

09; 12

© 1990 г.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ ОКЕАНА МЕТОДОМ СПЕКТРОМЕТРИРОВАНИЯ РАДИОТЕПЛОвого ИЗЛУЧЕНИЯ В САНТИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А. Г. Гранков

Теоретически обоснована возможность использования в качестве количественной меры температуры поверхности океана положение максимума спектральной зависимости чувствительности поля собственного излучения к вариациям температуры. Предложены методы измерений спектрального максимума и развита методика определения температуры поверхности океана в участке спектра 3—8 см. Результаты расчетов подтверждаются моделированием в контролируемых лабораторных условиях.

### Введение

Для определения температуры поверхности океана (ТПО) в настоящее время широко используются дистанционные СВЧ радиометрические методы, основанные на взаимосвязи ТПО либо ее вариаций с интенсивностью собственного радиотеплового излучения водной поверхности (радиационными контрастами) в сантиметровом диапазоне радиоволн [1]. Контрастный (аплитудный) принцип измерения СВЧ радиационных характеристик, положенный в основу этих методов, обуславливает ряд недостатков и ограничений: а) необходимая для океанологов точность определения ТПО либо ее вариаций достигается лишь при условии комплексирования дистанционных измерений данными синхронных контактных измерений ТПО и других геофизических параметров [2]; б) при наблюдении с ИСЗ оценки ТПО критичны к вариациям параметров антенно-фидерного тракта, связанных с периодическими перемещениями носителя с ночной стороны Земли на дневную либо наоборот.

В настоящей работе предложен метод измерений СВЧ радиационных характеристик и развита методика, обеспечивающая определение ТПО без привлечения контактных данных. Методика позволяет также по сравнению с известными методиками ослабить влияние температурной нестабильности приемного тракта на точность оценок ТПО.

### Описание метода

Предлагается в качестве количественной характеристики ТПО использовать вместо интенсивности радиоизлучения положение максимума спектральной зависимости чувствительности поля к вариациям ТПО. В основе такой посылки лежат следующие особенности взаимосвязи СВЧ радиационных характеристик с ТПО: а) чувствительность поля излучения к вариациям ТПО  $q^T = (\partial T^a) / (\partial T)$  в сантиметровом диапазоне с увеличением длины волны  $\lambda$  вначале монотонно растет, а затем убывает [2, 3]; таким образом, у спектральной зависимости  $q^T(\lambda)$  в сантиметровом диапазоне существует максимум (рис. 1); б) в силу нелинейности радиационно-температурной зависимости ТПО влияет на форму спектра  $q^T(\lambda)$ , в частности, величина ТПО определяет положение максимума, т. е. длину волны  $\lambda_m$ , соответствующую максимуму чувствительности.

Из рис. 2 видно, что при вариациях ТПО в пределах естественной изменчивости Мирового океана от 0 до 30 °С параметр  $\lambda_m$  меняется соответственно от 8.5 до 3.5 см.

### Обоснование выбора параметра $\lambda_m$ для определения ТПО

Величина ТПО определяет форму спектральной зависимости  $q^T(\lambda)$ , таким образом, можно говорить о взаимодвухзначном соответствии ТПО с целым рядом характеристик спектра, таких как положение максимума  $\lambda_m$  и его величина  $q_m$ , величина и знак крутизны ( $dq/d\lambda$ ) в заданном интервале длин волн и др.

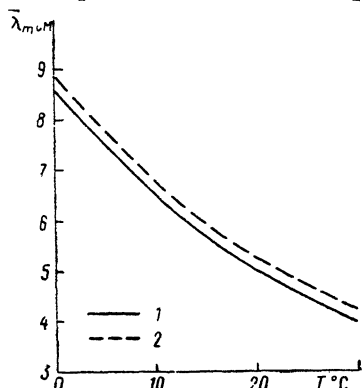
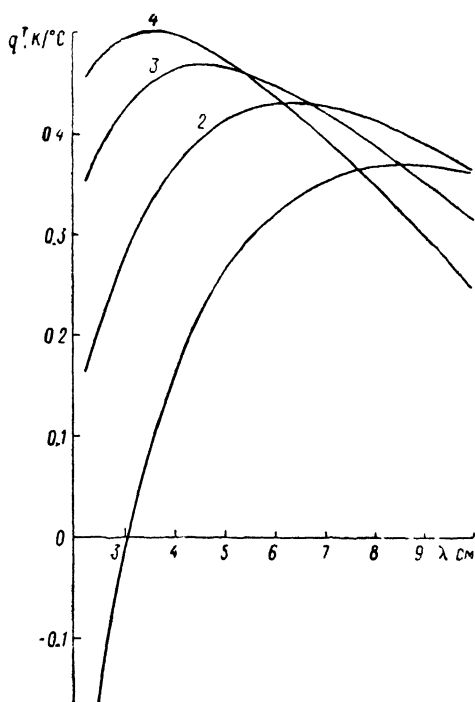


Рис. 2. Зависимость параметра  $\lambda_m$  от ТПО.

1 —  $S=38$ , 2 — 33 ‰.

←

Рис. 1. Спектральные зависимости чувствительности поля излучения к вариациям ТПО в сантиметровом диапазоне при различных значениях ТПО.  
 $T$ , °С: 1 — 0, 2 — 10, 3 — 20, 4 — 30.

Расчетным путем установлено, что семейство спектральных зависимостей чувствительности поля излучения к вариациям температуры спокойной морской поверхности при значении солёности  $S=35$  ‰ (данное значение близко к среднеокеаническому  $S_{cp}=35.7$  ‰) в интервале изменения ТПО от 0 до 30 °С описывается с точностью 5—10 % уравнением 2-го порядка

$$q - q_m = -c(\lambda - \lambda_m)^2. \quad (1)$$

Параметры уравнения (1)  $c$ ,  $q_m$ ,  $\lambda_m$  зависят от параметра  $T$ ; эту зависимость для ряда значений  $T$  иллюстрирует табл. 1.

В результате нормировки соотношения (1) в интервале длин волн  $\lambda_1 - \lambda_2$  число аппроксимирующих параметров сокращается с трех до одного; норми-

Таблица 1

$T$ , °С	$c$ , К/°С · см <sup>2</sup>	$q_m$ , К/°С	$\lambda_m$ , см
0	$10^{-2}$	0.37	8.5
10	$7.3 \times 10^{-3}$	0.43	6.75
20	$4.4 \times 10^{-3}$	0.47	5.25
30	$2.6 \times 10^{-3}$	0.50	3.75

рованный спектр  $\gamma(\lambda) = (q(\lambda) - q(\lambda_1)) / (q(\lambda_2) - q(\lambda_1))$  полностью определяется параметром  $\lambda_m$

$$\gamma(\lambda) = \frac{(\lambda_m - \lambda)^2 - (\lambda_m - \lambda_1)^2}{(\lambda_m - \lambda_2)^2 - (\lambda_m - \lambda_1)^2}. \quad (2)$$

Таким образом, взаимосвязь формы спектра  $\gamma(\lambda)$  в интервале длин волн 3—8 см с температурой спокойной морской поверхности реализуется через параметр  $\lambda_m$ , т. е. в виде следующего функционального соотношения:

$$\text{ТПО} \rightarrow \gamma(\lambda) \rightarrow \lambda_m. \quad (3)$$

Этот вывод обосновывает возможность использования параметра  $\lambda_m$  для дистанционного определения ТПО.

### Устойчивость зависимости $\lambda_m$ (Т) в естественных условиях

Анализ излучательных и диэлектрических характеристик морской воды показывает, что температурная зависимость параметра  $\lambda_m$  обусловлена в сантиметровом диапазоне сильной зависимостью от температуры одного из дебаевских параметров — длины волны релаксации  $\lambda_S$  и является следствием дипольно-релаксационной поляризации молекул воды на сверхвысоких частотах. В различных источниках приводятся сильно различающиеся значения  $\lambda_S$ ; при прочих равных условиях (температура и соленость морской воды, длина волны измерений) разброс параметра  $\lambda_S$  составляет в зависимости от температуры 15—45 % [1, 4]. Расчет искомой зависимости  $\lambda_m(T)$  выполнен с помощью развитой в [5] модели взаимосвязи электрических параметров морской воды с температурой  $T$  и соленостью  $S$ , обеспечивающей при  $0 \leq T \leq 30$  °С,  $0 \leq S \leq 40$  ‰ хорошее согласие теоретических оценок параметра  $\lambda_S$  и других дебаевских параметров с данными диэлектрических измерений. Результаты расчетов величины  $\lambda_m$  при различных значениях параметров  $T$  и  $S$  в интервале их естественной изменчивости ( $0 \leq T \leq 30$ °,  $33 \leq S \leq 38$  ‰) представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что температурный фактор является определяющим. Увеличение (уменьшение) солености приводит к незначительному смещению температурной зависимости параметра  $\lambda_m$ , причем определяемые с помощью смещенной кривой  $\lambda_m(T)$  кажущиеся значения ТПО являются ниже (выше) истинных. Согласно рис. 2, в условиях экстремальной изменчивости солености Мирового океана различие между кажущимися и истинными значениями ТПО может достигать 1—1,5 °С. В стандартных ситуациях пространственные вариации солености на подспутниковых трассах не превышают 0,5—1 %, а соответствующая погрешность определения ТПО — 0,1—0,3 °С.

Получены оценки влияния волнения на радиационно-температурное соотношение (3) в сантиметровом диапазоне. Установлено, что положение спектрального максимума взволнованной водной поверхности определяется величиной ТПО, интенсивностью крупно- и мелко масштабных составляющих волнения, относительной площадью и толщиной пенного покрова. Согласно результатам расчетов, влияние состояния водной поверхности на радиационно-температурную зависимость  $\lambda_m(T)$  в сантиметровом диапазоне проявляется наиболее сильно при скорости ветра  $V \geq 7$  м/с (интенсивность волнения более 4 баллов), т. е. при наличии пенообразований.

Несмотря на сравнительно слабое поглощение радиоволн сантиметрового диапазона в атмосфере, вариации ее характеристик, прежде всего влагозапаса облаков, оказывают существенное влияние на радиационно-температурную зависимость (3). Расчеты показывают, что при  $T=0$  умеренная облачность с интегральным влагозапасом 0,1—0,2 кг/м<sup>2</sup> (балльность 3—4 единицы по 10-балльной шкале) обуславливает смещение оценки параметра  $\lambda_m$  на 1—2 см, причем кажущиеся значения ТПО выше истинных.

### Пути реализации СВЧ спектрометрического метода определения ТПО

Исходными данными для определения ТПО являются спектральные зависимости антенной температуры  $T^A(\lambda)$ , измеряемые периодически с ИСЗ (для определенности — орбитального типа) с помощью плавно перестраиваемого

в интервале длин волн  $\Lambda = \lambda_1 - \lambda_2$  радиометра. Периодичность измерений  $\Delta t$  определяется, с одной стороны, степенью пространственной изменчивости температурных полей в океане, с другой — требуемым временем накопления сигналов в оконечных устройствах радиометра. Для определения ТПО проводится сравнение спектральных зависимостей антенной температуры на различных участках подспутниковой трассы. Если в сравниваемых участках волнение и облачность отсутствуют либо имеют одинаковую интенсивность (балльность), то разность соответствующих измерений  $\Delta T^A(\lambda)$  пропорциональна чувствительности поля излучения к ТПО

$$\Delta T^A(\lambda) = P \cdot \Delta T \cdot q^r(\lambda), \quad (4)$$

а коэффициентами пропорциональности служат разность ТПО  $\Delta T$  в этих участках и аппаратная функция  $P$  антенно-фидерного тракта. Соотношение (4) учитывает, что при проведении измерений с орбитальных ИСЗ вариации ТПО  $\Delta T$ , обеспечивающие надежную фиксацию контраста  $\Delta T^A(\lambda)$  ( $\Delta T = 0.5 - 1^\circ\text{C}$ ), наблюдаются за сравнительно небольшой промежуток времени ( $\Delta t = 10 - 20$  с), в течение которого аппаратную функцию прибора можно считать неизменной (постоянная времени вариаций  $P$ , обусловленных тепловой инерционностью характеристик антенно-фидерного тракта в открытом космосе, составляет единицы и десятки минут).

В отсутствие шумов и сильной частотной дисперсии аппаратной функции  $P$  положение максимума измеряемого сигнала  $\Delta T^A(\lambda)$ , согласно соотношению (4), совпадает с положением максимума спектральной зависимости  $q^r(\lambda)$  и, следовательно, однозначно характеризует величину ТПО. Однако влияние погрешностей измерений антенной температуры  $\xi$ , обусловленных аппаратными шумами, на точность определения параметра  $\lambda_m$  с помощью методики, предложенной в [6]. Анализ устойчивости параметра  $\lambda_m$  к погрешностям измерений основан на замене функции  $\bar{F}(\lambda) = \Delta T^A(\lambda, \lambda_m) + \xi(\lambda)$  функцией  $F(\lambda) = \Delta T^A(\lambda, \lambda_m + \delta\lambda_m)$  в интервале длин волн  $\Lambda = (\lambda_1 - \lambda_2)$ . Сущность такой замены состоит в том, что результат действия шумов  $\xi$  проявляется в виде паразитного изменения  $\delta\lambda_m$  искомого параметра  $\lambda_m$ . Нетрудно показать, что при условии малости шумов справедлива следующая оценка:

$$\delta\lambda_m = \int \xi \frac{\partial F}{\partial \lambda_m} / \int \left( \frac{\partial F}{\partial \lambda_m} \right)^2 d\lambda,$$

которая с учетом соотношений (4) и (1) принимает вид

$$\delta\lambda_m = -\frac{3}{2} \frac{1}{P\Delta T c \Delta^3} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \xi(\lambda) (\lambda - \lambda_m) d\lambda. \quad (5)$$

Средний квадрат погрешности  $\delta\lambda_m$  определяется дисперсией величины  $\xi(\lambda)$  и ее корреляционной функцией; при условии, что среднее значение  $\xi(\lambda)$  равно нулю, а ее корреляционный интервал  $\Lambda_\xi$  мал по сравнению с  $\Lambda$ , имеет место приближенная оценка

$$\sigma(\lambda_m) \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_\xi}{P\Delta T c \Lambda} \sqrt{\Lambda_\xi / \Lambda}. \quad (6)$$

Согласно оценке (6), при ориентировочных значениях исходных параметров  $\sigma_\xi = \sigma_\xi / P\Delta T = 0.01 - 0.02$  К/°С (флюктуационная погрешность измерений вариаций ЯТ при времени накопления 10—20 с),  $\Lambda_\xi = 3 \times 10^{10} \times (\Delta f) / f^2 = 0.05 - 0.2$  см (в диапазоне частот  $f = 7.5 - 4$  ГГц),  $\Lambda = 3.5$  см и ширине полосы пропускания входной части радиометра  $\Delta f = 50$  МГц<sup>1</sup> реализуется точность измерений параметра  $\lambda_m \sigma(\lambda_m) = 0.05 - 0.35$  см. Соответствующая величина погрешности определения ТПО рассчитывается с помощью зависимости  $\lambda_m(T)$ , приведенной на рис. 2,  $\sigma_T = 0.25 - 3.5^\circ\text{C}$ .

<sup>1</sup> Соответствует, за исключением параметра  $\sigma_\xi$ , параметрам серийно выпускаемого прибора (измерителя параметров антенн) ПК7-19.

Приведенные оценки точности могут быть реализованы с помощью известных методов фиксации временного положения импульсных сигналов [7]. Например, положение максимума  $\lambda_m$  может быть определено с точностью, характеризуемой формулой (6), по положению фронтов импульса  $\Delta T^A(\lambda)$ .

Теоретический анализ показывает, что использование принципа оптимальной фильтрации обеспечивает более высокую точность измерений параметра  $\lambda_m$ . Дисперсия оценки параметра  $\lambda_m$  на выходе фильтра, согласно [8],

$$\sigma^2(\lambda_m) = -1/r''(\lambda_m), \quad (7)$$

где

$$r(\lambda) = \frac{1}{\sigma_\xi^2 \Delta_\xi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Delta T^A(\nu, \lambda_m) \Delta T^A(\nu, \lambda) d\nu \quad (8)$$

— автокорреляционная функция сигнала на входе фильтра, нормированная на спектральную плотность шумов.

Т а б л и ц а 2

Точность измерений $\sigma(\lambda_m)$ , см	
фиксация положения импульса $\Delta T^A(\lambda)$	оптимальная фильтрация импульса $\Delta T^A(\lambda)$
0.05—0.1 ( $T=0$ ) 0.2—0.4 ( $T=30$ °C)	0.02—0.04 ( $T=0$ ) 0.03—0.06 ( $T=30$ °C)

После подстановки (4) и (4) в (8) и (7) приходим к оценке потенциальной точности измерений  $\lambda_m$

$$\sigma(\lambda_m) = \frac{\sigma_\xi}{2\sqrt{c} \sqrt{q_m + \frac{1}{3} c \Lambda^2}} \sqrt{\Lambda_\xi / \Lambda}. \quad (9)$$

Из выражения (9) следует, что при  $q_m \ll (1/3)c\Lambda^2$

$$\sigma(\lambda_m) = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma'_\xi}{c\Lambda} \sqrt{\Lambda_\xi / \Lambda}, \quad (9a)$$

а при  $q_m \gg (1/3)c\Lambda^2$

$$\sigma(\lambda_m) = \frac{\sigma'_\xi}{\sqrt{2cq_m}} \sqrt{\Lambda_\xi / \Lambda}. \quad (9б)$$

Приближение (9a) совпадает с соотношением (6), в этом случае использование оптимального фильтра не дает преимуществ по сравнению с простым методом фиксации по положению фронтов импульса  $\Delta T^A(\lambda)$ . В табл. 2 приведены значения  $\sigma(\lambda_m)$ , рассчитанные для обоих методов ( $\sigma'_\xi = 0.01—0.02$  K/°C,  $\Lambda = 3.5$  см,  $\Delta f = 50$  МГц).

### Апробация метода в лабораторных условиях

Выполнены лабораторные измерения спектральных зависимостей излучения спокойной водной поверхности в диапазоне волн 5—7.5 см в интервале изменения температуры от 11 до 23 °C при фиксированном значении солености воды  $S = 35$  ‰, получены экспериментальные зависимости  $\lambda_m(T)$ .

В качестве СВЧ радиометра-спектрометра использован измеритель параметров антенн ПК7-19 с флюктуационной чувствительностью 1—1.5 K/c, обеспечивающий плавную перестройку частоты от 3.9 до 6.0 ГГц. Приемный датчик — широкополосная лабораторная антенна П6-23. Нижний температурный предел (11 °C) достигается в измерениях путем охлаждения воды с помощью жидкого азота, верхний (22—24 °C) — ее нагревом посредством электронагре-

вателя. Контроль температуры водной поверхности с точностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  осуществляется ртутными термометрами. Линейные размеры кюветы с водой в 10—15 раз превышают длину электромагнитной волны, что практически исключает влияние трудноучитываемых дифракционных эффектов на результаты измерений.

Исследована возможность использования параметра  $\lambda_m$  для разделения (различения) спектральных характеристик собственного радиотеплового излучения водной поверхности при изменении температуры с дискретностью  $2^\circ\text{C}$  в интервале 11— $23^\circ\text{C}$ . Измерения выполнены с трехкратной повторностью. На рис. 3 приведены экспериментальная и расчетная зависимости параметра  $\lambda_m$  от температуры водной поверхности. Из него следует, что прибор ПК7-19 обеспечивает надежное различение двухградусных градаций температуры водной поверхности, а экспериментально полученная зависимость  $\lambda_m(T)$  в данном интервале изменения параметра  $T$  хорошо согласуется с расчетной. Некоторое

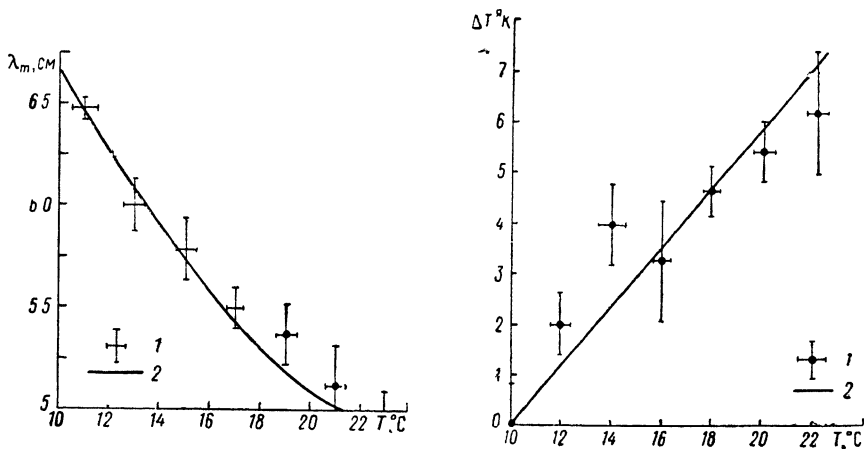


Рис. 3. Зависимость параметра  $\lambda_m$  от температуры водной поверхности ( $S=35\%$ ).  
1 — эксперимент, 2 — расчет.

Рис. 4. Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости яркостного контраста на частоте 4.5 ГГц ( $\lambda=6.67$  см) от температуры водной поверхности.

расхождение расчетной и экспериментальной зависимостей в интервале изменения  $T$  от 18 до 22— $23^\circ\text{C}$  можно отнести за счет неравномерности (частотной дисперсии) коэффициента передачи антенно-фидерного и радиометрического трактов.

Выполнено сопоставление рассматриваемой методики определения температуры с известной методикой определения температурных вариаций по величине яркостного контраста. В обоих случаях использованы данные одних и тех же измерений. На рис. 4 приведен результат обработки измерений с помощью второй методики — зависимость яркостного контраста от температуры водной поверхности в участке спектра, соответствующем наибольшей чувствительности поля излучения к вариациям  $T$ . Видно, что экспериментальная радиационно-температурная зависимость заметно отличается от соответствующей расчетной. Такой результат обусловлен тепловым дрейфом «нуля» и коэффициента усиления радиометра: например, «уход» температуры антенно-фидерного тракта составил  $0.7\text{—}1^\circ\text{C}$  на час работы.

### Заключение

Результаты расчетов и данных лабораторных измерений подтверждают возможность определения ТПО по положению максимума спектральной зависимости чувствительности поля собственного радиоизлучения в диапазоне 3—8 см к вариациям ТПО. По сравнению с известными СВЧ радиометрическими методами дистанционного определения ТПО данный метод обеспечивает сле-

дующие преимущества: возможность калибровки дистанционных измерений в терминах абсолютных значений ТПО без привлечения контактных данных о величине ТПО и других геофизических параметров в реперных областях океана; устойчивость дистанционных оценок ТПО к неконтролируемым вариациям аппаратной функции прибора, обусловленным температурно-временной нестабильностью характеристик антенны и антенно-фидерного тракта в открытом космосе.

Учет критичности оценок ТПО к метеоусловиям и состоянию морской поверхности, вопросы аппаратурной реализации метода являются темой отдельного исследования.

#### Список литературы

- [1] Шутко А. М. СВЧ радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука, 1986. 192 с.
- [2] Гранков А. Г., Шутко А. М. Препринты ИРЭ АН СССР. № 3 (286), 7 (290), 17 (300). М., 1980.
- [3] Переслегин С. В. // Изв. АН СССР. Сер. физ. атм. и океана. 1967. Т. 3. № 1. С. 47—57.
- [4] Shutko A. M., Liberman B. M., Chukhrai G. I. // IEEE J. Oceanic Eng. 1982. Vol. OE-7. P. 35—41.
- [5] Klein L. A., Swift C. T. // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1977. Vol. AP-25. P. 104—110.
- [6] Харкевич А. А. Избранные труды. Т. 3. Теория информации. Опознавание образов. М.: Наука, 1973. 524 с.
- [7] Митяшев Б. Н. Определение временного положения импульсов при наличии помех. М.: Сов. радио, 1962. 200 с.
- [8] Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966. 678 с.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР  
· Фрязинская часть

Поступило в Редакцию  
26 июля 1989 г.

В окончательной редакции  
14 ноября 1989 г.