

УДК: 551.510.4

DOI: 10.26907/rwp29.2025.410-413

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ РАДИОЛОКАЦИОННОГО СИГНАЛА ОТ ПРИВОДНОГО ВЕТРА В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ ОЗ. БАЙКАЛ

В.П. Бутуханов, Е.Б. Атутов, О.Н. Очиров

Институт физического материаловедения СО РАН, 670048, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: vbut1951@gmail.com

Аннотация. В условиях короткопериодной динамики ветровых волн рассматривается связь характеристик ветра в приводном слое атмосферы с уровнем отраженного сигнала наносекундного радара. Результатами измерений установлено, что с увеличением скорости ветра западного и северо-западного направления отраженный сигнал увеличивается. Вариации отраженного сигнала при больших углах падения определяются преимущественно его угловой зависимостью. При вертикально поляризованной волне установлен угол Брюстера, указывающий на минимальный отраженный вертикально поляризованный сигнал.

Ключевые слова: скорость ветра; направление ветра; наносекундный радар; угол Брюстера

SPATIAL-TEMPORAL DEPENDENCE OF RADAR SIGNAL ON SURFACE WIND IN THE COASTAL ZONE OF LAKE BAIKAL

V.P. Butukhanov, E.B. Atutov, O.N. Ochirov

Abstract. In conditions of short-period dynamics of wind waves, the relationship of wind characteristics in the atmospheric surface layer with the level of the reflected signal of a nanosecond radar is considered. The results of measurements have established that with an increase in the wind speed of the western and northwestern directions, the reflected signal increases. Variations in the reflected signal at large angles of incidence are determined mainly by its angular dependence. With a vertically polarized wave, the Brewster angle is established, indicating the minimum reflected vertically polarized signal.

Keywords: wind speed; wind direction; nanosecond radar; Brewster angle.

Введение

Для Байкальской природной территории актуальным является комплексный мониторинг ветровых волн оз. Байкал вблизи прибрежной зоны, которые часто являются разрушительными для хозяйственной деятельности береговой инфраструктуры.

Дистанционное зондирование микроволнами дает большой объем данных, полезных для исследования коротких волн. В частности, резонанс Брэгга является одним из основных механизмов обратного рассеяния радара от водной поверхности, а характеристики рассеянного микроволнового излучения зависят от свойств отражающей водной поверхности, и масштаба шероховатости [1]. Шероховатость поверхности сильно коррелирует с касательным турбулентным напряжением, нежели со скоростью ветра. Турбулентный поток импульса или касательное турбулентное напряжение является важнейшей динамической характеристикой приводного пограничного слоя атмосферы. Эта величина характеризует силовое касательное воздействие ветра на поверхность воды, которое определяет поток энергии к волнам [2].

Касательное турбулентное напряжение определяет параметры ветрового нагона, одного из самых опасных и разрушительных проявлений сильных штормов и ураганов [3].

Активные микроволновые приборы, измеряющие скорость ветра по характеристикам излучения, рассеянного морской поверхностью, приспособлены для измерения именно касательного турбулентного напряжения ветра τ [4]. Это связано с тем, что рассеяние электромагнитных волн сантиметрового диапазона происходит на шероховатости водной поверхности, которая, в свою очередь, определяется главным образом турбулентным потоком импульса, равным $\tau = \rho v_*^2$. Следствием этого является более сильная корреляция эффективной площади рассеяния ЭПР поверхности воды, со скоростью трения v_* , чем со скоростью ветра,

отмеченная рядом авторов [5]. Приближенная зависимость от средней скорости ветра представлена как $v_* \approx 0,005v$ [6].

В работе [2] было предложено выражение для оценки связи между эффективной площадью рассеяния ЭПР при обрушении волн и скоростью трения в прибрежной зоне морей в виде

$$\sigma^2 \equiv F_2(\psi, \varphi) \left[v_*^2 / g \right]^{3/2}, \quad (1)$$

где $F_2(\psi, \varphi)$ функция, характеризующая рассеивающие свойства всплеска гребней волн, и зависит от угла скольжения ψ и угла φ между направлениями облучения и ветра.

Оценка связи ЭПР и скорости трения является весьма приближенной, поэтому использование (1) для адекватной оценки зависимости отраженного сигнала от характеристик приводного ветра в условиях короткопериодной динамики ветровых волн в прибрежной зоне будет некорректной. Поэтому на данном этапе с целью установления связи уровня отраженного сигнала и характеристик приводного ветра необходимо провести измерения угловой зависимости отраженного сигнала ветровых волн при разных скоростях ветра.

Условия проведения эксперимента и результаты измерений

Для проведения измерений был выбран пункта наблюдения в населенном пункте п. Горячинск с координатами 52°59' N и 108°18' E, который отличается открытостью береговой линии [7].

Метеоусловия в пункте наблюдения во второй половине дня отличались неустойчивостью, порывы ветра доходили до 8 м/с, при этом направление ветра изменялось с юго-западного на западное, северо-западное. Для анализа данных наблюдений отраженного сигнала и скорости ветра был выбран 10 минутный временной интервал с 2 минутным шагом осреднения указанных параметров во второй половине дня с 14:52:00 до 15:02:00 ч, таблица 1.

Таблица 1. Временные вариации скорости ветра v и уровней отраженного сигнала

Время, ч:м:с	v , м/с	U^{VV} , В	U^{HH} , В	Время, ч:м:с	v , м/с	U^{VV} , В	U^{HH} , В
14:52:00	6,2	0,98	0,98	15:00:00	3,7	0,57	0,94
14:54:00	5,0	0,74	0,93	15:02:00	4,0	0,64	0,99
14:56:00	5,2	0,66	0,68	15:04:00	4,7		
14:58:00	8,0	0,87	0,86	15:06:00	4,0		

В таблице U^{VV} , U^{HH} обозначены уровни отраженных сигналов при вертикальной и горизонтальной поляризациях, соответственно.

В этот период наблюдалось прохождение атмосферного фронта северо-западного направления. Измерения скорости и направления ветра проводились при помощи анеморумбометра М-63-М1 с выходом на компьютер.

Измерение отраженного сигнала проводились наносекундным радаром с приемником высокой чувствительности и большим динамическим диапазоном [7].

На рис. 1 показана угловая зависимость отраженного сигнала при вертикальной VV и горизонтальной HH поляризациях во время прохождения атмосферного фронта с 14:52:00 - 14:58:00 ч. Из рисунка видно увеличение отраженного сигнала обеих поляризаций до 0,98 В при усилении скорости ветра до 6,2 м/с. В дальнейшем с увеличением угла отражения (угол между лучом отраженного сигнала и нормалью к отражающему объекту) происходит уменьшение уровня отраженного сигнала. Резкое увеличение скорости ветра v до 8 м/с приводит к всплеску отраженного сигнала при обеих поляризациях. С установлением атмосферной устойчивости в 15:00 ч при изменении скорости ветра с 3,7 м/с до 4,0 м/с происходит уменьшение отраженного сигнала при вертикальной поляризации до минимального значения при угле отражения, равном 72°.

Для однородных изотропных, немагнитных прозрачных сред его можно определить, как угол Брюстера, равный, $\varphi_{Br} = \arctg(n_2 / n_1)$, $n_2 = \sqrt{\epsilon_2}$, $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ при котором коэффициент отражения Френеля для p -поляризованного поля (электрическое поле параллельное плоскости

падения) обращается в нуль и падающее поле полностью проникает в прозрачную среду. Однако, такое состояние может быть только при мнимой части диэлектрической проницаемости $\epsilon_2'' = 0$, т.е. при идеально прозрачных гладких средах. В случае поглощающих сред $\epsilon_2'' \neq 0$ коэффициент отражения $r^P(\varphi_{Br}) \rightarrow 0$, но не равен нулю. Во-вторых, при φ_{Br} отраженная волна при p поляризации полностью не исчезает [8].

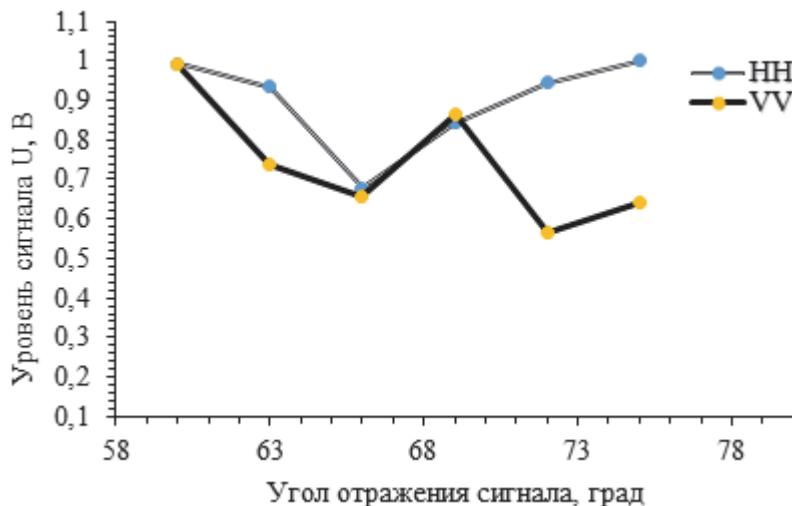


Рис.1. Угловая зависимость отраженного сигнала ветровых волн

При расчете φ_{Br} слабо поглощающей пресной водной среды при температуре окружающего воздуха 22 °C мнимую часть диэлектрической проницаемости при $f = 10$ ГГц представили, равной $\epsilon_2'' = 30,4$ [9], откуда $\varphi_{Br} = 79,69^\circ$.

На рис.1 угол $\varphi_{Br} = 72^\circ$ смещен в сторону меньших углов по сравнению с расчетным. Здесь видимо сказывается шероховатость поверхности волны, с ее увеличением происходит смещение угла Брюстера в сторону меньших углов [10].

Заключение

С увеличением скорости ветра при северо-западном направлении ветра наблюдалось усиление уровня отраженного сигнала. Особенностью угловой зависимости отраженного сигнала при разных поляризациях является различный ход уровня сигнала. Причем, при достижении относительной устойчивости атмосферы, с увеличением угла отражения при вертикальной VV поляризации (излучение и прием при одинаковой вертикальной поляризации) отраженный сигнал достигает минимального значения, а сигнал при горизонтальной поляризации HH возрастает. Если принять эту особенность угловой зависимости отраженного сигнала, как причину проявления эффекта Брюстера необходимо верифицировать состояние поверхности границы раздела атмосфера-вода, т.е. провести эксперимент при гладкой поверхности раздела сред при штиле.

Список литературы

- Басс Ф.Г., Фукс И.М. Рассеяние волн на статистически неровной поверхности. – М.: Наука. 1972.
- Phillips, O.M. Radar Returns from the Sea Surface // J. Geophys. Oceanogr. – 1988. – V. 18. – P. 1065–1074.
- Moon I., Kwon J.l, Lee J.-C., Shim J.-S., Kang S. K., Oh I. S., Kwon S. J. Effect of the surface wind stress parameterization on the storm surge modeling // Ocean Modelling. – 2009. – V. 29. – № 2. – P. 115–127.
- Liu W. T., Xie X., Tang W. Scatterometer's unique capability in measuring ocean surface stress // Oceanography from Space. – 2016, – P. 93–111.

5. Weismann, D. E., Davidson K. L., Brown R. A., Friehe C. A., Li F. The relationship between the microwave radar cross section and both wind speed and stress: Model function studies using Frontal Air–Sea Interaction Experiment data // J. Geophys.Res. – 1994. – V. 99. – P. 10 087–10 108.
6. Kraus E.B. *Atmosphere–Ocean interaction*. – New York: Oxford University Press, 1972. – VIII. – 276 p.
7. Бутуханов В.П., Атутов Е.Б., Очиров О.Н. Радиолокационное рассеяние ветровых волн вблизи береговой зоны озера Байкал // Радиотехника. – 2023. – № 12. – С. 56–63. <https://doi.org/10.18127/j00338486–202312–07>.
8. Ломухин Ю.Л., Бутуханов В.П. Исследование обратного отражения водных сред при любых углах скольжения // Известие вузов. Физика. – 2017. – № 11. – С. 61–66. <https://doi.org/10.1007/s11182–018–1303z>.
9. Садовский И.Н., Кузьмин А.В., Шарков Е.А., и др. Анализ моделей диэлектрической проницаемости водной среды, используемых в задачах дистанционного зондирования акваторий // Пр–2172 ИКИ РАН. – 2013. – С. 1–60.
10. Rino Charles L. and Hoc D. Ngo. Application of beam simulation to scattering at low grazing angles 2. Oceanlike surfaces // Radio Science. – 1994. – V. 29. – № 6. – P. 1381–1391.