

## Аппроксимационная фильтрация помеховых отражений в гидроакустических сигналах

В. Г. ГЕТМАНОВ\*, А. А. ФИРСОВ\*\*

\* Геофизический центр РАН, Москва, Россия, e-mail: vgetm@starnet.ru  
 \*\* Научно-исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Предложен метод аппроксимационной фильтрации помеховых отражений для решения задачи измерений координат объекта со звуковым излучателем, движущегося в водной среде. При измерениях использована пассивная локационная гидроакустическая система на основе сети гидрофонов. Для цифровой обработки доплеровских гидроакустических сигналов с их выходов применен двухэтапный аппроксимационный алгоритм. Рассмотрен пример реализации метода фильтрации и его погрешности.

**Ключевые слова:** отражение от водной поверхности, доплеровские гидроакустические сигналы, аппроксимационный алгоритм.

The approximatinal filtration method of noise reflections is proposed for solution of a task of measurement of coordinates of moving in aquatic environment object with sound emitter. The measurements are carried out by means of passive location hydroacoustic system based on network of hydrophones. For digital processing of Doppler hydroacoustic signals from hydrophones outputs the two-stage approximation algorithm is used. The example of filtration method realization and its errors are considered.

**Key words:** reflection from water surface, Doppler hydro-acoustic signals, approximation algorithm.

Измерение координат движущегося под водой объекта с акустическим излучателем при помощи пассивных гидролокационных систем — достаточно актуальная задача, востребованная для разнообразных технических приложений [1]. Как правило, решение измерительных задач, реализуемых в водных средах, при наблюдениях гидроакустических сигналов связано с необходимостью учета возможных помех, образующихся в результате сложных отражений излучаемых акустических волн от дна, берегов и водной поверхности. Многочисленным вопросам анализа указанных отражений посвящена обширная литература [2—4].

В настоящей статье рассмотрен достаточно проблемный случай помеховых отражений от зеркальной (спокойной) водной поверхности в случае малых дальностей, для которых такие сигналы почти совпадают по частоте и амплитуде с основным сигналом. Действие указанных помех чаще всего приводит к аппаратным сбоям и появлению аномальных погрешностей в измерениях.

Простейший вариант модели формирования полезного и помехового сигналов вследствие отражения от зеркальной водной поверхности для малых дальностей представлен в [5]. При движении объекта в водной среде акустичес-

кий сигнал распространяется от объекта к гидрофону двумя путями: прямым и зеркальным отражением от водной поверхности, что равносильно появлению дополнительного мнимого объекта с излучателем. Зеркально отраженный сигнал, пришедший к гидрофону, является помеховым.

Материалы статьи базируются на методах локальной аппроксимации нестационарных колебательных сигналов, разработанных в [6, 7], и представляют собой развитие результатов, полученных в [8—10]. Следует отметить, что существующие методы измерений координат движущихся объектов при помощи пассивных гидролокационных систем, описанные в [11—14], применимы, в основном, в условиях простых помех, а для случаев сложных помех, например, из-за отражений, указанные методы практически неработоспособны. Предлагаемый метод вследствие применения аппроксимационной фильтрации функционирует вполне удовлетворительно в условиях помеховых отражений.

**Схема модельного движения объект—гидрофон. Модель гидроакустического сигнала. Постановка задачи.** Рассмотрим взаимное движение объекта со звуковым излучателем и гидрофона; сформируем модель наблюдаемого гидроакустического сигнала с нестационарными доплеровскими частотами. Для упрощения выкладок принят случай одного неподвижного гидрофона.

Схема модельного движения системы реального  $e_1$  и мнимого  $e_2$  излучателей относительно гидрофона  $p$  для вертикальной плоскости изображена на рис. 1. Текущие координаты излучателей, перемещающихся равномерно и параллельно горизонтальной оси координат, вычисляются по следующим соотношениям:

$$x(t) = x(0) + vt; \quad y_n(t) = y_n(0), \quad (1)$$

где  $x(0)$ ,  $y_n(0)$  — начальные координаты объектов с номерами  $n = 1, 2$  (1 — реальный излучатель, 2 — мнимый излучатель), причем в силу симметрии  $y_1(0) = -y(0)$ ,  $y_2(0) = y(0)$ ;  $v$  — скорость движения излучателей  $e_1, e_2$ .

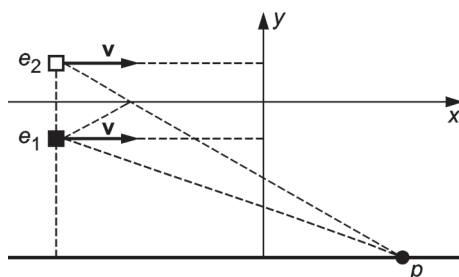


Рис. 1. Схема движения реального  $e_1$  и мнимого  $e_2$  излучателей относительно гидрофона  $p$

Координаты неподвижного гидрофона ( $x_p, y_p$ ) известны. Звуковые излучатели принимаются точечными, их сигналы представляются гармоническими функциями с заданной постоянной частотой  $f_0$ . Разности координат гидрофона и движущихся объектов выражаются формулами

$$\Delta x(t) = x(0) + vt - x_p; \Delta y_n(t) = y_n(0) - y_p, n = 1, 2. \quad (2)$$

Функции дальностей имеют вид

$$D_n(t) = \left( \Delta x^2(t) + \Delta y_n^2(t) \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Продифференцируем  $D_n(t)$  и получим выражения для функций доплеровских скоростей

$$v_{d,n}(t) = -\Delta x(t) v / D_n(t). \quad (4)$$

Функции нестационарных доплеровских частот  $f_{d,n}(t)$ , зависящие от доплеровских скоростей (4), при условии неподвижности гидрофона представляются формулой

$$f_{d,n}(t) = f_0(1 - v_{d,n}(t)/c_0), \quad (5)$$

где  $c_0$  — скорость звука в воде.

Выражение (5) является приближенным [15]: данная линейная зависимость справедлива, когда  $|v_{d,n}(t)| \ll c_0$ . Доплеровские фазовые функции  $\varphi_{d,n}(t)$  выходного сигнала приемника гидрофона формируются на основе интегрирования функций доплеровских частот

$$\varphi_{d,n}(t) = 2\pi f_0 (1 - D_{d,n}(t)/c_0) + \varphi_{d,n0},$$

где  $\varphi_{d,n0}$  — некоторые начальные фазы.

Результат наблюдения  $y_n(t)$  доплеровского гидроакустического сигнала от  $n$ -го излучателя без учета шумовой аддитивной составляющей записывается как

$$y_n(t) = E_n(t) \cos \varphi_{d,n}(t), \quad (6)$$

где амплитудные функции  $E_n(t)$  в данном случае изменяются обратно пропорционально дальностям,

$$E_n(t) = k_{0,n} / D_n(t); \quad (7)$$

$k_{0,n}$  — коэффициент пропорциональности.

В результате суммирования  $y_n(t)$  формируется сигнал, наблюдаемый в данном случае в виде функциональной модели двухчастотного гидроакустического сигнала на выходе приемника гидрофона:

$$y(t) = E_1(t) \cos \varphi_{d1}(t) + E_2(t) \cos \varphi_{d2}(t) + w(t), \quad (8)$$

где  $w(t)$  — помехи при наблюдении.

В амплитудных и фазовых (частотных) функциях сигнала (8), очевидно, содержится вся информация о параметрах движения системы излучатели—приемник.

Здесь ставится задача: по проведенным наблюдениям  $y(t)$  с учетом модельных представлений (1)—(4) о характере движения найти координаты движущегося объекта  $x^\circ(t)$ ,

$y_i^\circ(t)$  в виде функций времени для заданного интервала  $(0, t_f)$ . Для нахождения координат предложены следующие алгоритмы: аппроксимационной фильтрации отражений помех от водной поверхности для двухчастотных доплеровских гидроакустических сигналов и вычисления оценок координат движущегося объекта на основе цифровой обработки отфильтрованных доплеровских частотных составляющих гидроакустических сигналов.

**Аппроксимационная фильтрация помеховых отражений в гидроакустическом сигнале.** Рассмотрим решение этой задачи, основываясь на функциональной модели (8). Дискретные наблюдения представляют собой зашумленную сумму из двух синусоидальных составляющих сигналов, отличающихся нестационарными амплитудами и доплеровскими частотами в соответствии с (6)—(8). Разобьем реализацию наблюдаемого зашумленного двухчастотного дискретного гидроакустического сигнала  $y(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$  на  $m_0$  малых локальных интервалов по  $N$  точкам  $N_f = Nm_0$ ; гидроакустический сигнал на этих интервалах будем полагать квазистационарным. Пусть аппроксимация локальных наблюдений осуществляется при помощи дискретных двухчастотных локальных моделей

$$y_m(c_j, Ti) = \sum_{n=1}^2 (a_{nj} \cos \omega_{nj} Ti + b_{nj} \sin \omega_{nj} Ti), \quad (9)$$

$$i = 0, 1, \dots, N - 1, \quad j = 1, \dots, m_0,$$

где  $c_j^T = (a_{1j}, b_{1j}, \omega_{1j}, a_{2j}, b_{2j}, \omega_{2j})$  — локальные модельные параметры; индекс  $n = 1$  соответствует модели основной составляющей сигнала,  $n = 2$  — модели помеховой составляющей.

Сформируем последовательность локальных функционалов  $S(c_j, y_j)$ , зависящих от модельных параметров:

$$S(c_j, y_j) = \sum_{i=0}^{N-1} (y(i+N(j-1)) - \sum_{n=1}^2 (a_{nj} \cos \omega_{nj} Ti + b_{nj} \sin \omega_{nj} Ti))^2, \quad j = 1, \dots, m_0. \quad (10)$$

Оценки параметров локальных моделей реализуются на основе последовательности оптимизационных задач локальной аппроксимации

$$c_j^\circ = \arg \{ \min_{c_j \in C_j} S(c_j, y_j) \}, \quad j = 1, \dots, m_0,$$

$$c_{nj}^{\circ T} = (a_{nj}^\circ, b_{nj}^\circ, \omega_{nj}^\circ), \quad n = 1, 2.$$

Модели (9) являются линейными для части параметров. Для фиксированных нелинейных параметров  $\omega_{nj}$ ,  $j = 1, \dots, m_0$ ,  $n = 1, 2$  нахождение частично оптимальных линейных параметров

$a_{nj}^\circ(\omega_{nj})$ ,  $b_{nj}^\circ(\omega_{nj})$  сводится к решению систем линейных уравнений. Формируются соответствующие частично оптимальные функционалы  $S(a_{nj}^\circ(\omega_{nj}), b_{nj}^\circ(\omega_{nj}), \omega_{nj}, y_j)$ , и вычисление оптимальных параметров моделей  $\omega_{nj}^\circ$  реализу-

ется на основе минимизационного поиска по частотам с учетом  $\omega_{nj} \in \Omega_{nj} \subset C_j$ :

$$\omega_{nj}^{\circ} = \arg\{ \min_{\omega_{nj} \in \Omega_{nj}} S(a_{nj}^{\circ}(\omega_{nj}), b_{nj}^{\circ}(\omega_{nj}), \omega_{nj}, y_j) \},$$

$$a_{nj}^{\circ} = a_{nj}^{\circ}(\omega_{nj}^{\circ}), b_{nj}^{\circ} = b_{nj}^{\circ}(\omega_{nj}^{\circ}),$$

$$j = 1, \dots, m_0, n = 1, 2.$$

Запишем локальные оценки амплитудных  $E_{nj}^{\circ}(Ti)$

$$= (a_{nj}^{\circ 2} + b_{nj}^{\circ 2})^{1/2} \text{ и частотных } f_{nj}^{\circ} = 2\pi\omega_{nj}^{\circ}, f_{nj}^{\circ}(Ti) = f_{nj}^{\circ} \text{ функ-$$

ций для  $N(j-1) \leq i \leq Nj-1$ , которые равны нулю вне локальных интервалов. На их основе образуем оценки амплитудных и частотных функций

$$f_n^{\circ}(Ti) = \sum_{j=1}^m f_{nj}^{\circ}(Ti), E_n^{\circ}(Ti) = \sum_{j=1}^m E_{nj}^{\circ}(Ti) \quad i = 0, 1, \dots, N_f - 1. \quad (11)$$

Результат аппроксимационной фильтрации помеховых отражений формируется в соответствии с (8), (11). Отфильтрованные доплеровские частотные функции представляются в виде

$$f_{d,n}^{\circ}(Ti) = f_n^{\circ}(Ti), \quad n = 1, 2, i = 0, 1, \dots, N_f - 1. \quad (12)$$

Алгоритм аппроксимационной фильтрации включает разбиение исходного сигнала на локальные интервалы, выбор локальных моделей и функционалов (10), (11) для решения последовательности задач локальной минимизации и формирование результатов аппроксимационной фильтрации — доплеровских частотных функций (11), (12).

**Измерение координат движущегося объекта на основе цифровой обработки доплеровских составляющих гидроакустических сигналов.** Воспользуемся зависимостями (2), (5) и сформируем на их основе параметрические модели для доплеровских частотных функций

$$f_{Md,n}(\alpha, Ti) = f_{0,n} \left( \frac{(1+2/c_0)v((x(0)+vTi)-x_p)}{\sqrt{((x(0)+vTi)-x_p)^2 + (y_n(0)-y_p)^2}} \right)^2, \quad n = 1, 2. \quad (13)$$

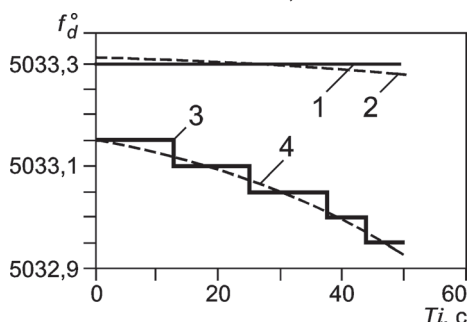


Рис. 2. Оценки доплеровских частотных функций:

1, 3 —  $f_{d,1}^{\circ}(Ti), f_{d,2}^{\circ}(Ti)$ , вычисленных по (12); 2, 4 —  $f_{Md,n}(\alpha^{\circ}, Ti)$ , полученных подстановкой в (13) координат оптимального вектора  $\alpha^{\circ}$

Образуем функционал для подгонки функций оценок  $f_{d,n}^{\circ}(Ti)$

(12) параметрическими моделями доплеровских частот  $f_{Md,n}(\alpha, Ti)$  из (13), где вектор параметров  $\alpha^T = (x(0), y(0), v)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$

$$S(f_d^{\circ}, \alpha) = \sum_{n=1}^2 \sum_{i=0}^{N_f-1} (f_{d,n}^{\circ}(Ti) - f_{Md,n}(\alpha, Ti))^2. \quad (14)$$

Приняв во внимание, что параметры вектора  $\alpha$  принадлежат ограничивающему множеству  $A$ , с учетом (14) запишем

$$\alpha^{\circ} = \arg \{ \min_{\alpha \in A} S(f_d^{\circ}, \alpha) \}.$$

На основе этой оценки  $\alpha_1^{\circ} = x^{\circ}(0)$ ,  $\alpha_2^{\circ} = y^{\circ}(0)$ ,  $\alpha_3^{\circ} = v^{\circ}$  можно сформировать уравнения движения объекта, т. е. осуществить измерения его координат как функций времени на интервале  $(0, t_p)$ :

$$x^{\circ}(t) = x^{\circ}(0) + v^{\circ}t; \quad y_1^{\circ}(t) = -y^{\circ}(0).$$

Алгоритм измерений координат включает формирование моделей доплеровских скоростей (13) и функционала (14), решение соответствующей минимизационной задачи и вычисление функций координат объекта.

Моделирование алгоритмов аппроксимационной фильтрации и измерения координат движущегося объекта проводилось для демонстрации их работоспособности и выработки предварительного суждения о точности измерений. Математическая модель взаимного движения системы реальный — мнимый объект и гидрофон принимали в виде дискретных соотношений

$$\Delta x(Ti) = (x(0) + vTi) - x_p; \quad \Delta y_n(Ti) = y_n(0) - y_p; \quad D_n(Ti) = (\Delta x^2(Ti) + \Delta y_n^2(Ti))^{1/2}; \quad (15)$$

$$v_{d,n}(Ti) = -\Delta x(Ti)v/D_n(Ti), \quad n = 1, 2.$$

Соответствующие (15) дискретные доплеровские частотные и фазовые функции имели вид

$$\omega_{d,n}(Ti) = 2\pi f_0 \left( 1 - \frac{v_{d,n}(Ti)}{c_0} \right);$$

$$\varphi_{d,n}(Ti) = 2\pi f_0 \left( Ti - \frac{D_n(Ti)}{c_0} \right) + \varphi_{dn,0}. \quad (16)$$

Дискретные наблюдения выходных сигналов гидрофонов представляли с использованием (16) как

$$y(Ti) = E_1(Ti) \cos \varphi_{d1}(Ti) + E_2(Ti) \cos \varphi_{d2}(Ti) + w(i),$$

$$i = 0, 1, \dots, N_f - 1. \quad (17)$$

Согласно (7) амплитуды  $E_n(Ti) = \bar{k}_{0,n}/D_n(Ti)$ . Модельные нормально распределенные случайные числа  $w(i)$  с нуле-

вым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_w^2$  имитировали погрешности в наблюдениях (17).

Степень зашумленности наблюдаемых сигналов находили с использованием  $\rho$ , равного отношению средней мощности входного исходного сигнала  $P_s$  к мощности шумового сигнала  $P_w$ . Для рассматриваемого модельного случая сигнала можно записать

$$P_s \approx \bar{E}_1^2/2 + \bar{E}_2^2/2; P_w \approx \sigma_w^2; \rho = 20 \lg_{10}(P_s/P_w), \quad (18)$$

где  $\bar{E}_1^2, \bar{E}_2^2$  — усредненные квадраты амплитудных функций сигнала (8);

$$\bar{E}_n^2 = \frac{1}{t_f} \int_0^{t_f} (k_{0,n}/D_n(t))^2 dt, \quad n = 1, 2.$$

Для моделирования задавали варианты начальных координат  $x(0) = x_0, x_0(1) = -2000$  м,  $x_0(2) = -1500$  м,  $x_0(3) = -1000$  м,  $y(0) = 50$  м;  $v = 10$  м/с. Параметры модели принимали значения:  $c_0 = 1500$  м/с,  $f_0 = 5000$  Гц,  $T = 50$  мкс и  $N_f = 10^6$ , что соответствовало времени наблюдения 50 с.

Коэффициент  $\bar{k}_{0,n}$  при моделировании выбирали так, чтобы в начальный момент времени выполнялись соотношения  $E_n(T \cdot 0) = 1, n = 1, 2$ ; поэтому  $\bar{k}_{0,n} = D_n(T \cdot 0) = D_{n0}$  — коэффициент пропорциональности, численно равный начальной дальности. Начальные дальности в зависимости от  $x_0(l), l = 1 \dots 3$  вычисляли по формуле

$$D_{n0}(l) = \sqrt{(x_0(l) - x_p)^2 + (y_n(0) - y_p)^2},$$

они принимали значения  $D_{10}(1) = 2159,3$  м,  $D_{10}(2) = 1662,1$  м,  $D_{10}(3) = 1167,3$  м,  $D_{20}(1) = 2152,3$  м,  $D_{20}(2) = 1653,0$  м,  $D_{20}(3) = 1154,3$  м. Соответственно  $\bar{k}_{0,n}(l) = D_{n0}(l), n = 1, 2, l = 1 \dots 3$ . Дисперсии шумов принимали ряд дискретных значений:  $\sigma_w^2(m) = (0,2m)^2, m = 1 \dots 5$ . При этом отношение сигнал—шум представляло дискретную двумерную функцию  $\rho(l, m)$  для  $m = 1 \dots 5$ .

На этапе моделирования алгоритма аппроксимационной фильтрации наблюдениям (17) ставились в соответствие локальные двухчастотные модели (9). Решались задачи подгонки локальных моделей к модельным наблюдениям путем минимизации локальных функционалов (10) и вычислялись локальные оценки доплеровских частот.

Начальную дальность вычисляли при  $l = 2, n = 1$ ; отношение сигнал—шум по (18) для  $m = 1$  составило  $\rho(2,1) = 30,15$  дБ; число локальных интервалов принимали  $m_0 = 8, N = 125000$ , их длительность  $NT = 6,25$  с. Поиск по частоте для оценивания параметров локальных полигармонических моделей проводился в диапазоне 5032,90 – 5033,40 Гц с шагом 0,05 Гц.

Результаты вычисленных первичных оценок  $f_{d,1}^\circ(Tl)$ ,

$f_{d,2}^\circ(Tl)$  по (12) приведены на рис. 2 — кривые 1, 3. На этапе

моделирования алгоритма измерений координат оценкам доплеровских частотных функций (12) ставились в соответствие модели (13), решали задачу аппроксимации и находили оценки параметров в результате минимизации функционала  $S(f_d^\circ, \alpha)$  (14) по  $\alpha$ .

Минимизацию по  $\alpha \in A$  проводили на основе прямого перебора в трехмерном параллелепипеде. Рассматривали исходные численные значения для  $\alpha^T = (-1500, 50, 10)$ . Задавали границы поискового параллелепипеда и число шагов дискретного поиска

$$x(0)_{\min} \leq x(0, k_1) \leq x(0)_{\max}, \quad 1 \leq k_1 \leq k_{1f},$$

$$\Delta x(0) = (x(0)_{\max} - x(0)_{\min})/(k_{1f} - 1),$$

$$x(0, k_1) = x(0)_{\min} + \Delta x(0) (k_1 - 1);$$

$$y(0)_{\min} \leq y(0, k_2) \leq y(0)_{\max}, \quad 1 \leq k_2 \leq k_{2f},$$

$$\Delta y(0) = (y(0)_{\max} - y(0)_{\min})/(k_{2f} - 1),$$

$$y(0, k_2) = y(0)_{\min} + \Delta y(0) (k_2 - 1);$$

$$v_{\min} \leq v(k_3) \leq v_{\max}, \quad 1 \leq k_3 \leq k_{3f}, \quad \Delta v = (v_{\max} - v_{\min})/(k_{3f} - 1),$$

$$v(k_3) = v_{\min} + \Delta v(k_3 - 1).$$

Процедуру поиска проводили при  $x(0)_{\min} = -1700$  м,  $x(0)_{\max} = -1300$  м,  $k_{1f} = 40, y(0)_{\min} = 40$  м,  $y(0)_{\max} = 60$  м,  $k_{2f} = 20, v_{\min} = 9,999$  м/с,  $v_{\max} = 10,001$  м/с,  $k_{3f} = 20$ . В итоге функционал (13)  $S(f_d^\circ, \alpha) = S(f_d^\circ, \alpha(k_1, k_2, k_3))$  оказывался зависимым от дискретных переменных  $(k_1, k_2, k_3) \in \bar{K}$ , где  $\bar{K}$  — ограничивающее множество, соответствующее множеству  $\bar{A}$ .

Минимизационный перебор  $S(f_d^\circ, \alpha(k_1, k_2, k_3))$  по  $k_1, k_2, k_3$  позволил найти оптимальные индексы  $(k_1^\circ, k_2^\circ, k_3^\circ) = \arg\{\min_{k_1, k_2, k_3 \in \bar{K}} S(f_d^\circ, \alpha(k_1, k_2, k_3))\}$  и оценки  $x^\circ(0) = x^\circ(0, k_1^\circ)$ ,

$y^\circ(0) = y^\circ(0, k_2^\circ), v^\circ(0) = v^\circ(k_3^\circ)$ , которые определили  $\alpha^{\circ T} = (x_e^\circ(0), y_e^\circ(0), v^\circ)$ . В результате процедуры поиска получили  $x^\circ(0) = -1510$  м,  $y^\circ(0) = 51$  м,  $v^\circ = 10,0003$  м/с.

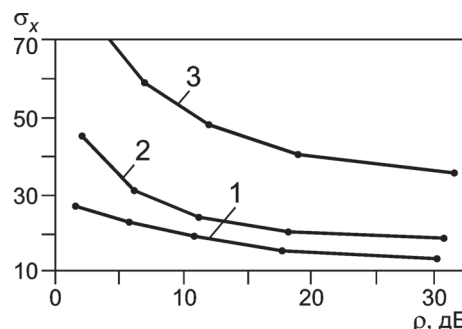


Рис. 3. Оценки погрешностей вычисления декартовых координат объекта для начальных дальностей  $D_{10}(l)$  при  $l = 1 \dots 3$  — кривые 1 — 3

На рис. 2 кривыми 2, 4 представлены оценки модельных доплеровских частотных функций  $f_{md,n}(\alpha^\circ, Ti)$ , которые получены подстановкой в (13) координат оптимального вектора  $\alpha^\circ$ .

**Погрешности измерений координат движущегося объекта** определяли путем статистического моделирования на основе сквозной математической модели и испытаний предложенных алгоритмов на реальных гидроакустических сигналах, полученных в ходе натурных экспериментов. Использовали значения параметров, приведенные выше.

Последовательности дискретных шумов  $w_s(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$  формировались в виде случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией  $\sigma_w^2$ , и последовательности наблюдений сигналов от гидрофона  $y_s(Ti)$ ,  $i = 0, 1, \dots, N_f - 1$ ,  $s = 1, \dots, \bar{s}$ , где  $\bar{s}$  — число сформированных реализаций последовательностей.

В результате применения предложенных алгоритмов были найдены последовательности оценок начальных координат и скоростей объекта  $x_s^\circ(D_1(0), \rho)$ ,  $y_s^\circ(D_1(0), \rho)$ ,  $v_s^\circ(D_1(0), \rho)$ ,  $s = 1, \dots, \bar{s}$  в зависимости от  $\rho$  и начальной дальности  $D_1(0)$ . Усредненные среднеквадратические значения (СКЗ) погрешностей оценок параметров определяли по формулам

$$\sigma_x(D_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (x_s^\circ(D_1(0), \rho) - x(0))^2};$$

$$\sigma_y(D_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (y_s^\circ(D_1(0), \rho) - y(0))^2}; \quad (19)$$

$$\sigma_v(D_1(0), \rho) = \sqrt{\frac{1}{\bar{s}} \sum_{s=1}^{\bar{s}} (v_s^\circ(D_1(0), \rho) - v)^2}. \quad (20)$$

Дисперсии погрешностей измерений координат движущегося объекта в соответствии с (1) имели вид

$$\sigma_x^2(Ti) = \sigma_x^2(D_1(0), \rho) + \sigma_v^2(D_1(0), \rho)(Ti)^2,$$

$$\sigma_y^2(Ti) = \sigma_y^2(D_1(0), \rho). \quad (21)$$

На рис. 3 представлены графики оценок СКЗ погрешностей  $\sigma_x(D_1(0), \rho)$  (19) излучателя, полученные в результате статистического моделирования, в зависимости от отношения сигнал—шум  $\rho(l, m)$  и для набора значений начальных дальностей  $D_{10}(l)$ ,  $l = 1...3$  (кривые 1—3),  $m = 1...5$ , интервал движения  $t_f = 50$  с,  $\bar{s} = 40$ . Для  $D_{10}(2) = 1662,1$  м,  $\rho = 30,15$  дБ были вычислены  $\sigma_y \approx 0,7$  м,  $\sigma_v \approx 0,0001$  м/с.

Для формул (21) с учетом малых значений  $\sigma_v(D_1(0), \rho)$  для  $t_f = 50$  с следовало неравенство  $\sigma_v^2(D_1(0), \rho)(t_f)^2 \ll \ll \sigma_x^2(D_1(0), \rho)$ , что позволило приближенно полагать

$\sigma_x^2(Ti) = \sigma_x^2(D_1(0), \rho)$ . Погрешности измерений координат объекта были оценены исходя из данных рис. 3 для двух случаев: наихудшего (при  $\rho = 6,07$  дБ и  $D_1(0) = 1662$  м) получены  $\sigma_x \approx 65$  м,  $\sigma_y \approx 6,5$  м,  $\sigma_v \approx 65,2$  м) и наилучшего (при  $\rho = 30,15$  дБ,  $D_1(0) = 1662$  м) получены  $\sigma_x \approx 15$  м,  $\sigma_y \approx 0,7$  м,  $\sigma_v \approx 15,1$  м).

Измерения доплеровских скоростей (частот) по предлагаемому алгоритму обеспечивались со сверхвысокой точностью. К примеру, для  $D_1(0) = 1662$  м и  $\rho = 30,15$  дБ погрешность измерения скорости составила  $\sigma_v \approx 0,0001$  м/с, что соответствовало относительной погрешности 0,01 %. Точности оценок координат, рассчитанных на основе цифровой обработки реальных гидроакустических сигналов по предложенным алгоритмам с учетом априорной информации, оказались удовлетворительными.

Таким образом, разработанный алгоритм аппроксимационной фильтрации помеховых отражений в гидроакустических сигналах показал свою работоспособность и приемлемую точность благодаря применению частотного поиска для локальных моделей. Как показало статистическое моделирование предлагаемых алгоритмов для начальной дальности  $D_1(0) = 1662$  м, погрешности измерений координат составили  $\sigma \approx 15$  м при отношении сигнал—шум  $\rho = 30,15$  дБ и  $\sigma \approx 65$  м при  $\rho = 6,07$  дБ. Результаты измерений доплеровских скоростей (частот) на основе предлагаемых алгоритмов имели погрешность около 0,01 %.

Предлагаемая аппроксимационная фильтрация для алгоритма задачи координат движущегося объекта может расширить существующие возможности пассивной гидролокации и допускает различные обобщения, например, на случаи более сложных моделей движений и помеховых сигналов.

## Литература

1. **Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В.** Корабельная гидроакустическая техника: состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
2. **Воловов В. И.** Отражение звука от дна океана. М.: Наука, 1993.
3. **Дашен Р. и др.** Распространение звука во флуктуирующем океане / Под ред. С. Флатте. М.: Мир, 1982.
4. **Гулин Э. П.** Разнесенный прием гидроакустических сигналов по результатам экспериментов в Черном море // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 6. С. 781—794.
5. **Урик Р. Дж.** Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978.
6. **Гетманов В. Г.** Технология спектрально-временного анализа нестационарных колебательных сигналов механических систем // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 2. С. 121—129.
7. **Гетманов В. Г.** Цифровая обработка нестационарных колебательных сигналов на основе локальных и сплайновых моделей. М.: Изд-во НИЯУ МИФИ, 2011.

8. Битюков В. К., Гетманов В. Г., Фирсов А. А. Технология пространственного разрешения системы звуковых излучателей на основе двухэтапного алгоритма цифровой обработки гидроакустических сигналов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. № 10. С. 6—13.

9. Гетманов В. Г., Фирсов А. А. Оценивание параметров движения источника звука на основе цифровой обработки системы доплеровских гидроакустических сигналов // Акустический журнал. 2011. Т. 57. № 4. С. 479—484.

10. Гетманов В. Г., Модяев А. Д., Фирсов А. А. Метод измерения координат движущегося объекта с помощью пассивной локационной гидроакустической системы // Измерительная техника. 2012. № 3. С. 21—27; Getmanov V. G., Modyaev A. D., Firsov A. A. A method of measurement of the coordinates of a moving object with the use of a passive hydroacoustic detection and ranging system // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N 3. P. 248—256.

11. Маслов В. К. Алгоритмы оценки кинематических параметров нестационарных процессов // Измерения в гидроакустике и акустике: Труды ВНИИФТРИ, 2009. Вып. 57(149). С. 214—240.

12. Беляев В. С. и др. Применение время-частотных распределений для оценки параметров движения источников тональных сигналов // Измерительная техника. 1997. № 3. С. 48—52; Belyaev V. S. et al. Use of time-frequency distributions to estimate the parameters of motion of a tonal signal source // Measurement Techniques. 1997. V. 40. N 3. P. 268—275.

13. Торопов В. Н. Доплеровский измеритель параметров траектории движущегося излучателя тонального сигнала в реальном масштабе времени // Труды ВНИИФТРИ, 1999. С. 75—79.

14. Торопов В. Н. Об оценке уровня тонального сигнала при измерении параметров траектории движущегося излучателя методом, основанным на эффекте Доплера // Проблемы и методы гидроакустических измерений: Труды ВНИИФТРИ, 2003. С. 134—140.

15. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3-х томах. Т. 1. Механика, молекулярная физика. М.: Физматгиз, 1962.

Дата принятия 31.05.2013 г.

## МЕДИЦИНСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.082.9+612.172.2

### Числовой классификатор функционального состояния организма человека

А. А. КУЗНЕЦОВ

Владимирский государственный университет, Владимир, Россия, e-mail: artemi-k@mail.ru

Предложены методы измерений, системного анализа и обработки электрокардиографической информации. Приведена классификация функционального состояния организма введением нормы в режиме контроля ритма сердца. В рамках модели системы управления и регуляции физического состояния здорового организма посредством режимной вариабельности ритма сердца адаптационные механизмы представлены в форме функции обратимости этих систем.

**Ключевые слова:** классификация, функциональное состояние организма, электрокардиограмма, диаграмма ритма сердца.

The methods of measurements, systems analysis and of electrocardiography information processing are suggested. The classification of organism functional state by introduction of a norm in hear rhythm control regime is presented. Within a framework of the model of system of control and regulation of healing organism physical state by means of regime variability of heart rhythm the adaptation mechanisms are presented in the form of convertibility function of these systems.

**Key words:** classification, organism functional state, electrocardiogram, heart rhythm diagram.

Окружающая среда является определяющей в формировании психического и эмоционального состояния здоровья людей. Исследование функциональных состояний организма (ФСО) в интервале между нормой и патологией по степени отклонения от нормы и их обратимых изменений является предметом донозологической диагностики (ДД) [1, 2]. По теории ДД состояние организма (здоровье — болезнь) — результат его адаптации или дезадаптации к изменчивой

внешней среде. [2]. Здоровье, как полная гармония эндогенной внутренней среды организма с экзогенной внешней, определяется в форме устойчивой жизнедеятельности, обеспечивающей экономичные оптимальные механизмы приспособления к окружающей среде на основе функционального резерва [1—6]. Из такого определения следует, что организм — полукрытая неравновесная неиерархическая система. Также необходимо определить понятие нормы,