



Особенности измерения высоты значительного волнения радиолокатором с ножевой диаграммой направленности антенны

Караев В.Ю., Мешков Е.М.

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

1. Введение

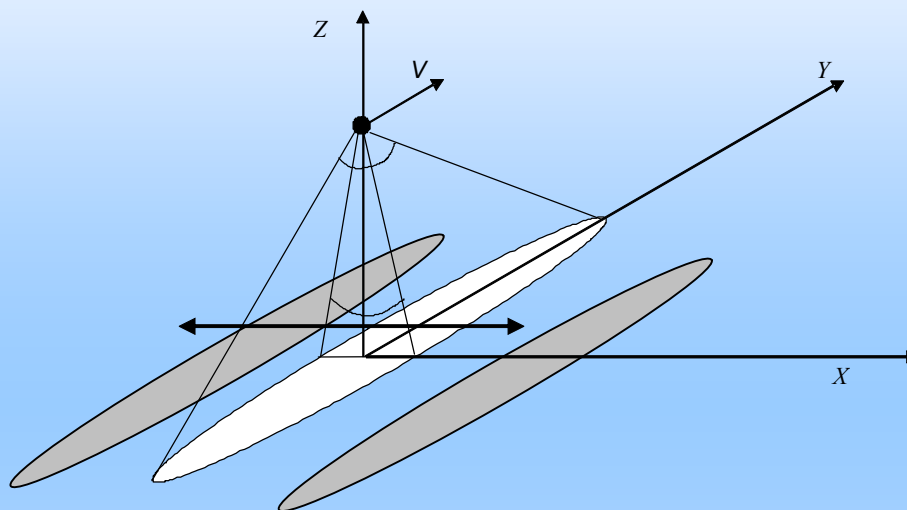


Рис. 1. Схема зондирования. Сканирующая антенна.

1. Введение

Построение двумерного изображения поверхности открывает возможности для анализа волновых процессов на поверхности океана, изучения их структуры и временной динамики при повторных наблюдениях.

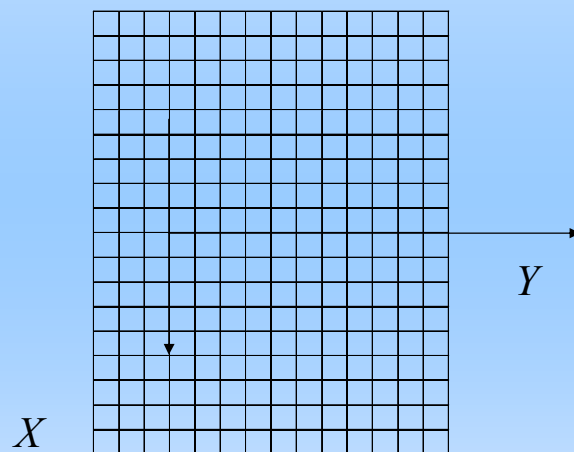


Рис.2. Пример разбиения полосы обзора на элементарные рассеивающие ячейки (ширина полосы – 350 км при высоте 800 км) . В каждой ячейке (14 км x 14 км) определяется дисперсия наклонов, направление распространения крупномасштабного волнения и скорость ветра.

1. Введение

Основной задачей радиоальтиметра является измерение уровня Мирового океана

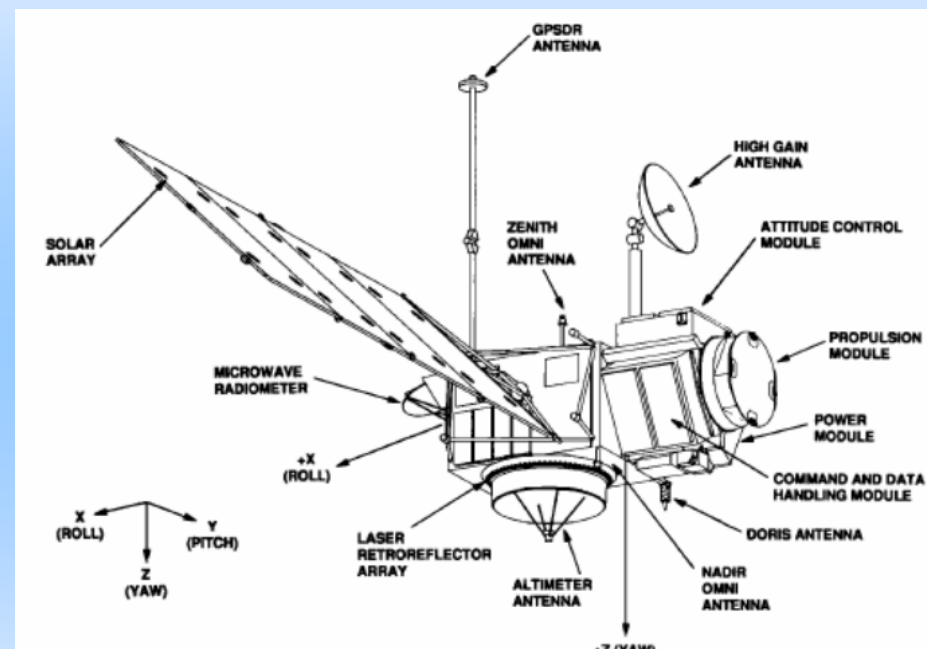
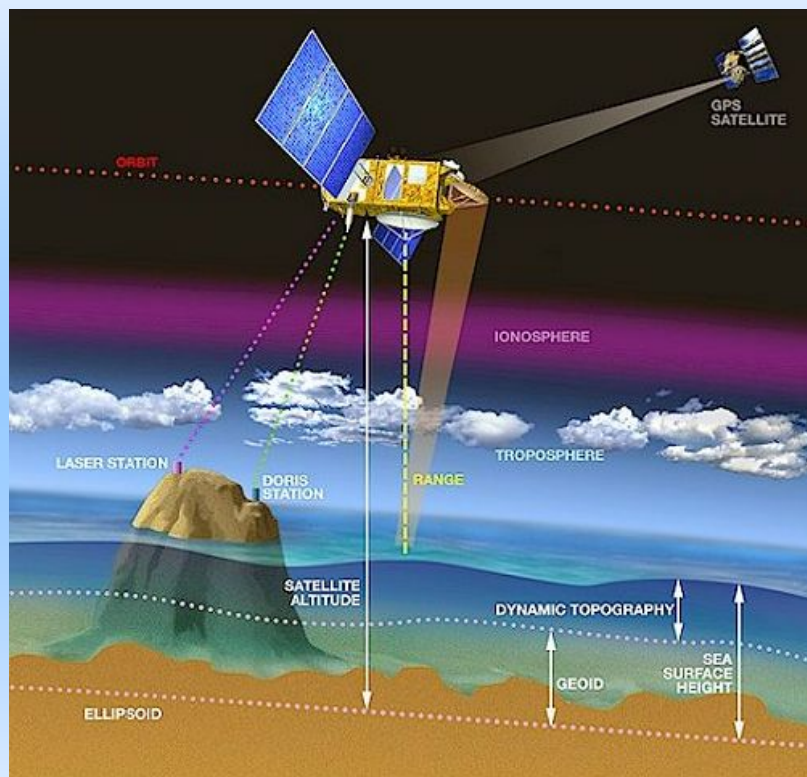


Рис. 3. Радиоальтиметр Торех/Poseidon и схема работы.

1. Введение

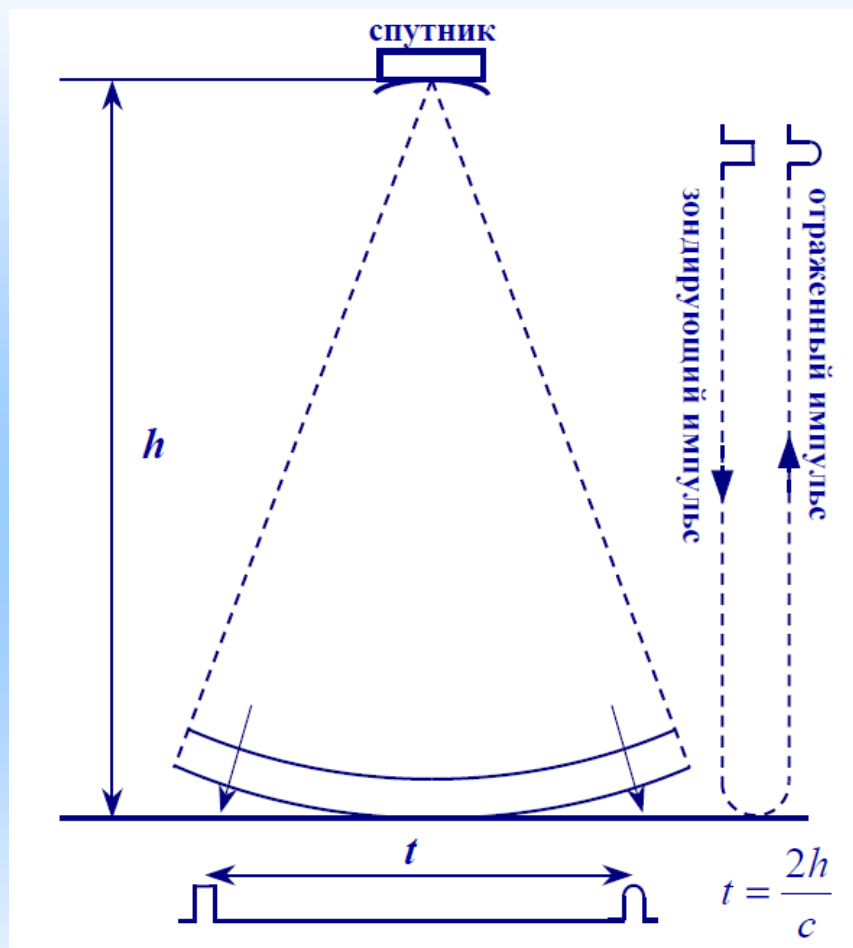


Рис. 4. Принцип работы радиоальтиметра.

1. Введение

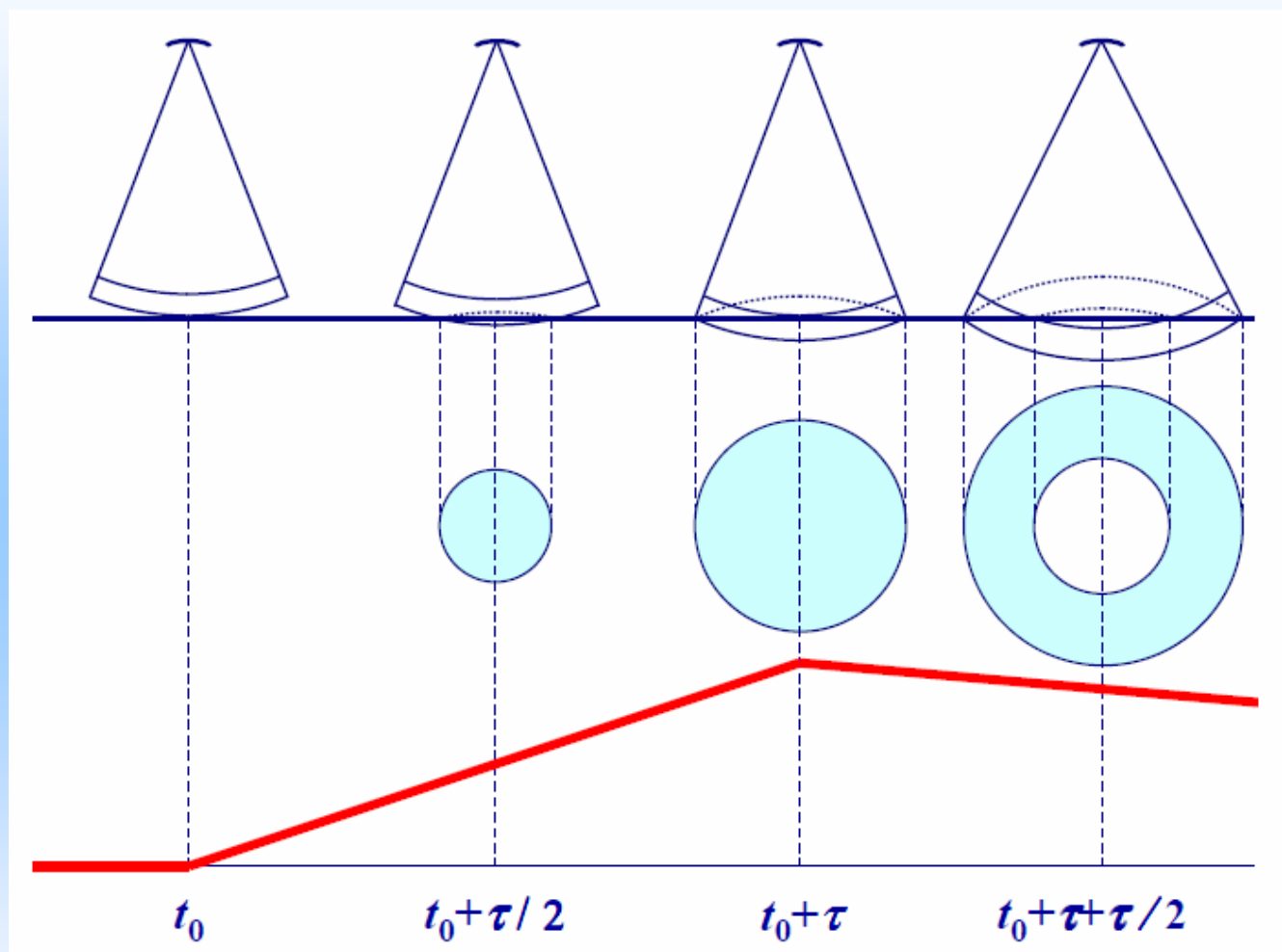


Рис. 5. Формирование формы отраженного импульса для плоской поверхности.

1. Введение

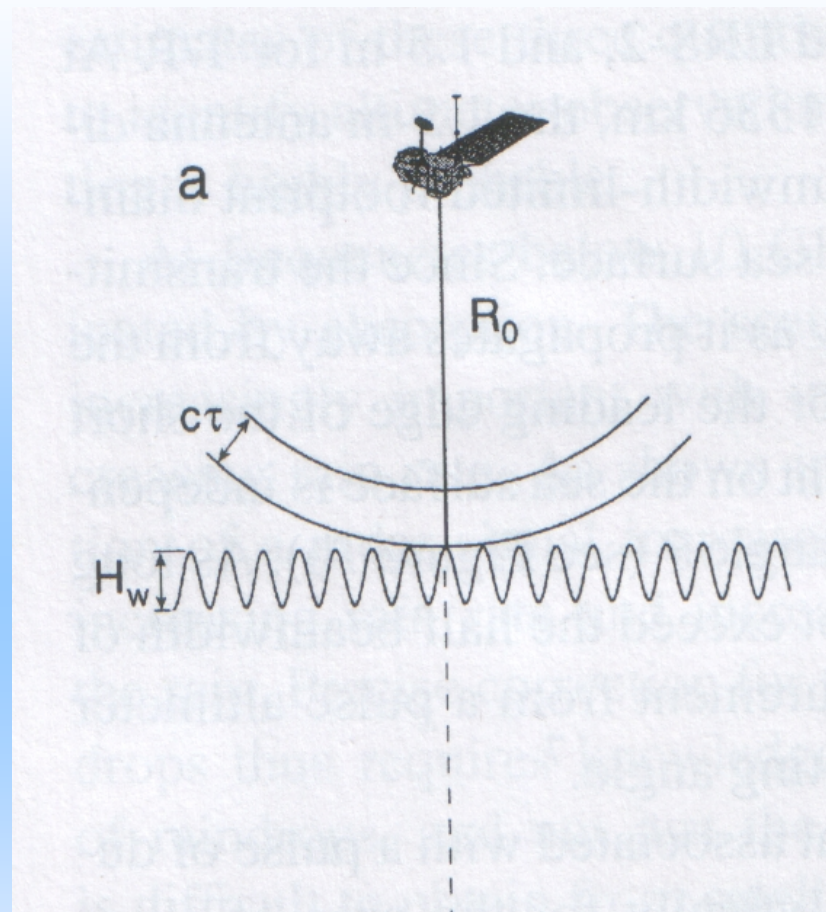


Рис. 6. Схема измерений в присутствии волнения.

1. Введение

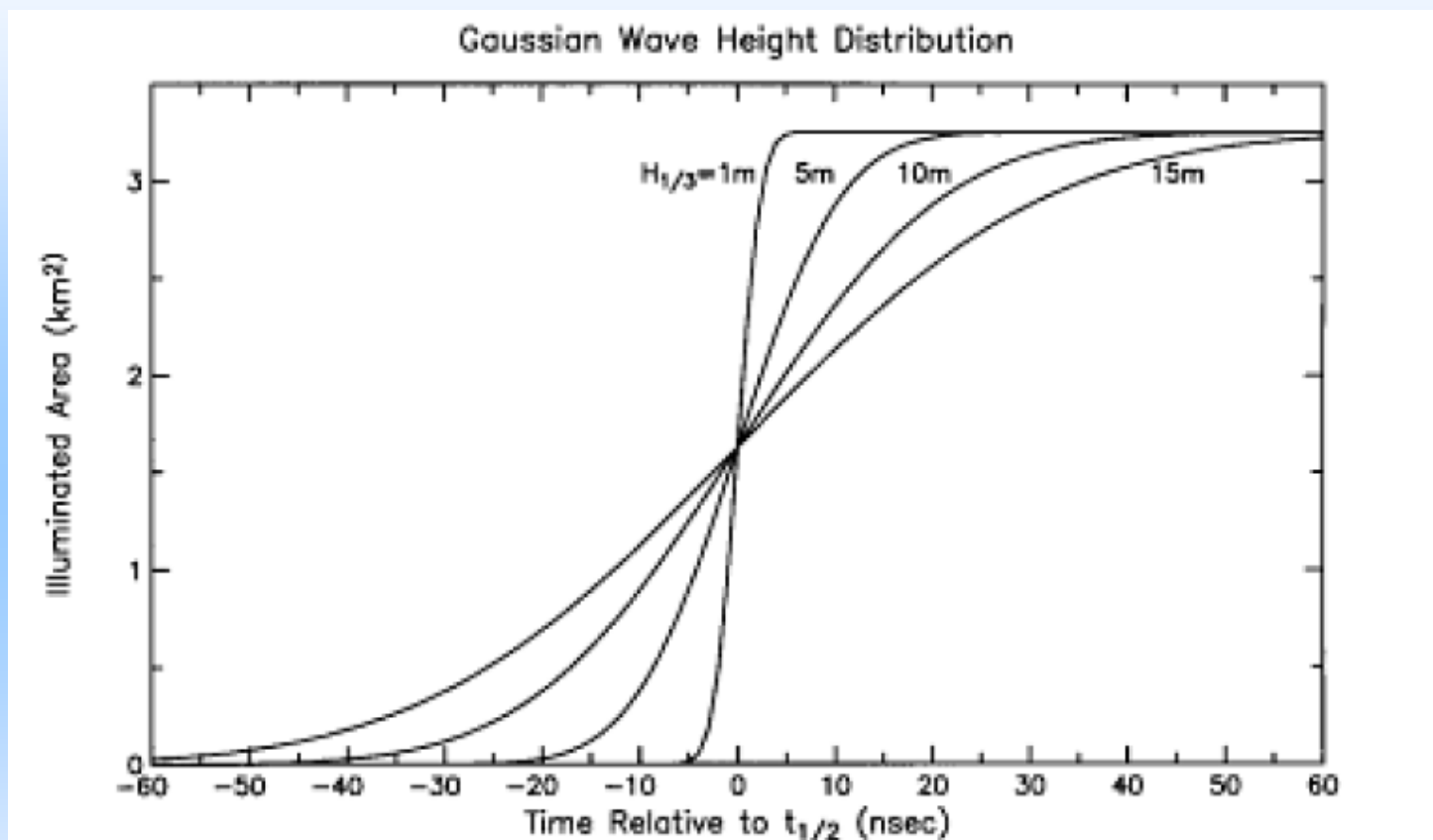


Рис. 7. Изменение формы отраженного импульса в зависимости от высоты значительного волнения.

1. Введение

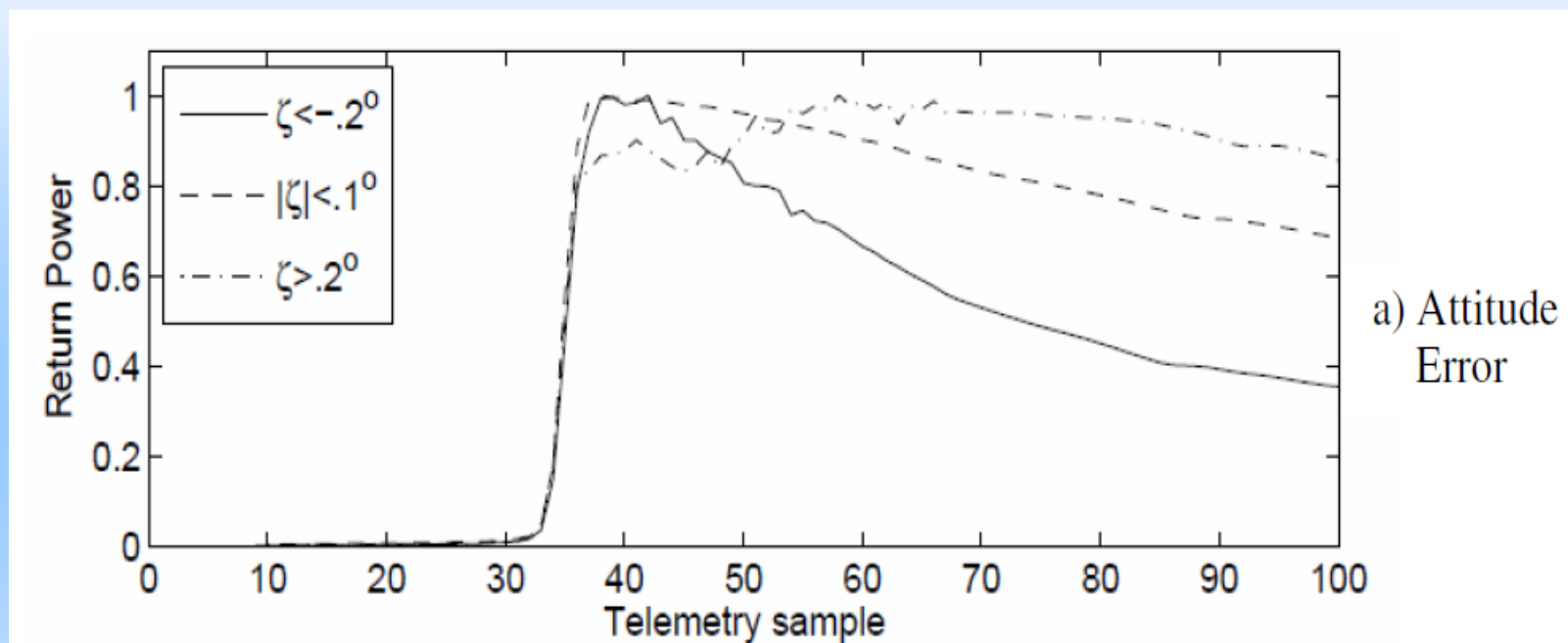


Рис. 8. Иллюстрация влияние отклонения оси ДНА от вертикали (ширина ДНА – $1,1^\circ$ для Ку-диапазона).

2. Радиолокатор с широкой диаграммой направленности антенны

Измерение высоты значительного волнения в широкой полосе обзора с требуемым разрешением можно осуществить с помощью радиолокатора с узкой ДНА, работающей в сканирующем режиме. Для каждого излученного импульса и угла падения будет существовать единственная точка отсчета, связанная с касанием переднего фронта импульса морской поверхности.

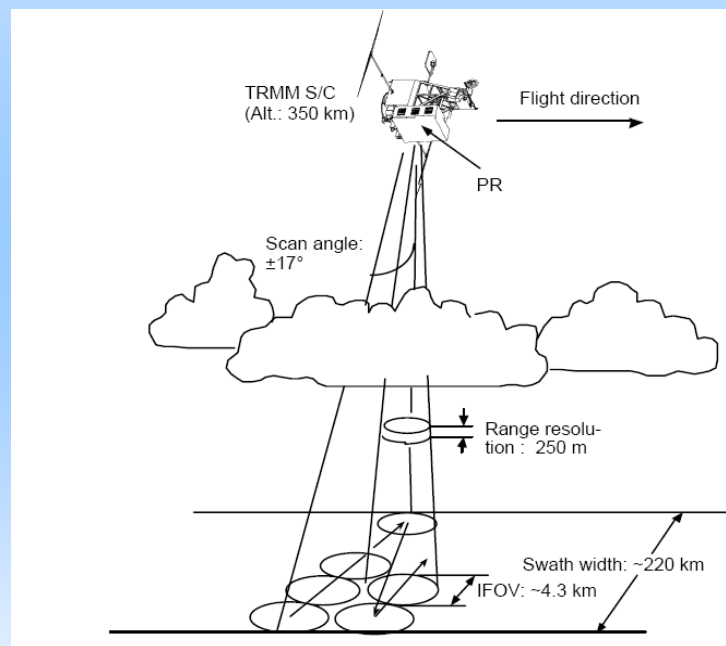


Рис. 9. Возможная схема реализации радиолокатора, измеряющего высоту значительного волнения в широкой полосе обзора.

2. Радиолокатор с широкой диаграммой направленности антенны

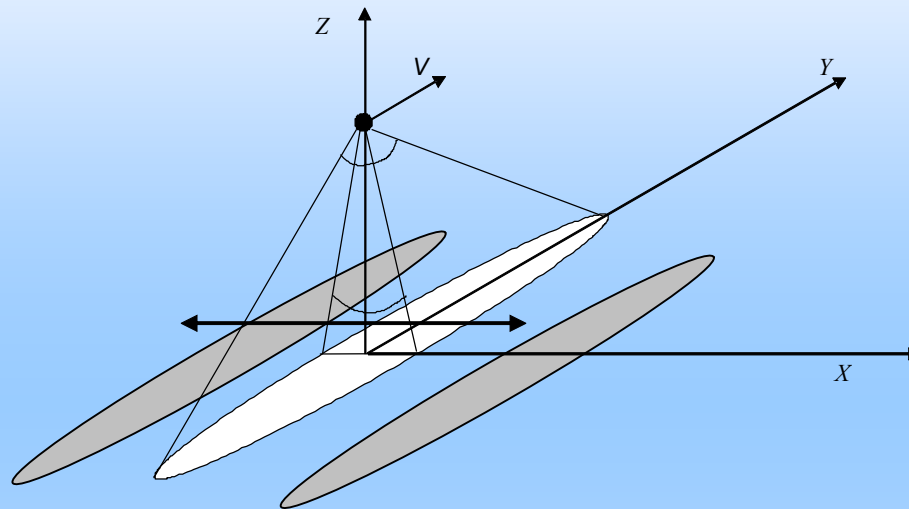


Рис. 10. Схема зондирования радиолокатором с ножевой ДНА.

2. Радиолокатор с широкой диаграммой направленности антенны

Рассмотрим особенности формирования формы отраженного импульса для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны.

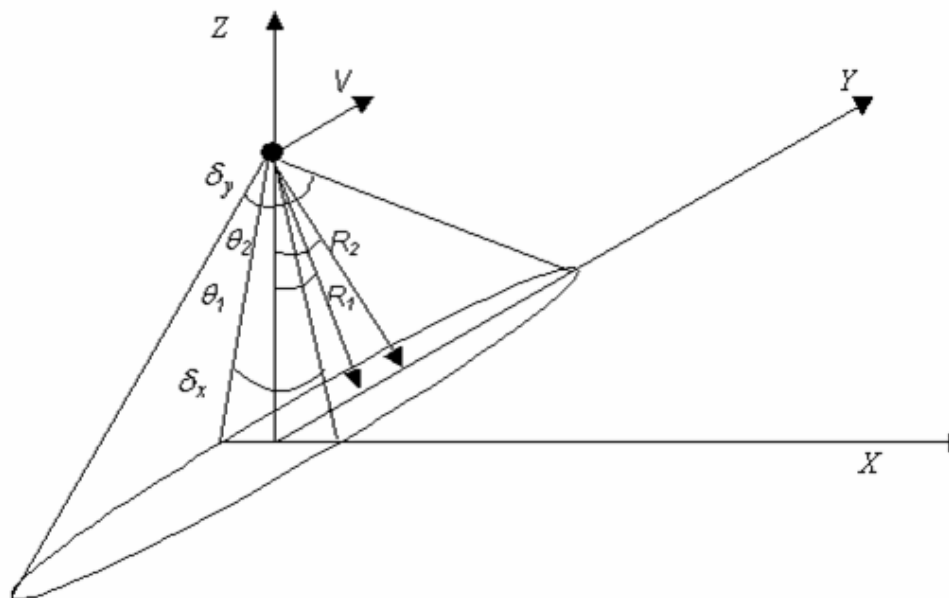


Рис. 11. Схема зондирования.

Приведем математическую формулировку данной проблемы. Учитывая то, что нас интересует только форма отраженного импульса, то формулу для отраженного поля приведем в упрощенном виде

$$E(t) \sim \int_S G(\vec{r}) \exp(-2kR_1 i) d\vec{r}, \quad (1)$$

где $G(\vec{r})$ - диаграмма направленности антенны

2. Радиолокатор с широкой диаграммой направленности антенны

Как известно, выражение для мощности принимаемого сигнала имеет следующий вид:

$$P(t) \sim \iint \exp\left[-\frac{2}{H_0^2}\left(\frac{x^2}{\sigma_{xx}^2} + \frac{y^2}{\sigma_{yy}^2}\right)\right] \cdot \exp\left[-\frac{2.76}{H_0^2}\left(\frac{x^2}{\delta_x^2} + \frac{y^2}{\delta_y^2}\right)\right] dx dy, \quad (2)$$

В предположении симметричной диаграммы направленности антенны ($\delta_x = \delta_y = \delta$) и изотропного волнения ($\sigma_{xx}^2 = \sigma_{yy}^2 = \sigma_{xy}^2$) можно перейти в полярную систему координат (ρ, φ) и интеграл легко берется аналитически.

В этом случае пределы интегрирования по азимутальному углу лежат в интервале от 0 до 2π . Границы интегрирования по радиусу зависят от времени.

2. Радиолокатор с широкой диаграммой направленности антенны

Передний фронт отраженного импульса лежит в интервале от t_0 до $t_0 + \tau_u$, где $t_0 = 2H_0/c$ и задается следующей формулой:

$$P(t_0 + \tau) = 1 - \exp\left[-\frac{c\tau(2,76\sigma_{xy}^2 + 2\delta^2)}{H_0\delta^2\sigma_{xy}^2}\right], \quad (3)$$

После касания электромагнитной волны поверхности в момент t_0 начинается формирование переднего фронта отраженного импульса, которое заканчивается в момент $t_0 + \tau_u$. После этого начинается формирование **заднего фронта отраженного импульса** и его форма задается следующим выражением:

$$P(t_0 + \tau) = A_0 \exp\left[-\frac{c\tau(2,76\sigma_{xy}^2 + 2\delta^2)}{H_0\delta^2\sigma_{xy}^2}\right], \quad (4)$$

где A_0 - коэффициент, введенный для согласования формы импульса в момент $t_0 + \tau_u$:

Эти формулы справедливы для плоской поверхности. При отражении от морской поверхности отражение начнется от гребней волн.

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

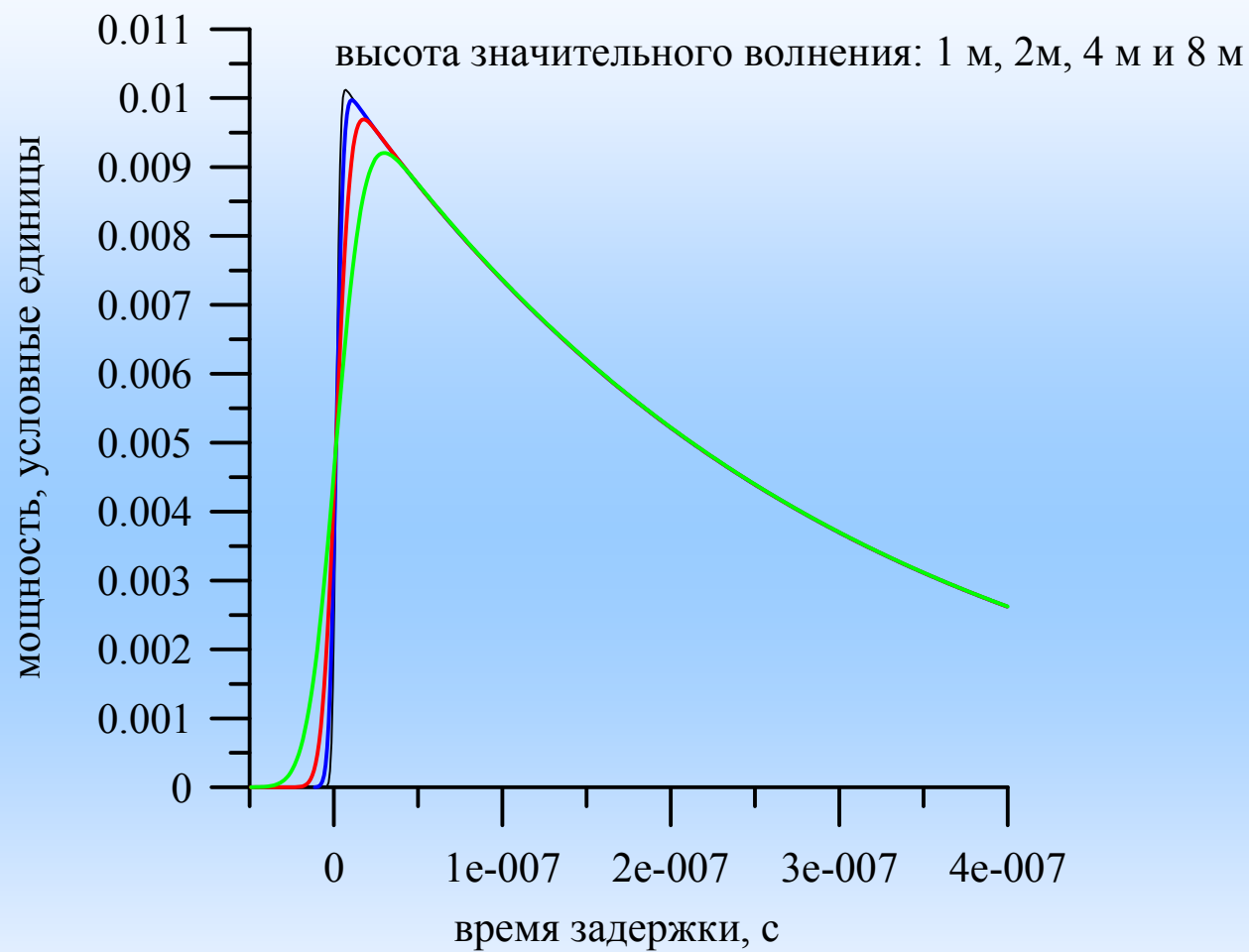


Рис. 12. Форма отраженного импульса: $H_0 = 800$ км,
 $\tau_{и} = 3$ нс, $\delta = 1^\circ$, SWH = 1 м, 2 м, 4 м и 8 м

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

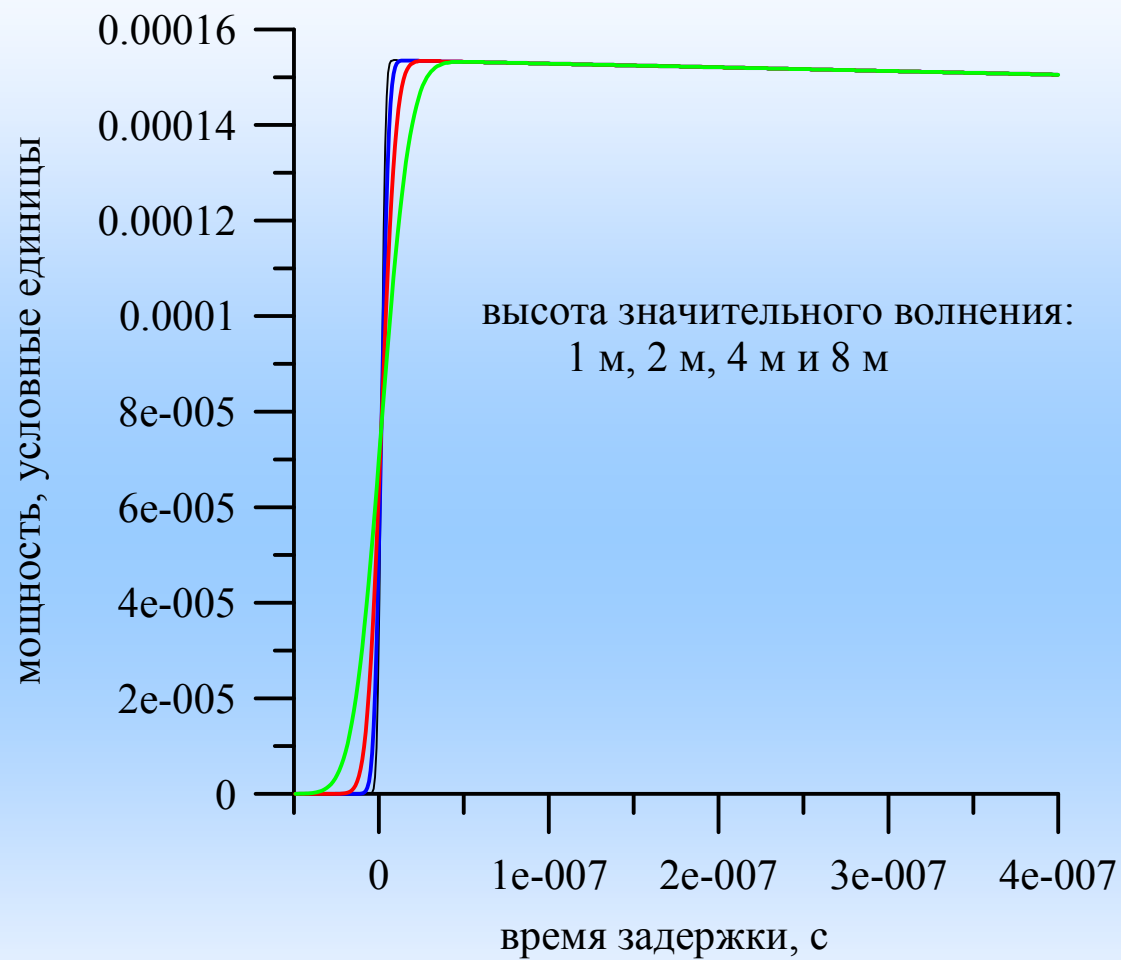


Рис. 13. Форма отраженного импульса: $H_0 = 800$ км,
 $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\delta = 28^\circ$, SWH = 1 м, 2 м, 4 м и 8 м

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

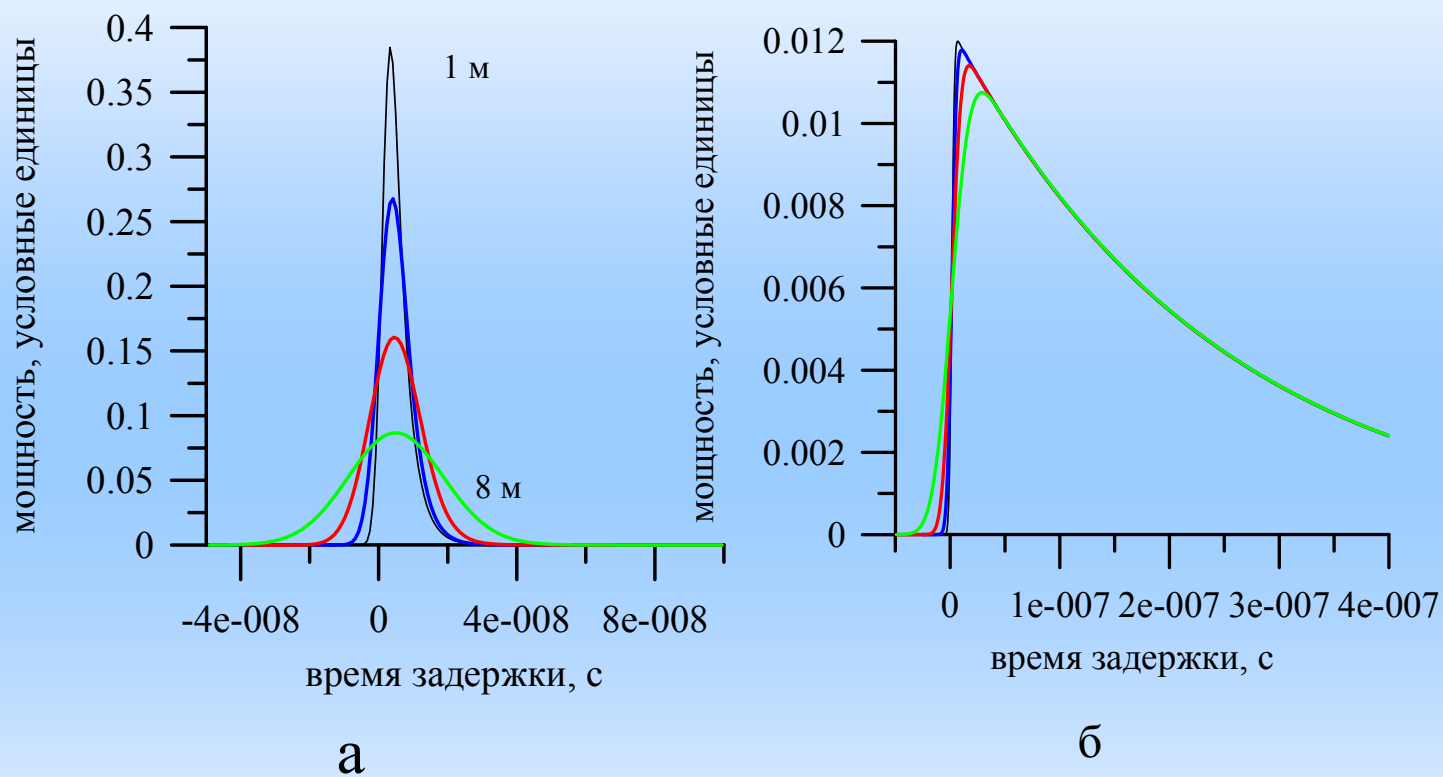


Рис. 14. Форма отраженного импульса: $H_0 = 10$ км,
 $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, SWH = 1 м, 2 м, 4 м и 8 м: а - $\delta = 1^\circ$,
б - $\delta = 28^\circ$

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

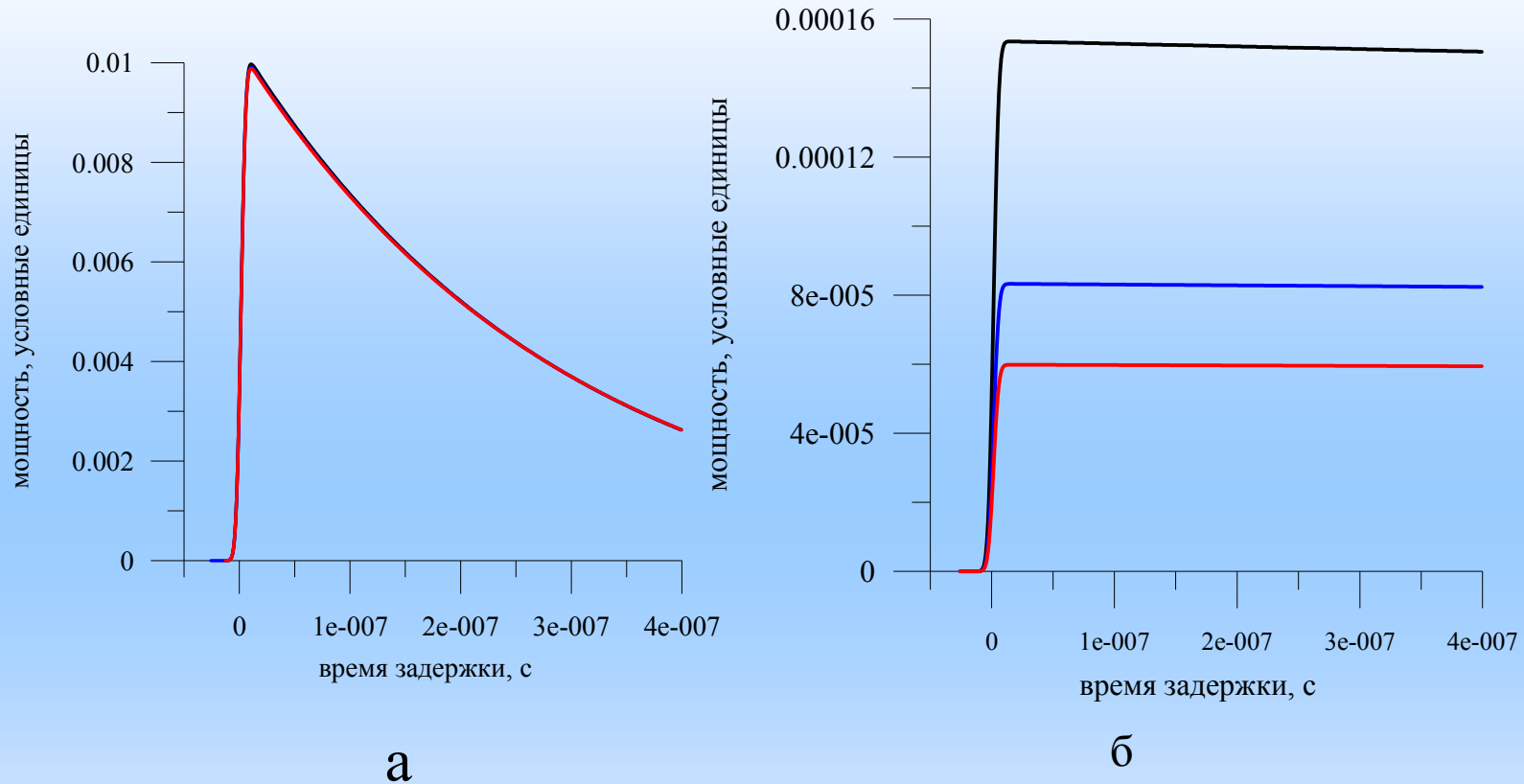


Рис. 15. Форма отраженного импульса: $H_0 = 800$ км,
 $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\text{SWH} = 2$ м, $\sigma_{\text{хх}}^2 = 0,008; 0,016; 0,024$:
а - $\delta = 1^\circ$, б - $\delta = 28^\circ$

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

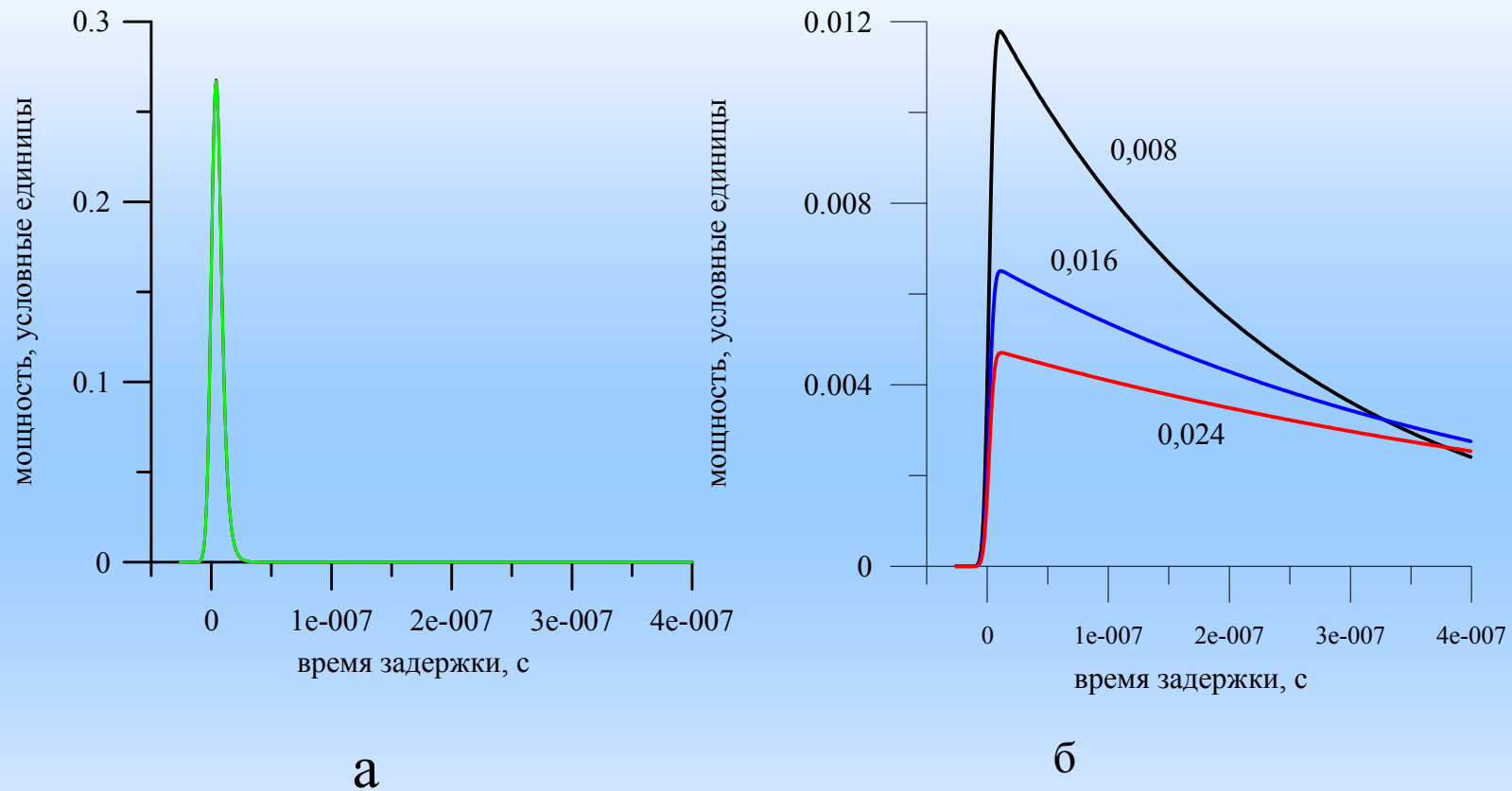


Рис. 16. Форма отраженного импульса: $H_0 = 10$ км,
 $\tau_{и} = 3$ нс, $SWH = 2$ м, $\sigma_{xx}^2 = 0,008; 0,016; 0,024$:
а - $\delta = 1^\circ$, б - $\delta = 28^\circ$

3. Радиолокатор с широкой ДНА, вертикальное зондирование

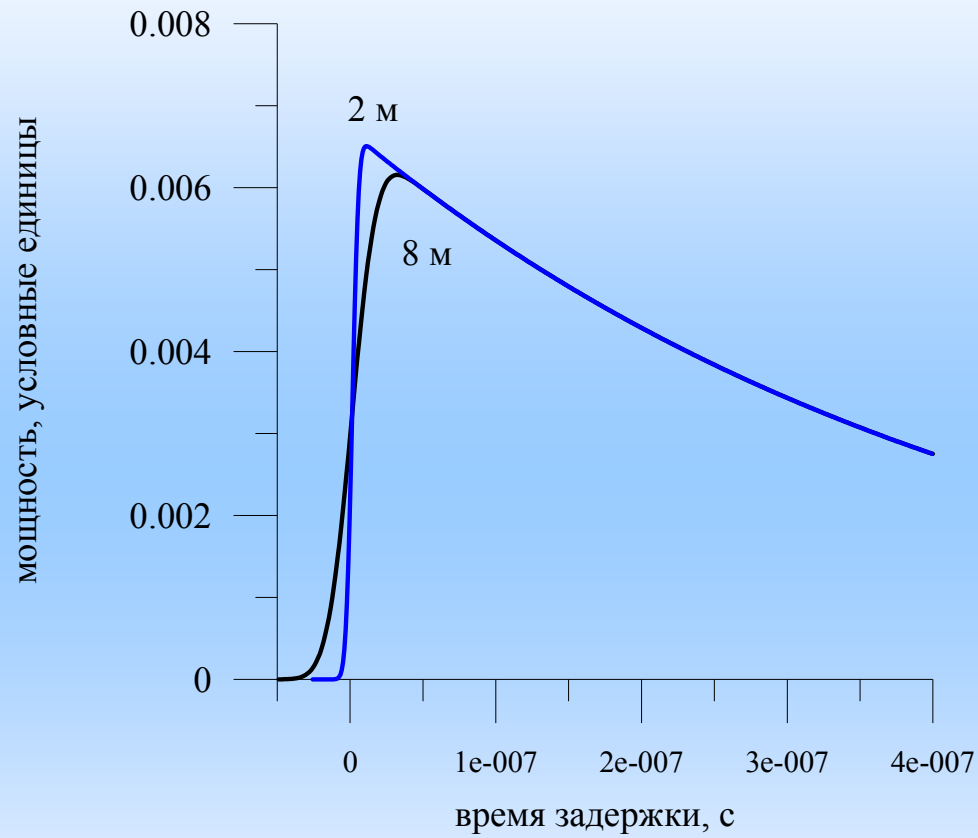


Рис. 17. Форма отраженного импульса: $H_0 = 10$ км,
 $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\sigma_{\text{хх}}^2 = 0,016$; $\delta = 28^\circ$; SWH = 2 м и 8 м

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

Недостаток:

один импульс → одно измерение высоты значительного волнения.

Решение

использовать частотные фильтры для измерения формы отраженного импульса в заданных рассеивающих ячейках

Диаграмма направленности антенны ориентирована вдоль направления движения и доплеровский сдвиг зависит от угла падения:

$$f = 2V \sin \theta / \lambda$$

Задавая полосу пропускания частотного фильтра – определяем элементарную рассеивающую ячейку, для которой будем измерять высоту значительного волнения

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

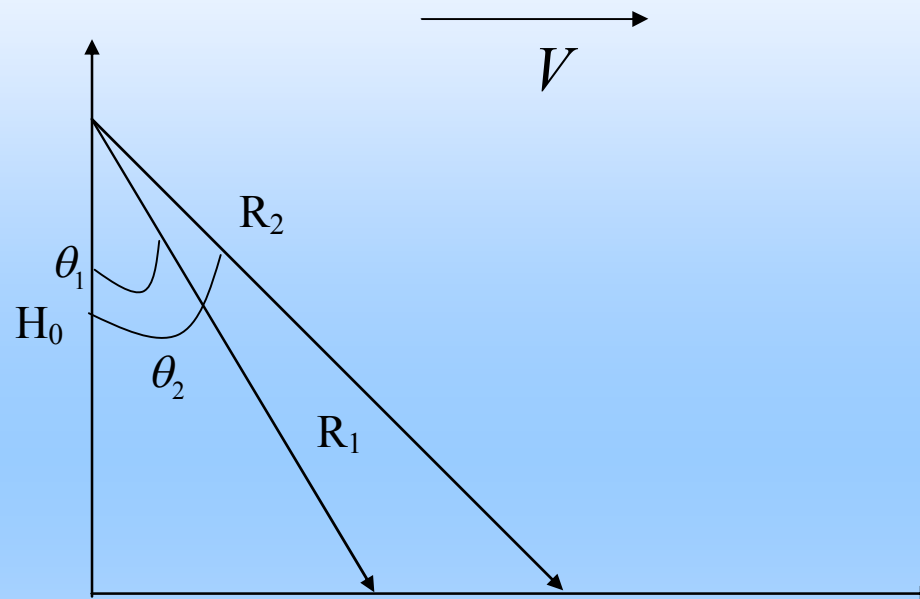


Рис. 18. Схема наблюдения в заданном частотном фильтре

На рисунке R_1 и R_2 показывают начало и конец элементарной рассеивающей ячейки на морской поверхности для одного из частотных фильтров. Ориентация антенны может быть под углом к траектории движения.

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

Пределы интегрирования по азимутальному углу равны $\pm 1^\circ$. **Передний фронт отраженного импульса** лежит в интервале от t_0 до $t_0 + \tau_u$, где $t_0 = 2H_0 \cdot \text{tg}\theta_1 / c$ и задается следующей формулой:

$$P(t_0 + \tau) = 1 - \exp\left[-\frac{c\tau(2,76\sigma_{yy}^2 + 2\delta^2)}{H_0 \cos\theta_1 \cdot \delta^2 \sigma_{yy}^2}\right], \quad (5)$$

где угол θ_1 зависит от нижней частоты полосы пропускания частотного фильтра:

$$\theta_1 = \arcsin(f_D \cdot \lambda / (2V)) , \quad (6)$$

Для участка времени $t_0 + \tau_u$ до $t_0 + t_D$ форма отраженного также совпадает с ранее полученным выражением:

$$P(t_0 + \tau) = A_{12} \exp\left[-\frac{c\tau(2,76\sigma_{yy}^2 + 2\delta^2)}{H_0 \cos\theta_1 \cdot \delta^2 \sigma_{yy}^2}\right], \quad (7)$$

где $t_D = \frac{2H_0}{c} \cdot \left(\frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2}{\cos\theta_1 \cos\theta_2}\right)$.

Задний фронт импульса формируется в интервал времени от $t_0 + t_D$ до $t_0 + t_D + \tau_u$ и изменяется по следующему закону:

$$P(t_0 + \tau) = A_{23} \left(\exp\left[-\frac{c\tau(2,76\sigma_{yy}^2 + 2\delta^2)}{H_0 \cos\theta_1 \cdot \delta^2 \sigma_{yy}^2}\right] - 1 \right), \quad (8)$$

Коэффициенты A_{12} и A_{23} определяются из условия совпадения амплитуды сигнала на границе интервалов.

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

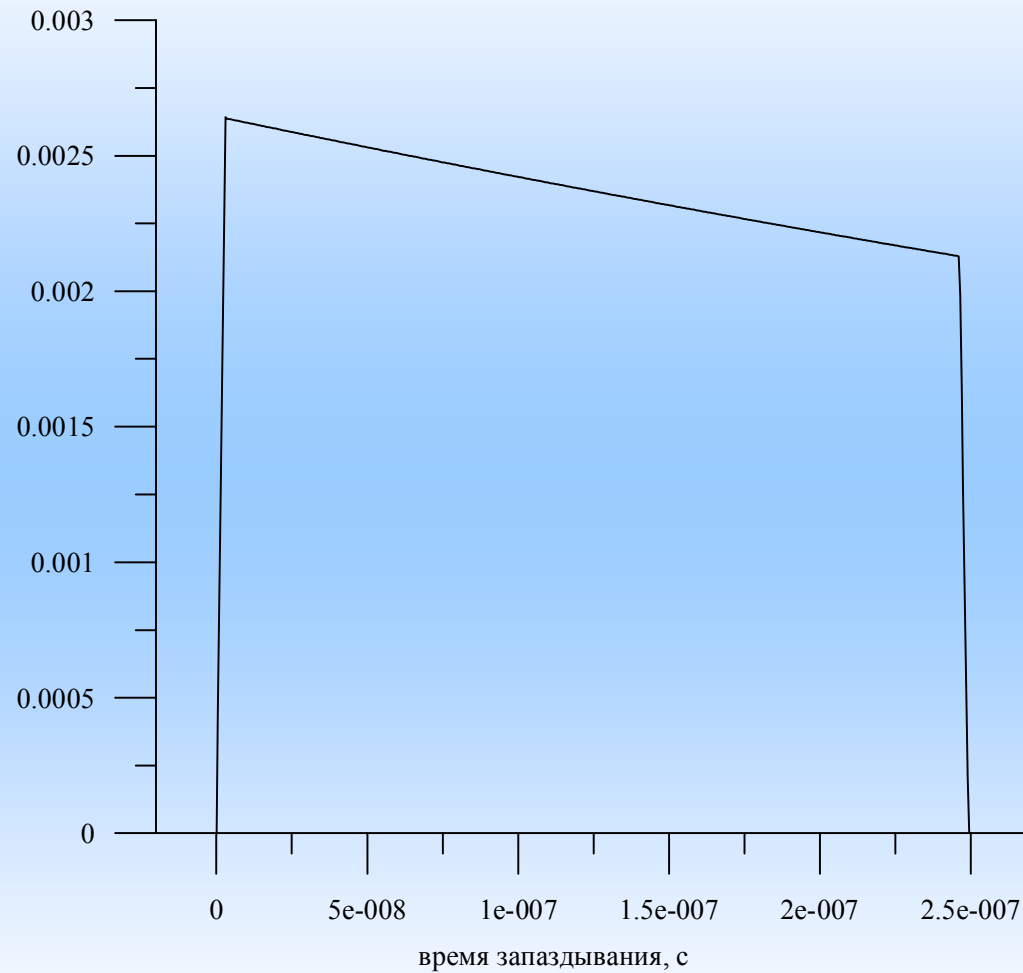


Рис. 19. Форма импульса в заданном частотном фильтре для плоской поверхности

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

Как и в рассмотренном случае надирного зондирования высота волнения окажет существенное влияние на форму отраженного импульса и необходимо вычислять средний импульс ($\delta_x = 28^\circ$ и $\delta_y = 1^\circ$).

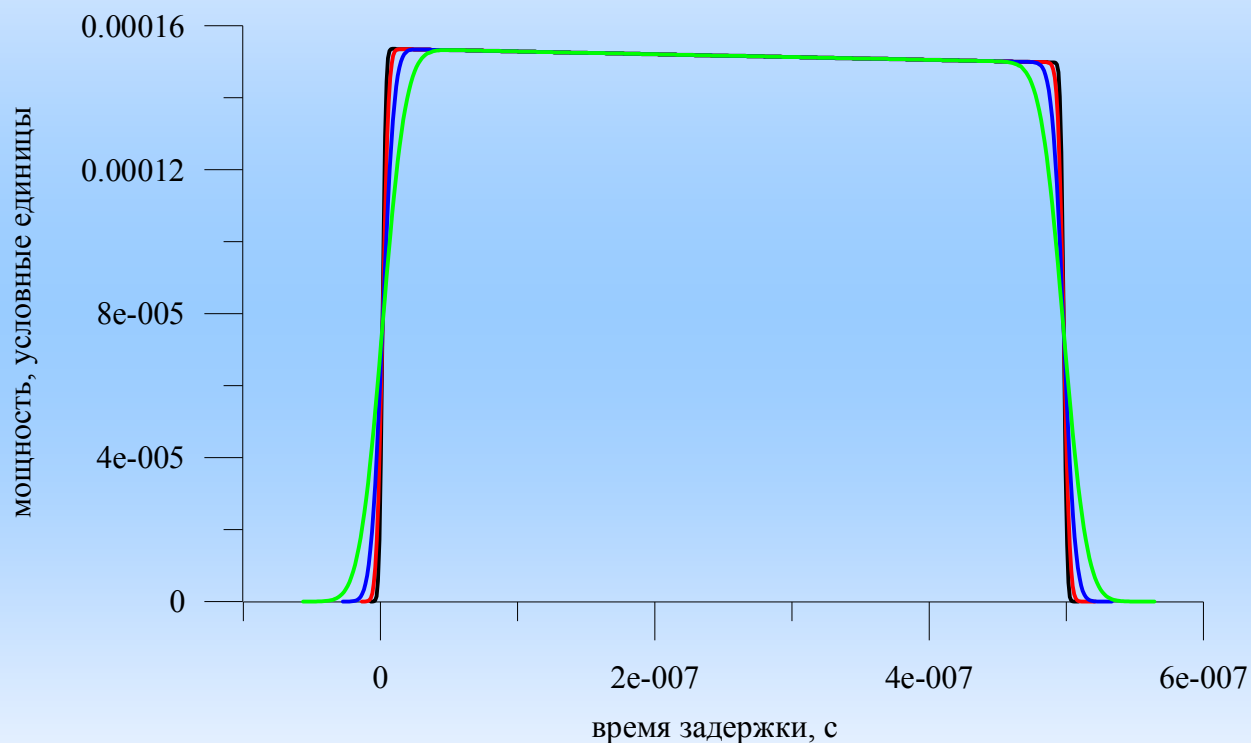


Рис. 20. Форма отраженного импульса в заданном частотном фильтре: $H_0 = 800$ км, $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\sigma_{\text{xx}}^2 = 0,008$, $\delta = 28^\circ$, SWH = 1 м, 2 м, 4 м и 8 м

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

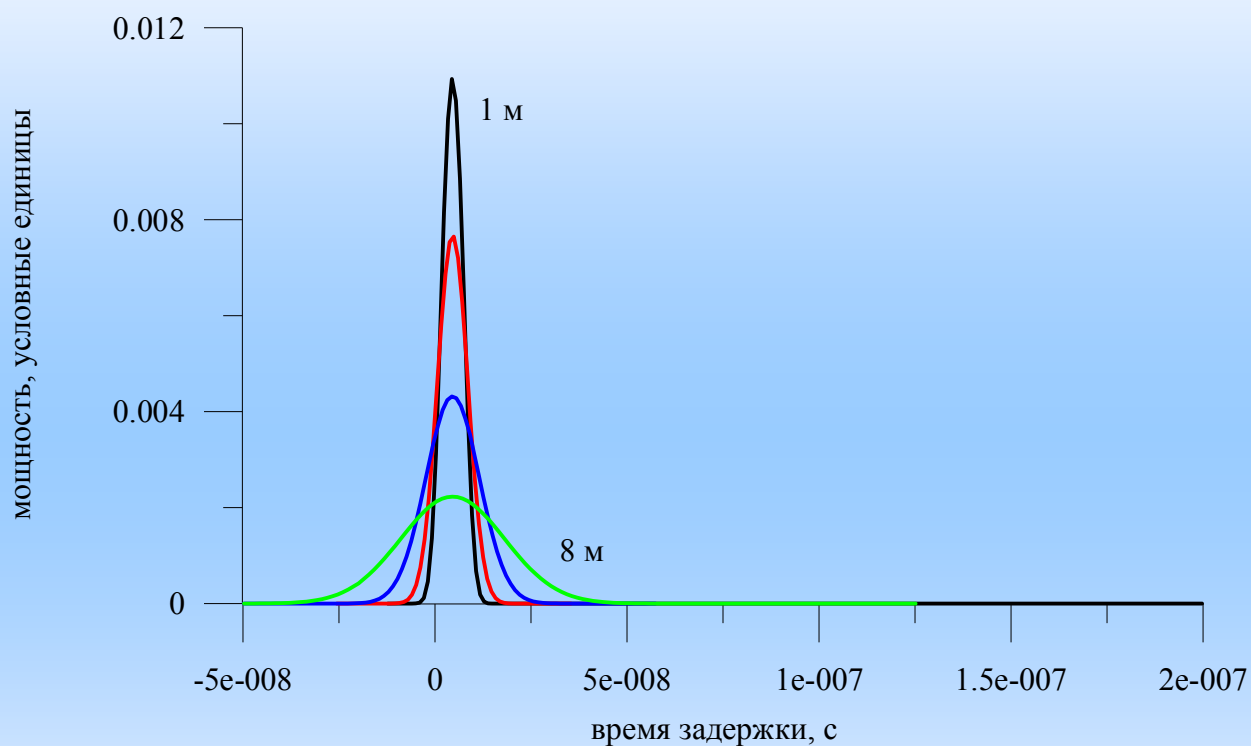


Рис. 21. Форма отраженного импульса в заданном частотном фильтре: $H_0 = 10$ км, $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\sigma_{\text{xx}}^2 = 0,008$, $\delta = 28^\circ$, SWH = 1 м, 2 м, 4 м и 8 м

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

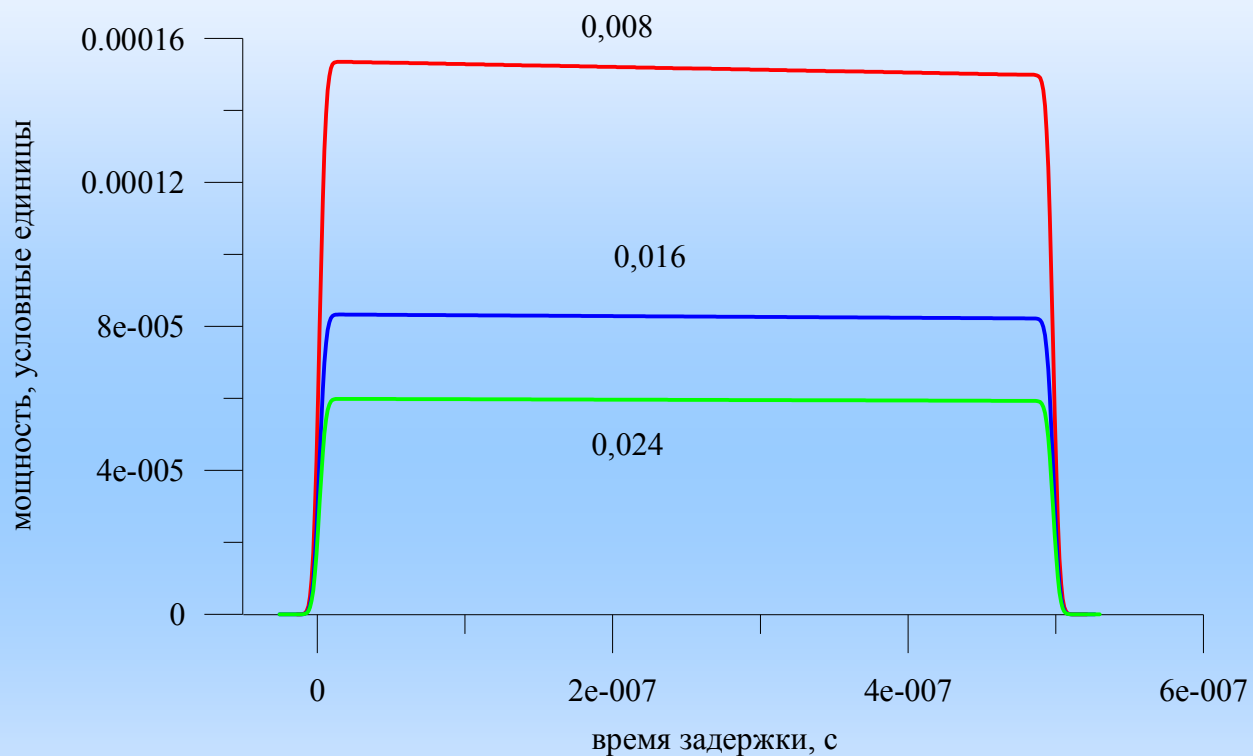


Рис. 22. Форма отраженного импульса в заданном частотном фильтре: $H_0 = 800$ км, $\tau_{\text{и}} = 3$ нс, $\text{SWH} = 2$ м, $\delta = 28^\circ$

4. Радиолокатор с ножевой ДНА, наклонное зондирование

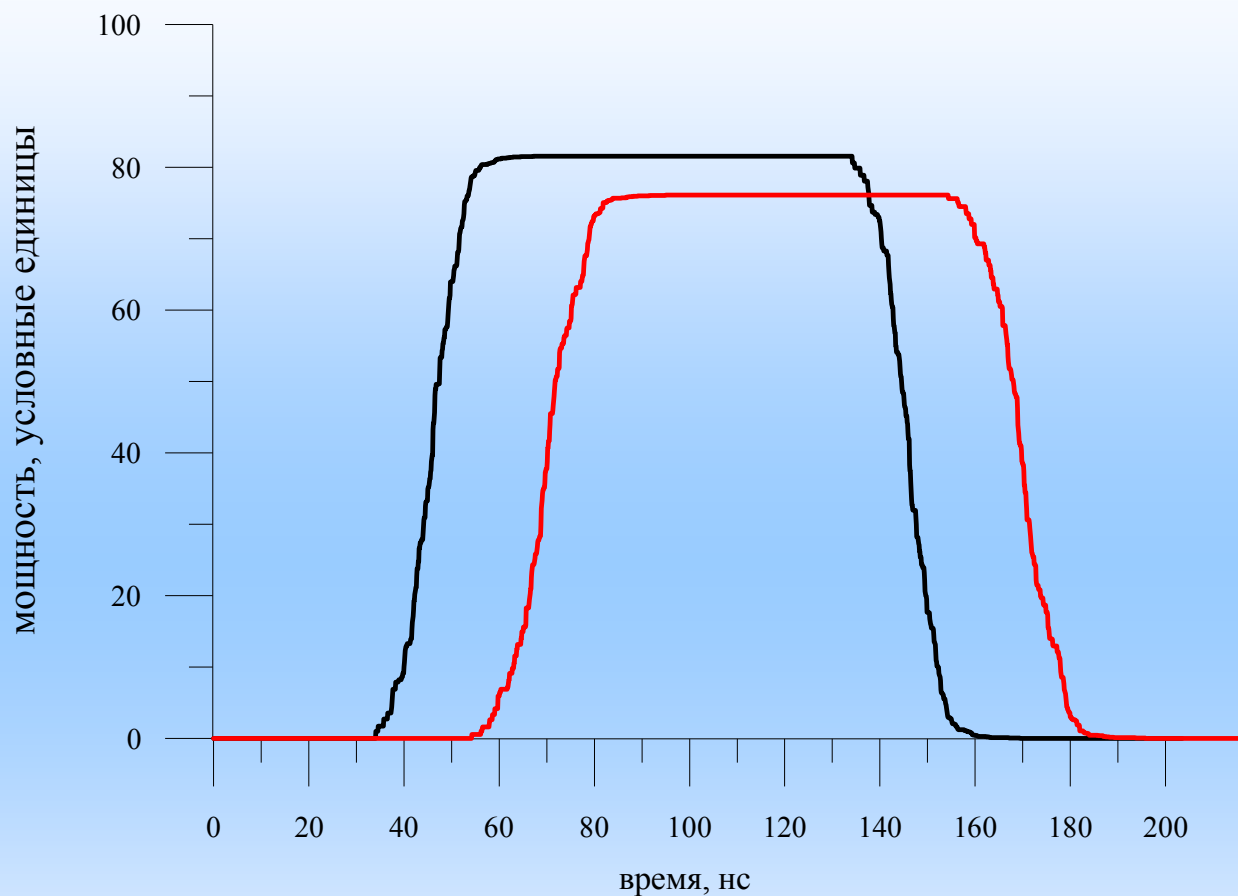


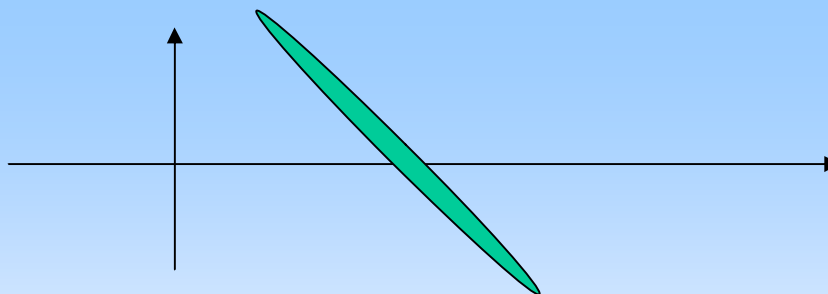
Рис. 23. Примеры зависимости мощности отраженного сигнала от времени прихода в частотных фильтрах: 1 – полоса пропускания 6,667 кГц – 10 кГц, 2 – 10 кГц – 13,333 кГц. Скорость ветра 10 м/с.

4. Заключение

Для радиолокатора с ножевой ДНА построена модель для формы отраженного импульса в заданной элементарной ячейке при работе в панорамном режиме обзора.

Показано, что

- 1) при использовании в приемном тракте частотных фильтров, настроенных на заданные элементарные рассеивающие ячейки, существует возможность измерять высоту значительного волнения в каждой ячейке со спутника радиолокатором с ножевой ДНА. Алгоритмы восстановления будут аналогичны тем, что применяются для обработки данных существующих радиоальтиметров;



- 2) при измерении с самолета существует возможность по форме отраженного импульса измерять не только высоту значительного волнения, но и дисперсию наклонов и, соответственно, оценивать среднюю длину волны

$$L = \sqrt{\frac{\sigma_h^2}{\sigma_{xx}^2}}$$

СПАСИБО!