



Свойства доплеровского спектра радиолокационного СВЧ-сигнала, отраженного морской поверхностью при малых углах падения

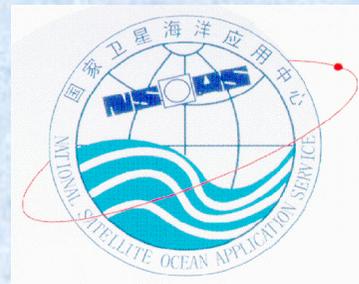
**В.Караев , М.Рябкова, М.Панфилова,
Ю.Титченко, Е.Мешков**

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Введение

29 октября 2018 в 8:43 утра по местному времени из центра запуска спутников Цзюцюань состоялся запуск ракеты РН CZ-2С.

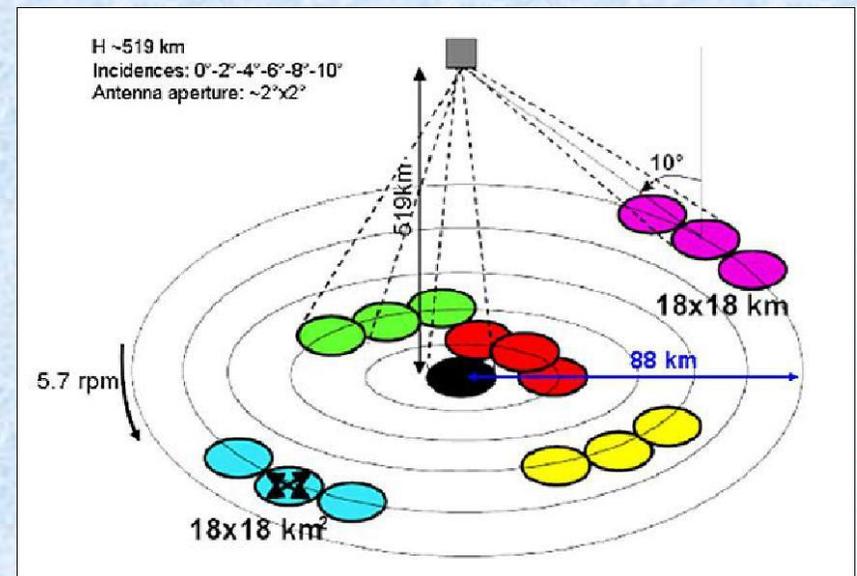
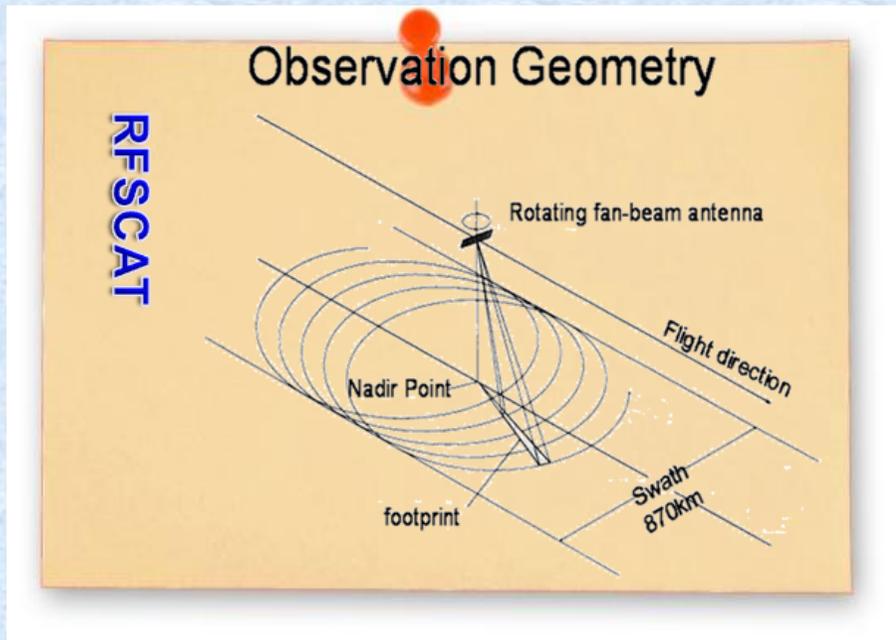
Спутник CFOSAT был выведен на солнечно-синхронную орбиту с высотой 520 км.



Совместный проект стартовал 26 марта 2014 года, когда CNES и CNSA (China National Space Administration) подписали соглашение.

CFOSAT mission

Wind and wave observations from space: A Chinese-French mission



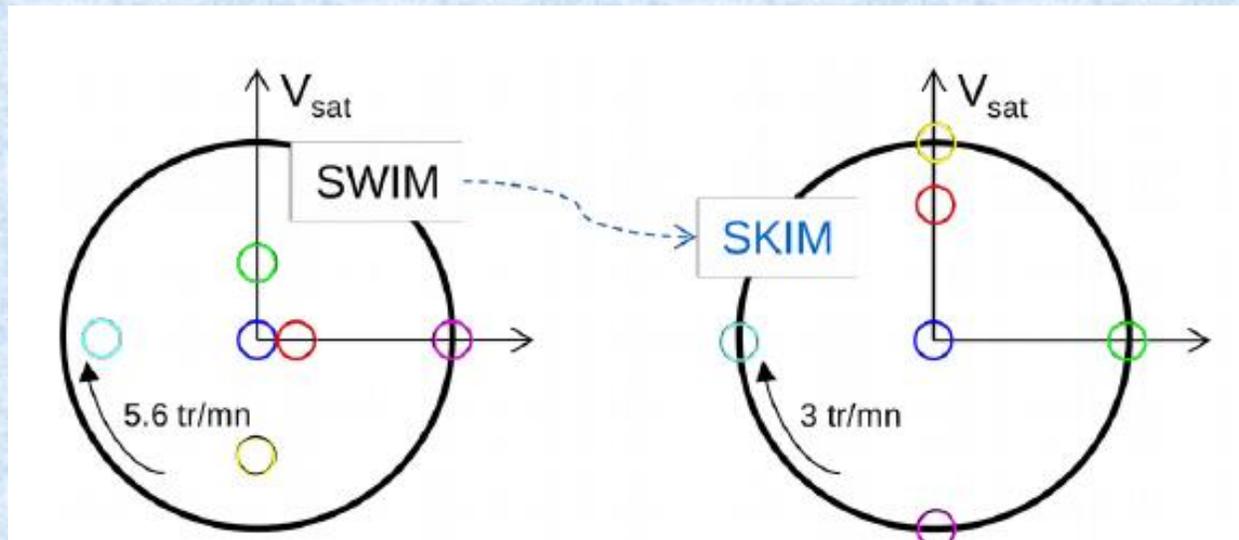
Ku-RFSCAT: Ku-диапазон,
скаттерометр RFSCAT (Китай).
Число наблюдений ветровой ячейки
от 4 до 9 (летные испытания в 2016)

радиолокатор SWIM – спектрометр

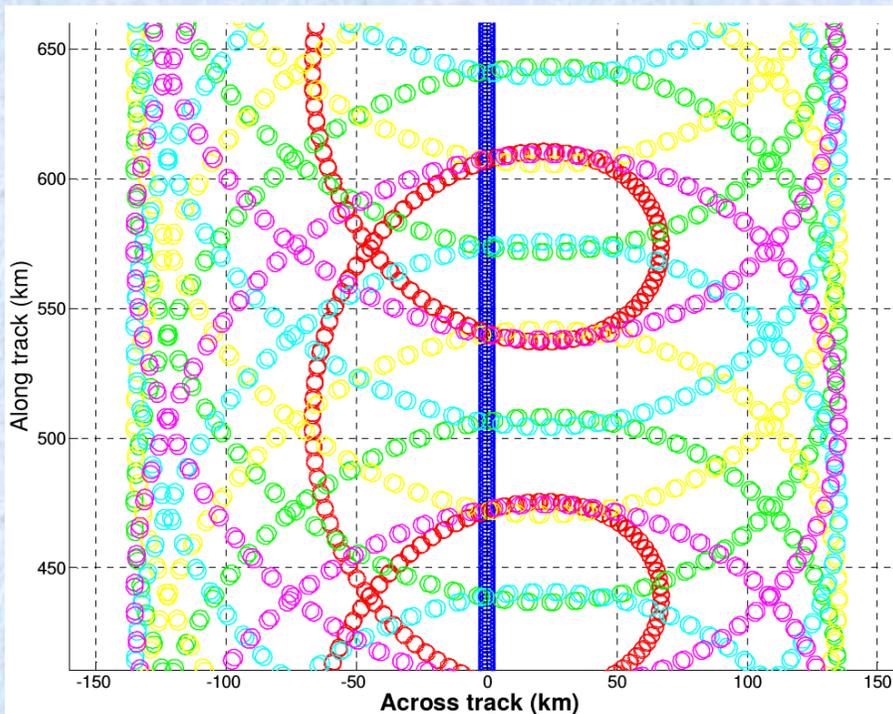
Введение

Проект SKIM

Sea surface Kinematic
Multiscale monitoring



Сравнение схем измерений SWIM и SKIM



В развитие проекта CFOSAT с установленным на борту радиолокационным комплексом SWIM в ESA обсуждается возможность реализации похожего проекта, направленного на измерение глобального поля течений.

Наиболее значимые технические решения скаттерметра МЕТЕОР-МП (2011)

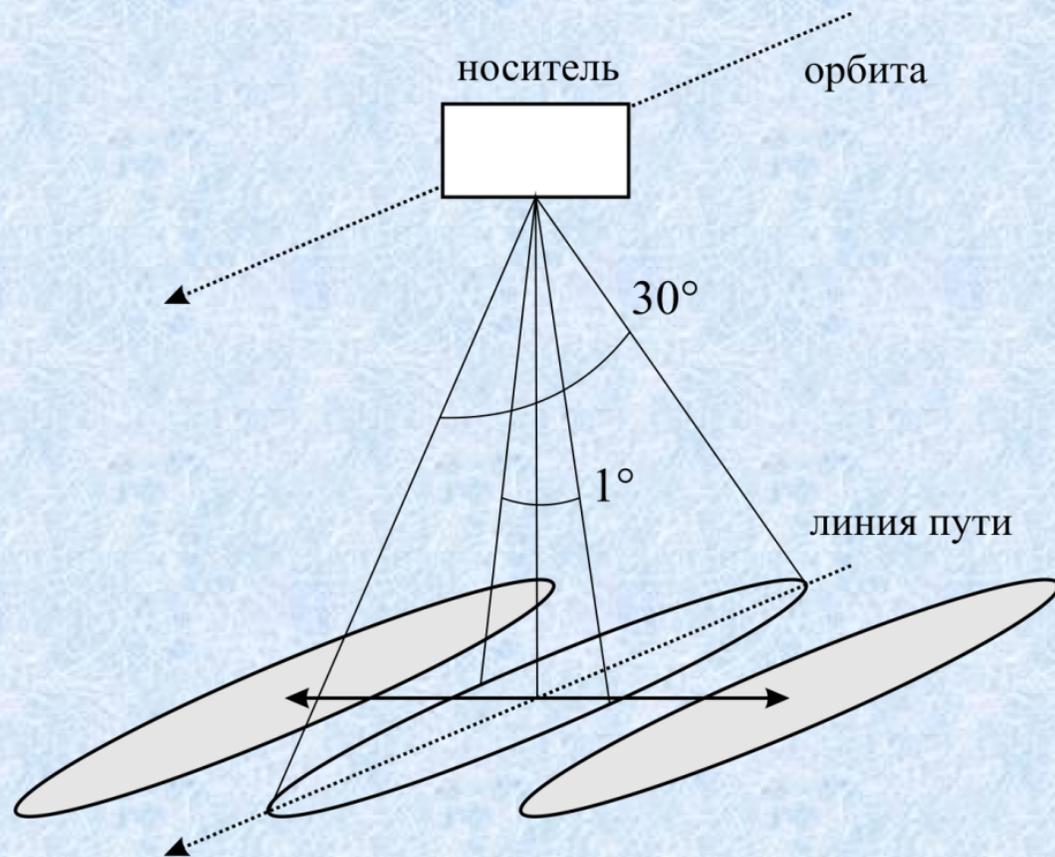


Направления совершенствования	Какими техническими решениями обеспечивается
Решение новых задач по формированию поля волнения : 1) измерение дисперсии наклонов волнения; 2) измерение высоты значительного волнения 3) оценка средней длины и периода волнения;	КВЗ : совмещение функций скаттерметра и радиоальтиметра в одной антенной системе
Решение доп. задач : влажность почвы, характеристики льда, снега и др.	КНЗ : одновременные измерения УЭПР для поляризаций ВВ и ГГ под одинаковыми углами падения
Повышение точности измерения параметров приводного ветра	1) КВЗ : устранение вблизнадирной неопределенности при определении направления ветра (геометрия измерений), обеспечение определения параметров ветра в прибрежной зоне (меньший размер ячейки); 2) КНЗ : повышение точности определения параметров ветра (увеличение количества измерений УЭПР в ячейке).

Введение

Основной целью Космического Эксперимента является разработка методов дистанционного зондирования Земли для получения новой информации о морском волнении и определения скорости ветра над поверхностью Мирового океана в канале вблизи надирного зондирования.

Для проведения эксперимента будет разработан и изготовлен радиолокатор (длина волны 0,03 м) с ножевой диаграммой направленности антенны ($1^\circ \times 30^\circ$) на основе активной фазированной антенной решётки.



Декабрь 2013 – начало подготовки ТЗ на КЭ

Ноябрь 2014 – согласовано ТЗ на эксперимент, начало согласования ТЗ на НА

.....
Декабрь 2016 – согласовано ТЗ на НА

Январь 2018 – начало работ по КЭ (эскизный проект)

.....
2022-2023 – установка НА на МКС

Содержание доклада

1. Теоретическая модель доплеровского спектра для малых углов падения

2. Численный эксперимент

3. Натурный эксперимент (2016)

4. Обработка радиолокационных данных и сравнение с теоретической моделью

5. Выводы

2. Теоретическая модель

При построении модели рассеяния электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью классические подходы: метод Кирхгофа и метод возмущений не работают во всем интервале углов падения.

Один из вариантов – двухмасштабная модель рассеивающей поверхности

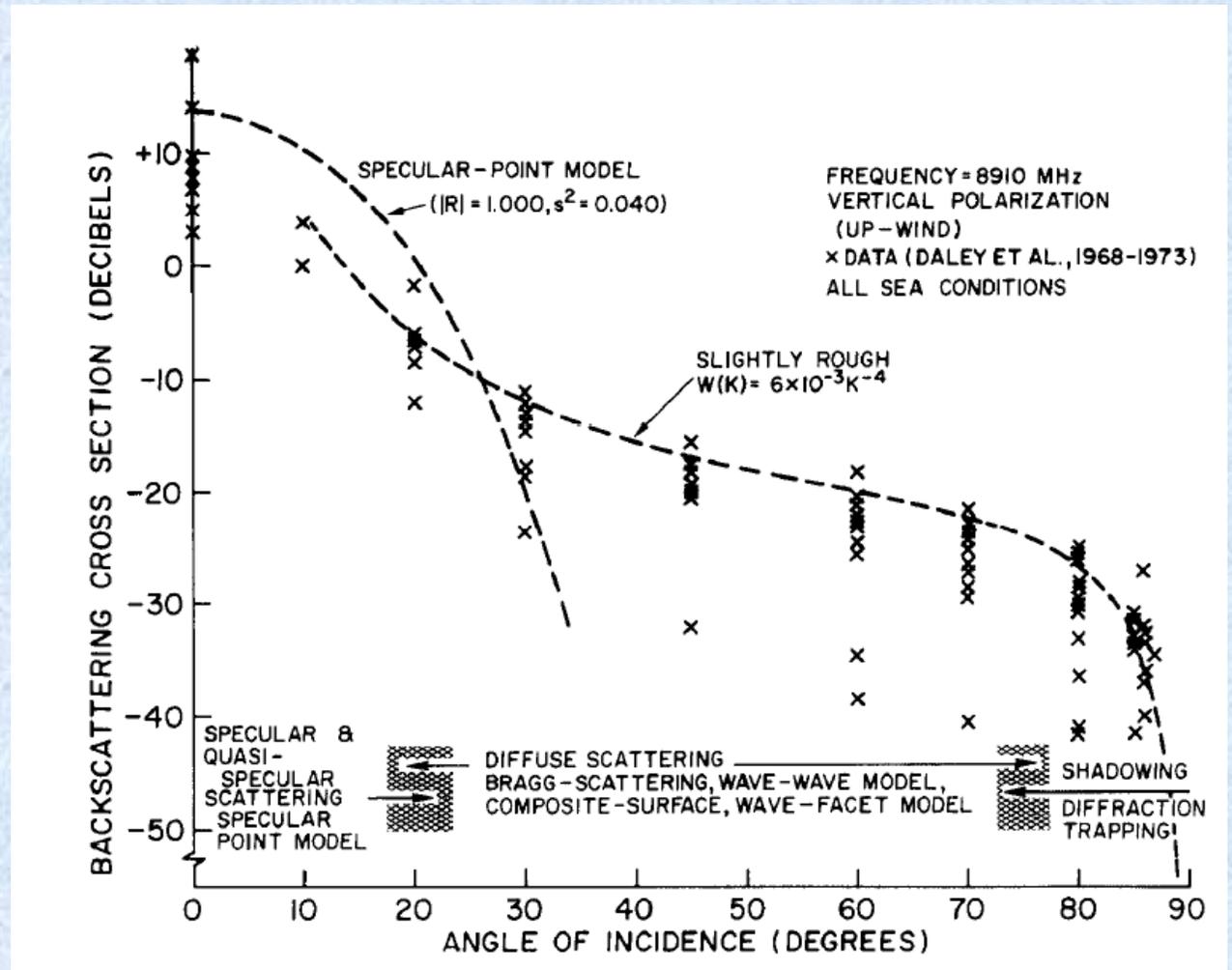


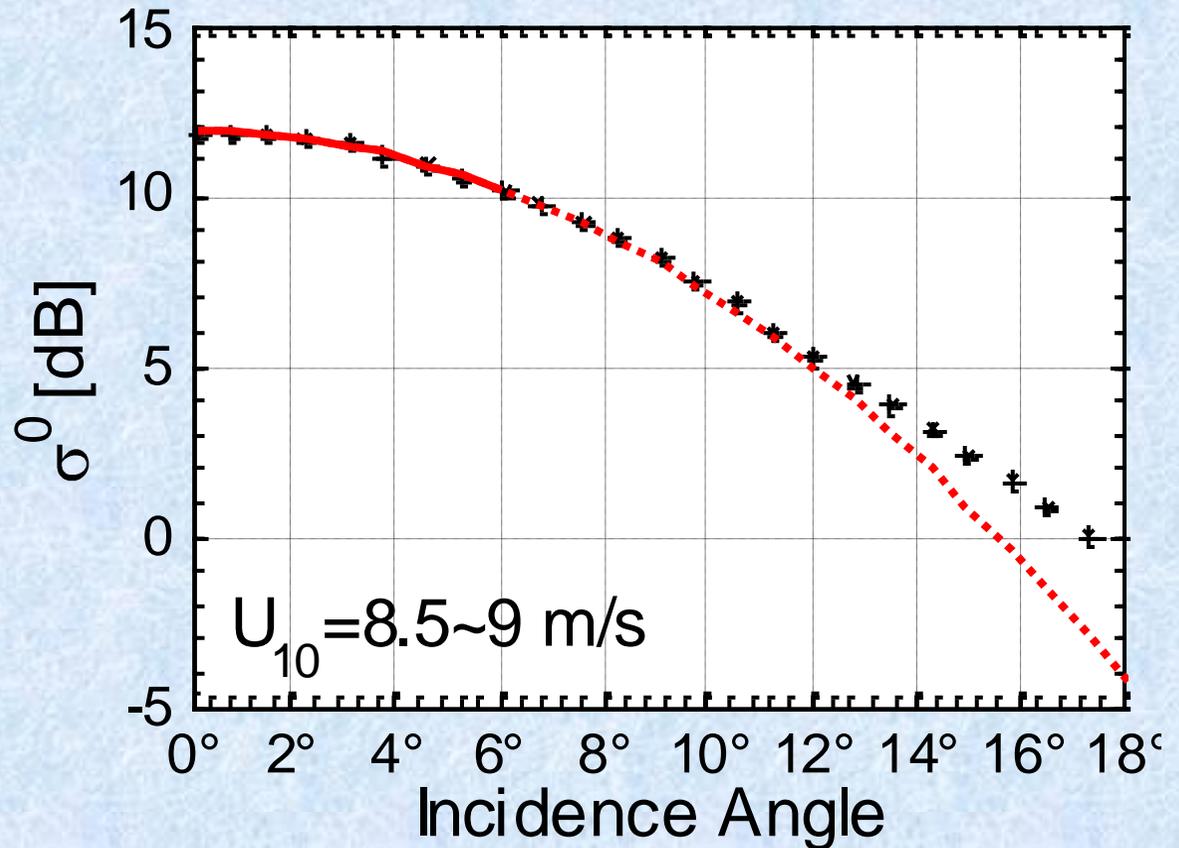
Иллюстрация зависимости механизмов рассеяния от угла падения (Valenzuela, 1978)

2. Теоретическая модель

При малых углах падения для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны сечение обратного рассеяния задается следующей формулой:

$$\sigma_0 \cong \frac{|R_{eff}(U_{10})|^2}{2\cos^4\theta_0\sigma_{xx}\sigma_{yy}} \exp\left[-\frac{\text{tg}^2\theta_0}{2\sigma_{xx}^2}\right]$$

где σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 - дисперсии наклонов крупномасштабного волнения вдоль оси X и Y соответственно; θ_0 - угол падения.



Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для скорости ветра в интервале от 8,5 м/с до 9 м/с: сравнение модельных оценок и экспериментальных данных (дождевой радиолокатор)

2. Теоретическая модель

В результате проведенного теоретического анализа была получена формула для доплеровского спектра отраженного радиолокационного СВЧ-сигнала ($V=0$):

$$\begin{aligned}
 S(\omega) = & \frac{\sqrt{\pi} \cdot |R_{\text{эфф}}(U_{10})|^2}{2k \cos^4 \theta_0 \sqrt{\alpha_{n0}} \sqrt{a_{x0} a_{y0}} \sqrt{\alpha_{v0} \alpha_{r0}} \sqrt{\omega_S}} \times \\
 & \times \exp\left(-\frac{\text{tg}^2 \theta_0}{2\alpha_{n0}} \left[\sigma_{xx}^2 \sin^2 \varphi_0 + \sigma_{yy}^2 \cos^2 \varphi_0 + 2K_{xy} \sin \varphi_0 \cos \varphi_0 \right]\right) \\
 & \times \exp\left(\frac{\text{tg}^2 \theta_0}{4} \left[\frac{(1 - \cos^2 \varphi_0 \sin^2 \theta_0)^2 \alpha_0^2 \delta_x^2}{11,04 \cdot a_{x0} \alpha_{v0} \cos^2 \theta_0} + \frac{A_{z0}^2 \delta_y^2}{2,76 \cdot a_{y0} \alpha_{r0}} \right]\right) \times \\
 & \times \exp\left(-\frac{(k\omega_t + \omega)^2}{4k^2 \omega_S}\right)
 \end{aligned}$$

2. Теоретическая модель

Пусть смотрим зондирование вдоль оси X, т.е. угол $\varphi_0 = 0$.

$$f_{sh}(\Gamma y) = -\frac{\sin \theta_0}{\lambda} \left[\frac{2K_{xt}}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\sigma_{xx}^2 \alpha_{y0} \alpha_p}{2\alpha_{n0}} - \frac{\alpha_{u0} \alpha_0 \delta_x^2 \cos \theta_0}{11,04 \cdot \alpha_{v0}} + \frac{A_{s0} A_{z0} \delta_y^2}{5,52 \cdot \alpha_{r0} \cos \theta_0} \right]$$

$$\Delta f_{10}(\Gamma y) = \frac{4\sqrt{\ln 10}}{\lambda} \left[\frac{2 \cos^2 \theta_0 \alpha_t}{\sigma_{xx}^2} - \frac{\cos^2 \theta_0 \alpha_p^2 \sigma_{xx}^2}{2\alpha_{n0}} + \frac{\alpha_{u0}^2 \delta_x^2 \cos^2 \theta_0}{11,04 \cdot \alpha_{v0}} + \frac{A_{s0}^2 \delta_y^2}{11,04 \cdot \alpha_{r0}} \right]^{1/2}$$

$$\omega_s = \frac{2\alpha_t \cos^2 \theta_0}{\sigma_{xx}^2} - \frac{\sigma_{xx}^2 \alpha_p^2 \cos^2 \theta_0}{2\alpha_{n0}} + \frac{\alpha_{u0}^2 \delta_x^2 \cos^2 \theta_0}{11,04 \alpha_{v0}} + \frac{A_{s0}^2 \delta_y^2}{11,04 \alpha_{r0}} \quad \alpha_{r0} = 1 + \frac{\sigma_{xx}^2 \cdot \delta_y^2}{5,52 \alpha_{n0}} \cos^2 \theta_0 \quad \alpha_0 = \frac{2}{\sigma_{xx}^2 \cos \theta_0} + \frac{K_{xy}}{\alpha_n \cos \theta_0}$$

$$\omega_t = \frac{2K_{xt} \sin \theta_0}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\sigma_{xx}^2 \alpha_p \alpha_{y0} \sin \theta_0}{2\alpha_{n0}} - \frac{\alpha_{u0} \alpha_0 \delta_x^2 \cdot \text{tg} \theta_0 \cos^2 \theta_0}{11,04 \cdot \alpha_{v0}} + \frac{A_{s0} A_{z0} \delta_y^2 \text{tg} \theta_0}{5,52 \cdot \alpha_{r0}} \quad \alpha_{v0} = 1 + \frac{\sigma_{xx}^2 \delta_x^2}{5,52 \alpha_{n0}} \quad A_{s0} = \frac{\sigma_{xx}^2 \alpha_p}{\alpha_{n0}}$$

$$\alpha_p = 2K_{yt} + \frac{2K_{xy} K_{xt}}{\sigma_{xx}^2} \quad \alpha_{u0} = \frac{2K_{xt}}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\alpha_p K_{xy}}{\alpha_{n0}} \quad \alpha_{n0} = \sigma_{xx}^2 \cdot \sigma_{yy}^2 - K_{xy}^2$$

$$\alpha_{y0} = \frac{2K_{xy}}{\sigma_{xx}^2} \quad A_{z0} = -\frac{\sigma_{xx}^2 \alpha_{y0}}{2\alpha_{n0} \cos \theta_0} \quad \alpha_t = \sigma_{tt}^2 \cdot \sigma_{xx}^2 - K_{xy}^2 \quad \alpha_0 = \frac{2}{\sigma_{xx}^2 \cos \theta_0} + \frac{\alpha_{y0} K_{xy}}{\alpha_{n0} \cos \theta_0}$$

2. Теоретическая модель

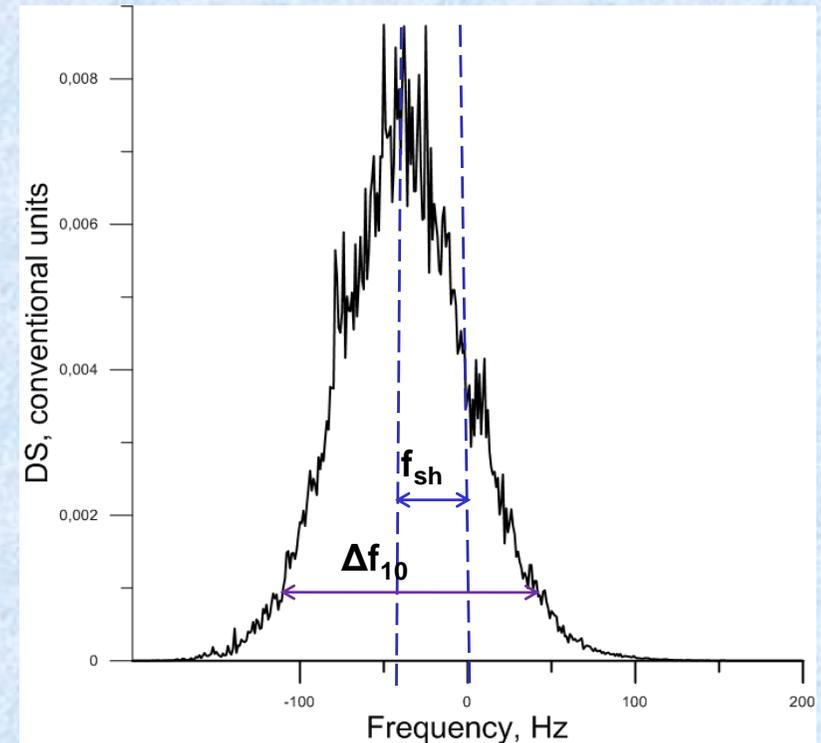
Для описания доплеровского спектра будем использовать следующие характеристики: смещение, ширина

$$f_{sh} = \frac{1}{2\pi} \frac{\int \omega \cdot S_{Dop}(\omega) d\omega}{\int S_{Dop}(\omega) d\omega}$$

$$\omega_S = \sqrt{\frac{1}{(2\pi)^2} \frac{\int \omega^2 S_{Dop}(\omega) d\omega}{\int S_{Dop}(\omega) d\omega}} - f_{sh}^2$$

$$\Delta f_{10} = \sqrt{\ln 10} \omega_S$$

Кроме того, для описания формы ДС будем использовать коэффициенты **асимметрии и эксцесса**.



2. Теоретическая модель

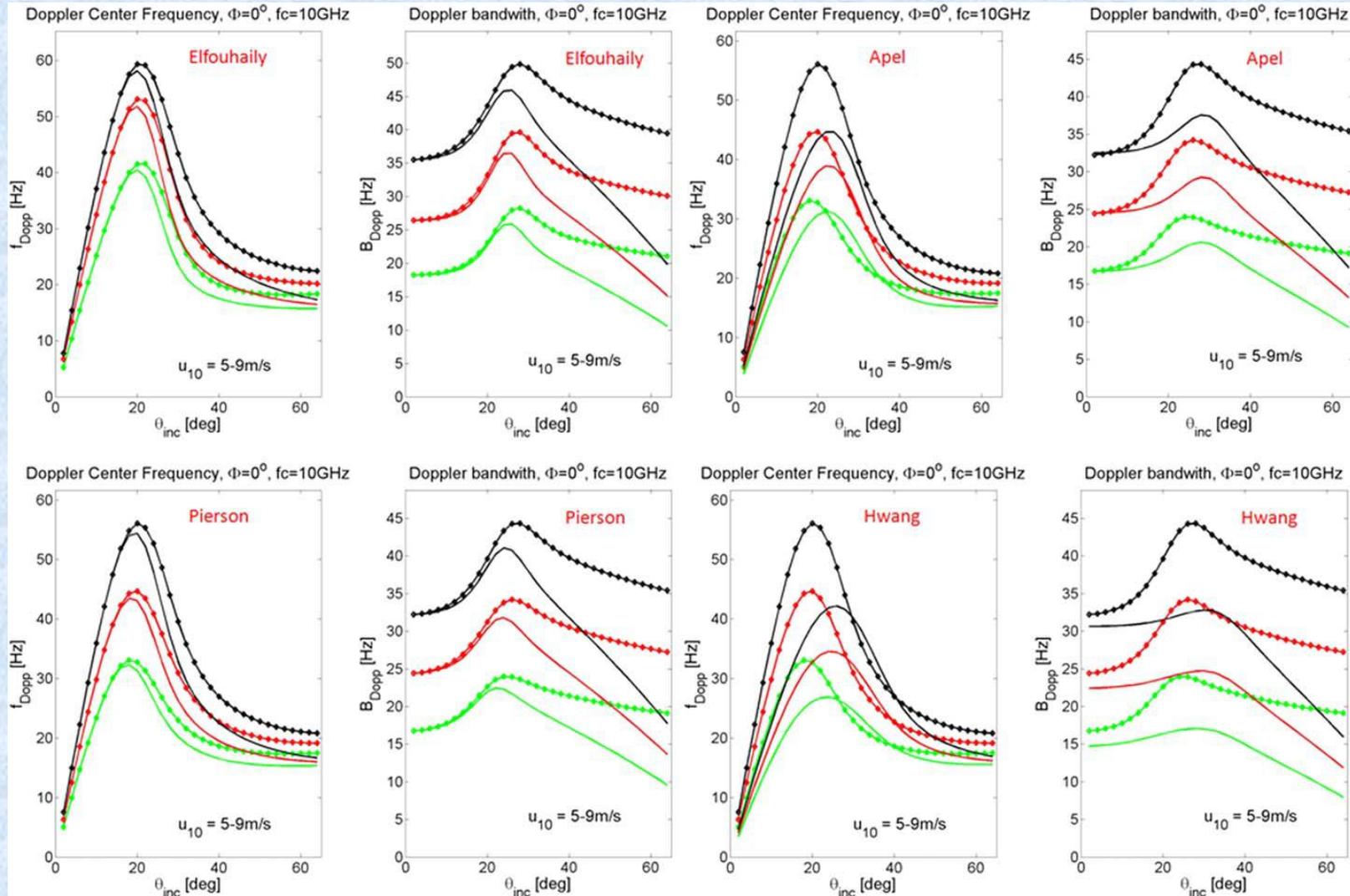
Область малых углов падения является наименее исследованной экспериментально. Для исследования свойств ДС можно выполнять

1. численное моделирование процесса рассеяния – наиболее известными являются работы Топоркова

2. счет по моделям рассеяния.

Fois, F., P. Hoogeboom, F.L. Chevalier, and A. Stoffelen (2015), An analytical model for the description of the full polarimetric sea surface Doppler signature, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 988–1015, doi:10.1002/2014JC010589.

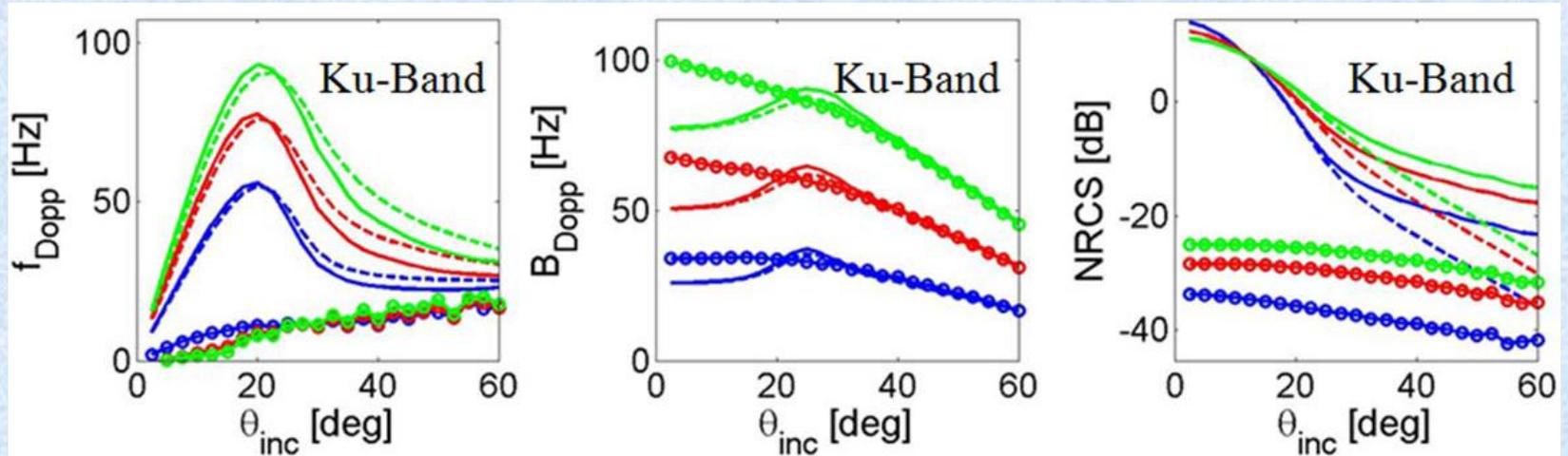
2. Теоретическая модель



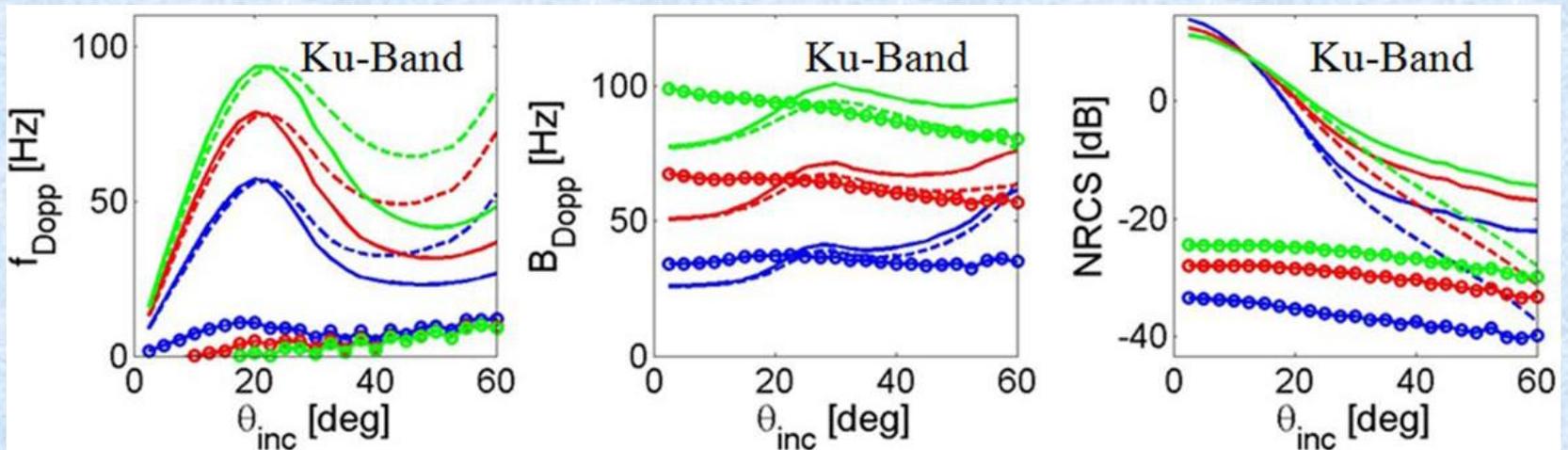
Для вычислений использовался метод Кирхгофа и метод Кирхгофа с Choppy Wave Model (KA-CWM)

2. Теоретическая модель

SSA2-Linear



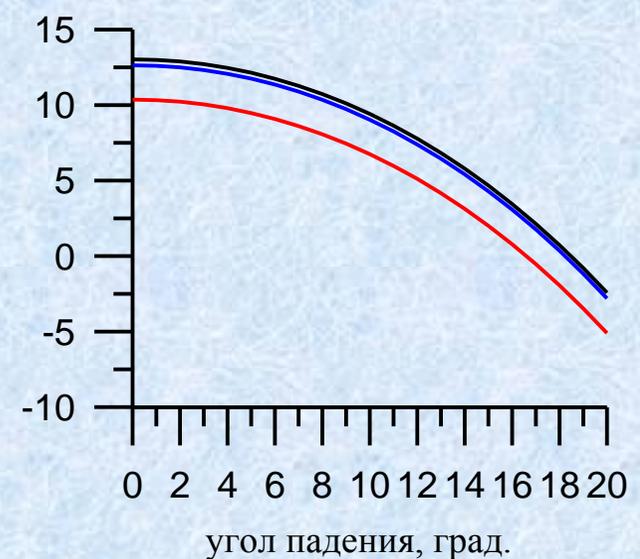
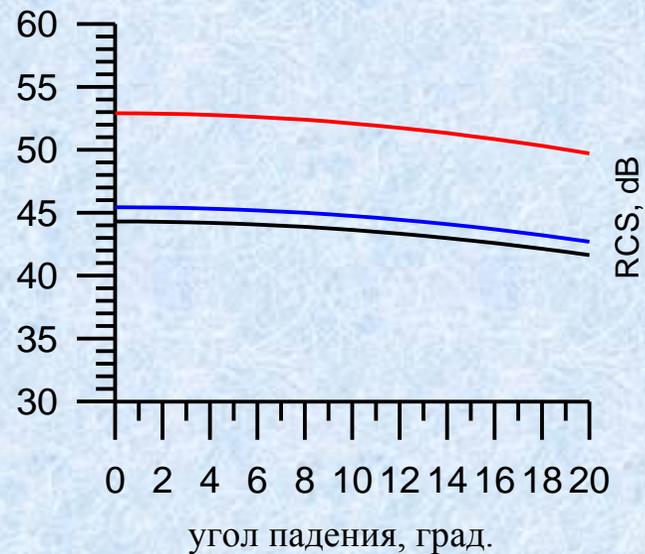
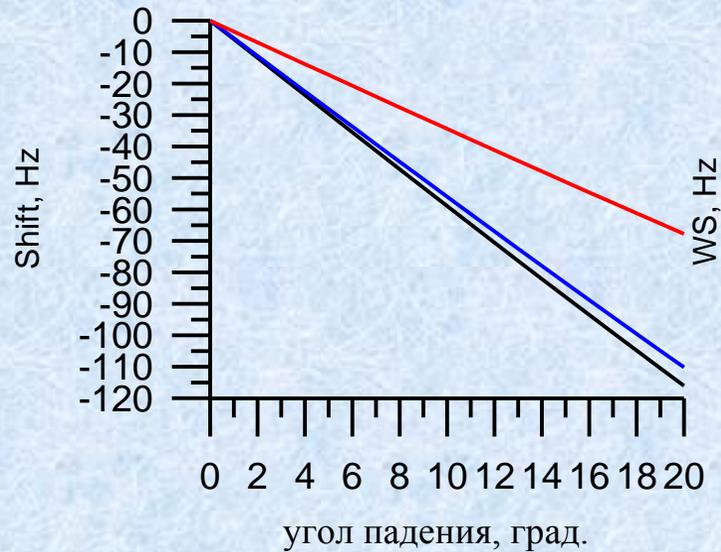
SSA2-Nonlinear



Зеленая кривая – 13 м/с, красная – 9 м/с, синяя – 5 м/с
Пунктир – ГГ, сплошная – ВВ, кружки - ГВ

2. Теоретическая модель

Длина волны – 8 мм, скорость ветра 5 м/с, безразмерный разгон 5000



Черная кривая = диаграмма направленности антенны 1 x 1

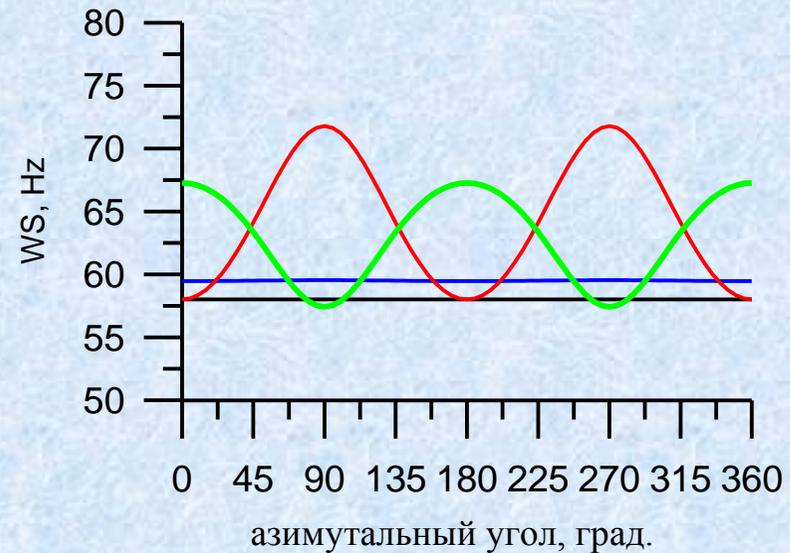
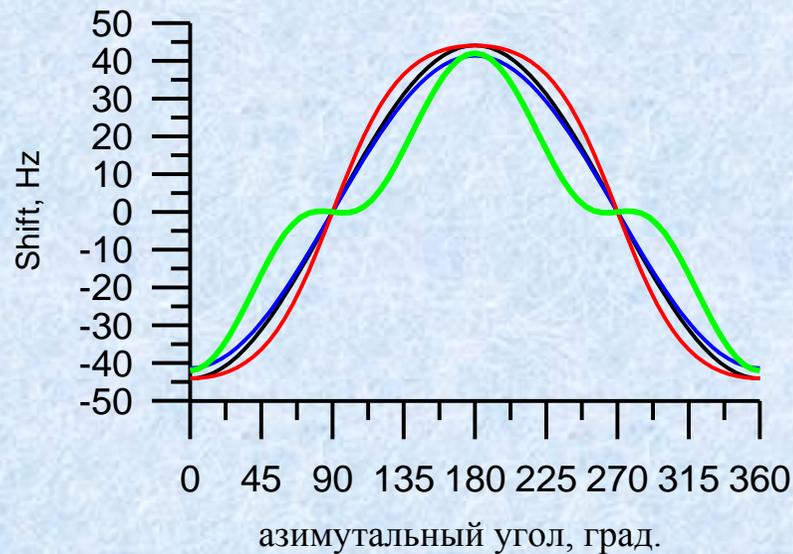
Синяя кривая = диаграмма направленности антенны 6 x 6

Красная кривая = диаграмма направленности антенны 30 x 1

2. Теоретическая модель

Длина волны – 8 мм, скорость ветра 5 м/с, безразмерный разгон 20170

Угол падения 5,68



Черная кривая = диаграмма направленности антенны 1 x 1

Синяя кривая = диаграмма направленности антенны 6 x 6

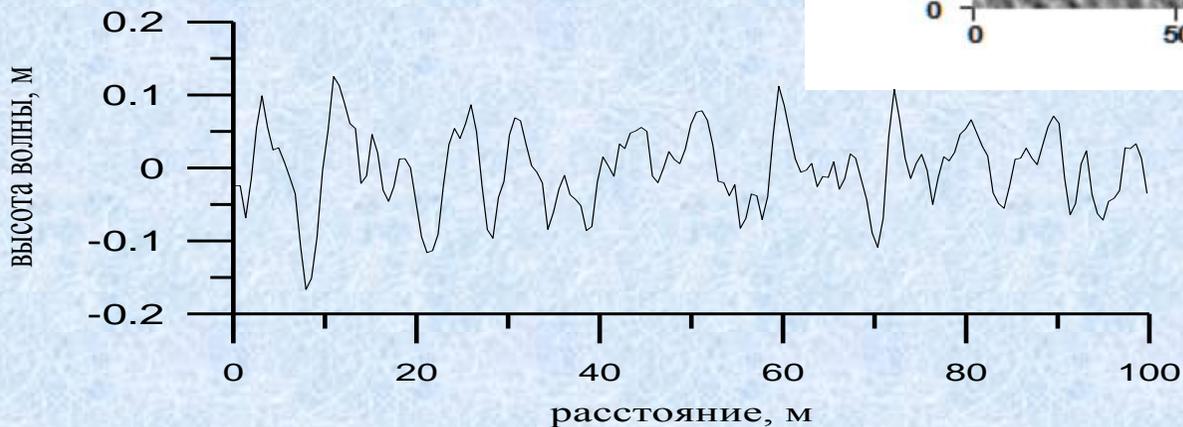
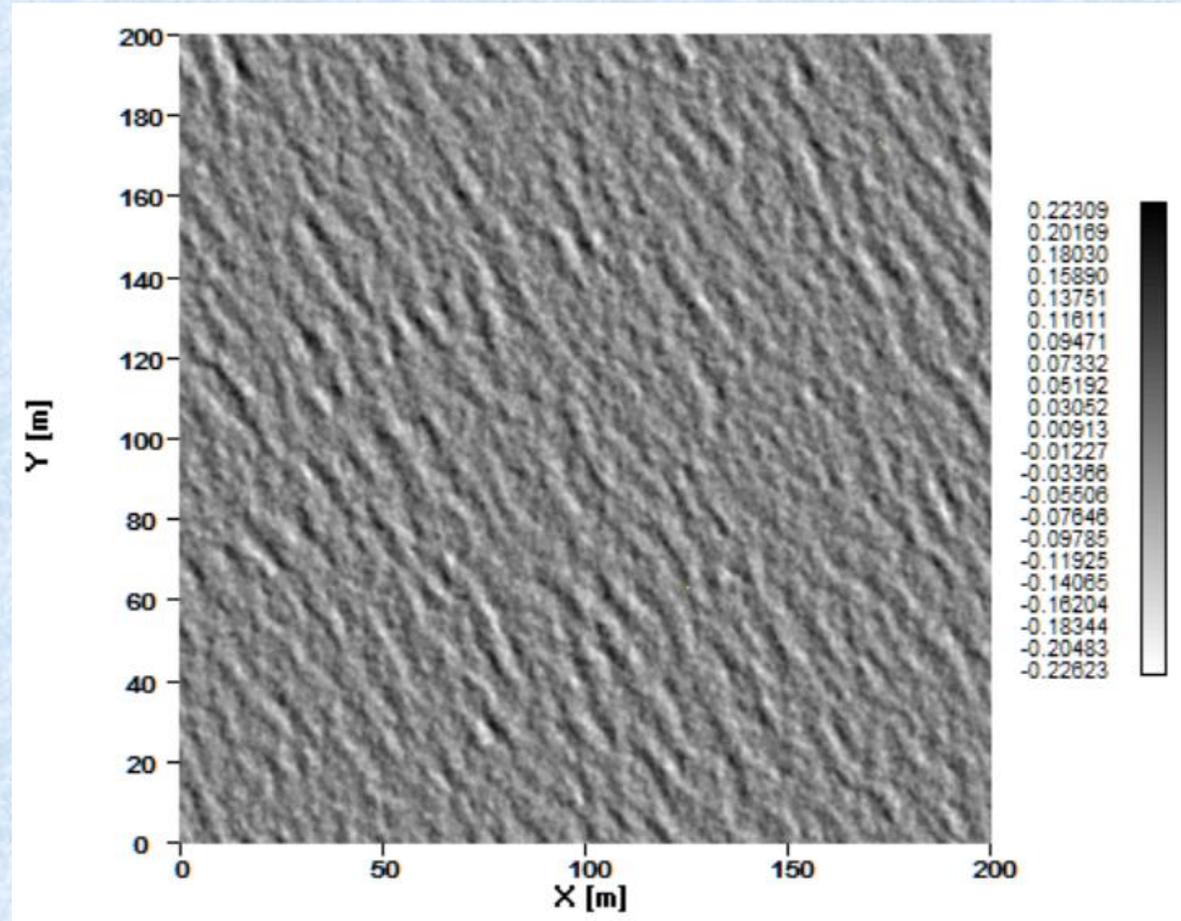
Красная кривая = диаграмма направленности антенны 1 x 30

Зеленая кривая = диаграмма направленности антенны 30 x 1

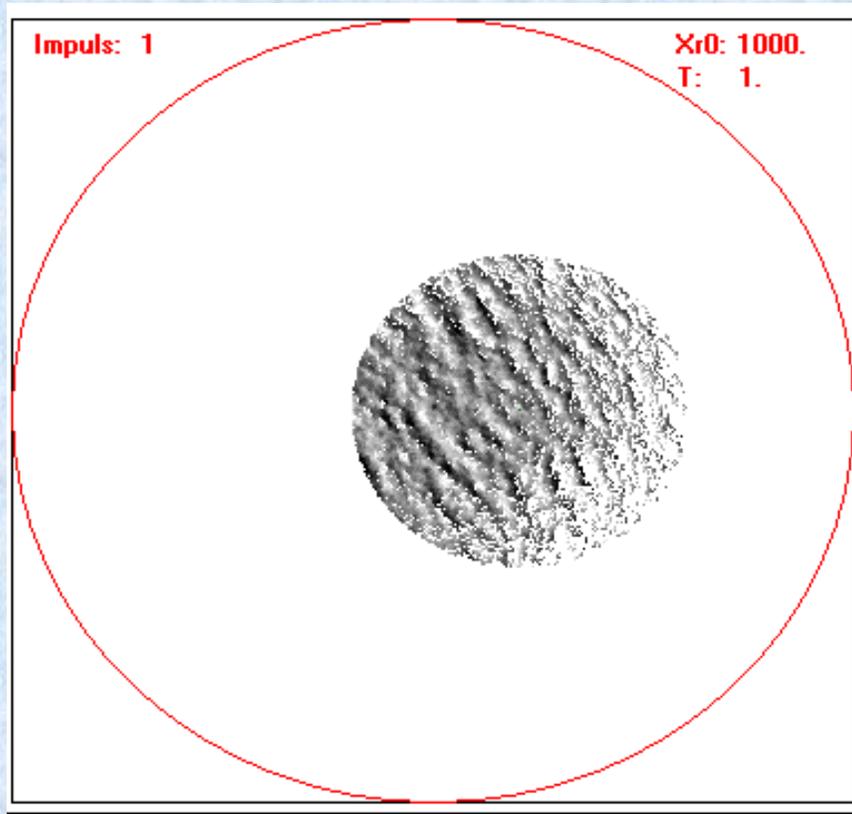
3. Численный эксперимент

Для оценки модели доплеровского спектра использовался подход, который можно назвать численным экспериментом.

Моделирование волнения: скорость ветра 5 м/с, разгон 5000, направление волнение – 30 градусов

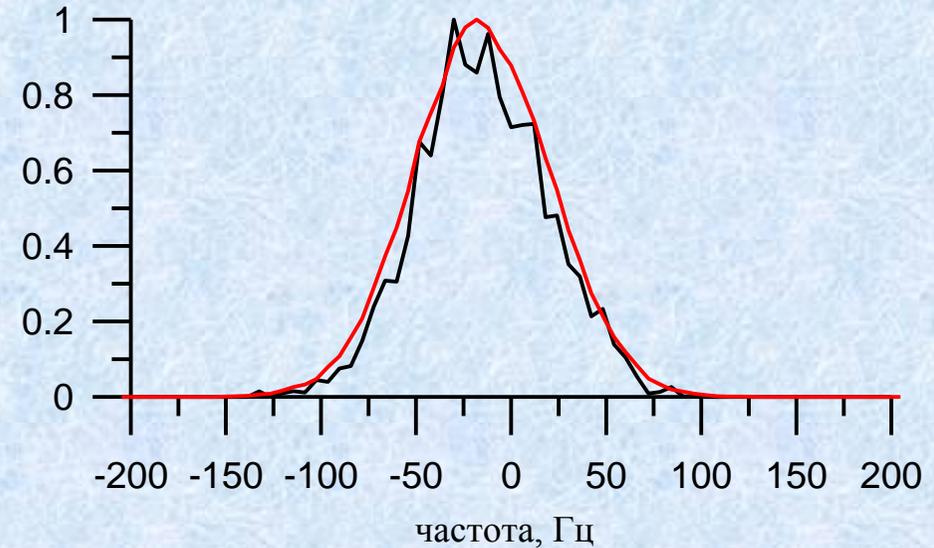


3. Численный эксперимент



Пример визуализации счета программы, имитирующей численный эксперимент

спектральная плотность мощности, у.е.

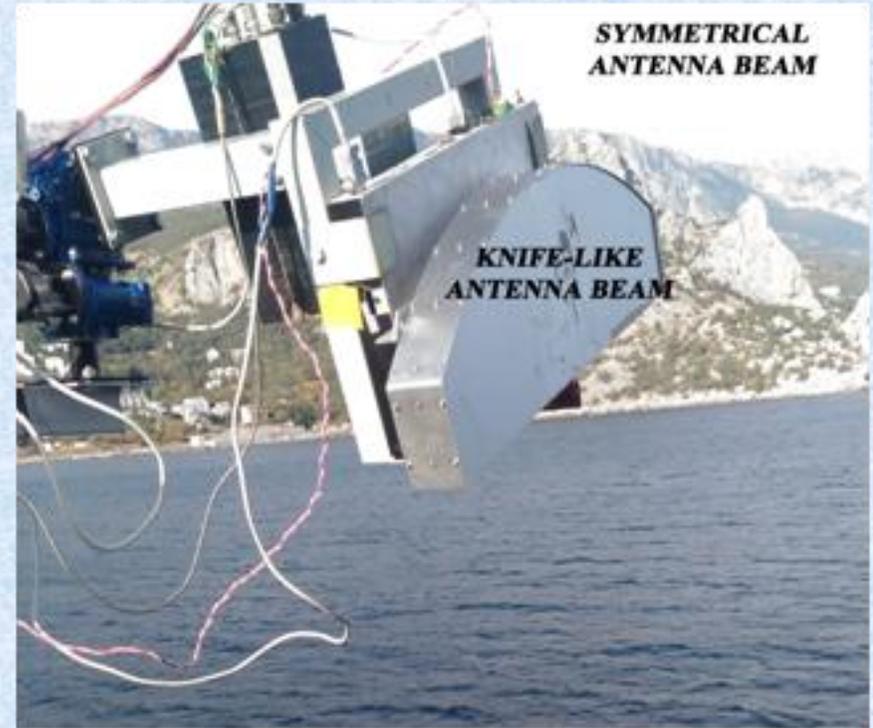


Сравнение смоделированного доплеровского спектра (черная кривая) и теоретического спектра (красная кривая): скорость ветра 4,45 м/с, безразмерный разгон 5000, направление волнения 30 градусов, длина волны 8 мм, угол падения 5,7 градуса,

4. Эксперимент

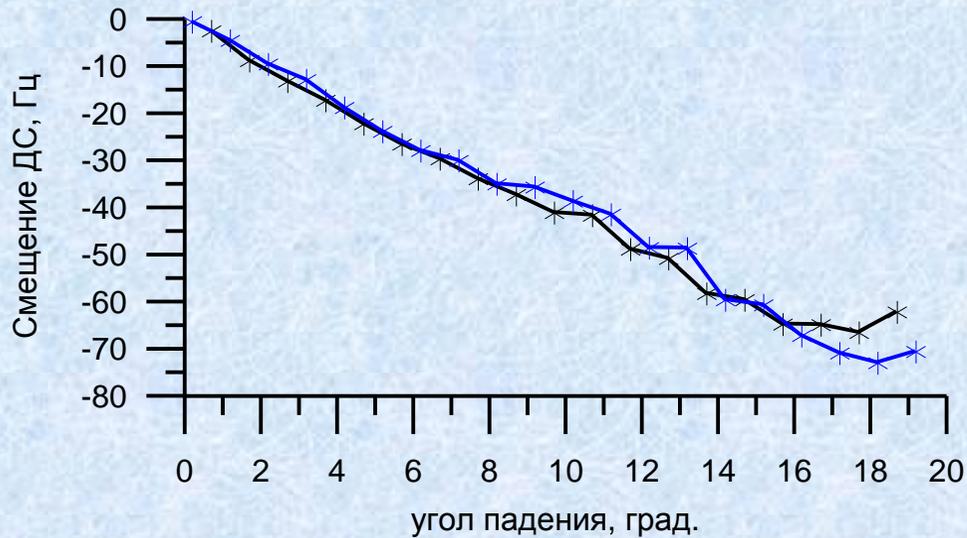
Измерения проводились с морской платформы 4-5 октября 2016 года.

Два доплеровских радиолокатора Кадиапазона были установлены на поворотном механизме и исследовалась зависимость спектральных и энергетических характеристик отраженного сигнала от угла падения и азимутального угла.

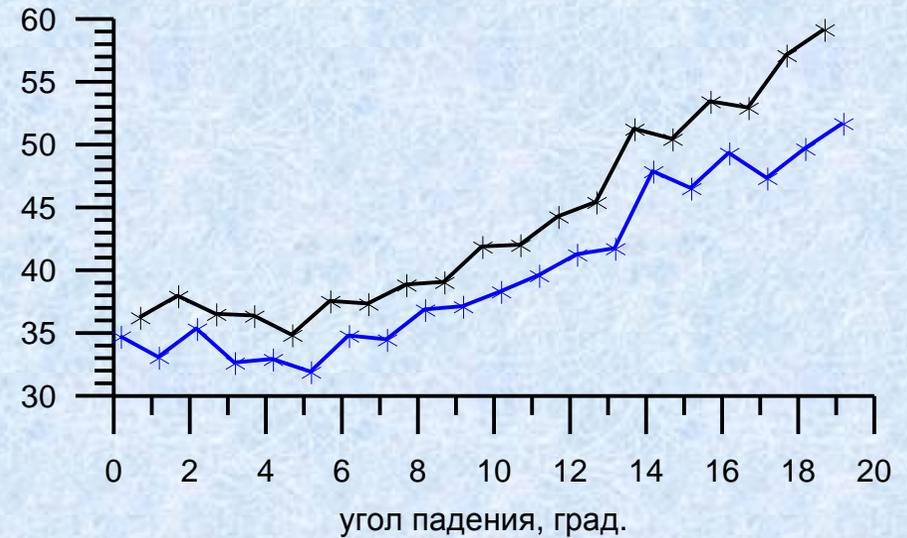


	Длина волны, см	Диаграмма направленности, град.
Симметричная антенна	0,83	6 x 6
Ножевая антенна	0,89	1 x 30

4. Эксперимент

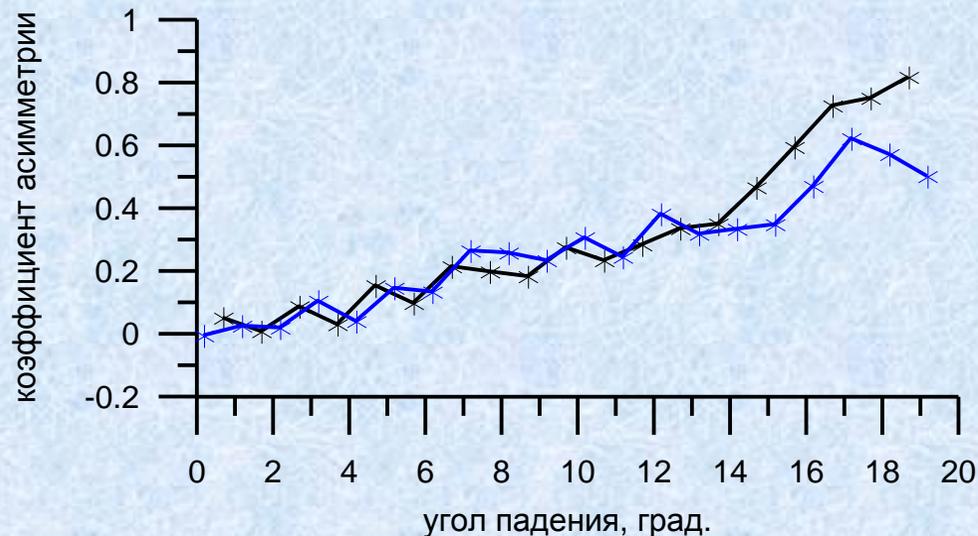


Зависимость смещения ДС от угла падения: синяя кривая – ножевая антенна, черный цвет – симметричная

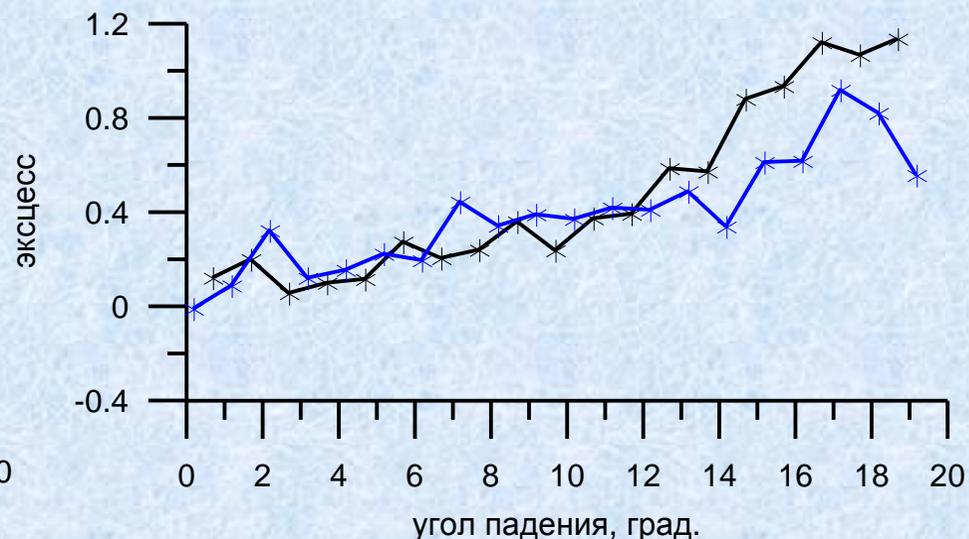


Зависимость ширины ДС от угла падения: синяя кривая – ножевая антенна, черный цвет – симметричная

4. Эксперимент

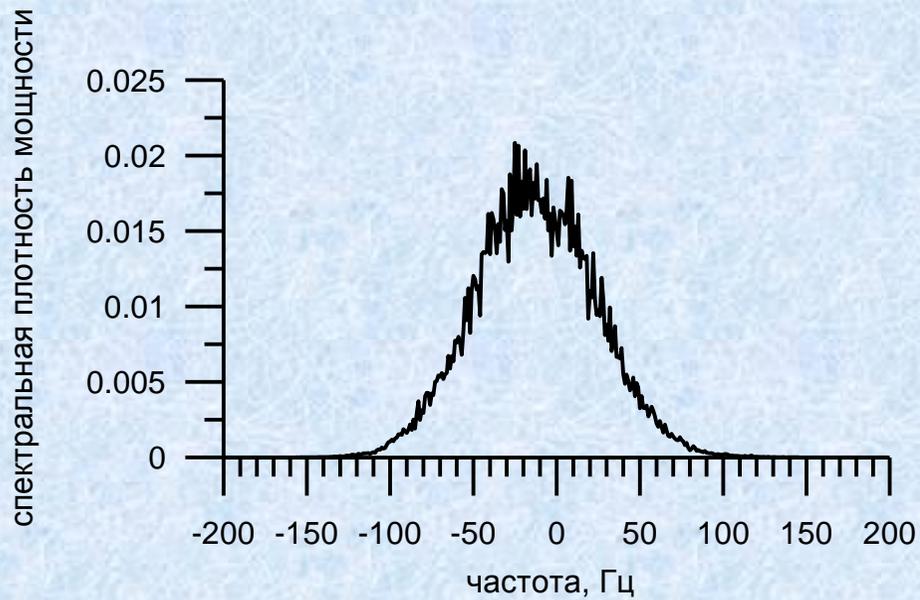


Зависимость коэффициента асимметрии ДС от угла падения: синяя кривая — ножевая антенна, черный цвет — симметричная

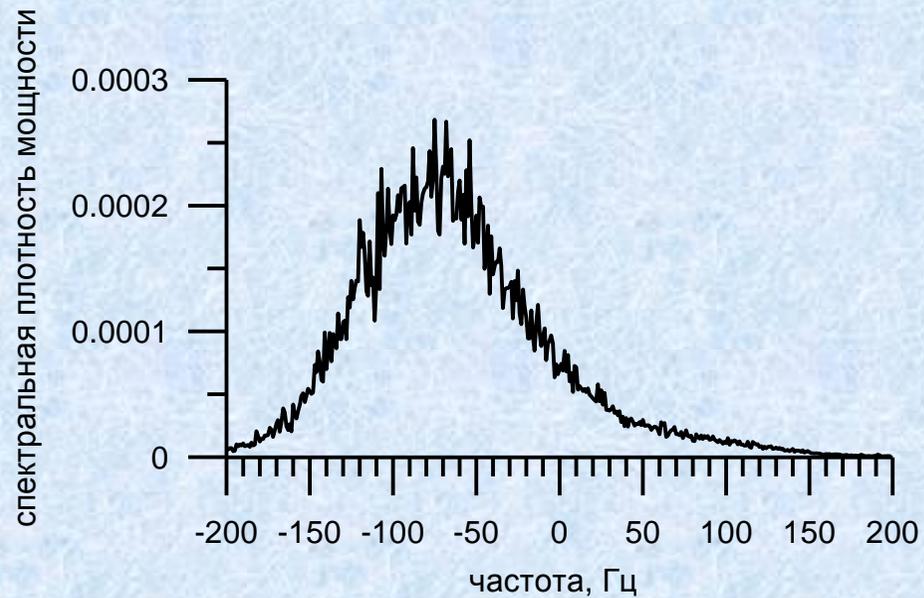


Зависимость коэффициента эксцесса ДС от угла падения: синяя кривая — ножевая антенна, черный цвет — симметричная

4. Эксперимент

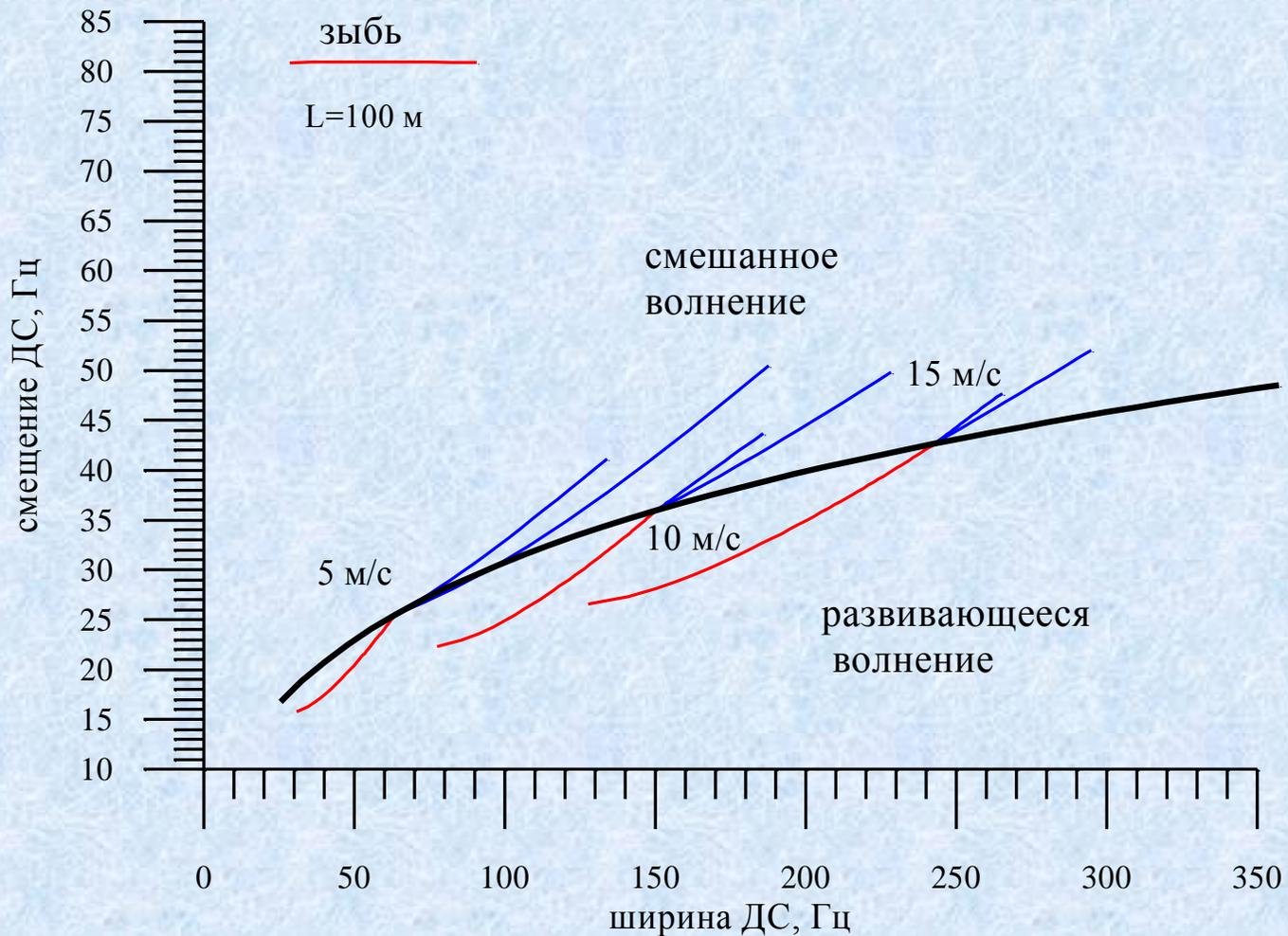


Угол падения 2,68



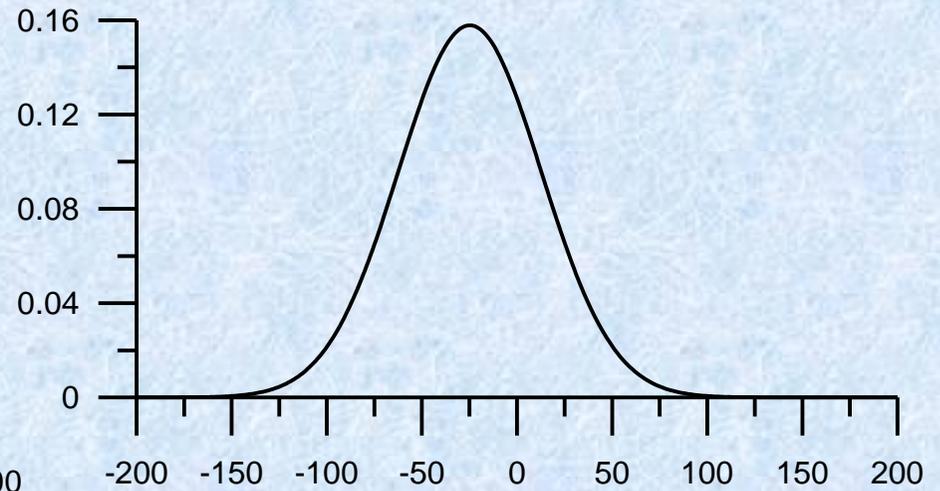
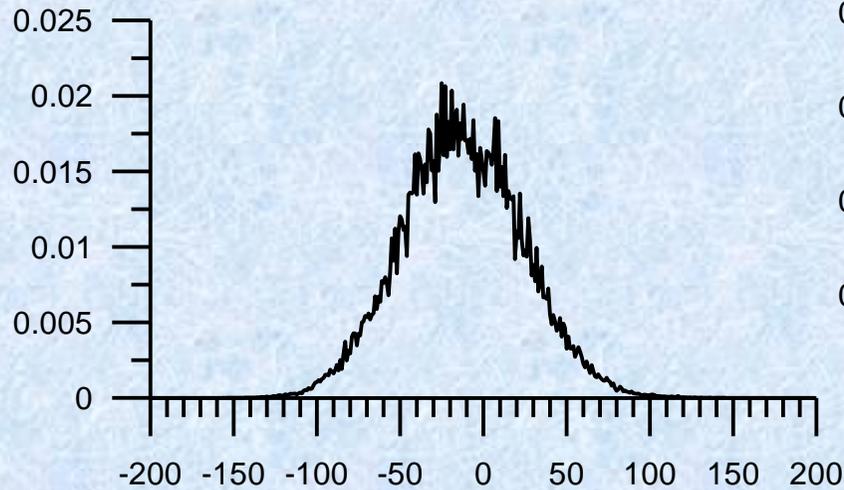
Угол падения 18,68

5. Обработка



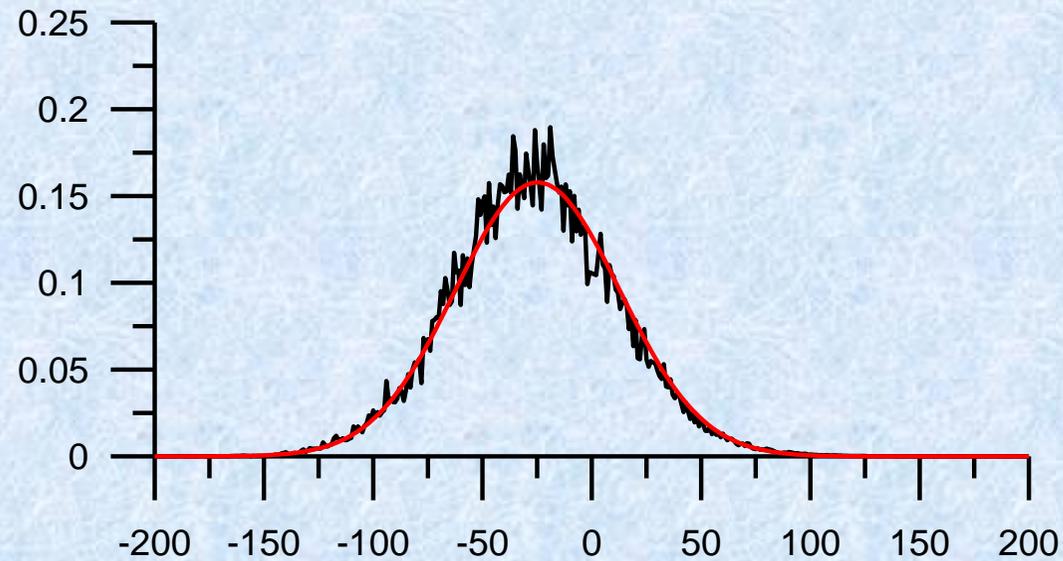
5. Обработка

спектральная плотность мощности



частота, Гц

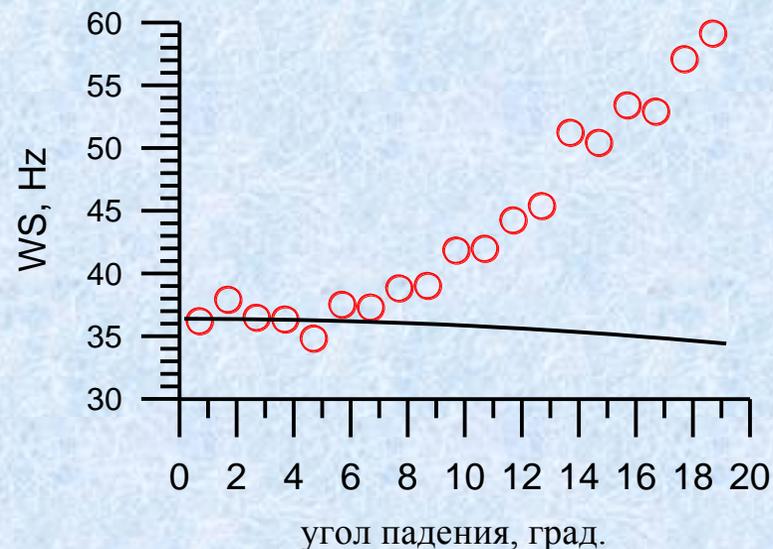
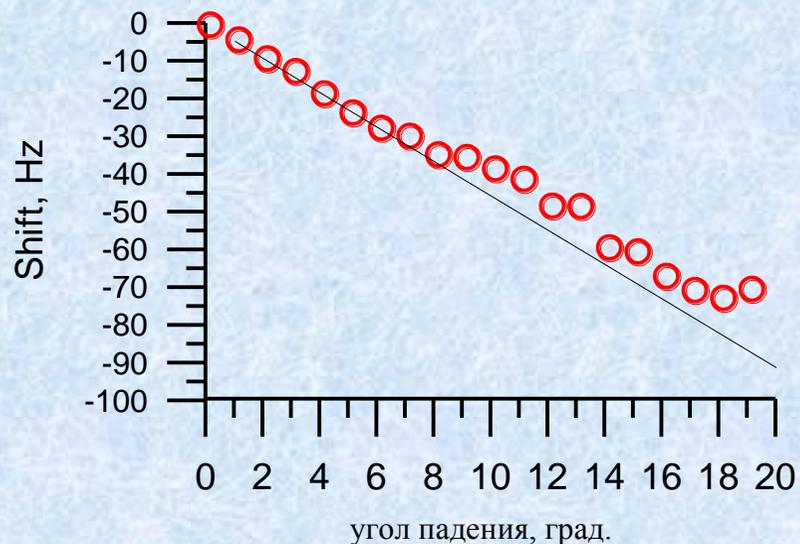
Угол падения
5,68 градуса,
диаграмма
направленно
сти антенны
6 x 6



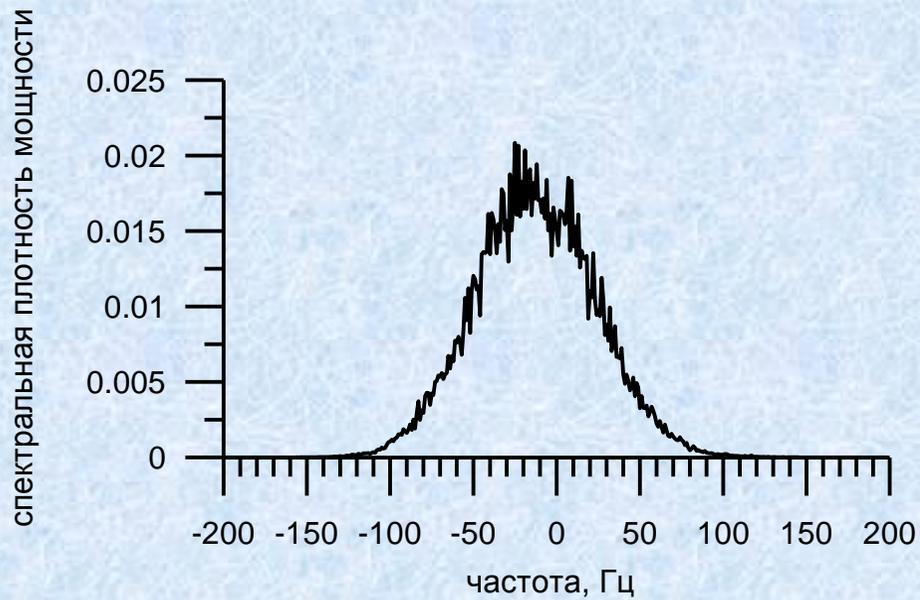
частота, Гц

5. Обработка

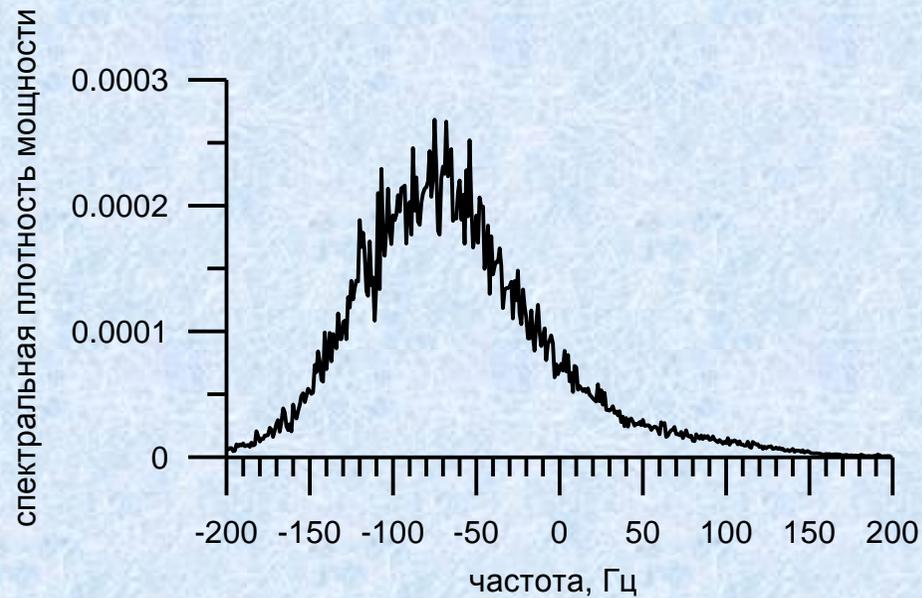
По спектру волнения была вычислена зависимость смещения и ширины доплеровского спектра от угла падения. Наблюдается хорошее совпадение при малых углах падения и расхождение при увеличении угла падения. Особенно для ширины доплеровского спектра.



4. Эксперимент



Угол падения 2,68



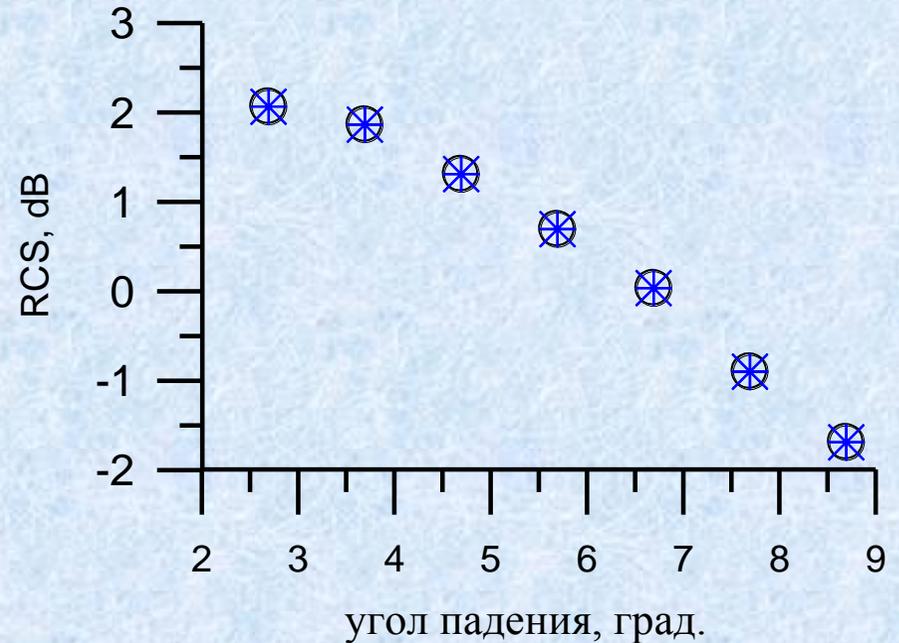
Угол падения 18,68

5. Обработка

$$\sigma_0 \sim \exp\left[-\frac{\text{tg}^2\theta_0}{2\sigma_{xx}^2}\right]$$

Дисперсия нааклонов
крупномасштабного волнения =
0,0116

Коэффициент асимметрии < 0,2
Коэффициент эксцесса < 0,3



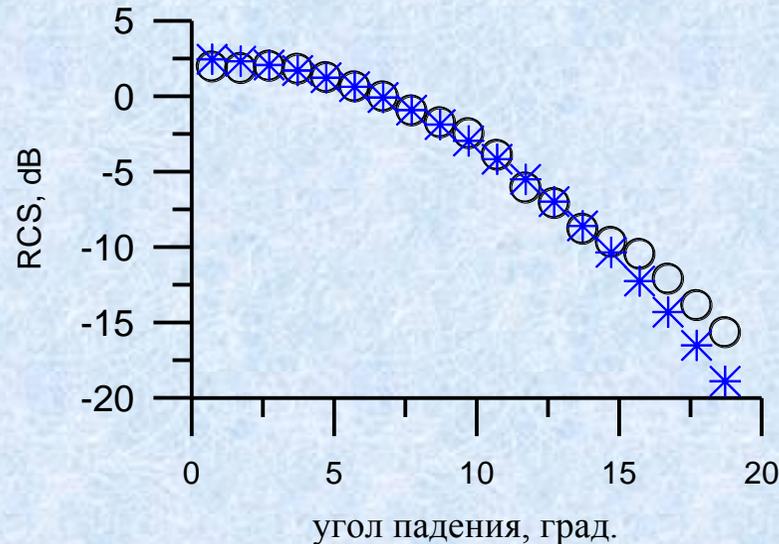
Зависимость сечения обратного
рассеяния от угла падения: кружки
– эксперимент, звездочки - модель

5. Обработка

Измеренная в эксперименте мощность (угол падения 2,68) = 1,61

Мощность по теоретической модели (угол падения 2,68) = 19,05

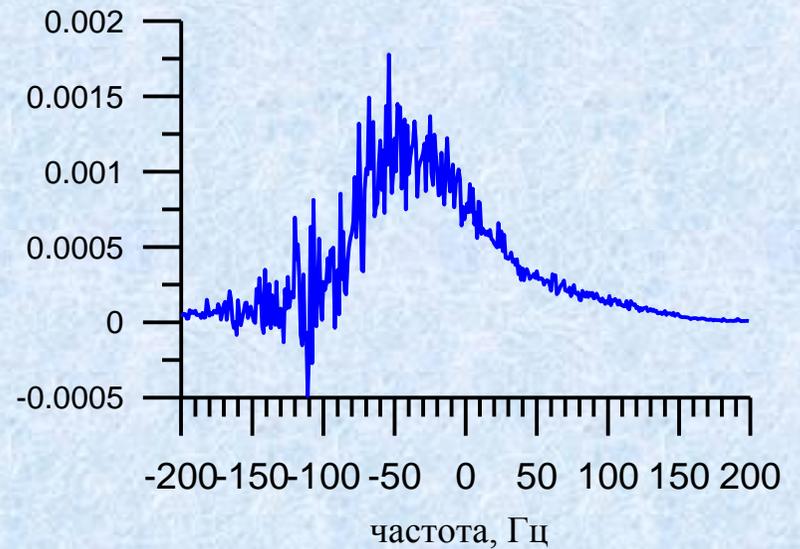
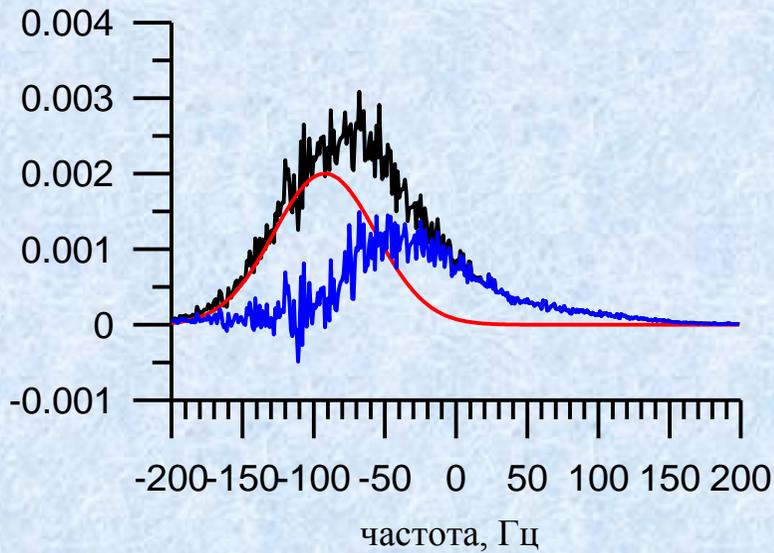
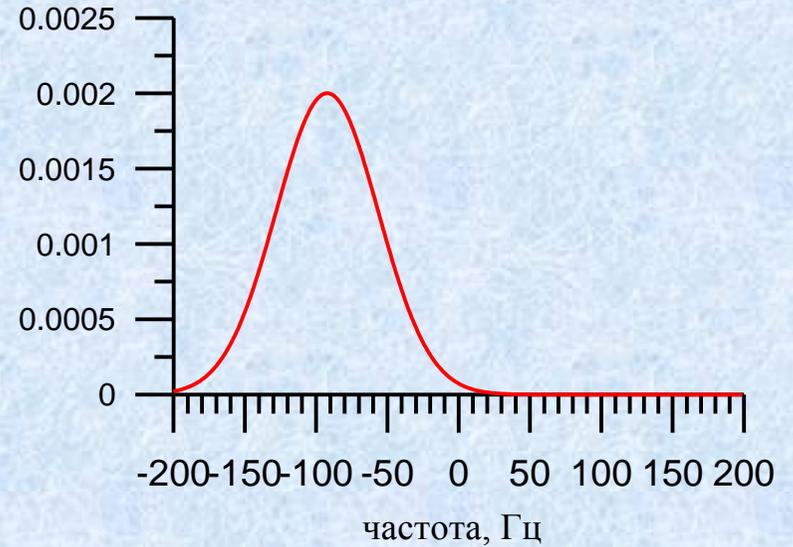
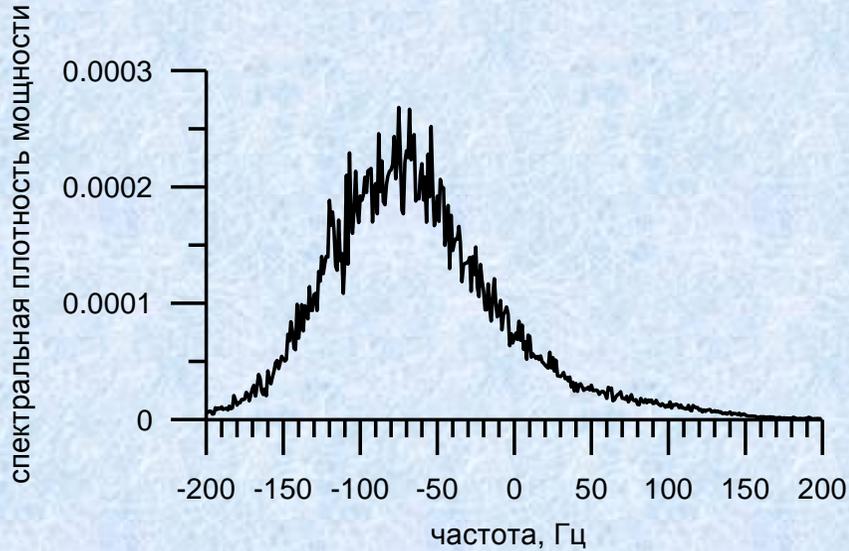
Средний по интервалу углов падения коэффициент пересчета 12,1



Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: кружки — эксперимент, звездочки - модель

5. Обработка

Угол падения 18,68



Выводы

Обработка данных натурального эксперимента показала, что метод Кирхгофа с учетом диаграммы направленности антенны хорошо описывает спектральные и энергетические свойства отраженного радиолокационного сигнала при малых углах падения.

Использование при описании доплеровского спектра радиолокационного сигнала коэффициентов асимметрии и эксцесса позволяет перейти к количественной оценке границ перехода от квазизеркального механизма обратного рассеяния к методу возмущений.

Предложен упрощенный вариант «калибровки» радиолокатора для получения «абсолютных» значений сечения обратного рассеяния для сравнения измерений разных радиолокаторов.

Разработан алгоритм выделения в отраженном сигнале квазизеркальной и брэгговской компонент.

Спасибо за внимание!