

Амплитудно-частотное смещение, влияющее на точность измерений лага скорости

П.С. Евсюков¹, О.Н. Андреева¹

¹ Центральный научно-исследовательский институт «Курс»
ул. Кирпичная, д. 34а, г. Москва 105187, Российская Федерация

✉ e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

Резюме

Целью работы является разработка математической модели для исследования влияния амплитудно-частотного смещения на коэффициент поглощения при использовании лагов скорости с Доплеровским эффектом, различных параметров, таких как размер апертуры, коэффициент поглощения, высота и угол направленности.

Методы. В данной работе были использованы методы для моделирования смещения амплитудно-частотного сигнала с эффектом Доплера: 1) метод анализа спектра сигналов: используется для изучения частотных характеристик сигналов, включая определение частоты, амплитуды и других параметров; 2) метод численного моделирования: включает в себя использование численных алгоритмов и компьютерных программ например Matlab/Simulink, для моделирования физических явлений, связанных с эффектом Доплера и поглощением; 3) метод обработки сигналов во временной и частотной областях: включает в себя различные техники фильтрации, декомпозиции сигналов и анализа их характеристик во времени и частоте, помогают выявить особенности сигналов; 4) метод математического моделирования: включает в себя разработку математических моделей, описывающих движение объектов и их взаимодействие с окружающей средой.

Результаты. В ходе исследования была разработана математическая модель которая исследует влияние различных параметров на амплитудно-частотное смещение в активной акустической системе. Моделирование показало, как размер апертуры, угол наклона, коэффициента поглощения и донное отдаление имеют значительное влияние, а также выявило линейную зависимость между коэффициентами ошибок влияющих на смещение.

Заключение. Исследования показали, что амплитудно-частотное смещение оказывает значительное влияние на точность измерений в системе Доплеровского лага. Фазированные массивные приборы демонстрировали преимущества в рамках длительной точности. Сравнение амплитудно-частотного смещения с экспериментальными данными выявило хорошее согласие, что подтверждает адекватность разработанной модели. Однако требуется дополнительное моделирование для проверки влияния других источников ошибок, таких как территориальное, связь боковых лепестков, выравнивание луча и др., и более подробного изучения влияния крена на точность измерений.

Ключевые слова: амплитудно-частотное смещение; лаг скорости; эхосигнал; общая доплеровская фаза; эффект Доплера; моделирование; диаграмма направленности.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Евсюков П.С., Андреева О.Н. Амплитудно-частотное смещение, влияющее на точность измерений лага скорости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2024; 28(1): 57-70. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-57-70>.

Поступила в редакцию 13.01.2024

Подписана в печать 12.02.2024

Опубликована 27.03.2024

Amplitude-Frequency Shift Affecting the Accuracy of Velocity Lag Measurements

Petr S. Evsyukov ¹ ✉, Olga N. Andreeva ¹

¹ Central Research Institute «Kurs»
34a Kirpichnaya str., Moscow 105187, Russian Federation

✉ e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

Abstract

Purpose of research of this work is to develop a mathematical model to study the effect of amplitude-frequency offset on the absorption coefficient when using velocity lags with Doppler effect, different parameters such as aperture size, absorption coefficient, height and angle of directivity.

Methods. In this work, methods were used to model the amplitude-frequency signal shift with the Doppler effect: 1) Signal spectrum analysis method: used to study the frequency characteristics of signals, including the determination of frequency, amplitude and other parameters. 2) Numerical simulation method: include the use of numerical algorithms and computer programs such as Matlab/Simulink, to simulate the physical phenomena associated with the Doppler effect and absorption. 3) Signal processing method in time and frequency domains: include various techniques for filtering, decomposition of signals and analyzing their characteristics in time and frequency, help to identify the characteristics of signals. 4) Method of mathematical modeling: include the development of mathematical models describing the motion of objects and their interaction with the environment.

Result. In this research, a mathematical model was developed to investigate the effect of various parameters on the amplitude-frequency displacement in an active acoustic system. The modeling showed how aperture size, tilt angle, absorption coefficient and bottom distance have a significant effect, and also revealed a linear relationship between the error coefficients affecting the displacement.

Conclusion. Amplitude-frequency offset studies showed that this phenomenon has a significant impact on the accuracy of Doppler lag measurements. Phased array instruments showed advantages within the long term accuracy framework. Comparison of the amplitude-frequency offset with experimental data revealed good agreement, which confirms the adequacy of the developed model. However, additional modeling is required to verify the influence of other error sources, such as territorial, side lobe coupling, beam alignment, etc., and to study in more detail the influence of roll on measurement accuracy.

Keywords: amplitude-frequency offset; velocity lag; echo; total Doppler phase; Doppler effect; modeling; directional pattern.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Evsyukov P. S., Andreeva O.N. Amplitude-Frequency Shift Affecting the Accuracy of Velocity Lag Measurements. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2024; 28(1): 57-70 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2024-28-1-57-70>.

Received 13.01.2024

Accepted 12.02.2024

Published 27.03.2024

Введение

Лаги скорости с использованием эффекта Доплера измеряет относительную скорость между прибором и донным пространством путем передачи акустических импульсов, которые рассеиваются от дна. Затем рассеянный звук принимается и измеряется для определения доплеровского сдвига.

Гидроакустический лаг включает в себя получающее устройство с дешифратором входного сигнала и механизмом выполнения [1].

Важно отметить, что большинство существующих доплеровских лагов [2], по большей части (или всегда, если доступна только одна приемно-передающая антенна), работают в импульсном режиме. Это означает, что длительность приема эхосигнала зависит от глубины под килем объекта. В результате, эхосигнал представлен в виде отрезков независимых реализаций, протяженных во времени, пропорционально времени распространения акустического луча до дна и обратно. Важно учитывать, что это может привести к ситуации, когда интервал приема эхосигнала меньше, чем интервал корреляции случайного процесса с его корреляционной функцией. Этот аспект

требует учета при разработке алгоритмов оценки доплеровского сдвига частоты.

В литературе [3,4] можно найти описания эхосигнала, который анализируется как пространственно-временное случайное поле рассеяния на дне, а затем его отражение представляется в виде частотно-пространственного или частотно-волнового сигнала [5]. Для доплеровского измерителя скорости, работающего с направленным излучением и приемом эхосигнала, применение модели эхосигнала в форме случайного поля, который не добавляет дополнительной информации. Это связано с тем, что пространственные координаты не расширяют базу исходных данных для последующей обработки в алгоритмах, особенно в дальней зоне, когда принимаемое поле представляется как результат воздействия плоской волны на антенну. Следовательно, мы будем рассматривать эхосигнал как временной случайный процесс [6]. Для каждого сигнала определяется трехмерный вектор скорости путем преобразования оцененных радиальных доплеровских смещений акустических лучей в координаты инструмента. Данная технология может применяться в навигации надводных ко-

раблей, подводных лодок, автономных беспилотных аппаратов, а также буксируемых платформ для точного определения скорости либо в сочетании с инерциальной навигационной системой для коррекции дрейфа [7].

Как и при использовании любого другого датчика, качество данных, получаемых от доплеровского измерителя, можно количественно оценить с учетом их точности как в коротких, так и в длительных периодах. Анализ точности измерений скорости имеет важное значение для прогнозирования динамики навигационных ошибок в приложениях, где требуется высокая точность, а также для оптимального использования данных в сочетании с данными о скорости от других датчиков в системах слияния данных, например, с применением фильтров Калмана на основе инерциальной системы [8, 9].

До реализации фильтра Калмана-Бьюси в 1961 году [10], широкое распространение получил метод, предложенный Н. Винером, который обеспечивал оптимальную оценку (с минимальной дисперсией ошибки оценки) измеренного полезного сигнала. Этот метод применялся в случае стационарного случайного процесса среди стационарного случайного шума (ошибки измерения). При этом корреляционные функции и соответствующие спектральные плотности обоих случайных процессов считались известными. В качестве примера такого подхода можно привести работы [11-13], в ко-

торых он применялся для решения задач обработки навигационной информации.

В приложениях, где необходим расчет пути и позиционирование, ошибка скорости может быть описана случайным процессом с нулевой средней дискретной суммой времени. Предполагая независимость краткосрочных ошибок скорости для каждого импульса, стандартное отклонение ошибки позиционирования увеличивается как квадратный корень из количества импульсов. Однако ошибка позиционирования из-за длительной ошибки скорости увеличивается линейно с количеством импульсов. С увеличением количества пингов во времени, длительная ошибка в конечном итоге превышает ошибку позиционирования из-за краткосрочной ошибки [14]. Поэтому важно иметь возможность моделировать и количественно оценивать точность лагов скорости с Доплеровским эффектом.

Метод акустической эмиссии [13] также может применяться в системах измерения скорости совместно с другими эффектами и используется для измерения скорости подводных объектов относительно окружающей среды с использованием доплеровского эффекта. Этот метод может быть полезен для обнаружения и анализа внутренних вибраций или шумов, возникающих в системе измерения скорости в результате ее работы, например, из-за трения внутренних компонентов или движения воды через датчики. Анализ акустической

эмиссии позволяет выявлять аномалии в работе системы и проводить диагностику ее состояния.

Материалы и методы

Эхосигнал [15], который принимает антенна, формируется как сумма сигналов от отдельных элементарных рассеивателей, которые независимы, случайно распределены и находятся во всех направлениях в пределах ширины диаграммы направленности. Предполагается, что ни один из этих элементарных сигналов не преобладает над остальными по уровню [16], и они обладают случайной начальной фазой и временем возникновения.

Отклонение коэффициента амплитудно-частотного смещения моделируются путем вычисления общей доплеровской фазы с помощью взвешивания ожидаемой доплеровской фазы для каждого угла прихода по диаграмме направленности луча, коэффициентом обратного рассеяния, поглощением и сферическим распространением.

Частотный сдвиг принятого сигнала связан с эффектом Доплера [16]:

$$\omega_d = \omega_{\text{пр}} - \omega_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{пр}}$ – частота принятого сигнала; $\omega_{\text{и}}$ – частота излучаемого сигнала. Диаграмма направленности луча рассчитывается с помощью интеграла Рэлея от апертуры и типа системы: поршневой или с фазированной решеткой. Сигналы фазируются таким образом, чтобы обеспечить прием эхо-импульса поперечной волны [17], измеряя радиальную

составляющую скорости в плоском секторе как функцию дальности, азимута и времени [18]. Диаграмма направленности луча рассчитывается как функция сферических координат θ и ϕ .

Для вычисления доплеровской фазы используется геометрическая модель, которая учитывает геометрию пути сигнала от источника к приемнику в водной среде. Формула включает в себя три основных компонента: горизонтальное и вертикальное расстояния между источником и приемником (зависящие от угла прихода и глубины), а также горизонтальное расстояние между точками прохождения сигнала через глубину. Это уравнение позволяет учесть как прямой путь сигнала от источника к приемнику, так и путь через глубину, что позволяет получить более точные значения доплеровской фазы с учетом сложной геометрии и характеристик среды.

Точная доплеровская фаза в единицах циклов для заданного угла прихода, заданного θ и ϕ , на глубине H в количестве длин волн определяется следующим образом

$$d_{\lambda}(\theta, \phi) = 2 \sqrt{H^2 \tan^2(\theta) + H^2 - 2 \sqrt{H^2 \tan^2(\theta) \cos^2(\phi) + H^2}}. \quad (2)$$

Задача заключается в том, чтобы определить разницу расстояний между двумя путями: первый путь идет от точки $(-1, 0, 0)$ до рассеивателя в точке $(x_s, y_s, -H)$, а второй путь – от точки $(0, 0, 0)$ до того же рассеивателя $(x_s, y_s, -H)$. Фактически, доплеровская фаза в циклах вычисляется

ся для данного угла прихода путем перемещения на одну длину волны вдоль оси x . При больших значениях N и малых значениях ϕ это уравнение можно приблизить следующим образом:

$$d_\lambda(\theta, \phi) = 2\sin(\theta)\sqrt{1-\sin^2(\phi)}. \quad (3)$$

Это упрощенное уравнение предполагает, что приблизительно N можно рассматривать как бесконечность, а угол ϕ близок к нулю, что приводит к упрощению формулы.

Весовая функция задается следующим образом

$$w(\theta, \phi) = |W_{tx}(\theta, \phi)|^2 \cdot |W_{rx}(\theta, \phi)|^2 \\ S_a(\theta) \cdot \frac{1}{r^2} \cdot 10^{\frac{2\alpha r}{10}} \cdot \sin(\theta), \quad (4)$$

где $W_{tx}(\theta, \phi)$ и $W_{rx}(\theta, \phi)$ представляют собой диаграммы направленности передатчика и приемника соответственно; $S_a(\theta)$ – коэффициент площади рассеяния; r – расстояние между передатчиком и приемником; α – коэффициент поглощения в дБ/м. Данное уравнение учитывает различные аспекты, такие как диаграммы направленности лучей, апертурная функция, расстояние действия и коэффициент поглощения, что делает его более полным и точным для описания процессов в системе передачи и приема сигнала.

Далее средняя доплеровская фаза в циклах вычисляется с помощью метода численного интегрирования, используя суммирование по дискретным значениям углов θ и ϕ . Этот метод заключается в дискретизации области интегрирова-

ния и вычисления среднего значения функции $\lambda(\theta, \phi) \cdot w(\theta, \phi)$ деленного на среднее значение только весовой функции $w(\theta, \phi)$, где весовая функция $w(\theta, \phi)$ принимает значение больше нуля.

$$D_\lambda \approx \frac{\sum_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sum_{\phi=-\max}^{\max} \lambda(\theta, \phi) \cdot w(\theta, \phi)}{\sum_{\theta=\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \sum_{\phi=-\max}^{\max} w(\theta, \phi)}. \quad (5)$$

Если диапазон ϕ ограничен квадрантом, то диапазон θ должен быть определен так, чтобы импульс охватывал этот квадрант. В данном случае, когда диапазон ϕ ограничен квадрантом, диапазон θ также будет зависеть от ограничений на диапазон ϕ , диапазон можно выбрать в соответствии с условиями, например

$$\theta_{\max} = \arccos\left(\frac{\sqrt{1-\sin^2(\alpha J)}}{\frac{2}{2 \cdot (1+\frac{PF}{4})}}\right), \quad (6)$$

где αJ – угол между продольной осью объекта и линией направления, а PF – длина импульса в долях диапазона.

Существует пять основных переменных, влияющих поглощающую погрешность: размер апертуры, тип апертуры (поршень или фазированная решетка), угол между двумя направлениями, коэффициент поглощения и высота. Амплитудно-частотное смещение масштабируется со скоростью и будет оценена как функция всех пяти переменных. Оно определяется как относительная ошибка между средней доплеровской фазой и ожидаемой номинальной доплеровской фазой, из-за заданного угла αJ , когда ошибка смещения может быть смоделирована следующим образом:

$$\Delta\lambda_{rel} = \frac{\delta\lambda - 2\sqrt{1-\cos^2(\alpha_j)}}{2\sqrt{1-\cos^2(\alpha_j)}} - \varepsilon_{tb}, \quad (7)$$

где $\Delta\lambda_{rel}$ – это амплитудно-частотное смещение поглощения, которое выражает отклонение фактической средней доплеровской фазы от ожидаемой номинальной доплеровской фазы; λ – длина волны звукового сигнала, используемого в измерениях; $\text{eff } D$ – эффективный диаметр, который характеризует размер акустической апертуры или антенны, используемой для приема или передачи сигнала, ε_{tb} – другие источники ошибок, α_j – угол, который определяет направление передачи сигнала и направление наблюдения. Формула описывает зависимость смещения поглощения от параметров сигнала (длина волны), характеристик используемого оборудования (эффективный диаметр) и свойств среды распространения (коэффициент поглощения) при различных углах наблюдения.

Интуитивно понятно, что амплитудно - частотное смещение поглощения вызвано неравномерным взвешиванием рассеянной энергии, приходящей под разными углами. Удаленность от датчика до дна обозначена r при угле возрастания $\theta - \Delta\theta$, а при угле $\theta + \Delta\theta$ дальность равна $r + \Delta r$. Следовательно, дальность до дна увеличивается с увеличением угла возрастания. Разница в дальности до дна для разных углов прибытия приводит к не одинаковому взвешиванию доплеровской фазы. Поглощение в дБ пропорционально даль-

ности, поэтому сигналы, приходящие под большими углами возрастания, ослабляются сильнее, чем сигналы, приходящие под меньшими углами возрастания. Интуитивно это должно вызывать отрицательное амплитудное смещение поглощения, поскольку доплеровская фаза меньше при меньших углах возрастания.

Амплитудно - частотное смещение может быть смоделировано следующим образом:

$$\Delta\lambda_{rel} = -\frac{\lambda^2}{D^2} \cdot C \cdot \frac{\alpha}{\cos(\theta)}, \quad (8)$$

где λ – длина волны; D – эффективный диаметр; α – коэффициент поглощения; θ – угол направления; C – коэффициент, корректирующий результаты измерений.

Результаты и их обсуждение

Первое моделирование было проведено для изучения влияния размера апертуры на амплитудное смещение поглощения. Были смоделированы апертуры с фазированной решеткой для фиксированного угла направления 30° , $\alpha = 0,1$ дБ/м и высоты 100 м, результаты показаны на рис. 1. Форма первого члена в (8) была выбрана для моделирования параболы зависимости смещения поглощения от размера апертуры, а константа во втором члене была выбрана для согласования с наклоном параболы.

Следующее моделирование пытается ответить на вопрос, как амплитудное смещение влияет на коэффициент поглощения. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементов,

угол направления фиксирован на 30° , а глубина – 100 м. Результаты можно увидеть на рис. 2, существует линейная зависимость между коэффициентом поглощения в дБ/м и смещением поглощения, поскольку коэффициент поглощения приводится в логарифмических единицах. Та же логика может быть и в отношении ошибки наклона рельефа, которая будет обсуждаться в следующих статьях, применима и к этому случаю, когда коэффициент по-

глощения в линейных единицах приблизительно пропорционален коэффициенту в логарифмических единицах в небольшом диапазоне. Как видно, высота над уровнем моря и коэффициент поглощения взаимозаменяемы, как следует из (8), где α и h представлены как произведение. Это означает, что любая комбинация этих двух переменных, дающая данное произведение, приводит к такому же смещению поглощения.

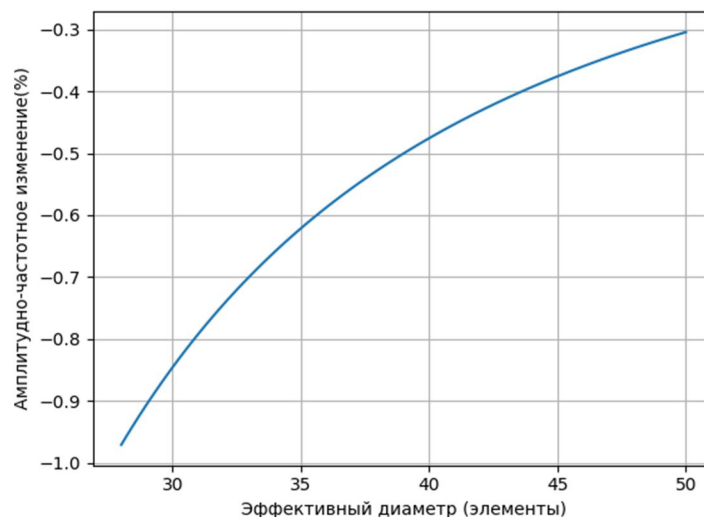


Рис. 1. Влияние размера апертуры на амплитудно-частотное смещение

Fig. 1. Effect of aperture size on amplitude-frequency offset

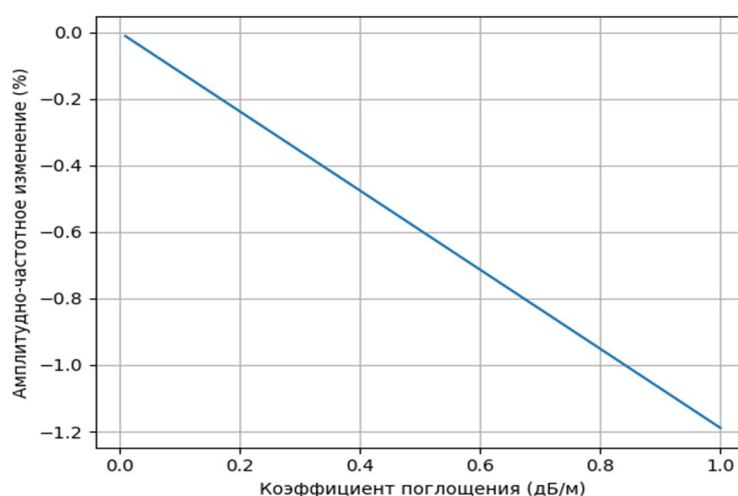


Рис. 2. Влияние амплитудно-частотного смещения на коэффициент поглощения

Fig. 2. Effect of amplitude-frequency offset on absorption coefficient

Следующее моделирование оценивает амплитудное смещение как функцию высоты. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементах, угол наклона фиксирован на 30° [19], а коэффициент поглощения фиксирован на 0,1 дБ/м. Результаты показаны на рис. 3, и видно, что существует линейная зависимость между высотой и смещением поглощения на умеренных и больших высотах. На малых высотах

проявляется смещение в сторону мелководья, что известно, но в данной работе не рассматривается. Последнее моделирование оценивает амплитудное смещение как функцию угла наклона. Для этого моделирования апертура фиксирована на 40 элементах, коэффициент поглощения фиксирован на 0,1 дБ/м, высота над уровнем моря фиксирована на 100 м. Результаты показаны на рис. 4.

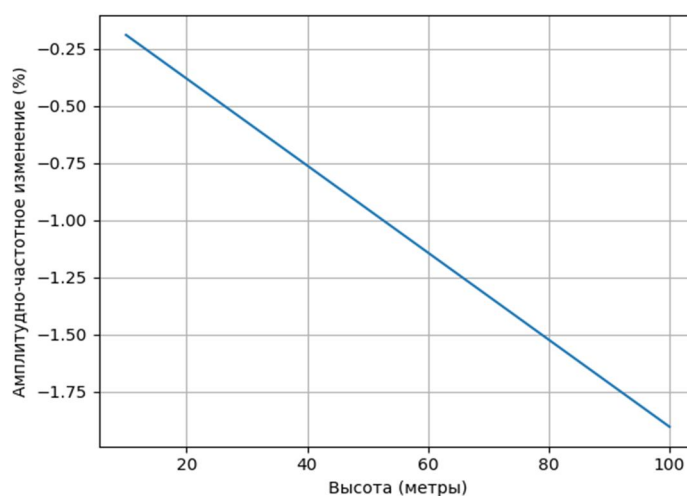


Рис. 3. Влияние отдаления от донного покрытия на амплитудно-частотное смещение

Fig. 3. Effect of distance from the bottom cover on amplitude-frequency offset

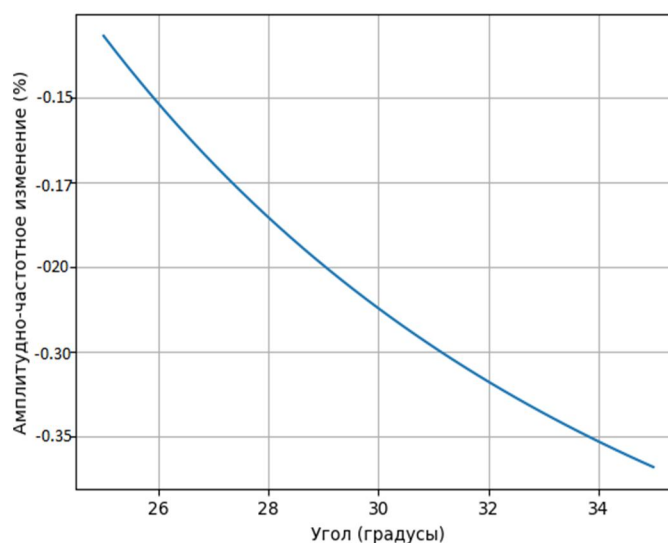


Рис. 4. Влияние угла направления на амплитудно-частотное смещение

Fig. 4. Effect of the direction angle on the amplitude-frequency offset

Форма последнего члена в (8) была выбрана для моделирования формы кривой зависимости смещения поглощения от угла между двумя направлениями. Мы видим что амплитудно - частотное смещение пропорционально высоте и углу и поэтому хуже всего проявляется на максимальной глубине и большому углу направленности. Для прогнозирования величины ошибки источника, ранее обсуждаемого, необходимо иметь данные о параметрах окружающей среды, таких как уклон и коэффициент поглощения, который зависит от различных параметров, таких как давление, температура, соленость и другие свойства воды, но наиболее сильное влияние оказывает частота [20]. Поэтому для каждой акустической частоты рассматривается

только одно значение коэффициента поглощения, соответствующее давлению на уровне моря, например при температуре 5°C и солености 35 промилле. Общая длительная точность шести различных конфигураций лага скорости, включая поршневые приборы и приборы с фазированной решеткой в диапазоне от 150 кГц до 600 кГц, представлена в табл. 1. Поглощение оказывает отрицательное воздействие на точность измерений и приводит к занижению измеряемых значений. Определение точности в длительной перспективе в данном контексте – это точность лага скорости после усреднения в течение достаточно долгого времени, так что дисперсия приближается к нулю.

Таблица 1. Влияние амплитудно-частотной погрешности на общую длительную точность шести различных конфигураций лага

Table 1. Effect of amplitude-frequency error on the overall accuracy of six different lag configurations

Параметр / Parameter	Единица / Unit	Тип аппертуры антенны / Type of antenna aperture					
		ФАР	ПА	ФАР	ПА	ФАР	ПА
Частота	кГц	150	150	300	300	600	600
Угол направления луча	град	30	30	30	30	30	30
Диаметр аппертуры	см	15	13	11	7	6	7
Амплитудно-частотная погрешность поглощения	%	-0.646	-0.613	-0.341	-0.399	-0.229	-0.079

Выводы

Была разработана модель, охватывающая амплитудно - частотное смещение поглощения, с целью прогнозирования точности данных о скорости с использованием эффекта Доплера. Коэффициент поглощения изменяется во

времени и в различных точках пространства, что может привести к изменению скорости распространения звука и, следовательно, к ошибкам в измерениях скорости.

В длительной перспективе эти изменения могут существенно повлиять на точность и надежность данных. По-

этому важно учитывать и компенсировать влияние амплитудно - частотного смещения поглощения при анализе и интерпретации результатов навигационных измерений. Точность данных улучшается при работе на расстояниях, которые не близки к максимально ука-

занному диапазону. Исследования смещения поглощения подтверждают, что данное явление оказывает значительное влияние на стабильность измерений в системе лага скорости в длительной перспективе.

Список литературы

1. Гидроакустические навигационные средства / В.И. Бородин, Г.Е. Смирнов [и др.]. Л.: Судостроение, 1983. 262 с.
2. Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В. Корабельная гидроакустическая техника. СПб.: Наука, 2004.
3. Гусев В.Г. Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации. Л.: Судостроение, 1988.
4. Коняев К.В. Спектральный анализ случайных океанологических полей. Л.: Гидрометеиздат, 1981.
5. Полканов К.И., Лоскутова Г.В., Попова О.С. Программный макет перспективного гидроакустического лага // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: труды IX Всероссийской конференции. СПб.: Наука, 2008.
6. Полканов К.И., Лоскутова Г.В. Пространственно-частотные и частотно- волновые методы описания и обработки гидроакустических полей. СПб.: Наука, 2007.
7. Кенни А., Лопез Г. Доплеровский гидролокатор: достижения и расширенные области применения // Океан. MTS/IEEE Использование энергии океана, 2012.
8. Кинси Дж. К., Юстис Р., Уиткомб Л. Л. Обзор навигации подводных аппаратов: последние достижения и новые вызовы // Конференция IFAC по маневрированию и управлению морскими судами. 2006. Т. 88. С. 1-12.
9. Безмен П.А. Исследование работы расширенного фильтра Калмана, дополненного адаптивным цифровым фильтром, для комплексирования данных системы управления мобильным роботом // Известия Юго-Западного государственного университета. 2020; 24(1):68-89. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>.
10. Калман Р.Е., Бьюси Р.С. Новые результаты в линейной фильтрации и теории предсказания // Труды американского общества инженеров- механиков, сер. Д. 1961. Т. 83. №. 1. С. 123-142.
11. Челпанов И.Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М.: Наука, 1967.
12. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана. М., 2016. 396 с.

13. Андреева Л.П., Агеев Е.В. Применение метода акустической эмиссии для контроля образования микротрещины в точечном тонколистовом сварном соединении // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016;20(2):8-14.
14. Папулис А., Пиллай С. У. Вероятность, случайные переменные и стохастические процессы. 4-е изд. Нью-Йорк: McGraw-Hill, 2002.
15. Давыдов М.Н., Липатова А.П., Ткаченко Ю.С. Способы оценки реальных размеров дефектов на основе длин их фронтальных образов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(2):18-28. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28>
16. Виноградов К.А., Кошкарёв В.Н. Абсолютные и относительные лаги: справочник. Л.: Судостроение, 1990.
17. Пасси Г.С. Технология фазированных решеток – современная реализация передовых решений в области УЗК, накопленных в прошлом веке // В мире неразрушающего контроля. 2009. № 2 (44). С. 56–64.
18. Пинкель Р. О стимулировании качества данных доплеровского гидролокатора // Доклады IEEE, 2-я рабочая конференция по текущим измерениям. 1982. С. 113-116.
19. Мустье К., Вендельбоэ Г. Угловая зависимость высокочастотного обратного акустического рассеяния морского дна (200-400 kHz) // Академия акустических наук. 2011. Т. 130. № 4.
20. Франсуа Р. Е., Гаррисон Г. Р. Поглощение звука на основе океанических измерений. Часть I: Чистая вода и вклад сульфата магния // Журнал Акустического общества Америки. 1982. Т. 72. № 3. С. 896-907.

References

1. Borodin V.I., Smirnov G.E. *Gidroakusticheskie navigatsionnye sredstva* [Hydroacoustic navigation aids]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983.
2. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. *Korabel'naya gidroakusticheskaya tekhnika* [Korabelnaya hydroacoustic technique]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2004.
3. Gusev V.G. *Sistemy prostranstvenno-vremennoi obrabotki gidroakusticheskoi informatsii* [Systems of spatial-temporal processing of hydroacoustic information]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1988.
4. Konyaev K.V. *Spektral'nyi analiz sluchainykh okeanologicheskikh polei* [Spectral analysis of random oceanologic fields]. Leningrad, Gidrometeeoizdat Publ., 1981.
5. Polkanov K.I., Loskutova G.V., Popova O.S. [Program layout of a perspective hydroacoustic lag]. *Trudy IX Vserossiiskoi konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»* [Proceedings of IX All-Russian conference "Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics"]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2008.

6. Polkanov K.I.; Loskutova G.V. *Prostranstvenno-chastotnye i chastotno-volnovye metody opisaniya i obrabotki gidroakusticheskikh polei* [Spatial-frequency and frequency-wave methods of the hydroacoustic fields description and processing]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2007.
7. Kenny A., Lopez G. Doplerovskii gidrolikator: dostizheniya i rasshirennye oblasti primeneniya [Doppler sonar: achievements and extended applications]. *Okean. MTS/IEEE Ispol'zovanie energii okeana = Ocean. MTS/IEEE Harnessing Power Ocean*, 2012.
8. Kinsey J. K., Eustis R., Whitcomb L. L. Obzor podvodnoi navigatsii podvodnykh apparatov: Poslednie dostizheniya i novye zadachi [A review of underwater navigation of submersibles: Recent advances and new challenges]. *Konferentsiya IFAC po manevrirovaniyu i upravleniyu morskimi sudami = IFAC Conference on Maneuvering and Management of Marine Vessels*, 2006, vol. 88, pp. 1-12.
9. Bezmen P. A. Investigation of the Operation of the Extended Kalman Filter Supplemented by an Adaptive Digital Filter for Integrating Data from a Mobile Robot Control System. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2020, 24(1): 68-89 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2020-24-1-68-89>.
10. Kalman R.E., Bucy R.S. Novye rezul'taty v lineinoi fil'tratsii i teorii predskazaniya [New results in linear filtering and prediction theory]. *Trudy amerikanskogo obshchestva inzhenerov- mekhanikov = Proceedings of the American Society of Mechanical Engineers*, ser. D, 1961, vol. 83, no. 1, pp. 123-142.
11. Chelpanov I.B. *Optimal'naya obrabotka signalov v navigatsionnykh sistemakh* [Optimal signal processing in navigation systems]. Moscow, Nauka Publ., 1967.
12. Shakhhtar B.I. *Fil'try Vinera i Kalmana* [Wiener and Kalman filters]. Moscow, 2016. 396 p.
13. Andreeva L.P., Ageev E.V. Application of acoustic emission method for control of microcrack formation in spot thin plate welded joint. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*, 2016; 20(2):8-14 (In Russ.).
14. Papoulis A., Pillai S. V. *Veroyatnost', sluchainye peremennye i stokhasti-cheskie protsessy* [Probability, Random Variables and Stochastic Processes]. New York, McGraw-Hill Publ., 2002.
15. Davydov M. N., Lipatova A. P., Tkachenko Y. S. Methods for Estimating the Actual Size of Defects Based on the Lengths of Their Frontal Images. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(2): 18-28 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-2-18-28>
16. Vinogradov K.A., Koshkaryov V.N. *Absolyutnye i otnositel'nye lagi* [Absolute and relative lags]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1990.

17. Passi G.S. Tekhnologiya fazirovannykh reshetok – sovremennaya realizatsiya peredovykh reshenii v oblasti UZK, nakoplenykh v proshlom veke [Technology of phased arrays - modern realization of advanced solutions in the field of ultrasonic testing accumulated in the last century]. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = In the World of Nondestructive Testing*, 2009, no 2 (44), pp. 56-64.

18. Pinkel R. O stimulirovanii kachestva dannykh doplerovskogo gidrolokatora [On the stimulation of Doppler sonar data quality]. *Doklady IEEE, 2-ya rabochaya konferentsiya po tekushchim izmereniyam = IEEE Papers, 2nd Working Conference on Current Measurements*, 1982, pp. 113-116.

19. Mustier K., Wendelboe G. Vendel'boe G Uglovaya zavisimost' vysokochastotnogo obratnogo akusticheskogo rasseyaniya morskogo dna (200-400 kHz) [Angular dependence of high-frequency seafloor acoustic backscattering (200-400 kHz)]. *Akademiya akusticheskikh nauk = Academy of Acoustical Sciences*, 2011, vol. 130, no. 4.

20. Francois R. E., Garrison G. R. Pogloshchenie zvuka na osnove okeanicheskikh izmerenii. Chast' I: Chistaya voda i vklad sul'fata magniya [Sound absorption based on ocean measurements. Part I: Pure Water and magnesium sulfate contributions]. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1982, vol. 72, no. 3, pp. 896–907.

Информация об авторах / Information about the Authors

Евсюков Петр Сергеевич,
инженер-программист ЦНИИ Курс,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

Petr S. Evsyukov, Software Engineer,
Central Scientific Research Institute Kurs,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: PetrEvsyukovS@yandex.ru

Андреева Ольга Николаевна, доктор
технических наук, руководитель
научно-методического центра
АО «Концерн «Моринсис-Агат»,
профессор БК232 РТУ МИРЭА,
г. Москва, Российская Федерация,
e-mail: nauka@concern-agat.ru

Olga N. Andreeva, Dr. of Sci. (Engineering),
Head of Scientific and Methodological Center
of JSC "Concern "Morinsis-Agat",
Professor BK232 RTU MIREA,
Moscow, Russian Federation,
e-mail: nauka@concern-agat.ru