неизбежно уменьшается с ростом h/λ и уменьшением D/λ . Возможным подходом к решению этой проблемы является улучшение конструкции миниатюрных антенн и использование материалов с предельно низкими омическими потерями, таких как высокотемпературные сверхпроводники. Эффективность этих материалов с точки зрения миниатюризации антенн исследовалась в [5, 6]. Наши предварительные оценки показывают,

что ближнепольные радиометрические измерения возможны в интервале высот антенны $0 < h/\lambda < 0,1$ и при размерах $D/\lambda > 0,01$. Тогда эффективную толщину слоя, в котором формируется принимаемое излучение, можно будет варьировать в диапазоне $0,2d_{sk} < d_{eff} < d_{sk}$. Предложенный метод одноволнового подповерхностного зондирования температуры может оказаться более простым в практической реализации по сравнению с известными многочастотными методами [7].

Список литературы

1. Резник А. Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии // Изв. вузов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 5. С. 512–517.
2. Абрамов В. И., Резник А. Н. Миниатюризация вибраторной сверхпроводниковой антенны // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 2. С. 158–167.
3. Гайкович К. П., Резник А. Н. Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 2. Вып. 11. С. 792–796.
4. Gaikovich K. P., Reznik A. N. Near-field subsurface radiothermometry // 8-th International Conf. "Microwave and Telecommunication Technology" (Crimea, Ukraine, September 14–17, 1998, Sevastopol), Sevastopol: Veber Co., Conference Proceedings. 1998. V. 2. P. 629–630.
5. Климов А. Ю., Красильник З. Ф., Резник А. Н., Абрамов В. И. и др. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ диапазона // Сверхпроводимость: Физ., Хим., Техн. 1993. Т. 6. № 11–12. С. 2150–2159.
6. Абрамов В. И., Климов А. Ю., Резник А. Н., Тагунов Б. Б. Электрически малая полосковая антенна из высокотемпературного сверхпроводника // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. № 19. С. 60–65.
7. Гайкович К. П., Сумин М. И., Троицкий Р. В. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. № 9. С. 1104–1112.

УДК 621.3

Г. И. Леонович, д-р техн. наук,
С. А. Матюнин, канд. техн. наук,
Самарский государственный аэрокосмический
университет им. С. П. Королева

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОДИРОВАНИЯ В ДАТЧИКАХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются датчики линейных и угловых перемещений, основанные на методе спектрального взаимодействия. Датчики реализованы на волоконно-оптических элементах, имеют спектральное уплотнение канала связи.

Использование метода спектрального взаимодействия элементов многокомпонентной оптической структуры (МОС) позволяет реализовать как датчики линейных и угловых перемещений [4], так

и устройства спектрального уплотнения каналов связи датчиков с периферийными электронными блоками, устройства контроля и коррекции источников погрешностей датчиков (погрешности от перекося кодирующего устройства, люфтов в элементах привода и др.).

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) показан позиционный датчик угловых перемещений вала с подвижной кодирующей маской. В датчике реализована функция спектрального уплотнения волоконно-оптического канала связи [1, 2]. Датчик состоит из источника излучения 1, диафрагмы 2, двух спектроформирующих элементов (СФЭ) 3, 6, N -разрядной кодирующей маски 4, закрепленной на валу 5, фоклина 7, волоконно-оптического кабеля 8, оптического демультиплексора 9, приемников излучения 10 и блока электроники 11. Осветитель 1 с помощью диафрагмы 2 формирует точечный источник светового потока, который через первый спектроформирующий элемент 3, распо-