

Эксперимент на Нижегородской канатной дороге с радиолокатором X-диапазона

К.Понур¹, Ю.Титченко¹, В.Караев¹, Е.Мешков¹, М.Панфилова¹, И.Лебедев¹, А.Крылов², Е.Хахин³

¹ Институт прикладной физики РАН
603950, г. Н.Новгород, ул. Ульянова, 46
E-mail: ponur@ipfran.ru

² АО «Нижегородские канатные дороги»
603024, г.Н.Новгород, ул. Казанская набережная, 8
E-mail: official@nnkd.ru

³ООО «ЕФТ ГРУПП», г. Москва, ул. Новодмитровская, д.2, к. 2
E-mail: info@eftgroup.ru

Представлены первые примеры обработки данных эксперимента на Нижегородской канатной дороге. Импульсный радиолокатор X-диапазона был установлен на технологической тележке и выполнял измерения во время движения в двух режимах, которые последовательно чередовались. В радиовысотном режиме измерялась форма отраженного импульса и определялось расстояние до рассеивающей поверхности. В доплеровском режиме измерялся доплеровский спектр отраженного излучения, который содержит информацию о статистических параметрах поверхности. Последующая обработка данных позволит оценить точность разработанных алгоритмов.

Ключевые слова: импульсный радиолокатор X-диапазона, доплеровский спектр, форма отраженного импульса, эксперимент на канатной дороге

Experiment on the Nizhny Novgorod cable car with X-band radar

K.Ponur¹, Yu.Titchenko¹, V.Karaev¹, E.Meshkov¹, M.Panfillova¹, I.Lebedev¹, A.Krylov², E.Khakhin³

¹ Institute of Applied Physics RAS

² Joint-Stock Company «Nizhegorodskie Ropeways»

³ EFT GNSS

The first examples of data processing of the experiment on the Nizhny Novgorod cable car are presented. A pulsed X-band radar was installed on a technological trolley and performed measurements while moving in two modes that worked sequentially. In the radio altimeter mode, the shape of the reflected pulse was measured and the distance to the scattering surface was determined. In the Doppler mode, the Doppler spectrum of the reflected signal was measured, which contains information about the statistical parameters of the surface. Subsequent data processing will allow us to evaluate the accuracy of the developed algorithms.

Keywords: X-band pulsed radar, Doppler spectrum, reflected pulse shape, cable car experiment

Введение

Одним из наиболее эффективных методов ДЗЗ морской поверхности является радиолокационное зондирование. Размещение радиолокаторов на спутниках позволяет получать оперативную и глобальную информацию, в частности, о параметрах волнения и поле приводного ветра вне зависимости от времени суток и облачности. Наиболее известными орбитальными радиолокаторами являются скаттерометры, измеряющие поле приводного ветра [1, 2], радиовысотометры, измеряющие высоту значительного

волнения и средний уровень водной поверхности [3], радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), преимуществом которых является высокое пространственное разрешение [4].

Растущие требования к расширению числа измеряемых параметров стимулируют развитие новой радиолокационной аппаратуры и на перспективном российском океанографическом спутнике «Океан» планируется установить радиолокатор Ku-диапазона, который будет выполнять измерения в канале вблизи надирного зондирования. Это будет первый орбитальный радиолокатор, выполняющий измерения в двух режимах: 1) при надирном зондировании измерения выполняются в режиме радиовысотомера и восстанавливается высота значительного волнения вдоль траектории полета 2) в режиме сканирования (± 13 градусов) формируется радиолокационное изображение поверхности и восстанавливается поле уклонов крупномасштабного, по сравнению с длиной волны радиолокатора, морского волнения [5, 6]. Частота переключения между режимами и их длительность подобраны так, чтобы формировать «сплошное» радиолокационное изображение морской поверхности (без пропусков).

Схема измерения приведена на рис. 1.

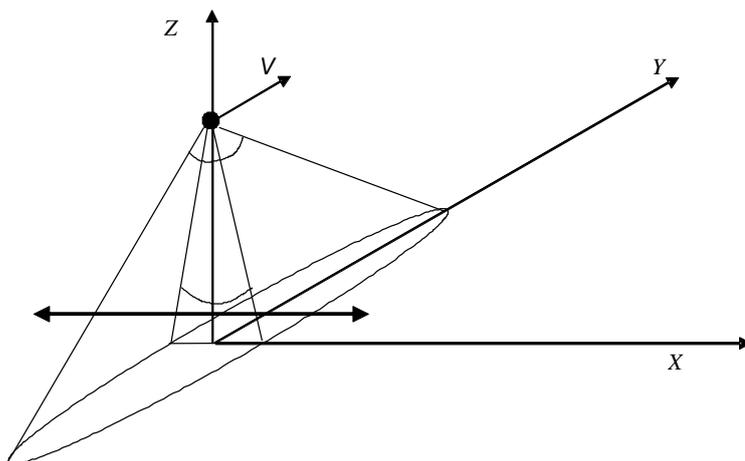


Рис. 1. Схема измерения радиолокатора с ножевой диаграммой направленности антенны.

При высоте орбиты 500 км за счет использования ножевой диаграммы направленности антенны ($1,5^\circ \times 30^\circ$) впервые каждый элемент разрешения (14 км x 14 км) в полосе обзора шириной 230 км будет наблюдаться более 30 с.

Радиолокатор с ножевой диаграммой направленности антенны

В отличие от средних углов падения измерения при малых углах падения сложно реализовать в ходе натурального эксперимента. Один из вариантов решения проблемы является установка радиолокатора на мосту и такой измерительный комплекс был реализован для измерения скорости течения на метромосту через р.Ока (г.Нижний Новгород). В эксперименте измерялся доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала и исследовалась зависимость параметров доплеровского

спектра от угла падения и азимутального угла [7, 8]. Однако измерения выполнялись с «неподвижного» носителя и только в доплеровском режиме.

Для проведения экспериментов АО НПФ Микран по заказу ИПФ РАН разработало и изготовило радиолокатор X-диапазона. Измерения в радиовысотомерном и доплеровском режимах выполняются в цикле длительностью 10,285 с (0,285 с и 10 с). На рис. 2 приведена фотография радиолокатора. Электроника размещена в металлическом ящике жестко соединенным с антенной (ножевая диаграмма направленности), которая на рисунке находится сверху.



Рис. 2. Радиолокатор X-диапазона с ножевой диаграммой направленности антенны (30°x3,6°).

Режим сканирования не был реализован из-за сложности конструкции, поэтому доплеровский режим также будет тестироваться при надирном зондировании. 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

Радиолокатор работает в двух режимах и для их тестирования необходимо выполнить ряд требований к схеме измерения.

Доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала содержит информацию о распределении радиальной компоненты скорости движения поверхности. Для ледяного покрова или суши собственное движение поверхности отсутствует, поэтому для тестирования доплеровского режима необходимо выполнять измерения с движущегося носителя.

В режиме высотомера измеряется высота значительного волнения. Ветровое волнение на реке имеет небольшую высоту. Разрешение по дальности составляет около 50 см, поэтому протестировать алгоритмы измерения высоты волнения будет крайне сложно.

Оптимальным вариантом для проведения измерений и тестирования обоих режимов стала установка радиолокатора в технологической тележке Нижегородской канатной дороги. Первый эксперимент был выполнен 2 декабря 2022 года. Сюжет был показан в новостной передаче «Вести-Поволжья» [9].

Эксперимент на Нижегородской канатной дороге

Установка радиолокатора на технологической тележке Нижегородской канатной дороги обеспечивает движение радиолокатора над водной поверхностью и льдом, что позволяет протестировать доплеровский режим.

Тележка движется по канату, который провисает между опорами. В результате «имитируется» движение над «неровной» поверхностью. Это можно интерпретировать как движение над «крупномасштабным» волнением. Высоту «волн» можно выбирать, задавая время усреднения отраженных импульсов и зная (измерив) изменение координат технологической тележки. Таким образом, можно протестировать работу и радиовысотомерного режима.

На рис. 3 показано изменение высоты технологической тележки, измеренное геодезическим приемником навигационных сигналов, во время эксперимента. Начало измерений начиналось на Борской станции канатной дороги (низкий берег) и происходил подъем на высокий берег (станция Нижний Новгород). Перепад высот составляет около 80 м.

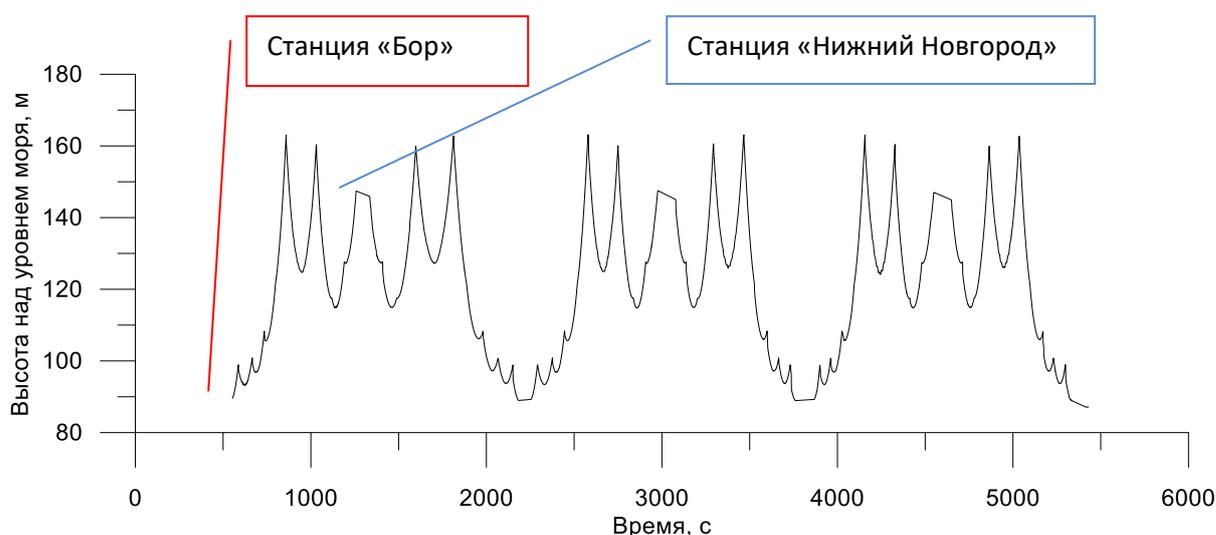


Рис. 3. Изменение высоты технологической тележки (радиолокатора) во время эксперимента.

Во время эксперимента было сделано три полных круга во время которых менялась ориентация антенны относительно направления движения радиолокатора и режимы работы. Длительность круга составляет около 30 минут. Радиолокатор, установленный на технологической тележке, показан на рис. 4.

«Бытовые» GNSS приемники измеряют высоту и скорость движения с большой ошибкой, поэтому для обеспечения необходимой точности использовался геодезический приемник EFT M1 Plus производства компании EFT GROUP (г. Москва). Он обеспечивает точность измерения порядка 2 см. Сотрудники компании

принимали участие в эксперименте и подготовили данные для последующей обработки.



Рис. 4. Технологическая тележка с установленным радиолокатором перед экспериментом.

Обработка данных

В настоящее время выполняется обработка данных и ниже приведены первые результаты.

В радиовысотомерном режиме излучается короткий импульс. За счет девиации по частоте примерно в 300 МГц достигается разрешение по дальности около 50 см. Измеряя время распространения электромагнитной волны от радиолокатора до отражающей поверхности и обратно можно найти высоту радиолокатора над отражающей поверхностью.

Пример отраженных импульсов приведен на рис. 5. Время задержки было пересчитано в дальность и отраженный импульс построен на оси дальности (горизонтальная ось).

На рис. 5а разным цветом показаны одиночные импульсы из пачки в 100 импульсов (длительность пачки 0,285 с). Форма отраженного импульса сильно меняется от импульса к импульсу. На рис. 5б показан средний импульс для излученной пачки. Он имеет стабильную форму и по нему можно восстанавливать расстояние до отражающей поверхности.

В доплеровском режиме измеряются спектральные характеристики отраженного сигнала и движение радиолокатора приводит к появлению доплеровского спектра даже для неподвижной поверхности. Ширина доплеровского спектра зависит от скорости движения радиолокатора, диаграммы направленности антенны и параметров отражающей поверхности.

Пример доплеровского спектра, вычисленного по записи длительностью 0,7 с приведен на рис. 6. Красная кривая соответствует гауссу со средним и дисперсией, вычисленными по измеренному доплеровскому спектру. Видим, измеренный доплеровский спектр неплохо совпадает с модельным и можно будет использовать разработанные алгоритмы обработки для восстановления статистических характеристик рассеивающей поверхности.

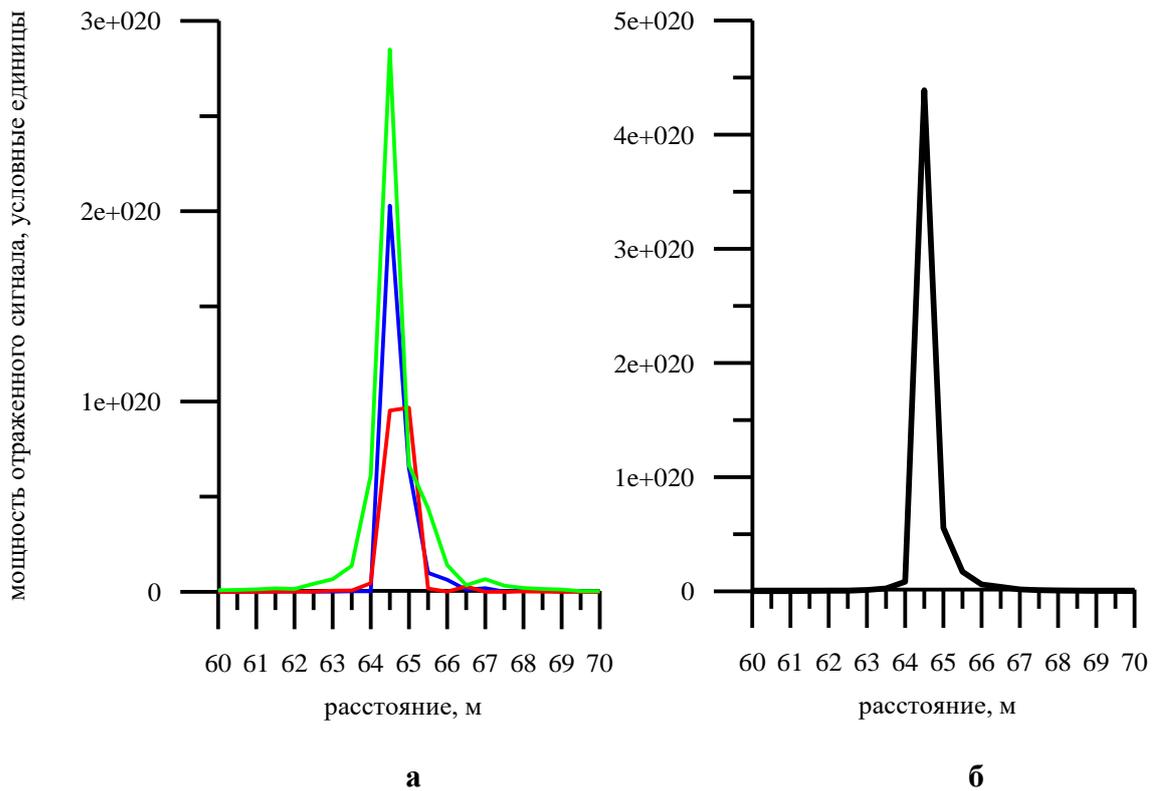


Рис. 5. Пример отраженного импульса: а) одиночные отраженные импульсы б) усредненный импульс. Высота технологической тележки около 64,5 м.

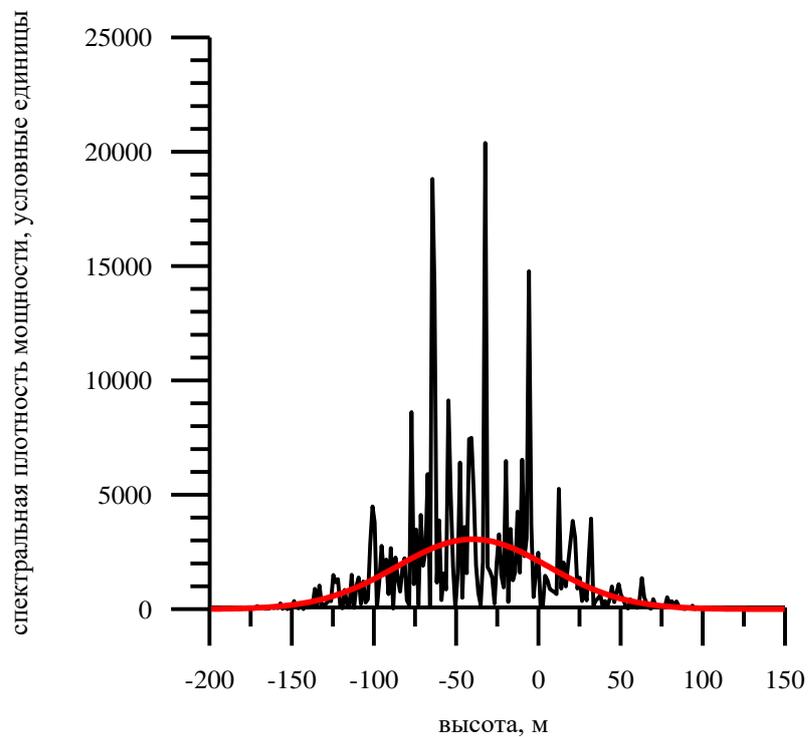


Рис. 6. Доплеровский спектр отраженного сигнала: черная кривая – измеренный доплеровский спектр, красная кривая – гаусс.

Радиолокатор смотрит вертикально вниз и наблюдаемое смещение доплеровского спектра связано с движением технологической тележки между опорами. Провисание каната приводит к появлению вертикальной компоненты скорости. В этом случае

движение происходит вверх (технологическая тележка приближается к опоре) или вниз (удаляется). Ширина доплеровского спектра зависит от вектора скорости и ширины диаграммы направленности антенны.

Синхронно выполнялась запись координат технологической тележки геодезическим приемником EFT M1 Plus. В дальнейшем будет проведено сравнение восстановленной высоты по данным радиолокатора с измерениями геодезического приемника. Кроме того, можно будет классифицировать тип подстилающей поверхности (суша, лед, вода) и сравнить доплеровские спектры.

Выводы

В работе обсуждается постановка и проведение первого эксперимента на Нижегородской канатной дороге с импульсным радиолокатором X-диапазона. Радиолокатор работал в двух режимах: 1) радиовысотомерном режиме и 2) в доплеровском режиме.

В первом режиме измеряется форма отраженного импульса, определяется время распространения электромагнитной волны от радиолокатора до рассеивающей поверхности (двойной ход) и вычисляется расстояние. Разрешение по дальности составляет около 0,5 м.

Во втором режиме измеряется доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала и при наличии независимой информации о скорости движения (геодезический приемник) можно будет восстановить дисперсию уклонов рассеивающей поверхности.

Обработка данных будет продолжена и получены оценки точности алгоритмов обработки. Будет проведено сравнение доплеровских спектров, измеренных над водной поверхностью, ледяным покровом и сушей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №20–05–0046а и госзадания ИПФ РАН N 0030-2021-0006. 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. Anderson H.S., Long D.G. Sea ice mapping method for Seawinds, IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing. 2005. V. 43. No. 3. P. 647 – 657.
2. Муртазин А.Ф., Евграфова К.Г., Кудрявцев В.Н. Применение данных скаттерометра ASCAT для исследования ледового покрова в Арктике // Ученые записки российского государственного гидрологического университета. 2015. Т. 40. С. 160-173.
3. International Altimetry Team, Altimetry for the future: Building on 25 years of progress, Advances in Space Researches, 2021, Vol. 68, No. 2, pp. 319-363
4. Fang, H., Xie, T., Perrie, P., Zhao, L., Yang, J., He, Y., OceanWind and Current Retrievals Based on Satellite SAR Measurements in Conjunction with Buoy and HF Radar Data, Remote Sensing, 2017, V. 9, N 1321, Doi:10.3390/rs9121321
5. Karaev, V., Kanevsky, M., Meshkov, E., Kovalenko, A., The concept of the advanced space microwave radar for remote sensing of the ocean at small incidence angles, PORSEC 2010, 18-23 October 2010, National Taiwan Ocean University, Keelung, Taiwan, Proceedings, p.23
6. Karaev, V., Panfilova, M., Titchenko, Yu., Meshkov, E., Ryabkova, M., Experiment at the International Space Station: a microwave radar with scanning fan beam antenna at nadir

probing // 25 years of Progress in Radar Altimetry symposium, 24-29 September 2018, Ponta Delgata, Portugal. Abstracts. P. 232-233

7. Рябкова М.С., Караев В.Ю., Панфилова М.А., Титченко Ю.А., Мешков Е.М., Зуйкова Э.М., Доплеровский спектр радиолокационного СВЧ-сигнала обратного рассеяния: эксперимент на реке // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 213-217.

8. Karaev, V., Ryabkova, V., Panfilova, M., Titchenko, Yu., Meshkov, Eu., Zuikova, E., Microwave Doppler radar experiment on a river, Proceedings of IGARSS 2021, pp. 7350-7353

9. <https://vestinn.ru/news/society/195732/>