



К вопросу о модели наклонного высотомера

**Караев В.Ю., Титченко Ю.А., Понур К.А, Рябкова М.С., Панфилова
М.А., Мешков Е.М., Баландина Г.Н.**

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Аннотация

Эффективными приборами для измерения высоты морского волнения являются радиолокационные и акустические высотомеры. Недостаток современных орбитальных радиовысотомеров связан с тем, что зондирование выполняется при нулевом угле падения и высота волнения восстанавливается только вдоль трека. 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 впервые получена аналитическая формула для формы отраженного импульса при наклонном зондировании. Рассматривалась схема наклонного зондирования для углов падения меньше 12° , когда механизм обратного рассеяния остается квазизеркальным и отраженный сигнал описывается в приближении метода Кирхгофа. Для радиолокатора с узкой симметричной диаграммой направленности антенны был разработан комплекс программ для моделирования отраженного сигнала и вычисления формы отраженного импульса. Было показано, что передний фронт отраженного импульса содержит информацию о высоте значительного волнения, которая может быть восстановлена.

Введение

Эффективными приборами для измерения высоты морского волнения являются радиолокационные и акустические высотомеры. Орбитальные радиовысотомеры измеряют высоту значительного волнения в Мировом океане, и полученная информация используется при описании волнового климата, измерения скорости 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.

Более информативным было бы восстановление высоты значительного волнения в широкой полосе обзора и такие проекты прорабатываются. Наиболее близким к реализации является американо-французский радиовысотомер SWOT (Surface Water Ocean Topography), который планируется вывести на орбиту в конце 2022 года. В данном случае на спутнике будет реализована бистатическая схема измерения.

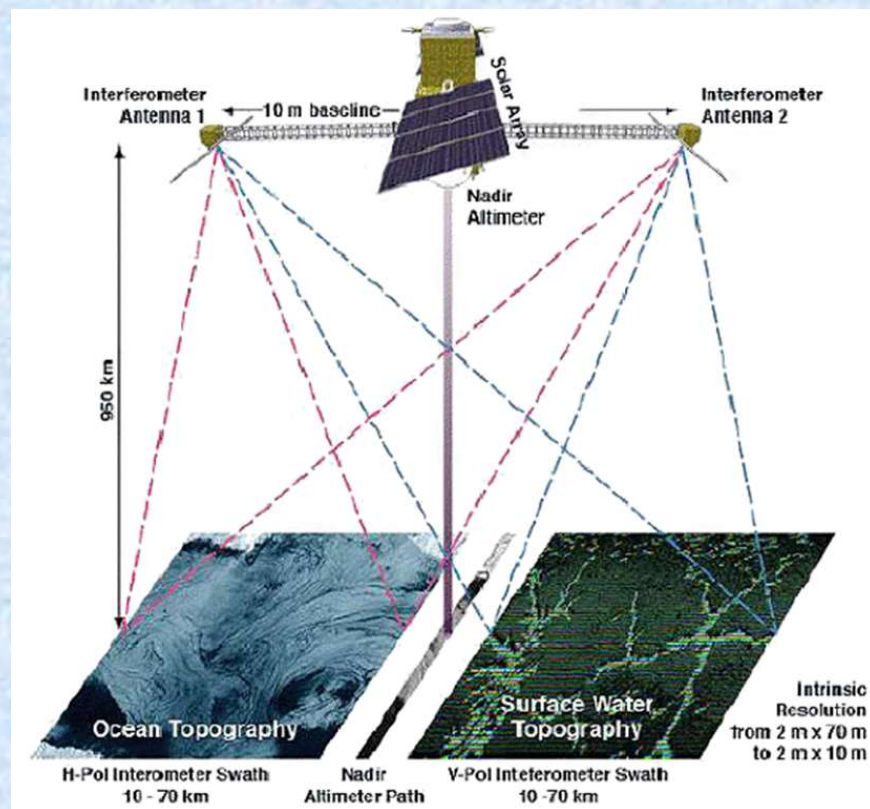


Схема измерения французско-американской миссии SWOT.

Введение

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).

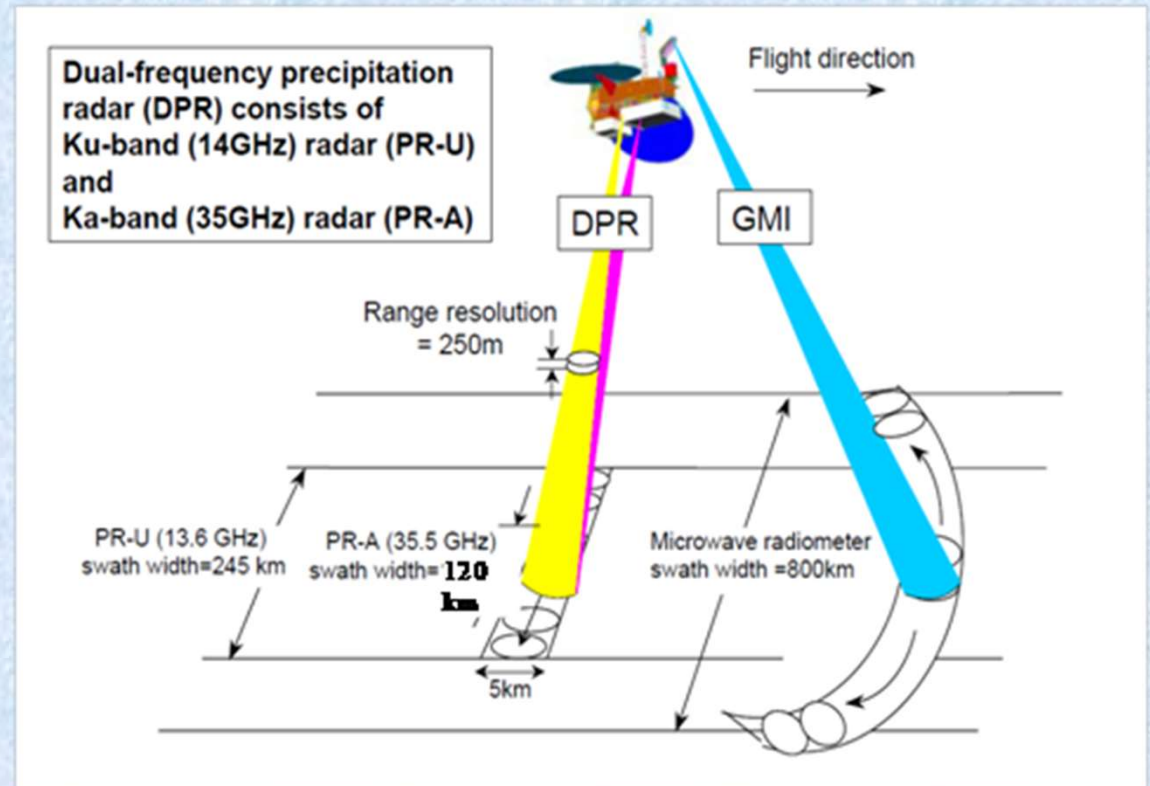


Схема измерения двухчастотного дождевого радиолокатора спутника GPM

Теоретическая модель

«Классические» высотомеры 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 (гидролокатор) 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 .

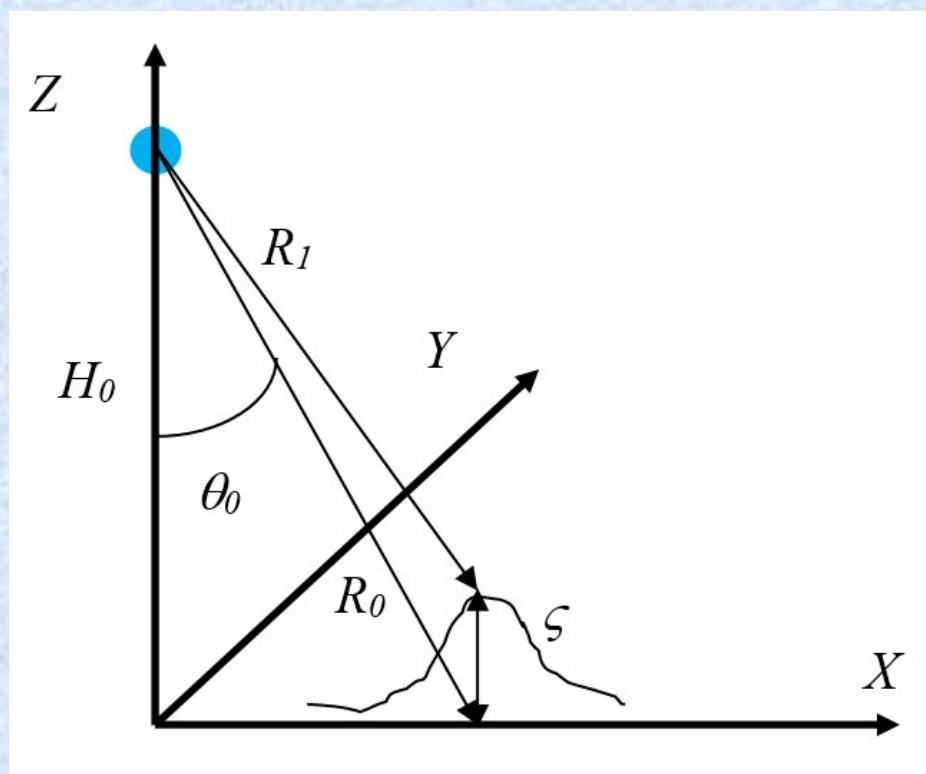


Схема измерения

Теоретическая модель

Отраженное поле вблизи задается приемной антенны задается следующей формулой

$$U_{bsc} = \frac{V \cdot U_0 k}{4\pi \cos \theta_0 R_0^2 \cdot i} \int_S \exp[-2kR \cdot i] \cdot G^2(\vec{r}) d\vec{r}$$

где V – коэффициент отражения, U_0 – амплитуда излученного поля, функция G описывает диаграмму направленности антенны, которая предполагается гауссовой с шириной диаграммы направленности δ_x по уровню 0,5 по мощности.

Для нахождения мощности отраженного сигнала воспользуемся определением корреляционной функции

$$K(\tau) = \langle U_{bsc}(t_1) U_{bsc}^*(t_2) \rangle$$

в точке $\tau = 0$.

Теоретическая модель

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

передний фронт отраженного импульса $f_1 = \sigma_{0x} (1 - \exp[-A_x H_0 c \tau \cdot])$

задний фронт отраженного импульса $f_2 = \sigma_{0x} (\exp[A_x H_0 c \tau_{imp}] - 1) \times \exp[-A_x H_0 c \tau]$

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

$$W(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_t^2}} \exp\left[-\frac{\tau^2}{2\sigma_t^2}\right]$$

где $\sigma_t^2 = \frac{4\sigma_\zeta^2}{c^2}$; σ_ζ^2 - дисперсия высот волнения.

Теоретическая модель

В результате форма отраженного импульса представляет из себя свертку импульса, отраженного плоской поверхностью и функции распределения высот

$$F(\tau) = \int_0^{\tau_{imp}} W(\tau - t) f_1(t) dt + \int_{\tau_{imp}}^{\infty} W(\tau - t) f_2(t) dt$$

После интегрирования форма отраженного импульса имеет следующий вид:

$$F(\tau) = F_1(\tau) + F_2(\tau) + F_3(\tau) + F_4(\tau)$$

где входящие в формулу функции получились достаточно громоздкими

$$F_1 = \sigma_{0x} \times \sqrt{\pi \frac{\sigma_t^2}{2}} \exp\left[\frac{\tau^2}{2\sigma_t^2}\right] \left(1 - \Phi\left[\frac{\tau}{\sqrt{2\sigma_t^2}}\right]\right) \quad F_2 = -\sigma_{0x} \sqrt{\pi \frac{\sigma_t^2}{2}} \exp\left[\frac{\tau^2}{2\sigma_t^2}\right] \cdot \left(1 - \Phi\left(\frac{\tau}{\sqrt{2\sigma_t^2}} + \frac{\tau_{imp}}{\sqrt{2\sigma_t^2}}\right)\right)$$

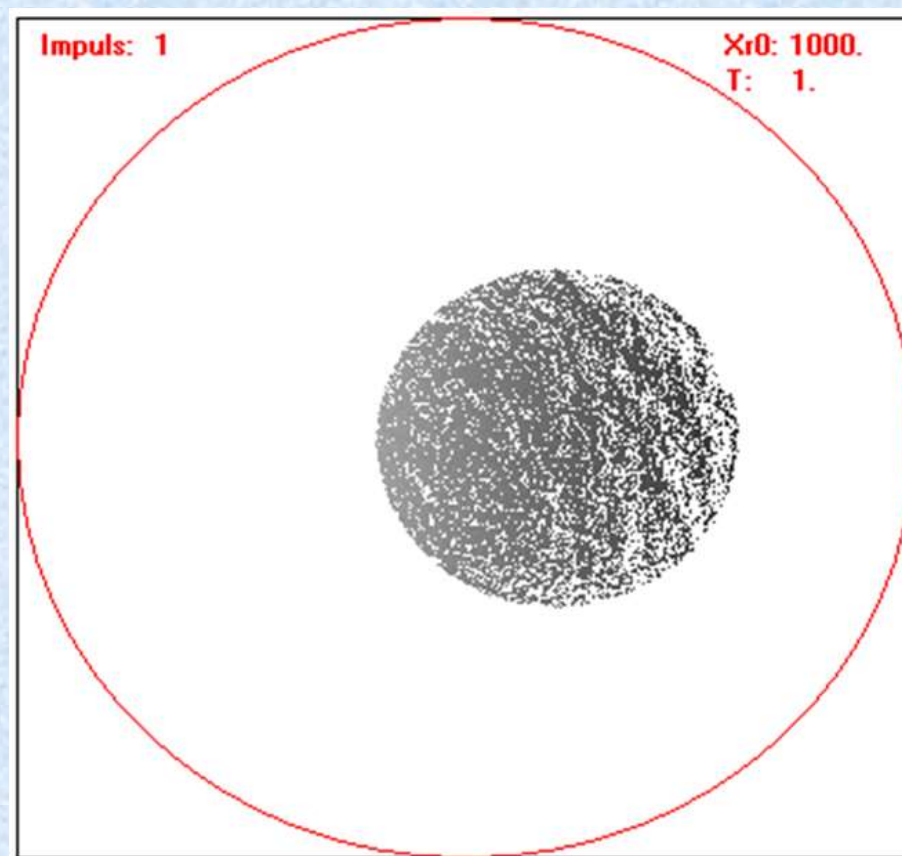
$$F_3 = -\sigma_{0x} \sqrt{\pi \frac{\sigma_t^2}{2}} \exp\left[\frac{\sigma_t^2}{2} \left(\frac{\tau}{\sigma_t^2} - A_x H_0 c\right)^2\right] \cdot \left(1 - \Phi\left(\left(\frac{\tau}{\sigma_t^2} - A_x H_0 c\right) \sqrt{\frac{\sigma_t^2}{2}}\right)\right)$$

$$F_4 = \sigma_{0x} \sqrt{\pi \frac{\sigma_t^2}{2}} \exp\left[\frac{\sigma_t^2}{2} \left(\frac{\tau}{\sigma_t^2} - A_x H_0 c\right)^2\right] \cdot \left(1 - \Phi\left(\left(\frac{\tau}{\sigma_t^2} - A_x H_0 c\right) \sqrt{\frac{\sigma_t^2}{2}} + \frac{\tau_{imp}}{2\sqrt{\frac{\sigma_t^2}{2}}}\right)\right)$$

Численное моделирование

Численное моделирование является эффективным инструментом для тестирования алгоритмов обработки.

Для радиолокатора с узкой симметричной диаграммой направленности антенны был разработан комплекс программ для моделирования отраженного сигнала и вычисления формы отраженного импульса. Задаются расстояние до отражающей поверхности, угол падения, диаграмма направленности антенны и интенсивность морского волнения.

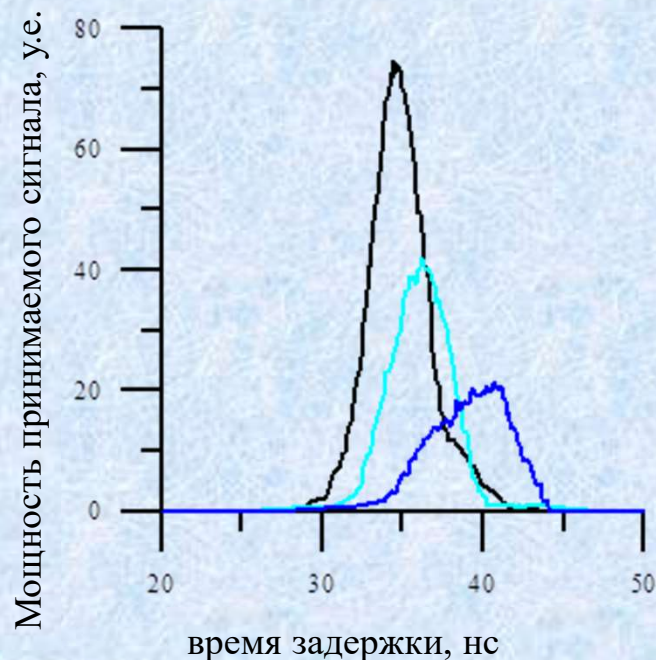


На рисунке приведен пример численного моделирования морского волнения (отражающих площадок) при наклонном зондировании. Белый цвет пиксела — нет отражения и темный пиксел характеризует зеркальную точку.

Численное моделирование

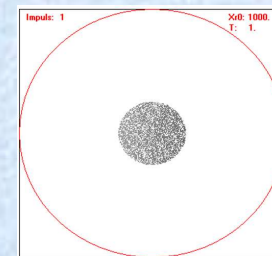
Для ускорения численного моделирования расстояние от радиолокатора до морской поверхности было выбрано равным 2000 м и узкая диаграмма направленности ($1^0 \times 1^0$), скорость приводного ветра 10 м/с, длительность зондирующего импульса 3 нс. «Визуализация» рассеивающей площадки для углов падения 0^0 , 6^0 и 9^0 показана на рисунках справа.

Результаты численного моделирования формы отраженного импульса приведены на рисунке: угол падения 0^0 - черная кривая, 6^0 - голубая кривая и 9^0 - синяя кривая. «Быстрое заваливание» заднего фронта отраженного импульса связано с небольшим расстоянием до отражающей поверхности.

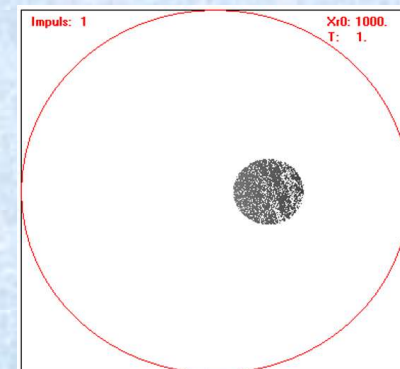


Форма отраженного импульса для трех углов падения: 0^0 - черная кривая, 6^0 - голубая кривая и 9^0 - синяя кривая.

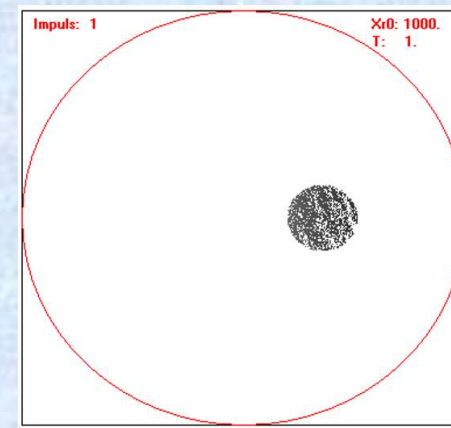
$\theta = 0^0$



$\theta = 6^0$



$\theta = 9^0$



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 ($< 12^0$) для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны.
- 2) Разработан комплекс программ имитирующий работу высотомера в импульсном режиме. Входными параметрами для «высотомера» являются расстояние до отражающей поверхности, угол падения, длительность и число импульсов, скорость движения. При моделировании отражающей поверхности задается скорость и направление ветра, длина ветрового разгона, длина и высота волн зыби, направление распространения волн зыби.
- 3) Проведено численное моделирование и получены первые формы отраженных импульсов при наклонном зондировании.

Планируется продолжить исследования в этом направлении и разработать алгоритм определения высоты значительного волнения по переднему фронту отраженного импульса для малых углов падения и протестировать его на модельных данных.