

Новый прибор для определения дисперсионных характеристик гравитационно-капиллярных волн

М.Г. Булатов, М.Д. Раев, Е.И. Скворцов

*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: mbulatov@mx.rssi.ru*

Микроволновый трехчастотный скаттерометр создан для дистанционных измерений фазовой и групповой скоростей и дисперсионного параметра гравитационно-капиллярных волн на морской поверхности. Дано описание прибора и его технических характеристик. Приведены предварительные результаты натурных испытаний прибора в 2006 г. Показана возможность использования такого прибора для получения информации о скоростях поверхностных течений, скоростях приповерхностного ветра и индикации выхода на поверхность газовых пузырьков искусственного и естественного происхождения.

Введение

Измерение дисперсионных характеристик гравитационно-капиллярных волн, возбужденных ветром на морской поверхности, является одной из самых актуальных задач, решаемых методами микроволнового зондирования. Актуальность этой проблемы обусловлена возможностями получения на основе этих измерений информации о скоростях поверхностных течений, о скоростях приводного ветра, о наличии загрязняющих поверхность моря пленках и т.д.

Цель настоящей работы – создание прибора, позволяющего измерять скорости движения Брэгговских резонансных поверхностных волн и его экспериментальная проверка в натурных условиях.

Разработка прибора была проведена в ИКИ РАН в 2005-2006 гг., а его испытания – осенью 2006 года на базе Южного отделения ИО РАН.

Принцип действия прибора

Разработанный прибор должен измерять следующие характеристики гравитационно-капиллярных волн:

а) Фазовую скорость
$$u_{ph}(q) = \frac{\omega_s}{q} \quad (1)$$

б) Групповую скорость
$$u_{gh}(q) = \frac{d\omega_s}{dq} \quad (2)$$

в) Дисперсионный параметр
$$D = \frac{du_{gh}}{dq} = \frac{d^2\omega_s}{dq^2} \quad (3)$$

где, ω_s и q - частота и волновое число поверхностных волн, связанные дисперсионным соотношением $\omega_s = f(q)$.

Прибор разрабатывался на основе метода измерений, сформулированного в [1].

В [1] показано, что определение параметров (1), (2) и (3) может быть выполнено с помощью микроволнового скаттерометра, зондирующего водную поверхность на трех когерентных частотах ω , $\omega^+ = \omega + \Omega$, $\omega^- = \omega - \Omega$. Когерентный трехчастотный сигнал $E(t)$ сформирован путем амплитудной модуляции несущей частоты передатчика равной 35.5 ГГц.

$$E(t) = (1 + m \cos \Omega t) \times \cos \omega t = \cos \omega t + \frac{m}{2} \cos(\omega + \Omega) + \frac{m}{2} \cos(\omega - \Omega). \quad (4)$$

где, ω - несущая частота, Ω - частота модуляции, и m - коэффициент модуляции.

Тогда электромагнитная волна, облучающая поверхность и распространяющаяся в направлении единичного вектора \mathbf{n} , имеет вид:

$$E(\mathbf{R}, t) = \cos\left(\mathbf{n} \frac{\omega}{c} \mathbf{R} - \omega t\right) + \frac{m}{2} \cos\left(\mathbf{n} \frac{\omega + \Omega}{c} \mathbf{R} - (\omega + \Omega)t\right) + \frac{m}{2} \cos\left(\mathbf{n} \frac{\omega - \Omega}{c} \mathbf{R} - (\omega - \Omega)t\right) \quad (5)$$

Три компоненты падающей волны будут рассеиваться на водной поверхности тремя Брэгговскими компонентами с волновыми числами:

$$q_0 = 2 \frac{\omega}{c} \cos \vartheta, \quad q_+ = 2 \frac{\omega^+}{c} \cos \vartheta, \quad q_- = 2 \frac{\omega^-}{c} \cos \vartheta, \quad (6)$$

где, ϑ - угол скольжения падающей волны.

Как показано в [1], соответствующие доплеровские сдвиги $\delta\omega_0$, $\delta\omega_{\pm}$ в спектре отраженного сигнала связаны с излучаемыми частотами дисперсионным соотношением

$$\delta\omega_0 = f\left(2 \frac{\omega}{c} \cos \vartheta\right), \quad \delta\omega_+ = f\left(2 \frac{\omega^+}{c} \cos \vartheta\right), \quad \delta\omega_- = f\left(2 \frac{\omega^-}{c} \cos \vartheta\right), \quad (7)$$

а интересующие нас параметры (1-3) могут быть определены в виде:

$$u_{ph}\left(2 \frac{\omega}{c} \cos \vartheta\right) = \frac{\delta\omega_0}{2(\omega/c) \cos \vartheta}$$

$$u_{gh}\left(2 \frac{\omega}{c} \cos \vartheta\right) = \frac{\delta\omega_+ - \delta\omega_-}{4(\Omega/c) \cos \vartheta} \quad (8)$$

$$D\left(2 \frac{\omega}{c} \cos \vartheta\right) = \frac{\delta\omega_+ + \delta\omega_- - 2\delta\omega_0}{4(\Omega/c)^2 \cos^2 \vartheta}$$

Как следует из (8), измерение фазовой и групповой скорости гравитационно-капиллярных волн, а также определение дисперсионного параметра, сводится к измерениям доплеровских сдвигов на трех когерентных частотах зондирующего сигнала.

Описание прибора

В соответствии с выбранным методом измерения была разработана функциональная схема прибора, которая приведена на рис. 1.

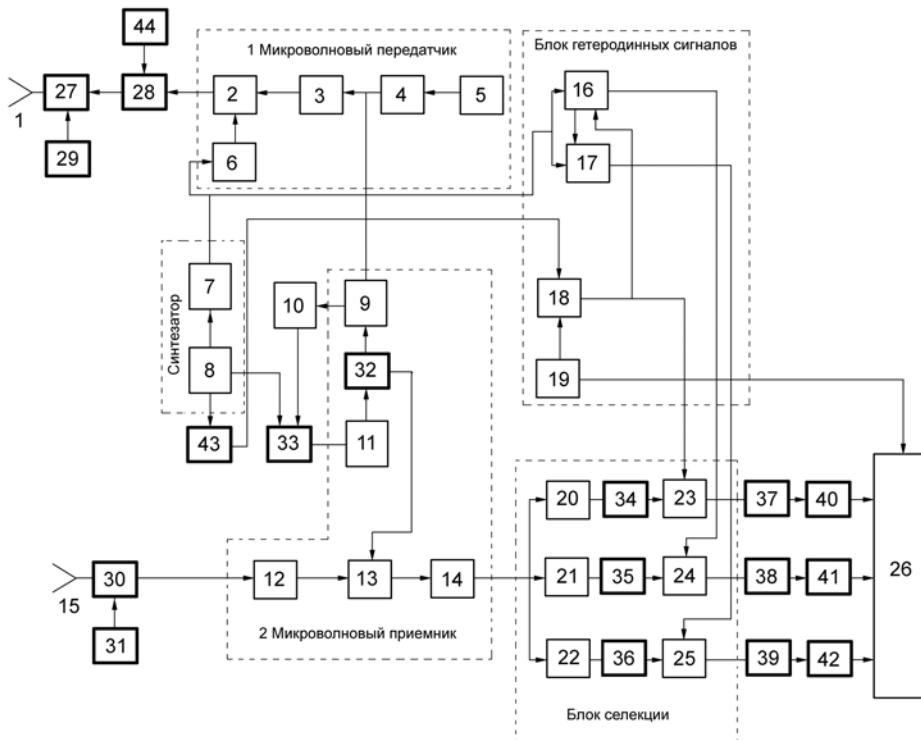


Рис. 1. Функциональная схема прибора

Прибор работает следующим образом. Непрерывный сигнал СВЧ-генератора 5 усиливается в усилителях 3, 4 и поступает на амплитудный модулятор 2. На второй вход модулятора с синтезатора частот 7 подается модулирующее напряжение с частотой 500 мГц. Далее сформированный трехчастотный сигнал проходит через выходной усилитель мощности 28, вращатель поляризации 27 и излучается передающей антенной 1.

Отраженный сигнал принимается приемной антенной 15, проходит через вращатель поляризации 30 и усиливается малошумящим СВЧ усилителем 12. После преобразования в смесителе 13 и усиления в усилителе первой промежуточной частоты 14 происходит разделение трехчастотного сигнала на отдельные составляющие в линейке фильтров 20,21,22 со средними частотами 100, 600 и 1100 мГц. Частоты задающего генератора 5 и гетеродина 32 синхронизированы цепью фазовой автоподстройки частоты. Она состоит из смесителя 9, усилителя разностной частоты 10, узла сравнения 33 сигнала опорной частоты синтезатора 8 и сигнала разностной частоты и усилителя управляющего напряжения 11.

После усиления в усилителях 34,35,36 в смесителях 23,24,25 происходит преобразование составляющих трехчастотного сигнала на вторую промежуточную частоту-2.5кГц. Гетеродинные сигналы для этого преобразования формировались из опорного сигнала синтезатора 8 с помощью квадратурного модулятора 18, генератора второй промежуточной частоты 19 и двух смесителей 16,17. Три сигнала на второй промежуточной частоте, соответствующие трем принимаемым сигналам, после фильтрации 37,38,39 и усиления 40,41,42 поступали на АЦП 26 и регистрировались на персональном компьютере.

В приборе предусмотрены два режима переключения поляризации излучаемых и принимаемых сигналов: ручной и автоматический с частотой 1 Гц.

Обработка сигналов заключалась в нахождении спектральных характеристик выходных сигналов в квазиреальном времени с разрешением 0.15 Гц. Эта операция выполнялась с помощью программы PowerGraph Professional.

Параметры прибора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры прибора

	Параметры	Значения
1.	Частоты выходных сигналов	35.5гГц 36.0гГц 36.5гГц
2.	Мощность излучаемого сигнала	250мВт
3.	Частота модуляции	500мГц
4.	Коэффициент шума приемника	4дБ
5.	Частота гетеродина	35.4гГц
6.	Первые промежуточные частоты	100мГц 600мГц 1100мГц
7.	Вторая промежуточная частота	2.5кГц
8.	Диаграмма направленности антенн	6 град.

Предварительные результаты полевых испытаний трехчастотного скаттерометра

Натурные испытания прибора осуществлялись в рамках экспериментальных работ, проводимых по двум основным направлениям:

1. “Микроволновые исследования нелинейной динамики морских волн” (Грант РФФИ. №05-02-16384).

2. “Микроволновая диагностика состояния морской поверхности, возмущаемой потоком газовых пузырьков”(Грант РФФИ №06-05-64600)

На первом этапе эксперимента проводились измерения групповой скорости гравитационно-капиллярных волн. В ходе всех испытаний ветер дул с северо-востока (с берега, под углом 30 градусов к пирсу) со скоростью 3-5 м/с. Ветровой разгон составлял 200 метров. Зыбь отсутствовала. Прибор ориентировался против ветра. Экспериментально полученные значения групповой скорости сравнивались с расчетными значениями для соответствующих Брэгговских компонент ветрового волнения. Результаты измерений приведены в таблице 2, где δF_- – доплеровский сдвиг на частоте 35.5 ГГц; δ_+ - доплеровский сдвиг на частоте 36.5 ГГц; $u_{gh.э}$ - групповая скорость гравитационно-капиллярных волн, полученная по результатам эксперимента; $u_{gh.р}$ – расчетное значение групповой скорости.

Таблица 2. Результаты измерений групповой скорости гравитационно-капиллярных волн

	Угол визирования (градусы)	δF_+ (Гц)	δF_- (Гц)	$\delta F_+ - \delta F_-$ (Гц)	$u_{gh.э}$ (см/с)	$u_{gh.р}$ (см/с)
1	45	61.61	63.48	1.87	40	42.45
2	55	73.74	75.9	2.16	39.4	45.84
3	65	88.29	91.06	2.79	45.9	48.30
4	75	100.1	103.21	3.11	48	50

Анализ полученных результатов показал достаточно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных. Систематическое отличие измеренных скоростей по сравнению с расчетными (меньше на 2-6 см/с) объясняется, по-видимому, наличием течения.

В ходе второго этапа эксперимента были проведены измерения спектров доплеровских частот отраженных сигналов при воздействии на морскую поверхность восходящего потока воздушных пузырьков.

При проведении эксперимента ветер был северо-восточный 5-6 м/с, длина ветрового разгона 200 метров, зыбь отсутствовала. Прибор ориентировался против ветра. Угол визирования постоянный – 42 градуса. Избыточное давление воздуха менялся с помощью редуктора от 0.1 до 0.5 атмосферы. Пузыри генерировались с помощью специальной насадки на конце шланга, погруженного на глубину 1.5 метра и подсоединенного к баллону со сжатым воздухом (рис. 2). Диаметр пузырьков составляла 0.8-1.0 мм.

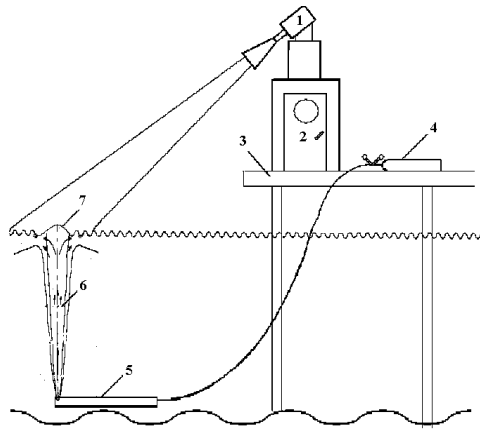


Рис. 2. Схема эксперимента (1-трехчастотный скаттерометр. 2-контейнерная лаборатория. 3-пирс. 4-баллон со сжатым воздухом. 5-насадка с калиброванными отверстиями. 6-поток воздушных пузырьков. 7-пузырьки на водной поверхности)

На рис. 3-6 показано как изменялась форма и частотный состав спектров доплеровских частот отраженных сигналов при изменении избыточного давления.

Кривая синего цвета соответствует сигналу с частотой 35 ГГц, зеленого цвета - сигналу с частотой 35.5 ГГц, а лилового цвета – сигналу с частотой 36.5 ГГц.

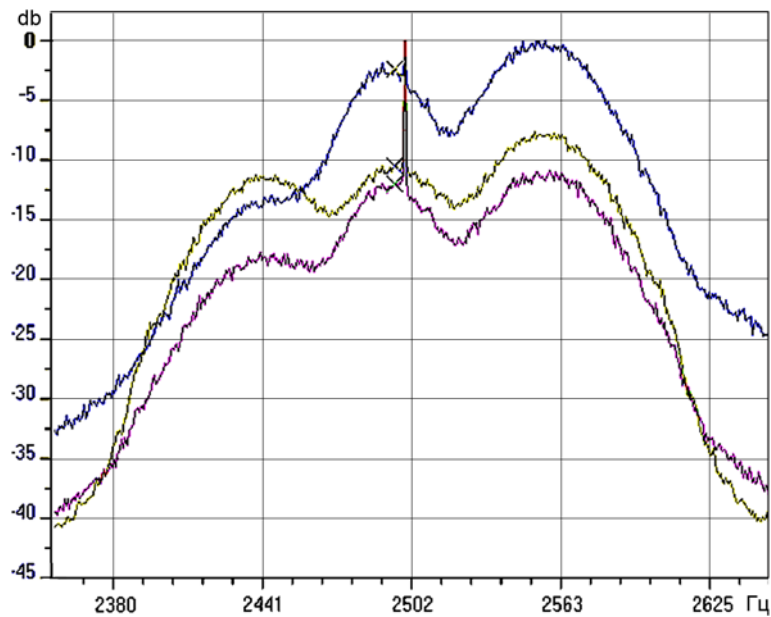


Рис. 3. Доплеровские спектры сигналов, отраженных от невозмущенной пузырями морской поверхность ($u_{gy} = 46.1 \text{ см/с}$)

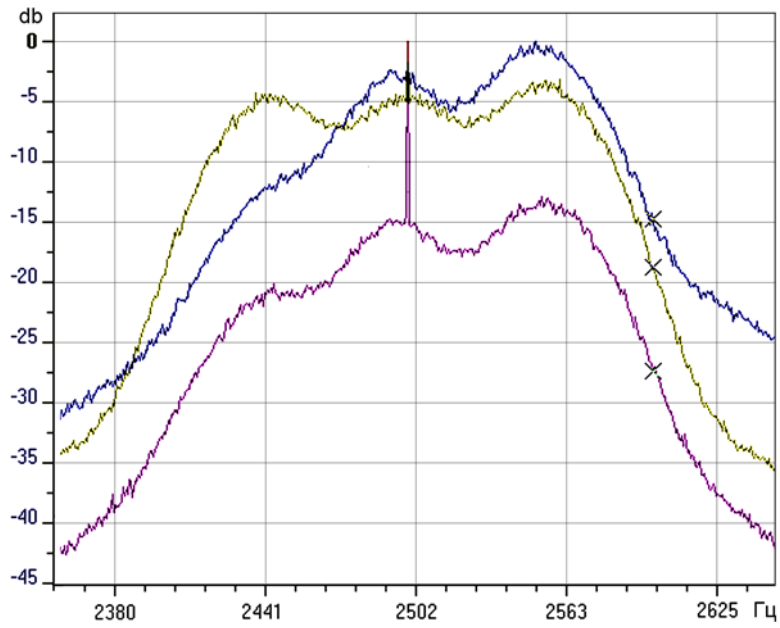


Рис. 4. Доплеровские спектры сигналов, отраженных поверхностью, возмущенной потоком пузырьков при давлении 0,1 атмосфера ($u_{gy} = 41\text{см/с}$)

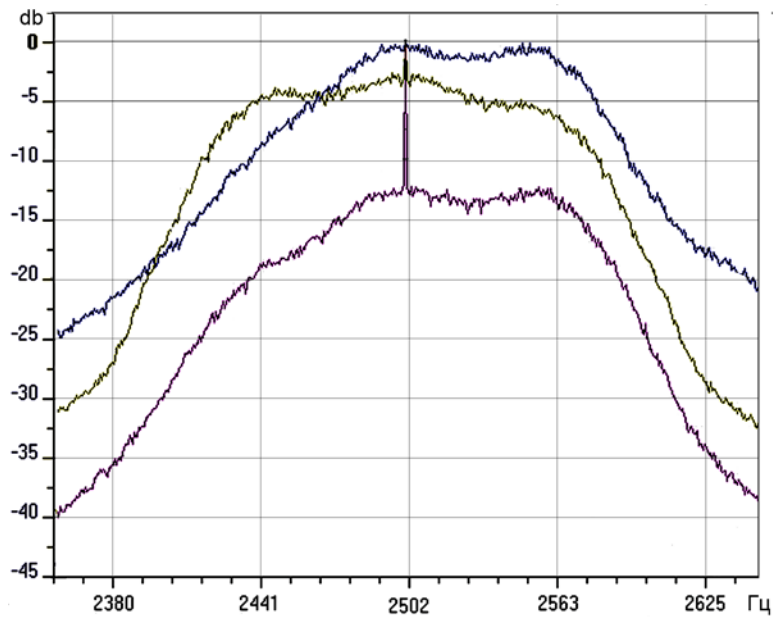


Рис. 5. То же, что на рис. 4, при давлении 0,3 атмосферы ($u_{gy} = 22.9\text{см/с}$)

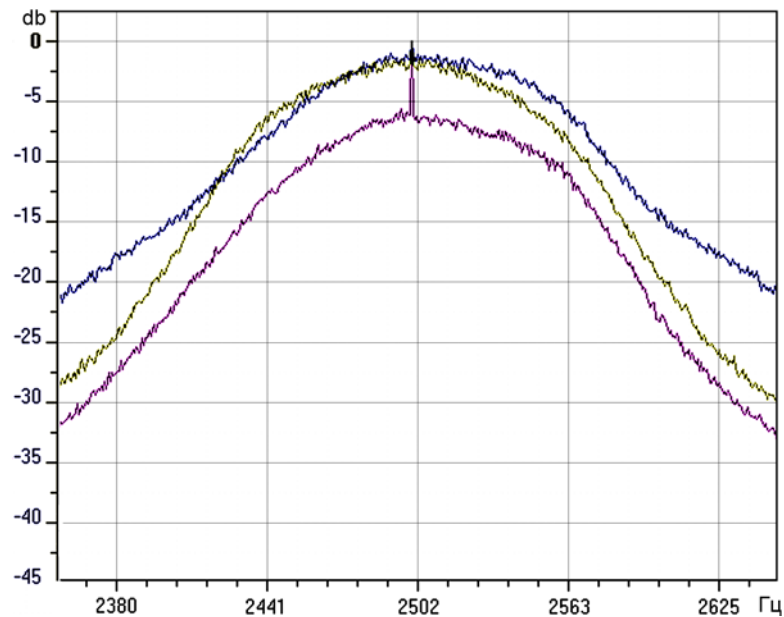


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при давлении 0,5 атмосферы ($u_{gy} = 0$)

Из представленных рисунков видно как происходила трансформация спектра ветровых гравитационно-капиллярных волн при воздействии всплывающих пузырьков. Вначале групповая скорость, по мере увеличения расхода воздуха и, соответственно, роста количества пузырей на поверхности, уменьшалась с 46.1 см/с (рис. 3) до 22.9 см/с (рис. 5). Затем при увеличении избыточного давления до 0,5 атмосфер произошла полная блокировка ряби мелкими пузырьками ($u_{gh} = 0$) (рис. 6).

Выводы

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе натурных испытаний микроволнового трехчастотного скаттерометра, показал перспективность его использования для получения информации о скорости поверхностных течений, скорости приповерхностного ветра и индикации на морской поверхности выхода потоков газовых пузырьков естественного и искусственного происхождения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №05-02-16384-а, грант №06-05-64600).

Литература

1. V. I. Tatarskii . “On the possibility of measuring the phase velocity, group velocity, and dispersion parameter of surface waves by means of coherent amplitude-modulated radar” , Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2004, Vol. 18, No. 4, pages 429-435.