

УДК 681.883.41

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДОПЛЕРОВСКОГО СИГНАЛА ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЛАГА

© С.Т. Барась, О.В. Онищук, 2008

Винницкий национальный технический университет

Розглянуто математичну та фізичну моделі доплерівських сигналів, в основі побудови яких лежить феноменологічний підхід. Виконано аналіз та встановлено кореляцію динаміки змін обвідної, фази та миттєвої частоти з використанням як математичної, так і фізичної моделей. Визначені ознаки, що підтверджують адекватність фізичної моделі реальним доплерівським сигналам. Запропоновано фрагментацію доплерівських сигналів, яка дозволила сформулювати основні закономірності поведінки частоти в межах існування ехо-сигналу та вимоги щодо алгоритму роботи вимірювача частоти.

Рассмотрены математическая и физическая модели доплеровских сигналов, в основе построения которых лежит феноменологический подход. Выполнен анализ и установлена корреляция динамики изменений огибающей, фазы и мгновенной частоты как по математической, так и по физической моделям. Определены признаки, которые подтверждают адекватность физической модели реальным доплеровским сигналам. Предложена фрагментация доплеровских сигналов, которая позволила сформулировать основные закономерности поведения частоты в пределах существования эхо-сигнала и требования к алгоритму работы измерителя частоты.

The mathematical and physical models of the Doppler signals, the phenomenological modeling of them being the basic approach, have been studied. The analysis and correlation of the dynamics of envelope alteration, phase and instantaneous frequency as provided by the mathematical and physical models have been performed. The criteria certifying the physical model equivalence to the actual Doppler signals have been defined. Doppler signals fragmentation, enabling the definition of the principal mechanisms of frequency mode of behavior within the echo-signal and according to the algorithm of the frequency meter operation has been suggested.

ДОПЛЕРОВСКИЙ СИГНАЛ, ЛАГ, ЭХО-СИГНАЛ, ЧАСТОТА, МОДЕЛИРОВАНИЕ

Среди источников погрешности измерения составляющих вектора скорости объекта надводного или подводного плавания гидроакустическим лагом структуру доплеровского сигнала следует считать самой существенной из них [1]. Именно структура доплеровского сигнала влияет на предельные возможности измерения частоты высокочастотного заполнения и, таким образом, определяет погрешность доплеровского лага. Следовательно, всестороннее исследование доплеровских сигналов является чрезвычайно важной проблемой на пути определения потенциальной точности измерения составляющих вектора скорости носителя гидроакустическим лагом. Исследование реальных доплеровских сигналов является малоэффективным из-за их быстротечности, поэтому целесообразнее всего это делать путем анализа их математической и физической моделей, полученных с учетом процессов, которые влияют на формирование структуры сигналов при прохождении ими пути «передатчик-дно-приемник». Физические модели сигналов могут быть получены путем использования имитационного моделирования.

Анализ математической модели

Рассмотрим процесс рассеивания излученного сигнала участком дна и формирования донного эхо-сигнала при таких упрощенных условиях: носитель лага движется равномерно и прямолинейно со скоростью V , качка отсутствует, среда распространения не влияет на спектральный состав эхо-сигнала.

Известно [2, 3], что в процессе излучения и приема сигнала подвижным объектом, а также во время его распространения в водной среде и рассеивания дном, фаза сигнала изменяется, что, собственно, и влияет на его окончательную структуру. Следовательно, на интервале своего существования эхо-сигнал на приемной антенне доплеровского лага можно записать в таком виде:

$$s(t) = A(t) \cos[2\pi f_0 t + \phi_0 - \Delta\phi(t)], \quad (1)$$

где ϕ_0 – начальная фаза;

$A(t)$ – амплитуда;

f_0 – несущая частота;

$\Delta\phi(t)$ – переменная составляющая фазы сигнала.

Согласно принципу Гюйгенса этот сигнал можно представить в виде суммы большого количества рассеянных дном i -х элементарных эхо-сигналов:

$$s(t) = \sum_{i=1}^{M(t)} A_i \cos[\Psi_i(t)], \quad (2)$$

где $A_i, \Psi_i(t)$ – амплитуда и полная фаза i -го элементарного эхо-сигнала,

$M_i(t)$ – количество элементарных эхо-сигналов, которое изменяется во времени и зависит от момента приема и длительности каждого элементарного эхо-сигнала.

Найдем аналитическое выражение для составляющей $\Delta\phi_i(t)$ i -го элементарного эхо-сигнала, которая является составляющей полной фазы. Для этого будем пользоваться схематическим воссозданием динамики движения носителя, а также излучения, рассеивания i -м рассеивателем и приема гидроакустических сигналов носовым лучом антенны лага, рис. 1.

Из рис. 1 видно, что в течение длительности излучения импульса τ_0 за счет движения носителя расстояние R_{1i} между подвижным объектом излучения и i -м рассеивателем дна в каждый момент времени уменьшается на величину $\Delta R_{1i}(t)$, которую можно определить как проекцию вектора скорости \overline{V} подвижного объекта на радиус-вектор, проведенный от передающей антенны к i -му рассеивателю дна.

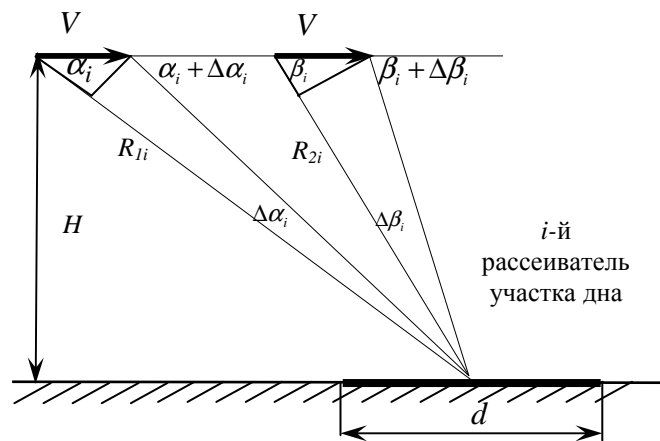


Рис.1 – Озвучивание излученным сигналом участка дна

Тогда для текущего времени t можно записать:

$$\Delta R_{1i}(t) = Vt \cos[\alpha_i + \Delta\alpha_i(t)]. \quad (3)$$

Выражение (3) определяет разницу хода, которая в свою очередь вызывает изменение фазы, следовательно, и частоту Доплера. Как показано в [3], с учетом приобретенных доплеровских сдвигов составляющая фазы для i -го элементарного сигнала определяется по такой формуле:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i(t) = \Delta\varphi_{1i}(t) + \Delta\varphi_{2i}(t) = & \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{li}}{c} \frac{H}{\sin \alpha_i} - \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{li}}{c} Vt \cos[\alpha_i + \Delta\alpha_i(t)] + \\ & + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{li}}{c} \frac{H}{\sin \beta_i} - \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{li}}{c} Vt \cos[\beta_i + \Delta\beta_i(t)]. \end{aligned} \quad (4)$$

Вышеприведенные рассуждения и математическая модель доплеровского сигнала (2) с учетом выражения (4) являются теоретической основой для создания физической модели доплеровского сигнала. Такой феноменологический подход к имитационному моделированию доплеровского сигнала может быть воплощен и реализован в среде Delphy 7 при создании целого массива моделей.

Прежде чем перейти к анализу физических моделей доплеровских сигналов, надлежит сделать предварительные оценки их свойств на основе рассмотрения математической модели. Такую возможность предоставляет преобразование Гильберта [4], которое применяется обычно к узкополосным процессам. Основные результаты анализа сигнала, полученного в виде суммы двух элементарных эхо-сигналов, который выполнен с применением отмеченного подхода, иллюстрируются приведенными на рис. 2 пространственными графиками.

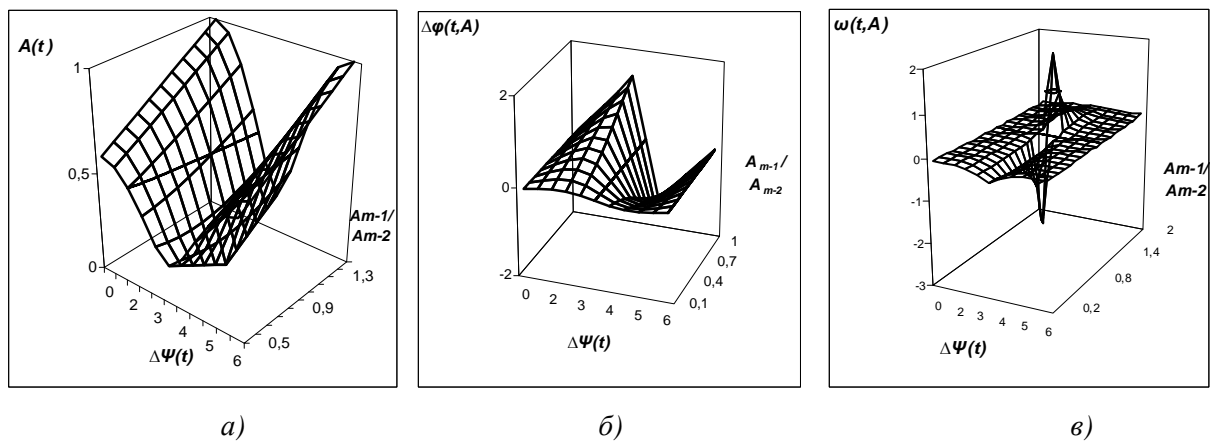


Рис.2 – Динамика изменения огибающей (а), фазы (б) и мгновенной частоты (в) суммы двух элементарных эхо-сигналов

Из рис. 2а 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 разница фаз элементарных эхо-сигналов кратна 2π , то амплитуда огибающей суммарного колебания принимает максимальное значение, если разница фаз равняется π , 3π , 5π и так далее – амплитуда огибающей минимальная.

Анализ рис. 2б показывает, что фаза суммарного колебания при отношении амплитуд элементарных эхо-сигналов меньше единицы, является медленной функцией времени, а при отношении амплитуд эхо-сигналов, близкому к единице и разности фаз, равной π , 3π , 5π и так далее, фаза суммарного колебания быстро (скачкообразно) изменяет свое значение на π , то есть происходит фазовая манипуляция. При этом мгновенная частота, которая является производной фазы, также отображает эти изменения. В характере изменений мгновенной частоты наблюдаются положительные и отрицательные выбросы, которые представлены на пространственном графике, рис. 2в.

Следовательно, суммарное от двух элементарных эхо-сигналов колебание характеризуется выше отмеченными амплитудными, фазовыми и частотными изменениями, причем между этими изменениями наблюдается тесная корреляция.

Анализ физической модели

Понятно, что сумма лишь двух элементарных эхо-сигналов не может в полной мере воспроизвести структуру доплеровского сигнала. Именно поэтому с привлечением современных высокоскоростных ЭВМ было выполнено имитационное компьютерное моделирование сигнала согласно математической модели (2) в виде суммы большого количества элементарных эхо-сигналов. При этом были установлены такие ограничения:

- объект плавания движется равномерно и прямолинейно;

- рассеиваемый участок дна однороден и неизменяем;
- качка, другие дестабилизирующие факторы и шумы среды отсутствуют;
- моделирование ограничивается распространением сигнала с момента его излучения до момента приема антенной лага.

Моделирование выполнялось для разных скоростей носителя, глубин акватории и длительности излученного сигнала. Приведенные выше условия имитационного 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 глубинной природе доплеровских сигналов, которая отображается в их структуре, то есть законах поведения огибающей и высокочастотного заполнения.

Отметим исходные параметры моделирования. Пусть излучение и прием радиоимпульсов выполняются по первому лучу диаметрально-граверзной антенной системы лага, угол наклона которого относительно горизонта $\alpha = 60^0$, ширина характеристики направленности $\gamma = 3^0$. Несущая частота излученного сигнала $f_0 = 250000 \text{Гц}$. Будем осуществлять моделирование для скоростей 1, 5 и 7 м/с и глубин 10, 30, 200 м. Длительность импульса излучения устанавливается в соответствии с рекомендациями [5]. При моделировании имитировалось несколько десятков рассеивающих элементов, которые находятся в пределах озвученной площадки дна.

Результаты моделирования доплеровских сигналов представлены на рис. 3, а на рис. 4 и рис. 5 приведены, соответственно, графики мгновенных частот и спектров смоделированных сигналов. Отметим, что рис. 3а, 4а и 5а относятся к сигналу, смоделированному для $V_1 = 1 \text{ м/с}, H_1 = 10 \text{ м}, \tau_1 = 10 \text{ мс}$. Рис. 3б, 4б и 5б приведены для сигнала, смоделированного для $V_2 = 5 \text{ м/с}, H_2 = 30 \text{ м}, \tau_2 = 30 \text{ мс}$, а рис. 3в, 4в и 5в характеризуют сигнал, смоделированный для $V_3 = 7 \text{ м/с}, H_3 = 150 \text{ м}, \tau_3 = 100 \text{ мс}$. Кроме этого, для сравнения, на рис. 6 приведены осциллограммы реальных доплеровских сигналов, полученные в натуральных условиях плавания для скоростей, соответственно, 1, 5 и 7 м/с.

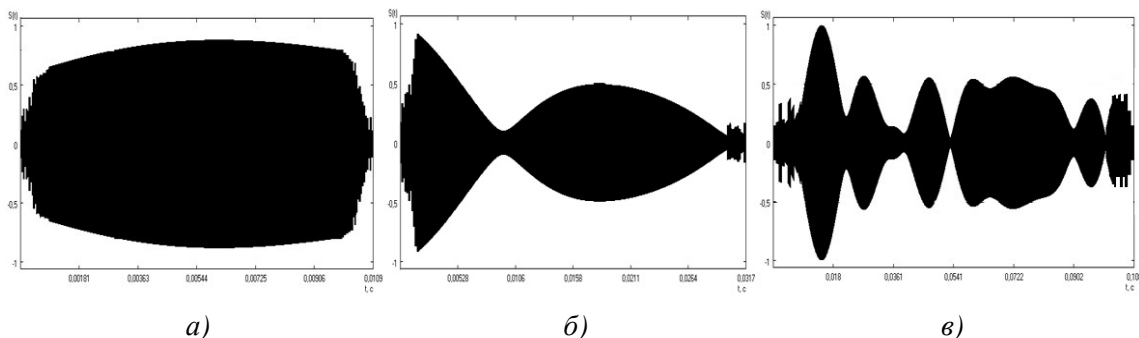


Рис. 3 – Структура доплеровских сигналов, смоделированных при:
 а) – $V_1 = 1 \text{ м/с}, \tau_1 = 10 \text{ мс}$; б) – $V_2 = 5 \text{ м/с}, \tau_2 = 30 \text{ мс}$; в) – $V_3 = 7 \text{ м/с}, \tau_3 = 100 \text{ мс}$

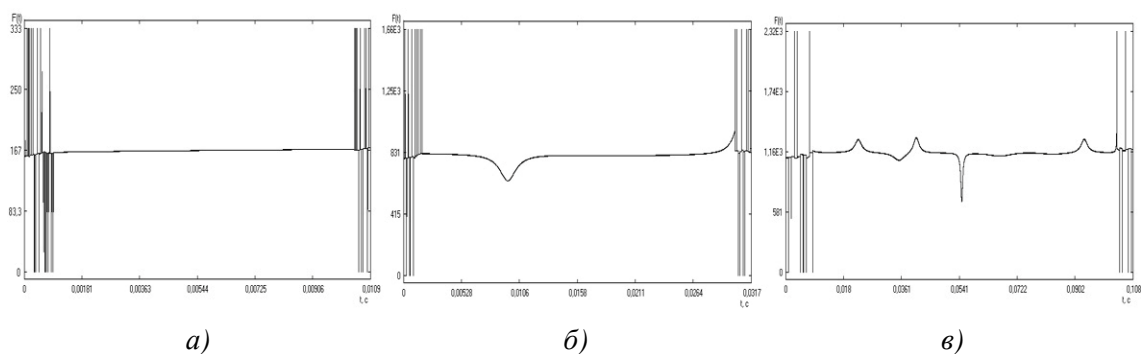


Рис. 4 – Графики мгновенных частот доплеровских сигналов, смоделированных для:
 а) – $V_1 = 1 \text{ м} / \text{с}, \tau_1 = 10 \text{ м} / \text{с}$; б) – $V_2 = 5 \text{ м} / \text{с}, \tau_2 = 30 \text{ м} / \text{с}$; в) – $V_3 = 7 \text{ м} / \text{с}, \tau_3 = 100 \text{ м} / \text{с}$

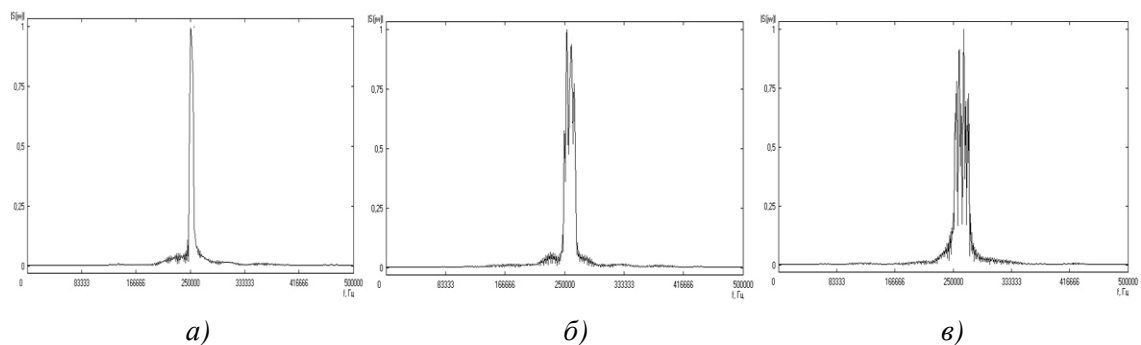


Рис. 5 – Графики спектров доплеровских сигналов, смоделированных для:
 а) – $V_1 = 1 \text{ м} / \text{с}, \tau_1 = 10 \text{ м} / \text{с}$; б) – $V_2 = 5 \text{ м} / \text{с}, \tau_2 = 30 \text{ м} / \text{с}$; в) – $V_3 = 7 \text{ м} / \text{с}, \tau_3 = 100 \text{ м} / \text{с}$

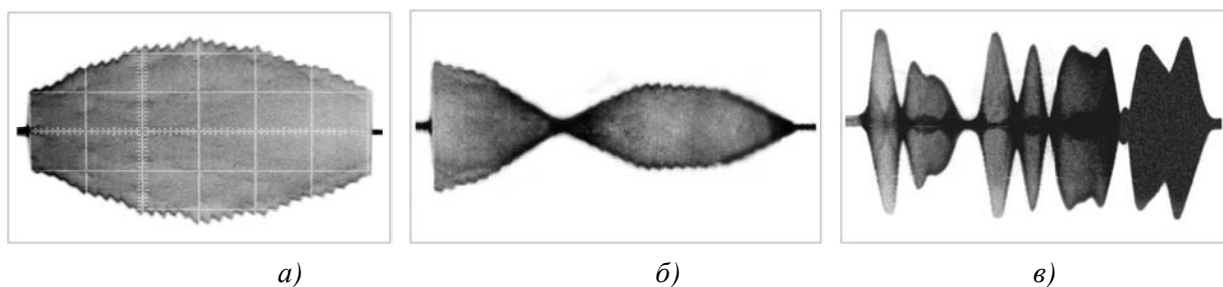


Рис. 6 – Осциллограммы реальных доплеровских сигналов:
 а) – $V_1 = 1 \text{ м} / \text{с}$; б) – $V_2 = 5 \text{ м} / \text{с}$; в) – $V_3 = 7 \text{ м} / \text{с}$

Самый очевидный критерий сравнения полученных физических моделей и реальных доплеровских сигналов – их форма для одинаковых или близких начальных условий. С этой точки зрения сходство моделей и реальных сигналов очевидно (см. рис. 3 и рис. 6).

Обратим внимание на зависимость формы огибающей моделей и реальных сигналов от скорости носителя. При увеличении скорости, следовательно, и увеличении доплеровских

сдвигов, огибающие принимают вид случайных процессов, причем спектральный состав огибающих обоих типов сигналов (моделей и реальных сигналов) следует признать достаточно близким.

Следует также обратить внимание на высокочастотные флуктуации огибающей в зонах переднего и заднего фронтов физических моделей эхо-сигнала, рис. 3. Такие флуктуации не наблюдаются в реальных сигналах, рис. 6, что объясняется, очевидно, их прохождением частотно-избирательным трактом доплеровского лага. Учитывая установленные ограничения для моделирования, объяснения относительно существования таких флуктуаций следует искать в особенностях формирования эхо-сигнала озвученной площадкой дна.

Структура огибающей является важной составляющей физической модели доплеровского сигнала. Ее параметры определяют механизм прохождения сигнала трактом приема, предварительного и основного усиления и узкополосной фильтрации. Но в данной работе сосредоточимся преимущественно на анализе тонкой структуры смоделированных сигналов. Для этого обратимся к графикам мгновенной частоты, рис. 4. Эти графики характеризуют значения частоты, которые определялись апостериорно для каждого k -го периода высокочастотного заполнения смоделированных сигналов по формуле:

$$F_{Дк} = \frac{1}{T_k} - f_0, \quad (5)$$

где f_0 – частота заполнения излученного радиоимпульса;

T_k – длительность k -го периода высокочастотного заполнения смоделированного сигнала.

На графике приведены мгновенные значения доплеровских сдвигов частоты $F_{Дк}$ в пределах длительности смоделированного сигнала. В первую очередь отметим, что на всех приведенных графиках мгновенные частоты в зонах переднего и заднего фронтов характеризуются значительными флуктуациями, тогда как средняя зона отображается гладкими линиями, которые относительно медленно изменяются во времени. Но и в средней зоне сигнала можно заметить существенные отклонения частоты от некоторого устоявшегося значения. Показательно, что эти отклонения совпадают во времени с минимальной амплитудой огибающей.

Обобщая вышеприведенные рассуждения, которые касаются физической модели доплеровских сигналов и базируются на анализе графиков мгновенных частот, рис. 4, и соответствующих огибающих смоделированных сигналов, рис. 3, можно сформулировать такие выводы.

Во-первых, наблюдается корреляция между изменениями амплитуды огибающей и значением мгновенной частоты этих сигналов. На участках сигнала, где амплитуда

огibaющей принимает максимальные значения, соответствующие значения мгновенных частот остаются неизменными, что отображается горизонтальной прямой, рис. 4, которая «поднята» на значение частоты Доплера, определенного для центральной оси характеристики направленности антенны лага. На участках сигнала, где амплитуда огibaющей минимальна, значение мгновенной частоты стремительно смещается относительно частоты Доплера в ту или другую сторону. Следовательно, в пределах длительности смоделированных сигналов можно выделить фрагменты, которые характеризуются разными значениями частоты Доплера.

Во-вторых, обращает на себя внимание тот факт, что длительности зон стабильной (квазистабильной) частоты превышают длительность зон выбросов, но такая благоприятная для разработчика закономерность ухудшается с ростом скорости носителя.

В-третьих, нет оснований утверждать, что выбросы частоты в зонах минимальной амплитуды огibaющей и зонах переднего и заднего фронтов имеют значения, которые являются одинаковыми по уровню, но противоположные по знаку. Если бы такая закономерность имела место, то это бы значительно способствовало повышению точности измерения частоты заполнения сигнала.

Кроме того, анализ спектров доплеровских сигналов, изображенных на рис. 5, показывает, что с увеличением скорости носителя происходит их расширение. Наблюдается также незначительное смещение спектра сигнала по частотной оси, которое дает основание прогнозировать появление систематической погрешности измерения частоты (составляющих вектора скорости) при увеличении скорости носителя. Одновременно следует отметить, что увеличение скорости носителя способствует возникновению большого количества дополнительных спектральных пиков, что усложняет выделение точного значения частоты Доплера спектральными методами.

Перейдем к количественному анализу полученных физических моделей доплеровского сигнала. Для этого сначала, ориентируясь на характер поведения мгновенной частоты и огibaющей смоделированных сигналов, а также учитывая связь между ними, выделим в пределах длительности физической модели три вида фрагментов и выполним для каждого из них количественный анализ частоты Доплера. Фрагменты первого вида относятся к тем участкам сигнала, в пределах которых огibaющая принимает максимальные значения, а соответствующие мгновенные частоты практически неизменны (на соответствующем графике, рис. 4, имеют вид горизонтальной прямой). Фрагменты второго вида отвечают тем участкам смоделированного сигнала, в пределах которых амплитуда огibaющей минимальна, а соответствующие мгновенные частоты стремительно смещаются относительно постоянного значения частоты Доплера в ту или иную сторону, создавая выбросы частоты. И, наконец, к фрагментам третьего вида отнесем зоны переднего и заднего фронтов смоделированных сигналов, которые отличаются от предыдущих не только по часовому признаку, но и по уровням и спектрам флуктуаций частоты заполнения и амплитуды.

После проведенной фрагментации физических моделей определим в пределах каждого фрагмента среднеарифметическое значение частоты Доплера $\bar{F}_{Дj}$, а также его среднеквадратичное отклонение σ_{Fj} по известным формулам:

$$\bar{F}_{Дj} = \frac{\sum_{i=1}^{n_j} F_{Дi}}{n_j};$$

$$\sigma_{Fj} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_j} (\bar{F}_{Дj} - F_{Дi})^2}{n_j}},$$
(6)

где j – порядковый номер фрагмента;

n_j – количество периодов высокочастотного заполнения в j -м фрагменте.

Для удобства анализа результатов будем рассчитывать разницу по модулю между теоретическим $F_{Д}^*$ и экспериментальным $\bar{F}_{Дj}$ значениями частоты Доплера:

$$\Delta F_{\dot{A}} = \left| \bar{F}_{\dot{A}} - F_{\dot{A}}^* \right| = \left| \bar{F}_{\dot{A}} - \frac{2 \cdot V}{c} f_0 \cos \alpha \right|.$$
(7)

Результаты расчетов для фрагментов одного вида объединялись по формулам, аналогичным (6). Окончательные результаты расчетов занесены в табл. 1. Символом τ в табл. 1 обозначены длительности соответствующих фрагментов (суммарная длительность на интервале существования эхо-сигнала).

Из табл. 1 видно, что флуктуации частоты в пределах фрагментов первого вида характеризуются наименьшим среднеквадратичным отклонением σ_F частоты Доплера (единицы Гц), а также наименьшей систематической составляющей $\Delta F_{Д}$ (единицы Гц). Очевидно, фрагменты первого вида следует признать единственными зонами - носителями объективной информации о доплеровских сдвигах.

Табл.1 – Результаты исследования частоты Доплера в разных фрагментах смоделированных сигналов

V, м/с	Фрагменты 1-го вида			Фрагменты 2-го вида			Фрагменты 3-го вида (фронты)		
	τ, c	$\Delta F_{Д}, Гц$	$\sigma_F, Гц$	τ, c	$\Delta F_{Д}, Гц$	$\sigma_F, Гц$	τ, 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

Случайная и систематическая составляющие флуктуаций частоты в зонах фрагментов второго и третьего вида на порядок (несколько порядков) превышают соответствующие значения в зоне фрагментов первого вида и, понятно, не могут использоваться для определения составляющих вектора скорости.

Обобщая результаты проведенного анализа математической и физической моделей доплеровского сигнала и констатируя при этом их взаимную адекватность, а также адекватность с реальными доплеровскими сигналами, можно подтвердить известные [6, 7, 8] и сделать ряд новых важных выводов.

1. Структура доплеровского сигнала видоизменяется в зависимости от скорости движения носителя, причем с увеличением скорости наблюдается ее усложнение [6].

2. Спектр доплеровского сигнала является сплошным; он расширяется и смещается по оси частот с увеличением скорости движения носителя [7].

3. Зоны переднего и заднего фронтов доплеровского сигнала характеризуются значительными флуктуациями огибающей и высокочастотного заполнения.

4. Длительность эхо-сигнала больше длительности излученного радиоимпульса.

5. Структура основной части доплеровского сигнала, в отличие от зон переднего и заднего фронтов, полностью сформирована и характеризуется плавным законом изменения огибающей и относительным постоянством мгновенной частоты.

6. Исследуемые сигналы содержат манипуляцию фазы и выбросы мгновенной частоты в тех местах, где амплитуда огибающей принимает минимальное значение; среднеквадратичное отклонение частоты в этих зонах составляет десятки и сотни Гц.

7. Мгновенная частота в зонах переднего и заднего фронтов существенно отличается от значения в установившейся зоне эхо-сигнала, а ее дисперсия достаточно большая.

8. Случайная и систематическая составляющие флуктуаций частоты в пределах фрагментов, которые отвечают максимальным значениям амплитуды сигнала, составляют единицы Гц; эти зоны могут считаться единственными зонами-носителями объективной информации о доплеровских сдвигах.

Таким образом, математическая и физическая модели доплеровских сигналов отвечают существующим представлениям об этих сигналах [5, 7], являются адекватными реальным доплеровским сигналам [6, 8] и отображают их новые важные свойства. Полученные результаты позволяют обосновать и определить условия повышения точности измерения доплеровских сдвигов частоты, что, в свою очередь, дает возможность повысить точность определения составляющих вектора скорости носителя.

Литература

1. Барась С.Т. Аналіз джерел похибок вимірювання складових вектора швидкості судна. // Вісник ВПІ – 2000. -№ 2. - С.81-85.

2. Онищук О.В., Барась С.Т. Моделювання доплерівського сигналу // Вісник ВПІ – 2007. -№5.-С.143-147.
3. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448с.
4. Барась С.Т., Костюк О.А., Лободзінська Р. Ф. Оптимізація часової діаграми роботи гідроакустичного доплерівського лага.// МНТЖ ВОТТП – 2000. №2. – С.87-91.
5. Абсолютные и относительные лаги / К.А. Виноградов, В.Н. Кошкарев, Б.А.Осюхин, А.А. Хребтов: Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 264 с.:ил.
6. Барась С.Т. Спектр обвідної доплерівського ехосигналу, розсіяного морським дном // Вісник ВПІ - 2000. -№5.-С.74-76.
7. Гидроакустические навигационные средства / В.И. Бородин, Г.Е. Смирнов, Н.А. Толстяков, Г.В. Яковлев. - Л.: Судостроение, 1983. 262с.
8. Измеритель частоты гидроакустического доплеровского лага: А.с. 1700492 СССР / С.Т.Барась, В.А.Мельник, А.П.Мартынук - Заявлено 31.05.89, опубл. 23.12.91, Бюл.№47.- 5с, ил.