

# Радиостроение

Научно-практический журнал

<http://www.radiovega.su>

Ссылка на статью:

// Радиостроение. 2017. № 04. С. 28–36

DOI: 10.24108/rdeng.0417.00000104

Представлена в редакцию: 26.06.2017

© НП «НЕИКОН»

УДК 621.3

## Чувствительность поляризационного отношения к изменениям температуры морской поверхности при зондировании в СВЧ диапазоне

Запевалов А.С.<sup>1,\*</sup>, Ожиганова М.И.<sup>2</sup>,  
Шумейко И.П.<sup>2</sup>

\* [sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

<sup>1</sup>Морской гидрофизический институт РАН,  
Севастополь, Россия

<sup>2</sup>Севастопольский государственный университет,  
Севастополь, Россия

---

Анализируется влияние физико-химических характеристик морской воды на формирование сигнала радиолокатора, работающего в СВЧ диапазоне. Анализ проводится для углов падения, при которых регистрируемый сигнал определяет резонансный механизм рассеяния радиоволн шероховатой поверхностью. Показано, что изменения солёности в тех пределах, которые наблюдаются в Мировом океане, практически не влияют на поляризационное отношение. Поляризационное отношение слабо зависит от температуры при зондировании морской поверхности в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн. При зондировании в миллиметровом диапазоне эффект значителен и зависит от угла падения. Если зондирование проводится при угле падения  $75^\circ$ , относительное изменение поляризационного отношения может достигать 10 % при изменении температуры на  $5^\circ$ .

**Ключевые слова:** поляризационное отношение; СВЧ диапазон; морская поверхность; температура; солёность

---

### 1. Введение

В настоящее время определение температуры и солёности с борта самолетов и космических аппаратов осуществляется с помощью СВЧ радиометров. Выходные сигналы СВЧ радиометров пропорциональны излучательной способности морской поверхности, которая, в частности, зависит от электрофизических параметров морской воды. Излучательная способность морской поверхности мала, поэтому СВЧ радиометры имеют относительно невысокую разрешающую способность [1].

Вследствие изменения температуры и солёности морской воды происходит изменение ее относительной диалектической проницаемости [2]. При активном радиозондирова-

нии в условиях, когда регистрируемый сигнал, определяет резонансный механизм рассеяния, изменения физико-химических характеристик среды под границей океан-атмосфера приводят к изменению уровня рассеянного радиосигнала [3, 4], что в принципе позволяет решать обратную задачу, определять физико-химические характеристики морской воды. Однако, указанный эффект выражен очень слабо, по сравнению с изменениями, обусловленными вариациями уровня шероховатости морской поверхности [5, 6].

Чтобы исключить влияние вариаций уровня шероховатости при определении температуры или солености морской воды, можно использовать поляризационное отношение [7]. В первом приближении, когда изменениями локального наклона морской поверхности можно пренебречь, поляризационное отношение определяется одним параметром – относительной диэлектрической проницаемостью морской воды [8]. В настоящей работе исследуется чувствительность поляризационного отношения к изменениям температуры и солености морской поверхности при радиозондировании в СВЧ диапазоне.

## 2. Резонансное рассеяние

Резонансное рассеяние радиоволн создают поверхностные волны, бегущие вдоль направления зондирования в прямом или обратном направлении, у которых волновое число  $K_R$  связано с волновым числом радиоволн  $k$  и углом падения  $\theta$  соотношением

$$K_R = 2k \sin \theta. \quad (1)$$

В первом приближении сечение обратного рассеяния можно представить в форме

$$\sigma_{pp}^0(k, \theta, \alpha, \varepsilon) = 8 k^4 |G_{pp}(\theta, \varepsilon)|^2 \Xi(\vec{K}_R), \quad (2)$$

где  $p$  – вид поляризации, первый индекс соответствует поляризации излучаемого сигнала, второй – принимаемого;  $\alpha$  – азимутальный угол;  $|G_{pp}(\theta, \varepsilon)|^2$  – геометрический коэффициент, зависящий от вида поляризации излучаемого и принимаемого радиолокационного сигнала и от электрофизических параметров морской воды;  $\varepsilon$  – комплексная относительная диэлектрическая проницаемость морской воды;  $\Xi(\vec{K}_R)$  – спектр морской поверхности, соответствующий волновому вектору  $\vec{K}_R$  резонансной компоненты.

Если излучение и прием осуществляются на одной и той же поляризации, то при работе на вертикальной ( $V$ ) и горизонтальной ( $H$ ) поляризации функция  $G_{pp}(\theta)$  соответственно имеет вид [3]

$$G_{VV}(\theta, \varepsilon) = \cos^2 \theta \frac{(\varepsilon - 1)[\varepsilon(1 + \sin^2 \theta) - \sin^2 \theta]}{[\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}, \quad (3)$$

$$G_{HH}(\theta, \varepsilon) = \cos^2 \theta \frac{(\varepsilon - 1)}{[\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}]^2}. \quad (4)$$

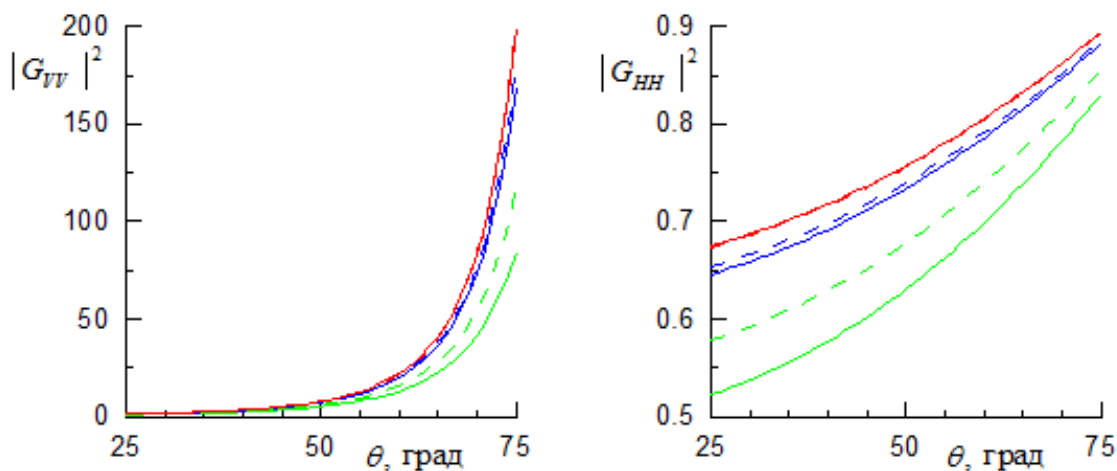
Относительная диалектическая проницаемость морской воды зависит от её температуры и солёности, а также от частоты (длины) зондирующей радиоволны. Для дальнейшего анализа воспользуемся предложенной в работе [2] моделью

$$\varepsilon(T, S, \nu) = \frac{\varepsilon_s(T, S) - \varepsilon_1(T, S)}{1 + i\nu/\nu_1(T, S)} + \frac{\varepsilon_1(T, S) - \varepsilon_\infty(T, S)}{1 + i\nu/\nu_2(T, S)} + \varepsilon_\infty(T, S) - i \frac{\sigma(T, S)}{2\pi\varepsilon_0\nu}, \quad (5)$$

где  $T$  – температура;  $S$  – солёность;  $\nu$  – частота радиоволны;  $\varepsilon_s(T, S)$  – статическая диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_1(T, S)$  – промежуточный диэлектрический параметр;  $\varepsilon_\infty(T, S)$  – «оптическая» диэлектрическая проницаемость;  $\nu_1(T, S)$ ,  $\nu_2(T, S)$  – первая и вторая частоты релаксации Дебая;  $\sigma(T, S)$  – электропроводность воды;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная.

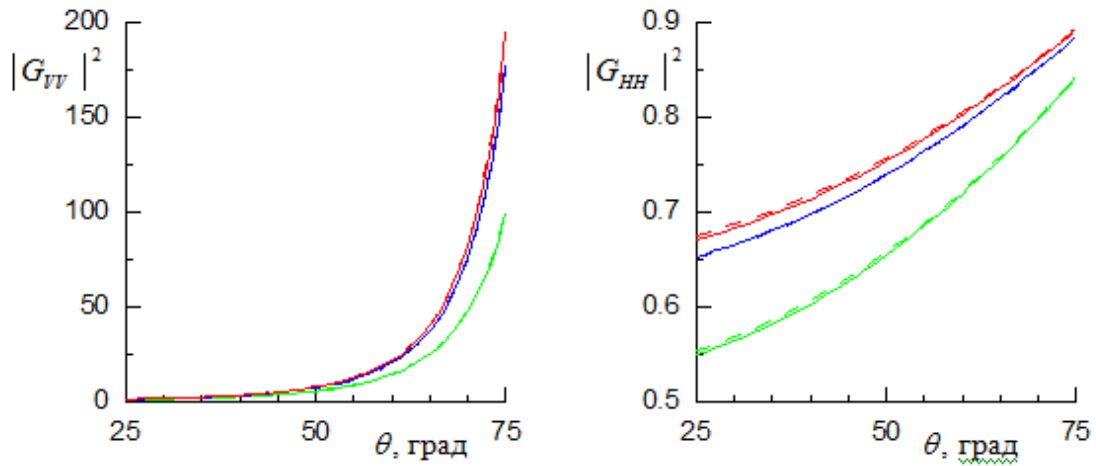
Изменения геометрического коэффициента в зависимости от угла падения при характерных значениях солёности и температуры представлены на рис. 1. В качестве характерного значения солёности выбрано значения солёности океанической воды 32 ‰. Для температуры выбраны значения 1° и 20°.

Как видно из рис. 1 чувствительность геометрического коэффициента (а соответственно и сечения обратного рассеяния) к изменениям температуры морской воды растёт с уменьшением длины радиоволны. На горизонтальной поляризации чувствительность выше, чем на вертикальной.



**Рис. 1.** Зависимости геометрического коэффициента  $|G_{pp}|^2$  от угла падения  $\theta$ : кривые зеленого, синего и красного цвета соответствуют длинам радиоволн 0.8, 3 и 10 см; сплошные кривые соответствуют температуре 1°, штриховые – 20°

Аналогичные расчеты, при двух значениях солёности 1 ‰ и 32 ‰ и температуре 15° показали, что чувствительность геометрического коэффициента к изменениям солёности ниже, чем к изменениям температуры. Был рассмотрен диапазон изменения солёности от распреснённой воды до океанической. Результаты расчетов представлены на рис. 2. Значения коэффициента  $G_{VV}(\theta)$  при двух значениях солёности практически совпадают.



**Рис. 2.** Зависимости геометрического коэффициента  $|G_{pp}|^2$  от угла падения  $\theta$ : кривые зеленого, синего и красного цвета соответствуют длинам радиоволн 0.8, 3 и 10 см; сплошные кривые соответствуют солености 1 ‰, штриховые –32 ‰

### 3. Поляризационное отношение

Поляризационное отношение определяется отношением нормированных сечений обратного рассеяния на двух поляризациях

$$R = \frac{\sigma_{HH}^0(k, \theta, \alpha, \varepsilon)}{\sigma_{VV}^0(k, \theta, \alpha, \varepsilon)}. \quad (6)$$

Не трудно показать, что в случае, когда нормированное сечение обратного рассеяния описывается выражением (2), поляризационное отношение не зависит от уровня шероховатости поверхности и соответственно не зависит от азимутального угла  $\alpha$ .

$$R = \frac{|G_{HH}(\theta, \varepsilon)|^2}{|G_{VV}(\theta, \varepsilon)|^2} \quad (7)$$

Учитывая (5), поляризационное отношение можно представить как функцию четырех параметров,  $R = R(\theta, T, S, \nu)$ , или, поскольку частота  $\nu$  и длина  $\lambda$  радиоволны однозначно связаны между собой,  $R = R(\theta, T, S, \lambda)$ .

Расчеты будем проводить для диапазона углов падения  $25^\circ < \theta < 75^\circ$ . Выбор для углов  $\theta$  данного диапазона обусловлен следующим. Если зондирование морской поверхности осуществляется при углах падения  $\theta < 25^\circ$ , регистрируемый радиолокатором сигнал определяет не резонансное рассеяние, а другой физический механизм – квазизеркального отражения. При углах падения  $\theta > 75^\circ$  возникает затенение гребнями волн некоторых участков морской поверхности. В этом случае представление нормированного сечения обратного рассеяния в форме (1) становится некорректным.

Связь поляризационного отношения  $R$  с изменениями температуры и солености, показана на рис. 3. Расчеты выполнены для трех углов падения. Заметные изменения поляризационного отношения при изменении температуры имеют место, если зондирование морской поверхности осуществляется в миллиметровом диапазоне длин волн. Причем

чувствительность поляризационного отношения к изменениям температуры растет с ростом угла падения. Если зондирование ведется в сантиметровом и дециметровом диапазонах изменения температуры практически не влияют на величину параметра  $R$ . Зависимость поляризационного отношения от солености при углах падения, на которых сигнал радиолокатора определяет резонансное рассеяние, выражена слабо. Это относится к длинам волн миллиметрового, сантиметрового и дециметрового диапазонов.

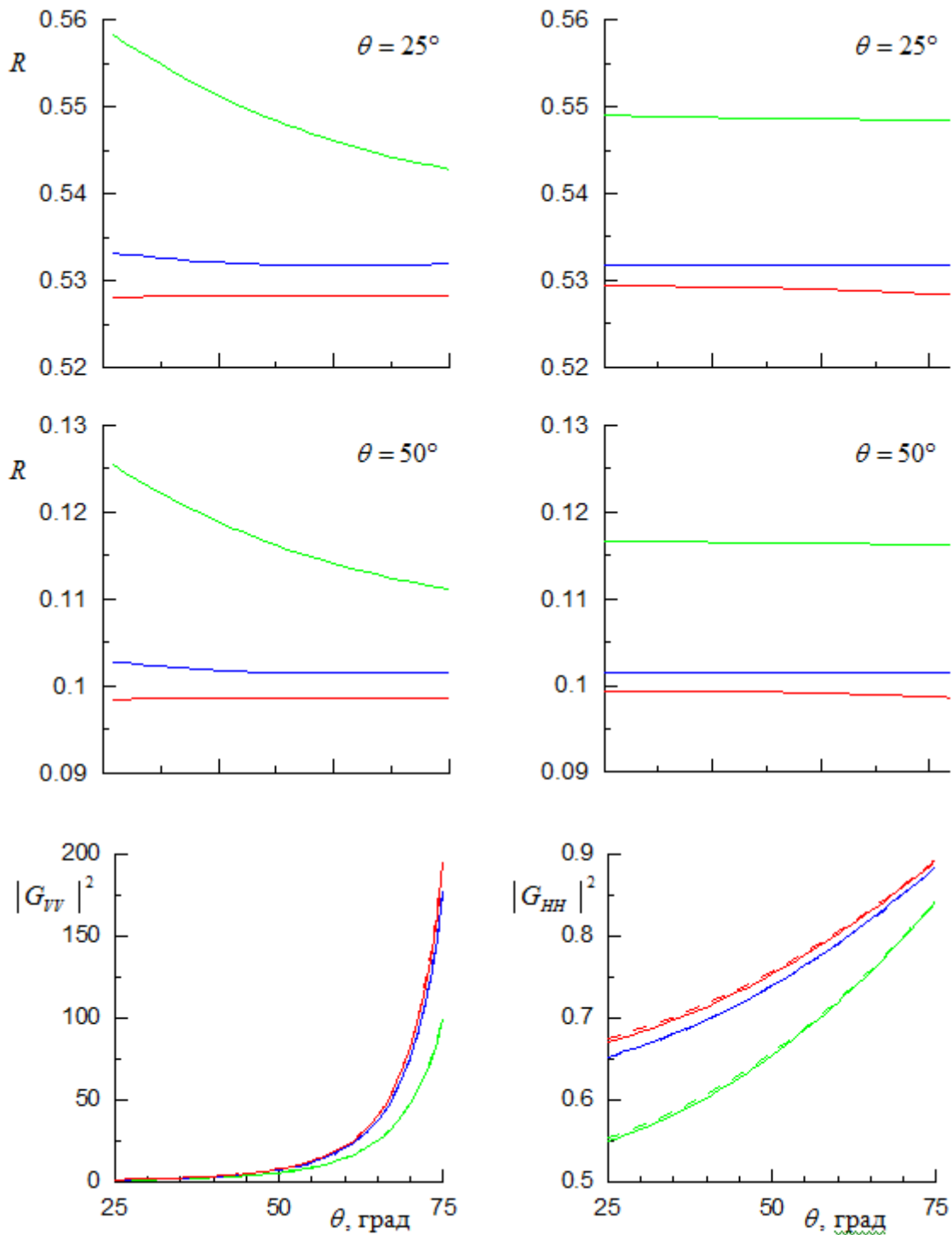


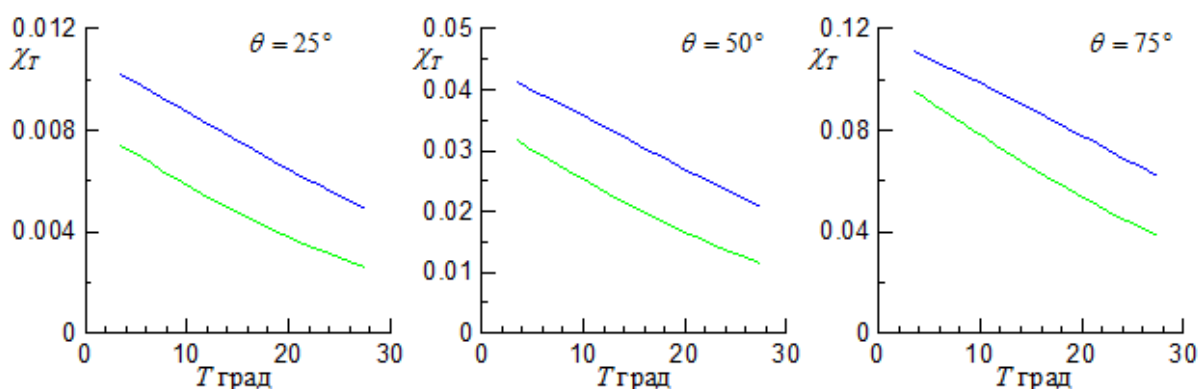
Рис. 3. Зависимости поляризационного отношения  $R$  от температуры  $T$  и солености  $S$ : кривые зеленого, синего и красного цвета соответствуют длинам радиоволн 0.8, 3 и 10 см;

Таким образом, при оценке влияния изменений физико-химических характеристик морской поверхности на поляризационное отношение учитывать изменения температуры необходимо, только в случае, когда зондирование проводится в миллиметровом диапазоне длин волн. Чтобы получить количественные оценки чувствительности поляризационного отношения к изменениям температуры, введем безразмерный параметр

$$\chi_T = \frac{R(T_1) - R(T_2)}{R\left(\frac{T_1 + T_2}{2}\right)}, \quad (8)$$

который показывает относительное изменение поляризационного отношения при изменении температуры на величину  $T_2 - T_1$ .

Оценим чувствительность поляризационного отношения к изменениям температуры при зондировании морской поверхности на длинах волн 0.4 см и 0.8 см. Значения параметра  $\chi_T$ , рассчитанные для ситуации, когда  $T_2 - T_1 = 5^\circ$ , показаны на рис. 4. Видно, что чувствительность поляризационного отношения  $\chi_T$  растет с ростом угла падения. При изменении угла падения от  $25^\circ$  до  $75^\circ$  значения параметра  $\chi_T$  увеличивается примерно в 10 раз.



**Рис. 4.** Чувствительность поляризационного отношения  $\chi_T$  к изменениям температуры  $T$ : кривые синего и зеленого цвета соответствуют длинам радиоволн 0.4 и 0.8 см

#### 4. Заключение

При зондировании морской поверхности чувствительность поляризационного отношения к изменениям ее температуры зависит от угла падения и длины зондирующей волны. Чувствительность растет с увеличением угла падения и уменьшением длины волны. При зондировании в миллиметровом диапазоне и углах падения около  $75^\circ$  изменения поляризационного отношения могут достигать 10 % при изменении температуры на  $5^\circ$ . Чувствительность поляризационного отношения к изменениям солености значительно ниже.

Проведенный анализ показал потенциальную возможность использования данных о поляризационном отношении в миллиметровом диапазоне для дистанционного определения температуры морской поверхности. При этом надо учесть следующее. На радиосигнал

локатора, сформированный в результате рассеяния от морской поверхности, действует большое число разных по своей физической природе факторов. Основным из них является изменение шероховатости поверхности в результате вариаций скорости приповерхностного ветра. Рассмотренный в настоящей работе подход позволяет исключить влияние этого фактора. Еще одним фактором является изменение локального наклона морской поверхности, вызванное присутствием на ней волн более длинных, чем резонансные волны. Необходимо оценить роль этого фактора, что является предметом дальнейших исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0011.

### Список литературы

1. Арманд А.Н., Тищенко Ю.Г., Аблязов В.С., Халдин А.А. Спутниковые СВЧ радиометры дециметрового диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 214-218.
2. Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol. 42. No. 9. Pp. 1836-1849. DOI: [10.1109/TGRS.2004.831888](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888)
3. Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves - a review // Boundary Layer Meteorology. 1978. Vol. 13. № 1-4. Pp. 61-85.
4. Терехин Ю.В., Пустовойтенко В.В. Влияние температуры и солености морской воды на характеристики радиолокационного сигнала СВЧ-диапазона // Исследование Земли из космоса. 1986. № 2. С. 16-20.
5. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Влияние физико-химических характеристик морской воды на резонансное рассеяние радиоволн морской поверхностью // Журнал Радиоэлектроники. 2014. № 9. С. 6. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/iso/sep14/4/text.pdf> (дата обращения 5.09.2017).
6. Кузмин Ф.В. Влияние изменчивости физико-химических характеристик морской среды на точность дистанционного определения скорости ветра // Журнал Радиоэлектроники. 2016. № 4. С. 10. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/10/text.pdf> (дата обращения 5.09.2017).
7. Запевалов А.С. Способ дистанционного определения относительной диэлектрической проницаемости среды под границей атмосфера-океан: пат. 2 623 668 С1 Российская Федерация. 2015. Бюл. № 19. 5 с.
8. Запевалов А.С., Шумейко И.П., Ожиганова М.И. Изменения поляризационного отношения при резонансном рассеянии радиоволн морской поверхностью // Журнал Радиоэлектроники. 2016. № 2. С. 4. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/10/text.pdf> (дата обращения 5.09.2017).

## Polarization Ratio Sensitivity to Changing Sea Surface Temperature in Microwave Sounding

A.S. Zapevalov<sup>1,\*</sup>, M.I. Ozhiganova<sup>2</sup>,  
I.P. Shumeyko<sup>2</sup>

\*[sevzepter@mail.ru](mailto:sevzepter@mail.ru)

<sup>1</sup>Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

<sup>2</sup>Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

---

**Keywords:** attitude polarization; microwave range; sea surface; temperature; salinity

---

The paper analyses an impact of the seawater physical-chemical characteristics on the forming radar signal in the microwave range. The analysis was carried out for the incidence angles from 25° to 75°. At these angles a recorded radar signal determines the resonant mechanism to scatter radio waves by the uneven surface. For numerical simulation we used a model based on Debye double-frequency approximation. The model describes dependence of the complex dielectric constant of water on the temperature, salinity and frequency of the sounding radio wave.

A changing level of the sea surface unevenness is the main factor to determine a value of the normalized cross-section of the backscattering radio signal. The polarization ratio allows us to exclude this factor, leaving only the dependence on the incidence angle and the complex dielectric constant of water. The polarization ratio becomes dependent on the seawater temperature and salinity because at different polarizations a level of the backscattered signal has different sensitivity to these parameters. At horizontal polarization the sensitivity is higher than at vertical one.

The polarization ratio sensitivity to the changes in the complex dielectric constant grows with increasing incidence angle. It also increases with decreasing radio wavelength, i.e. the greatest sensitivity is observed when sounding in the millimeter range. If the sounding is carried out at the incidence angle of 75°, the relative change in the polarization ratio can reach 10% when the temperature changes by 5°. The relative change in the polarization ratio when sounding at an angle of 25° is approximately ten times lower. It is shown that changes in salinity within the limits observed in the Global Ocean lead to relatively small changes in the polarization ratio, as compared with changes due to temperature variations.

### References

1. Armand A.N., Tischenko Yu.G., Abliazov V.S., Khaldin A.A. Sputnikovye SVCh radiometriy detsimetrovogo diapazona [Satellite microwave radiometers UHF]. *Sovremennyye*



- problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa: fizicheskie osnovy, metody i tekhnologii monitoringa okruzhayuschej sredy, potentsialno opasnykh iavlenij i ob'ektov* [Modern problems of Earth remote sensing from space: physical basics, methods and monitoring technologies of the environment, potentially dangerous phenomena and objects], 2008, vol. 5, no. 1, pp. 214-218 (in Russian).
2. Meissner T., Wentz F.J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, vol. 42, no. 9, pp. 1836-1849. DOI: [10.1109/TGRS.2004.831888](https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831888)
  3. Valenzuela G.R. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves - a review. *Boundary Layer Meteorology*, 1978, vol. 13, no. 1-4, pp. 61-85.
  4. Terekhin Yu.V., Pustovojtenko V.V. The effect of temperature and salinity on the characteristics of the radar signal of microwave band. *Issledovanie zemli iz kosmosa* [The Study of Earth from Space], 1986, no. 2, pp. 16-20 (in Russian).
  5. Zapevalov A.S., Pustovojtenko V.V. The effect of physico-chemical characteristics of sea water on the resonance scattering of radio waves by the sea surface. *Zhurnal Radioelektroniki* [Radioelectronics], 2014, no. 9, p. 6. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/sep14/4/text.pdf> , accessed 5.09.2017 (in Russian).
  6. Kuzmin F.V. Effects of variability in physico-chemical characteristics of the marine environment on the accuracy of remote measurement of wind speed. *Zhurnal Radioelektroniki* [Radioelectronics], 2016, no. 4, p. 10. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/apr16/10/text.pdf>, accessed 5.09.2017 (in Russian).
  7. Zapevalov A.S. *Sposob distantsionnogo opredeleniia otnositel'noj dielektricheskoy pronitsaemosti sredy pod granitsej atmosfera-okean* [Method of remote measurement of the relative dielectric constant of the medium below the boundary the atmosphere-ocean]. Patent RF, no. 2 623 668 C1. 2015 (in Russian).
  8. Zapevalov A.S., Shumejko I.P., Ozhiganova M.I. Change of the polarization relations by resonant scattering of radio waves by the sea surface. *Zhurnal Radioelektroniki* [Radioelectronics], 2016, no. 2, p. 4. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/feb16/10/text.pdf>, accessed 5.09.2017 (in Russian).