

УДК 537.86/.87

**ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДОПЛЕРОВСКИЙ РАДИОСКАТТЕРОМЕТР X-ДИАПАЗОНА  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ\*****В. И. АБРАМОВ<sup>1</sup>, Э. М. ЗУЙКОВА<sup>2</sup>, Д. А. СЕРГЕЕВ<sup>2</sup>, Ю. И. ТРОИЦКАЯ<sup>2</sup>,  
А. В. ЕРМОШКИН<sup>2</sup>, В. И. КАЗАКОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Научно-исследовательский радиофизический институт»,  
Россия, Нижний Новгород, 603950, ул. Большая Печерская, 25/12а

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»,  
Россия, Нижний Новгород, 603950, БОКС-120, ул. Ульянова 4б

**Аннотация.** В работе описан разработанный и изготовленный в ИПФ РАН экспериментальный образец доплеровского радиоскаттерометра непрерывного излучения (с синусоидальной частотной модуляцией) X-диапазона, предназначенный для изучения физических процессов рассеяния радиоволн на морской поверхности в контролируемых лабораторных условиях. Основная его особенность заключается в адаптации к условиям лабораторного моделирования на ветро-волновых каналах с целью исследования зависимости удельной эффективной площади рассеяния от скорости ветра. Конструкция СВЧ части и антенной системы позволяет проводить измерения мощности рассеянного излучения, а также его доплеровского спектра, как на основных, так и на перекрестных линейных поляризациях в последовательном режиме переключения. Приведено подробное описание конструкции и технических характеристик. Также обсуждаются вопросы калибровки и приводятся полученные с его использованием результаты экспериментов на Высоко-скоростном ветро-волновом канале ИПФ РАН.

**Ключевые слова:** доплеровский радиоскаттерометр, морская поверхность, перекрестная поляризация, лабораторный эксперимент

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время дистанционное зондирование Земли является одним из основных методов диагностики океана и атмосферы. Теоретические подходы к описанию и методы практического использования рассеяния микроволнового электромагнитного излучения

при исследовании поверхности гидросферы изучались во многих работах [1–5].

Для измерения скорости и направления приводного ветра в оперативной практике широко применяются спутниковые радиолокационные устройства, прежде всего, скаттерометры (спутники MetOp, а до ноября 2009 и QuikSCAT). В отдельных регионах начато оперативное использование полей приводного

---

\* Работа выполнена при поддержке проекта Российского научного фонда № 14-17-00667.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юровский, Ю.Ю.; Сергиевская, И.А.; Ермаков, С.А.; Шапрон, Б.; Капустин, И.А.; Шомина, О.В. Влияние обрушений ветровых волн на обратное рассеяние миллиметровых радиоволн морской поверхностью. *Морской гидрофизический журнал*, № 4, С. 37–50, 2015. URI: <http://мгфж.рф/index.php/repository?id=37>.
2. Кулемин, Г.П.; Разказовский, В.Б. *Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью земли под малыми углами*. К.: Наукова думка, 1987. 232 с.
3. Запевалов, А.С. Моделирование берегового рассеяния электромагнитного излучения сантиметрового диапазона морской поверхностью. Влияние волн более длинных, чем береговые составляющие. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, Т. 45, № 2, С. 266–275, 2012. URI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=11770187>.
4. Караев, В.Ю.; Мешков, Е.М.; Чу, К. Особенности классификации типов волнения в задачах радиолокационного зондирования. *Исследование Земли из космоса*, № 4, С. 1–16, 2013. DOI: [10.7868/S0205961413040088](https://doi.org/10.7868/S0205961413040088).
5. Кравченко, В.Ф.; Луценко, В.И.; Луценко, И.В. *Рассеяние радиоволн морем и обнаружение объектов на его фоне*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 448 с. ISBN 978-5-9221-1613-8.
6. Lehner, S.; Horstmann, J.; Koch, W.; Rosenthal, W. Mesoscale wind measurements using recalibrated ERS SAR images. *J. Geophys. Res.*, Vol. 103, No. C4, P. 7847–7856, 1998. DOI: [10.1029/97JC02726](https://doi.org/10.1029/97JC02726).
7. Horstmann, J.; Schiller, H.; Schulz-Stellenfleth, J.; Lehner, S. Global wind speed retrieval from SAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 41, No. 10, P. 2277–2286, 2003. DOI: [10.1109/TGRS.2003.814658](https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.814658).
8. Monaldo, F. M.; Thompson, D. R.; Beal, R. C.; Pichel, W. G.; Clemente-Colon, P. Comparison of SAR-derived wind speed with model predictions and ocean buoy measurements. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Vol. 39, No. 12, P. 2587–2600, 2001. DOI: [10.1109/36.974994](https://doi.org/10.1109/36.974994).
9. Hwang, P. A.; Zhang, B.; Perrie, W. Depolarized radar return for breaking wave measurement and hurricane wind retrieval. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 37, No. 1, P. L01604, 2010. DOI: [10.1029/2009GL041780](https://doi.org/10.1029/2009GL041780).
10. Hersbach, H. Comparison of C-band scatterometer CMOD5.N equivalent neutral winds with ECMWF. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, Vol. 27, P. 721–736, 2010. DOI: [10.1175/2009JTECHO698.1](https://doi.org/10.1175/2009JTECHO698.1).
11. Hersbach, H.; Stoffelen, A.; de Haan, S. An improved C-band scatterometer ocean geophysical model function: CMOD5. *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, No. C3, P. C03006, 2007. DOI: [10.1029/2006JC003743](https://doi.org/10.1029/2006JC003743).
12. Hwang, P. A.; Zhang, B.; Toporkov, J. V.; Perrie, W. Comparison of composite Bragg theory and quad-polarization radar backscatter from RADARSAT-2: With applications to wave breaking and high wind retrieval. *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, No. C8, P. C08019, 2010. DOI: [10.1029/2009JC005995](https://doi.org/10.1029/2009JC005995).
13. Zhang, B.; Perrie, W.; He, Y. Wind speed retrieval from RADARSAT-2 quad-polarization images using a new polarization ratio model. *J. Geophys. Res.*, Vol. 116, No. C8, P. C08008, 2011. DOI: [10.1029/2010JC006522](https://doi.org/10.1029/2010JC006522).
14. Vachon, P. W.; Wolfe, J. C-band cross-polarization wind speed retrieval. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, Vol. 8, No. 3, P. 456–459, 2011. DOI: [10.1109/LGRS.2010.2085417](https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2085417).
15. Zhang, B.; Perrie, W. Cross-polarized synthetic aperture radar: A new potential measurement technique for hurricanes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 93, P. 531–541, 2012. DOI: [10.1175/BAMS-D-11-00001.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00001.1).
16. Komarov, S.; Komarov, A.; Zabeline, V. Marine wind speed retrieval from RADARSAT-2 dual-polarization imagery. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 37, No. 5, P. 520–528, 2011. DOI: [10.5589/m11-063](https://doi.org/10.5589/m11-063).
17. van Zadelhoff, G. J.; Stoffelen, A.; Vachon, P. W.; Wolfe, J.; Horstmann, J.; Belmonte Rivas, M. Scatterometer hurricane wind speed retrievals using cross polarization. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.*, Vol. 7, No. 2, P. 7945–7984. DOI: [10.5194/amtd-6-7945-2013](https://doi.org/10.5194/amtd-6-7945-2013).
18. Uher, J.; Bornemann, J.; Rosenberg, U. *Waveguide Components for Antenna Feed Systems: Theory and CAD*. Michigan University: Artech House, 1993. 457 p.
19. Rudge, A. W.; Milne, K.; Oliver, A. D.; Knight, P. *The Handbook of Antenna Design*. London: Short Run Press LTD, 1982, 720 p.
20. Винницкий, А.С. *Автономные радиосистемы: учеб. пособие*. М.: Радио и связь, 1986. 336 с.
21. Сколник, М. *Справочник по радиолокации Т. 3: Радиолокационные устройства и системы*. М.: Сов. Радио, 1979. 528 с.

22. Troitskaya, Y. I.; Sergeev, D. A.; Kandaurov, A. A.; Baidakov, G. A.; Vdovin, M. A.; Kazakov, V. I. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions. *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, No. C11, P. C00J21, 2012. DOI: [10.1029/2011JC007778](https://doi.org/10.1029/2011JC007778).

23. Valenzuela, G. R. Theories for the interaction of electromagnetic and oceanic waves — A review. *Bounda-*

*ry-Layer Meteorology*, Vol. 13, No. 1–4, P. 61–85, 1978. DOI: [10.1007/BF00913863](https://doi.org/10.1007/BF00913863).

24. Troitskaya, Yu.; Abramov, V.; Ermoshkin, A.; Zuikova, E.; Kazakov, V.; Sergeev, D.; Kandaurov, A.; Ermakova, O. Laboratory study of cross-polarized radar return under gale-force wind conditions. *Int. J. Remote Sens.*, Vol. 37, No. 9, P. 1981–1989, 2016. DOI: [10.1080/01431161.2016.1160301](https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1160301).

Поступила в редакцию 29.11.2016

После переработки 25.07.2017