

## Исследование влияния ледяного покрова на характер отражённого СВЧ - излучения доплеровского радиолокатора $K_a$ диапазона

Втюрина Анастасия Сергеевна

10 класс, Лицей 82 Нижнего Новгорода, Научное объединение «Школа юного исследователя»

АНО ДО «Академ клуб», ИПФ РАН

Научный руководитель Д.А. Ковалдов, старший лаборант-исследователь ИПФ РАН

*В работе представлены результаты серии экспериментов, проведённых зимой 2021 – 2022 года. На метромосту через реку Ока в Нижнем Новгороде был установлен радиолокатор  $K_a$  – диапазона. Радиолокатор работал в доплеровском режиме с вырезанием постоянной составляющей, что приводило к отсутствию принимаемого сигнала при отражении от ледяного покрова. Однако использование специального поворотного механизма позволило реализовать режим «движения» радиолокатора и рассмотреть зависимости характеристик отраженного ледяным покровом сигнала.*

*Ключевые слова: ледяной покров, доплеровский радиолокатор  $K_a$ -диапазона, доплеровский спектр, смещение доплеровского спектра.*

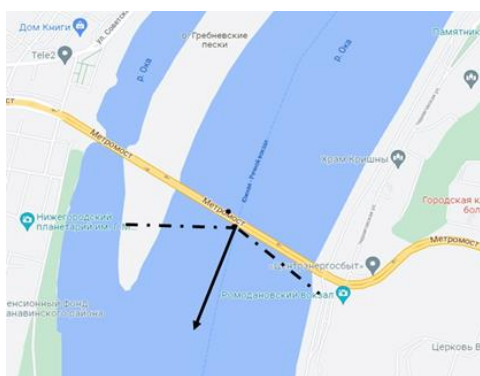
Радиолокационные методы дистанционного зондирования земной поверхности являются одними из наиболее эффективных с точки зрения возможности постоянного мониторинга больших площадей акваторий.

Спутники являются основным источником информации о характере ледяного покрова мирового океана и внутренних водоемов Земли. Для наблюдения за ледяным покровом в Арктике успешно применялись радиолокаторы бокового обзора, вместе с тем данные альтиметров применяются для определения толщины льда. Данные скаттерометров используются для картирования ледяного покрова и определения его типа. Определение сплоченности ледяного покрова выполняется по данным микроволновых радиометров и радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны.

В рамках данной работы исследуются характеристики отраженного ледяным покровом СВЧ-излучения в зависимости от различных температурных условий. Целью работы является исследование возможностей радиолокатора определять характеристики ледяного покрова на реке.

### Схема эксперимента

Проведение измерений при малых углах падения сложно реализовать в натурных условиях. Решением стала установка системы радиолокаторов на метромосту через р.Ока в черте г.Н.Новгород. В серии экспериментов, проводимых осенью 2021 года, измерялся доплеровский спектр отражённого сигнала и исследовались зависимости его параметров от угла падения и азимутального угла. Ниже будет рассмотрена зависимость смещения полученных доплеровских спектров от угла падения. Зимой 2021–2022 были проведены эксперименты с локатором, смотрящим вверх по течению реки. На рис.1(а) представлена схема расположения радиолокатора, на рис. 1(б) фотография самого радиолокатора, сделанная осенью 2021 года на метромосту.



(а)



(б)

**Рис. 1.** Схема эксперимента (а). Чёрными пунктирными линиями показаны ограничения на азимутальный угол поворота радиолокатора. Чёрной стрелкой - направление зондирования, осуществляемого локатором с моста. Натурная фотография радиолокатора  $K_a$  – диапазона (б), сделана осенью 2021 года

Доплеровский радиолокатор (рис. 1(б)) имеет симметричную диаграмму направленности антенны -  $6^\circ \times 6^\circ$ . И работает в  $K_a$ – диапазоне, т.е. на длине волны 9.7 мм или на частоте 30.9 ГГц. На радиолокатор дополнительно установлены камеры, для визуальной регистрации и оценки поверхности ледяного покрова зимой и характеристик поверхностного волнения, когда река не скована льдом. На рис.2 показаны примеры фотографий, полученных с камеры.



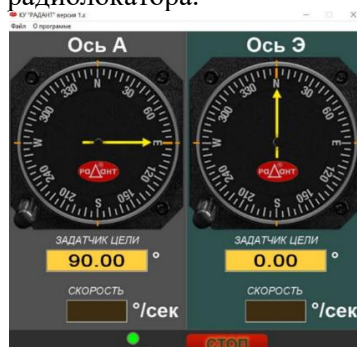
(а)



(б)

**Рис. 2.** Примеры поверхности реки во время экспериментов, проведённых 12.11.2021 (а) и 2.3.2022 (б)

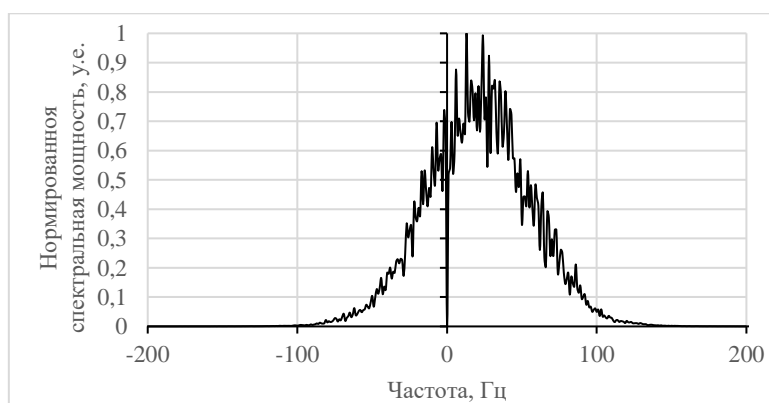
На радиолокатор был установлен механизм для поворота локатора. Данный механизм позволял менять азимутальный угол и угол падения. Для удаленного управления работой поворотного механизма и радиолокатора используется мобильный интернет. На рис. 3 показан интерфейс программы управления на мониторе оператора. В ходе измерений оператор задает азимутальный угол, угол падения и время работы радиолокатора.



**Рис. 3.** Интерфейс программы управления системой поворота локатора

#### *Смещение доплеровского спектра и определение параметров для надирного зондирования*

Как можно было увидеть выше, в программе задаётся некий угол элевации. В силу особенностей экспериментальной установки углы элевации, задаваемые программой, нельзя считать равными реальным углам падения, таким образом для построения зависимости характеристик доплеровского спектра требовалось определить нулевой угол падения. Для этого были проведены измерения смещения ДС с шагом в один градус по элевации (углу падения). При строго вертикальном зондировании смещение ДС должно быть равно нулю. На рис.4 показан пример полученного отражённого доплеровского спектра из осенней серии экспериментов по определению 0° угла падения.

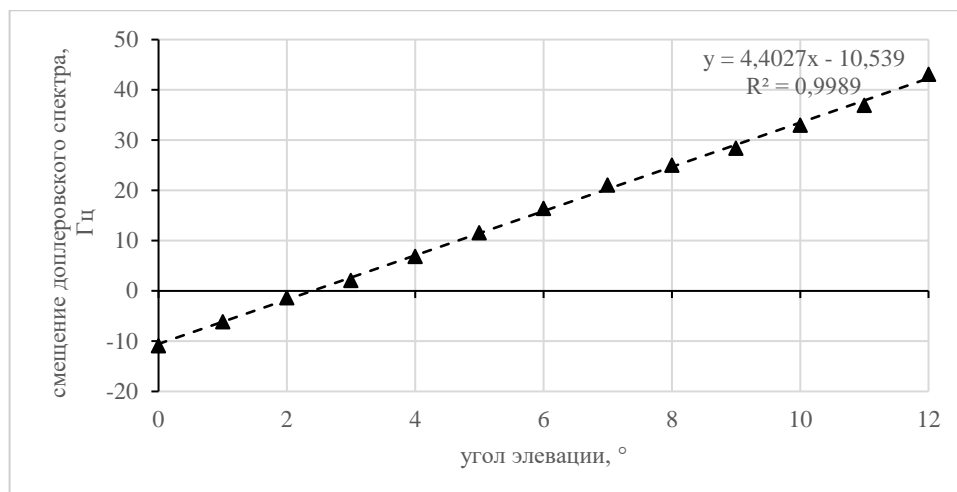


**Рис. 4.** Пример отражённого доплеровского спектра, полученного при измерении отражённого от поверхности сигнала во время осенних экспериментов 12.11.2021 с углом элевации 7°

Для полученных в экспериментах доплеровских спектров отражённого сигнала мы рассчитывали смещение ( $f_{shift}$ ):

$$f_{shift} = \frac{\int f S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} \quad (1)$$

где  $S_{DS}(f)$  – доплеровский спектр. Далее построили зависимость смещения от угла элевации задаваемого в программе поворотного механизма (рис.5).

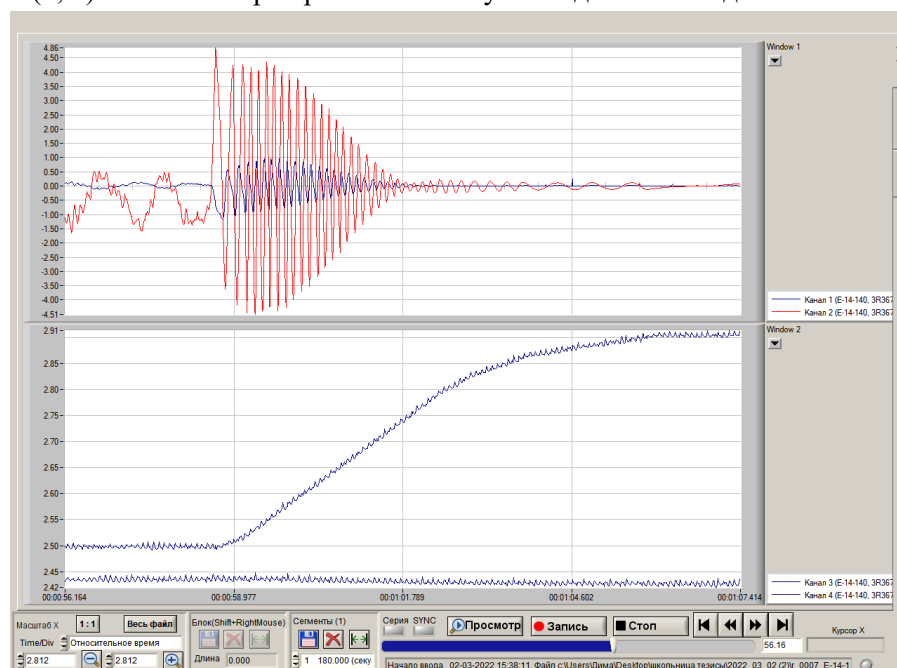


**Рис. 5.** Зависимость смещения доплеровского спектра от угла элевации, пунктирной линией построена линейная аппроксимация зависимости

Выполнив линейную аппроксимацию полученной зависимости, определили  $0^\circ$  угла падения и нашли необходимую коррекцию -  $2.4^\circ$ . При дальнейшем анализе данных использовались скорректированные значения углов падения.

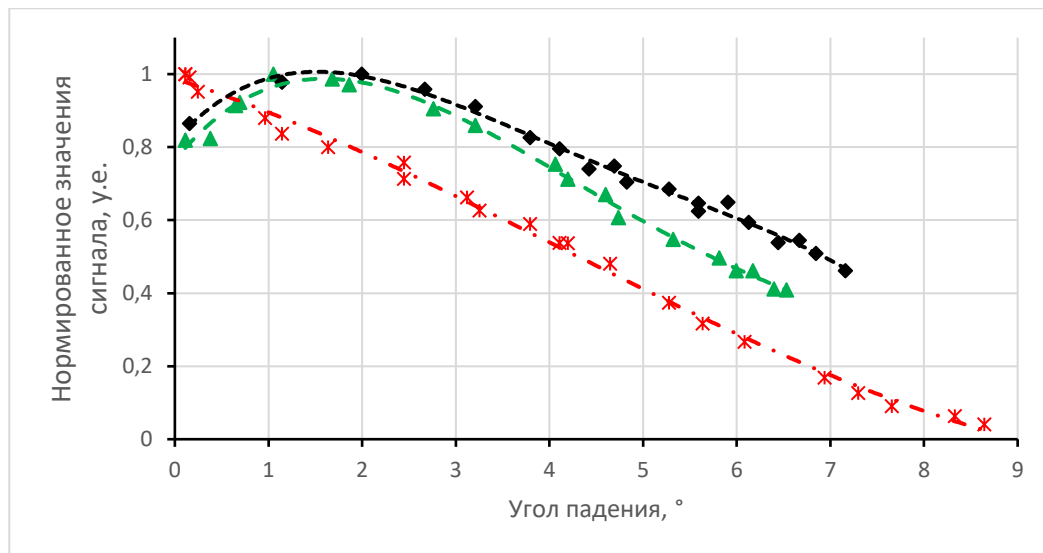
#### *Исследование характеристик сигналов, отраженных от поверхности льда*

Как говорилось ранее, для корректной работы доплеровского радиолокатора требуется радиальное движение радиолокатора относительно отражающей поверхности, которое бы создавало доплеровское изменение частоты. Для произведения необходимых измерений был разработан следующий метод: в некоторый момент времени запускается поворотное устройство, меняющее угол падения, отраженный сигнал записывается одновременно с изменением угла падения. Далее на рис.6 приведены записи двух квадратур (Канал 1 и 2) отражённого сигнала и выходных каналов (3, 4) инклинометра при изменении угла падения от  $0^\circ$  до  $16^\circ$ .



**Рис. 6.** Запись радиолокатора от 02.03.2022,  $T = 4^\circ\text{C}$ . Вертикальная ось в вольтах, горизонтальная ось показывает время с начала записи. В верхнем окне идёт запись отражённого сигнала, в нижнем окне запись показаний инклинометра. На записи сигнала красная –  $\sin$ , синяя –  $\cos$  квадратуры

Для анализа полученных данных приведём для ряда характерных случаев огибающие и сравним уменьшение сигнала с увеличением угла падения на рис. 7.



**Рис. 7.** Огибающие для отраженного сигнала локатора в экспериментах от 21.2.22 (зелёным и чёрным,  $T_{\text{воздуха}} = 1^{\circ}\text{C}$ , лёд только начал таять) и 2.3.22 (красным,  $T_{\text{воздуха}} = 4^{\circ}\text{C}$ ), пунктирными линиями построены аппроксимирующие полиномы

#### Выводы

В работе обсуждается постановка и проведение экспериментов на Нижегородском метромосту с доплеровским радиолокатором Ка-диапазона.

В первой серии экспериментов с помощью расчётов зависимости смещения доплеровского спектра скорректировали значение реального угла падения и угла элевации задаваемого в поворотном механизме.

Далее рассмотрели характеристики отражённых от поверхности льда сигналов доплеровского радиолокатора и их огибающих. Из характера полученных зависимостей видно, что параметры льда влияют на значения отражённого сигнала.

#### Литература

1. Кутуза Б.Г., Данилычев М.И., Яковлев О.И. Спутниковый мониторинг Земли. Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. // М.: ЛЕНАНД, 2016. 336 с.
2. Fors A., Brekke C., Gerland S., Doulgeris A., Beckers J. Late summer arctic sea ice surface roughness signatures in C-band SAR data // J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. V. 9. No. 3. P. 1199–1215.
3. Конюхов С.Н., Драновский В.И., Цымбал В.Н. Радиолокационные методы и средства оперативного дистанционного зондирования Земли с аэрокосмических носителей. // Киев: «Авиадиагностика», 2007. 440 с.
4. Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Popov S.K. Satellite Altimetry of Sea Level and Ice Cover in the Barents Sea// Ecologica Montenegrina. 2019. V. 25. P. 26–35.
5. 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.