

УДК 53.082.74

## ИЗМЕРЕНИЕ ВИБРАЦИИ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

В. М. Бурдюгов<sup>1</sup>, И. П. Шумейко<sup>2</sup>, М. И. Ожиганова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Морской гидрофизический институт РАН, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет, 299053, Севастополь, ул.  
Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 15 января 2019 г.

**Аннотация.** Анализируются возможности определение амплитуды вибрации путем контроля нелинейной трансформации СВЧ радиосигнала, отраженного от вибрирующей поверхности. Показаны ограничения диапазона определяемых амплитуд вибрации по соотношению амплитуд первых четырех гармоник. Рассмотрены особенности радиолокационного определения вибрации надводных объектов, вызванные взаимодействием радиоволн с морской поверхностью. Предложен метод расширения диапазона измеряемых амплитуд вибрации путем двухчастотного зондирования вибрирующей поверхности.

**Ключевые слова:** вибрация, дистанционное зондирование, гармоники отраженного сигнала, индекс фазовой модуляции.

**Abstract.** The possibilities of determining the vibration amplitude of marine objects by controlling the nonlinear transformation of the microwave radio signal reflected from the vibrating surface are analyzed. It is shown that the signal has such a structure that allows you to determine the amplitude of vibration according to the ratios of the amplitudes of the first four harmonics of the reflected radio signal. In the framework of this method, the vibration amplitude is determined in units of the length of the probing radio wave. This allows measurements to be taken without any additional radar calibrations.

The principal disadvantage of this method is the limitation of the range of measured vibration amplitudes, which cannot exceed 0.3 times the length of the radio

wave. Ambiguity occurs at larger values of vibration amplitude. The interaction of radio waves with the sea surface also reduces the maximum value of the measured vibration amplitudes. The sea surface is mobile and its contribution to the Doppler radar spectrum can be significant.

A new approach to determining the amplitude of vibration is proposed. It is based on two-frequency sensing of the vibrating surface. It is shown that within the framework of this approach the range of vibration determination can be extended several times. The conditions for determining the relationship between the wavelengths that provide continuity of the range of measured vibration amplitudes are obtained. The continuity conditions are obtained taking into account the interference created by the sea surface.

**Key words:** vibration, remote sensing, harmonics of the reflected signal, phase modulation index.

## **Введение**

В последние годы активно развиваются методы дистанционного определения параметров вибрации путем дистанционного зондирования в разных диапазонах электромагнитных волн (в оптическом и СВЧ диапазонах) [1-3]. Для определения амплитуды вибрации используются методы, основанные на нелинейной трансформации сигнала, отраженного от вибрирующей поверхности [4, 5].

В работах [5, 6] описано методическое обоснование дистанционного определения амплитуды вибрации корпуса морского объекта с помощью когерентной радиолокационной станции сантиметрового диапазона. Показано, что отношение уровней спектральной плотности на основной частоте вибрации и частоте второй гармоники определяются одним параметром – индексом фазовой модуляции, который линейно связан с амплитудой вибрации. Эти исследования получили развитие в работе [7], где показаны ограничения возможности расчетов амплитуды вибрации по первым двум гармоникам и предложен метод, в котором

определение амплитуды вибрации осуществляется на основе сравнения амплитуд первой и третьей гармоник отраженного сигнала или сравнением амплитуд второй и четвертой гармоник. Достоинством указанных подходов является то, что амплитуда вибрации определяется в единицах длин зондирующей радиоволны, что позволяет осуществлять измерения амплитуды вибрации без проведения дополнительных калибровок.

Общим принципиальным недостатком предложенных в работах [4-7] методов является ограничение диапазона амплитуды вибрации, в котором возможно их измерение. Ограничения связаны с тем, что при амплитуде вибрации, сравнимой с длиной зондирующей радиоволны, возникает неоднозначность в определении амплитуды вибрации. При радиолокации морских объектов необходимо также учитывать взаимодействие радиоволн с морской поверхностью [8, 9].

Целью настоящей работы является разработка подхода, в рамках которого будет расширен диапазон измеряемых амплитуд вибрации надводных объектов.

### Структура отраженного сигнала

Рассмотрим, как меняется структура сигнала, отраженного от вибрирующей поверхности, с изменением амплитуды вибрации. Будем полагать, что поверхность облучается непрерывным когерентным радиолокатором с длиной волны  $\lambda$ . Вибрация является гармонической и описывается выражением

$$\xi(t) = \xi_0 \sin(\Omega t), \quad (1)$$

где  $t$  – время;  $\xi_0$  – амплитуда вибрации;  $\Omega$  – частота вибрации. В этом случае после осуществления процедуры фазового детектирования отраженный от вибрирующей поверхности радиосигнал можно представить в виде [5]

$$S(t) = a \left[ \cos \varphi J_0(m) + 2 \cos \varphi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m) \cos(2n\Omega t) - 2 \sin \varphi \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(m) \cos((2n-1)\Omega t) \right], \quad (2)$$

где  $a$  – амплитуда сигнала;  $J_n(m)$  – функции Бесселя первого рода порядка  $n$ ;  $m$  – индекс фазовой модуляции;  $\varphi$  – сдвиг фазы. Индекс фазовой модуляции определяется соотношением между амплитудой вибрации и длиной зондирующей радиоволны

$$m = 4\pi\xi_0/\lambda. \quad (3)$$

Фазовый сдвиг  $\varphi$  описывается выражением

$$\varphi = \varphi_0 - 4\pi L/\lambda \quad (4)$$

где  $\varphi_0$  – изменение фазы сигнала при отражении;  $L$  – расстояние от вибрирующей поверхности до источника излучения.

Таким образом, с изменением параметра  $m$  происходит изменение амплитуд гармоник сигнала  $S(t)$ . Непосредственный расчет амплитуды вибрации  $\xi_0$  по амплитудам гармоник, которые для нечетных и четных гармоник соответственно равны

$$A_{2n-1} = a|2 \sin \varphi J_{2n-1}(m)|, \quad (5)$$

$$A_{2n} = a|2 \cos \varphi J_{2n}(m)|, \quad (6)$$

невозможен, поскольку неизвестны параметры  $a$  и  $\varphi$ .

Чтобы исключить зависимость от неизвестных параметров  $a$  и  $\varphi$  в работе [7] для расчета амплитуды вибрации предложено использовать отношения  $A_3/A_1$  и  $A_4/A_2$ . Указанные отношения определяются только отношениями функций Бесселя, которые зависят от одного параметра. Ограничения предложенного метода заключаются в следующем. Функции Бесселя являются знакопеременными [10], отношения амплитуд гармоник имеют ряд максимумов, и, как следствие, одному и тому же отношению амплитуд гармоник соответствуют несколько значений индекса фазовой модуляции (см. рис. 1).

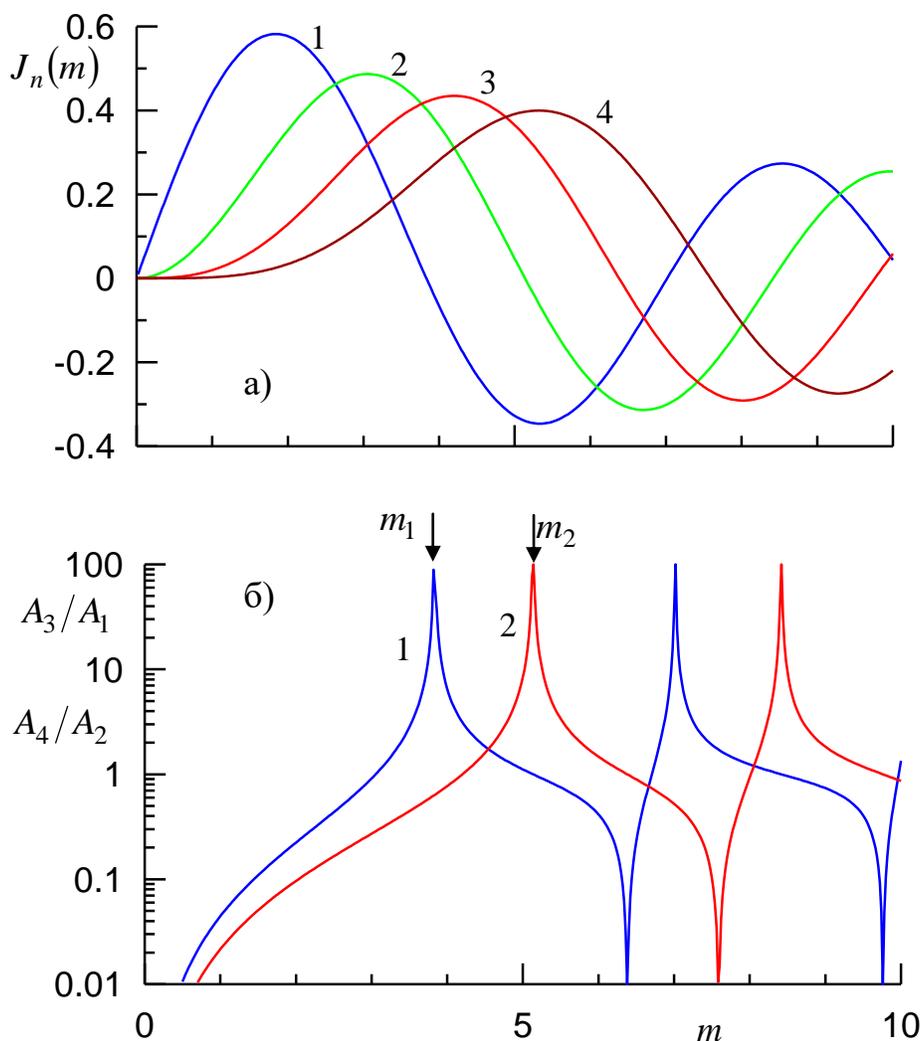


Рис. 1. Зависимости амплитуд гармоник отраженного от вибрирующей поверхности сигнала от индекса фазовой модуляции: а) – кривые 1-4 соответствуют амплитудам первых четырех гармоник; б) – кривая 1 соответствует  $A_3/A_1$ , кривая 2 соответствует  $A_4/A_2$ .

### Ограничения диапазона измеряемых амплитуд вибрации

Выше была показана неоднозначность определения амплитуды вибрации с помощью соотношений (4) при больших значениях параметра  $m$ . В зависимости от величины фазового сдвига  $\varphi$  могут использоваться как соотношение (5), так и соотношение (6) или оба. Соответственно однозначный расчет индекса фазовой модуляции возможен, если выполняются условия  $m < m_1$  или  $m < m_2$ . Параметры

$m_1$  и  $m_2$  соответствуют первым нулевым значениям функций Бесселя  $J_1(m)$  и  $J_2(m)$ .

При измерениях вибрации надводных объектов существует еще один фактор, который еще более ограничивает диапазон измеряемых амплитуд вибрации. Он связан с помехами, возникающими в результате взаимодействия радиоволн с морской поверхностью. Взаимодействие определяют два физических механизма. Первый механизм – это резонансное рассеяние назад, уровень которого растет с усилением ветра [11], и который зависит от физико-химических характеристик морской воды [12]. Второй механизм – это квазизеркальное отражение от морской поверхности при распространении волн от радара до вибрирующего объекта и от объекта до радара [9]. С ростом скорости ветра уровень квазизеркального отражения снижается. Кроме того, при сильном ветре, когда наблюдаются обрушения волн, значительным становится вклад отражений от заостренных гребней волн [13, 14].

При построении моделей радиосигналов, рассеянных морской поверхностью, в ситуациях, когда зондирование осуществляется под настильными углами, необходимо также учитывать эффект “затенения”, проявляющийся в том, что гребни основных энергонесущих волн закрывают отдельные участки поверхности [13]. Данный эффект в значительной мере зависит от фактора групповитости, характеризующего групповую структуру поверхностных волн [15].

Проблема определения уровня помехи состоит в том, что, даже зная скорость приводного ветра, нельзя рассчитать ее уровень. Тонкая топографическая структура морской поверхности, определяющая при радиозондировании в СВЧ диапазоне регистрируемый сигнал, неоднозначно зависит от скорости ветра. Моделирование морской поверхности является сложной многофакторной задачей, характерной для процессов в геосредах [16]. На морскую поверхность оказывают

большое влияние различные по своей физической природе механизмы, роль которых различна в разных метеорологических условиях [17, 18].

Эффект присутствия радиосигнала, сформированного морской поверхностью иллюстрирует рис. 2. При его построении предполагалось, что можно определить отношение амплитуд гармоник только в ситуации, когда указанное отношение не выходит за пределы некоторых критических значений, которые обозначены как  $L_1$  и  $L_2$ . Между собой критические значения связаны соотношением  $L_2 = L_1^{-1}$ . При построении рис. 2 принято, что критические значения соответствуют отношению 1:15.

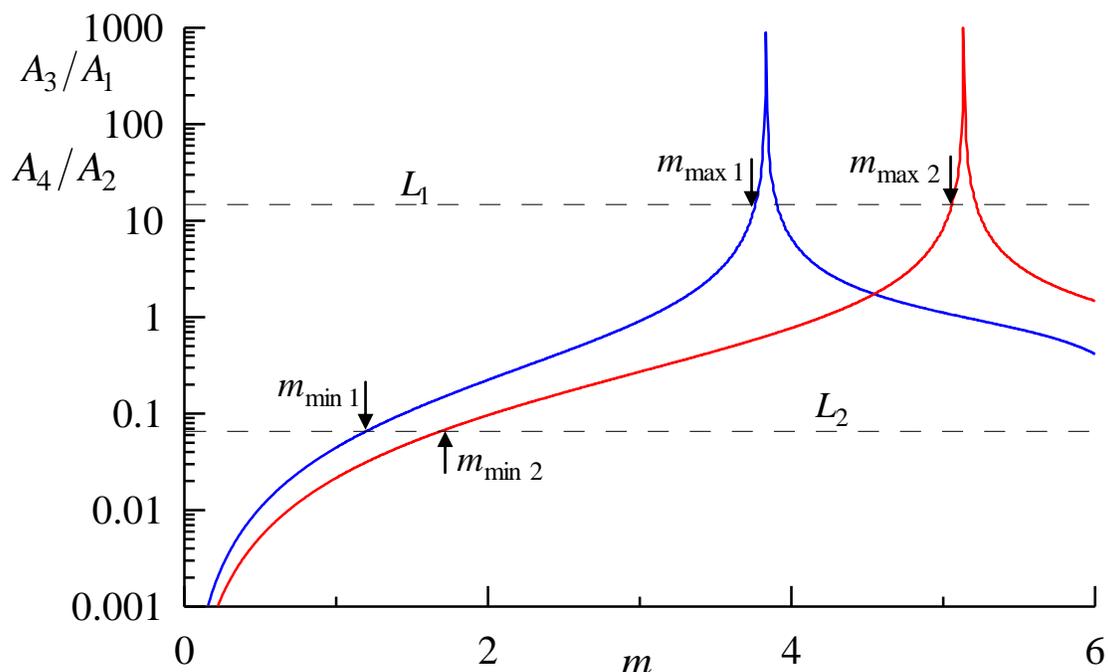


Рис. 2. Влияние взаимодействия радиоволн с морской поверхностью на диапазон измеряемых индексов фазовой модуляции:  
 синяя кривая –  $A_3/A_1$ ; красная кривая –  $A_4/A_2$ ;  
 штриховая линия – значения параметров  $L_1$  и  $L_2$ .

Приведенным на рис. 2 максимальным  $m_{\max}$  и минимальным  $m_{\min}$  значениям индекса фазовой модуляции соответствуют значения амплитуды вибрации в диапазонах  $0.10 \leq \xi_0/\lambda \leq 0.30$ , если расчеты проводятся по отношению

$A_3/A_1$ , и  $0.14 \leq \xi_0/\lambda \leq 0.40$ , если расчеты проводятся по отношению  $A_4/A_2$ . Показанные стрелками значения индекса фазовой модуляции являются наименьшими корнями уравнений

$$\left. \begin{aligned} J_3(m_{\min 1})/J_1(m_{\min 1}) &= L_2 \\ J_3(m_{\max 1})/J_1(m_{\max 1}) &= L_1 \\ J_4(m_{\min 1})/J_2(m_{\min 1}) &= L_2 \\ J_4(m_{\max 1})/J_2(m_{\max 1}) &= L_1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

### Двухчастотное зондирование

Расширить диапазон, в котором однозначно определяется амплитуда вибрации, можно, облучая вибрирующую поверхность радиоволнами разной длины. Рассмотрим ситуацию, когда зондирование осуществляется на длинах волны  $\lambda$  и  $\nu\lambda$ . Здесь  $\nu$  безразмерный множитель, который для определенности примем удовлетворяющим неравенству  $\nu > 1$ . Из (3) следует, что изменение длины зондирующей радиоволны в  $\nu$  раз соответствует изменению индекса фазовой модуляции  $m \rightarrow m/\nu$ .

Сначала рассмотрим случай, когда расчет амплитуды вибрации проводится по нечетным гармоникам. Чтобы диапазон измеряемых амплитуд вибрации был непрерывным, необходимо, как показано на рис. 3, чтобы выполнялось условие

$$J_3(m_{\min 1}/\nu)/J_1(m_{\min 1}/\nu) = L_2. \quad (8)$$

Таким образом, при выполнении условия (8) значение верхней границы указанного диапазона изменилось с  $\xi_0 = 0.30\lambda$  при одночастотном зондировании до  $\xi_0 = 0.91\lambda$  при двухчастотном зондировании.

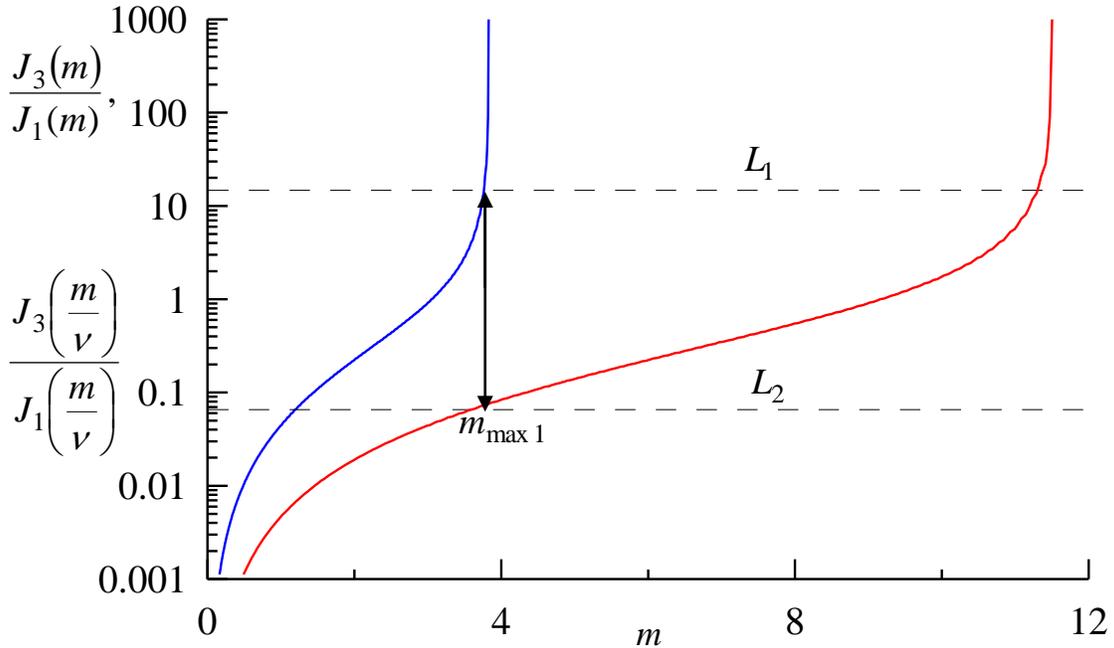


Рис. 3. Расширение диапазона измерения индекса фазовой модуляции при двухчастотном зондировании. Расчет по нечетным гармоникам.

Если расчет проводится по четным гармоникам, то должно выполняться условие

$$J_4(m_{\min 2}/\nu)/J_2(m_{\min 2}/\nu) = L_2. \quad (9)$$

При этом положение верхней границы диапазона для  $\xi_0$  изменяется от  $0.40\lambda$  при одночастотном зондировании до  $1.22\lambda$  при двухчастотном зондировании.

При сравнении графиков, представленных на рис. 3 и 4 видно, что использование для определения индекса фазовой модуляции соотношения четвертой и второй гармоник позволяет оценивать его значения в более широком диапазоне, чем при использовании отношения третьей и первой гармоник.

Следует также отметить, что при изменении длины зондирующей волны также меняется фазовый сдвиг  $\varphi$ , определяемый выражением (4). Соответственно меняется соотношение между амплитудами четных и нечетных гармоник, которые соответственно пропорциональны  $|\cos \varphi|$  и  $|\sin \varphi|$ .

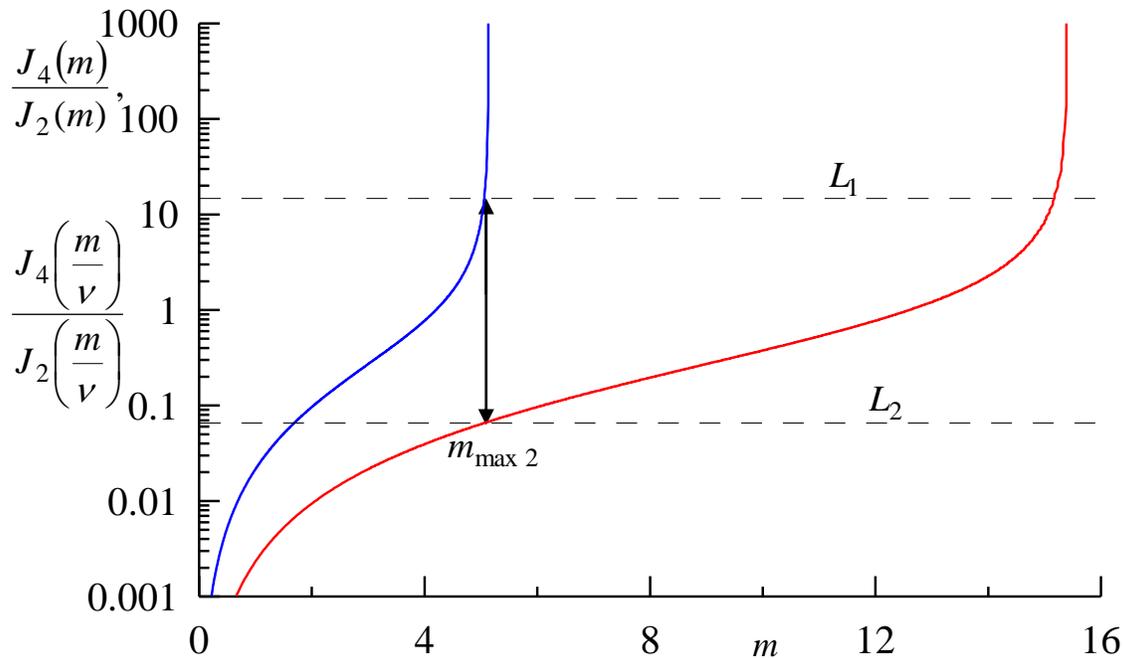


Рис. 4. Расширение диапазона измерения индекса фазовой модуляции при двухчастотном зондировании. Расчет по четным гармоникам.

Поэтому могут возникнуть ситуации, при которых для расчетов амплитуды вибрации по данным зондирования на длине волны  $\lambda$  используется отношение амплитуд третьей и первой гармоник, а при расчетах по данным зондирования на длине волны  $\nu\lambda$  используется отношение амплитуд четвертой и второй гармоник, и наоборот.

## Выводы

Проведен анализ возможности определения амплитуды вибрации морских объектов путем контроля нелинейной трансформации СВЧ радиосигнала, отраженного от вибрирующей поверхности. Показано, что отраженный сигнала имеет такую структуру, которая позволяет определять амплитуду вибрации по соотношениям амплитуд его первых четырех гармоник.

Принципиальным недостатком указанного метода является ограничение диапазона измеряемых амплитуд вибрации, которые в общем случае не могут

превышать 0.3 длины радиоволны. При больших значениях амплитуды вибрации возникает неоднозначность. Это вызвано тем, что одному и тому же отношению амплитуд гармоник могут соответствовать разные значения индекса фазовой модуляции и соответственно разные значения амплитуды вибрации. Взаимодействие радиоволн с морской поверхностью также приводит к снижению максимальных значений измеряемых амплитуд вибрации.

Предложен новый подход к определению амплитуды вибрации. Он основан на двухчастотном зондировании вибрирующей поверхности. Показано, что в рамках этого подхода диапазон, в котором определяются амплитуды вибрации, может быть расширен в несколько раз. Получены условия для определения соотношений между длинами волн, которые обеспечивают непрерывность диапазона измеряемых амплитуд вибрации. Условия непрерывности получены с учетом помех, создаваемых морской поверхностью.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0002 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

### Литература

1. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement. *Optical Engineering // Opt. Eng.* 2001. Vol. 40, No. 1. P. 10-19. doi: [10.1117/1.1330700](https://doi.org/10.1117/1.1330700).
2. Волковец А.И., Руденко Д.Ф., Гусинский А.В., Кострикин А.М. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения и вибрации // Доклады БГУИР. 2007. Том 20, № 4. С. 58-64.
3. Vikram C.S., McDevitt T.E. Simple spectrum analysis in laser Doppler studies

of sinusoidal vibrations. // Opt. Eng. 1989. V. 28. P. 922-925.

4. Du S., Jinchun Hu J., Zhu Yu, Hu C. Analysis and compensation of synchronous measurement error for multi-channel laser interferometer // Measurement Science and Technology. 2017. Vol. 28, No.5. 055201.

5. Пинчук А.Н. Технология оценивания вибрации корпуса морского объекта с помощью когерентной радиолокационной станции сантиметрового диапазона // Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. 2014. № 4 (124). С. 76-79.

6. Пинчук А.Н. Дистанционное определение амплитуды вибрации корпуса судна // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 6. С. 270-278.

7. Запевалов А.С., Пинчук Н.А., Бурдюгов В.М. Дистанционное определение амплитуды вибрации // Журнал технической физики. 2018. № 12. С. 1890-1892. DOI: [10.21883/JTF.2018.12.46794.27-18](https://doi.org/10.21883/JTF.2018.12.46794.27-18).

8. Штагер Е.А. Отражение радиоволн от кораблей и других морских объектов // СПб. Издательство ВВМ при СПб Государственном университете. 2005. 418 с.

9. Пинчук А.Н. Модель пассивной помехи при радиолокации низковысотных целей над морской поверхностью // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 3. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/mar15/15/text.pdf>

10. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф. Специальные функции: Формулы, графики, таблицы. М.: Наука, 1968. 344 с.

11. Басс Ф.Г., Брауде С.Я., Калмыков А.И., Мень А.В., Островский И.Е., Пустовойтенко В.В., Розенберг А.Д., Фукс И.М. Методы радиолокационных исследований морского волнения (радиоокеанография) // Успехи физических наук. 1975. Том 116. С. 741.

12. Запевалов А.С., Пустовойтенко В.В. Влияние физико-химических характеристик морской воды на резонансное рассеяние радиоволн морской

поверхностью // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 9. Режим доступа <http://jre.cplire.ru/jre/sep14/4/text.pdf>

13. Булатов М.Г., Раев М.Д., Скворцов Е.И. Доплеровские спектры сигналов, рассеянных морской поверхностью при настильных углах зондирования (результаты натурного эксперимента) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4, № 1, С. 280-288.

14. Zavarotny V., Voronovich A. Two-scale model and ocean radar Doppler spectra at moderate and low-grazing angles // IEEE Trans. of AP. 1998. Vol. 46, No.1. P. 84-92.

15. Шумейко И.П., Ожиганова М.И., Воронина Н.Н., Крыль М.В., Наривончик С.В. К расчету фактора групповитости морских поверхностных волн // Процессы в геосредах. 2018. № 3(16). С. 1077-1081.

16. Карев В.И., Показеев К.В., Чаплина Т.О. Актуальные проблемы моделирования процессов в геосредах // Процессы в геосредах. 2018. № 1(14). С. 818-822.

17. Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е. Исследования уровня когерентности морских поверхностных волн // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 40, № 4. С. 545-549.

18. Запевалов А.С., Показеев К.В., Пустовойтенко В.В. О предельной точности альтиметрического определения скорости приводного ветра // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 49-54.

**Для цитирования:**

В. М. Бурдюгов, И. П. Шумейко, М. И. Ожиганова Измерение вибрации надводных объектов путем радиозондирования. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan19/10/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.1.10