

Эффект ближнего поля теплового радиоизлучения

К.П.Гайкович, А.Н.Резник

Институт физики микроструктур РАН, 603600, Нижний Новгород, ГСП-105

Экспериментально обнаружен эффект ближнего поля в тепловом излучении поглощающей среды в радиодиапазоне. Измерения излучения температурно стратифицированной водной среды на длине волны 30 см с использованием специально разработанных электрически малых антенн показали наличие предсказанной теоретически зависимости эффективной толщины слоя формирования принимаемого излучения от размера приемной антенны и ее высоты над поверхностью среды.

PACS: 41.20.Jb

Ближнее (квазистационарное) поле теплового электромагнитного излучения нагретых сред впервые было предсказано С.М.Рытовым еще в 50-х годах прошлого столетия как следствие его электродинамической теории равновесных тепловых флуктуаций [1]. Характерными особенностями этого поля являются отсутствие переносимого потока энергии и быстрое падение объемной плотности энергии с расстоянием от поверхности излучающей среды. В работе [2] было теоретически показано, что ближнепольная компонента теплового излучения существенно влияет на измеряемую приемником интенсивность сигнала только в случае, если принимается антенной малых электрических размеров $D \ll \lambda$, расположенной на высоте $h \ll \lambda$ над излучающей поверхностью. Указанные особенности затрудняют экспериментальные исследования, вследствие чего до настоящего времени ближнепольная компонента теплового излучения сред не была экспериментально зарегистрирована.

Следствием влияния ближнепольной компоненты оказывается уменьшение эффективной толщины слоя, формирующего принимаемое у поверхности поглощающей среды излучение, относительно глубины скин-слоя, которая определяет толщину излучающего слоя для волновой (распространяющейся) компоненты поля. Уменьшение эффективной толщины может наблюдаться экспериментально в зависимости либо от размера антенны (вблизи поверхности), либо от высоты антенны (для малой антенны). Именно так в данной работе впервые экспериментально зарегистрирован эффект ближнепольной компоненты теплового излучения при измерениях на фиксированной длине волны.

Экспериментальные исследования выполнены в дециметровом диапазоне длин волн ($\lambda = 31$ см). Очевидными преимуществами дециметровых волн по сравнению с более короткими радио и инфракрасными волнами являются существенно менее жесткие требования к размерам антенны и ее высоты над поверхностью, поскольку значения этих параметров определяются в масштабе длины волны и лежат в диапазоне $D/\lambda, h/\lambda < 0,1$ [2]. Регистрация теплового излучения производилась с помощью радиометра, имевшего рабочую частоту $f_0 = 950$ МГц, частотную полосу $\Delta f \approx 200$ МГц и флуктуационный порог чувствительности $\delta_T \approx 0,05$ К при постоянной интегрирования $\tau = 1$ с.

Ключевым элементом приемной системы являлась электрически малая антенна размера $D = 1$ см ($D/\lambda \approx 0,03$). Она состояла из двух синфазных диполей, подключенных к симметричной полосковой линии, игравшей роль согласующего резонатора (прототип этой системы описан в [3]). Антенну удалось согласовывать с входом радиометра при ее контакте с исследуемой средой ($h = 0$) так, что средний по полосе радиометра Δf коэффициент отражения от согласованной антенны в не превышал 0,03. При этом коэффициент полезного действия антенны, который определялся по данным калибровочных измерений при двух различных температурах однородно нагретой среды в сравнении с откликом на излучение согласованной нагрузки, составил $\eta = 0,85$ при $h = 0$. Увеличение высоты h приводило как к рассогласованию антенны (росту коэффициента отражения), так и к падению ее КПД. При максимальной высоте измере-

ний $h_{\max} = 2,5$ мм порог чувствительности системы к вариациям температуры исследуемой среды увеличивался от 0,05К (при $h = 0$) до 1К. Дальнейшее ухудшение точности при $h > h_{\max}$ сделало невозможным проведение измерений на больших высотах.

Таким образом, наличие согласованной высокоэффективной антенны является принципиальным требованием к ближнепольной радиометрической системе в отличие от аналогичных систем активной локации, обычно называемых ближнепольными микроскопами (см., например, [4]). Кроме вышеописанной антенны для измерений использовалась также стандартная контактная антенна с апертурой $D = 4$ см, разработанная для медико-биологических радиометрических исследований [5].

В качестве исследуемой среды была выбрана вода, поскольку ее комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2$, а следовательно и глубина скин-слоя $d = 1/\gamma$ ($\gamma = (4\pi/\lambda)\text{Im}\sqrt{\varepsilon}$ - коэффициент поглощения), могут быть вычислены с высокой точностью, например, по данным работы [6], если известны температура T и соленость S . Сильная зависимость толщины скин-слоя от солености позволяет проводить эксперименты, выбирая величину d в пределах от 1 мм до 10 см. Кроме того, в жидкости могут быть сравнительно легко выполнены контактные измерения глубинного профиля температуры $T(z)$. Для измерений в воде создавался устойчивый квазилинейный профиль $T(z)$ с помощью нагревателя вблизи поверхности и холодильника у дна цилиндрического сосуда. Градиент температуры в установившемся стационарном состоянии достигал $dT/dz \approx 2,5$ К/см. Измеряемым радиометром параметром служила эффективная температура принимаемого излучения исследуемой среды (антенная температура), которая заполняет полупространство $z \leq 0$:

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

то есть измеряемая антенная температура является некоторой средневзвешенной температурой среды. Ядро интегрального уравнения (1) нормировано и включает в себя две компоненты:

$$K(z) = \frac{K_1(z) + K_2(z)}{\int_{-\infty}^0 [K_1(z) + K_2(z)]dz}, \quad (2)$$

где K_1 представляет вклад волновой, а K_2 - квазистационарной компонент поля. Вид функций $K_{1,2}(z)$ для однородной по глубине диэлектрической проницаемости среды $\varepsilon(z) = \varepsilon = \text{const}$ приведен в [2]. Для однородно нагретой среды ($T(z) = T_0 = \text{const}$) в соответствии с (1), (2) независимо от вида ядра K имеем $T_a = T_0$. Если же распределение $T(z)$ неоднородно по глубине, то значение T_a как раз определяется интересующей нас величиной эффективной толщины слоя, формирующего принимаемое излучение, d_{eff} , которая выражается через K как

$$d_{\text{eff}} = \int_{-\infty}^0 zK(h, l, z)dz, \quad (3)$$

Волновая компонента излучения в свободном пространстве формируется плоскими неоднородными волнами, распространяющимися в некотором конусе под поверхностью поглощающей среды. Если ε удовлетворяет условиям $\varepsilon_1 \approx \varepsilon_2$, $|\varepsilon| \gg 1$ (как в рассматриваемом случае водной среды), то этот конус имеет малый угол при вершине относительно вертикали к поверхности. Тогда для волновой компоненты поля имеем $d_{\text{eff}} \approx d$. Волны, распространяющиеся в погло-

щающей среде пологими углами вне этого конуса, в свободном пространстве дают вклад только в ближнепольную компоненту принимаемого излучения, поэтому для этой компоненты $d_{\text{eff}} < d$. Таким образом, для принимаемого излучения, включающего обе компоненты поля, также будет выполнено условие $d_{\text{eff}} < d$, и d_{eff} является функцией $d_{\text{eff}}(h, D)$. В том случае, когда влияние ближнего поля на принимаемое излучение становится пренебрежимо, то есть с ростом высоты или размера антенны, ядро стремится к своему значению для волновой компоненты поля $K \approx \gamma \exp(z/d)$, и мы имеем $d_{\text{eff}} \rightarrow d$.

Для линейного профиля $T(z)$ в соответствии с принятым определением (3) получается простое точное выражение, которое и использовалось нами для определения величины d_{eff} по данным измерений T_a :

$$T_a = T(z = -d_{\text{eff}}) . \quad (4)$$

Температура T_a для каждого значения высоты h (или каждой из двух антенн различного размера D) измерялась с помощью двух калибровок по тепловому излучению идентичных сосудов с водой, однородно нагретой до температур T_1 и T_2 . При этом

$$T_a = T_1 + \frac{(n_a - n_1)}{(n_2 - n_1)} (T_2 - T_1) , \quad (5)$$

где n_a и $n_{1,2}$ отсчеты по регистрирующему прибору радиометра, соответствующие основному и калибровочному измерениям.

Эксперименты проводились при трех различных значениях солености воды $S = 0$; $1,8 \cdot 10^{-3}$; $5,0 \cdot 10^{-3}$ г/см³. Сильная зависимость d воды от солености позволяет проводить эксперименты, варьируя величину d в пределах от 1 мм до 10 см и моделируя тем самым условия в разнообразных средах. Результаты измерений зависимостей $d_{\text{eff}}(h)$ при $S = 1,8 \cdot 10^{-3}$ г/см³ для антенн с $D = 1$; 4 см вместе с результатами расчетов по теории [2] представлены на рис.1. Соответствие результатов расчетов и измерений оказалось наилучшим при этом значении параметра S , при котором толщина скин-слоя воды практически не зависит от температуры. По-видимому, в этом случае рассматривавшееся в [2] приближение диэлектрически однородной среды наилучшим образом описывает реальную ситуацию. При других значениях S температурная зависимость ϵ воды становится заметной. Однако и в этих случаях соответствие расчетов и эксперимента оказалось вполне удовлетворительным, если в теории излучения диэлектрически однородной среды полагать $\epsilon = \epsilon[T = T(z = -d_{\text{eff}})]$. Можно видеть, что данные измерений, представленные на рис.1, и результаты вычислений из (1) хорошо согласуются между собой, и предсказанные зависимости измеряемого в ближней зоне излучения от высоты и размера антенны действительно имеют место.

На рис.2 представлены вычисленная и измеренная зависимость d_{eff} от солености воды S в сравнении с толщиной скин-слоя d для случая контактных измерений с антенной размером $D = 1$ см. Наблюдаемое различие между d_{eff} и d (эффективная толщина примерно в два раза меньше толщины скин-слоя), которое оказалось весьма близко к предсказываемому теорией, наглядно демонстрирует эффект ближнего поля поскольку, как уже отмечалось, для уходящей волновой компоненты поля $d_{\text{eff}} = d$.

Таким образом, результаты, представленные на рис.1,2 позволяют сделать вывод о том, что эффект ближнего поля в тепловом радиоизлучении среды впервые экспериментально обнаружен.

В заключение отметим, что перспективы развития данных исследований могут быть связаны с повышением чувствительности радиометрической системы в области высот $h > h_{\text{max}}$ (в данной работе $h_{\text{max}} = 2,5$ мм), а также при уменьшении размеров антенны (в области $D < 1$ см). С

этой целью необходимо обеспечить согласование антенны для каждой высоты, что не является принципиальной проблемой. Вместе с тем, уменьшение КПД с ростом h для электрически малых антенн неизбежно и связано с уменьшением влияния поглощающей среды на характеристики антенны, которое обеспечивало высокий КПД вблизи поверхности. А в свободном пространстве падение КПД при уменьшении D/λ является свойством электрически малых антенн и обусловлено влиянием омических потерь в согласующих цепях. Возможным решением данной проблемы представляется применение материалов с экстремально малыми омическими потерями, таких, как высокотемпературные сверхпроводники. Исследования эффективности использования этих материалов в задачах миниатюризации антенных устройств выполнены в [7-9]. Как показали наши предварительные расчеты, ближнепольные радиометрические измерения могут быть реализованы, по крайней мере, в интервале высот $0 \leq h \leq 0,1\lambda$ при размерах антенны $D/\lambda \geq 0,01$. В этом случае вариации эффективной глубины излучающего слоя составят $0,1d \leq d_{\text{eff}} \leq d$, и данный эффект может быть использован для разработки новых методов радиотепловой диагностики сред. В частности, могут быть реализованы предложенные в [2, 10] одноволновые методы определения подповерхностного профиля температуры $T(z)$ по измерениям зависимости антенной температуры T_a от размера и высоты антенны над поверхностью на основе решения интегрального уравнения (1). Эти методы имеют перспективы стать более простыми и дешевыми в реализации по сравнению с известными многочастотными методами [11-15].

Таким образом, в данной работе впервые экспериментально продемонстрировано присутствие ближнего электромагнитного поля в тепловом излучении поглощающей среды. Развитие ближнепольной радиометрии позволит создать новые методы диагностики сред.

Авторы признательны В.Л.Ваксу за помощь в работе.

Работа выполнена при поддержке Государственной научно-технической программы «Физика конденсированных сред», гос. контракт № 107-3 (00-П).

Литература

1. Рыгов С.М. Теория электрических флуктуаций и теплового излучения. М: АН СССР, 1953. 232с.
2. Резник А.Н. Квазистационарное поле теплового излучения в теории контактной радиотермометрии. //Изв. вузов. Радиофизика, 1991, т.34, N5, с.512-517.
3. В.И.Абрамов, А.Н.Резник. Миниатюризация вибраторной сверхпроводниковой антенны. // Изв. вузов. Радиофизика, 1999, т.42, N2, с.158-167.
4. E.A.Ash, G.Nicholls. //Super-resolution aperture scanning microscope, Nature, 1972, v.237, pp.510-512.
5. Троицкий В.С., Белов И.Ф., Горбачев В.П. и др. О возможностях использования собственного теплового СВЧ-радиоизлучения тела человека для измерения температуры его внутренних органов: результаты и перспективы // Успехи физических наук, 1981, т.134, вып.1, с.155.
6. L.A.Klein, C.T.Swift. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies. //IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1977, v.AP-25, N1, pp.104-111.
7. H.Chaloupka, N.Klein, M.Peiniger, H.Piel, A.Pischke, G.Splitt. Miniaturized, high-temperature superconductor microstrip patch antenna. //IEEE Trans. Microwave Theory Techn., 1991, v.39, N9, pp.1513-1521.
8. А.Ю.Климов, З.Ф.Красильник, А.Н.Резник, В.И.Абрамов, И.Ф.Белов, Б.Б.Тагунов. Миниатюрная высокотемпературная сверхпроводящая антенна СВЧ диапазона. //Сверхпроводимость: Физ., Хим., Техн., 1993, т.6, N11-12, сс.2150-2159.
9. В.И.Абрамов, А.Ю.Климов, А.Н.Резник, Б.Б.Тагунов. Электрически-малая полосковая антенна из высокотемпературного сверхпроводника. //Письма в ЖТФ, 1994, т.20, N19, сс.60-65.
10. К.Р.Gaikovich, A.N.Reznik. Near-field subsurface radiothermometry. 8-th International Conf. "Microwave and Telecommunication Technology" (Crimea, Ukraine, September 14-17, 1998, Sevastopol), Sevastopol: Veber Co., Conference Proceedings, v.2, pp.629-630.
11. F.Bardaty, D.Solimini. Radiometric sensing of biological layered media. //Radio Sci., 1983, v.18, No.6, p.1393-1401.
12. I.Leroy, V.Bocquet, A.Mamouni. Non-invasive microwave radiometry thermometry. //Physiol. Meas., 1998, v.19, pp.127-148.
13. К.П.Гайкович, А.Н.Резник, М.И.Сумин, Р.В.Троицкий. Определение профиля температуры поверхностного слоя воды по его радиоизлучению в СВЧ диапазоне. //Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, 1987, т.23, N7, сс.761-768.
14. К.П.Гайкович., М.И.Сумин, Р.В.Троицкий. Определение глубинного профиля температуры методом многочастотной радиотермографии в медицинских приложениях. //Изв. вузов. Радиофизика, 1988, т.31, N9, с.1104-1112.
15. К.П.Гайкович, А.Н.Резник., Р.В.Троицкий. Радиометрический метод определения подповерхностного профиля температуры и глубины промерзания грунта. //Изв. вузов. Радиофизика, 1989, т.33, N12, с.1467-1474.

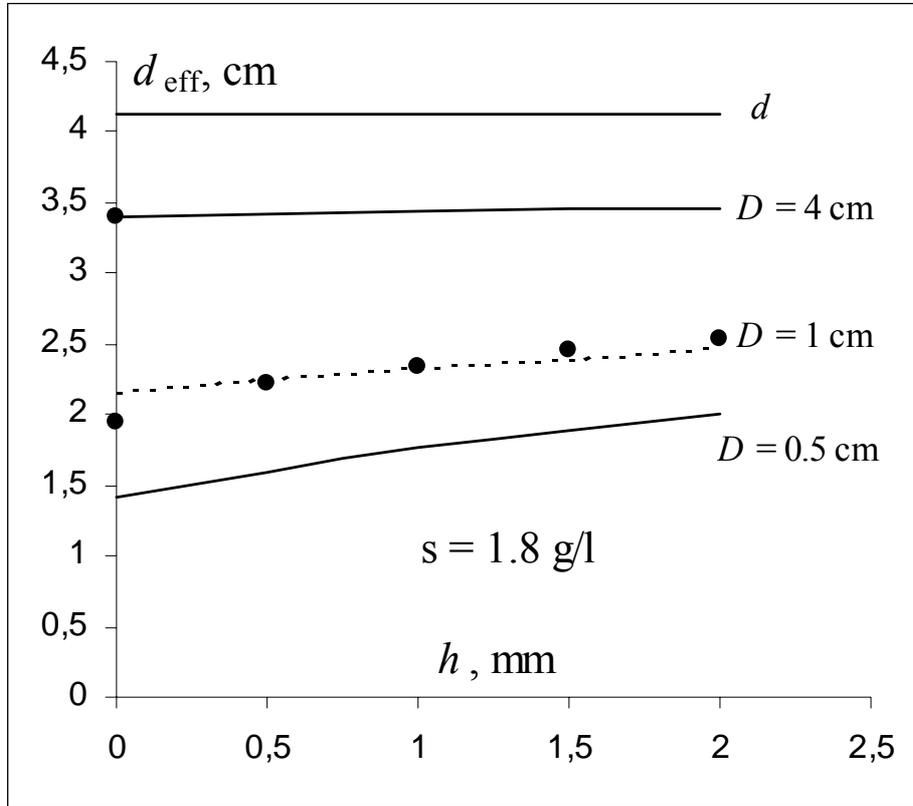


Рис.1. Эффективная толщина излучающего слоя как функция высоты антенны для различных значений размера апертуры. Кружки – измерения, сплошные линии – расчеты.

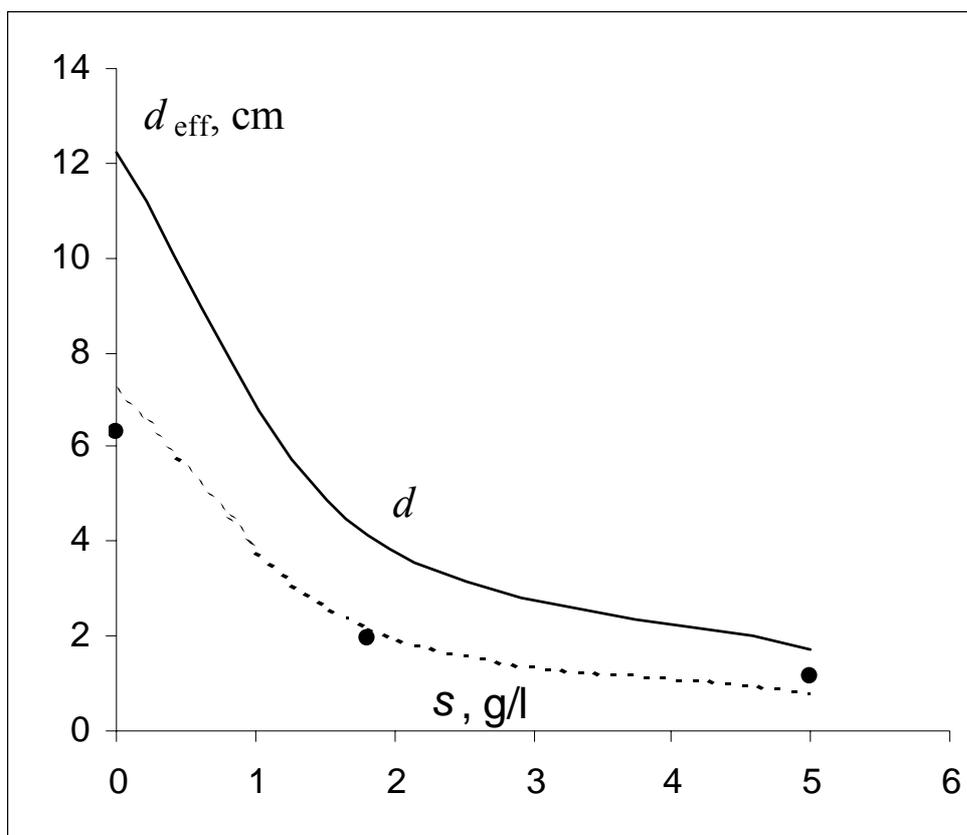


Рис.2. Экспериментальная (кружки) и теоретическая (пунктир) зависимость эффективной толщины формирования излучения от солёности воды. Сплошная кривая – вычисленная зависимость толщины скин-слоя.