

Особенности работы радиовысотомера на малых высотах: первые результаты

В.Ю. Караев, К.А. Понур, Ю.А. Титченко, Е.М. Мешков, М.А. Панфилова, И.Ю. Лебедев, Р.В. Беляев, М.С. Рябкова

*Институт прикладной физики РАН
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: volody@ipfran.ru*

Обсуждаются первые результаты обработки данных эксперимента на Нижегородской канатной дороге. Радиолокатор X-диапазона был установлен на технологической тележке и выполнял измерения во время движения. В режиме радиовысотомера измерялась форма отраженного импульса, и определялось расстояние до рассеивающей поверхности. Сравнение с данными GNSS приемника подтвердило, что существующие алгоритмы применимы для радиовысотомера с ножевой диаграммы направленности антенны. Было проведено имитационное моделирование формы отраженного импульса для заданной «высоты» крупных неровностей и было показано, что по переднему фронту отраженного импульса восстанавливается высота «неровностей». Было показано, что по заднему фронту отраженного импульса можно восстановить дисперсию уклонов крупномасштабного волнения. Планируется продолжить обработку данных и получить количественные оценки точности алгоритмов.

Ключевые слова: радиовысотомер X-диапазона, форма отраженного импульса, эксперимент на канатной дороге, алгоритмы обработки

Peculiarities of the radio altimeter operation at low altitudes: first results

V. Yu. Karaev, K. A. Ponur, Yu. A. Titchenko, E. M. Meshkov, M. A. Panfilova, I. Yu. Lebedev, R. V. Belyaev, M. S. Ryabkova

Institute of Applied Physics RAS.

The first results of data processing of the experiment on the Nizhny Novgorod cable car are presented. An X-band radar was mounted on a technological trolley and performed measurements during the movement. In the radio altimeter mode, the waveform of the reflected impulse was measured, and the distance from radar to the scattering surface was determined. Comparison with the GNSS receiver data confirmed that the existing algorithms are applicable to knife-like radio altimeter. A simulation of the waveform of the reflected pulse was carried out for a given "height" of large roughness and it was shown that the height of the "roughness" is restored from the leading edge of the waveform. It was shown that the mean square slopes of large-scale waves can be retrieved from the trailing edge of the waveform. It is planned to continue processing the data and obtain quantitative estimates of the accuracy of the algorithms.

Keywords: X-band radio altimeter, waveform of the reflected impulse, cable car experiment, retrieval algorithm

Введение

В настоящее время орбитальный радиовысотомер является эффективным инструментом при решении широкого круга задач дистанционного зондирования Мирового океана [1, 2]. Благодаря усилиям, предпринимаемым учеными разных стран, удалось обеспечить непрерывность наблюдения Мирового океана радиовысотомерами с 1992 г. и в настоящее время на орбите одновременно выполняют

измерения несколько радиовысотомеров, что повышает повторяемость наблюдений и улучшает пространственное и временное разрешение.

Радиовысотомер измеряет форму отраженного импульса, и форма импульса используется в алгоритмах обработки для определения расстояния от радиовысотомера до отражающей поверхности и определения высоты значительного волнения [1, 3, 4]. По максимуму отраженного импульса определяется сечение обратного рассеяния и при последующей обработке сечение обратного рассеяния используется в алгоритмах определения скорости приводного ветра [5-9]. Особое место занимает «доплеровский» радиовысотомер, в котором за счет процедуры синтезирования удается значительно повысить пространственное разрешение [10, 11]. Также для измерения высоты значительного волнения предлагалось использовать измерения на близких частотах в радиовысотомере, который разрабатывался для модуля «Природа» станции «Мир» [12, 13].

Первые работы, посвященные построению модели формы отраженного импульса радиолокационного сигнала при надирном зондировании, появились в конце шестидесятых, например, [14]. Однако в окончательном виде формула для формы импульса отраженного сигнала, которая применялась в алгоритмах обработки орбитальных радиовысотомеров, была получена Брауном [15].

В дальнейшем оказалось, что в первоначальном виде модель Брауна перестает работать при отклонении диаграммы направленности от надира более чем на $0,4^\circ$. Это связано с использованными при ее выводе упрощениями. Формула для формы отраженного импульса была уточнена в работе [16]. Обе формулы совпадают для нулевого угла падения. При отклонении от надира новая формула, за счет учета следующего члена ряда, оказывается точнее и в настоящее время используется для обработки данных.

Для радиолокатора с узкой диаграммой направленности антенны ($1,5^\circ$) в формировании формы отраженного импульса участвуют участки волнового профиля, ориентированные практически горизонтально. Следовательно, изменение дисперсии уклонов не повлияет на форму отраженного импульса, измеряемого радиовысотомером. У радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны в формировании формы отраженного импульса будут принимать участие не только горизонтальные участки волнового профиля, поэтому при построении теоретической модели для формы отраженного импульса необходимо учитывать дисперсию уклонов морского волнения. Формула для формы отраженного импульса с учетом дисперсии уклонов отражающей поверхности была получена в работе [17]. Однако измерения радиовысотомером с широкой диаграммой направленности антенны нам неизвестны.

Для исследования свойств отраженного импульса при надирном зондировании на малых высотах были проведены измерения радиовысотомером с ножевой диаграммой направленности антенны, установленном на технологической тележке Нижегородской канатной дороге. Данное исследование является продолжением первых публикаций, посвященных эксперименту [18, 19].

Радиолокатор

Для проведения экспериментов АО НПФ Микран [20] по заказу ИПФ РАН разработало и изготовило радиолокатор X-диапазона. Радиолокатор может работать в двух режимах: 1) в доплеровском режиме измеряется доплеровский спектр отраженного сигнала и 2) в высотомерном режиме измеряется форма отраженного импульса. Измерения в высотомерном и доплеровском режимах выполняются в цикле длительностью 10,285 с (0,285 с и 10 с соответственно). Параметры радиолокатора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры радиолокатора X-диапазона производства АО НПФ Микран

Частота (девиация частоты)	9,2-9,5 ГГц (289,99 МГц)
ширина ДН антенны	30° x 3,6°
выходная мощность	1 Вт
длительность импульса	2,85 мс
выходные данные	1) доплеровский спектр 2) форма отраженного импульса

Измерения выполнялись при надирном зондировании. В режиме высотомера может быть измерена высота значительного волнения. Надо отметить, что ветровое волнение на реке обычно имеет небольшую высоту и при разрешении радиовысотомера по дальности около 0.5 м (девиация частоты около 300 МГц) протестировать работу алгоритмов измерения высоты волнения в речных условиях сложно.

Оптимальным вариантом для проведения измерений стала установка радиолокатора в технологической тележке Нижегородской канатной дороги.

Эксперимент на Нижегородской канатной дороге

Нижегородская канатная дорога пересекает р. Волга и соединяет г. Нижний Новгород (высокий берег) и г. Бор (низкий берег). На рис. 1 приведено изображение из Google maps, на котором синей прямой показана канатная дорога (слева), и фотография канатной дороги (справа). Точками на прямой показаны места установки опор. Опоры расположены на суше, поэтому данные вблизи опор исключались при обработке.



Рис. 1. На изображении из Google maps синей прямой нанесена Нижегородская канатная дорога (слева) и приведена фотография канатной дороги с высокого берега (справа)

На рис. 2 показана технологическая тележка с установленным радиолокатором до начала измерения (слева) и во время измерений (справа). Тележка движется по канату, который провисает между опорами, поэтому в эксперименте «имитируется» движение над «неровной» поверхностью, профиль которой задается провисающим между опорами «канатом».

Это можно интерпретировать как горизонтальное движение радиолокатора над «крупными» неровностями (волнением). Высоту неровностей (волн) можно задавать, выбрав время усреднения (суммирования) отраженных импульсов и зная (измеряя) координаты технологической тележки. Таким образом, сформировав «искусственный»

импульс можно будет протестировать алгоритм определения высоты значительного «волнения» по переднему фронту отраженного импульса даже в речных условиях.



Рис. 2. Технологическая тележка с установленным радиолокатором перед измерениями (слева) и во время эксперимента при движении над водной поверхностью (справа).

При движении происходит изменение расстояния от радиолокатора до отражающей поверхности, поэтому обработка импульсов, усредненных за 1 с (100 импульсов), позволяет протестировать алгоритм измерения расстояния от радиолокатора до подстилающей и сравнить с измерениями GNSS приемника. Для обеспечения необходимой точности измерения пространственного положения радиолокатора использовался геодезический приемник EFT M1 Plus производства компании EFT GROUP (г. Москва) [21]. Он обеспечивает абсолютную точность измерения порядка 2-4 см. Сотрудники компании с геодезическим приемником принимали участие в эксперименте и подготовили данные для последующей обработки.

На рис. 3 показана траектория движения технологической тележки по данным GNSS во время одного из экспериментов. Было совершено три полных круга и это видно на рисунке.

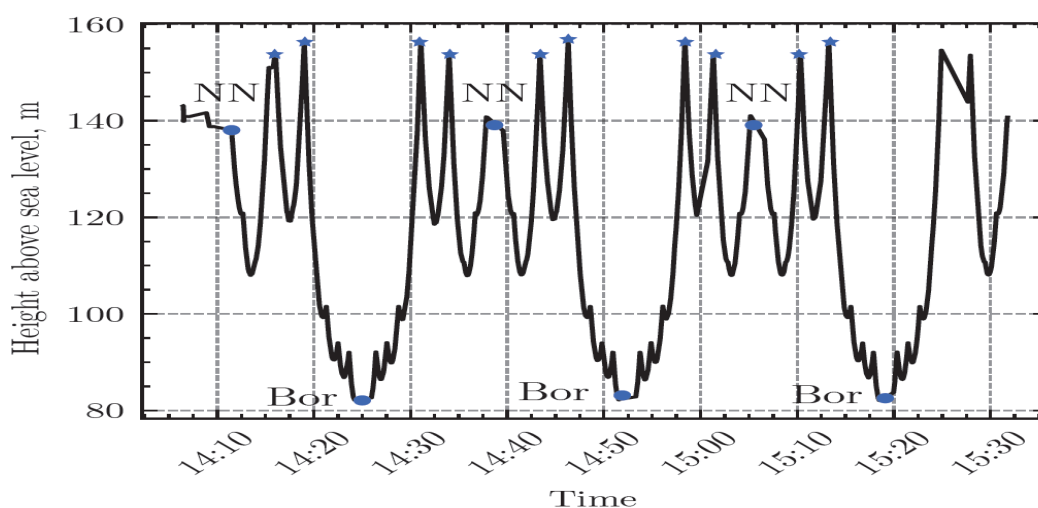


Рис. 3. Изменение высоты технологической тележки (радиолокатора) во время эксперимента. Высота отсчитывается от «уровня» моря. NN – станция Нижний Новгород и Bor станция на Бору

В отличие орбитального радиовысотомера, когда фактически записывается только передний фронт отраженного импульса, в ходе проведенного эксперимента записывался весь отраженный импульс. В этом случае, как следует из теоретической

модели [17], задний фронт отраженного импульса содержит информацию о дисперсии уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны радиолокатора, волнения (далее крупномасштабного волнения). Дисперсия уклонов - это дополнительная информация о подстилающей поверхности, которая может быть определена по форме отраженного импульса. Таким образом, схема проведения эксперимента позволяет протестировать алгоритм определения дисперсии уклонов крупномасштабного волнения.

Модель Amorouche

Для обработки данных радиовысотомера Torex/Poseidon успешно применялась модель Брауна с учетом кривизны Земли [22]. Однако после запуска спутников серии Jason возникли проблемы обработки, обусловленные значительными отклонениями угла падения от вертикали, которые не наблюдались у радиовысотомера Torex/Poseidon. При отклонениях угла падения от вертикали больше, чем на $0,4^\circ$, модель Брауна перестает работать – она предсказывает не спад, а рост заднего фронта импульса, что расходится с экспериментом.

В связи с этим возникла необходимость построения аналитической модели для формы отраженного импульса, работающей в большем интервале углов падения (отклонения центра диаграммы направленности антенны от вертикали). Такая модель, полученная в рамках более общих предположений, приведена в [16] и использовалась при обработке данных Jason-2, например, [23].

Приведем формулу Amorouche для модели Брауна второго порядка из работы [16]:

$$W(t) = A \exp(-v_1) [1 + \operatorname{erf}(u_1)] - \frac{A}{2} \exp(-v_2) [1 + \operatorname{erf}(u_2)] .$$

В формуле используются следующие переменные

$$u_1 = \frac{t - \alpha_1 \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v_1 = \alpha \left(t - \frac{\alpha_1}{2} \sigma_c^2 \right), \quad u_2 = \frac{t - \alpha_2 \sigma_c^2}{\sqrt{2} \sigma_c}, \quad v_2 = \alpha \left(t - \frac{\alpha_2}{2} \sigma_c^2 \right),$$

$$\alpha_2 = \delta. \quad \alpha_1 = \delta - \beta^2/4 .$$

где σ_S^2 – дисперсия высот поверхностного волнения, $\sigma_p \approx 0.425r_t$ [15] или $\sigma_p \approx 0.513r_t$ [24], r_t – разрешение по времени (дальности) и

$$\sigma_c^2 = \sigma_S^2 + \sigma_p^2 .$$

Амплитуда A определена следующим образом

$$A = A_0 \exp \left[-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi \right]$$

где A_0 параметр, зависящий от характеристик радиолокатора и потерь при распространении электромагнитной волны; ξ - угол отклонения центра диаграммы направленности антенны от вертикали. В выражения для параметров δ и β

$$\delta = \frac{4c}{\gamma h} \cos 2\xi \quad \beta = \frac{4}{\gamma} \sqrt{\frac{c}{h}} \sin 2\xi$$

входит высота h

$$h = H \left(1 + \frac{H}{R_t} \right),$$

которая зависит от высоты орбиты спутника H и радиуса Земли R_t .

Параметр γ характеризует антенну и вычисляется следующим образом

$$\gamma = 0.5 \ln 2 \cdot \sin^2 \theta_{3dB}$$

где θ_{3dB} - ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности.

Модель Караева для формы отраженного импульса

Как уже отмечалось, при получении формулы для формы импульса, отраженного от морской поверхности, используются различные приближения. Приведем формулы, полученные в работе ([17, 25]).

При малых углах падения обратное рассеяние является квазизеркальным и происходит на участках крупномасштабного волнения, ориентированных перпендикулярно падающему излучению. Функция $G(\vec{r})$ задает диаграмму направленности антенны и при надирном зондировании имеет следующий вид [14]:

$$G(\vec{r}) = \exp \left[-1.38 \left(\frac{x^2}{H^2 \delta_0^2} + \frac{y^2}{H^2 \delta_0^2} \right) \right],$$

где δ_0 - ширина диаграммы направленности антенны на уровне 0,5 по мощности.

Форма отраженного импульса при надирном зондировании для плоской поверхности (малые высоты) задается следующей формулой:

$$F(t) = I_1 + I_2 - I_3,$$

где функции I_1, I_2, I_3 представляют собой сумму X и Y составляющих, например,

$$I_1(t) = I_{1x}(t) + I_{1y}(t)$$

и

$$\begin{aligned} I_{1x} &= \frac{\sigma_{0x}}{2} \left[\exp(A_x H \cdot c \tau_{imp}) - 1 \right] \exp[-A_x H c \tau + 2\sigma_S^2 A_x^2 H^2] \times \\ &\quad \times \left(1 - \operatorname{erf} \left[A_x H \sqrt{2\sigma_S^2} + \frac{(\tau_{imp} - \tau)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right] \right), \\ I_{2x} &= \frac{\sigma_{0x}}{2} \left(\operatorname{erf} \left[\frac{(\tau_{imp} - \tau)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right] + \operatorname{erf} \left[\frac{\tau c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right] \right), \\ I_{3x} &= \frac{\sigma_{0x}}{2} \exp[-A_x H \cdot c \tau + 2\sigma_S^2 A_x^2 H^2] \times \\ &\quad \times \left(\operatorname{erf} \left[A_x H \sqrt{2\sigma_S^2} + \frac{(\tau_{imp} - \tau)c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right] - \operatorname{erf} \left[A_x H \sqrt{2\sigma_S^2} - \frac{\tau c}{2\sqrt{2\sigma_S^2}} \right] \right), \end{aligned}$$

и

$$A_x = \frac{1}{2mss_{xx}H^2} + \frac{5.52}{\delta_0^2 H^2}, \quad A_y = \frac{1}{2mss_{yy}H^2} + \frac{5.52}{\delta_0^2 H^2}, \quad \sigma_{0x} = \frac{2.76|R_{eff}|^2}{\pi H^2 \delta_0^2 \sqrt{mss_{xx}mss_{yy}}} = \sigma_{0y},$$

где mss_{xx} и mss_{yy} – дисперсии уклонов крупномасштабного волнения вдоль осей X и Y соответственно; R_{eff} – эффективный коэффициент отражения, который вводится вместо коэффициента Френеля, чтобы учесть влияние мелкой ряби на амплитуду отраженного сигнала (ослабление за счет брэгговского рассеяния); σ_S^2 - дисперсия высот поверхностного волнения; τ_{imp} – длительность зондирующего импульса; c – скорость света.

Формулы для x - и y - составляющих структурно выглядят похоже и переходят друг в друга при замене индекса x на y . Поэтому приведены формулы только для I_x .

На рис. 4 приведено сравнение отраженных импульсов для радиовысотомера с широкой диаграммой направленности антенны ($30^\circ \times 30^\circ$) для модели Amouche (сплошная черная кривая) и модели Караева (пунктирные кривые) для расстояния до поверхности 100 м, высоте значительного волнения 4 м и дисперсии уклонов крупномасштабного волнения $mss_{xx} = mss_{yy} = 0,005$ (синяя) и 0,03 (красная).

Из рисунка видно, что при увеличении дисперсии уклонов крупномасштабного волнения происходит «сближение» моделей и это связано с тем, что при выводе модели

Amorouche предполагалось, что обратное рассеяние наблюдается при всех углах падения и основным фактором, влияющим на форму импульса, является диаграмма направленности антенны.

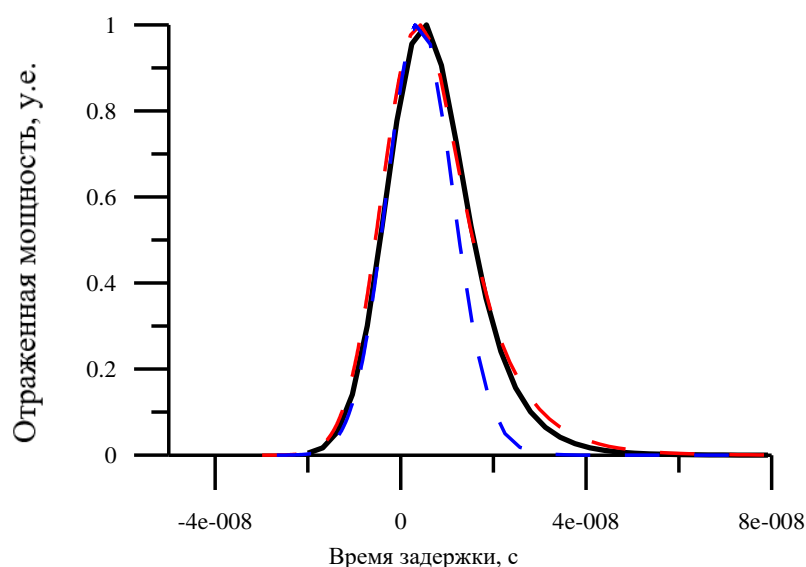


Рис. 4. Сравнение модели Amorouche (черная кривая) и модели Караева (пунктир) для радиолокатора с широкой диаграммой направленности антенны (30°x30°), расстояния до поверхности 100 м, высоте значительного волнения 4 м и дисперсии уклонов крупномасштабного волнения $mss_{xx} = mss_{yy} = 0,005$ (синяя) и 0,03 (красная).

Анализ данных: Форма отраженного импульса

При движении радиолокатора происходит изменение расстояния до водной поверхности из-за провисания каната. Была проведена обработка данных и на рис. 5 приведено сравнение данных GNSS приемника (черная кривая) и данных радиовысотомера (красная кривая). Расстояние между точками около 5 м.

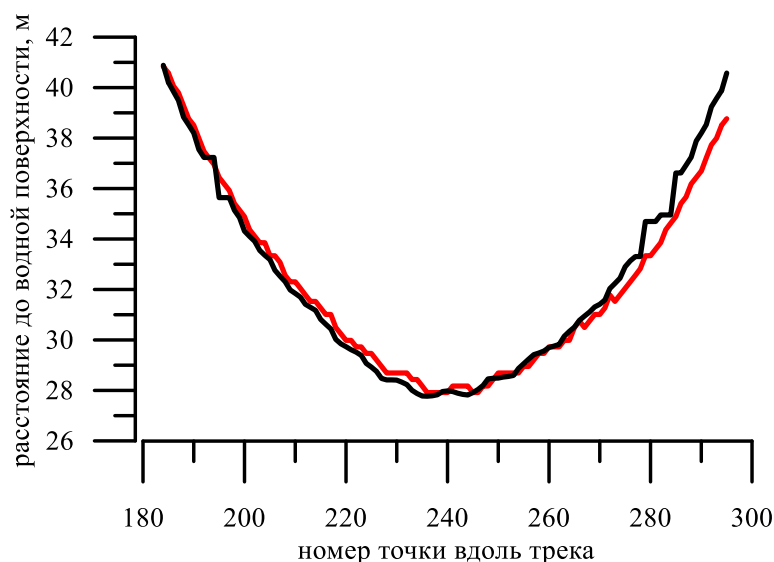


Рис. 5. Изменение расстояния от технологической тележки до водной поверхности, измеренных радиолокатором (красная кривая) и GNSS приемником (черная кривая).

Разрешение радиовысотомера по высоте составляет 0,5 м. Наблюдаемые «артефакты» в данных GMSS при подъеме к опоре, показывают, что движение влияет

на точность измерения координат прибора. Необходимо дополнительное исследование вопроса точности.

Таким образом, радиовысотомер измеряет расстояние от радиолокатора до поверхности. При движении происходит изменение расстояния и на рис. 6 приведена последовательность импульсов. Для удобства сравнения на рисунке все импульсы были нормированы на максимум и разные импульсы нарисованы разными цветами.

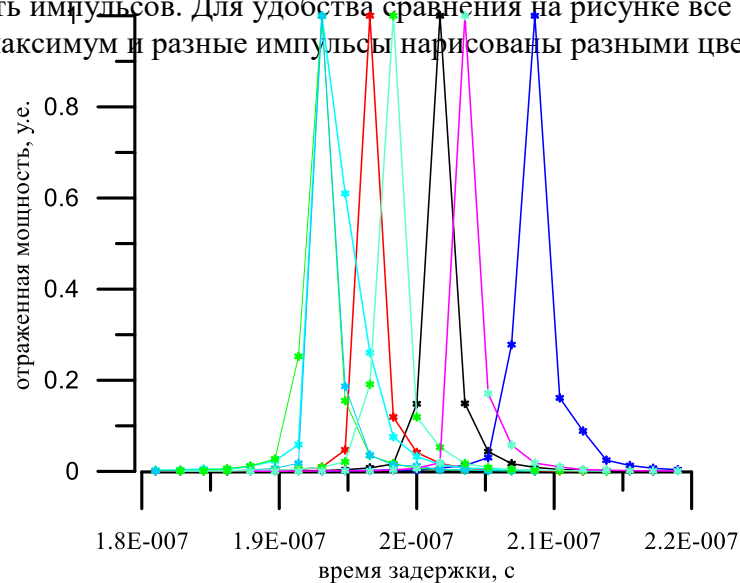


Рис. 6. Пример последовательности импульсов при движении технологической тележки.

Как обсуждалось выше, эти измерения можно интерпретировать как горизонтальное движение над «неровной» поверхностью. Исходя из предположения о гауссовой функции распределения высот можно сформировать «средний» импульс для такой поверхности. На рис. 7 показан результат такой обработки (звездочки).

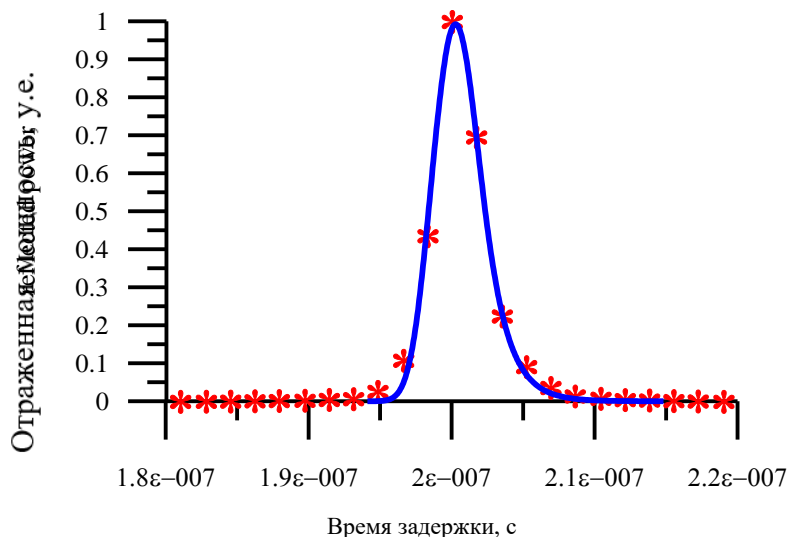


Рис. 7. Пример «смоделированного» импульса для высоты значительного 1.38 м: звездочки – импульс, кривая – результат ретрекинга волнения 1.20 м.

Произошло уширение переднего фронта отраженного импульса и можно воспользоваться известным алгоритмом для восстановления высоты значительного

волнения. Подобранный импульс показан синей кривой. В результате ретрекинга высота значительного волнения равна 1,2 м (по модели 1,38 м).

Поведение заднего фронта отраженного импульса зависит от дисперсии уклонов крупномасштабного волнения. Для определения дисперсии уклонов необходимо использовать модель Караева. Обработка показала, что алгоритм работает и дисперсия уклонов крупномасштабного волнения измеряется. В данном эксперименте она равна 0,0095.

Выводы

В работе обсуждаются первые результаты обработки данных эксперимента на Нижегородской канатной дороге с радиолокатором X-диапазона, работающим в режиме радиовысотомера. Изменялась форма отраженного импульса и определялось расстояние от радиолокатора до водной поверхности. Сравнение с независимыми измерениями GNSS приемника подтвердило возможность использования радиовысотомеров с ножевой (широкой) диаграммой направленности антенны для измерения расстояния.

Для оценки работоспособности алгоритма определения высоты значительного волнения было выполнено моделирование формы отраженного импульса для подстилающей поверхности с заданными «крупными» неровностями. Обработка данных подтвердила, что и в случае радиовысотомера с ножевой (широкой) диаграммой направленности антенны по переднему фронту отраженного импульса определяется высота значительного волнения.

Показано, что при использовании в радиовысотомере ножевой (широкой) диаграмма направленности антенны по заднему фронту отраженного импульса восстанавливается дисперсия уклонов крупномасштабного волнения.

Обработка и анализ данных будут продолжены и получены количественные оценки точности алгоритмов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (номер проекта 20-77-10089). Хотим поблагодарить АО «Нижегородские канатные дороги» за помощь в организации и проведении эксперимента. Выражаем благодарность сотрудникам Нижегородского филиала компании ООО «ЕФТ-ГРУПП» за участие в эксперименте и выполнение измерений сопутствующей информации.

Литература

- [1] Satellites, oceanography and society, edited D. Halpern, Elsevier, Amsterdam, 2000, p 368.
- [2] Coastal Altimetry, edited S. Vignudelli et all, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011, p. 565.
- [3] Fu L-L., Cazenave A. Satellite Altimetry, A Handbook of Techniques and Applications and Earth Sciences, Academic Press, San Diego, 2001, p. 464
- [4] Oceanography from space. Revisited., edited by V.Barale, J.F.R.Gower, L.Alberotanza, London, 2010, p. 374
- [5] Witter D.L. and Chelton D.B. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development // Journal of Geophysical Research, 1991, Vol. 96, pp. 8853-8860.
- [6] Karaev V., Kanevsky M., Balandina G., Cotton D., Challenor P., Gommenginder C., Srocosz M. On the problem of the near ocean surface wind speed retrieval by radar altimeter: two-parametric algorithm // International Journal of Remote Sensing, 2002, Vol.23, N 16, pp.3263-3283.

- [7] Gourrion J., Vandemark D., Bailey S., Chapron B., Gommenginger C., Challenor, P., Srokosz, M. A two-parameter wind speed algorithm for Ku-band altimeters // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, Vol. 19, N 12, pp. 2030-2048.
- [8] Chen G., Chapron B., Ezraty R., Vandemark D. A dual-frequency approach for retrieving sea surface wind speed from TOPEX altimetry // *Journal of Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, N C 12, pp. 1-19
- [9] Abdalla S. Ku-Band Radar Altimeter Surface Wind Speed Algorithm // *Marine Geodesy*, 2012, Vol. 35, pp. 276–298.
- [10] Raney R.K. The Delay/Doppler radar altimeter // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, Vol. 36, N 5, pp. 1578-1588.
- [11] Raney R.K. Cryosat SAR-Mode looks revisited // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, Vol. 9, N 3, pp. 393-397.
- [12] Баскаков А.И. Корреляционная функция и усредненная мощность радиолокационного сигнала, отраженного от взволнованной морской поверхности // *Радиотехника*, 1979, т. 34, N 1, с. 32-37.
- [13] Баскаков А.И. Прецизионный океанографический радиовысотометр космического базирования, М.: издат. МЭИ (ТУ), 1994, 75 с.
- [14] Зубкович С.Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности, 1968, М.: Советское радио, 224 с.
- [15] Brown G.S. The average impulse response of a rough surface and Its application // *IEEE Transactions on Antenna and Propagation*, 1977, v 25, n 1, pp. 67–74.
- [16] Amarouche L., Thibaut P., Zanife O.Z., Dumont J.-P., Vincent P., Steunou B.N. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects // *Marine Geodesy*, 2004, Vol. 27, n. 1-2, pp. 171–197.
- [17] Karaev V., Meshkov E., Titchenko Yu. Underwater acoustic altimeter // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014, Vol. 57, N 7, pp. 488-497.
- [18] Понур К., Титченко Ю., Караев В., Мешков Е., Панфилова М., Лебедев И., Крылов А., Хахин Е. Эксперимент на Нижегородской канатной дороге с радиолокатором X-диапазона // *Всероссийская открытая научная конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации распространения и дифракции волн”*, Материалы Всероссийской открытой научной конференции, Муром: МИ ВлГУ, 2022 , стр. 401-408.
- [19] Ponur K., Titchenko Yu., Karaev V., Meshkov E., Panfilova M., Lebedev I., Krylov A., Khakin E. Experiment with the X-band radar at the Nizhny Novgorod cable car: First Results // *Russian Journal of Earth Sciences*, Vol. 23, ES1001, <https://doi.org/10.2205/2022ES000822>, Geophysical Center RAS 2023, pp.. 1-7.
- [20] <https://www.micran.ru/>
- [21] <https://eftgroup.ru/>
- [22] Hayne G.S., Hancock D.W., Purdy C.L., Callahan P.S. The corrections for significant wave height and attitude effects in the TOPEX radar altimeter // *Journal of Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, N. C12, pp. 24941- 24955.
- [23] Thibaut P., Poisson J.-C., Bronner E., Picot N. Relative Performance of the MLE3 and MLE4 Retracking Algorithms on Jason-2 Altimeter Waveforms // *Marine Geodesy*, 2010, Vol. 33, pp. 317-335.
- [24] MacArthur J.L. Seasat, a radar altimeter design description // Rep. SDO-5232. Appl. Phys. Lab. Johns Hopkins Univ., Baltimore, 1978
- [25] Караев В.Ю., Мешков Е.М., Оценка влияния сферичности Земли на форму отраженного радиолокационного импульса для ножевой диаграммы направленности антенны при надирном зондировании морской поверхности // *Сборник научных статей*

"Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", 2012, т. 9, № 1, с. 240-246.