

УДК 681.883.41

**О. В. Онищук, асп.; С. Т. Барась, к. т. н., доц.**  
**ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА**  
**ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЛАГА**

*Проанализирована математическая модель и выполнено компьютерное моделирование физических моделей доплеровских сигналов. В результате обобщена модель доплеровского сигнала гидроакустического лага.*

**Ключевые слова:** эхо-сигнал, гидроакустический лаг, доплеровский сдвиг частоты, математическая модель, физическая модель.

### Введение

Среди источников погрешности измерения составляющих вектора скорости объекта надводного или подводного плавания гидроакустическим лагом структуру доплеровского сигнала следует считать наиболее существенным из них [1]. Именно структура доплеровского сигнала влияет на граничные возможности измерения частоты высокочастотного заполнения и, таким образом, определяет погрешность доплеровского лага. Всестороннее исследование доплеровских сигналов является чрезвычайно важной проблемой на пути определения потенциальной точности измерения составляющих вектора скорости носителя гидроакустическим лагом.

### Анализ последних достижений

В работе [2] представлены результаты экспериментальных исследований доплеровских сигналов гидроакустического лага в реальных условиях плавания. Анализ этих результатов позволил выявить тонкую структуру этих сигналов, то есть законы поведения их высокочастотного заполнения и огибающей, а также зависимость точности измерения доплеровских смещений частоты от этой структуры. Но исследование реальных доплеровских сигналов является малоэффективным из-за их быстротечности.

В работе [3] приведена математическая модель доплеровского сигнала, которая является результатом представления этого сигнала на приемной антенне в виде суммы большого количества рассеянных дном элементарных эхо-сигналов (принцип Гюйгенса):

$$s(t) = \sum_{m=1}^{M(t)} A_m \cos[\Psi_m(t)], \quad (1)$$

где  $A_m, \Psi_m(t)$  – амплитуда и фаза  $m$ -того элементарного эхо-сигнала,  $M(t)$  – количество элементарных эхо-сигналов, которое изменяется во времени и зависит от момента приема и длительности каждого элементарного эхо-сигнала.

### Постановка задачи

Модель (1) нельзя считать наглядной, следовательно, для ее всестороннего анализа нужны дополнительные преобразования с использованием соответствующего математического аппарата. Такой анализ необходимо направить на выявление особенностей структуры сигнала с целью выяснения возможности наиболее точного измерения частоты.

Чрезвычайно удобной для изучения структуры является физическая модель доплеровского сигнала, которая может быть получена в результате компьютерного моделирования. Сравнительный анализ математической и физической моделей доплеровского сигнала с одной стороны обеспечит получение объективных результатов, а с другой – определит обобщенную формализованную модель доплеровского сигнала, которая однозначно сориентирует разработчиков лага на обоснованные подходы для достижения

наивысшей точности измерения частоты. Именно этим задачам посвящена данная работа.

### Анализ математической модели

Из анализа выражения (1) следует, что структура суммарного сигнала  $s(t)$  зависит от параметров его составляющих элементарных эхо-сигналов. Каждый элементарный эхо-сигнал характеризуется индивидуальной амплитудой и фазой, которые определяются особенностями рассеивающей поверхности дна, влиянием эффекта Доплера и сменным расстоянием, которое проходит каждый сигнал с момента излучения до момента его приема антенной лага в пределах углов ее характеристики направленности в связи с движением носителя [3]. При этом каждый элементарный эхо-сигнал является узкополосным процессом, следовательно, суммарный сигнал также можно считать узкополосным. Тогда для анализа основных параметров таких сигналов можно применить известный аппарат Гильберта [4], согласно которому огибающая  $A(t)$  суммарного колебания (1) определяется как модуль соответствующего аналитического сигнала:

$$A(t) = \sqrt{s_m^2(t) + \hat{s}_m^2(t)} = \sqrt{\left[ \sum_{m=1}^{M(t)} A_m \sin[\Psi_m(t)] \right]^2 + \left[ \sum_{m=1}^{M(t)} A_m \cos[\Psi_m(t)] \right]^2}, \quad (2)$$

де  $\hat{s}(t)$  - сопряженное к  $s(t)$  выражение.

Полная фаза  $\Psi(t)$  сигнала  $s(t)$  равна аргументу аналитического сигнала:

$$\Psi(t) = \arctg \frac{\hat{s}(t)}{s(t)} = \arctg \frac{\sum_{m=1}^M A_m \sin[\Psi_m(t)]}{\sum_{m=1}^M A_m \cos[\Psi_m(t)]}. \quad (3)$$

Мгновенная частота  $\omega(t)$  сигнала  $s(t)$  является производной полной фазы:

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \arctg \frac{\hat{s}(t)}{s(t)} = \frac{d}{dt} \arctg \frac{\sum_{m=1}^{M(t)} A_m \sin[\Psi_m(t)]}{\sum_{m=1}^{M(t)} A_m \cos[\Psi_m(t)]}. \quad (4)$$

Выражения (2), (3) и (4) являются сложными для теоретического расчета  $M(t)$  эхо-сигналов. Поэтому с целью упрощения рассмотрим два элементарных эхо-сигнала  $s_{m-1}(t)$  и  $s_{m+1}(t)$ , которые характеризуются соответственно углами излучения  $a + \Delta\gamma$ ,  $a - \Delta\gamma$  и приема  $\beta + \Delta\gamma$ ,  $\beta - \Delta\gamma$ . Эти углы вместе с глубиной местной акватории определяют амплитуды этих сигналов  $A_{m-1}$ ,  $A_{m+1}$  и частоты  $\omega_{m-1}$ ,  $\omega_{m+1}$  [3].

С помощью выражения (2) найдем огибающую суммарного от двух элементарных эхо-сигналов колебания:

$$A(t) = \sqrt{A_{m-1}^2 + A_{m+1}^2 + 2A_{m-1}A_{m+1} \cos[\Psi_{m+1}(t) - \Psi_{m-1}(t)]}. \quad (5)$$

Выражение (5) подтверждает тот факт, что во время сложения колебаний с близкими значениями амплитуды и частоты, огибающая суммарного колебания принимает колебательный характер. Период колебания огибающей суммарного колебания определяется косинусом разности фаз элементарных эхо-сигналов.

Фаза суммарного от двух элементарных эхо-сигналов колебания равна:

$$\Psi(t, A) = (\omega_0 + \omega_D)t + \Delta\varphi(t) = \omega t + \arctg \left\{ \frac{\frac{A_{m-1}}{A_{m+1}} \sin[\Psi_{m+1}(t) - \Psi_{m-1}(t)]}{1 + \frac{A_{m-1}}{A_{m+1}} \cos[\Psi_{m+1}(t) - \Psi_{m-1}(t)]} \right\}, \quad (6)$$

где  $\omega_0$  – частота заполнения излученного радиосигнала,  $\omega_D$  – частота Доплера суммарного колебания,  $\Delta\varphi(t)$  – составляющая полной фазы исследованного сигнала, зависящая от разности фаз и отношения амплитуд элементарных эхо-сигналов.

Мгновенная частота высокочастотного заполнения сигнала, полученного путем сложения эхо-сигналов, является производной от мгновенной фазы  $\Psi(t, A)$  и после преобразований имеет такой вид:

$$\omega(t, A) = \omega_0 + \omega_D + \Delta\omega \frac{\frac{A_{m-1}^2}{A_{m+1}^2} - 1}{\frac{A_{m-1}^2}{A_{m+1}^2} + 1 + 2 \frac{A_{m-1}}{A_{m+1}} \cos[\Psi_{m+1}(t) - \Psi_{m-1}(t)]}, \quad (7)$$

где  $\Delta\omega$  – половина разности частот элементарных эхо-сигналов.

Выражение (7) характеризует частоту высокочастотного заполнения доплеровского сигнала, состоящую из частоты заполнения излученного радиоимпульса  $\omega_0$ , частоты Доплера  $\omega_D$ , которая является результатом движения объекта плавания, а также сменной во времени величины  $\Delta\omega(t)$ , которая возникает в результате сложения элементарных эхо-сигналов и определяется половиной разности частот и отношением амплитуд элементарных эхо-сигналов. Заметим, что при бесконечно узкой ширине характеристики направленности антенны лага доплеровский сигнал определяется лишь одним элементарным эхо-сигналом, который определяется углами излучения  $\alpha$  и приема  $\beta$ , при этом в выражении (7) исчезает третье слагаемое.

Проанализировав выражения (5), (6) и (7), можно утверждать, что исследуемый сигнал является колебанием с амплитудными и угловыми изменениями. Законы этих изменений зависят от отношения амплитуд  $A_{m-1}/A_{m+1}$  и разности фаз  $\Delta\Psi(t) = \Psi_{m+1}(t) - \Psi_{m-1}(t)$  элементарных эхо-сигналов. Следовательно, с помощью выражений (5), (6) и (7) рассмотрим динамику изменений соответственно амплитуды, фазы и мгновенной частоты суммарного колебания в зависимости от отношения амплитуд элементарных эхо-сигналов на протяжении одного периода колебания огибающей суммарного сигнала.

На рис. 1 а, б и в представлены пространственные графики, на которых по оси аппликат отложены соответственно значения амплитуды, фазы и мгновенной частоты суммарного колебания, по оси ординат – один период колебания огибающей суммарного колебания, по оси абсцисс – отношение амплитуд элементарных эхо-сигналов.

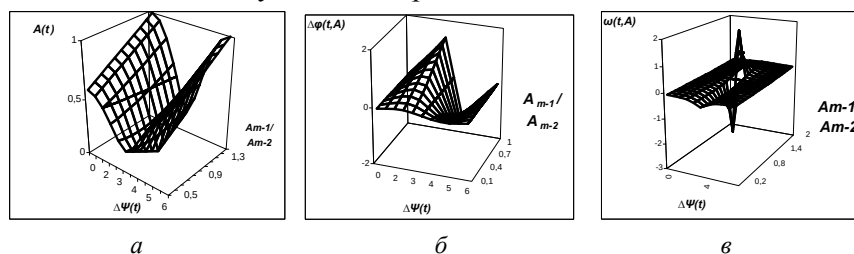


Рис. 1. Динамика изменения огибающей (а), фазы (б) та мгновенной частоты (в) суммы двух элементарных эхо-сигналов.

На рис. 1 а видно, что в результате сложения двух элементарных эхо-сигналов суммарное колебание характеризуется амплитудной модуляцией со значительной глубиной. Его огибающая изменяется по квазигармоническому закону и является медленной функцией

времени. Если разность фаз элементарных эхо-сигналов равняется 0 или  $2\pi$ , то огибающая суммарного колебания принимает максимальное значение, если разность фаз равняется  $\pi$  – огибающая минимальная.

Анализ рис. 1 б, показал, что фаза суммарного колебания, при отношении амплитуд элементарных эхо-сигналов меньшем единицы, является медленной функцией времени, а при отношении амплитуд эхо-сигналов близкому к единице и разности их фаз, равной  $\pi$ , фаза суммарного колебания быстро (скачкообразно) изменяет свое значение на  $\pi$ , происходит фазовая манипуляция. При этом мгновенная частота, которая является производной фазы, также не может быть медленной функцией времени, в характере ее изменения наблюдаются положительные и отрицательные выбросы, которые представлены на пространственном графике (рис. 1, в).

Итак, суммарное от двух элементарных эхо-сигналов колебания характеризуется амплитудными и угловыми изменениями, а также содержит манипуляцию фазы и выбросы мгновенной частоты. Необходимо отметить, что фазовая манипуляция, выбросы мгновенной частоты и уменьшение амплитуды огибающей до минимума происходят одновременно, когда значение разности фаз элементарных эхо-сигналов приближается или равно  $\pi$ . И наоборот, если значение разности фаз элементарных эхо-сигналов не равно  $\pi$ , то происходит стабилизация мгновенной частоты, огибающая принимает максимальные значения, а фаза суммарного колебания изменяется по гармоническому закону и является медленной функцией времени.

Такая статистическая связь между основными параметрами исследуемого сигнала имеет важное практическое значение для определения условий повышения точности измерения доплеровских сдвигов частоты.

### Компьютерное моделирование и анализ доплеровского сигнала

Необходимо заметить, что сумма лишь двух парциальных эхо-сигналов не может в полной мере воссоздать структуру исследуемого сигнала. Как отмечалось раньше, теоретический расчет колебания в виде суммы многих элементарных эхо-сигналов является весьма трудоемким. В связи с этим возникает необходимость привлечения современных высокоскоростных ЭВМ для компьютерного моделирования сигнала согласно математической модели (1) с целью дальнейшего исследования доплеровского сигнала в виде суммы большого количества элементарных эхо-сигналов.

Поскольку в данной статье речь идет о структуре доплеровских сигналов и законах изменения их огибающей и высокочастотного заполнения, то прежде, чем перейти к моделированию сигналов согласно модели (1), необходимо оговорить ограничения:

- объект плавания движется равномерно и прямолинейно;
- рассеивающий участок дна однородный и неизменный;
- качка, другие дестабилизирующие факторы и шумы среды отсутствуют;
- моделирование ограничивается распространением сигнала с момента излучения до момента приема его антенной лага.

Моделирование выполним для разных скоростей носителя, глубин и длительностей излученного сигнала. Определенные выше условия компьютерного моделирования дают возможность рассмотреть структуру исследуемого сигнала без влияния на нее искажающих и дестабилизирующих факторов среды формирования, распространения и обработки данных сигналов. Таким образом, можно вести речь о непосредственной природе доплеровских сигналов: законах поведения их огибающей и высокочастотного заполнения.

Определим исходные параметры моделирования. Пусть излучение и прием радиоимпульсов выполняется по первому лучу диаметрально-траверсной антенной системы лага, угол наклона которого относительно горизонта  $\alpha = 60^\circ$ , ширина характеристики направленности  $\gamma = 3^\circ$ . Частота заполнения излученного сигнала  $f_o = 250000$  Гц. Будем

выполнять моделирование для следующих диапазонов скоростей  $1, 5$  и  $7$  м/с и глубин  $10, 30, 200$  м. Длительность импульса излучения устанавливается согласно рекомендациям [5]. При моделировании будем имитировать несколько десятков рассеивающих элементов, которые находились в пределах озвученного участка дна.

Результаты моделирования структуры доплеровских сигналов представлены на рис. 3, а на рис. 4 и рис. 5 – соответственно графики мгновенных частот и спектров смоделированных сигналов. Заметим, что рис. 3 а, рис. 4 а и рис. 5 а относятся к сигналу, смоделированному при  $V_1=1$  м/с,  $H_1=10$  м,  $\tau_1=10$  мс. Рис. 3 б, рис. 4 б и рис. 5 б приведены для сигнала, смоделированного при  $V_2=5$  м/с,  $H_2=30$  м,  $\tau_2=30$  мс, и наконец, рис. 3 в, рис. 4 в и рис. 5 в характеризуют сигнал, смоделированный при  $V_3=7$  м/с,  $H_3=150$  м,  $\tau_3=100$  мс. Кроме этого для сравнения на рис. 2 а, б и в представлены осциллограммы реальных доплеровских сигналов, полученных в натурных условиях плавания при скорости носителя соответственно  $1$  м/с,  $5$  м/с и  $7$  м/с.

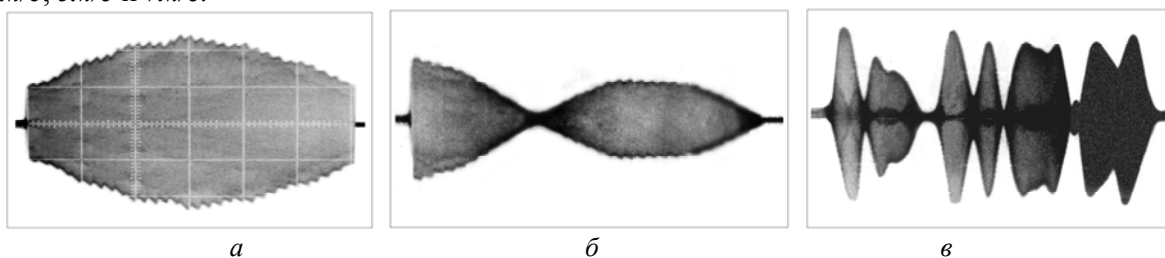


Рис. 2. Осциллограммы реальных доплеровских сигналов:

а -  $V_1=1$  м/с; б -  $V_2=5$  м/с; в -  $V_3=7$  м/с

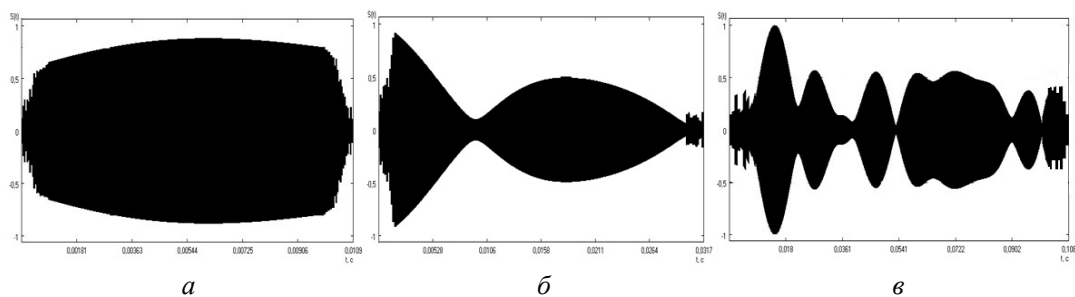


Рис. 3. Структуры доплеровских сигналов, смоделированные при:

а -  $V_1=1$  м/с,  $\tau_1=10$  мс; б -  $V_2=5$  м/с,  $\tau_2=30$  мс; в -  $V_3=7$  м/с,  $\tau_3=100$  мс

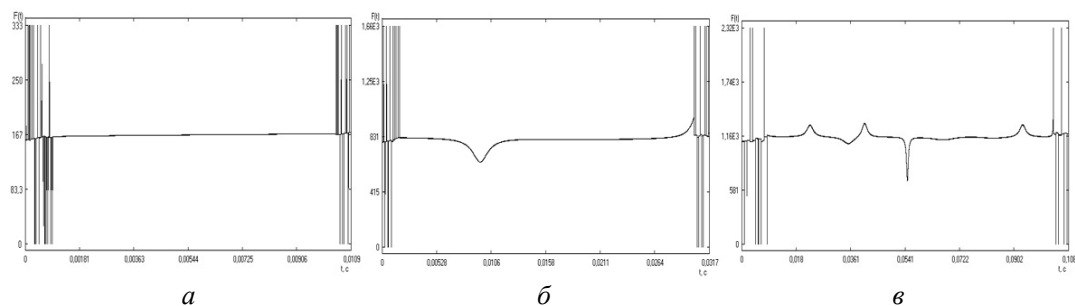


Рис. 4. Графики мгновенных частот доплеровских сигналов, смоделированные при:

а -  $V_1=1$  м/с,  $\tau_1=10$  мс; б -  $V_2=5$  м/с,  $\tau_2=30$  мс; в -  $V_3=7$  м/с,  $\tau_3=100$  мс

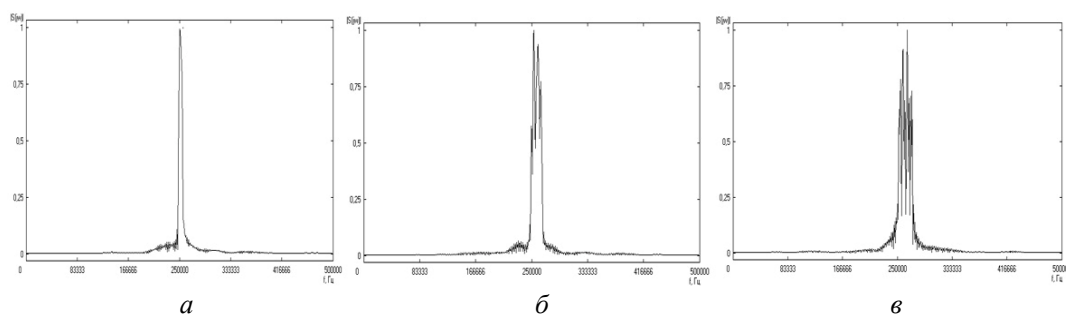


Рис. 5. Графики спектров доплеровских сигналов, смоделированные при:  
 а -  $V_1=1$  м/с,  $\tau_1=10$  мс; б -  $V_2=5$  м/с,  $\tau_2=30$  мс; в -  $V_3=7$  м/с,  $\tau_3=100$  мс

Начнем с анализа структуры смоделированных и реальных доплеровских сигналов. Смоделированные сигналы (рис. 3) имеют форму, похожую на реальные доплеровские сигналы (рис. 2). В частности на малых скоростях осциллограммы реальных (рис. 2 а и б) и смоделированных (рис. 3 а и б) доплеровских сигналов имеют вид амплитудно-модулированных колебаний с низкочастотной, близкой по форме к гармонической, огибающей. На высоких скоростях осциллограмма доплеровского сигнала (рис. 2 в) демонстрирует увеличение частоты модуляции амплитуды, при этом хорошо заметен отход от гармонического закона модуляции и принятие вида шумоподобного моделирующего сигнала. Аналогичное поведение огибающей наблюдается у физической модели доплеровского сигнала, смоделированного при высокой скорости (рис. 3 в).

Кроме этого, на участках фронтов смоделированных сигналов наблюдается значительные высокочастотные флуктуации огибающей, обусловленные особенностями формирования и распространения доплеровских сигналов с момента излучения до момента приема их антенной лага [3]. На осциллограммах реальных сигналов эти флуктуации не заметны, что, очевидно, связано с влиянием полосового фильтра („затягивание и сглаживание” фронтов сигналов), на выходе которого получены данные осциллограммы (рис. 2).

Рассмотрим тонкую структуру высокочастотного заполнения смоделированных сигналов. Для этого воспользуемся графиками мгновенной частоты (рис.4). Эти графики характеризуют значения частоты, которые определялись для каждого периода высокочастотного заполнения смоделированных сигналов по формуле:

$$F_{дi} = 1/T_i - f_0$$

где  $f_0$  – частота заполнения излученного радиоимпульса,  $i$  – порядковый номер периода,  $T_i$  – длительность  $i$ -того периода высокочастотного заполнения смоделированного сигнала.

Итак, на графике представлены мгновенные значения доплеровских сдвигов частоты  $F_{дi}$  в пределах длительности смоделированного сигнала (рис. 4).

Прежде всего заметим, что на всех графиках мгновенных частот крайние правые и левые их части характеризуются значительными флуктуациями частоты, а средняя часть характеризуется гладкими линиями, которые относительно медленно изменяются по определенному закону. Это значит, что в средней части смоделированного сигнала частота остается относительно постоянной, за исключением тех зон, где огибающая принимает минимальные значения.

Анализируя графики мгновенных частот (рис. 4) и соответствующих огибающих смоделированных сигналов (рис. 3), необходимо отметить закономерность и связь в характерах поведения огибающей и мгновенной частоты этих сигналов: на участках сигнала, где амплитуда огибающей принимает максимальные значения, соответствующие значения мгновенных частот остаются неизменными на уровне горизонтальной прямой, которая соответствует значению частоты Доплера, определенному для центральной оси характеристики направленности антенны лага. На участках сигнала, где амплитуды огибающей минимальные, мгновенные частоты стремительно смещаются относительно

частоты Доплера по определенному закону: принимают вид положительных „пиков” или отрицательных „провалов”, при этом отклонения от частоты Доплера происходят как в большую, так и в меньшую стороны. Таким образом, в пределах длительности смоделированных сигналов можно выделить фрагменты, которые характеризуются как постоянными, так и неустановившимися значениями частоты Доплера.

Наконец перейдем к графикам спектров доплеровских сигналов, изображенных на рис. 5. Их анализ показал, что с увеличением скорости происходит расширение и смещения спектра сигнала. При этом возникает большое количество дополнительных спектральных пиков, которые усложняют выделение точного значения частоты Доплера спектральными методами.

Ориентируясь на характер поведения мгновенной частоты и огибающей смоделированных сигналов, а также учитывая связь между ними, получаем возможность каждый сигнал разделить на три вида фрагментов и выполнить количественный анализ частоты Доплера в пределах отдельных фрагментов. Фрагменты 1-го вида ориентируются на те участки сигнала, в пределах которых огибающая принимает максимальные значения, а соответствующие мгновенные частоты постоянны и неизменны (имеют вид горизонтальной прямой). Фрагменты 2-го вида соответствуют тем участкам смоделированного сигнала, в пределах которых огибающая принимает минимальные значения, а соответствующие мгновенные частоты стремительно смещаются относительно частоты Доплера (имеют вид положительных „максимумов” и отрицательных „провалов”). И наконец, к фрагментам 3-го вида отнесем участки передних и задних фронтов смоделированных сигналов, которые по своим признакам не похожи на вышевыделенные и характеризуются значительными флюктуациями амплитуды и мгновенной частоты.

В пределах каждого фрагмента определим среднеарифметическое значение  $F_{Дj}$ , а также среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{Fj}$  частоты Доплера с помощью известных формул:

$$\bar{F}_{Дj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} F_{Дi}}{n_j}, \quad \sigma_{Fj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\bar{F}_{Дj} - F_{Дi})^2}{n_j}},$$

где  $j$  – порядковый номер фрагмента определенного вида,  $n_j$  – количество периодов высокочастотного заполнения в  $j$ -ом фрагменте.

После этого результаты расчетов для фрагментов одного вида объединялись по аналогичным формулам. Окончательные результаты расчетов занесены в таблицу 1.

Таблица 1

**Результаты исследования частоты Доплера в разных фрагментах смоделированных сигналов**

| V,<br>м/с | Фрагменты 1-го вида |                    |                | Фрагменты 2-го вида |                    |                | Фрагменты 3-го виду<br>(фронты) |                     |                 |
|-----------|---------------------|--------------------|----------------|---------------------|--------------------|----------------|---------------------------------|---------------------|-----------------|
|           | $\tau, c$           | $\Delta F_{Д}, Гц$ | $\sigma_F, Гц$ | $\tau, c$           | $\Delta F_{Д}, Гц$ | $\sigma_F, Гц$ | $\tau, c$                       | $\Delta F_{Д}, кГц$ | $\sigma_F, кГц$ |
| 1         | 0,07                | 3                  | 7              | 0,002               | 35                 | 55             | 0,002                           | 1-15                | 70-100          |
| 5         | 0,010               | 2                  | 6              | 0,010               | 40                 | 50             | 0,004                           | 1-10                | 30-50           |
| 7         | 0,400               | 4                  | 9              | 0,400               | 30                 | 60             | 0,020                           | 0,2-1               | 2-10            |

Анализируя результаты, представленные в таблице 1, отметим, что длительности фрагментов 1-го и 2-го видов приблизительно одинаковые, а длительности фронтов исследуемых сигналов составляют около десяти процентов от общей длительности сигнала. Разность по модулю  $\Delta F_{Д}$  между теоретическим значением частоты Доплера  $F_{Д}^*$

(определяется по классической формуле  $F_{Д}^* = f_0 \frac{2V}{c} \cos \alpha$ ) и экспериментальным  $F_{Д}$ , а также

среднеквадратическое отклонение  $\sigma_f$  частоты Доплера составляют: для фрагментов 1-го вида – единицы герц, для фрагментов 2-го вида – десятки герц, для фрагментов 3-го вида – десятки та сотни килогерц.

### Обобщение модели доплеровского сигнала

Всесторонний анализ математической модели (1) и соответствующей физической модели доплеровских сигналов, прежде всего, отображает известные особенности этих сигналов, которые представлены в классической литературе, а также подтверждаются экспериментальными исследованиями:

1. Доплеровский сигнал представляет собой узкополосный квазигармонический случайный процесс, который в общем случае описывается выражением  $s(t) = A(t) \cos[\Psi(t)]$  [6].

2. Структура доплеровского сигнала усложняется и видоизменяется с увеличением скорости движения носителя [7].

3. Спектр доплеровского сигнала является сплошным, причем он расширяется и смещается на оси частот с увеличением скорости движения носителя [8].

4. Крайняя левая и правая части (фронты) доплеровского сигнала характеризуются значительными флуктуациями огибающей и высокочастотного заполнения [9].

5. Длительность принятого сигнала больше длительности излученного радиоимпульса [8].

Кроме этого, в результате анализа математической и физической моделей доплеровских сигналов выявлены новые, до сих пор неизвестные, свойства этих сигналов, которые коррелируют между собой:

1. Структура основной части доплеровского сигнала, в отличие от структуры переднего и заднего фронтов этого сигнала, полностью сформирована и характеризуется плавным квазигармоническим законом изменения огибающей и мгновенной частоты.

2. Исследуемые сигналы содержат манипуляцию фазы и выбросы мгновенной частоты в тех местах, где амплитуда огибающей принимает минимальные значения.

3. Дисперсия мгновенной частоты тех фрагментов, которые соответствуют минимальным значениям огибающей смоделированных сигналов, составляет десятки и сотни герц, а дисперсия мгновенной частоты фрагментов, которые соответствуют максимальным значениям огибающей, изменяется на уровне единиц герц.

4. Частота заполнения на участках фронтов смоделированных сигналов на десятки килогерц отличается от значения частоты в пределах средней части доплеровского сигнала.

5. Связь между огибающей и высокочастотным заполнением этих сигналов позволяет выделить фрагменты, которые содержат постоянные и неизменные значения частоты Доплера.

Общий анализ математической и физической моделей доплеровского сигнала позволяет рассматривать доплеровский сигнал с точки зрения наиболее оптимальных подходов относительно его обработки (измерения). Доплеровский сигнал можно представить в виде графических зависимостей, которые интегрировано характеризуют поведение основных параметров сигналов и связей между ними (рис. 6). Поскольку такие графические зависимости вытекают из математической и физической моделей, то логично их считать обобщенной моделью доплеровских сигналов. Такая модель для разработчика может нести ценную информацию для выбора наиболее эффективных алгоритмов и приборов измерения основных параметров доплеровских сигналов.



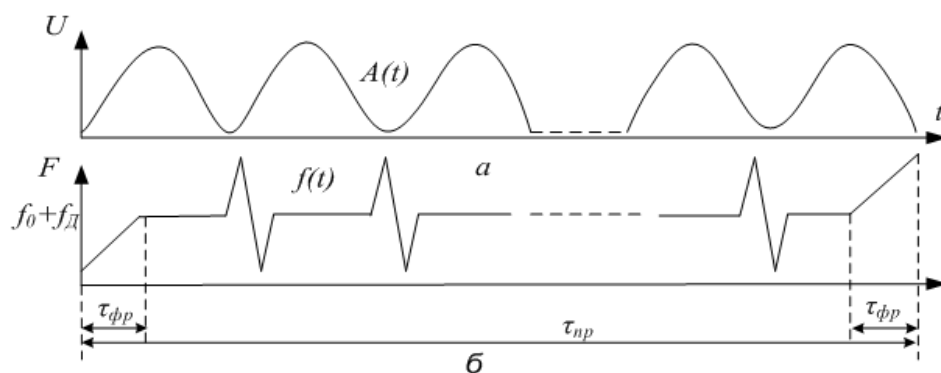


Рис. 6. Обобщенная модель доплеровского сигнала:  
 $a$  – огибающая сигнала  $A(t)$ ;  $б$  – высокочастотное заполнение  $f(t)$ .

### Выводы

В данной статье рассмотрены основные параметры (огибающая, фаза и высокочастотное заполнение) доплеровских сигналов и законы их поведения путем анализа математической модели (1) и соответствующего компьютерного моделирования этих сигналов. Результаты анализа и моделирования доплеровских сигналов соответствуют существующим представлениям об этих сигналах [6, 8], подтверждаются экспериментальными исследованиями реальных доплеровских сигналов [2, 7, 9] и воспроизводят новые свойства этих сигналов. На основе полученных результатов была обобщена модель доплеровского сигнала гидроакустического лага, определяющая условия повышения точности измерения доплеровских сдвигов частоты, а значит, и скорости движения носителя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барась С. Т. Аналіз джерел похибок вимірювання складових вектора швидкості судна // Вісник ВПІ. – 2000. – № 2. – С. 81 – 85.
2. Барась С. Т. Аналіз результатів експериментальних досліджень флуктуацій частоти доплерівського сигналу гідроакустичного лага в реальних умовах плавання // Вісник ВПІ. – 2003. – № 5. – С. 81 – 85.
3. Онищук О. В., Барась С. Т. Моделювання доплерівського сигналу // Вісник ВПІ. – 2007. – № 5. – С. 143–147.
4. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
5. Барась С. Т., Костюк О. А., Лободзінська Р. Ф. Оптимізація часової діаграми роботи гідроакустичного доплерівського лага // МНТЖ ВОТТІ. – 2000. № 2. – С. 87 – 91.
6. Абсолютные и относительные лаги / К.А. Виноградов, В.Н. Кошкарев, Б.А.Осюхин, А.А. Хребтов: Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.
7. Барась С. Т. Спектр обвідної доплерівського ехо-сигналу, розсіяного морським дном // Вісник ВПІ. – 2000. – № 5. – С. 74 – 76.
8. Гидроакустические навигационные средства / В. И. Бородин, Г. Е. Смирнов, Н. А. Толстяков, Г. В. Яковлев. – Л.: Судостроение, 1983. – 262 с.
9. Измеритель частоты гидроакустического доплеровского лага А.с. №1700492. СССР. / С. Т. Барась, В. А. Мельник, А. П. Мартынюк – № 4699484/21; Заявлено 31.05.89; Опубл. 23.12.91, Бюл. № 47. – 5с.: ил.

**Онищук Олег Владимирович** — аспирант кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры;

**Барась Святослав Тадионович** — доцент кафедры проектирования компьютерной и телекоммуникационной аппаратуры.

Винницкий национальный технический университет.