

СВОЙСТВА ДОПЛЕРОВСКИХ СПЕКТРОВ ОТРАЖЕННОГО МИКРОВОЛННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ МАЛЫХ УГЛАХ ПАДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ РЕЧНОГО ТЕЧЕНИЯ

*Ковалдов Д.А. (1), Рябкова М. С. (2), Титченко Ю.А. (2), Караев В.Ю. (2), Мешков Е. М. (2),
Зуйкова Э.М. (2)*

(1) ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

(2) Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

2021 г.

Схема провидения эксперимента

На Нижегородском метромосту через реку Ока располагались два когерентных доплеровских радиолокатора (далее радиолокатор 1 и 2), направленные вдоль и против течения реки. Схема измерения показана на рис. 1; параметры радиолокаторов приведены в Таблице.

Данная постановка эксперимента позволяет не только рассмотреть зависимости характеристик доплеровского спектра отражённого сигнала от азимутального угла (от 0 до 360), но и рассмотреть разные случаи формирования волнения.

Таблица. Характеристики доплеровских радиолокаторов

№ радиолокатора	Длина волны, мм	Частота, ГГц	Диаграмма направленности
1	9.7	30.9	6×6°
2	8.4	35.7	4×4°

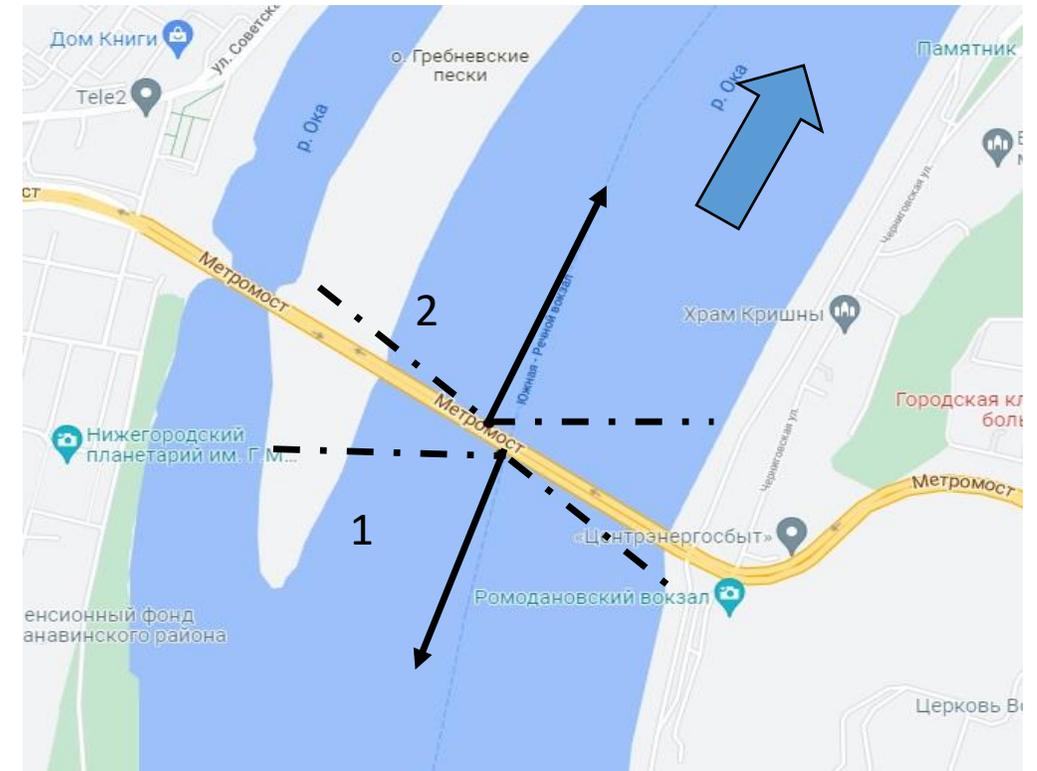


Рис. 1. Схема эксперимента. Чёрными стрелками показаны направления зондирования 90° и 274°, пунктиром предельные азимутальные углы, синяя стрелка показывает направление течения.

Реализация экспериментальной установки

В зависимости от направления ветра возможна реализация 4 ситуаций, показанных на Рис.2:

1. направление ветра совпадает с направлением течения и отражение происходит от переднего склона волны;
2. направление ветра против течения и отражение происходит от переднего склона;
3. направление ветра против течения и отражение происходит от заднего склона;
4. направление ветра совпадает с направлением течения и отражение происходит от заднего склона.

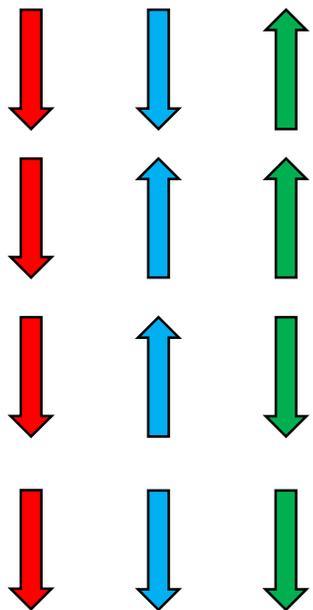


Рис.2 схема направлений ветра, течения и направления зондирования



Рис.3. Радиолокатор №1 (сверху) «смотрящий» вверх по течению и радиолокатор 2 (снизу) направленный вниз по течению.

Реализация экспериментальной установки

На радиолокаторы дополнительно установлены камеры, для визуальной регистрации и оценки интенсивности и направления распространения поверхностного волнения (рис.4).

Для удаленного управления работой поворотного механизма и радиолокатора используется мобильный интернет. На рис. 5 показан интерфейс программы управления на мониторе оператора. В ходе измерений оператор задает азимутальный угол , угол падения и время работы каждого радиолокатора.



Рис.4. Фотография с камеры радиолокатора 1.

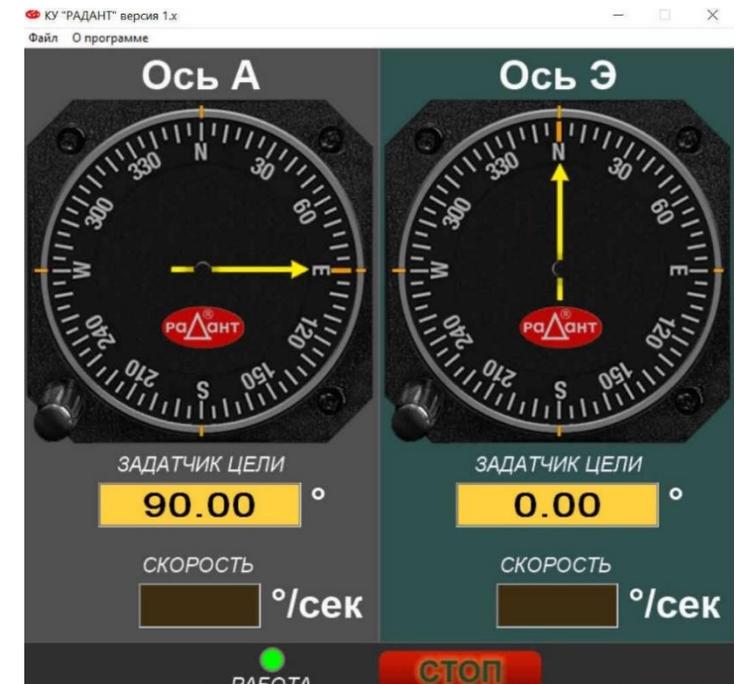


Рис.5. Интерфейс программы управления системой поворота локатора .

Для построения зависимости характеристик доплеровского спектра (ДС) требовалось определить нулевой угол падения. Для этого были проведены измерения смещения ДС с шагом в один градус по элевации (углу падения) для обоих радиолокаторов. При строго вертикальном зондировании смещение ДС должно быть равно нулю. Результаты серии экспериментов показаны на рис.6

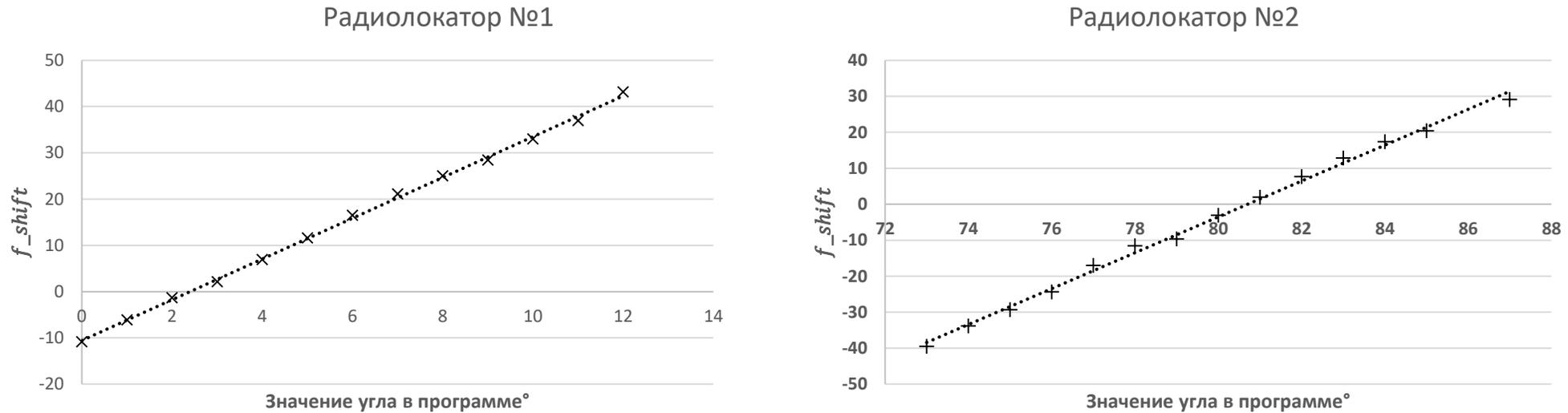


Рис.6. Зависимости смещения ДС от элевации в управляющей программе.

Выполнив линейную аппроксимацию полученных зависимостей, определили 0° и нашли необходимую коррекцию: для радиолокатора №1 - 2.4° и радиолокатора №2 – 80.7° . Значения для радиолокатора 2 связано с особенностями в настройке управления поворотным механизмом. При дальнейшем анализе использовались скорректированные значения углов падения.

Схема измерений

Для описания измеренных доплеровских спектров отражённого сигнала в наших экспериментах мы рассматривали ширину спектра (ΔF) и смещение (f_{shift}), рассчитываемые следующим образом:

$$f_{shift} = \frac{\int f S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} \text{ и } \Delta F = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} - f_{shift}^2},$$

но только ширины и смещения недостаточно для однозначного описания характеристик доплеровского спектра в силу возможности сильного отличия его формы от гауссовой. Таким образом дополнительно рассматривались коэффициенты асимметрии A и эксцесса E :

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \text{ и } E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3.$$

Где μ_n центральный n -ый момент распределения случайной величины.

Так же мы будем рассчитывать ширину ДС через старшие статистические моменты:

$$\Delta F_{42} = \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_2}}$$

Экспериментальные результаты

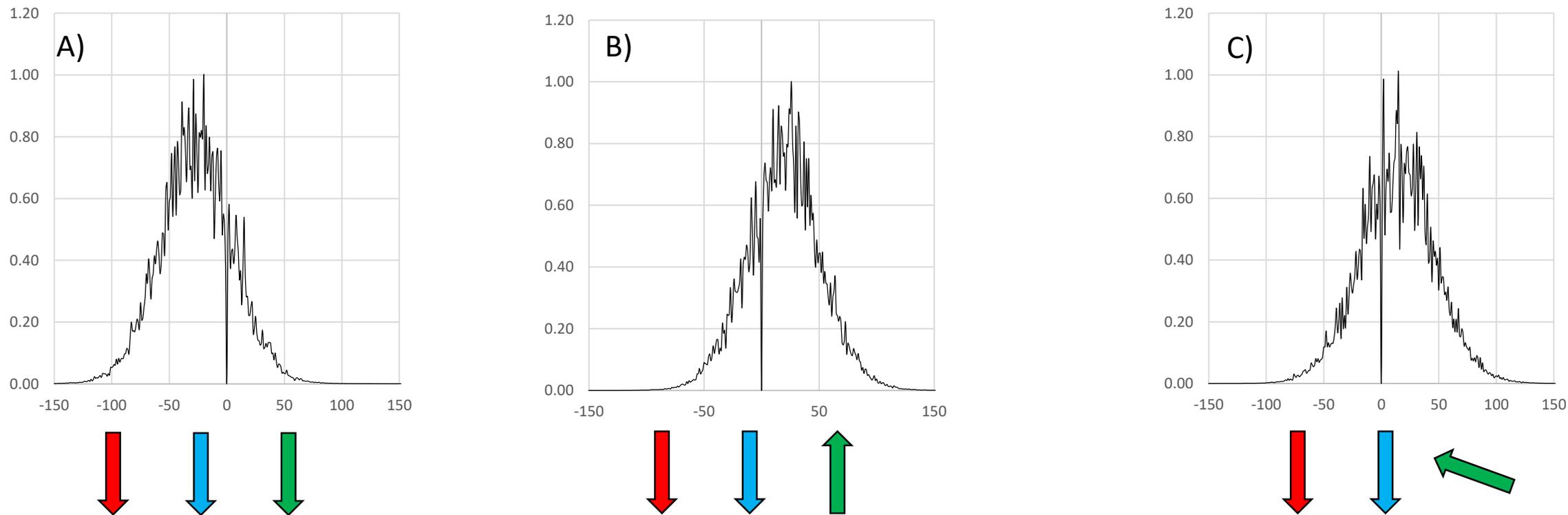


Рис.7. Отражённые доплеровские спектры для 1 («А») и 4 («В») случая. Измерения были выполнены при угле падения $\theta = 5^\circ$ и направлении зондирования перпендикулярно мосту, т.е. при азимутальном угле 90° . В случае «С» зондирование выполнялось при азимутальном угле 150° (60° от перпендикуляра). Ветер над поверхностью достигал 7 м/с.

Другие характеристики

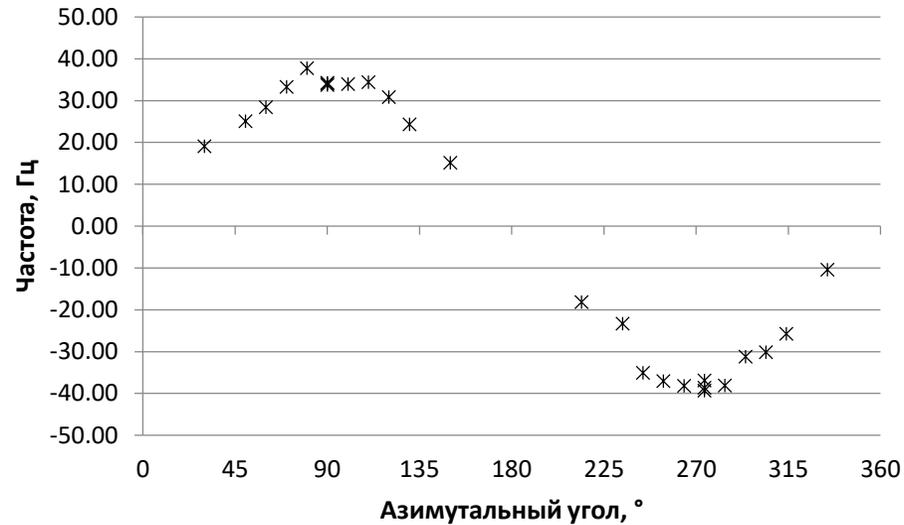


Рис.8. Зависимость смещения от азимутального угла.

Ветер дул практически под 90° по азимуту (юго-западный), течение так же считалось перпендикулярно мосту, 274° - зондирование против течения, 90° - по течению

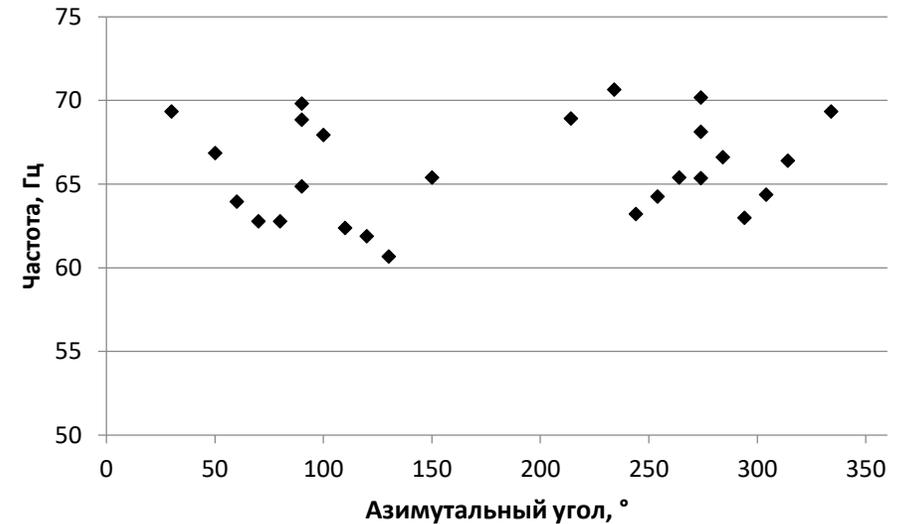


Рис.9. Зависимость ширины ДС от азимутального угла

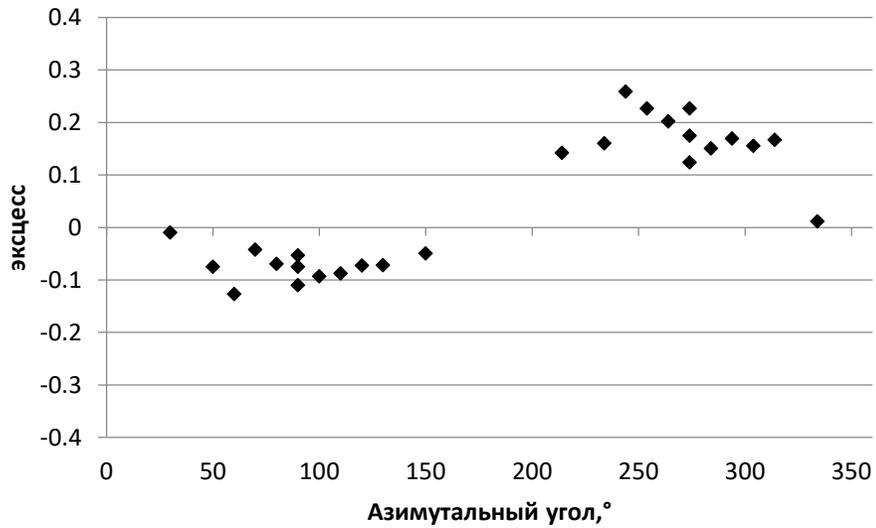


Рис.10. Зависимость коэффициента асимметрии от азимутального угла.

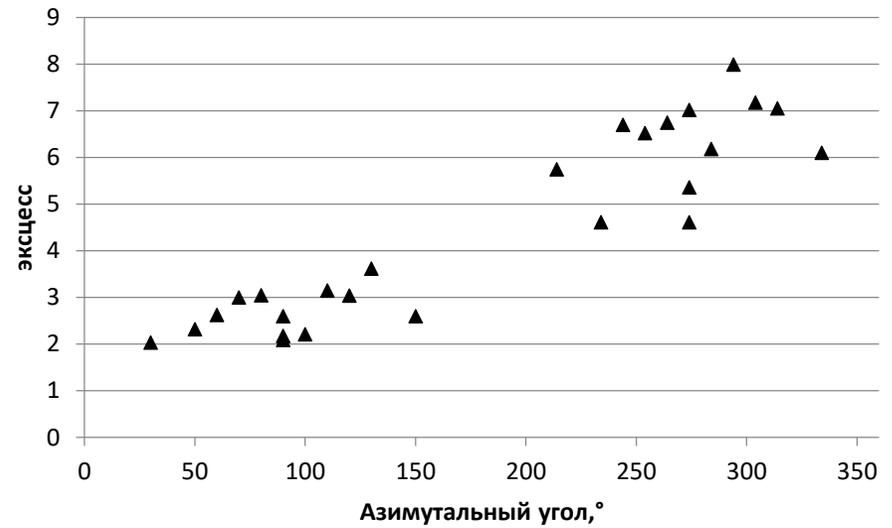


Рис.11. Зависимость коэффициента эксцесса от азимутального угла.

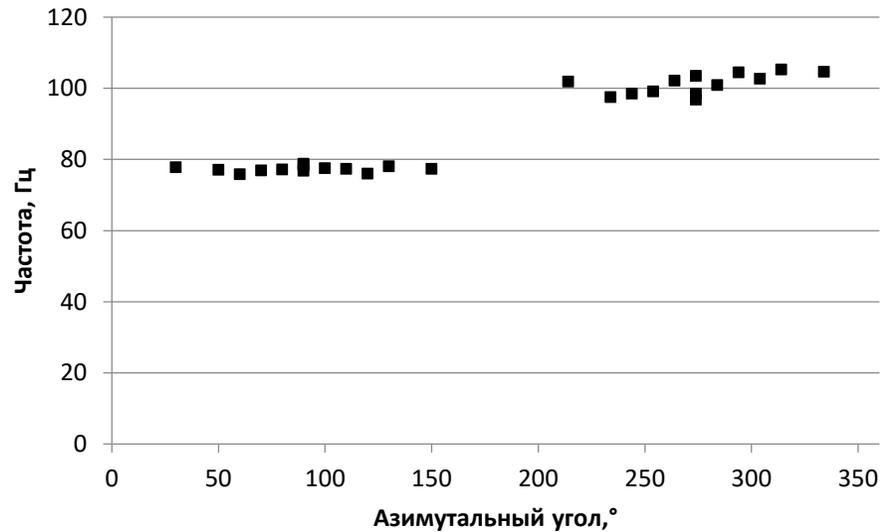


Рис.12. Зависимость ширины доплеровского спектра рассчитанной по четвертому и второму моменту от азимутального угла.

Заключение

Создана экспериментальная установка «Река» позволяющая проводить измерения при малых углах падения в режиме удаленного управления.

Проведена серия измерений азимутальных зависимостей характеристик ДС отраженного сигнала в октябре 2021 г. Впервые синхронные измерения ДС, выполненные при малых углах падения, охватывают практически все азимутальные углы.

Анализ данных показал следующие свойства ДС: 1) ширина ДС оказалась нечувствительной к азимутальному углу, 2) ДС остаются достаточно симметричными, но коэффициент эксцесса сильно зависит от направления зондирования, 3) ширина ДС, вычисленная через 2 и 4 моменты, также чувствительна к направлению зондирования, 4) азимутальная зависимость смещения ДС оказалось не настолько несимметричной, как можно было предполагать.

В ходе дальнейших экспериментов будут проведены измерения для всех 4 возможных ситуаций и исследовано влияние скорости ветра на свойства ДС.