



Теоретическая модель для формы отраженного импульса наклонного высотомера

Караев В.Ю., Титченко Ю.А., Панфилова М.А., Мешков Е.М.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация

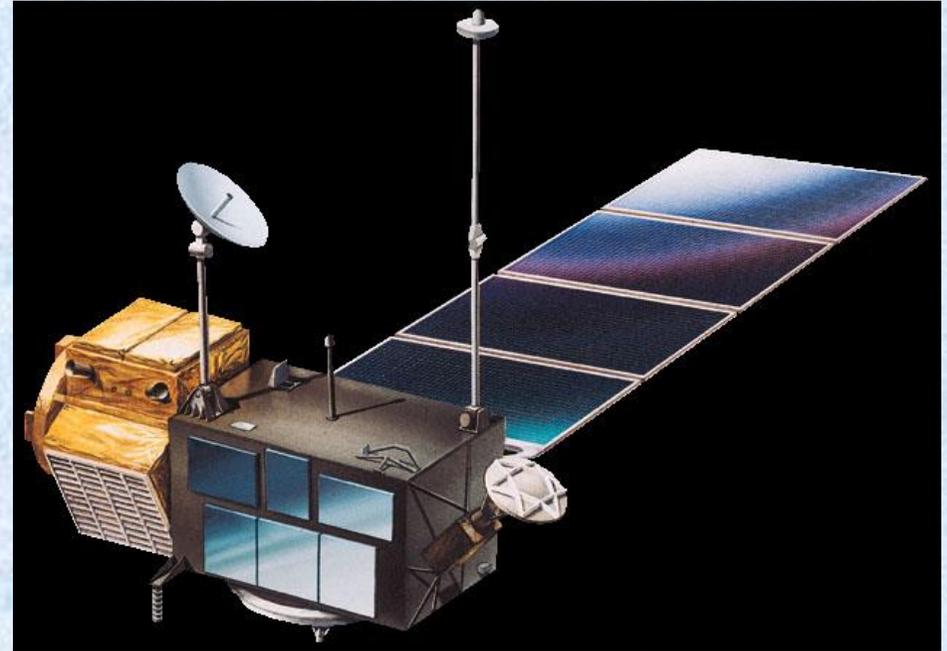
Дистанционное зондирование является эффективным методом получения информации о состоянии морской поверхности. Орбитальные радиовысотомеры измеряют высоту значительного волнения в Мировом океане и информация используется при описании волнового климата. Недостаток радиовысотомеров связан с тем, что зондирование выполняется при нулевом угле падения, поэтому высота волнения восстанавливается только вдоль трека и период повторения траектории составляет около 10 суток. Формирование полосы обзора можно осуществить за счет сканирования лучом в направлении перпендикулярном направлению полета, однако для наклонного зондирования теоретическая модель отсутствует, что тормозит создание «наклонного» радиовысотомера.

В ходе исследования получена аналитическая формула для формы отраженного импульса при наклонном зондировании, когда механизм обратного рассеяния остается квазизеркальным (углы падения меньше 12°) и отраженный сигнал описывается в приближении метода Кирхгофа. Было показано, что форма отраженного импульса содержит информацию о высоте значительного волнения, которая может быть восстановлена.

Введение

Орбитальные радиовысотомеры измеряют высоту значительного волнения в Мировом океане, и полученная информация используется при описании волнового климата, измерения скорости геострофических течений.

Данные ассимилируются в численные модели волнения, например, WaveWatch III, SWAN. Эта информация необходима для корректировки процесса численного моделирования, чтобы результаты моделирования соответствовали реальному морскому волнению.



Радиовысотомер Topex/Poseidon

Введение

Недостаток стандартного радиовысотомера связан с тем, что зондирование выполняется при нулевом угле падения и высота волнения восстанавливается только вдоль трека.

Формирование полосы обзора можно осуществить используя сканирование лучом в направлении перпендикулярном направлению полета, как это, например, сделано у дождевых радиолокаторов спутников TRMM (Tropical Rain Measurement Mission) и GPM (Global Precipitation Measurement).

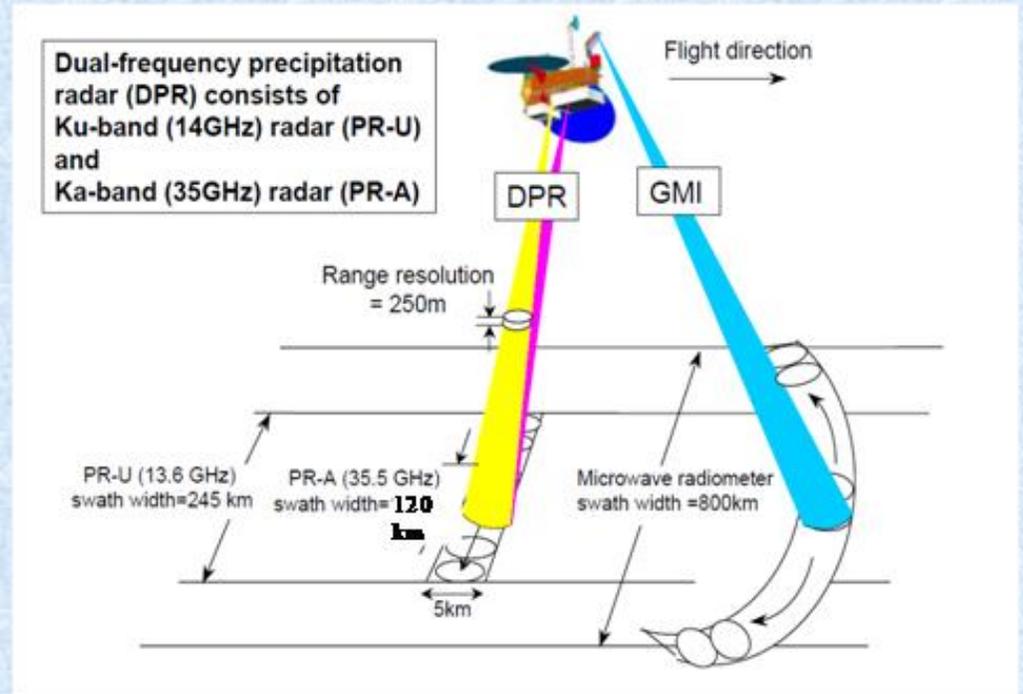


Схема измерения двухчастотного дождевого радиолокатора спутника GPM

Теоретическая модель

«Классические» высотометры работают при надирном зондировании и для восстановления высоты значительного волнения используется теоретическая модель, описывающая форму отраженного импульса. Для наклонного зондирования модель отсутствует.

Рассматриваемая схема измерения показана на рисунке. Радиолокатор находится на расстоянии H_0 от рассеивающей поверхности. Расстояние до плоскости XY равно R_0 и расстояние до точки отражения равно R_1 . Рассеивающая поверхность описывается случайной функцией ζ . Измерения выполняются под углом падения θ_0 .

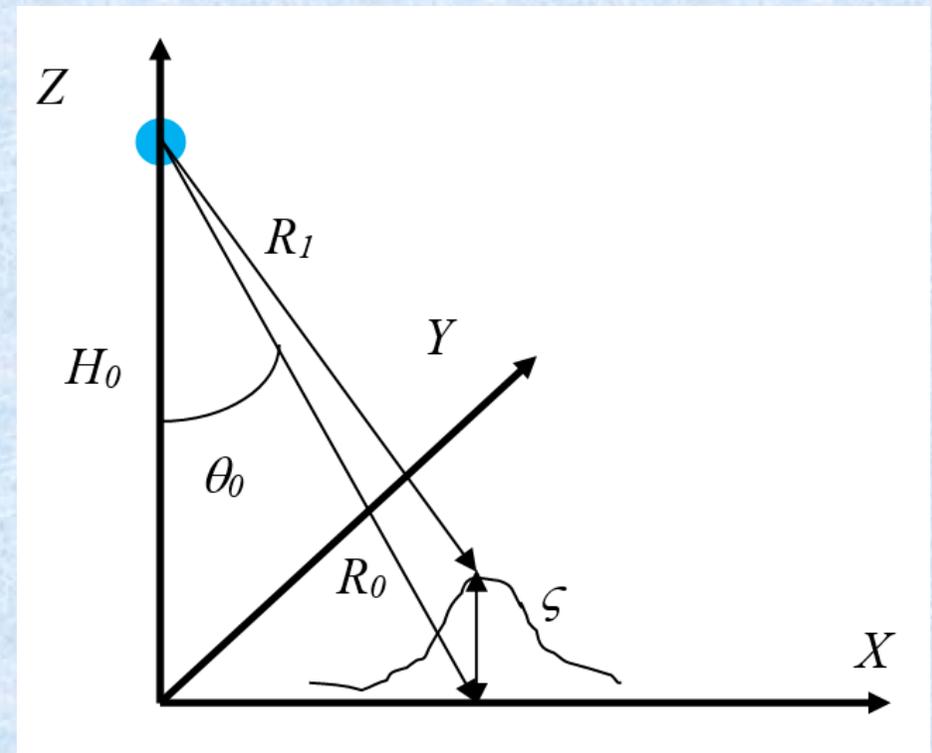


Схема измерения

Теоретическая модель

Отраженное поле вблизи приемной антенны задается следующей формулой

$$E_{scat} = \frac{R_{eff} \cdot E_i k}{2\pi R_0 \cos \theta_0 \cdot i} \int_S \exp[-2kR \cdot i] \cdot G^2(\vec{r}) d\vec{r}$$

где R_{eff} – коэффициент отражения, E_i – амплитуда поля вблизи отражающей поверхности, функция G описывает диаграмму направленности антенны, которая предполагается гауссовой с шириной диаграммы направленности $(\delta_x \times \delta_y)$ по уровню 0,5 по мощности

$$G(\vec{r}) = \exp \left[-1.38 \left(\frac{\cos^2 \theta_0}{R_0^2 \delta_x^2} (x - x_0)^2 + \frac{y^2}{R_0^2 \delta_y^2} \right) \right]$$

Для нахождения мощности отраженного сигнала воспользуемся определением корреляционной функции

$$K(\tau) = \langle E_{scat}(t) E_{scat}^*(t) \rangle$$

в точке $\tau = 0$.

Теоретическая модель

В результате последующих преобразований была получена формула для формы импульса, отраженного от плоской поверхности:

$$K(0) = \frac{|R_{eff}|^2}{2 \cos^2 \theta_0} \times \frac{1}{\sqrt{S_{xx}^2 S_{yy}^2}} \exp \left[-\frac{\sin^2 \theta_0}{2S_{xx}^2} \right] \times \\ \times \exp[-A_x(x - x_0)^2] \exp[-A_{xx}(x - x_0)]$$

где S_{xx}^2 and S_{yy}^2 - дисперсия уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны излучения, волнения,

$$A_x = \left(5.52 \frac{\cos^4 \theta_0}{H_0^2 \delta_x^2} + \frac{\cos^6 \theta_0}{2H_0^2 S_{xx}^2} \right) \quad A_{xx} = \frac{\sin \theta_0 \cos^3 \theta_0}{S_{xx}^2 H_0}$$

Для учета влияния высоты волнения на форму отраженного импульса необходимо выполнить усреднение по функции распределения высот, перейдя к ее представлению во временной области:

$$W(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}} \exp \left[-\frac{\tau^2}{2\sigma_t^2} \right] \quad \text{и} \quad \sigma_t^2 = \frac{4\sigma_\zeta^2}{c^2}$$

где σ_ζ^2 - дисперсия высот волнения.

Теоретическая модель

После усреднения по высотам получим формулу для формы отраженного импульса при наклонном зондировании

$$K(t) = \frac{|R_{eff}|^2}{2 \cos^2 \theta_0} \times \frac{1}{\sqrt{S_{xx}^2 S_{yy}^2}} \exp \left[-\frac{\sin^2 \theta_0}{2S_{xx}^2} \right] \times \frac{1}{\sqrt{1 + 2A_x \sigma_\zeta^2 / t g^2 \theta_0}} \times \\ \times \exp \left[\frac{A_{xx}^2 \sigma_\zeta^2}{C_x} \right] \times \exp \left[-\tau^2 \frac{A_x c^2}{4t g^2 \theta_0} \left(1 - \frac{A_x \sigma_\zeta^2}{C_x} \right) \right] \times \\ \times \exp \left[-\tau \frac{A_{xx} \cdot c}{2t g \theta_0} \left(1 - \frac{2A_x \sigma_\zeta^2}{C_x} \right) \right]$$

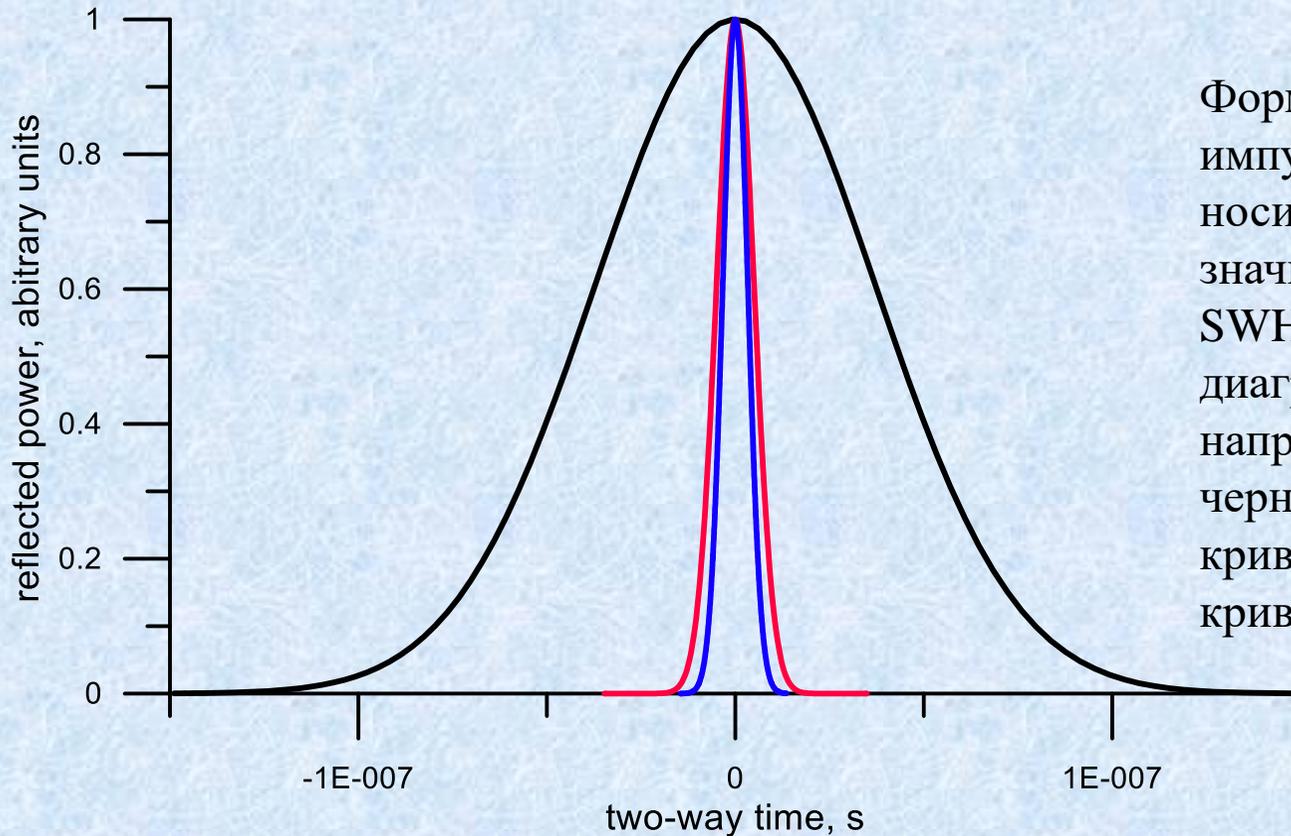
где

$$C_x = 2t g^2 \theta_0 + 4A_x \sigma_\zeta^2$$

Форма отраженного импульса

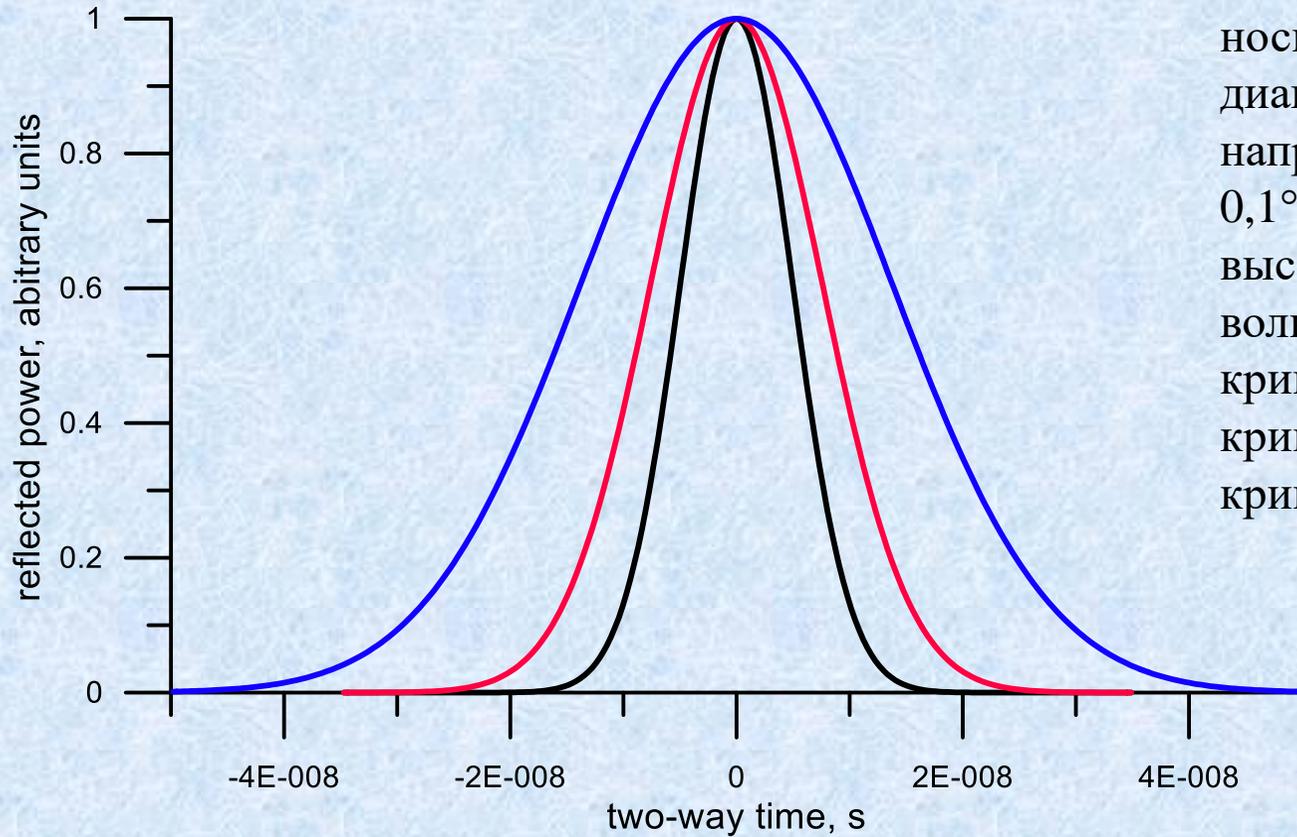
Рассмотрим влияние основных параметров на форму отраженного импульса:

1) ширина диаграммы направленности антенны, 2) высота волнения, 3) угол падения, 4) расстояние от радиолокатора до морской поверхности, 5) дисперсия уклонов крупномасштабного волнения.



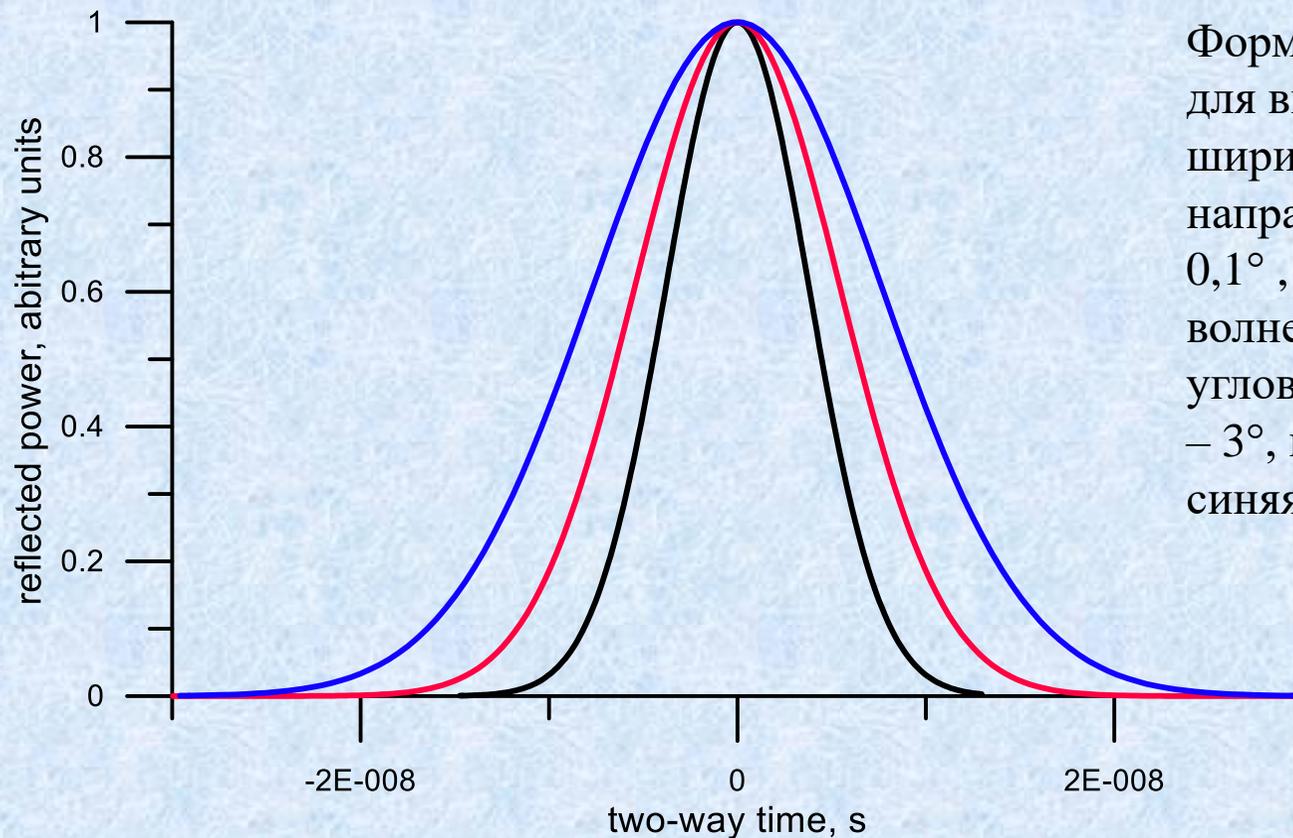
Форма отраженного импульса для высоты носителя 10 км, высоты значительного волнения SWH = 2 м и трех значений диаграммы направленности антенны: черная кривая – 1° , красная кривая - $0,1^\circ$ и синяя кривая – $0,01^\circ$.

Форма отраженного импульса



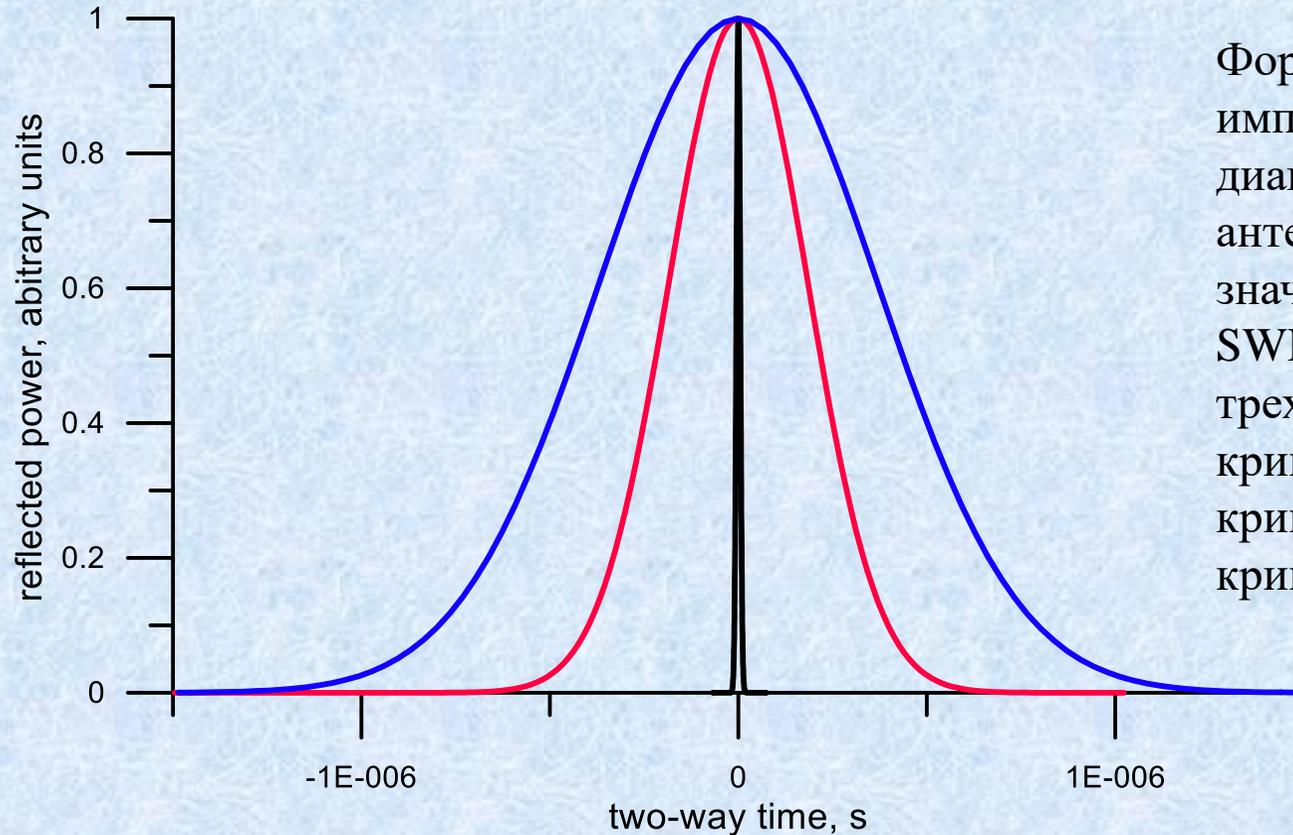
Форма отраженного импульса для высоты носителя 10 км, ширины диаграммы направленности антенны - $0,1^\circ$, и трех значений высоты значительного волнения SWH: черная кривая - 2 м, красная кривая - 4 м и синяя кривая - 8 м.

Форма отраженного импульса



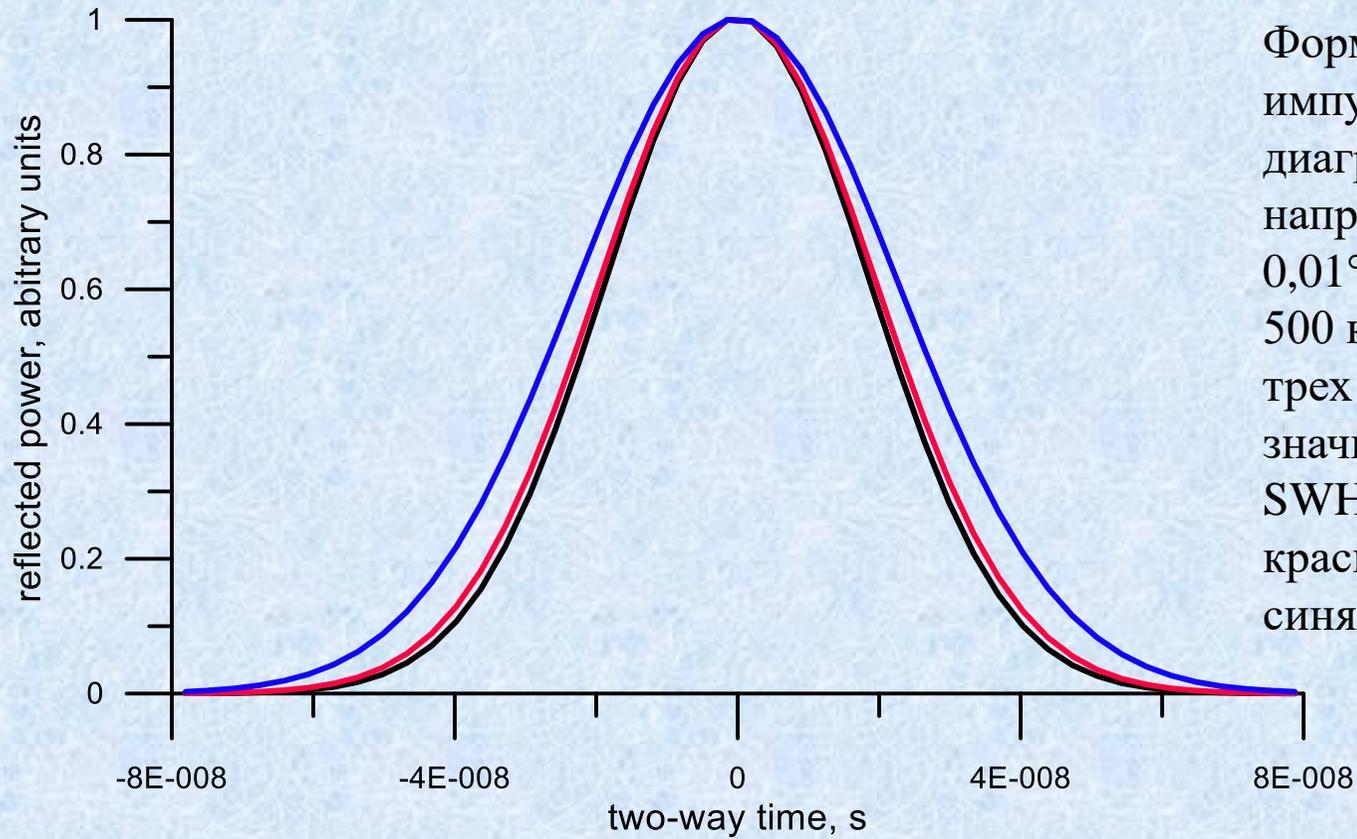
Форма отраженного импульса для высоты носителя 10 км, ширины диаграммы направленности антенны - $0,1^\circ$, высоты значительного волнения $SWH = 2$ м и трех углов падения: черная кривая - 3° , красная кривая - 7° и синяя кривая - 11° .

Форма отраженного импульса



Форма отраженного импульса для ширины диаграммы направленности антенны - $0,1^\circ$, высоты значительного волнения SWH = 2 м, угла падения 6° и трех высот носителя: черная кривая – 10 км, красная кривая – 500 км и синяя кривая – 1000 км.

Форма отраженного импульса



Форма отраженного импульса для ширины диаграммы направленности антенны - $0,01^\circ$, высоты носителя 500 км, угла падения 6° и трех значений высоты значительного волнения SWH: черная кривая – 2 м, красная кривая – 4 м и синяя кривая – 8 м.

Выводы

В приближении метода Кирхгофа рассмотрена задача о форме отраженного импульса при наклонном зондировании морской поверхности.

- 1) Проведено исследование и получена аналитическая формула для формы отраженного импульса при наклонном зондировании при малых углах падения ($< 12^{\circ}$) для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны.
- 2) Выполнено исследование зависимости формы отраженного импульса от ширины диаграммы направленности антенны, высоты значительного волнения, угла падения и расстояния от радиолокатора до морской поверхности.
- 3) Показано, что форма отраженного импульса зависит от высоты значительного волнения и высота волнения может быть восстановлена при последующей обработке.
- 4) Увеличение расстояния от радиолокатора до морской поверхности требует соответствующего уменьшения ширины диаграммы направленности антенны, чтобы сохранить зависимость формы отраженного импульса от угла высоты значительного волнения.