

Нелинейная зависимость радиояркостной температуры воды от кинетической температуры в гигагерцовом диапазоне частот

С.Н. Гаврилин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: Экспериментально исследована зависимость радиояркостной температуры воды от кинетической температуры в интервале температур 50-90 градусов Цельсия в гигагерцовом диапазоне частот. Установлено, что изменение радиояркостной температуры водной поверхности носит нелинейный характер. Радиоконтраст в исследованном температурном интервале позволяет эффективно обнаруживать тепловые контрасты поверхностей гидрообъектов.

Ключевые слова: нелинейность, кинетическая температура, радиационная температура, вода, излучательная способность, радиоконтраст, гигагерцовый диапазон.

Вода, как ключевой элемент любой экологической системы, является предметом исследований. Одно из основных свойств воды - её способность излучать электромагнитные волны в широком частотном диапазоне. Особенностью собственного радиоизлучения воды является существенно-нелинейный характер зависимости изменения радиояркостной температуры от температуры кинетической. Выявление особенностей и закономерностей радиационно-температурной зависимости в различных диапазонах температур и частот собственного излучения важно с точки зрения точного решения физических задач, таких, как задача отражения [1] и поглощения [2] излучения водной поверхностью в зависимости от её параметров (диэлектрической проницаемости [3-4], температуры, солёности, взволнованности). Необходимость получения зависимости радиационной температуры воды от кинетической температуры обусловлена, в частности, поиском решения многочисленных прикладных задач путём выявления радиояркостных контрастов гидрообъектов [5-6].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование радиационно-температурной зависимости пресной воды на частоте

$f = 37,5 \text{ ГГц}$ в диапазоне температур $t^o = 50 \div 90^o \text{C}$.

Яркостная температура излучения водной поверхности определяется соотношением [7]:

$$T_{\text{я}}(f, t^o, \theta) = T_{\text{эфф}} [1 - R(f, t^o, \theta)] + R(f, t^o, \theta) T_A(\theta) \quad , \quad (1)$$

где

$$T_{\text{эфф}} = \int_0^{\infty} \gamma(f, t^o) T(z) \exp\left[-\int_0^z \gamma dz\right] dz \quad , \quad (2)$$

где

$R(f, t^o, \theta)$ - коэффициент отражения поверхности,

$\gamma(f, t^o)$ - коэффициент поглощения электромагнитного излучения в воде,

$T_A(\theta)$ - температура радиоизлучения атмосферы,

$T(z)$ - глубинный профиль температуры воды,

θ – угол к горизонту.

При изотермичности профиля по вертикали:

$$T(z) = T = \text{const},$$

эффективная температура

$$T_{\text{эфф}} = T,$$

и выражение (1) принимает вид:

$$T_{\text{я}}(f, t^o, \theta) = T [1 - R(f, t^o, \theta)] + R(f, t^o, \theta) T_A(\theta) \quad (3)$$

Под поверхностью воды образуется слой толщиной 1-4 мм, который называют температурной плёнкой [8]. В этом слое наблюдается перепад температур от температуры воздуха на границе атмосфера-вода до температуры воды, измеряемой в толще воды. Причем температура воды на поверхности определяется несколькими факторами, а именно: температурой воздуха, испаряемостью, теплотокном. Температурный профиль характеризует распределение температуры в поверхностной плёнке, а величина теплопереноса на границе раздела вода-воздух пропорциональна $\text{grad } T(z)$.

Тепловое радиоизлучение формируется в слое порядка толщины скин – слоя [9], в который проникает электромагнитное излучение, а его величина зависит от частоты волны f и температуры t^o :

$$\delta = \frac{1}{\gamma(f, t^o)} \quad (4)$$

Для поглощающей среды коэффициент поглощения:

$$\gamma(f, t^o) = \frac{4\pi f}{c} \text{Im } \varepsilon(f, t^o) \quad , \quad (5)$$

где

$\varepsilon(f, t^o)$ - диэлектрическая проницаемость среды.

Диэлектрическая проницаемость в форме уравнения Дебая имеет вид:

$$\varepsilon = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_\infty}{1 - i2\pi\tau f} + i \frac{\sigma}{2\pi\sigma_0 f} \quad ,$$

где

ε_0 - статическая диэлектрическая постоянная,

ε_∞ - высокочастотная диэлектрическая постоянная,

τ – время релаксации, сек.,

f - частота волны,

σ_0 - проницаемость свободного пространства,

σ - ионная проводимость,

c - скорость света в вакууме.

Толщина скин - слоя воды на частоте $f = 37,5 \text{ ГГц}$ составляет $\delta = 0,3 \text{ мм}$, поэтому радиоизлучение воды на частотах гигагерцового диапазона формируется в пределах температурной плёнки, имеющей толщину в несколько миллиметров при указанных условиях.

Как видно из (1-5) радиояркая температура является, в общем случае, функцией температуры среды. Даже при изотермическом профиле температуры радиояркая температура T_r изменяется не пропорционально кинетической температуре T . Эффективное преобразование кинетической температуры среды в радиояркую температуру характеризуется

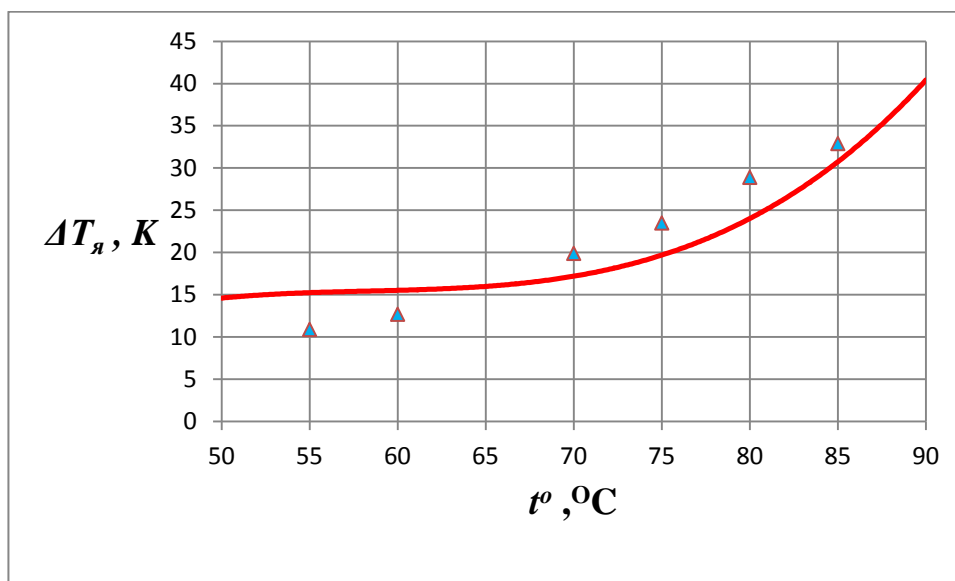
радиационно-температурной зависимостью и описывается производной $\frac{\partial T_{я}}{\partial T}$. Вычисление этой величины затруднено из-за недостаточной информации о профиле температуры $T(z)$ в поверхностном слое в натуральных условиях.

Расчет яркостной температуры проводился для пресной воды в предположении изотермического вертикального профиля температуры. Диэлектрическая проницаемость вычислялась по модели Стогрин [10].

Экспериментальное исследование температурно-радиационной зависимости выполнялось на частоте $f = 37,5 \text{ ГГц}$ с рупорной антенной, направленной в надир. В пенопластовую кювету наливалась горячая вода с температурой t° около 90°C . Измерения радиояркостной температуры велись в процессе остывания воды, температура которой контролировалась после тщательного перемешивания. Нулевой уровень, относительно которого отсчитывалось приращение яркостной температуры, фиксировался по яркостной температуре воды при температуре окружающего воздуха $t_{\text{воздуха}} = 24^{\circ}\text{C}$.

Флуктуационный порог приёмной аппаратуры (чувствительность), составлял $0,2 \text{ К}$, постоянная времени $\tau = 1 \text{ сек}$. Во время эксперимента регистрация сигнала осуществлялась по отношению к температуре калибровочного эталона. Запись сигнала проходила в течение одной минуты. Вычисленная случайная погрешность эксперимента составила $0,03 \text{ К}$. Оценка систематической погрешности составила $0,15 \text{ К}$, и определялась, прежде всего, погрешностью измерения температуры эталона. Интенсивность принимаемого излучения калибровалась по собственному излучению чёрного тела [11].

Результаты представлены на графике рис.1.



1. – График зависимости яркостной температуры $\Delta T_{\text{я}}$ от температуры воды t° (сплошная линия – теория, маркеры – эксперимент).

Как видно из графика, зависимость яркостной и кинетической температур воды является нелинейной. Заметное приращение радиоконтраста обнаруживается при температурах воды, начиная с $t^\circ = 50^\circ\text{C}$. Радиационно-температурная зависимость в интервале температур от 50°C до 85°C менялась, как:

$$0,4 < \frac{\partial T_{\text{я}}}{\partial T} < 1 \left[\frac{\text{градус K}}{\text{градус C}} \right]$$

Нелинейность радиояркостно-температурной зависимости воды может служить основой методик обнаружения пространственных неоднородностей температурных распределений.

Таким образом, возникают дополнительные возможности изучения [12], учёта [13-14] и использования нелинейных проявлений в различных средах [15].

Радиояркостная температура измерялась в условиях стабильной атмосферы (ясное небо), температура воздуха за время эксперимента была $t_{\text{воздуха}} = 24^\circ\text{C}$.

Расхождение теоретических данных с данными эксперимента, по-видимому, является следствием предположения об изотермическом профиле $T(z)$ по вертикали, при котором не учитывается температурное распределение в поверхностной термической плёнке.

Таким образом, экспериментальные исследования радиационно-температурной зависимости для пресной воды в интервале температур 50-90 градусов Цельсия показали, что в этом диапазоне температур проявляется заметное приращение радиоконтраста (порядка 25 К).

Температурные контрасты исследуемого диапазона могут фиксироваться на водной поверхности на частотах гигагерцового диапазона с достаточной чувствительностью в широком интервале температур от 50 °С до 90°С, что продемонстрировано в проведённом эксперименте. Полученная зависимость яркостной температуры воды от кинетической температуры позволяет использовать нагретую и охлаждённую воду для создания тепловых эталонов на частотах гигагерцового диапазона, необходимых для антенных калибровок в натуральных условиях.

При наличии термальных вод или тепловых стоков [16], а также при наличии погружённых источников тепла, на водной поверхности могут образовываться радиоконтрасты.

Проведённые экспериментальные исследования демонстрируют возможность дистанционного обнаружения тепловых аномалий гидрообъектов [17] по радиояркостным контрастам на их поверхности в гигагерцовом диапазоне частот.

Литература

1. Ray P.S. Broadband complex refractive indices of ice and water // Applied Optics. 1972. V.11. pp. 1836-1844.

2. Cole K.S. Dispersion and absorption in dielectrics // J. Chem. Phys. 1941. V.9. pp. 341-351.
 3. Klein L. A., Swift C. T. An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave frequencies // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1977. V.25. pp. 104-110.
 4. Liebe H. J., Hufford G. A., Manabe T. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12(7). pp. 659–674.
 5. Гранков А.Г. Определение температуры поверхности океана методом спектрометрирования радиотеплового излучения в сантиметровом диапазоне // ЖТФ. 1990. N.60. №10. С. 114–120.
 6. Машков Ю.А. Дистанционное определение температур естественных поверхностей в инфракрасной области спектра // Инженерный вестник Дона. 2022. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7766.
 7. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Радиометрия температурной плёнки морской поверхности // Успехи современной радиоэлектроники. 2006. №11. С. 39-55.
 8. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Измерение отражательной способности и диэлектрической проницаемости воды в плёночном слое морской поверхности в миллиметровом диапазоне // Радиотехника и электроника. 2013. Т.58. №7 С. 660-668.
 9. Бубукин И.Т., Станкевич К.С. Дистанционная диагностика плёночного слоя морской поверхности в инфракрасном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2012. Т.57. №10. С. 1089-1098.
 10. Stogryn A. Equations for Calculating the Dielectric Constant of Saline Water // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1971. V.19 (8). pp. 733-736.
-

11. Dietlein Ch., Popović Z., Grossman E. Aqueous blackbody calibration source for millimeter-wave/terahertz metrology// Applied Optics. 2008. V.47. pp. 5604-5615.
12. Гаврилин С.Н. Бистабильность нелинейной циркулярно-поляризованной волны в антиферромагнетике, помещённом в магнитное поле. Нелинейные волны – 2022 (XX научная школа). Тезисы докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2022. С.63-64. URL: nonlinearwaves.ipfran.ru/images/NW-2022.pdf
13. Вукович С., Гаврилин С. Н., Никитов С. А. Нелинейные электромагнитные волны в антиферромагнитной пластине, помещенной во внешнее магнитное поле // ЖЭТФ. 1990. Т.98.№5. С. 1718 - 1725.
14. Вукович С., Гаврилин С. Н., Никитов С. А. Бистабильность электромагнитных волн в легкоосном антиферромагнетике, помещенном в постоянное магнитное поле // ФТТ. 1992. Т.34.№11. С. 3412–3416.
15. Менян Ш., Кожанова Е.Р., Мельников В.М. Гибридные космические электростанции с лазерным излучением в качестве элементов энергетической системы. // Инженерный вестник Дона. 2022. №6. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7768.
16. Гаврилин С.Н. Радиационно-температурная зависимость воды на миллиметровых длинах волн. // Инженерный вестник Дона. 2023. №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8145.
17. Salmon N. Outdoor Passive Millimeter-Wave Imaging: Phenomenology and Scene Simulation // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V. 66(2). pp. 897-908.

References

1. Ray P.S. Applied Optics. 1972. V.11. pp.1836-1844.
 2. Cole K.S. J. Chem. Phys. 1941. V.9. pp.341-351.
-



3. Klein L. A., Swift C. T. 1977. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. V.25. pp. 104-110.
 4. Liebe H. J., Hufford G. A., Manabe T. International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 1991. V. 12(7). pp. 659–674.
 5. Grankov A.G. ZhTF. 1990. V. 60(10). pp. 114-120.
 6. Mashkov Yu.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7766.
 7. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Uspekhi sovremennoj radioelektroniki. 2006. V.11. pp. 39-55.
 8. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Radiotekhnika i elektronika. 2013. V. 58(7). pp. 660-668.
 9. Bubukin I.T., Stankevich K.S. Radiotekhnika i elektronika. 2012. V. 57(10). pp. 1089-1098.
 10. Stogryn A. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1971. V. 19(8). pp. 733-736.
 11. Dietlein Ch., Popović Z., Grossman E. Appl. Opt. 2008. V.47. pp. 5604-5615.
 12. Gavrilin S.N. Nelinejnye volny – 2022 (HKH nauchnaya shkola). Tezisy dokladov. Nizhny Novgorod, 2022, pp.63-64. URL: nonlinearwaves.ipfran.ru/images/NW-2022.pdf
 13. Vukovich S., Gavrilin S. N., Nikitov S. A. Sov. Phys. JETP. 1990. V. 71(5). pp. 964 – 968.
 14. Vukovic S., Gavrilin S. N., Nikitov S. A. FTT. 1992. V. 34(11). pp. 3412-3416.
 15. Maignan Sch., Kozhanova E.R., Melnikov V.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №6 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n6y2022/7768.
 16. Gavrilin S.N. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2023/8145.
-



17. Salmon N. IEEE IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. V. 66(2). pp. 897-908.

