

### **Исследование влияния течения на спектральные и энергетические характеристики отраженного радиолокационного сигнала при малых углах падения**

В.Ю. Караев, М.С. Рябкова., М.А.Панфилова, Ю.А. Титченко, Е.М. Мешков, Э.М. Зуйкова

*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», 603950, г.Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46, e-mail: volody@ipfran.ru*

*Измерение глобального поля морских течений является актуальной задачей, поэтому параллельно разрабатываются несколько проектов орбитальных радиолокаторов, предназначенных для ее решения. Для картографирования морских течений предлагается использовать доплеровские радиолокаторы, которые будут проводить измерения при малых или средних углах падения. Однако практически отсутствуют измерения доплеровского спектра при малых углах падения, поэтому серия экспериментов, проведенная осенью 2019 года, в диапазоне углов падения  $0^{\circ}$ - $25^{\circ}$ , является уникальной. В работе представлены результаты измерения доплеровского спектра обратного рассеяния микроволнового сигнала для стационарного речного течения. Доплеровский радиолокатор СВЧ-диапазона был установлен на мосту через реку Ока (г. Нижний Новгород) на высоте около 30 м. Первые результаты обработки данных показывают, что течение реки сильно влияет на форму доплеровского спектра и приводит к дополнительному смещению доплеровского спектра по сравнению с доплеровским спектром при отсутствии течения. Обработка и анализ данных будут продолжены.*

*Measuring the global field of sea currents is an important task, therefore several projects of orbital radars designed to solve the problem are developing in parallel. To measure sea currents, it is proposed to use Doppler radars that will operate at small or middle incidence angles. However, there are practically no measurements of the Doppler spectrum at small incidence angles, therefore the series of measurements of the Doppler spectrum carried out in the fall of 2019 in the range of incidence angles of  $0^{\circ}$ - $25^{\circ}$  is unique. In the paper presented the results of the measurement the Doppler spectrum of the backscattered microwave signal, in case of a stationary river current. The Doppler radar was mounted on a bridge over the Oka River (Nizhny Novgorod) at an altitude of about 30 m. The first results of processing the radar data show that the river current strongly affects the shape of the DS and leads to an additional shift of the DS compared to the DS in the absence of current. Investigation will be continued.*

#### **Введение**

Средства и методы дистанционного зондирования морской поверхности активно развиваются последние тридцать лет. Скаттерометры обеспечивают оперативное получение глобальной информации о поле приводного ветра над поверхностью Мирового океана. Дождевой радиолокатор обеспечивает измерение интенсивности осадков. Благодаря скаттерометрам и радиовысотометрам океанологи имеют возможность развивать региональные и глобальные модели волнового климата. Собранные данные ассимилируются в метеорологические и климатические модели.

Значительное влияние на климат оказывают морские течения, которые переносят огромное количество энергии (холодной/теплой воды) из одного региона в другой. Однако в настоящее время дистанционно умеют измерять только крупные геострофические течения при помощи радиовысотометра с низким пространственным и временным разрешением, поэтому задача получения оперативной и глобальной информации о течениях является крайне актуальной.

Океанские поверхностные течения представляют собой горизонтальное движение поверхностных океанских вод на границе океана в контакте с атмосферой. Скорость течений в основном колеблется в интервале от 0,02 до 1,0 м/с (с экстремальными локальными значениями, превышающими 5 м/с). Измерение поверхностных течений океана на различных пространственно-временных масштабах имеет важное значение для решения большого числа научных и прикладных задач. В частности, информация о поверхностных течениях необходима для оценки скорости дрейфа при проведении спасательных операций на море или для отслеживания разливов нефтепродуктов. Течения являются одной из фундаментальных переменных при описании динамики океана.

Процессы, которые формируют и/или управляют поверхностными течениями океана, являются сложными и включают в себя поле приводного ветра, поверхностные волны, приливные силы, крупномасштабные геострофические потоки, батиметрию, конфигурацию береговой линии и взаимодействие между этими процессами, что усложняет задачу моделирования.

### **Методы измерения течений**

Для измерения поля течений можно использовать различные приборы, в том числе и контактные. Спутниковые дрейфующие буи обеспечивают измерения морских течений с очень грубым разрешением, т.к. количество буев мало.

Задача построения глобальной карты течений может быть решена только дистанционными методами. Преимущество активных радиолокационных систем СВЧ-диапазона связано с возможностью получения информации вне зависимости от времени суток, облачности и других факторов.

В зависимости от угла падения зондирующего излучения на морскую поверхность выделяют область малых углов падения ( $<10^\circ$ - $12^\circ$ ), где механизм обратного рассеяния в СВЧ-диапазоне является квазизеркальным, и область средних углов падения ( $30^\circ$ - $65^\circ$ ), где рассеяние носит резонансный характер. При описании рассеяния электромагнитных волн морской поверхностью часто используют понятие двухмасштабной модели, в соответствии с которой рассеивающая поверхность представляется в виде крупномасштабного, по сравнению с длиной электромагнитной волны, волнения, покрытого мелкой рябью.

На течении происходит трансформация спектра волнения и это вызывает изменение статистических характеристик волнения. В зависимости от угла падения (действующего механизма обратного рассеяния), течения будут по-разному проявляться в отраженном радиолокационном сигнале.

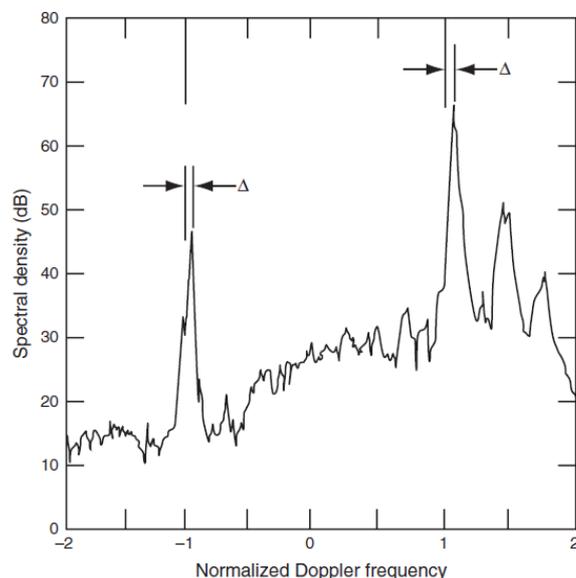
При малых углах падения работает квазизеркальный механизм обратного рассеяния и изменение параметров волнения на течении приведет к изменению ширины и смещения доплеровского спектра отраженного сигнала.

В области средних углов падения доминирующим является резонансный механизм обратного рассеяния и рассеяние происходит на ряби, которая движется в поле течения. Поэтому смещение доплеровского спектра содержит информацию о проекции скорости течения на направление зондирования.

Для измерения скорости течения были разработаны и применяются различные радиолокационные системы. Прежде всего, это сеть береговых радиолокаторов КВ диапазона, которые измеряют доплеровский спектр и по отраженному радиолокационному сигналу определяют скорость и направление течения. На рис. 1 приведен типичный доплеровский спектр, измеренный на течении [1]. При построении выполнена нормировка оси частот на частоту резонансной длины волны и по величине сдвига определяется скорость течения. Полоса обзора наземного/берегового

радиолокатора в КВ диапазоне составляет 300-400 км. Самая протяженная сеть береговых радиолокаторов расположена вдоль побережья США.

Для измерения вектора скорости течения можно использовать двухлучевую интерферометрическую РСА. Измеряя доплеровский сдвиг под двумя азимутальными углами можно восстановить вектор скорости течения [2, 3].



**Рис. 1.** Доплеровский спектр отраженного сигнала на частоте 13,4 МГц [1].

Однако на орбиту такие РСА вывести пока не удалось. Существующие орбитальные РСА способны измерить только проекцию скорости течения на направление зондирования, что значительно снижает ценность информации. Задача имеет однозначное решение только в условиях, когда направление течения известно и надо оценить его скорость, например, для рек, заливов во время прилива.

Актуальность задачи измерения глобального поля течений привела к тому, что появилось несколько проектов космических радиолокаторов, предназначенных для измерения глобального поля течений. Наиболее близким к реализации является проект SKIM (SeasurfaceKinematicsMultiscalemonitoring) французской команды, возглавляемой Fabrice Ardhuin [4]. Эта аббревиатура, переводится как «многомасштабный мониторинг кинематики морской поверхности».

Новый радиолокатор будет способен измерять следующие параметры: 1) поверхностные течения 2) движение ледяного покрова 3) параметры волнения.

В SKIM используется коническое сканирование лучами при углах падения  $6^\circ$  и  $12^\circ$ . Принцип работы показан на рис. 2. Вертикальный канал используется для измерения высоты значительного волнения, как в стандартном радиовысотомере.

Благодаря вращению антенны происходит измерение скорости движения рассеивающей поверхности под разными азимутальными углами, и авторы считают, что после обработки можно будет определить скорость и направление течения. Экспериментальной проверки этого предположения не проводилось. Полоса обзора – около 280 км, разрешение порядка 7 км.

Проект SEASTAR продвигается научным коллективом из Великобритании (National Oceanographic Center, Southampton), возглавляемым Cristine Gommenginger [5]. Основными объектами исследования являются океанские течения, поле ветра, прибрежные зоны, а также полярные моря.

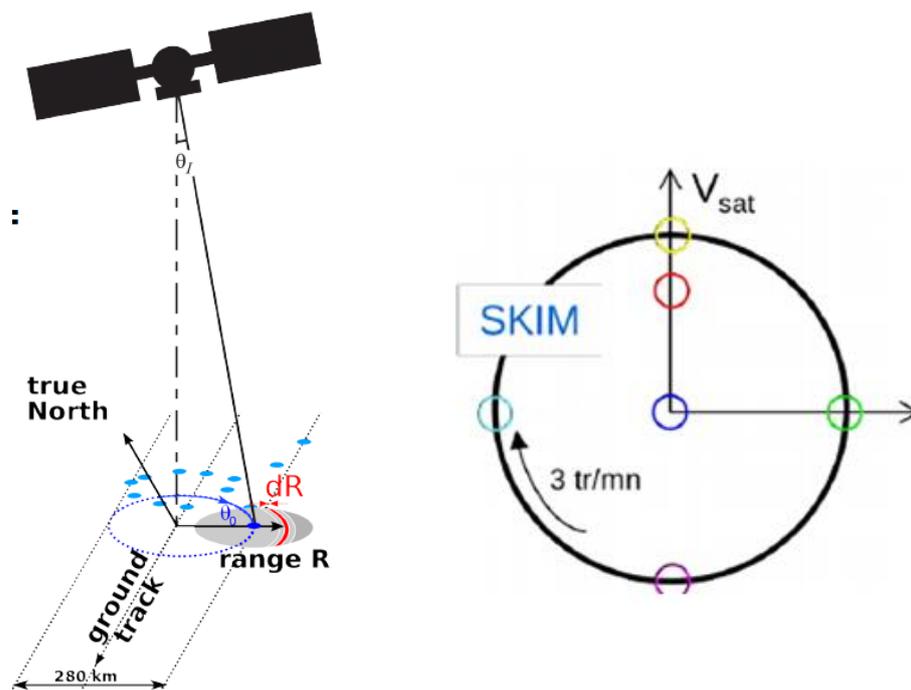


Рис. 2. Схема зондирования SKIM.

Если проект SKIM не имеет аналогов, то проект SEASTAR опирается на имеющийся научный и технический задел. В качестве основного инструмента предлагается использовать многолучевой интерферометрический радиолокатор с синтезированной апертурой. Аналогичные системы хорошо себя зарекомендовали при установке на самолет, но в космосе пока не применялись.

Проект DopplerScat/WaCM развивает научный коллектив из JPL, USA под руководством E.Rodriguez [6]. Принцип работы основан на коническом сканировании и измерении доплеровского спектра на средних углах падения (около  $45^\circ$ ). В настоящее время реализован самолетный вариант скаттерометра, который прошел успешные испытания в 2016 и 2017 годах.

Вопрос совмещения измерения поля приводного ветра и поля течений на одном спутнике (радиолокатор/скаттерометр) рассматривается в Европейском космическом агентстве и в Китае. Китай планирует начать создание нового инструмента в ближайшее время. Разработкой займется группа под руководством проф. X. Dong (Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences). Предполагается разработать двухчастотный доплеровский скаттерометр DopScat.

К настоящему времени накоплен значительный опыт измерения скорости течений при средних углах падения, однако отсутствуют измерения при малых углах падения.

В данной работе обсуждаются результаты измерения обратного рассеяния при малых углах падения в условиях стационарного течения.

### Эксперимент

Выполнение измерений обратного рассеяния при малых углах падения является сложной задачей, т.к. для таких измерений требуется стационарная платформа, чтобы можно было "направить" радиолокатор вниз. Если добавить требование к наличию

около морской океанографической платформы течения, то задача становится практически нереализуемой. Нам неизвестны такие измерения, поэтому наш эксперимент на мосту через реку является первым шагом в оценке возможностей измерения течения по доплеровскому спектру в области малых углов падения.

Доплеровский радиолокатор был установлен на мосту через р.Ока (г.Нижний Новгород) на высоте около 30 м. Система координат была выбрана так, чтобы ось  $X$  была направлена против течения. На рис. 3 показан доплеровский радиолокатор (длина волны 9,7 мм, диаграмма направленности антенны  $6^\circ \times 6^\circ$ ) во время эксперимента.



Рис. 3. Доплеровский радиолокатор (9,7 мм) во время эксперимента на мосту.

В период с сентября по октябрь 2019 года было проведено 5 экспериментов. В этой работе приведем результаты обработки данных эксперимента, который был проведен 3 октября 2019.

Ширина реки в этом месте составляет примерно 0,5 км, течение направлено против оси  $X$  ( $\varphi_{cur}=180^\circ$ ) и направление ветра  $\varphi_w$  во время эксперимента также было направлено против оси  $X$  ( $\sim 185^\circ-190^\circ$ ), что обеспечило положительное смещение доплеровского спектра. Длина прямого ветрового разгона (от моста до поворота реки) была примерно 4 км.

Во время измерений угол падения  $\theta_0$  менялся в интервале от  $0^\circ$  до  $25^\circ$ . Направление зондирования (азимутальный угол  $\varphi_{az}$ ) изменялось в интервале от  $-75^\circ$  до  $75^\circ$  с шагом  $15^\circ$ .

Применение видеокамеры во время эксперимента позволило обнаруживать и исключать при последующей обработке прохождение судов, которые "искажали" поле волнения. Кроме того, анализ видеозаписи позволил измерить скорость течения, которая составила около 0,4 м/с.

#### **Доплеровский спектр отраженного радиолокационного сигнала**

Для описания доплеровского спектра обычно используются два параметра: ширина  $\Delta F_{20}$  и смещение  $f_{shift}$  доплеровского спектра. Для модельной функции положение максимума может рассматриваться как смещение доплеровского спектра. Однако форма измеренного доплеровского спектра  $S_{DS}(f)$  является сильно «изрезанной» и

положение максимума определить невозможно, поэтому обычно используют следующее определение для вычисления смещения доплеровского спектра:

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

Не существует общепринятого определения для ширины доплеровского спектра, поэтому в данной работе используем наиболее распространенное:

$$\Delta F_{20} = 2 \sqrt{\frac{\int f^2 S_{DS}(f) df}{\int S_{DS}(f) df} - f_{shift}^2} . \quad (2)$$

В дополнение введем дополнительное определение ширины доплеровского спектра через центральные моменты 4 и 2 порядков:

$$\Delta F_{42} = 2 \sqrt{\frac{\mu_4}{\mu_2}} = 2 \sqrt{\frac{\mu_4}{\sigma^2}} . \quad (3)$$

где  $\mu_n$  - центральные моменты n-ого порядка и  $\sigma^2$  - дисперсия.

Этой информации достаточно для описания модельного доплеровского спектра, который имеет гауссову форму при малых углах падения [7]. Однако измеренный доплеровский спектр может отличаться от модельного и тогда ширины и смещения недостаточно для характеристики формы доплеровского спектра.

Для того, чтобы сделать описание доплеровского спектра более полным, введем коэффициенты асимметрии  $A$  и эксцесса  $E$ , которые вычисляются стандартным образом.

$$A = \frac{\mu_3}{\sigma^3} \text{ and } E = \frac{\mu_4}{\sigma^4} - 3 . \quad (4)$$

Нам не встречались исследования, где при описании доплеровского спектра использовались эти коэффициенты.

### Обработка данных

Во время эксперимента скорость ветра не была стабильной, поэтому чтобы отслеживать изменение параметров волнения в ходе эксперимента использовалась следующая схема измерений: 1) доплеровский спектр измерялся при азимутальном угле равном  $0^\circ$  2) последующие измерения выполнялись с шагом по азимутальному углу  $15^\circ$  (до  $75^\circ$ ) 3) после этого снова проводились измерения при азимутальном угле  $0^\circ$  4) следующие измерения проводились с шагом по азимутальному углу  $-15^\circ$  (до  $-75^\circ$ ) 5) заключительное измерение для данного угла падения выполнялось снова при  $0^\circ$ . В результате для каждого угла падения выполнялось три измерения при  $0^\circ$  азимутальном угле.

SKIM будет проводить измерения при угле падения  $12^\circ$ , поэтому в данной работе рассмотрим доплеровский спектр при угле падения близком к  $12^\circ$ . Типичные

доплеровские спектры для угла падения  $12,4^\circ$  показаны на рис. 4: а) азимутальный угол  $0^\circ$  б) азимутальный угол  $75^\circ$ .

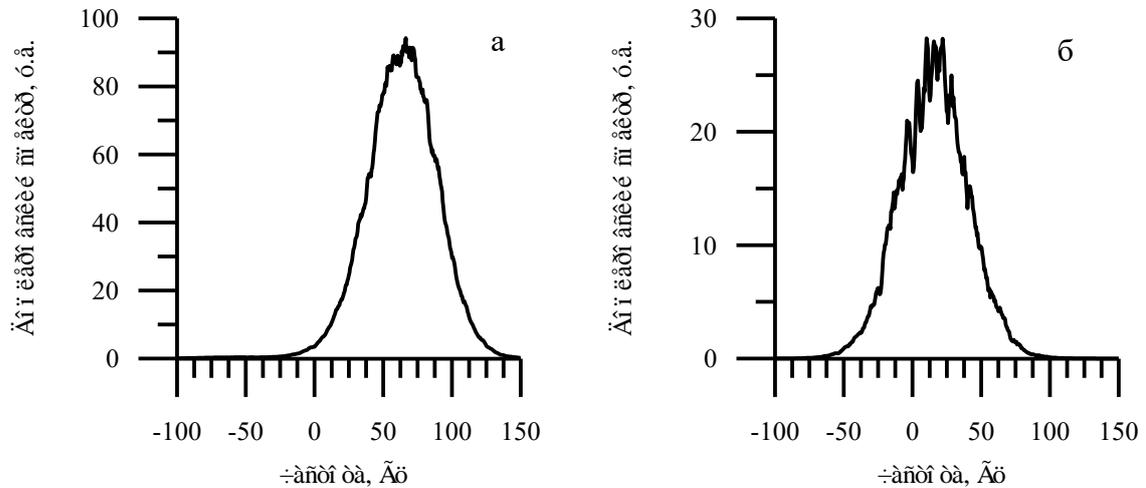


Рис. 4. Доплеровские спектры отраженного радиолокационного сигнала при угле падения  $12,4^\circ$  : а) направление зондирования  $\phi_{az} = 0^\circ$  и б) направлении зондирования  $\phi_{az} = 75^\circ$ .

Для зондирования навстречу течению ( $\phi_{az} = 0^\circ$ ) смещение доплеровского спектра  $f_{shift}$  равно 63,3 Гц, ширина доплеровского спектра  $\Delta F_{20}$  равно 52,5 Гц и ширина  $\Delta F_{42}$  равна 62,3 Гц. При повороте на  $75^\circ$  смещение уменьшается до 15,5 Гц.

Результаты обработки для угла падения  $12,4^\circ$  показаны на рис.5-7. В ходе эксперимента направление течения реки и направление распространения волнения (или ветра) близки, поэтому мы наблюдаем сильную азимутальную зависимость смещения доплеровского спектра (см. рис. 5). Здесь азимутальный угол это направление зондирования.

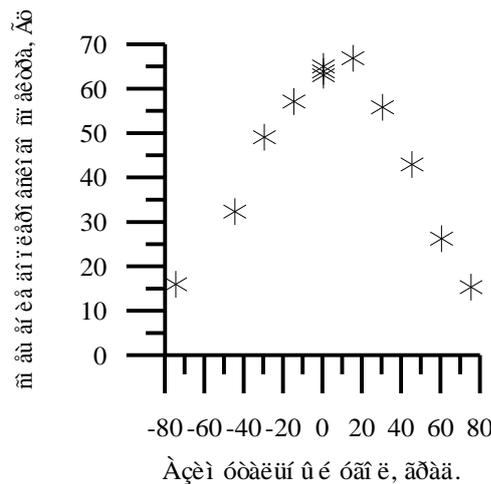


Рис. 5. Азимутальная зависимость смещения доплеровского спектра ( $\theta_0 = 12,4^\circ$ ).

Из рис. 6 видно, что ширина доплеровского спектра ( $\Delta F_{20}$ ) сильно меняется в ходе эксперимента и возможно более удобным является новое определение ширины

доплеровского спектра ( $\Delta F_{42}$ ). «Флуктуации» ширины доплеровского спектра в значительной степени связаны с небольшим временем усреднения (1 минута). Однако увеличение времени накопления приведет к увеличению общей длительности эксперимента и тогда основной причиной изменения параметров доплеровского спектра может стать нестабильность скорости ветра (параметров волнения) в ходе эксперимента.

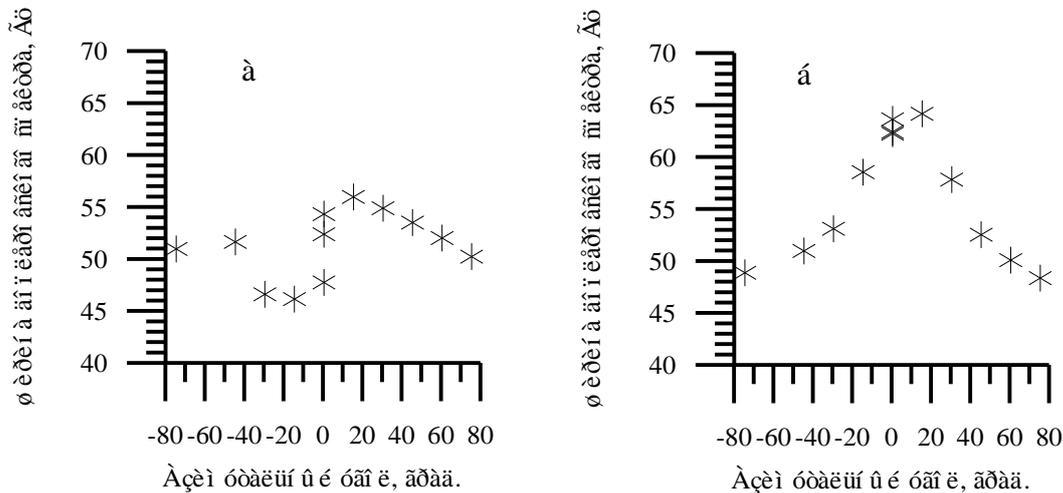


Рис. 6. Азимутальная зависимость ширины доплеровского спектра ( $\theta_0 = 12.4^\circ$ ): а)  $\Delta F_{20}$ , б)  $\Delta F_{42}$ .

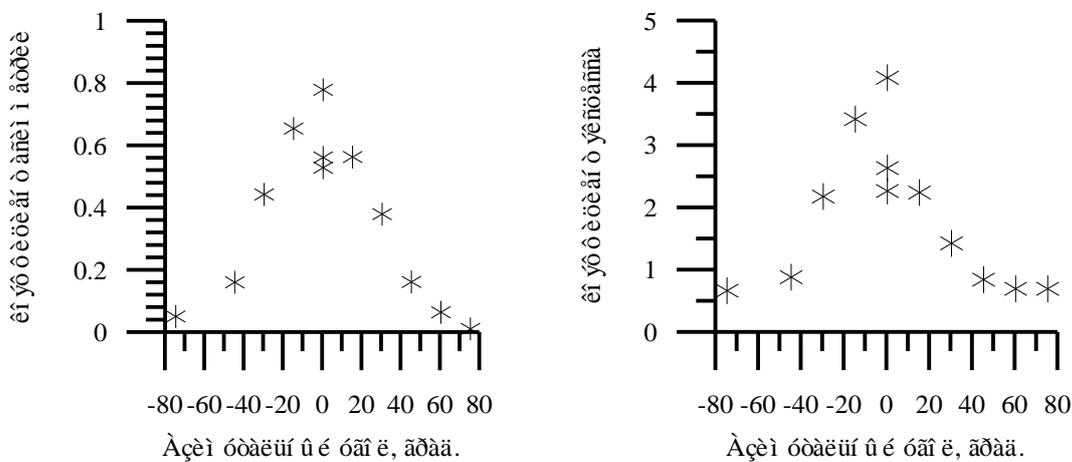


Рис. 7. Азимутальная зависимость коэффициентов асимметрии и эксцесса ( $\theta_0 = 12.4^\circ$ )

Первые результаты обработки показывают, что форма доплеровского спектра при зондировании навстречу волнению является негауссовой. При увеличении азимутального угла коэффициенты асимметрии и эксцесса уменьшаются, что тлже можно использовать для определения направления течения.

### Заклучение

Проведенные эксперименты стали первыми измерениями доплеровского спектра при малых углах падения для речного течения. Предварительные результаты обработки радиолокационных данных показывают, что течение оказывает сильное влияние на форму доплеровского спектра (большие значения коэффициентов асимметрии и

эксцесса) и приводит к дополнительному смещению доплеровского спектра. Эксперименты на морской платформе при отсутствии течения показали, что форма доплеровского спектра ДС является гауссовой функцией при малых углах падения (асимметрия и эксцесс близки к 0) [8].

Дальнейшая обработка данных и проведение новых экспериментов позволит продвинуться в разработке алгоритма измерения скорости течения при малых углах падения.

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-05-00462-а).*

### **Литература**

1. D. Barrick, “HF Radio oceanography – a review”, *Boundary-Layer Meteorology*, 1978, vol. 13, pp. 23-43.
2. J. Toporkov, P. Hwang, M. Sletten, D. Perkovic, S. Frasier, “Surface Velocity Profiles in a Vessel’s Turbulent Wake Observed by a Dual-Beam Along-Track Interferometric SAR”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, vol. 8, No. 4, pp. 602-606.
3. J. Toporkov, D. Perkovic, M. Sletten, S. Frasier, “Sea Surface Velocity Vector Retrieval Using Dual-Beam Interferometry: First Demonstration”, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, vol. 43, No. 11, pp. 2494-2502.
4. F. Arduin, “The SKIM Mission: a Pathfinder for Doppler Oceanography from Space”, workshop “Doppler Oceanography from space”, 10-12 October 2018, Brest (France). <https://dofs.sciencesconf.org/resource/page/id/7>.
5. C. Gommenginger, B. Chapron B., A. Martin A., J. Marquez, C. Brownsword, C. Buck, “SEASTAR: a new mission concept for high-resolution imaging of ocean surface current and wind vectors from space”, workshop “Doppler Oceanography from space”, 10-12 October 2018, Brest (France). URL: <https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Gommenginger.pdf> (14/10/2019).
6. E. Rodriguez, A. Wineteer, D. Perkovic-Martin, “DopplerScatt Results: What we have learned and implications for a Winds and Currents Mission”, *Doppler Oceanography from Space Proc. Workshop. Brest, France. 10–12 Oct. 2018. 40 p.* URL: <https://dofs.sciencesconf.org/data/pages/Rodriguez.pdf>.
7. В. Караев, Ю. Титченко Ю., Е. Мешков, М. Панфилова, М. Рябкова. Доплеровский спектр радиолокационного сигнала, отраженного морской поверхностью при малых углах падения / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. № 6, ст. 221-234.
8. Караев В., Рябкова М., Панфилова М., Титченко Ю., Мешков Е. К вопросу об обратном рассеянии электромагнитных волн СВЧ-диапазона морской поверхностью при углах падения меньше 20 градусов / Семнадцатая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 11-15 ноября 2019, Москва, ИКИ, Тезисы, стр. 275.