

***Исследование дисперсионных
характеристик гравитационно-
капиллярных волн на поверхности
жидкости
(результаты натуральных экспериментов
2006-07 гг.)***

**М.Г. Булатов¹⁾, М.Д. Раев¹⁾, Е.И. Скворцов¹⁾,
А.В. Смирнов²⁾, В.И. Татарский²⁾**

¹⁾Институт космических исследований РАН 117977, Москва, Профсоюзная ул. 84/32.
Факс: 7-495-333-10-56, Тел.: 7-495-333-35-33. E-mail: mbulatov@mx.iki.rssi.ru

²⁾Radio-Hydro-Physics, LLC.325, Broadway, Boulder, CO, 80305-3328 , USA

- Работа выполнена в соответствии с рамочным соглашением о проведении фундаментальных научных исследований и экспериментов в областях экологического прогнозирования и охраны окружающей среды с использованием технологий дистанционного зондирования на основе некоммерческого и безвозмездного сотрудничества между ИКИ РАН и Radio-Hydro-Physics, Boulder, CO, USA

Цель работы

- 1-Создание нового микроволнового прибора для измерения дисперсионных характеристик поверхностного волнения
- 2-Исследование связи дисперсионных характеристик, измеряемых микроволновыми методами, с наличием различных факторов (течения, ветер, пленки, турбулентность различной природы и т.п.)

Измеряемые параметры:

а) Фазовая скорость

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

б) Групповая скорость

$$u_{gr}(q) = \frac{d\omega_s}{dq} \quad (2)$$

в) Дисперсионный параметр

$$D = \frac{du_{gr}}{dq} = \frac{d^2\omega_s}{dq^2} \quad (3)$$

ω_s и q - частота и волновое число поверхностной волны, связанные дисперсионным соотношением

$$\omega_s = f(q).$$

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.*, Vol. 18, No. 4, pages 429-435, 2004.

$$\omega, \quad \omega^+ = \omega + \Omega, \quad \omega^- = \omega - \Omega.$$

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

ω несущая частота, Ω частота модуляции m коэффициент модуляции.

:

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

$$\frac{m}{2} \cos\left(\mathbf{n} \frac{\omega - \Omega}{c} \mathbf{R} - (\omega - \Omega)t\right)$$

R, \mathbf{n} ,-вектор, определяющий точку падения волны и единичный вектор

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

ϑ - угол скольжения падающей волны

доплеровские сдвиги $\delta\omega_0$, $\delta\omega_{\pm}$ в спектре отраженного сигнала связаны с излучаемыми частотами дисперсионным соотношением

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

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

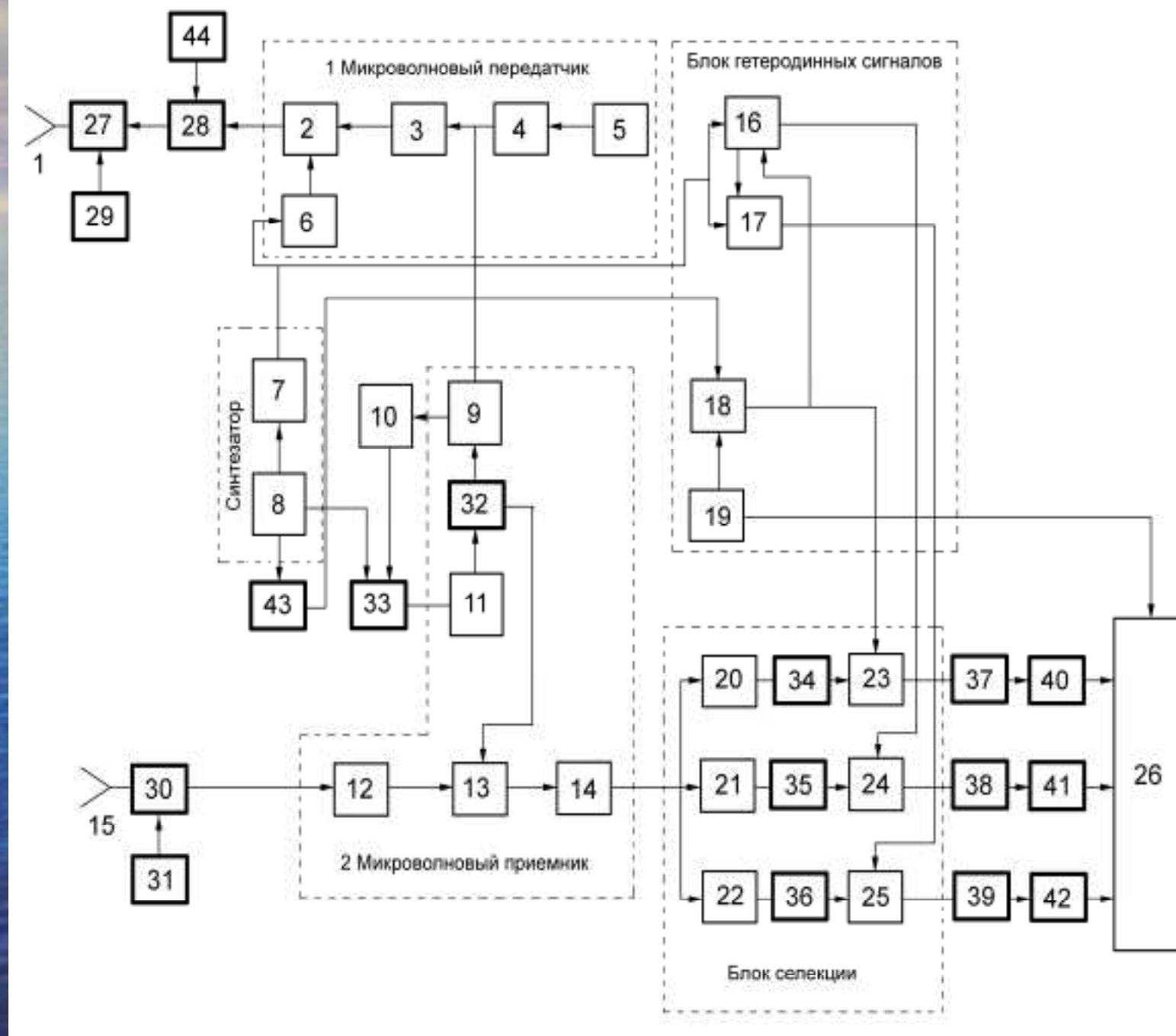
Интересующие нас параметры (1-3) могут быть записаны в виде:

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

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

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

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 500мГц. 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 1100мГц. 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.

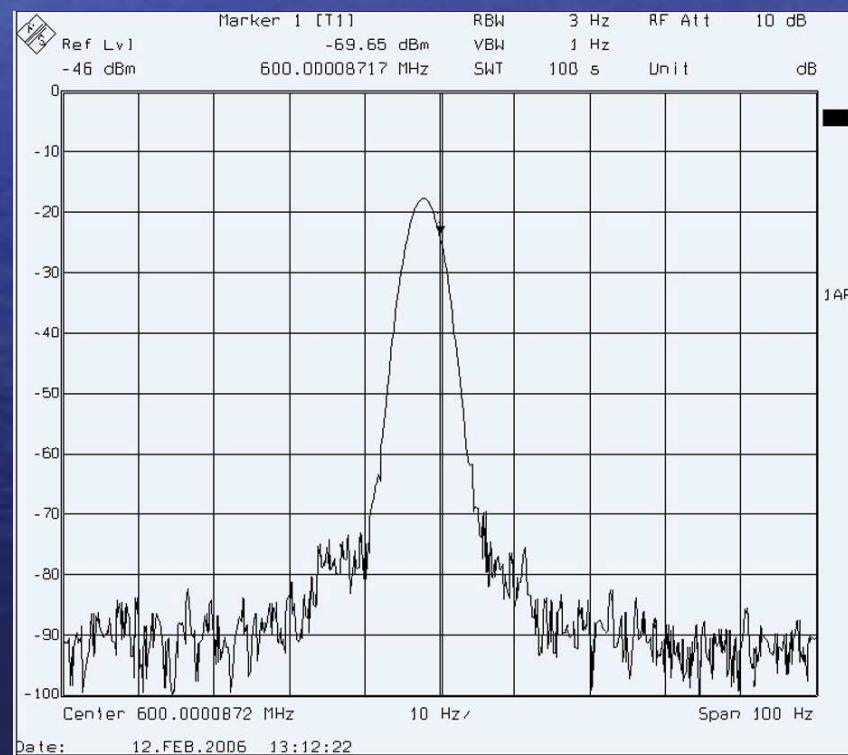
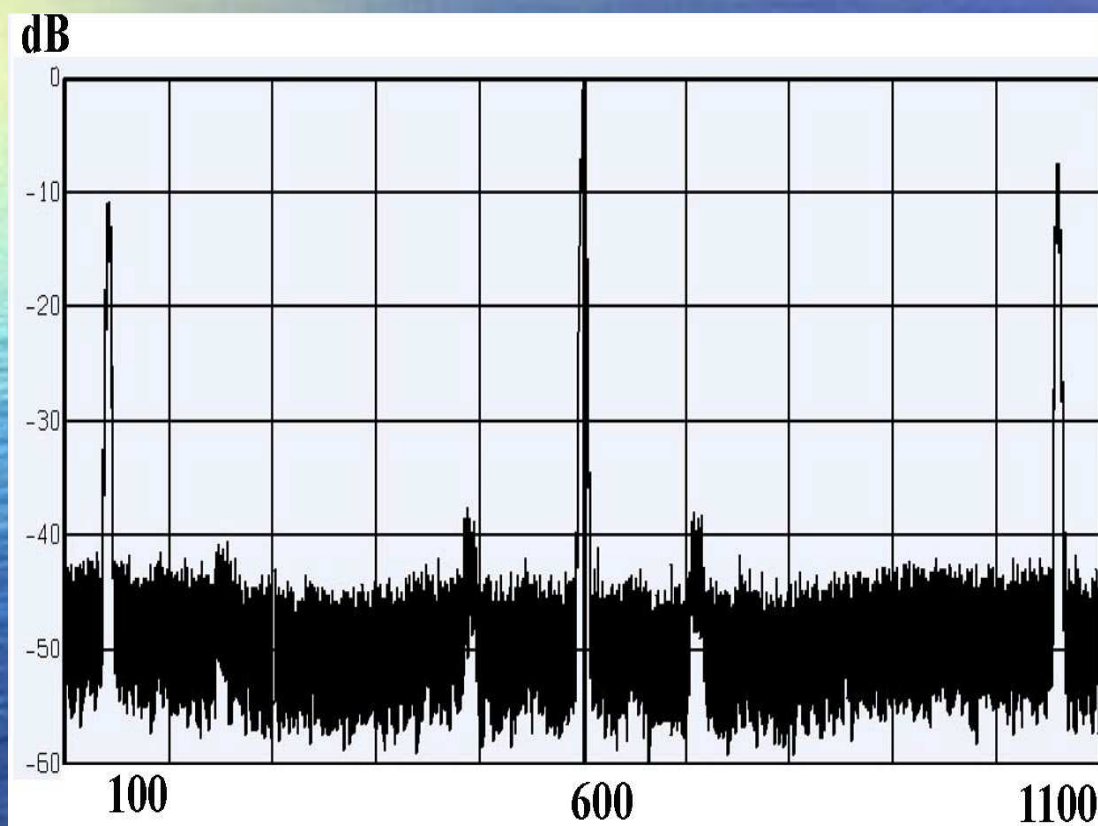
В приборе предусмотрены два режима переключения поляризации излучаемых и принимаемых сигналов: ручной и автоматический с частотой 1Гц.

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

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.

Спектр выходного сигнала



Внешний вид прибора



Геленджик, октябрь 2006



Гленвуд, январь 2007



+ 23⁰С

+(20-22⁰С)

2-3м/с

$Ri > 0$

Температура воздуха

Температура воды

Скорость ветра, U_{10}

Число Ричардсона

-10⁰С

+(40-50⁰С)

2-3м/с

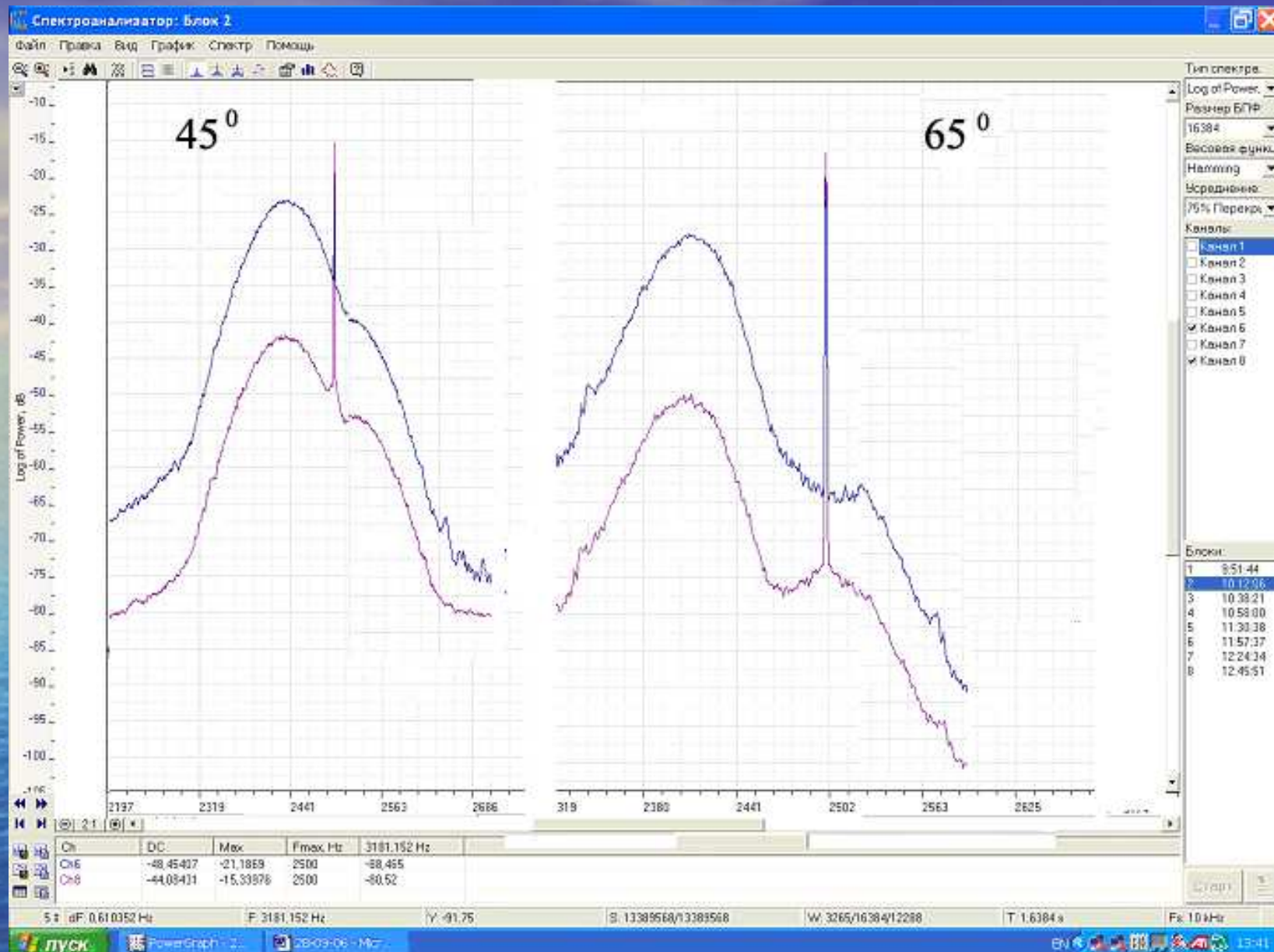
$Ri < 0$

Углы зондирования (45⁰ – 75⁰)

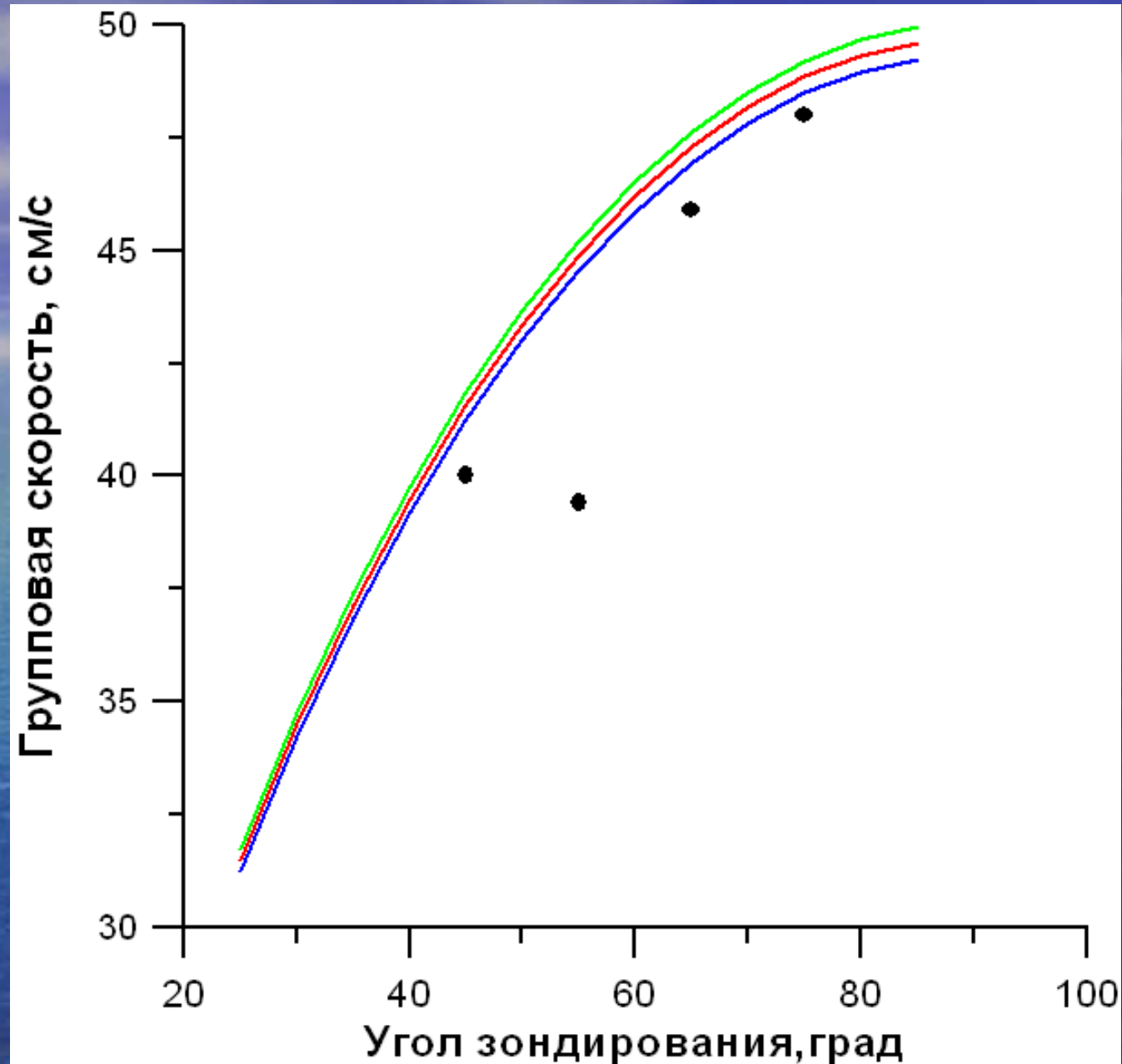
Размеры элемента разрешения (при 45⁰)

A=1.2м, B=0.7м

A=1.2м, B=0.7м



- Доплеровские спектры, полученные на верхней и нижней частотах при двух значениях угла зондирования
- (антенны направлены по ветру, скорость ветра 3-5 м/с)

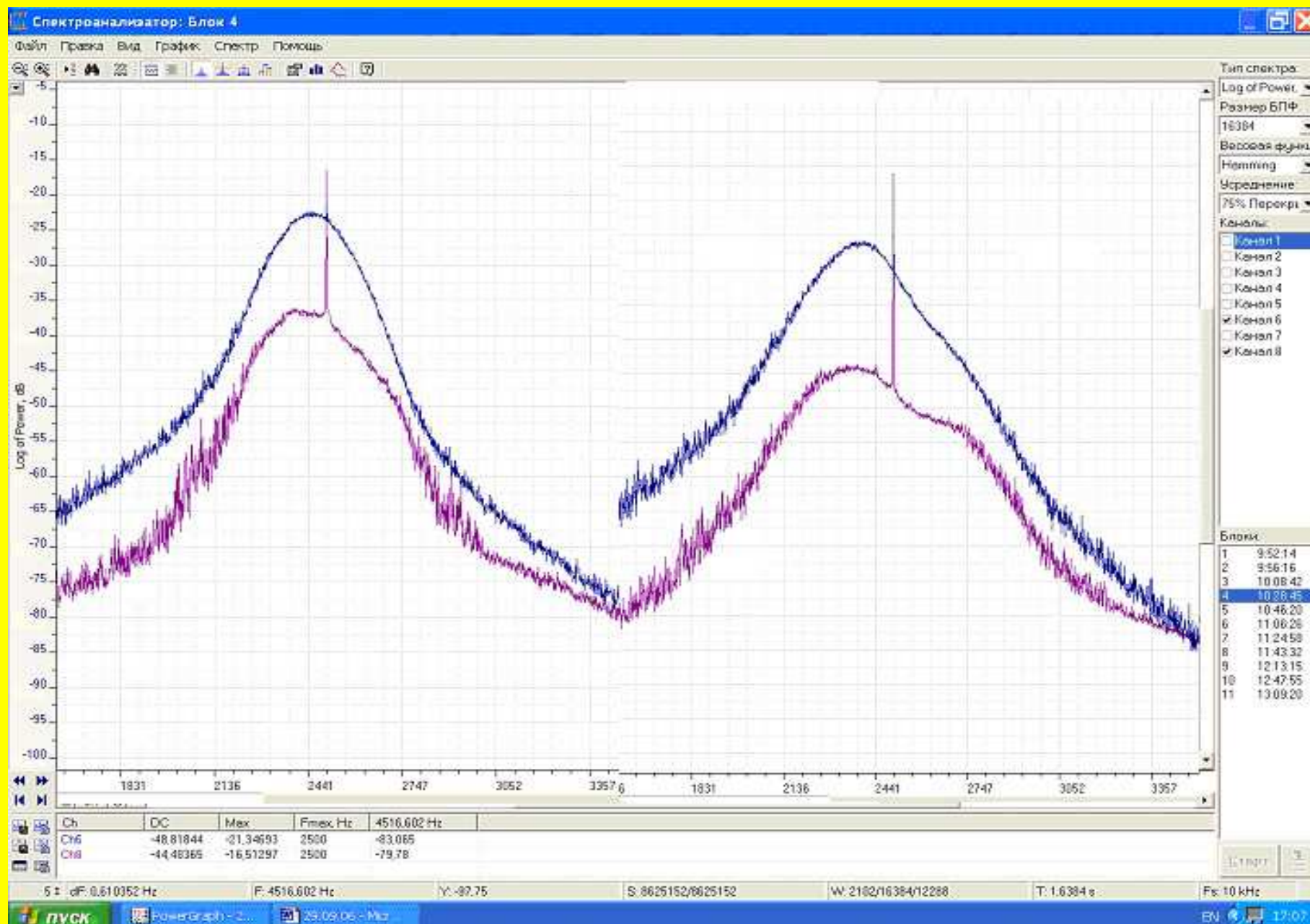


- Расчетные (сплошные линии) и экспериментальные (точки) значения групповых скоростей, определенные при различных значениях углов зондирования
- (зеленая линия соответствует минимальному, красная – среднему, синяя – максимальному значению длины волны резонансной компоненты)

Геленджик. 29.09.06. Ветер дул с юго-юго-востока (с моря) со скоростью 5-7м/с (порывы до 9м/с). Волнение 2-3 бала. Обрушения волн. Слабая зыбь с юга. Направление визирования – юг (против ветра и зыби). Измерения производились на вертикальной поляризации.

А) Угол места 35 градусов

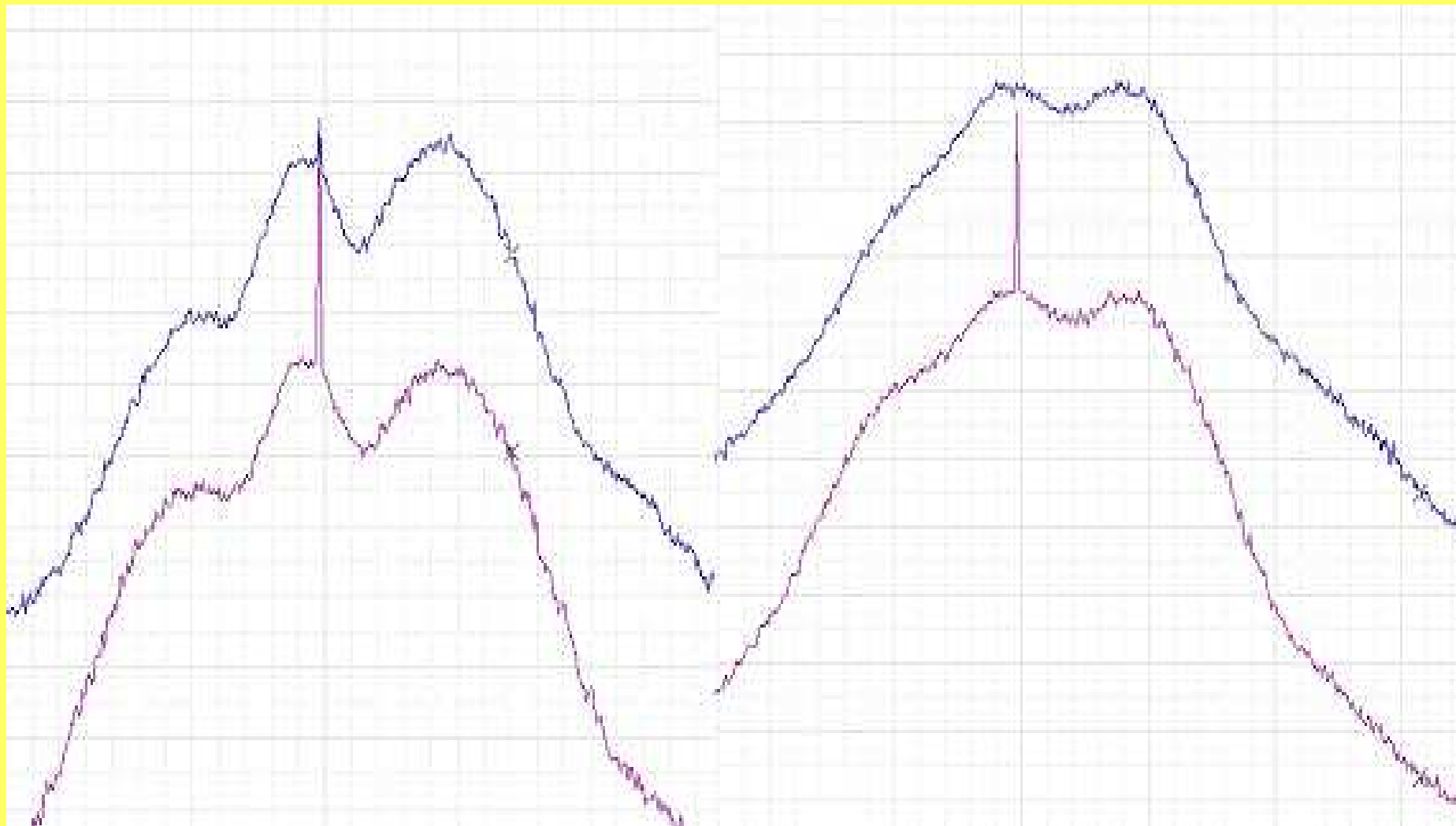
Б) Угол места 65 градусов



Геленджик. 10.10.06. . Ветер северный 5-6м/с, порывистый. Длина разгона 200метров. Направление зондирования - по ветру. Угол места – 42 градуса. Поляризация VV.

А) Фоновый файл.

**Б) Диаметр пузырей 0.8-1.0 мм
глубина погружения 0.3м.
0.1-атмосферы**



Выводы

- Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе натурных испытаний микроволнового трехчастотного прибора, показал возможность получения на их основе информации о скорости поверхностных течений, скорости приповерхностного ветра и индикации на морской поверхности выхода потоков газовых пузырьков естественного и искусственного происхождения.