



К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью при углах падения меньше 20 градусов

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

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Модель доплеровского спектра

При малых углах падения форма доплеровского спектра отраженного сигнала является гауссовой и задается следующей формулой:

$$S(\omega) = \frac{|F(0)|^2 \sqrt{\pi}}{2k \cos^4 \theta_0 \sqrt{\alpha_{n0}}} \times \exp\left[-\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_0}{2\alpha_{n0}} \sigma_{yy}^2\right] \times$$

$$\exp\left[\frac{\operatorname{tg}^2 \theta_0}{4 \cdot 5.52 \alpha_{n0}^2} \left(\frac{\sigma_{yy}^4 \cdot \delta_x^2}{\alpha_{v0}} + \frac{\delta_y^2 \cdot K_{\varphi xy}^2}{\alpha_{r0} \cos^2 \theta_0} \right)\right]$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{\omega_s} \sqrt{\left(1 + \frac{\sigma_{yy}^2 \delta_x^2}{11.04 \alpha_{n0}}\right) \times \left(1 + \frac{\sigma_{xx}^2 \delta_y^2}{11.04 \alpha_{n0} \cos^2 \theta_0}\right)}} \times$$

$$\times \exp\left[-\frac{(\omega + k\omega_t)^2}{4k^2 \omega_s}\right]$$

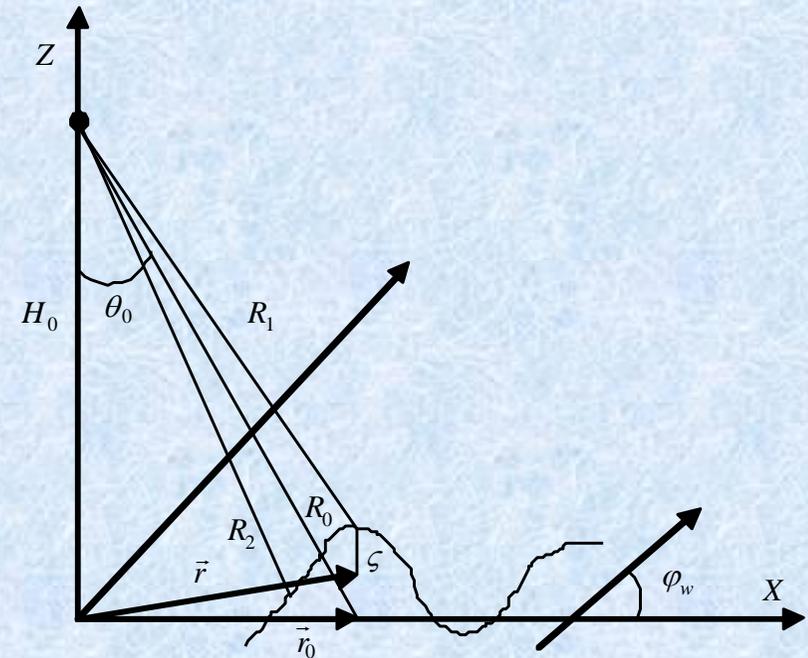


Схема измерения

Модель доплеровского спектра

Доплеровский спектр имеет гауссову форму, поэтому основными характеристиками являются ширина и смещение, которые задаются следующими выражениями:

$$f_{shift} = -\frac{\sin \theta_0}{\lambda} \left(\frac{2K_{\zeta t}}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\alpha_p K_{\zeta y}}{\alpha_{n0}} - \frac{\alpha_{u0} \delta_x^2 \sigma_{yy}^2}{(11.04 \alpha_{n0} + \sigma_{yy}^2 \delta_x^2)} - \frac{\alpha_p \sigma_{xx}^2 K_{\zeta y} \delta_y^2}{11.04 \cdot \alpha_{n0}^2 \alpha_{r0} \cos^2 \theta_0} \right)$$

$$\Delta f_{width} = 2 \frac{\sqrt{2\omega_s}}{\lambda}, \quad \omega_s = \frac{\delta_y^2 \cdot \alpha_p^2 \sigma_{xx}^4}{4 \cdot 5.52 \alpha_{r0} \alpha_{n0}^2} + \cos^2 \theta \cdot \left(\frac{2\alpha_t}{\sigma_{xx}^2} - \frac{\alpha_p^2 \sigma_{xx}^2}{2\alpha_{n0}} + \frac{\alpha_{u0}^2 \cdot \delta_x^2}{4 \cdot \alpha_{v0} 5.52} \right)$$

где

$$\alpha_{n0} = \sigma_{yy}^2 \sigma_{xx}^2 - K_{\zeta y}^2, \quad \alpha_p = 2K_{\zeta t} + \frac{2K_{\zeta y} K_{\zeta t}}{\sigma_{xx}^2}, \quad \alpha_t = \sigma_{tt}^2 \sigma_{xx}^2 - K_{\zeta t}^2,$$

$$\alpha_{v0} = \frac{11.04 \alpha_{n0} + \sigma_{yy}^2 \delta_x^2}{11.04 \cdot \alpha_{n0}}, \quad \alpha_{r0} = \frac{11.04 \cos^2 \theta_0 \cdot \alpha_{n0} + \sigma_{xx}^2 \delta_y^2}{11.04 \cos^2 \theta_0 \cdot \alpha_{n0}},$$

$$\alpha_{u0} = \frac{2K_{\zeta t}}{\sigma_{xx}^2} + \frac{\alpha_p K_{\zeta y}}{\alpha_{n0}}, \quad \alpha_{y0} = \frac{2K_{\zeta y}}{\sigma_{xx}^2}, \quad \alpha_{00} = \frac{2\sigma_{yy}^2}{\cos \theta_0 \cdot (\sigma_{yy}^2 \sigma_{xx}^2 - K_{\zeta y}^2)}.$$

Модель доплеровского спектра

Если волнение распространяется вдоль оси X , то формула для смещения упростится:

$$f_{shift} = -\frac{\sin \theta_0}{\lambda} \cdot \frac{2K_{ext}}{\sigma_{xx}^2} \left(\frac{11.04\sigma_{xx}^2}{11.04\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2} \right)$$

Для одной синусоидальной волны с волновым числом κ_1 и частотой ω_1 получим:

$$f_{shift} \sim \frac{\omega_1}{\kappa_1} \sin \theta_0 = c_1 \sin \theta_0$$

Смещение доплеровского спектра является проекцией «средней» фазовой скорости волнения и растет с увеличением длины волны. Высота волнения не влияет на величину доплеровского сдвига.

Модель доплеровского спектра

Если волнение распространяется вдоль оси X, то формула для ширины доплеровского спектра упростится:

$$\Delta f_{width} = 2 \frac{\sqrt{2\sigma_{tt}^2}}{\lambda} \cos \theta_0 \left(1 - \frac{K_{\zeta xt}^2}{\sigma_{tt}^2 (\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2 / 11.04)} \right)^{1/2}$$

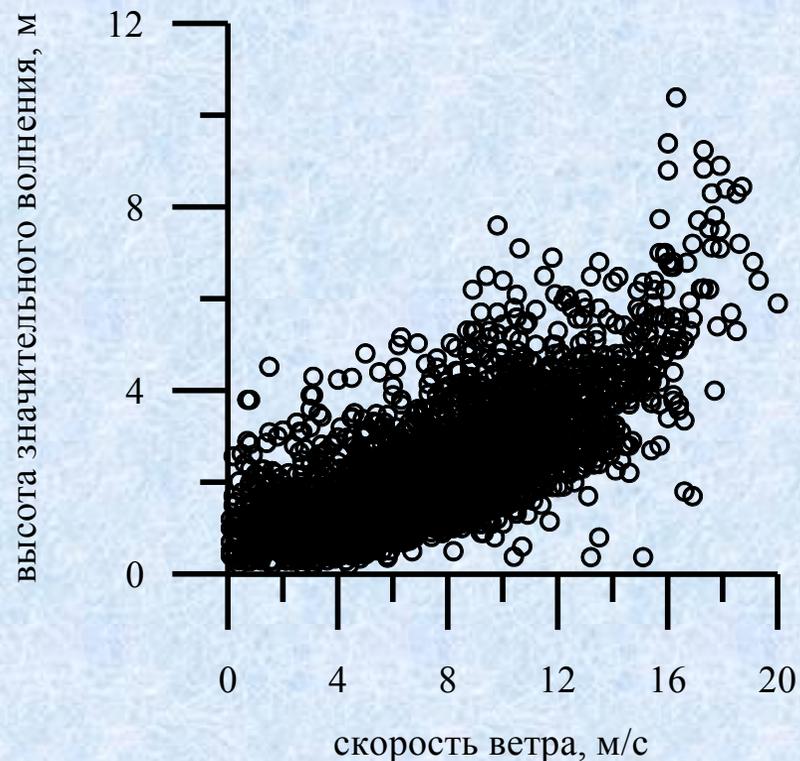
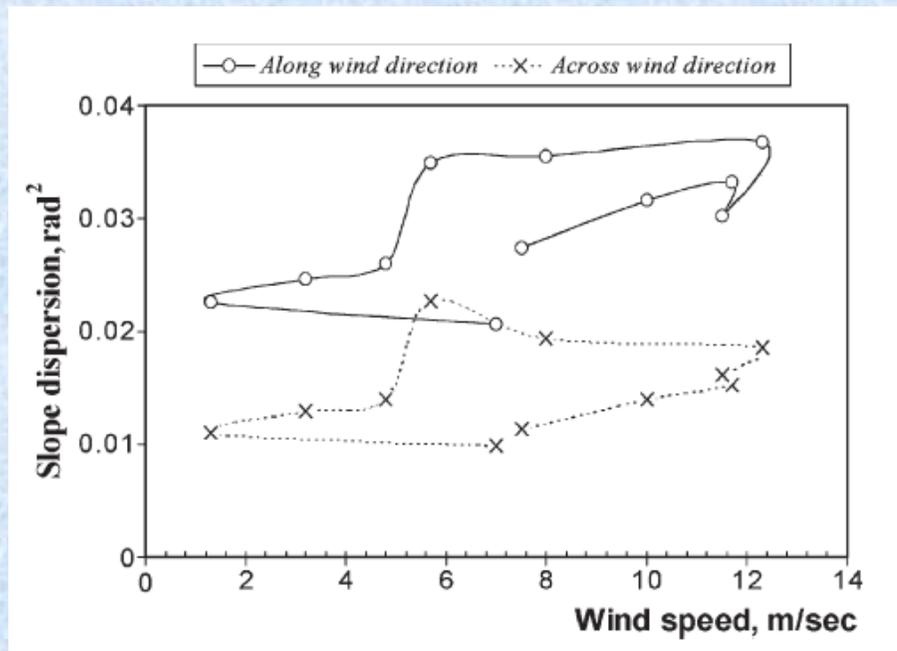
Ширина доплеровского спектра зависит от дисперсии вертикальной составляющей орбитальной скорости, а также от коэффициента корреляции вертикальной составляющей орбитальной скорости и уклонов морской поверхности:

$$r_{xt} = \frac{K_{\zeta xt}}{\sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{tt}^2}}$$

Свойства доплеровского спектра: теория

Рассмотрим зависимость параметров доплеровского спектра от **скорости и направления ветра, длины ветрового разгона, угла падения, азимутального угла и диаграммы направленности антенны.**

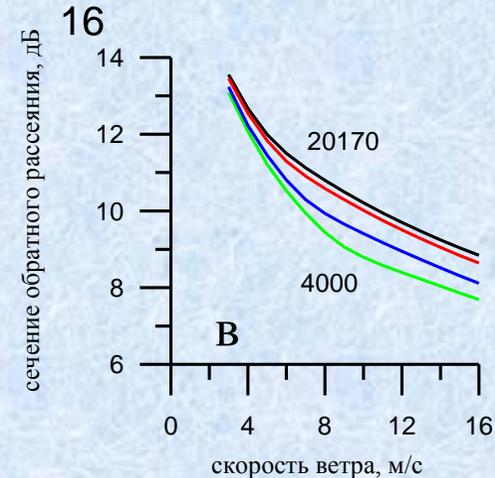
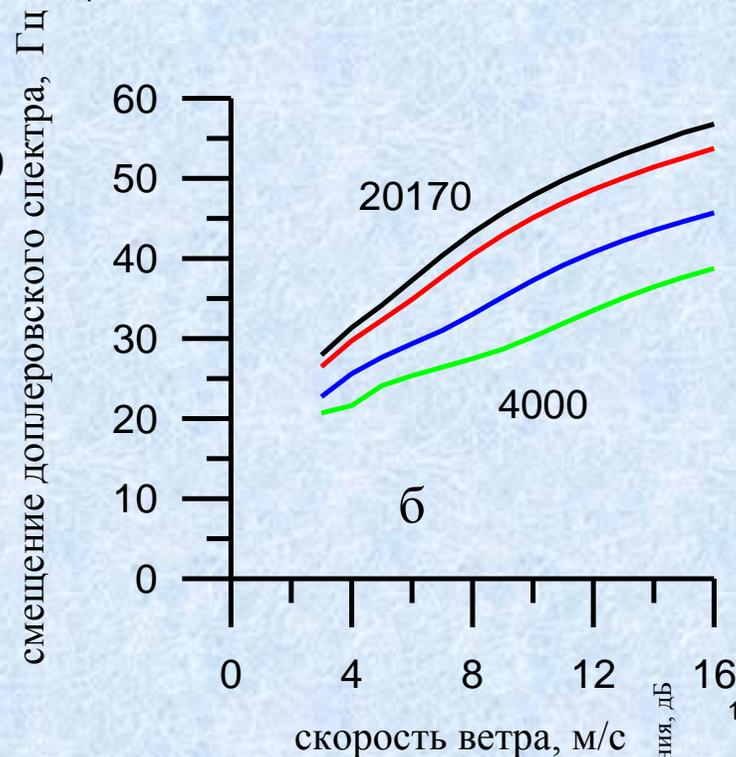
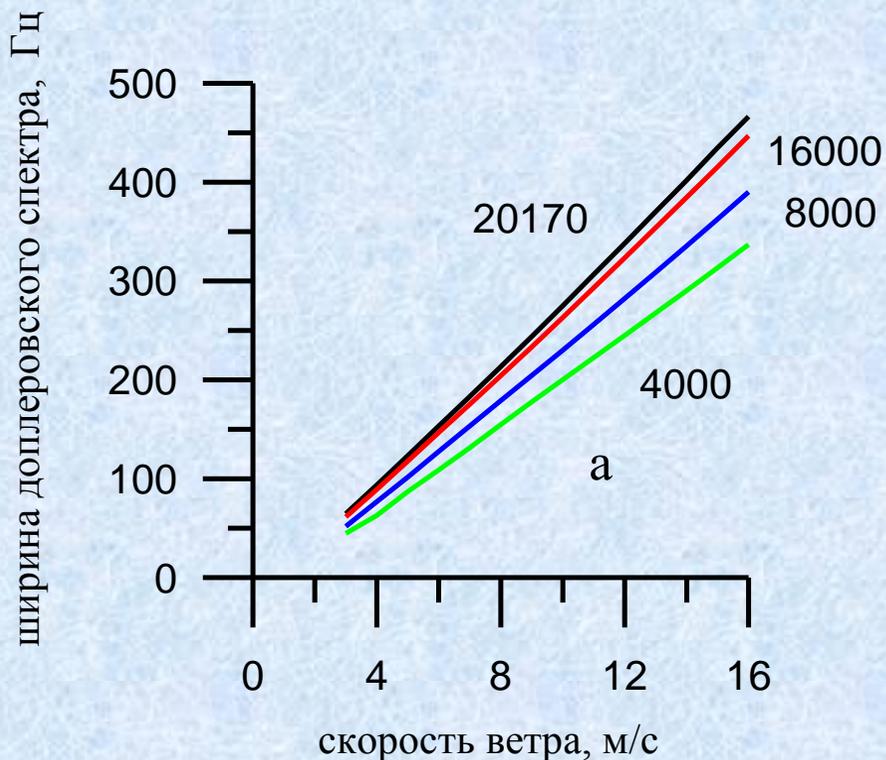
Почему недостаточно двух параметров: скорости и направления ветра?



Данные морских буев

Свойства доплеровского спектра: теория

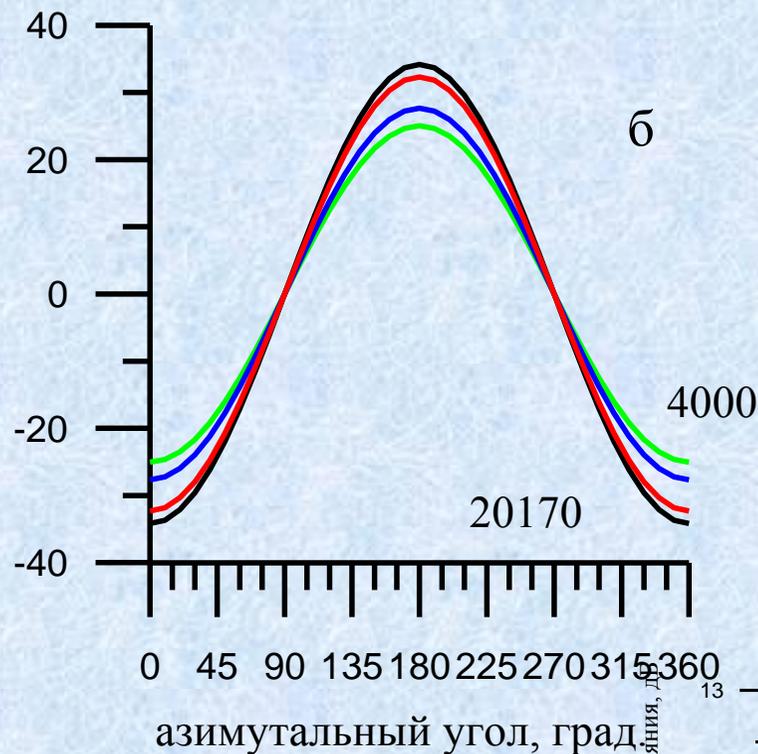
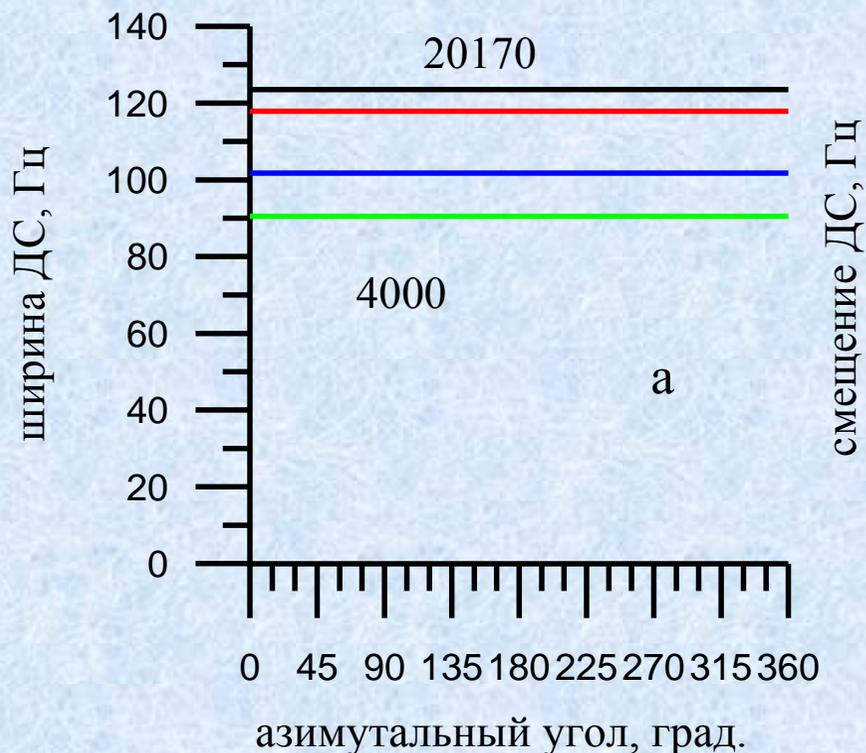
Во время эксперимента использовался когерентный радиолокатор (длина волны 8,3 мм), поэтому все вычисления были выполнены для этой длины волны. Угол падения 5° , диаграмма направленности антенны $1^\circ \times 1^\circ$, $\varphi = 180^\circ$.



Зависимость ширины (а), смещения (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от скорости ветра для разных значений безразмерного разгона $\tilde{x} = xg / U_{10}^2$ (4000, 8000, 12000, 20170)

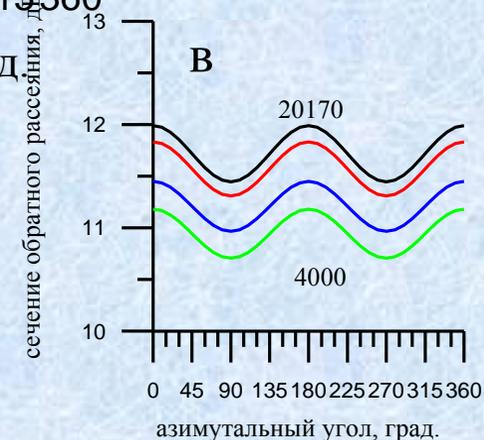
Свойства доплеровского спектра: теория

Как и в случае с сечением обратного рассеяния, важную роль при анализе доплеровского спектра играет азимутальная зависимость. Угол падения 5° , диаграмма направленности антенны $1^\circ \times 1^\circ$.



б

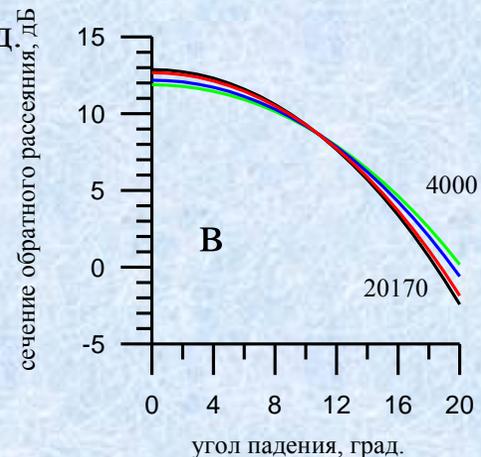
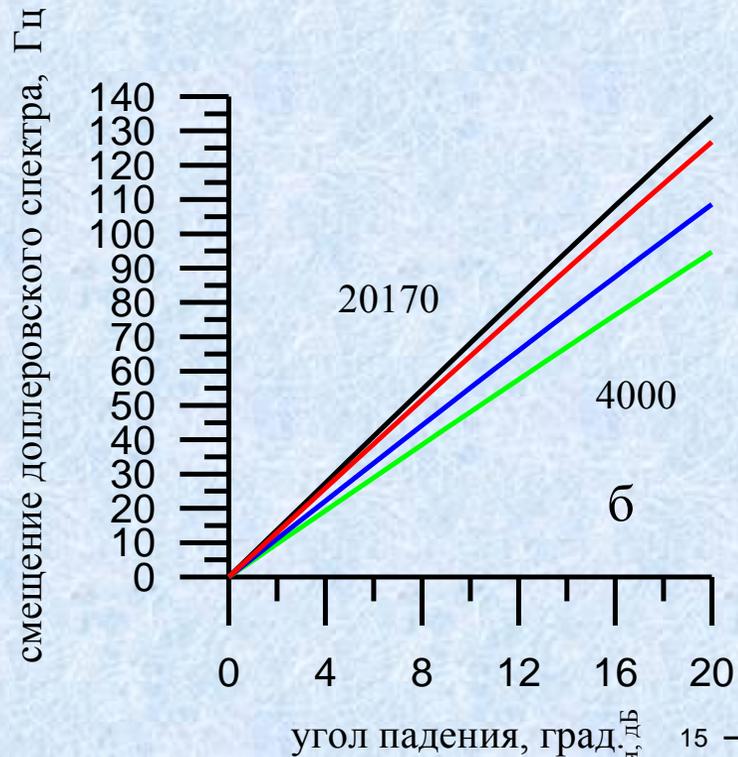
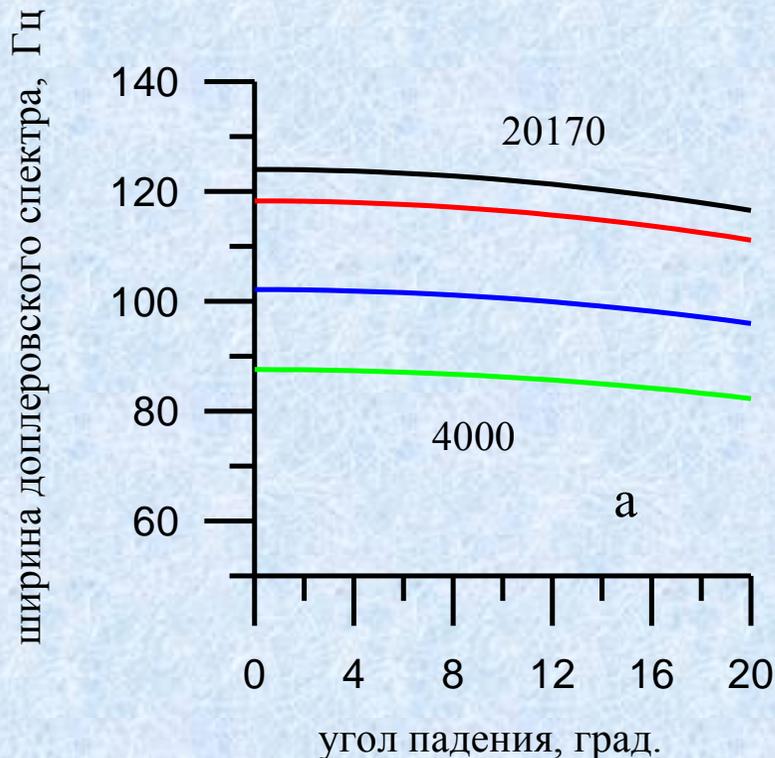
Зависимость ширины (а), смещения (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от азимутального угла для разных значений безразмерного разгона (4000, 8000, 12000, 20170). Скорость ветра 5 м/с.



в

Свойства доплеровского спектра: теория

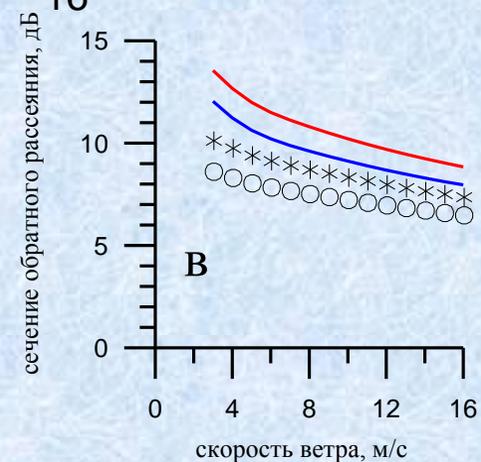
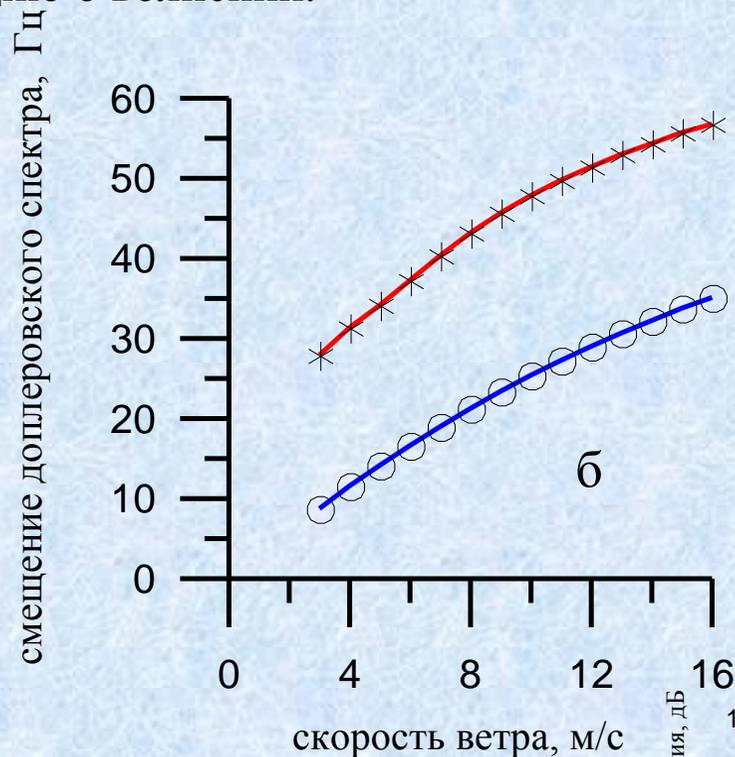
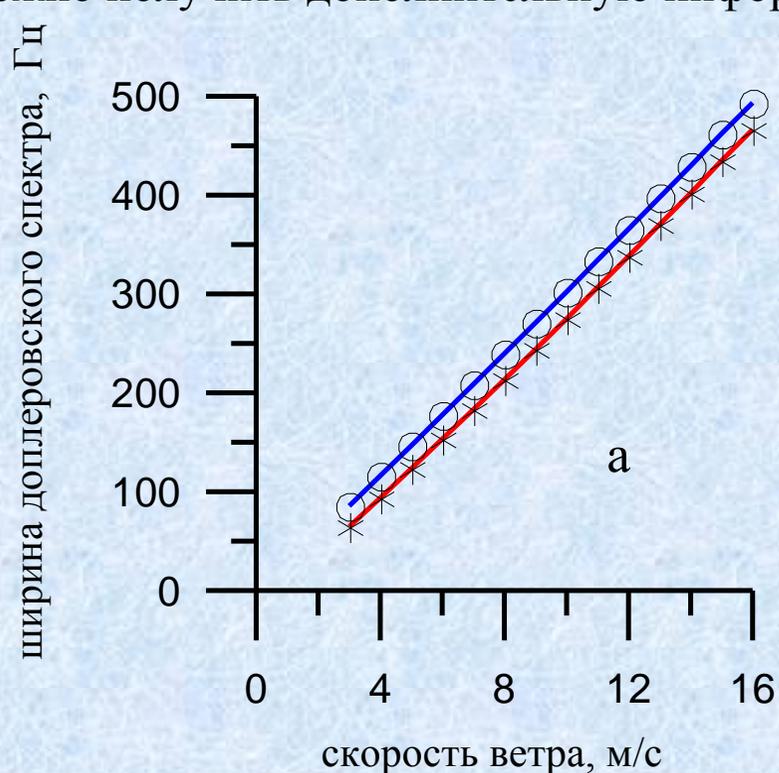
Еще один параметр, который можно изменять во время эксперимента, это угол падения, диаграмма направленности антенны $1^\circ \times 1^\circ$, $\varphi = 180^\circ$.



Зависимость ширины (а), смещения (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от угла падения для разных значений безразмерного разгона (4000, 8000, 12000, 20170). Скорость ветра 5 м/с.

Свойства доплеровского спектра: теория

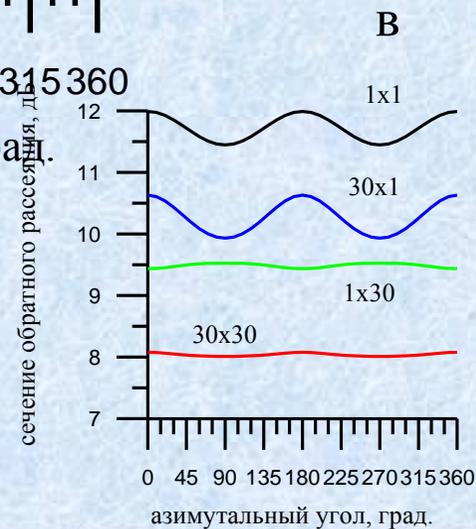
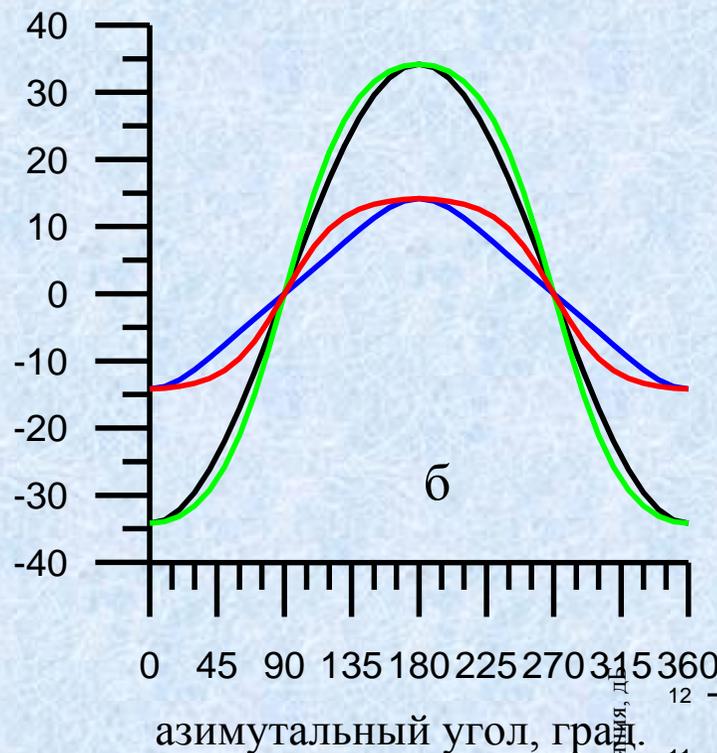
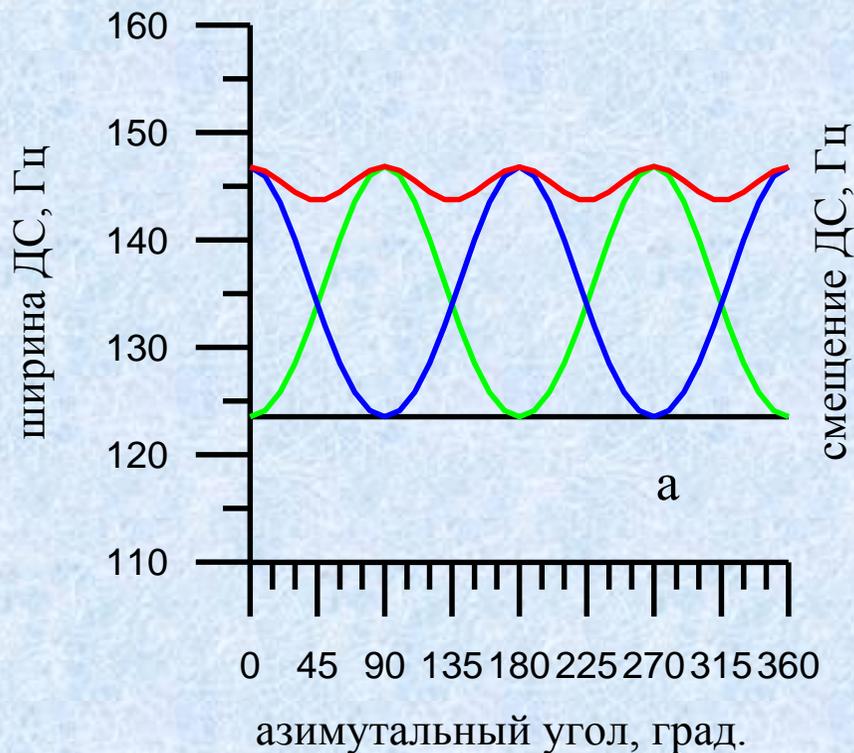
Диаграмма направленности антенны является дополнительным параметром, который можно использовать при выполнении измерений. Не меняя направления зондирования и угол падения можно получить дополнительную информацию о волнении.



Зависимость ширины (а), смещения (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от скорости ветра для разных ДНА: **красная кривая** – $1^\circ \times 1^\circ$, звездочки – $1^\circ \times 30^\circ$, **синяя кривая** – $30^\circ \times 1^\circ$, кружки – $30^\circ \times 30^\circ$. Скорость ветра 5 м/с, угол падения 5.

Свойства доплеровского спектра: теория

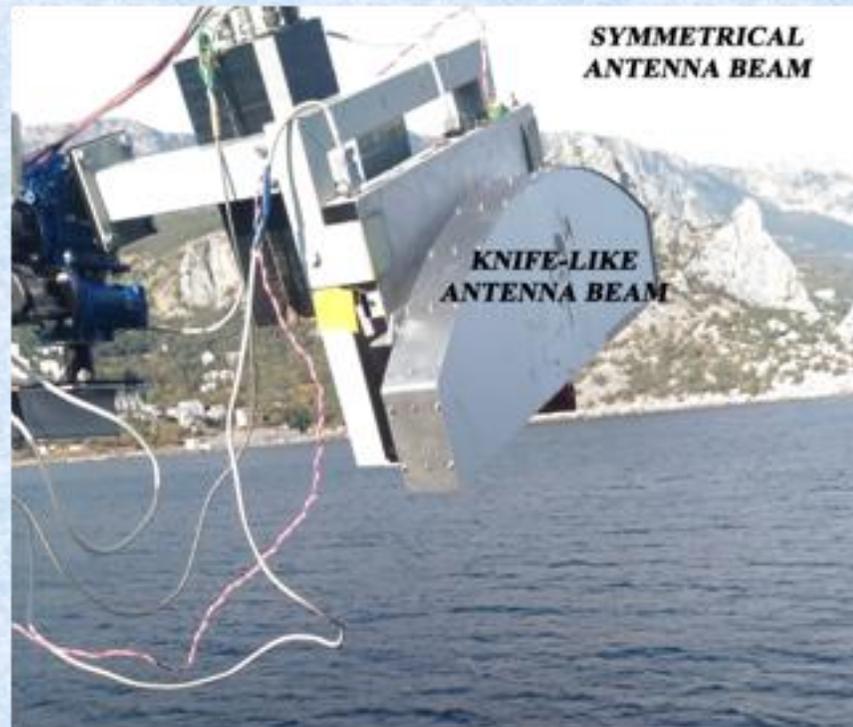
Особенно заметно влияние диаграммы направленности на азимутальную зависимость. Измеряя под одним азимутальным углом можно определить направление волнения.



Зависимость ширины (а), смещения (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от азимутального угла для разных ДНА: **красная кривая – 30°x30°**, **зеленая – 1°x30°**, **синяя кривая – 30°x1°**, **черная кривая – 1°x1°**. Скорость ветра 5 м/с, угол падения 5.

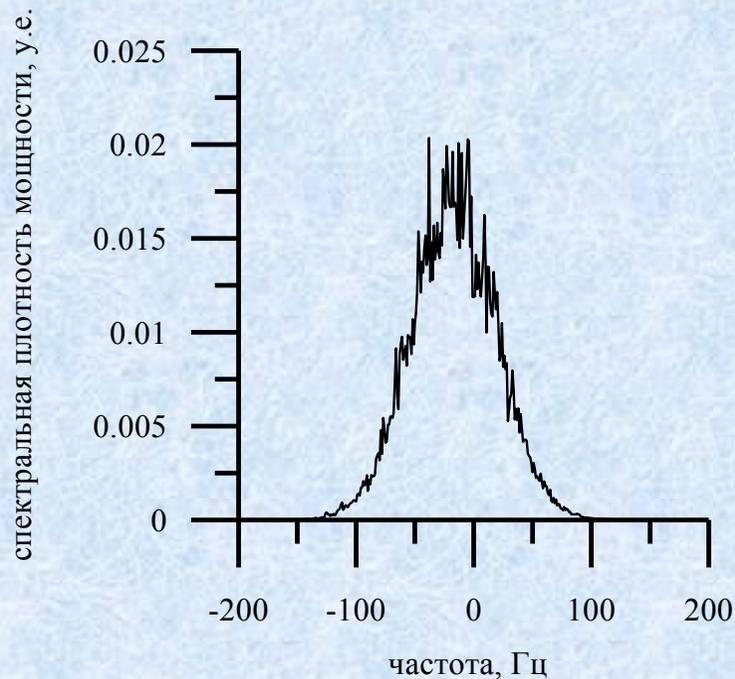
Эксперимент

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

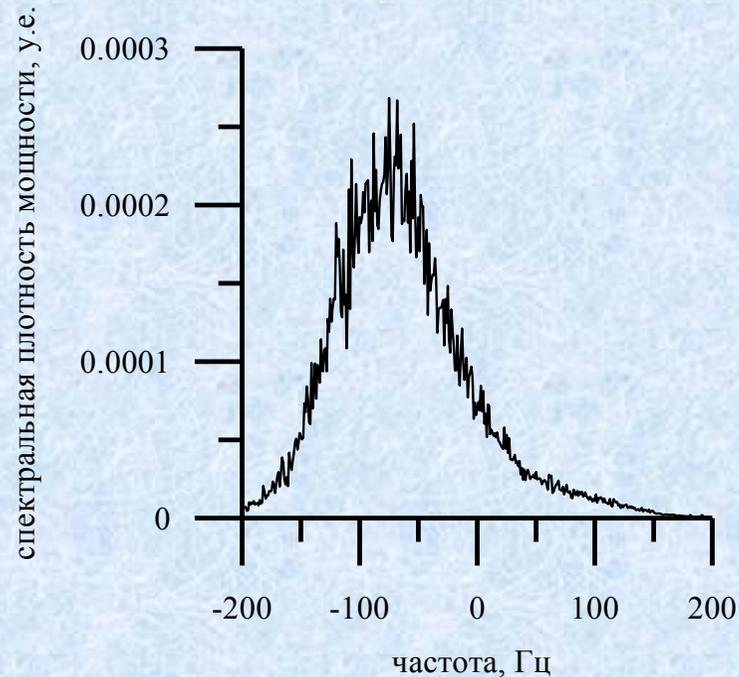


	Длина волны, см	Диаграмма направленности, град.
Симметричная антенна	0,83	6 x 6
Ножевая антенна	0,89	1 x 30

Свойства доплеровского спектра: эксперимент



угол падения $3,68^\circ$



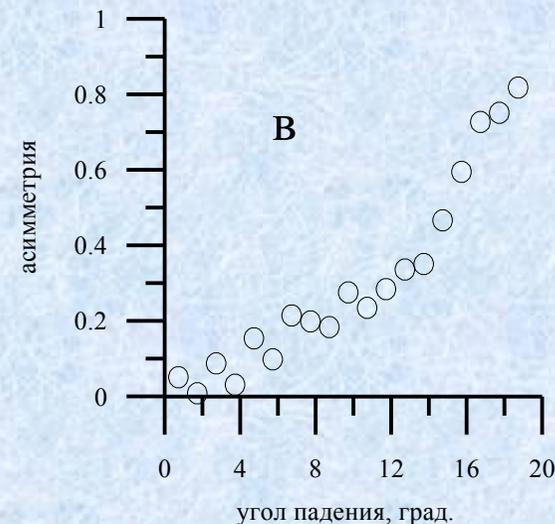
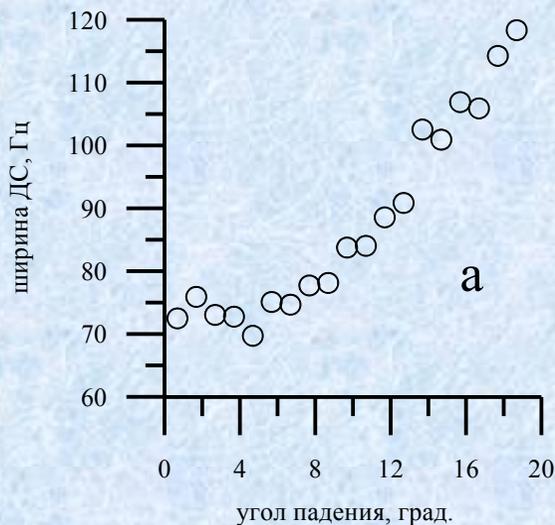
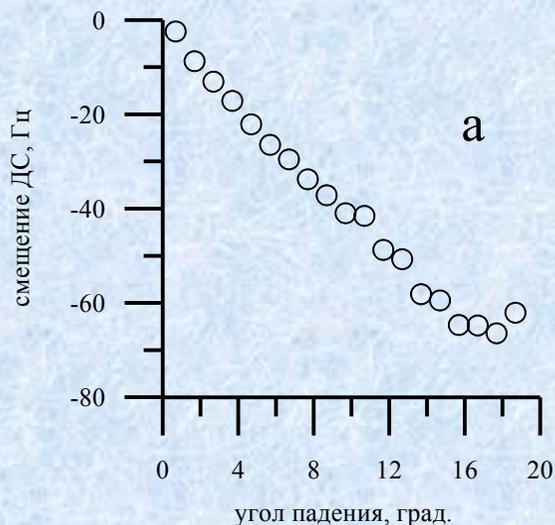
угол падения $18,68^\circ$

Для характеристики доплеровского спектра будем использовать: ширину, смещение, асимметрию, эксцесс и сечение обратного рассеяния

$$f_{shift} = \frac{\int f \cdot S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df}, \quad A = \frac{\mu_3}{\sigma^3}$$

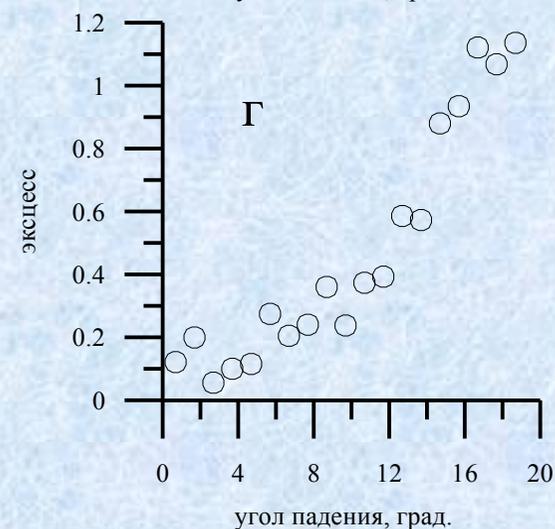
$$\Delta f_{width} = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} - f_{shift}^2}, \quad E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3$$

Свойства доплеровского спектра: эксперимент



Зависимость смещения (а) и ширины (б) доплеровского спектра от угла падения (длина волны 0,0083 м).

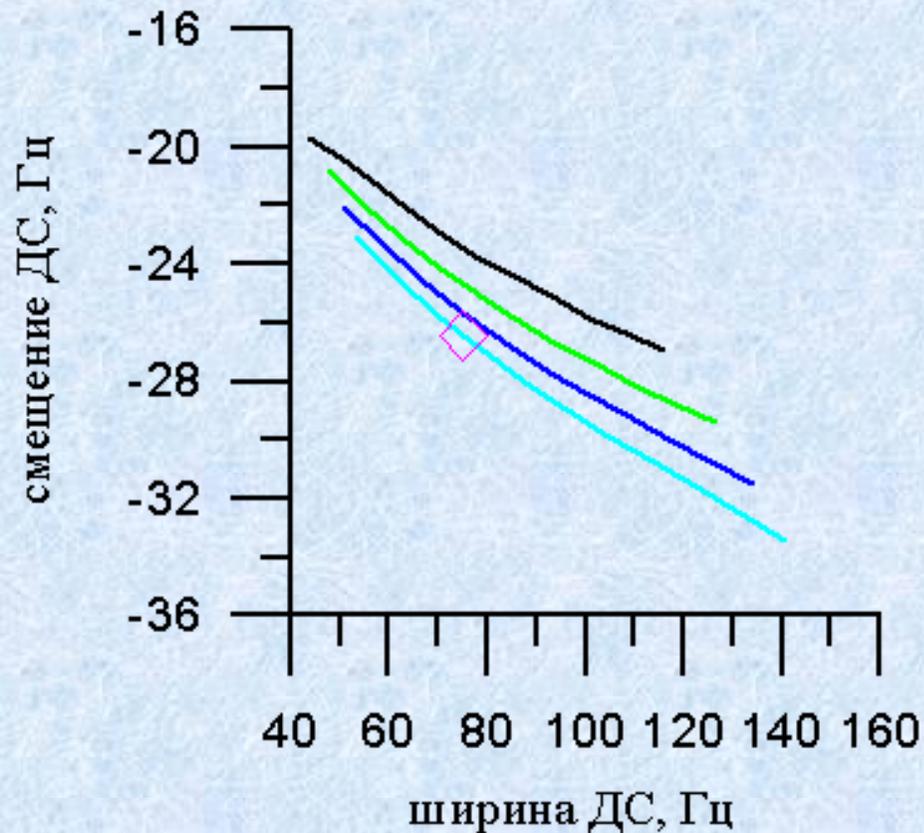
Зависимость коэффициентов асимметрии (в) и эксцесса (г) доплеровского спектра от угла падения (длина волны 0,0083 м). Более надежный индикатор, чем ширина ДС.



Свойства доплеровского спектра: обработка

При угле падения $5,68^\circ$,
смещение ДС = $-26,44$ Гц,
ширина ДС = $75,12$,
азимутальный угол 30°

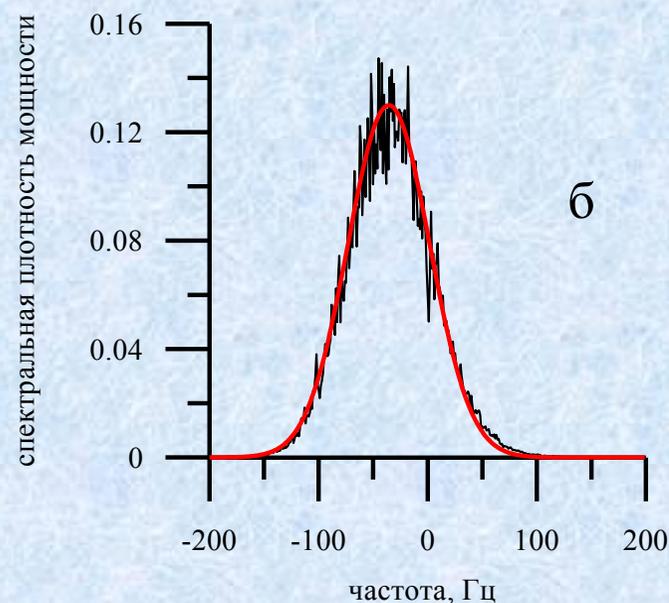
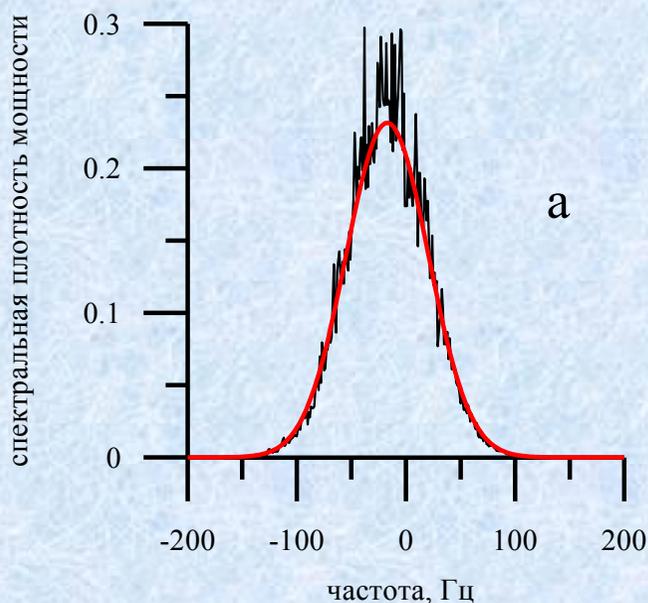
Вычисления были
выполнены для
радиолокатора с
симметричной антенной
($6^\circ \times 6^\circ$) при угле падения
 $5,68^\circ$



Пример «радиолокационной» плоскости:
черная кривая – 8000 , зеленая кривая – 12000
синяя кривая – 16000, голубая кривая – 20170.
Скорость ветра 2,5 м/с – 5,5 м/с.
Ромб – эксперимент.

Свойства доплеровского спектра: обработка

		Измеренные параметры			Восстановленные параметры					
θ	φ	SWH, м	ширина, Гц	смещение, Гц	U10, м/с	x	ширина, Гц	смещение, Гц	SWH, м	σ_{xx}^2
5,68°	30°	0,274	75,12	-26,44	3,28	20170	75,14	-26,4	0,248	0,011



Доплеровский спектр радиолокационного сигнала: черная кривая - измеренный спектр, красная кривая – модельный спектр: а) угол падения 3,68° и б) угол падения 7,68°.

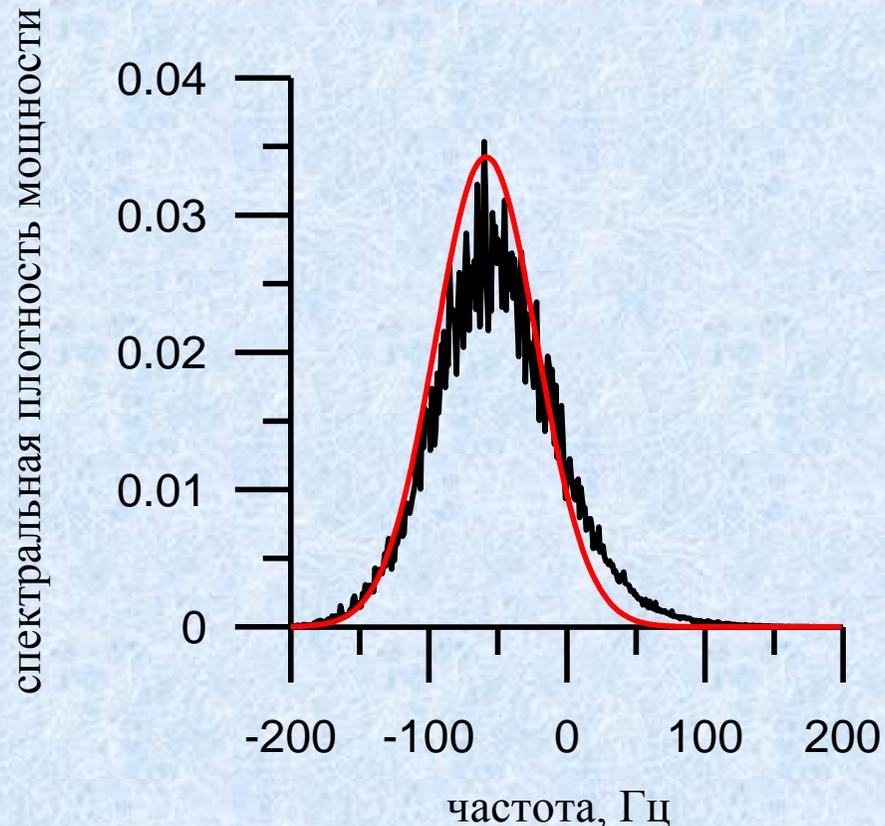
Свойства доплеровского спектра: обработка

Угол падения $12,68^\circ$

коэффициент асимметрии 0,34

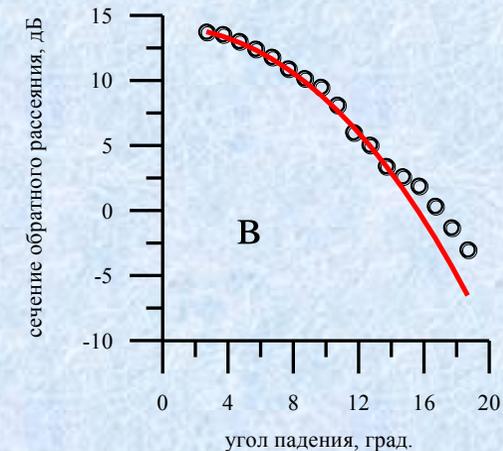
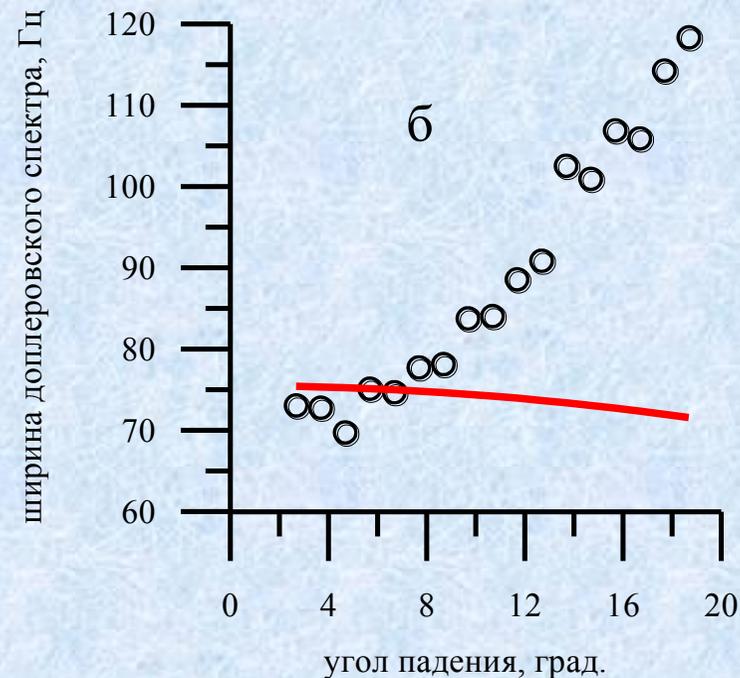
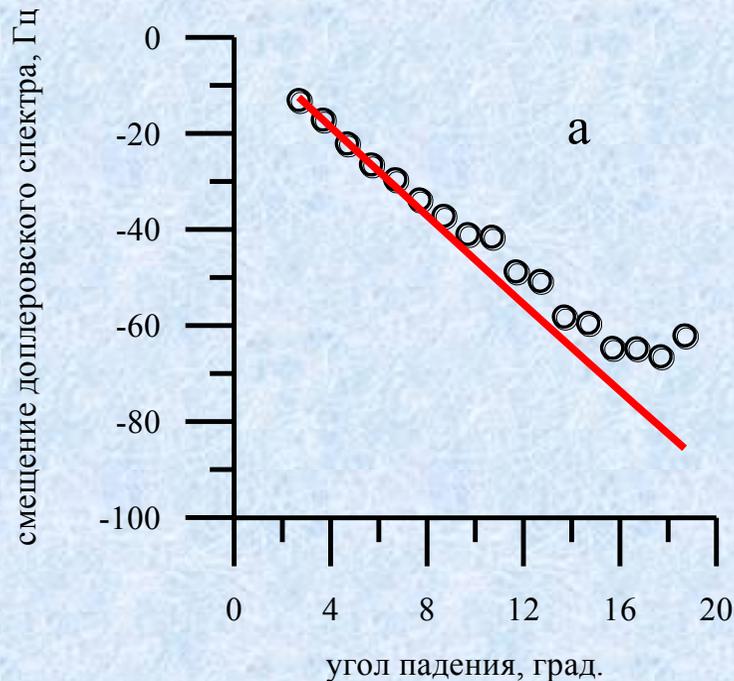
коэффициент эксцесса 0,59

	эксперимент	модель
Ширина, Гц	90,9	73,6
Смещение, Гц	-50,7	-58,6
УЭПР, дБ	4,62	5,0



Доплеровский спектр радиолокационного сигнала: черная кривая - измеренный спектр, красная кривая – модельный спектр. Угол падения $12,68^\circ$, скорость ветра 3,28 м/с, полностью развитое ветровое волнение.

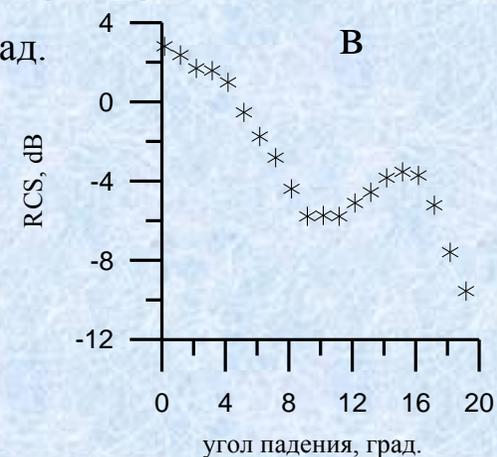
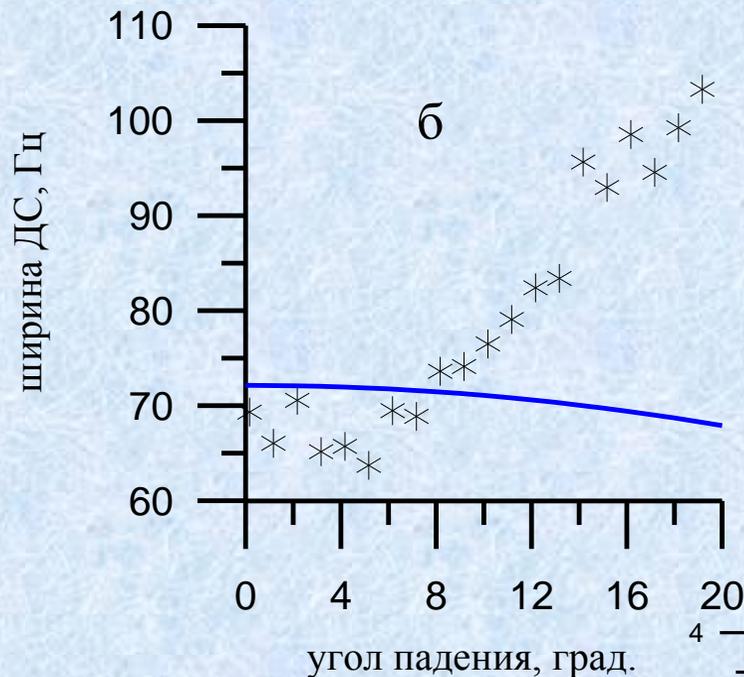
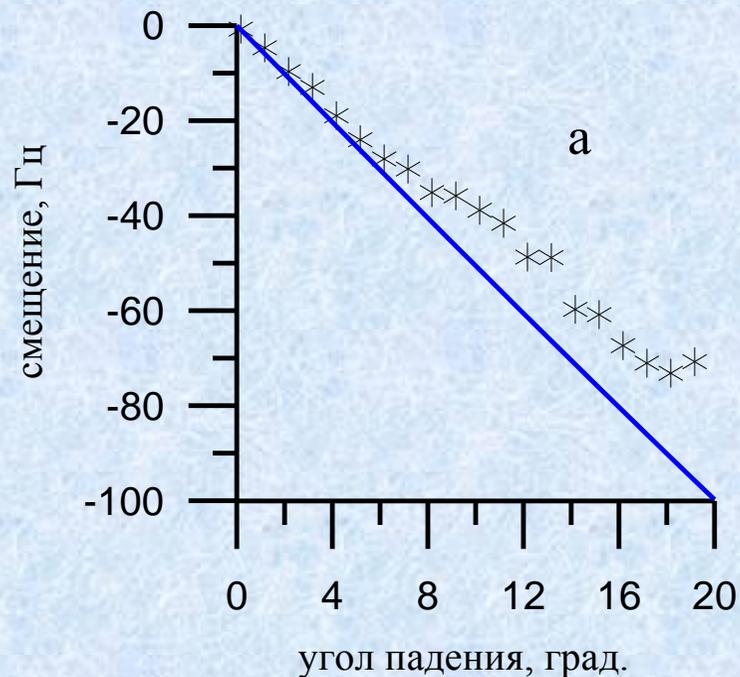
Свойства доплеровского спектра: обработка



Зависимость смещения (а), ширины (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от угла падения. Кружки – экспериментальные данные, кривая – вычисления по модели доплеровского спектра для полностью развитого ветрового волнения (эффективная скорость ветра 3,28 м/с и эффективный безразмерный ветровой разгон 20170).

Свойства доплеровского спектра: обработка

В эксперименте участвовали два радиолокатора. Измерения проводились синхронно, что позволяет использовать восстановленные параметры волнения для численного моделирования второго радиолокатора.



Зависимость смещения (а), ширины (б) доплеровского спектра и сечения обратного рассеяния (в) от угла падения. Кресты – экспериментальные данные, кривая – вычисления по модели доплеровского спектра для полностью развитого ветрового волнения (эффективная скорость ветра 3,28 м/с и эффективный безразмерный ветровой разгон 20170).

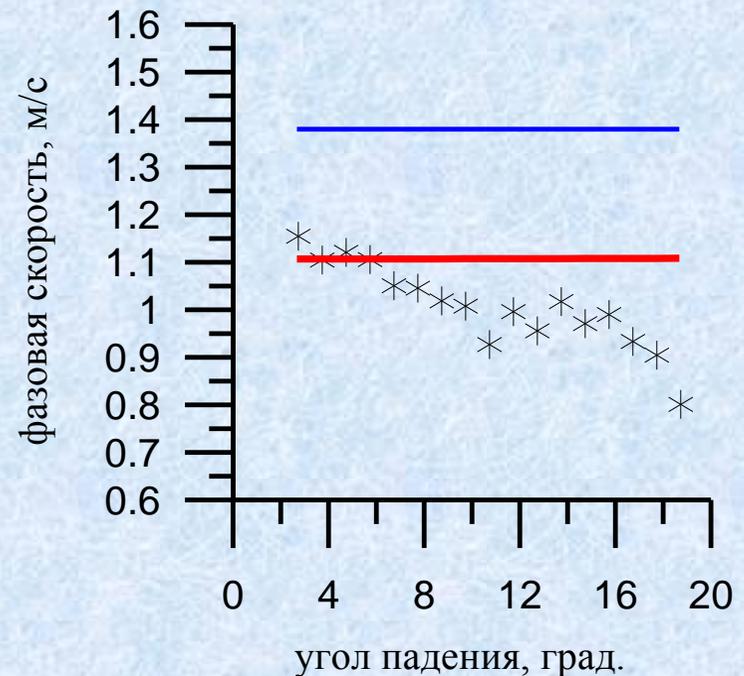
Свойства доплеровского спектра: обработка

В рамках квазизеркальной модели обратного рассеяния смещение доплеровского спектра определяется проекцией «средней» фазовой скорости, вычисленной по спектру волнения.

$$f_{shift} \sim \frac{\omega_1}{K_1} \sin \theta_0 = c_1 \sin \theta_0$$

По смещению измеренного доплеровского можно оценить фазовую скорость и это дополнительный критерий смены механизмов обратного рассеяния.

$$f_{shift} = - \frac{\sin \theta_0}{\lambda} \cdot \frac{2K_{\zeta t}}{\sigma_{xx}^2} \left(\frac{11.04\sigma_{xx}^2}{11.04\sigma_{xx}^2 + \delta_x^2} \right)$$

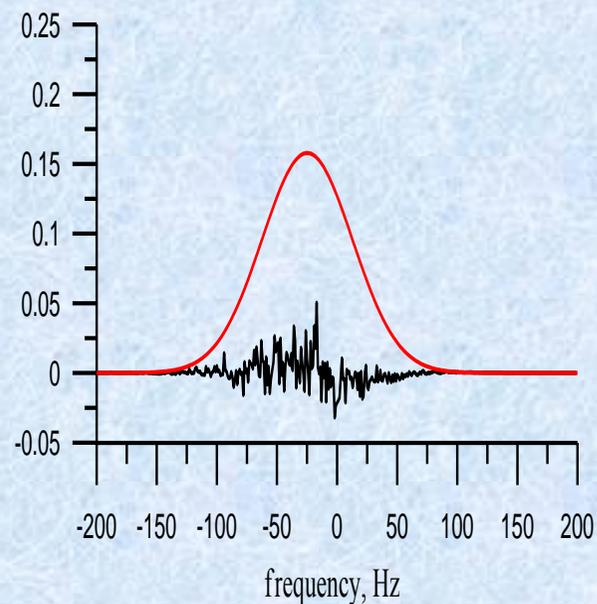
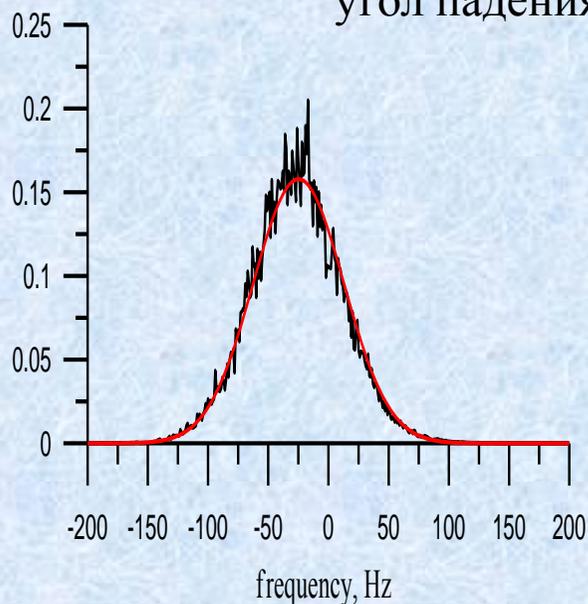


Зависимость «средней» фазовой скорости от угла падения: **красная линия** – теория (30°), звездочки – эксперимент, **синяя линия** – теория (0°).

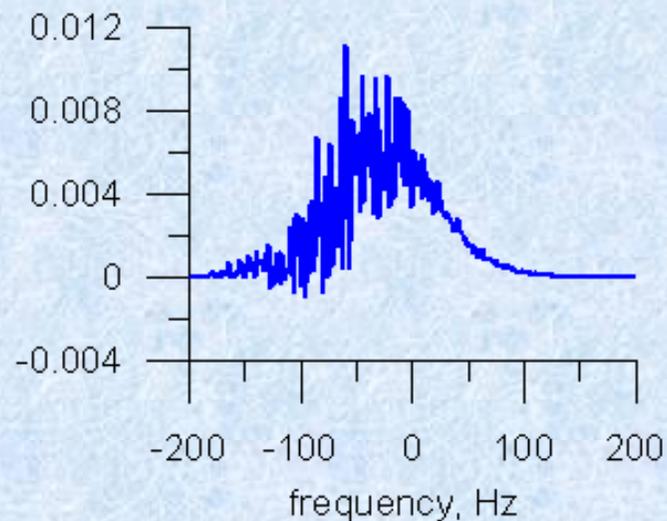
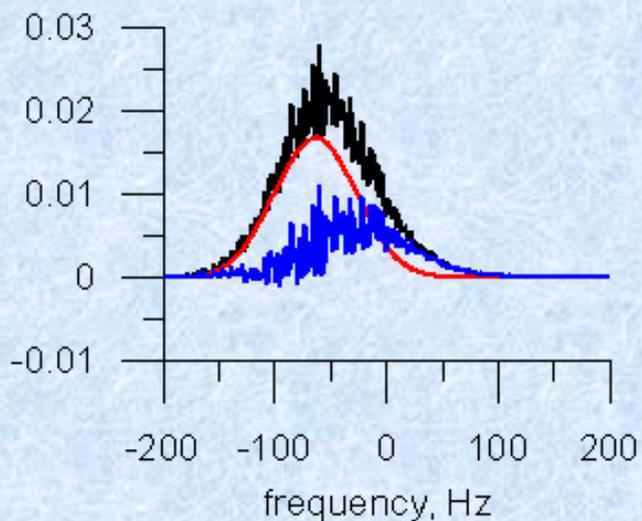
Свойства доплеровского спектра: обработка

По сечению
обратного рассеяния
невозможно точно
определить
соотношение между
квазизеркальным и
резонансным
механизмами
обратного рассеяния
в переходной
области углов
падения.

угол падения $5,68^\circ$

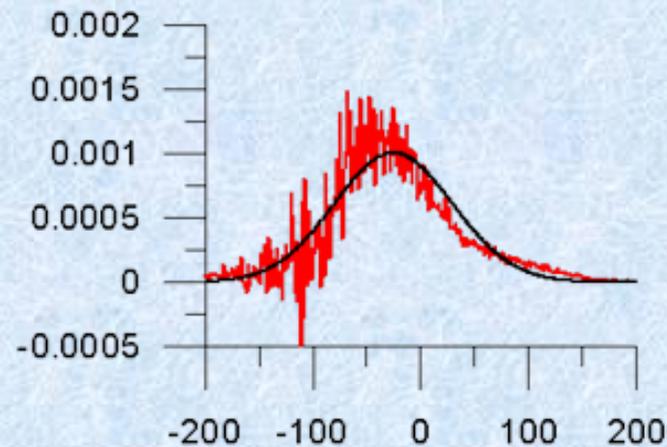
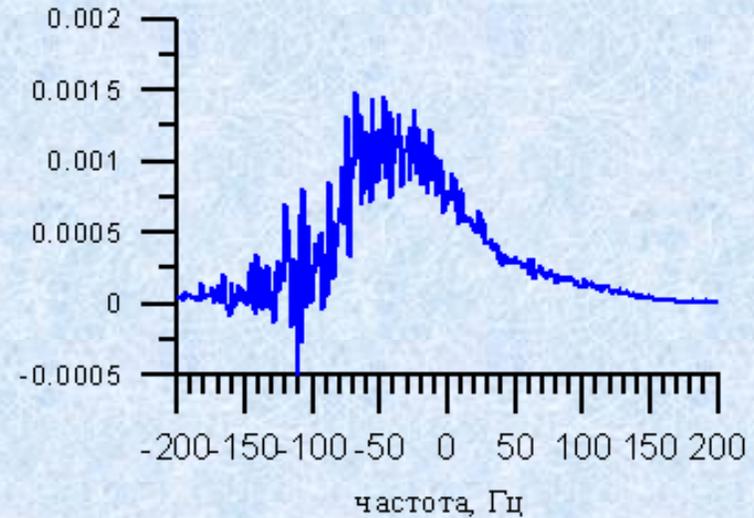
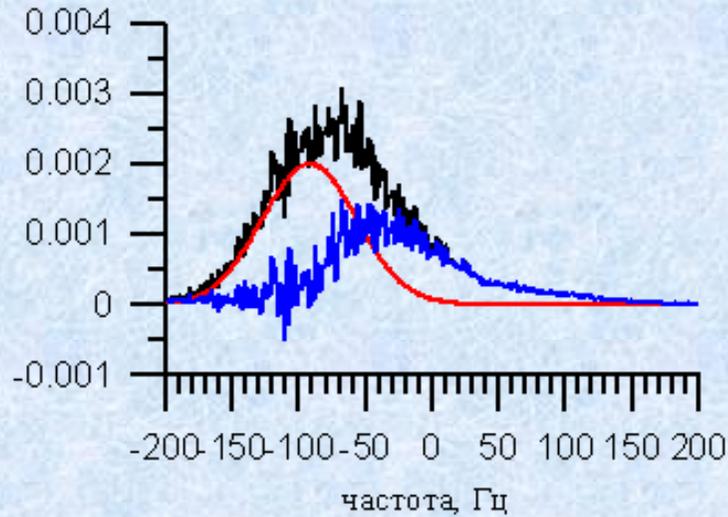


угол падения $12,68^\circ$



Свойства доплеровского спектра: обработка

угол падения $18,68^\circ$



Кривая вычислена по
модифицированной
модели резонансного
рассеяния

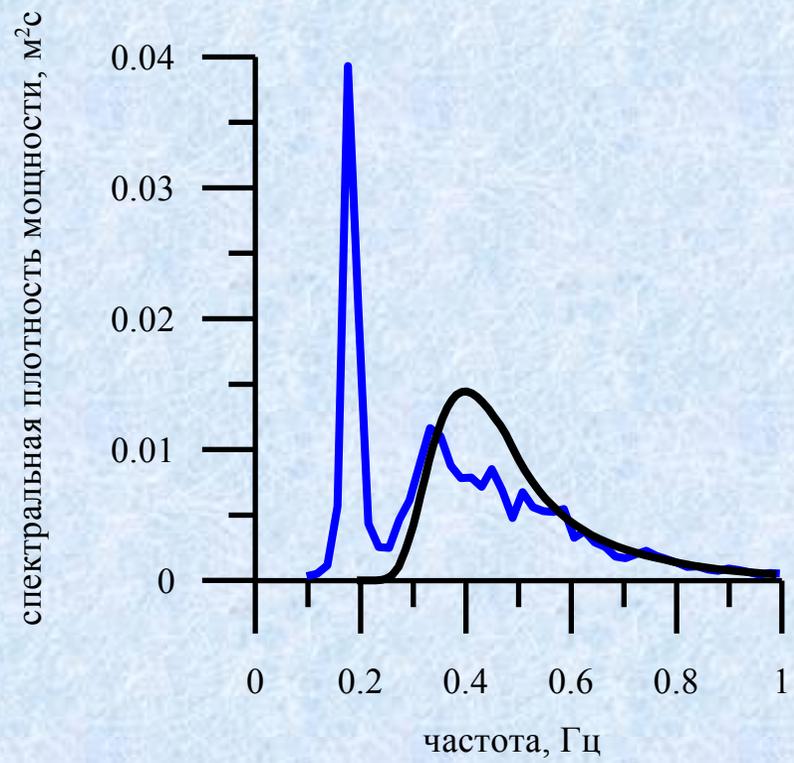
Выводы

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.

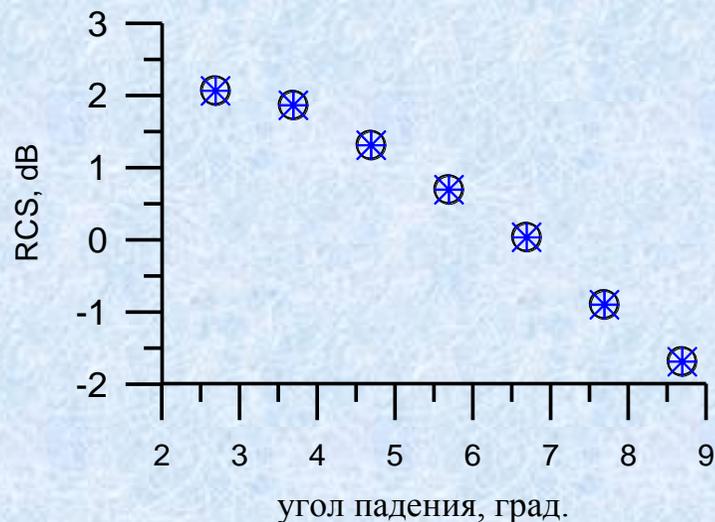
Разработан алгоритм выделения в отраженном сигнале квазизеркальной и брэгговской компонент в переходной области углов падения.

Спасибо за внимание!

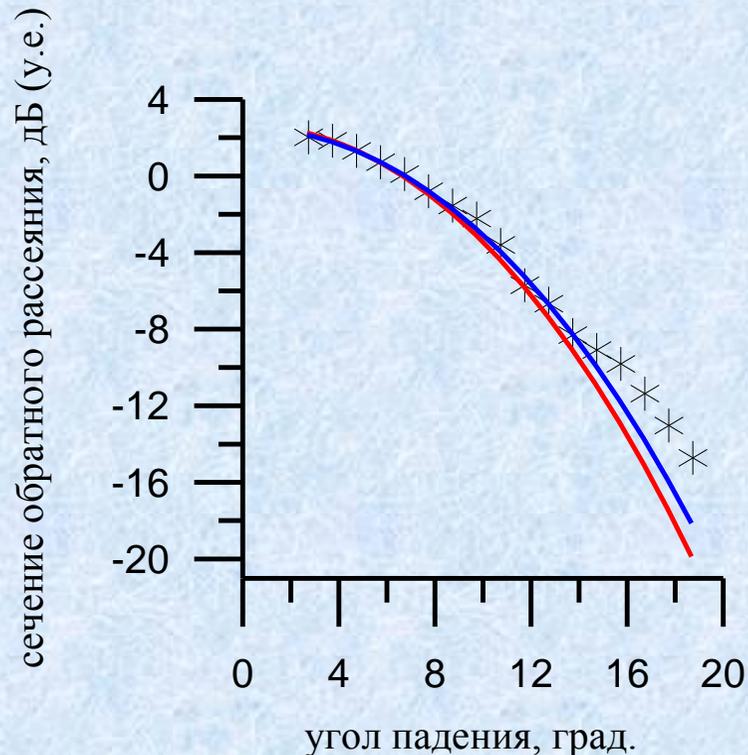


Свойства доплеровского спектра: обработка

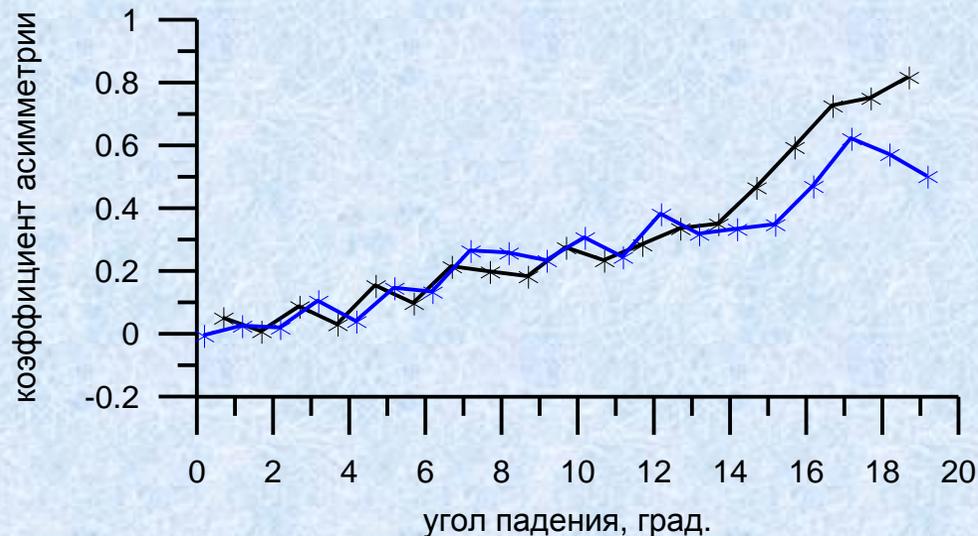
Зная зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения можно независимым способом вычислить дисперсию уклонов морской поверхности. Алгоритм применяется для обработки данных дождевого радиолокатора.



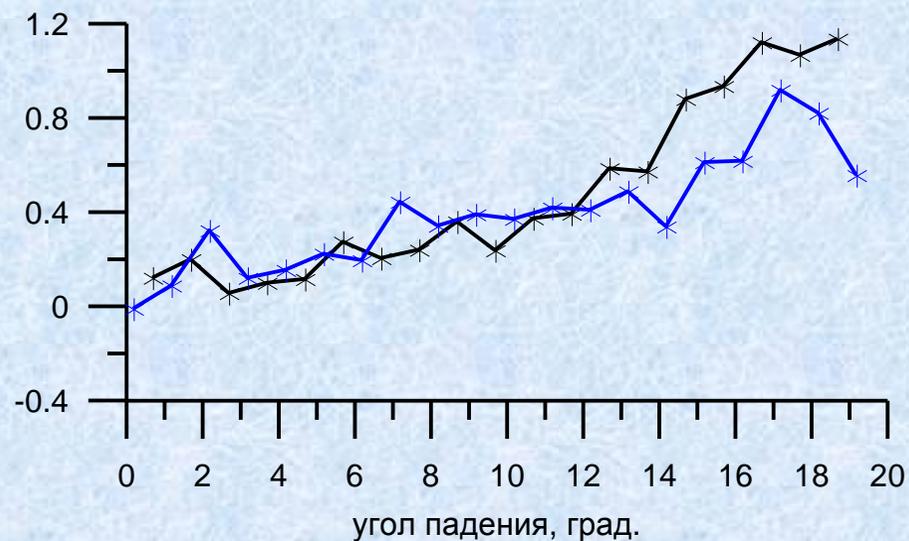
Проводится регрессия и вычисляется дисперсия уклонов, которая удовлетворяет данной угловой зависимости



Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения:
звездочки – эксперимент,
красная кривая – дисперсия уклонов 0,011 (4 угла падения),
синяя кривая – 0,012 (7 углов падения).

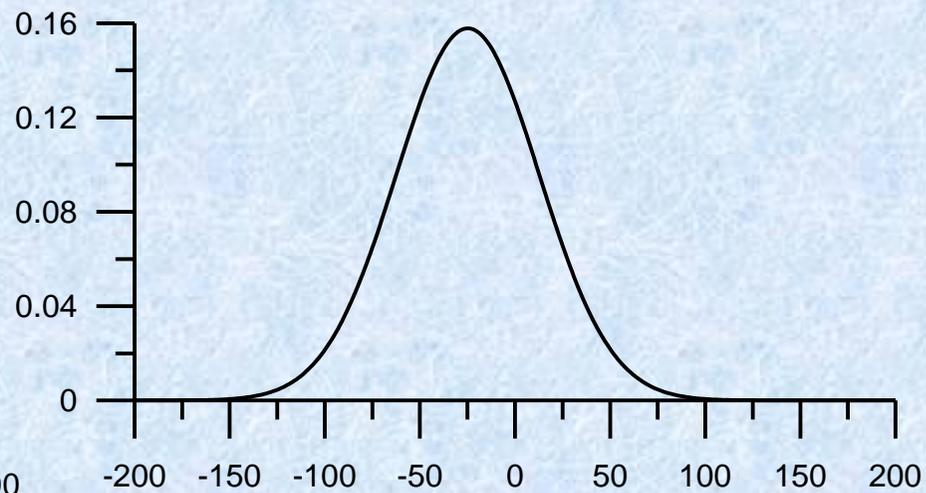
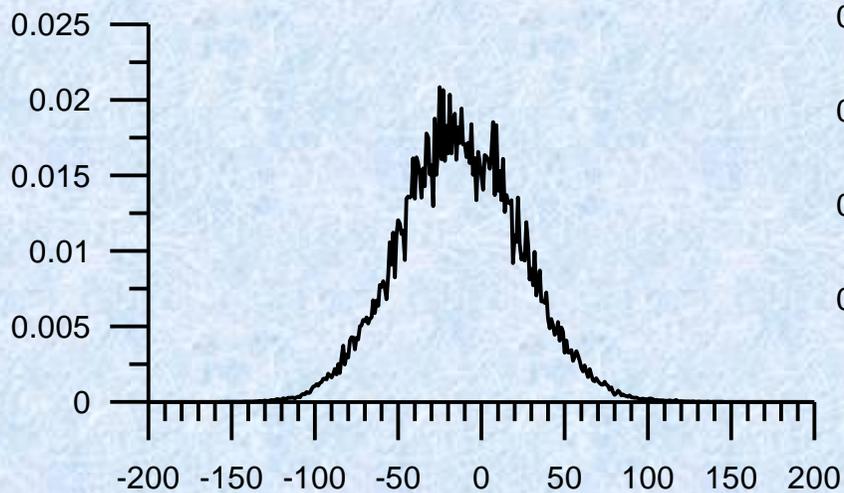


Зависимость коэффициента асимметрии ДС от угла падения: синяя кривая – ножевая антенна, черный цвет - симметричная



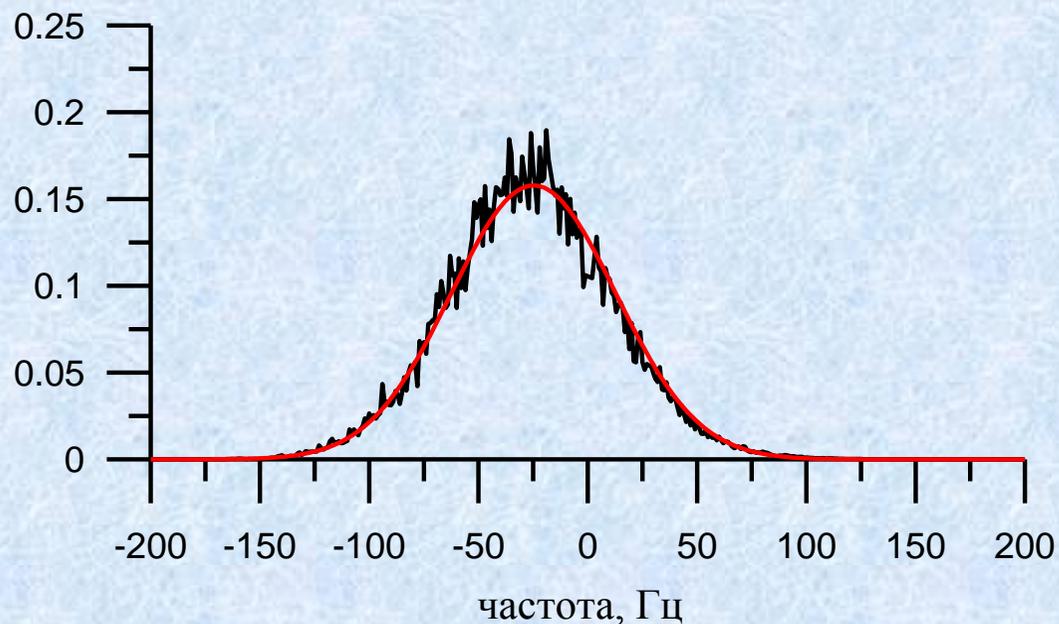
Зависимость коэффициента эксцесса ДС от угла падения: синяя кривая – ножевая антенна, черный цвет - симметричная

спектральная плотность мощности



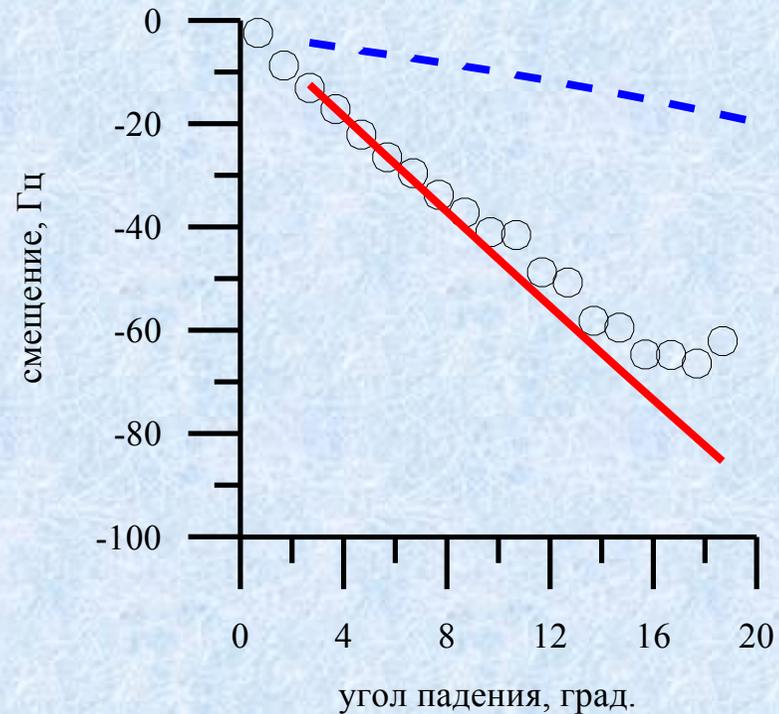
частота, Гц

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



частота, Гц

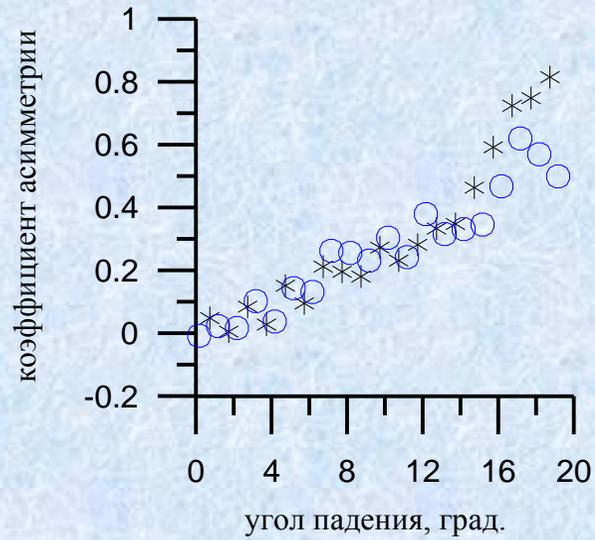
Свойства доплеровского спектра: эксперимент



Зависимость смещения доплеровского спектра от угла падения: кружки – эксперимент, сплошная кривая – метод Кирхгофа, пунктир – резонансное рассеяние (длина волны 0,0083 м).

Свойства доплеровского спектра: обработка

Асимметрия



эксцесс

