



Восстановление дисперсии наклонов крупномасштабного волнения по данным РР радиолокатора

Караев В.Ю., Каневский М.Б., Мешков Е.М., К. Чу

**Институт прикладной физики РАН
603950, Н.Новгород, Ульянова, 46
e-mail: *volody@hydro.appl.sci-nnov.ru***

1. Введение

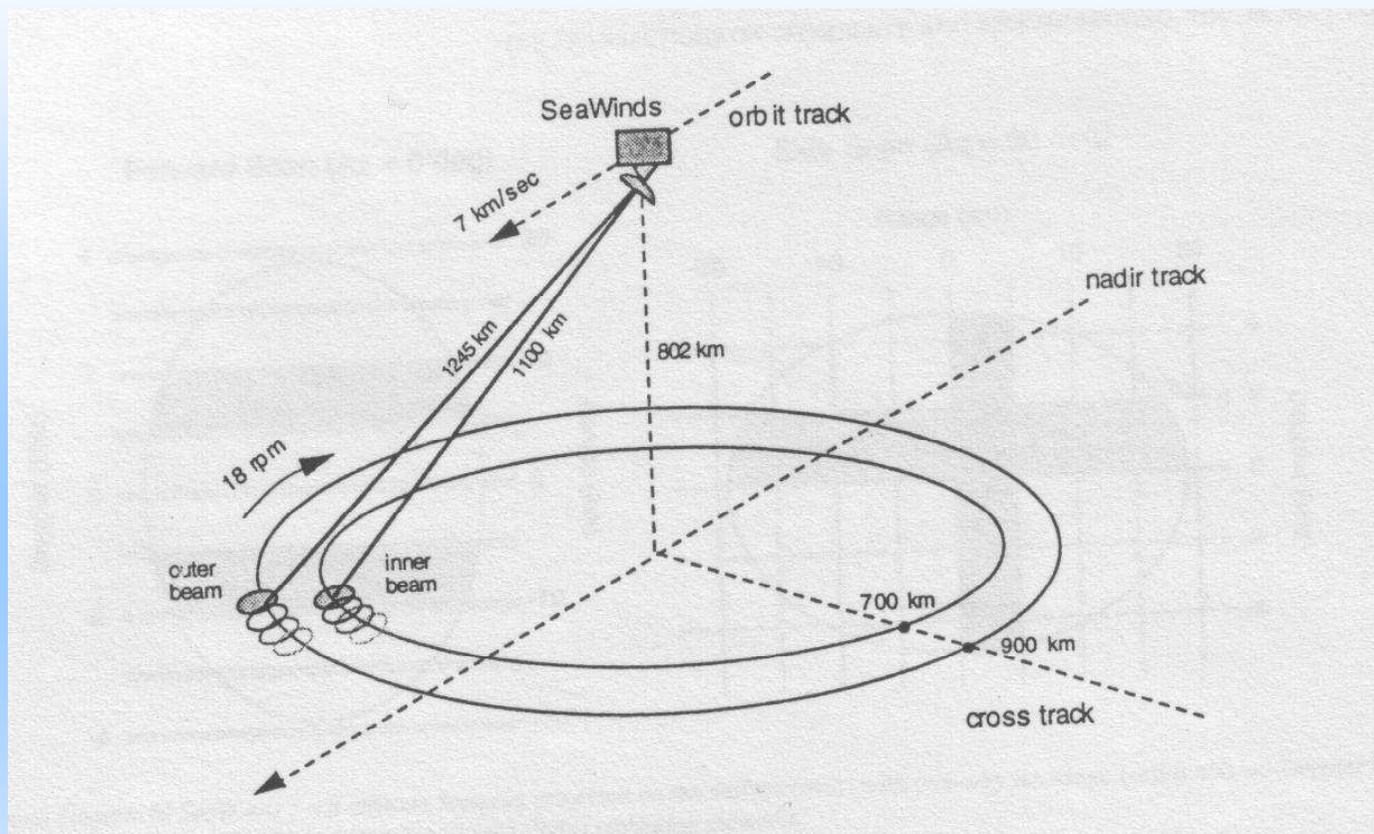


Рис.1. Скаттерометр SEA WINDS. Антенны $1,8^0 \times 1,6^0$, и $1,7^0 \times 1,4^0$, разрешение 25 км, ширина следа 1400 км, угол падения 47^0 и 55^0 (QuikSCAT и ADEOS II – 1800 км)

1. Введение

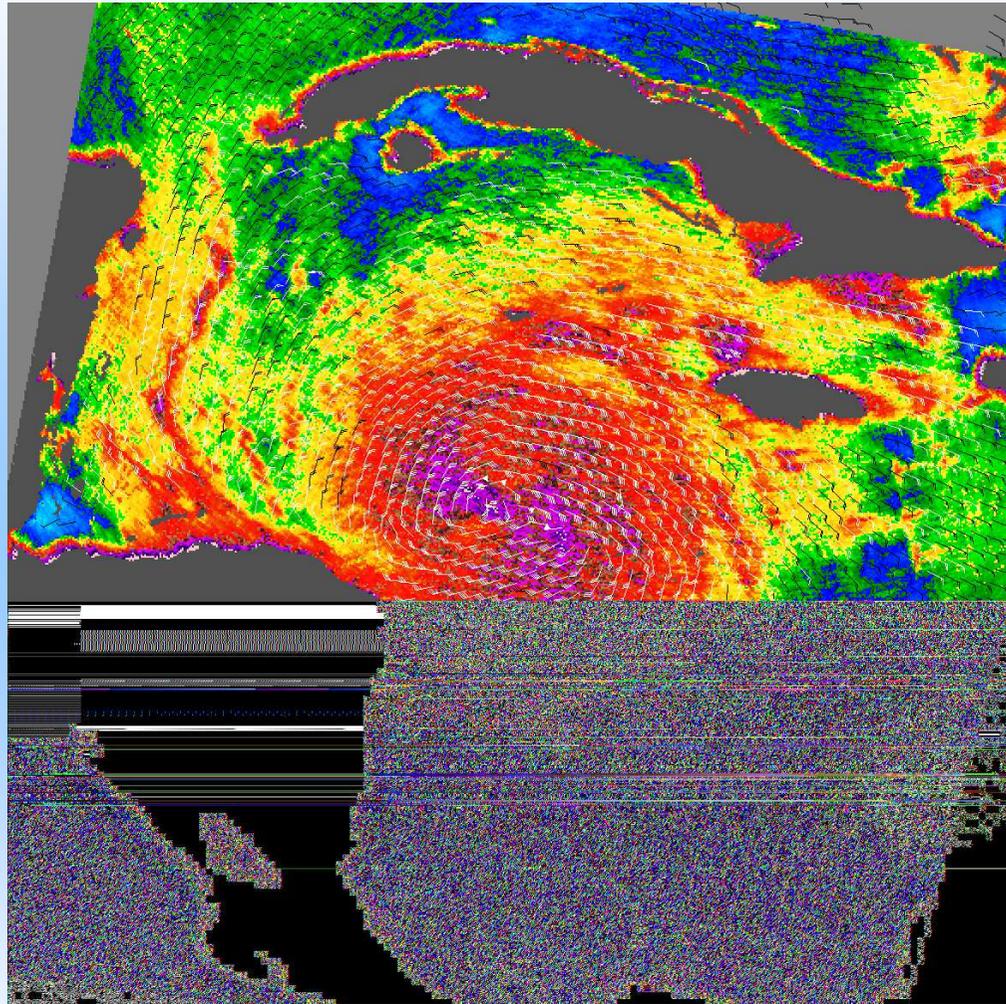


Рис. 2. Поле ветра, восстановленное по данным скаттерометра.

1. Введение

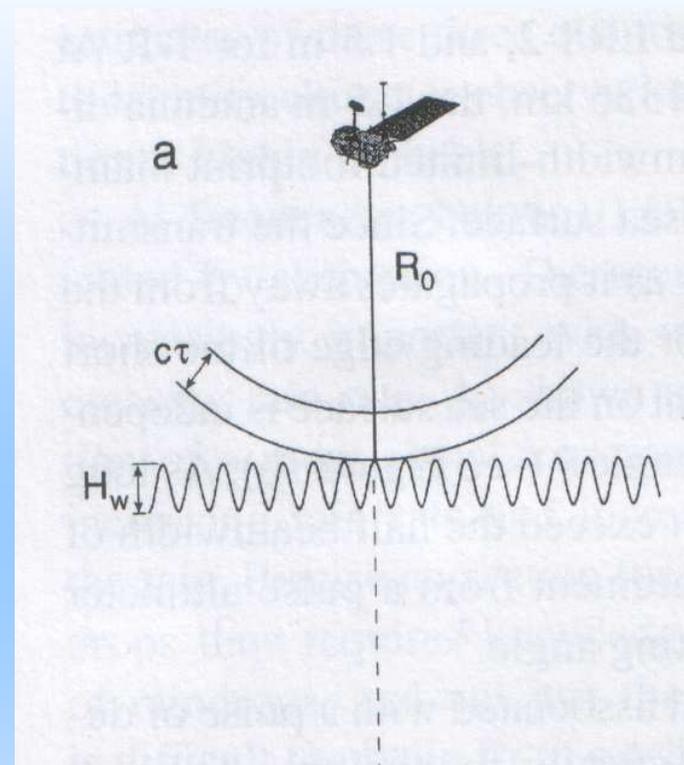
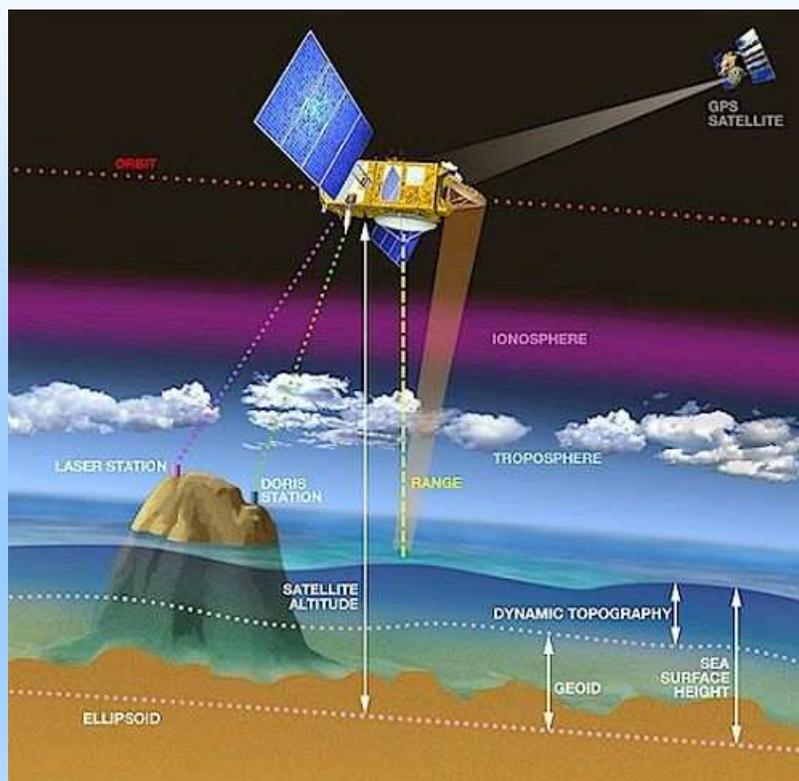


Рис. 3. Схема работы радиоальтиметра.

1. Введение

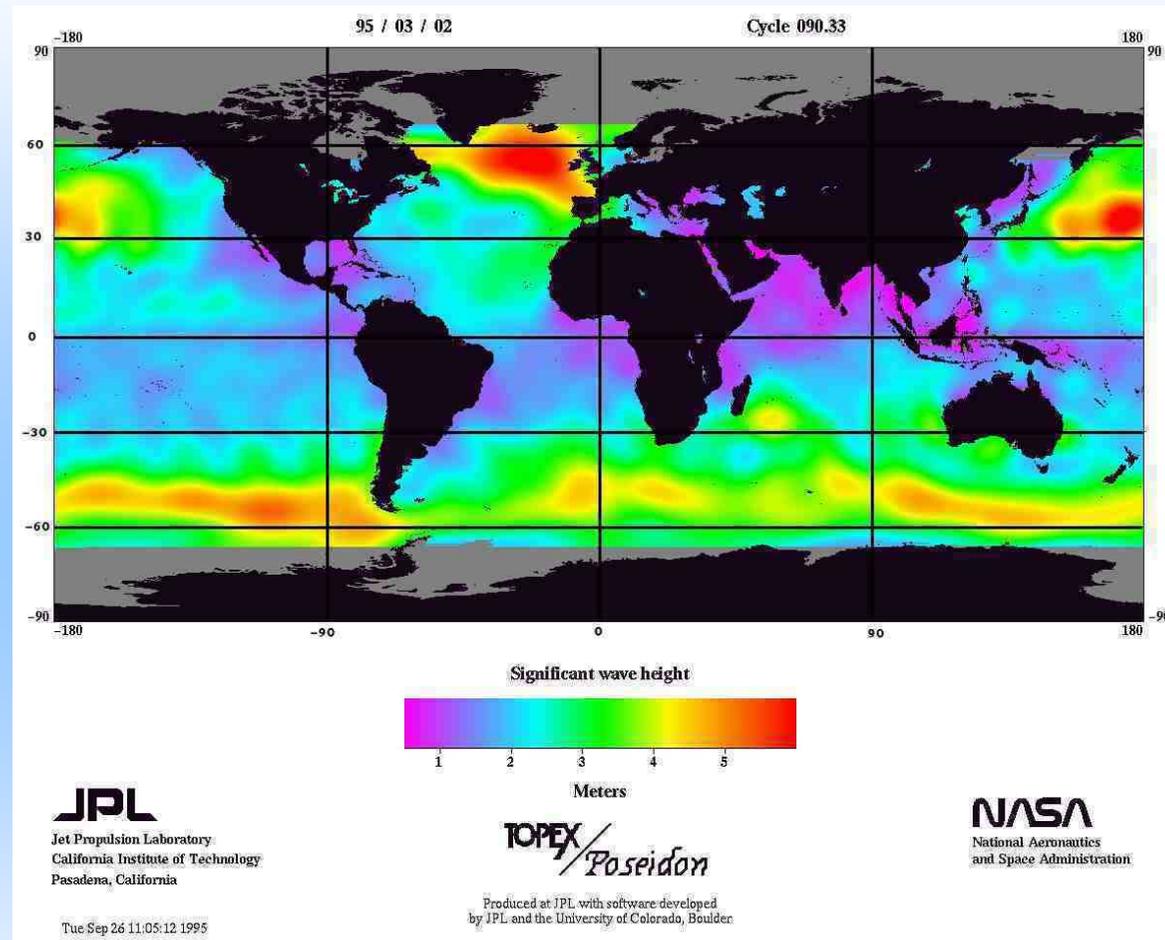


Рис. 4. Поле высот волнения по данным радиоальтиметра.

2. PR радиолокатор

Tropical Rainfall Measuring Mission (Япония-США)

На спутнике была установлена следующая аппаратура:

- 1) Precipitation radar (PR)
- 2) TRMM Microwave imager (TMI)
- 3) Visible Infrared scanner (VIRS)
- 4) Clouds and the Earth's radiant energy system (CERES)
- 5) Lightning Imaging sensor (LIS)

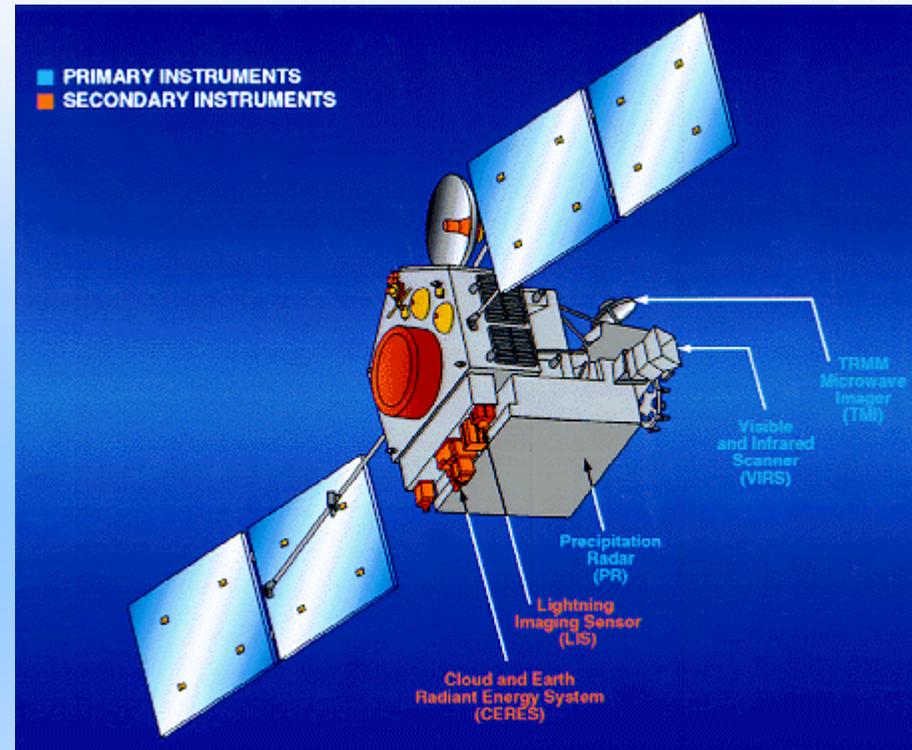


Рис. 5. TRMM спутник

2. PR радиолокатор

Параметры PR-радиолокатора

Частота, ГГц	13,8
Поляризация	НН
Угол сканирования, градусы	$\pm 17^\circ$
Количество лучей	49
Ширина луча, градусы	$0,71^\circ \times 0,71^\circ$
Высота полета, км	350
Ширина полосы обзора, км	215
Горизонтальное разрешение, км	4,3 (надир)
Разрешение по дальности, м	250
Мощность, Вт	213

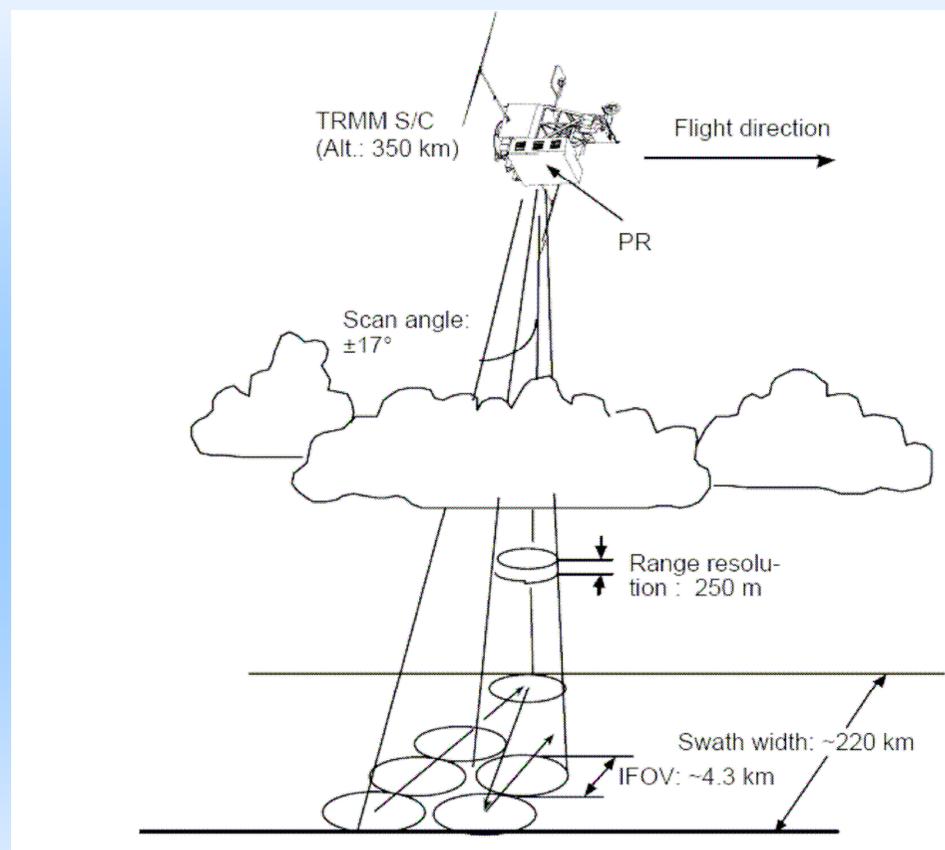


Рис. 6. PR радиолокатор

2. PR радиолокатор

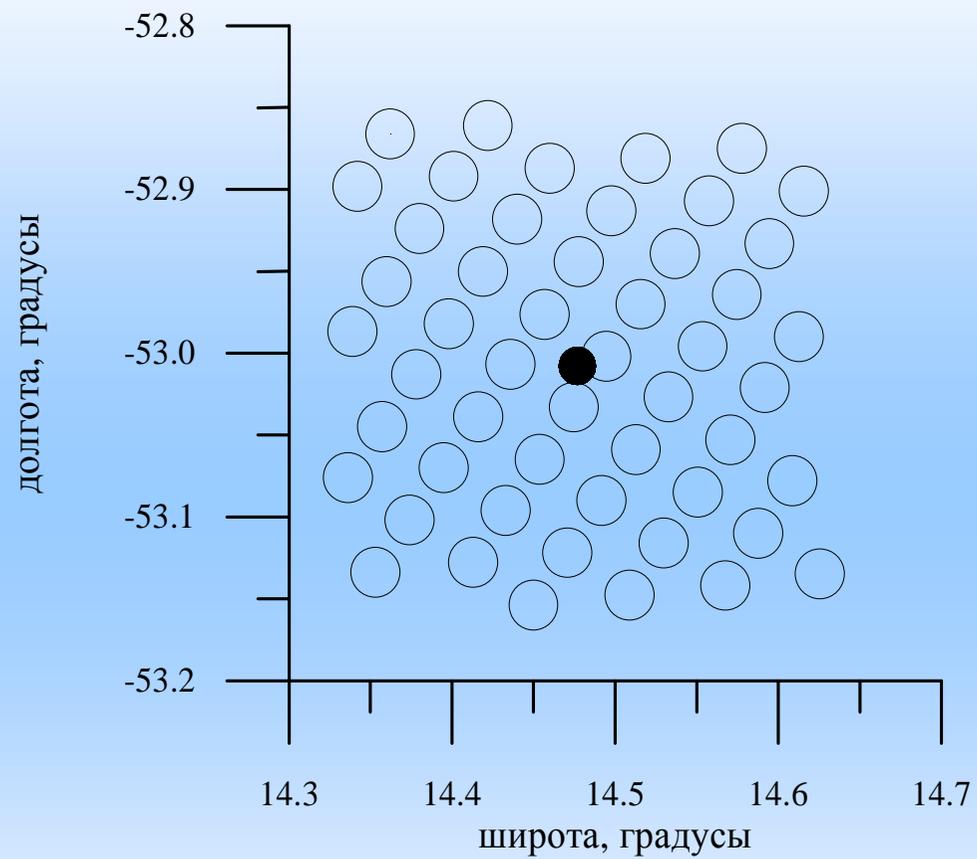


Рис. 7. Схема расположения лучей PR-радиолокатора вблизи буя.

2. PR радиолокатор

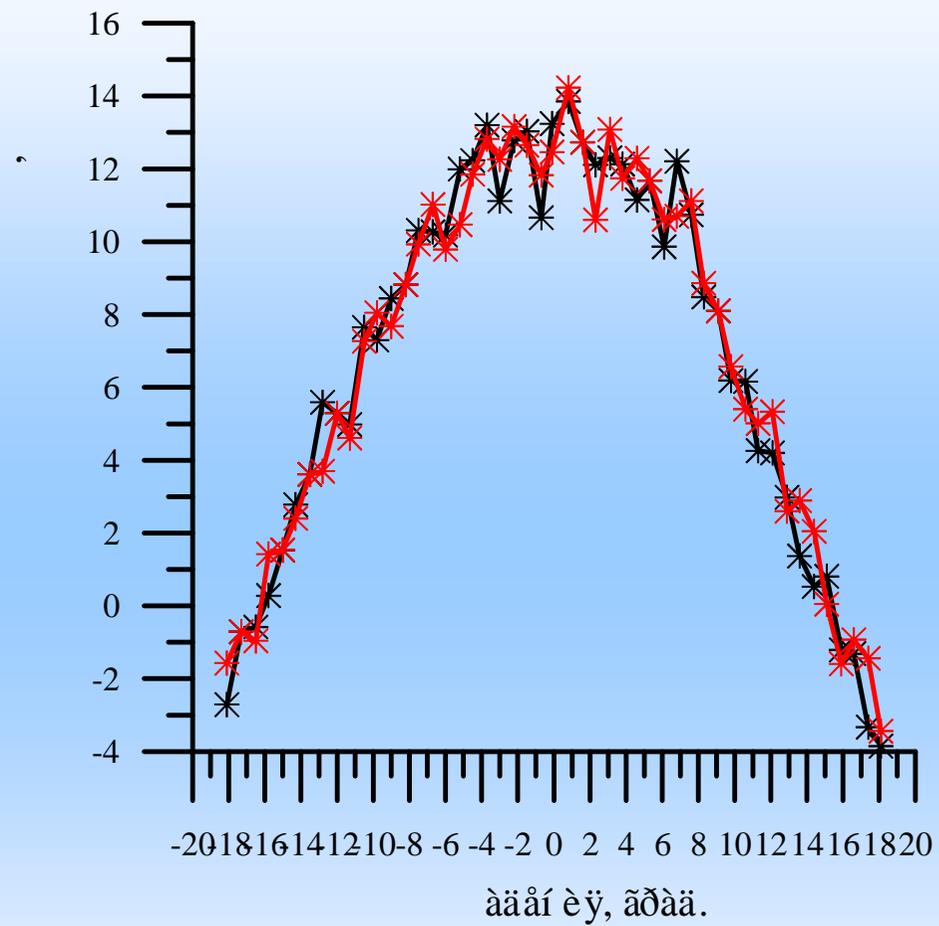


Рис. 8. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов.

3. Алгоритмы обработки данных PR радиолокатора

Как известно в области малых углов падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках волнового профиля, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. В этом случае сечение обратного рассеяния σ_0 при ориентации антенны вдоль оси X задается хорошо известной формулой:

$$\sigma_0(\theta) = \frac{|R(0)|^2}{2\cos^4\theta \cdot \sqrt{\sigma_{xx}^2 \sigma_{yy}^2}} \times \exp\left[-\frac{\text{tg}^2\theta}{2\sigma_{xx}^2}\right], \quad (1)$$

где θ - угол падения; $R(0)$ - эффективный коэффициент отражения при нормальном падении; σ_{xx}^2 и σ_{yy}^2 - дисперсии наклонов волнения вдоль осей X и Y соответственно.

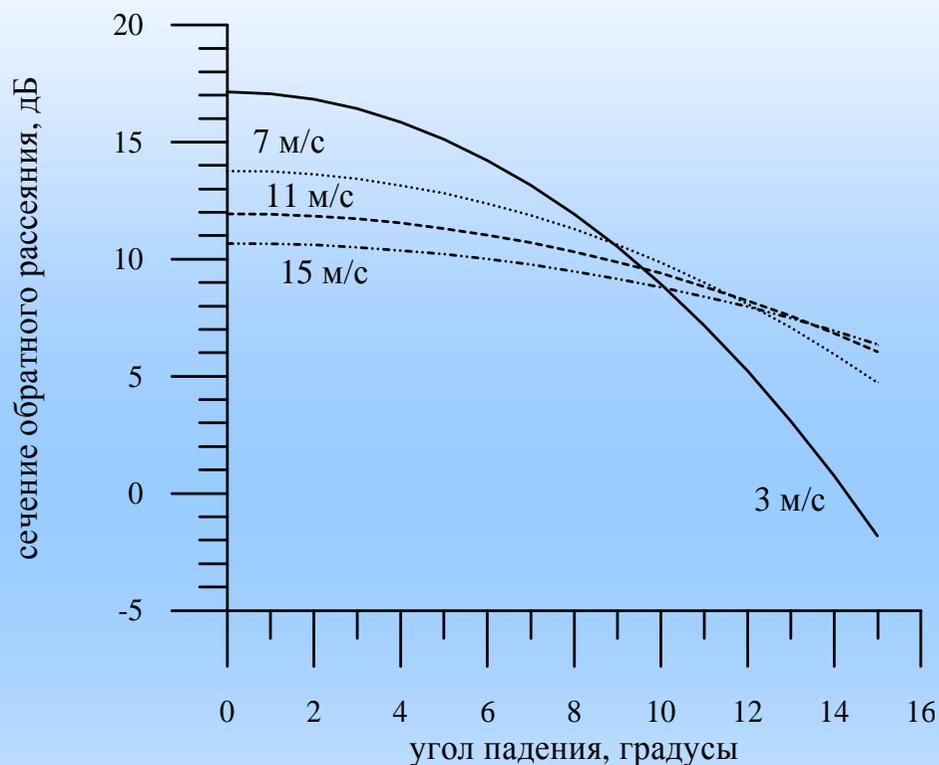


Рис. 9. Теоретическая зависимость сечения обратного от угла падения для четырех скоростей ветра: 3 м/с, 7 м/с, 11 м/с, 15 м/с

3. Алгоритмы обработки данных PR радиолокатора

Полоса обзора – 215 км

Отбор PR данных .

а) радиус круга 25 км

б) минимальное число
углов падения больше 4

в) угол падения не
превосходит 12°

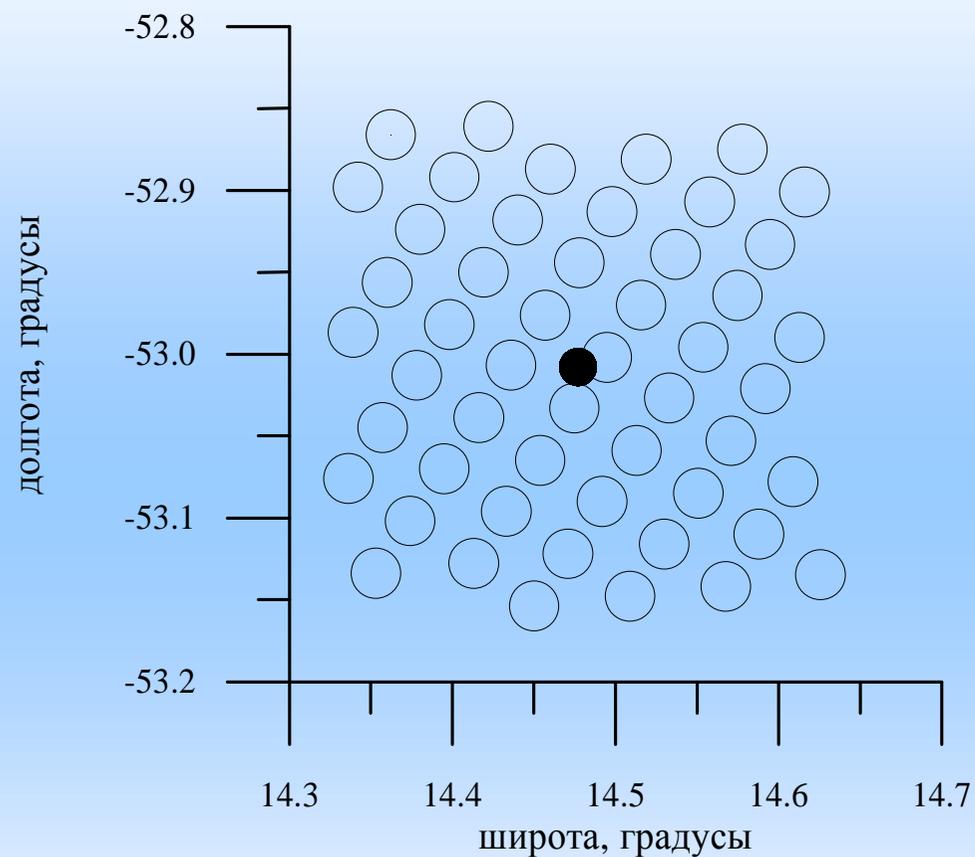
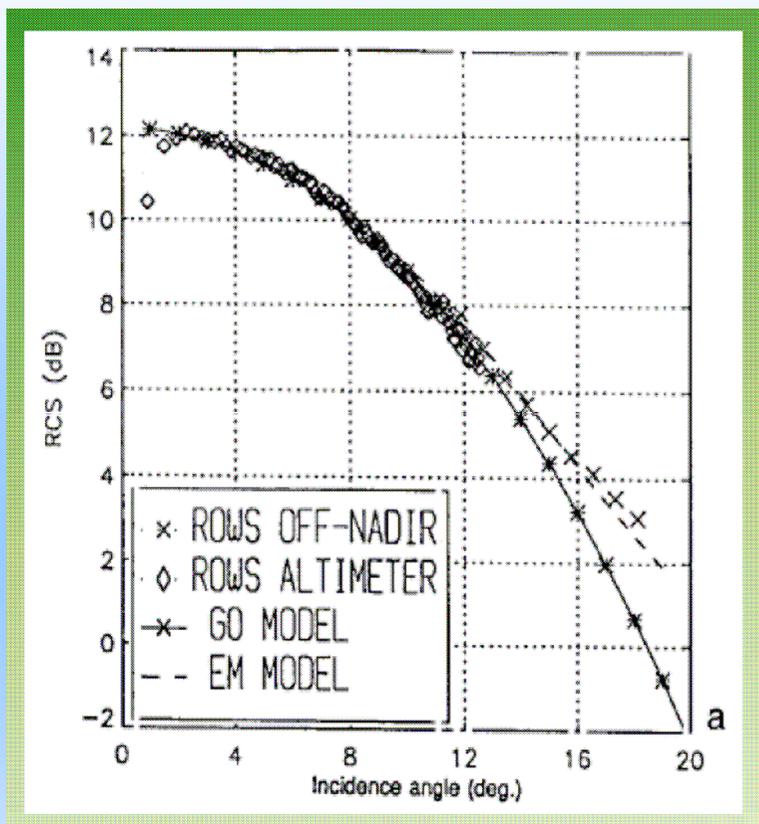
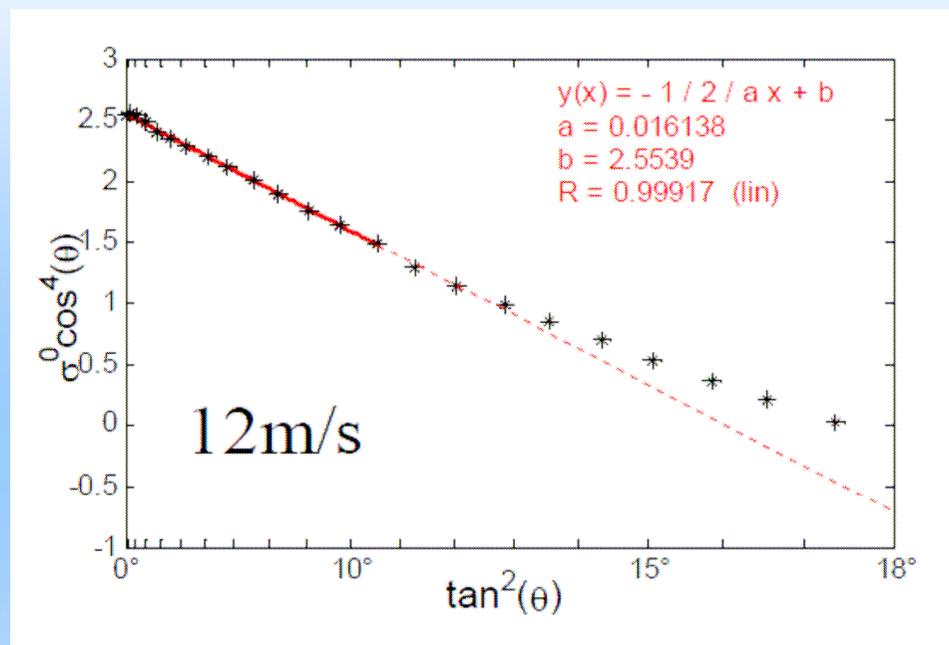


Рис. 10. Схема расположения лучей PR-радиолокатора вблизи буя.

3. Алгоритмы обработки данных PR радиолокатора



а



б

Рис. 11. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: а – самолетный эксперимент, б – PR данные

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

Можно предложить несколько алгоритмов обработки радиолокационных данных. Прежде всего, это использование зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения.

УГЛОВОЙ АЛГОРИТМ основан на зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения. Измерив сечение обратного рассеяния для двух углов падения можно определить дисперсию наклонов рассеивающей поверхности.

Формула для дисперсии наклонов вдоль направления изменения угла падения имеет следующий вид

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{tg^2\theta_1 - tg^2\theta_2}{2 \ln \left(\frac{\sigma_0(\theta_2) \cos^4 \theta_2}{\sigma_0(\theta_1) \cos^4 \theta_1} \right)}. \quad (2)$$

Эта дисперсия отличается от привычной дисперсии наклонов Cox и Munk, т.к. восстанавливаются наклоны крупномасштабного волнения.

Измерив дисперсию наклонов можно трансформировать измеренное под углом θ сечение обратного рассеяния в сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения:

$$\sigma_0(0) = \sigma_0(\theta) \cdot \exp \left[\frac{tg^2\theta}{2\sigma_{xx}^2} \right] \quad (3)$$

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

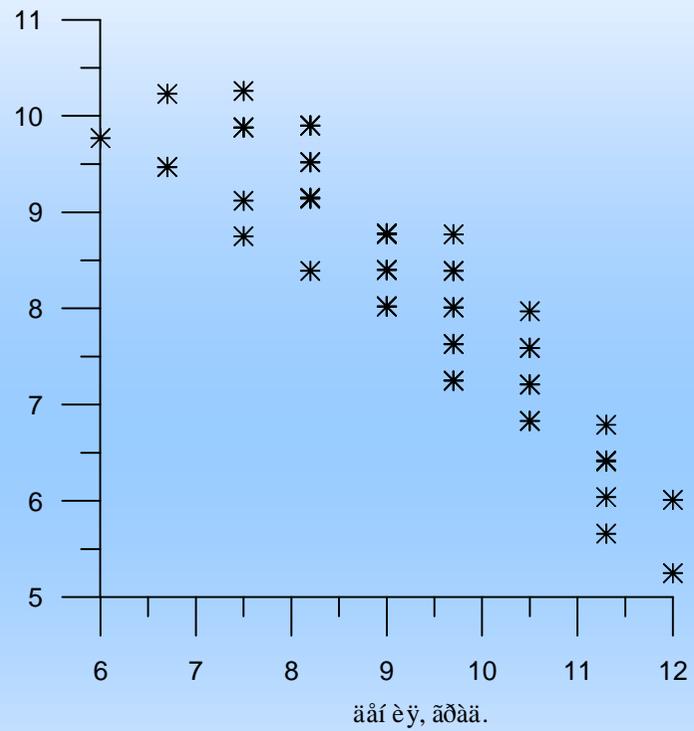


Рис. 12. Исходные данные вблизи морского буя.

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

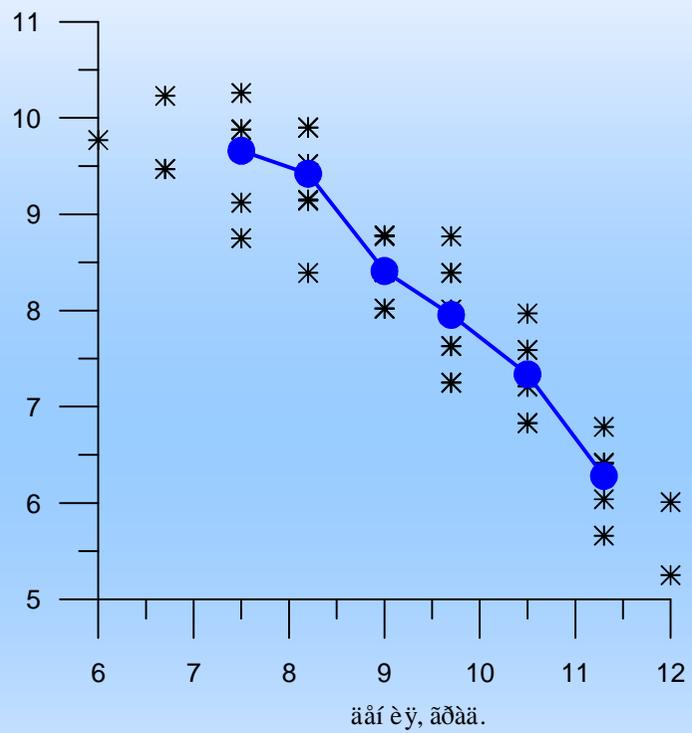


Рис. 13. Усредненная зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения.

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

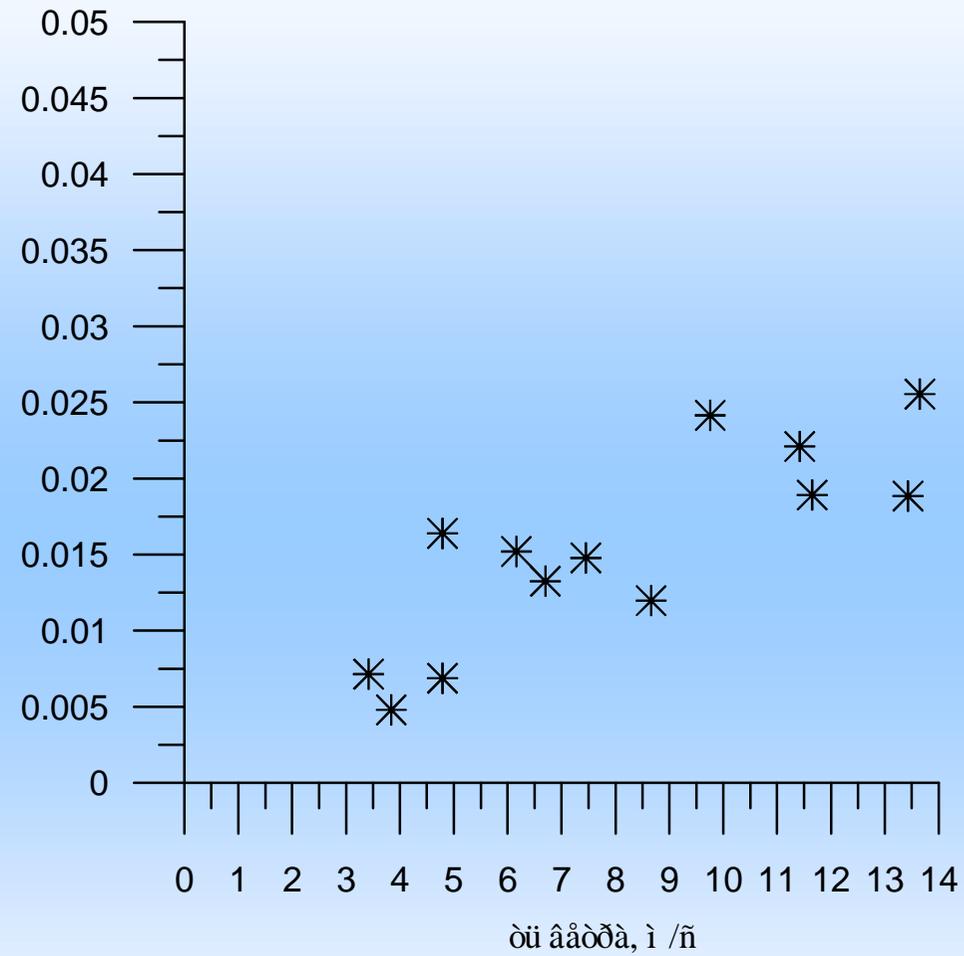


Рис. 14. Зависимость дисперсии наклонов крупномасштабного волнения от скорости ветра.

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

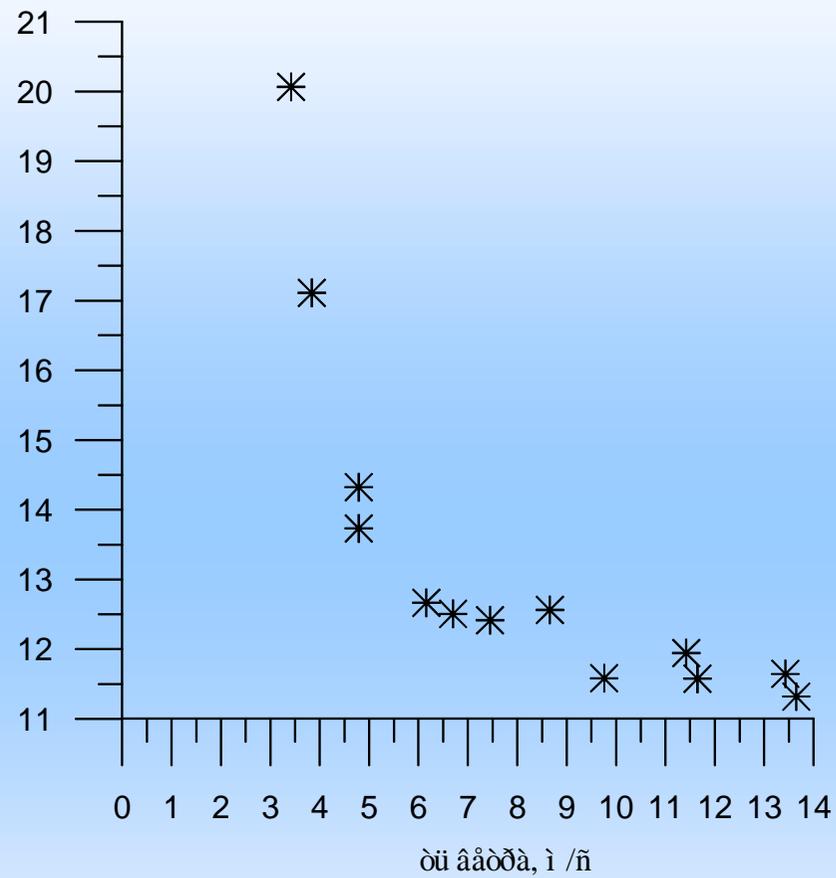


Рис. 15. Зависимость сечения обратного рассеяния от скорости ветра.

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

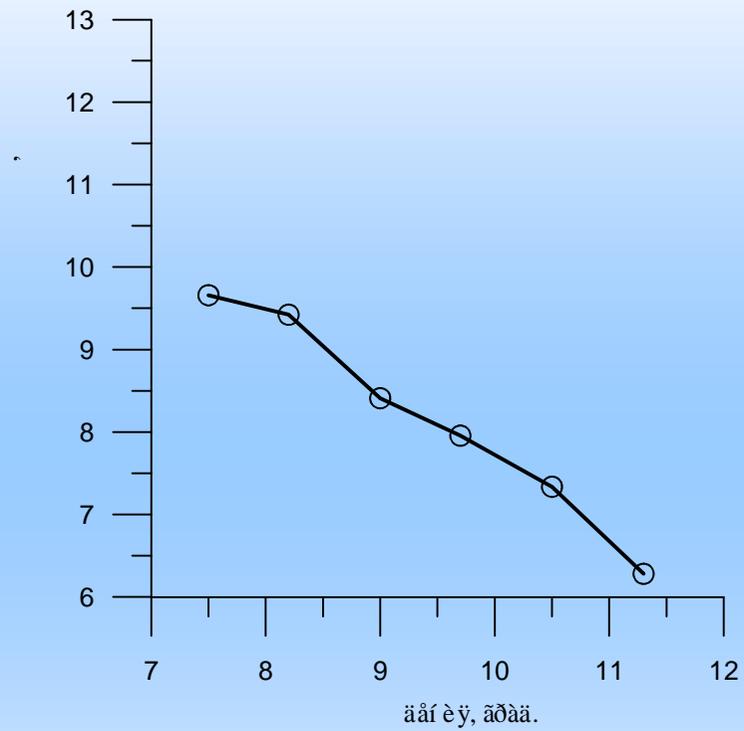


Рис. 16. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения.

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

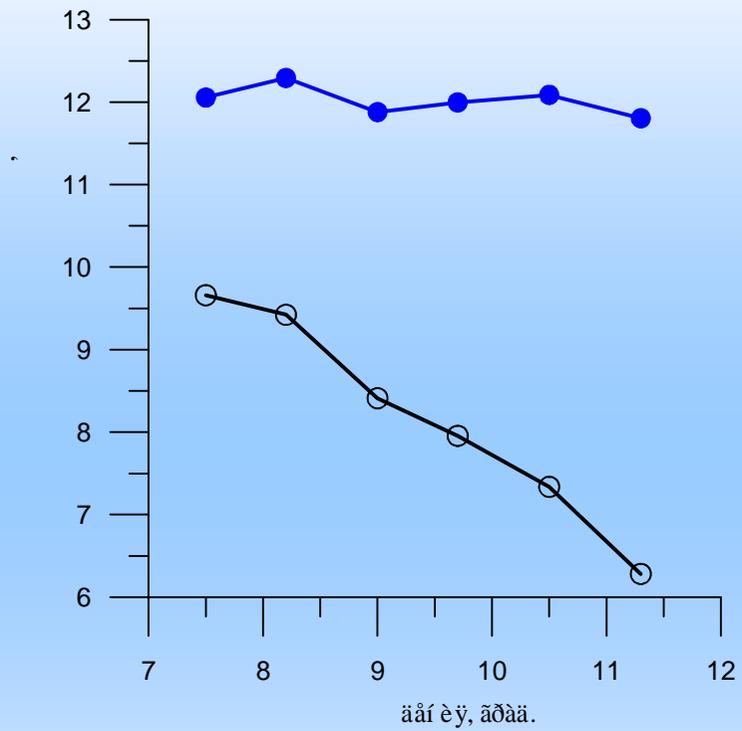


Рис. 17. Сечение обратного рассеяния при вертикальном зондировании

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

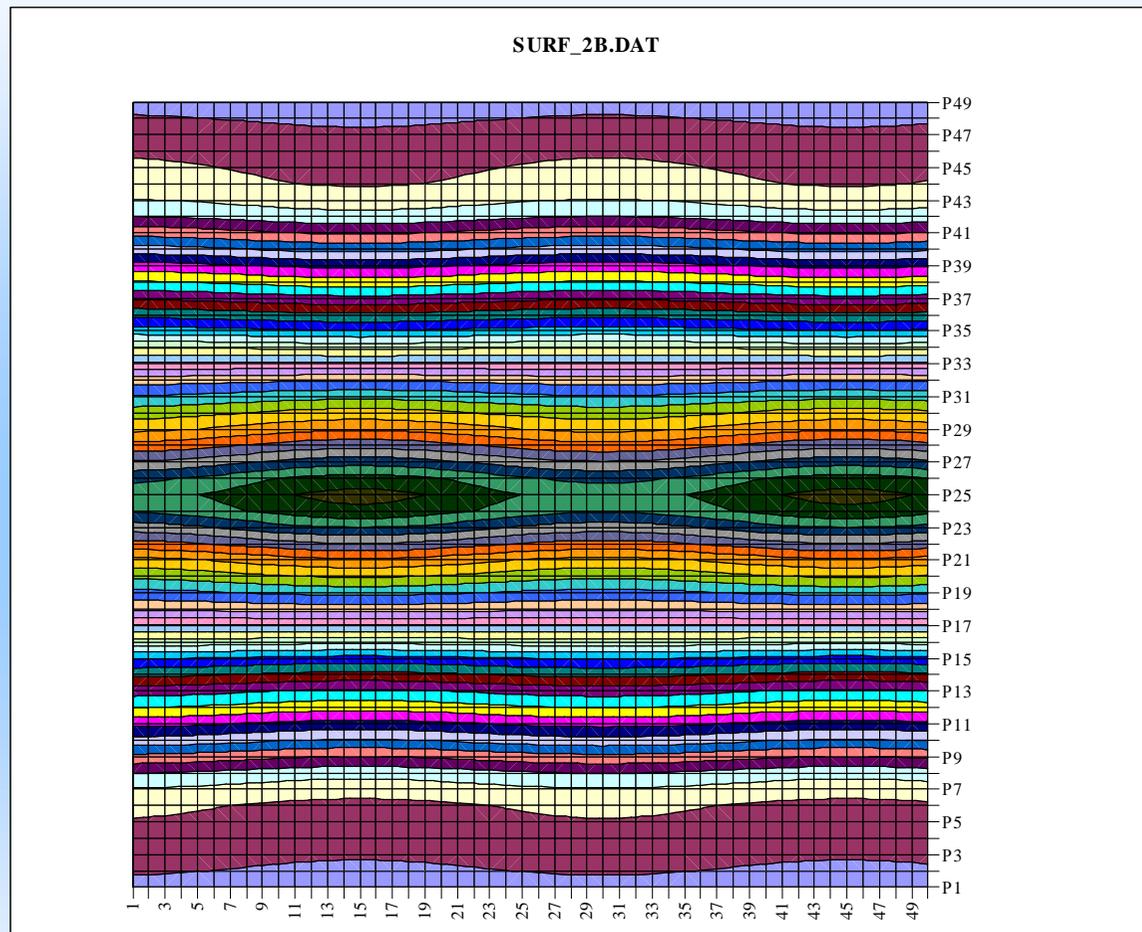


Рис. 18. Численное моделирование радиолокационного изображения с учетом угла падения

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

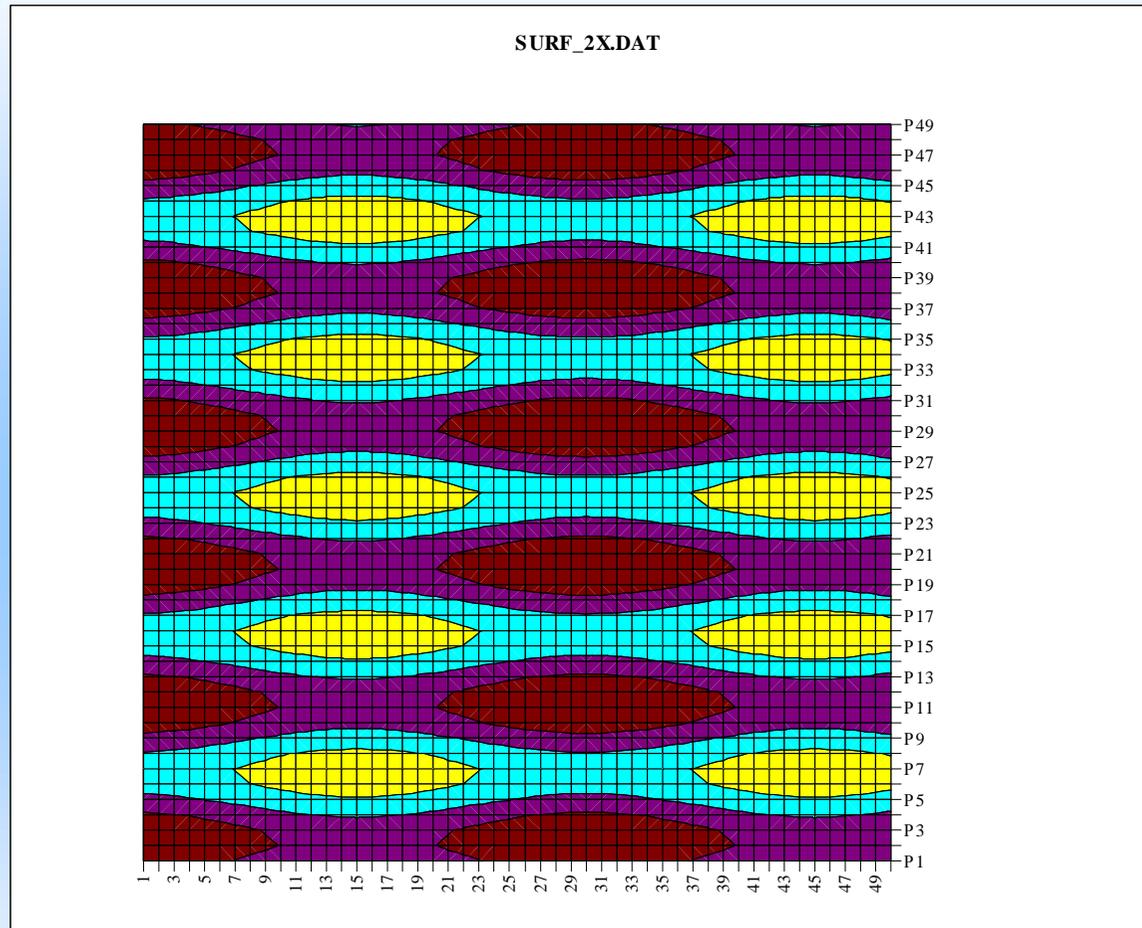


Рис. 19. Численное моделирование радиолокационного изображения с для надирного зондирования

4. Угловой алгоритм обработки данных PR радиолокатора

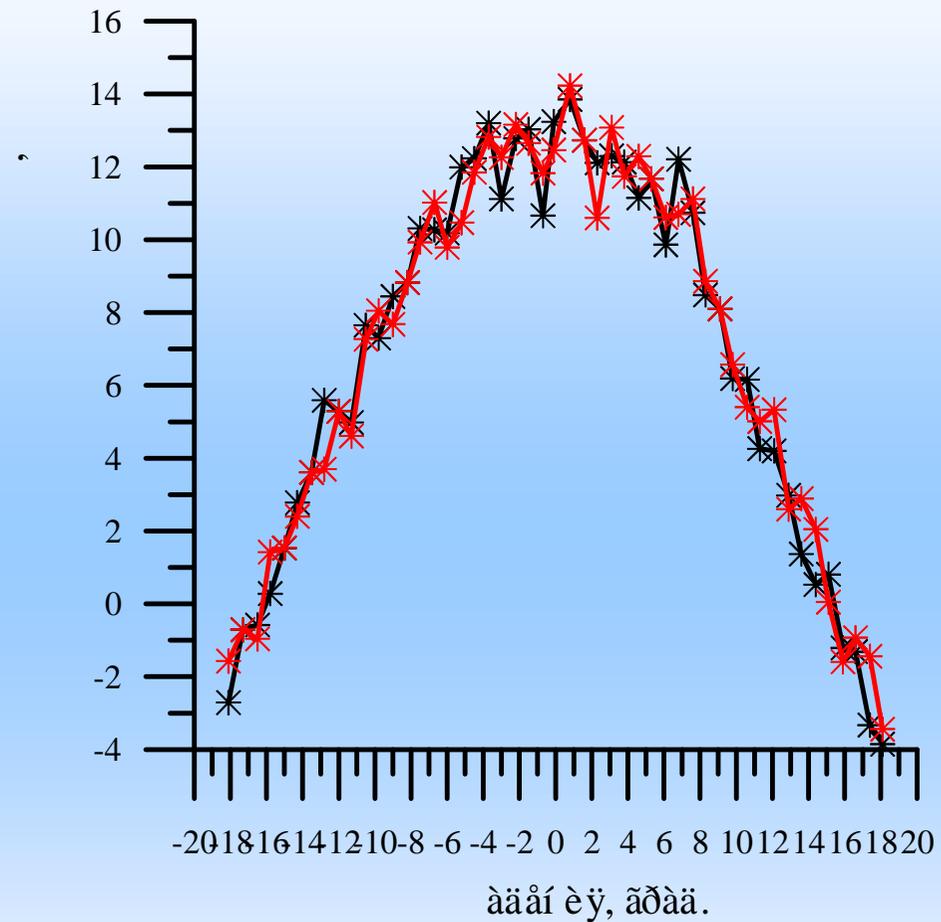


Рис. 20. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения для двух последовательных сканов.

5. Линейный алгоритм обработки данных PR радиолокатора

Рассмотрим другой подход к восстановлению дисперсии наклонов. Если взять формулу для сечения обратного рассеяния, то видно, что зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения можно линеаризовать:

$$\begin{aligned} \ln(\sigma_0(\theta) \cdot \cos^4 \theta) &= \ln \sigma_0(0) - \frac{tg^2 \theta}{2\sigma_{xx}^2} = \\ &= B + k \cdot tg^2 \theta \end{aligned} \quad (4)$$

Выполнив регрессию находим коэффициенты прямой и восстанавливаем дисперсию наклонов и сечение обратного рассеяния при нулевом угле падения:

$$\sigma_0(0) = \exp(B), \quad \sigma_{xx}^2 = -\frac{1}{2k}$$

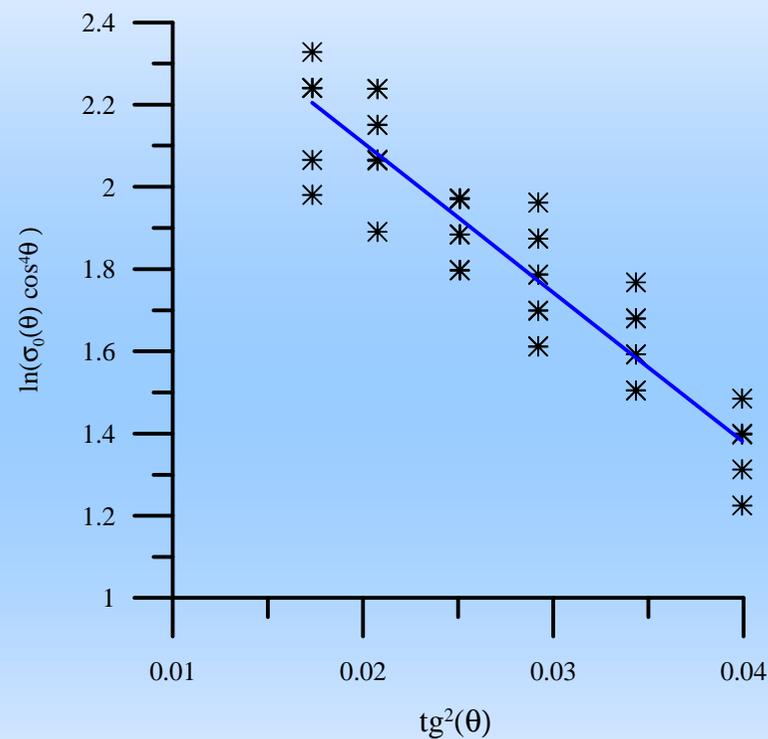


Рис. 21. Пример линейной регрессии

5. Линейный алгоритм обработки данных PR радиолокатора

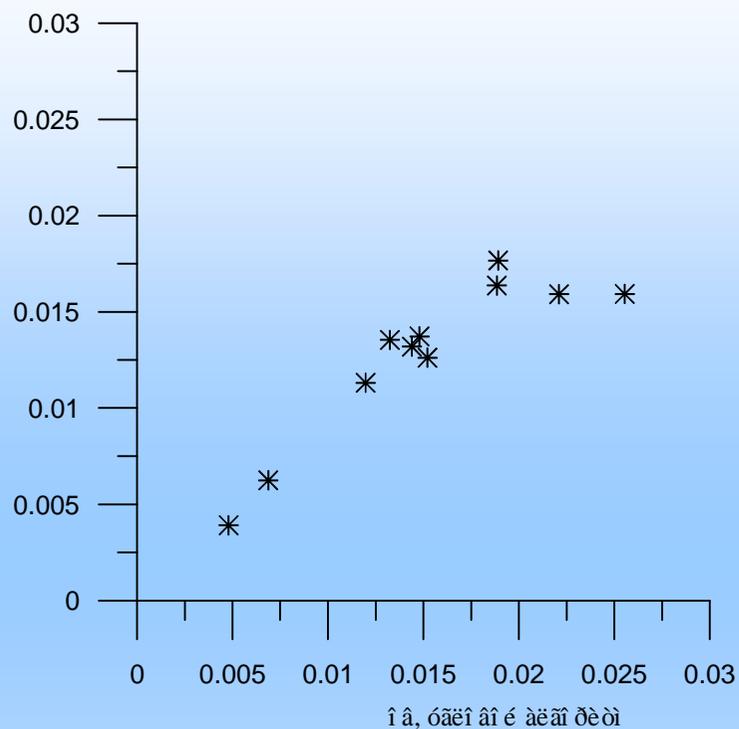


Рис. 22. Сравнение двух алгоритмов

Для восстановления скорости ветра будет разработан двухпараметрический алгоритм, входными параметрами станут сечение обратного рассеяния и дисперсия наклонов.

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

Основной целью исследования является использование данных действующего космического радиолокатора для оценки эффективности разрабатываемого радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

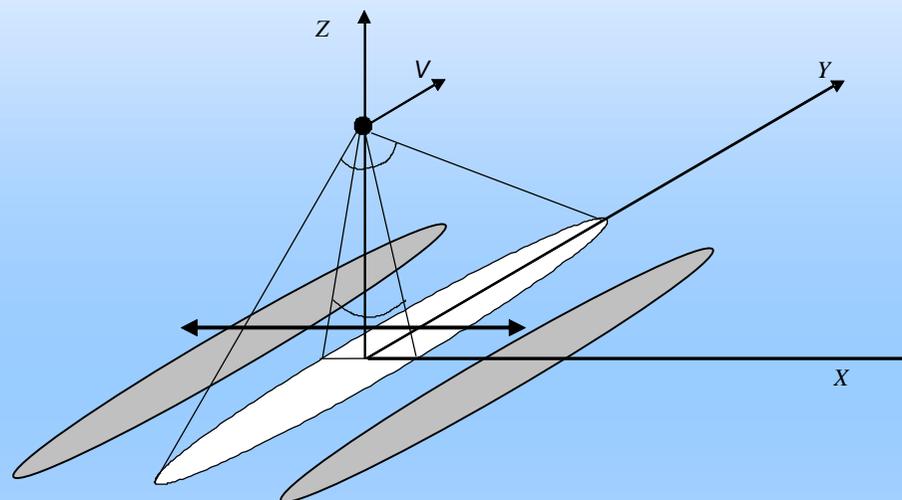


Рис. 23. Схема измерения.

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

Как использовать PR данные для тестирования алгоритмов для радиолокатора с ножевой антенной?

1. выбираем симметричную зависимость, что позволяет предположить однородность волнения в следе
2. выделяем углы падения +/- 10 градусов
3. для них определяем дисперсию наклонов и сечение обратного рассеяния
4. строим теоретическую зависимость сечения обратного рассеяния от угла
5. задаем ширину диаграммы направленности и накладываем на угловую зависимость сечения обратного рассеяния диаграмму направленности антенны
6. вычисляем сечение обратного рассеяния для ножевой антенны
7. находим дисперсию наклонов сравнивая сечение обратного рассеяния ножевой и узкой антенн

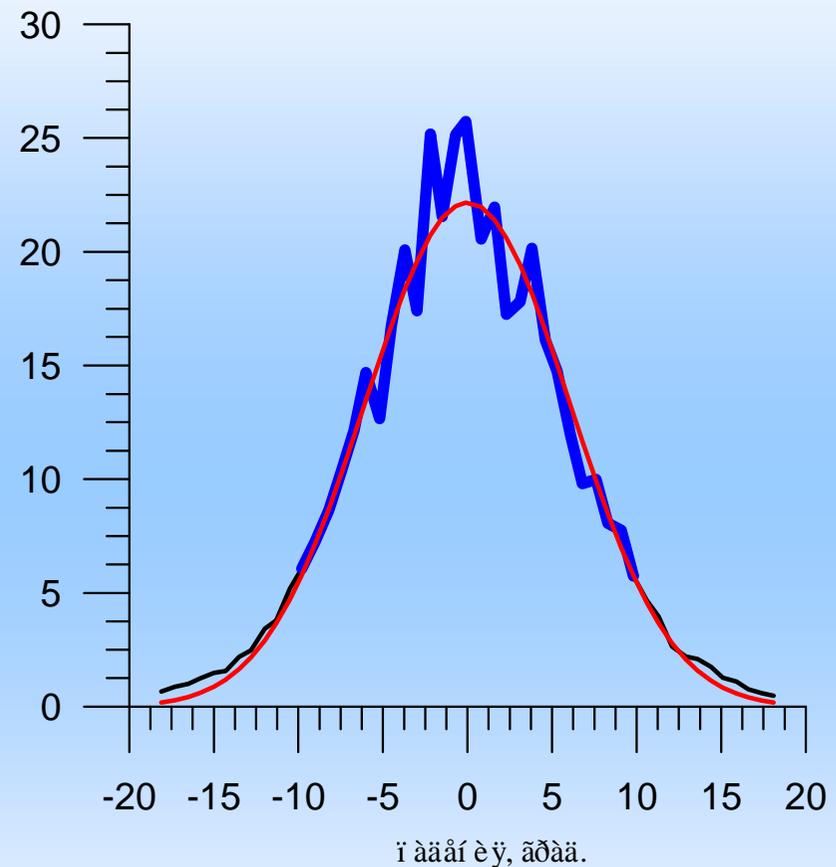


Рис. 24. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: черная кривая – исходные данные, синим цветом выделен диапазон углов +/- 10 град., красная кривая – модельная зависимость .

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

Используя зависимости сечения обратного рассеяния от угла падения мы можем найти сечение обратного рассеяния для ножевой антенны и вычислить дисперсию наклонов по следующей формуле:

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{\sigma_0^2(\text{нож}) \cdot \delta_x^2}{5,52(\sigma_0^2(\text{узк}) - \sigma_0^2(\text{нож}))}, \quad (5)$$

где $\sigma_0(\text{нож})$ - сечение обратного рассеяния для ножевой антенны и $\sigma_0(\text{узк})$ - для узкой симметричной антенны.

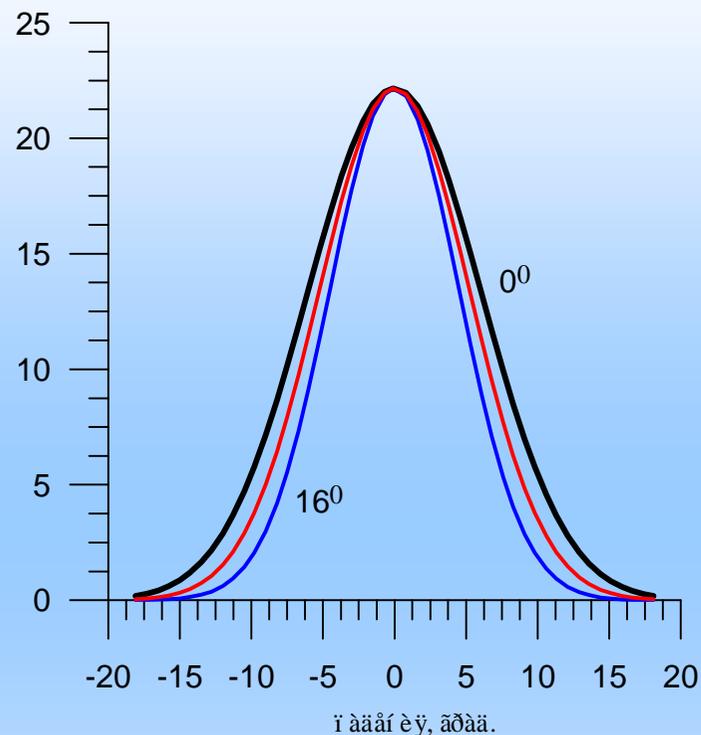


Рис. 25. Зависимость сечения обратного рассеяния от угла падения: черная кривая – модель, красная кривая – для 25° , синим цветом показана зависимость для 16°

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

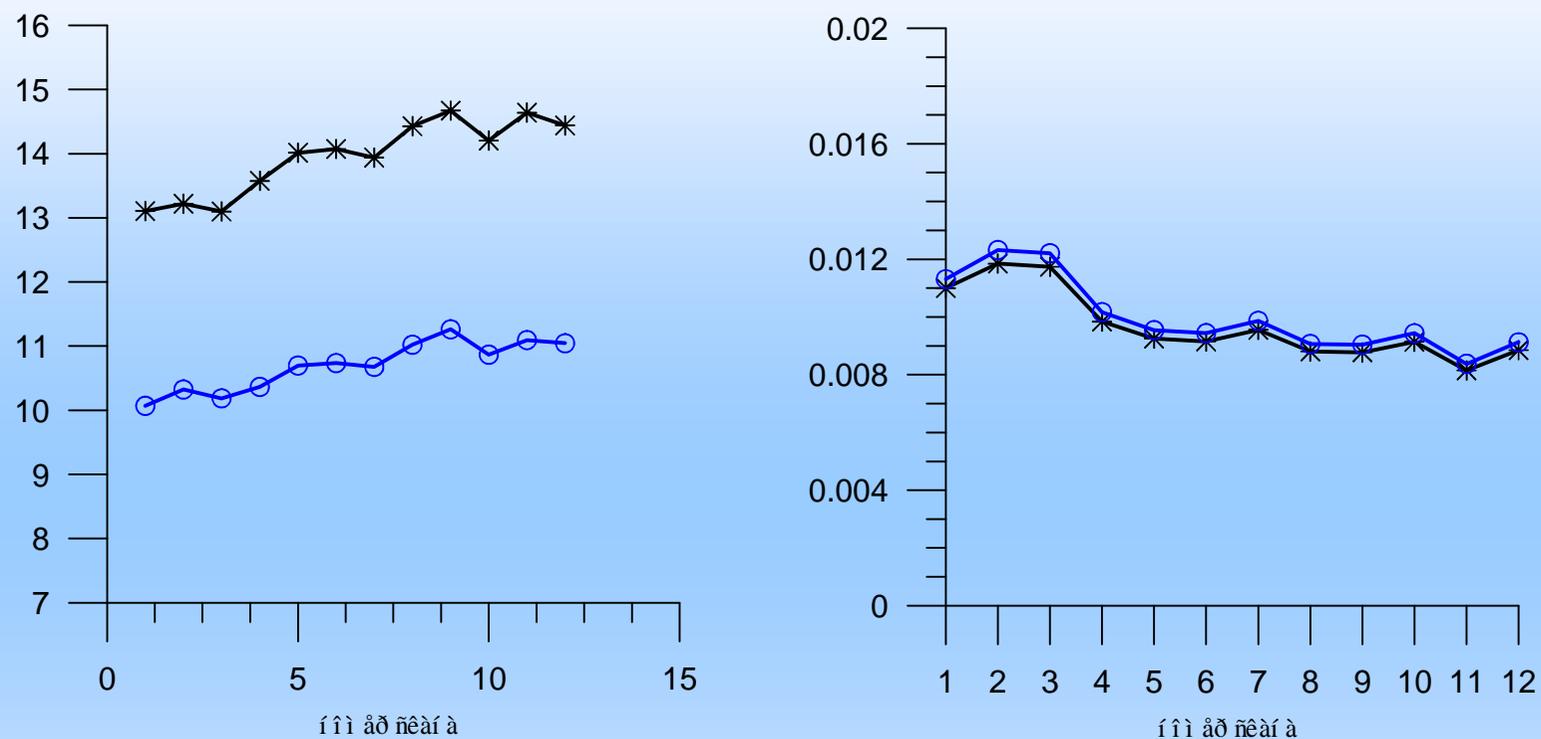


Рис. 26. Изменение сечения обратного рассеяния и дисперсии наклонов во время движения: кривая черного цвета – линейный алгоритм, кривая синего цвета – ножевая антенна

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

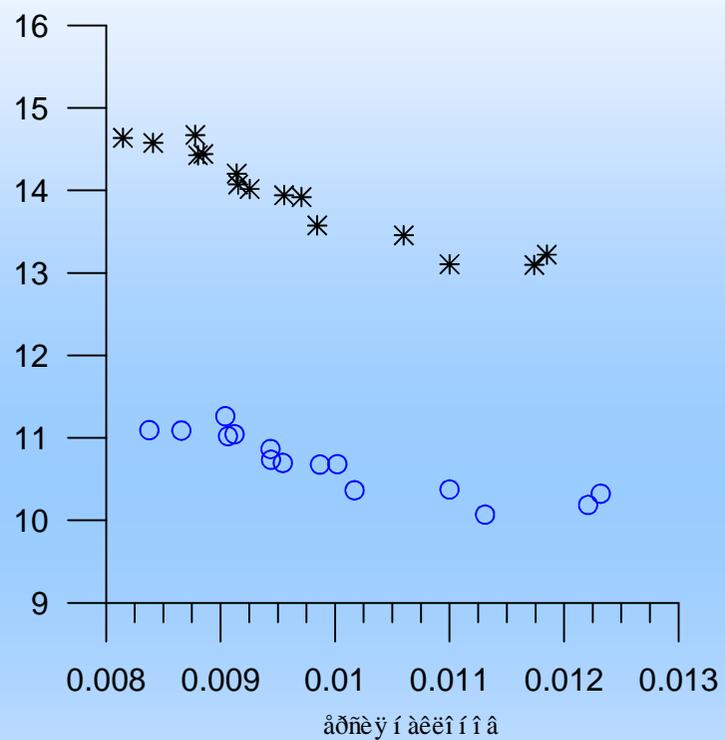


Рис. 27. Зависимость сечения обратного рассеяния от дисперсии наклонов: кривая черного цвета – линейный алгоритм, кривая синего цвета – ножевая антенна

6. Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

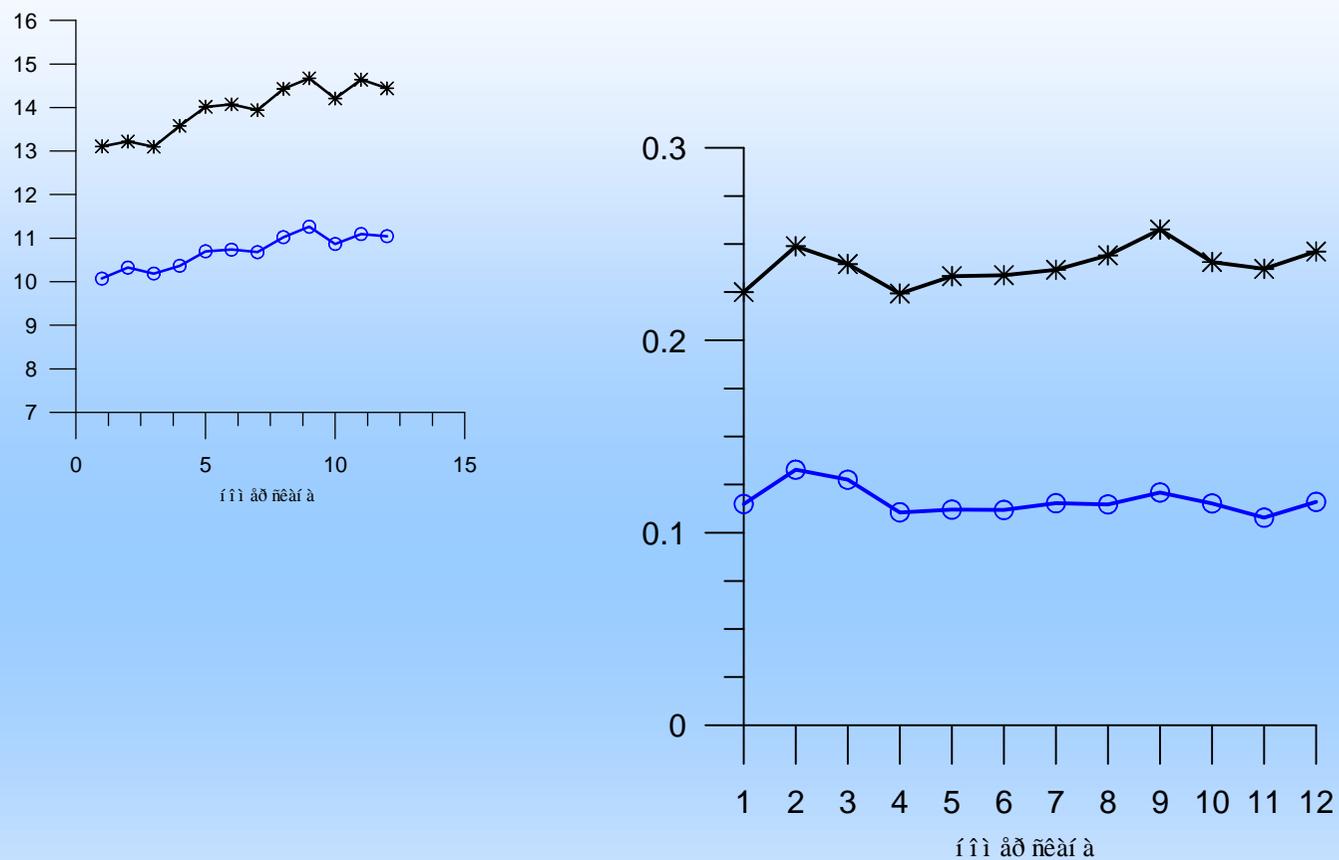


Рис. 28. Изменение эффективного коэффициента отражения во время движения: кривая черного цвета – линейный алгоритм, кривая синего цвета – ножевая антенна

7. Выводы

PR радиолокатор может стать третьим активным радиолокационным инструментом, формирующим непрерывный массив данных о ветре и волнении.

- 1) Измеряется дисперсия наклонов в направлении перпендикулярном траектории движения в тропической и субтропических областях Мирового океана.
- 2) Скорость ветра может быть восстановлена двухпараметрическим алгоритмом.
- 3) Восстанавливается сечение обратного рассеяния при надирном зондировании и может быть сформировано изображение поверхности.
- 4) PR данные будут использоваться для тестирования алгоритмов восстановления дисперсии наклонов и скорости ветра радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны.
- 5) Совместный анализ сечения обратного рассеяния, дисперсии наклонов и скорости ветра позволит лучше исследовать волновые процессы на поверхности океана, например, трансформацию волнения на течениях, в процессе ветрового разгона, нефтяных slicks.
- 6) В связи с высоким пространственным разрешением радиолокатор может применяться для исследований в прибрежных и шельфовых зонах, во внутренних водоемах.