

О ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭХОЛОТОВ С РАСЩЕПЛЕННЫМ ЛУЧОМ

А. А. ЛЮБИЦКИЙ¹, А. В. ОМЕЛЬЧЕНКО²

¹*Институт радиопизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков*

²*Харьковский национальный университет радиозлектроники*

Представлены имитационная модель и полученные на ее основе оценки точности определения координат газовыделяющих источников на морском дне с использованием эхолотов, оснащенных антенной системой «расщепленный луч».

ВВЕДЕНИЕ

Важными и пока недостаточно исследованными методологическими проблемами дистанционной акустической диагностики газовыделений из морского дна являются оценки потенциальных возможностей и погрешностей разрабатываемых методов, а также вопросы оптимизации алгоритмов обработки эхо-сигналов. В частности, первоочередной задачей изучения газоотдачи морского дна является поиск и картирование газовых факелов (ГФ). При этом, координаты газовыделяющих источников (метановых сипов) обычно определяются по данным приемника GPS, установленного вблизи антенны эхолота. В случае расположения сипов на значительных глубинах, когда размер «озвученного» пятна на дне существенно превышает (в плане) размер газовыделяющей площадки и ошибки навигационной системы, координаты источника могут быть уточнены по данным измерений фазовых углов на цель с использованием антенн типа «расщепленный луч» (split-beam) [1,2]. Однако, погрешности такой коррекции и основные причины возникновения ошибок не исследованы. Для этих целей целесообразно использование методов имитационного моделирования, позволяющих изучать влияние геометрии зондирования, характеристик газовыделений, среды распространения звука и параметров гидроакустических систем при повторяющихся и полностью контролируемых условиях.

В данной работе рассмотрена имитационная модель обратного рассеяния звука в ГФ и приводятся полученные на ее основе результаты исследования потенциальной точности измерения координат источников газовыделений по фазовым характеристикам эхо-сигналов с использованием антенны эхолота «расщепленный луч».

1. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Модель основана на представлении о дискретном характере рассеяния звука в газовых факелах, в соответствии с которым принятый эхо-сигнал является суммой элементарных сигналов, рассеянных в обратном направлении пузырьками, формирующими факел. Ниже рассматривается модель реверберации звука в факелах как временного случайного процесса при следующих предположениях: вторичное рассеяние отсутствует; морская среда является однородной в отношении рефракционных искажений в ней; в пределах рассматриваемого лучевого пучка распространение зондирующего сигнала является однолучевым.

Будем полагать, что корабль с эхолотом на борту движется со скоростью V_s мимо газового факела с цилиндрическим основанием, а координаты корабля в каждый момент времени известны. Эхолот на акустической волне длиной λ излучает вертикально вниз последовательность тональных импульсов длительностью T . Учитывается также, что в эхолоте используется антенная система с расщепленным лучом [3], которая на передачу имеет диаграмму направленности шириной 2ψ . Она электрически разделена на четыре сектора, возбуждаемые одновременно во время передачи, тогда как принятый каждым сектором сигнал усиливается в четырехканальном приемнике независимо, позволяя тем самым определить направление прихода отраженного сигнала.

В соответствии с предложенной моделью на каждую из четырех секций антенны (a, b, c, d) принимается рассеянный сигнал

$$s_r(t) = \operatorname{Re} \left[\sum_i b_i U(t - \tau_{r,i}) G(\phi_i, \theta_i) \cdot e^{j\omega_0(t - \tau_{r,i})} \right], \quad r \in \{a, b, c, d\}, \quad (1)$$

где $U(\cdot)$ – огибающая зондирующего импульса; ω_0 – частота зондирующего сигнала; $b_i G(\alpha_i, \beta_i)$ – амплитудный множитель, учитывающий отражающую способность i -го пузырька и форму диаграммы направленности антенны; ϕ_i и θ_i – углы на i - отражатель относительно направления зондирования; $\tau_{r,i}$ – задержка сигнала на трассе „передающий центр антенны $\rightarrow i$ -ый отражатель \rightarrow электромагнитный центр r -ой секции антенны. Заметим, что задержка $\tau_{r,i}$ сама является функцией времени вследствие движения рассеивателей и антенной системы. Это приводит, как известно, к сдвигам центральной частоты и уширению спектра излученного сигнала с изменением не только временного масштаба, но и уровней сигнала [4]. Модель (1) допускает наличие в суммарном эхо-сигнале, помимо случайной, также и когерентной составляющей.

Учитывая строение антенны эхолота, рассеянная волна, двигаясь по направлению к излучателю, достигает четырех ее секций в различные моменты времени. Это приводит к тому, что фазовые углы выходных электрических сигналов оказываются разными. Можно показать, что положение одиночных целей в луче антенны эхолота однозначно определяются углами $\hat{\phi}$ и $\hat{\theta}$ между направлением на цель и сечениями звукового луча вдоль и поперек судна, соответственно:

$$\hat{\phi} = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ac/bd} / 4\pi g), \quad \hat{\theta} = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ab/cd} / 4\pi g), \quad (2)$$

где величина $2g$ характеризует расстояние между центрами соседних секций антенны (базу антенной системы), $\Delta\Phi_{ab/cd}$ – разность фаз сигналов $s_a + s_b$ и $s_c + s_d$, а $\Delta\Phi_{ac/bd}$ – разность фаз сигналов $s_a + s_c$ и $s_b + s_d$ при расположении секций a и b по левому борту (относительно курса судна), а c и d – по правому.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью моделирования являлось (1) определение координат газовыделяющих источников по сигналу, принятому антенной «расщепленный луч», с минимальной среднеквадратичной ошибкой (СКО) и (2) оценка величины СКО в зависимости от определяющих параметров (размера факела, его расстояния от центра пятна, количества пузырьков в объеме рассеяния, их распределений по размерам и скоростям всплытия, соотношения сигнал/шум и др.).

В ходе моделирования строились эхограммы газовых факелов и их угловые двумерные диаграммы. Эхограммы определялись как двумерные функции дискретных аргументов

$$|S(q, k)|^2, q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots, \quad (3)$$

где суммарный принятый сигнал $S = S_a + S_b + S_c + S_d$.

Угловые диаграммы газовых факелов определялись как двумерные функции

$$\hat{\phi}(q, k) = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ac/bd}(q, k) / 4\pi g), \quad q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots; \quad (4)$$

$$\hat{\theta}(q, k) = \arcsin(\lambda \cdot \Delta\Phi_{ab/cd}(q, k) / 4\pi g), \quad q = 1, 2, \dots; k = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

Для оценивания координаты центров источников газовых факелов x_f и y_f использован алгоритм

$$\hat{x}_f = Mean\{d_k \lambda \cdot \Delta\Phi_{ac/bd}(q, k) / 4\pi g + q \cdot \Delta x, (q, k) \in V\}, \quad (6)$$

$$\hat{y}_f = Mean\{d_k \lambda \cdot \Delta\Phi_{ab/cd}(q, k) / 4\pi g, (q, k) \in V\}, \quad (7)$$

где $d_k = c t_k / 2$, а область V определяется из условия превышения сигналом выбранного порога $\varepsilon > 0$. В (6) и (8) использовано обозначение $Mean\{\cdot\}$ для оператора арифметического усреднения величин, заключенных в фигурные скобки. В результате экспериментальных исследований было установлено, что точность алгоритма оценивания (6) и (7) в ряде случаев может быть повышена путем замены в этих формулах оператора усреднения оператором взятия медианы.

Для проведения исследований в среде Wolfram Mathematica 8 была разработана интерфейсная программа и ряд процедур, реализующих приведенные выше аналитические выражения. Для повышения быстродействия процедура формирования отраженного сигнала была реализована на языке С.

При моделировании рассматривались случаи пузырей одинакового радиуса r_b (включая их цепочки, имитирующие струйные газовыделения) и скопления случайных пузырей, радиус которых описывается γ -распределением с плотностью вероятности

$$p(r_b) = 1700^{3.8} / \Gamma(3,8) r_b^{2.8} \cdot \exp\{-1700 r_b\}, r_b \in (0, \infty), \quad (8)$$

(форма которой близка к наблюдаемой в природных факелах [5]) с учетом зависимости скорости всплытия пузырьков в придонном слое от их эквивалентного радиуса. Число пузырьков в элементе разрешения Kb менялось от 1 до 110. Кроме того, при моделировании использовались типовые характеристики широко распространенных эхотемов с расщепленным лучом: частота зондирующего сигнала $f_0 = 38$ кГц; период повторения посылок $\Delta t = 0,5-2$ с; длительность зондирующего сигнала $T = 0,3-1$ мс; полуширина диаграммы направленности антенны $\psi = 3,35^\circ$; шаг квантования эхосигналов по глубине $\Delta z = 0,1$ м. Скорость судна составляла $V_s = 2,57$ м/с (5 узлов), а расстояние до дна $H = 100-1000$ м. Во всех случаях полагалось, что в пределах главного лепестка характеристики направленности антенны находится не более одного факела.

На рис. 1 - 2 изображены (в палитре «цвета радуги») примеры эхограммы и угловых диаграмм газового факела, полученные методом моделирования в отсутствии шумов при следующих условиях: расстояние до дна 400 м, длительность зондирующего импульса 1 мс, число пузырьков в одном элементе разрешения $N = 31$; радиус цилиндрического ГФ

$r = 0,5$ м; начальное положение его центра $x_f = 50$ м и $y_f = 10$ м; распределение пузырьков

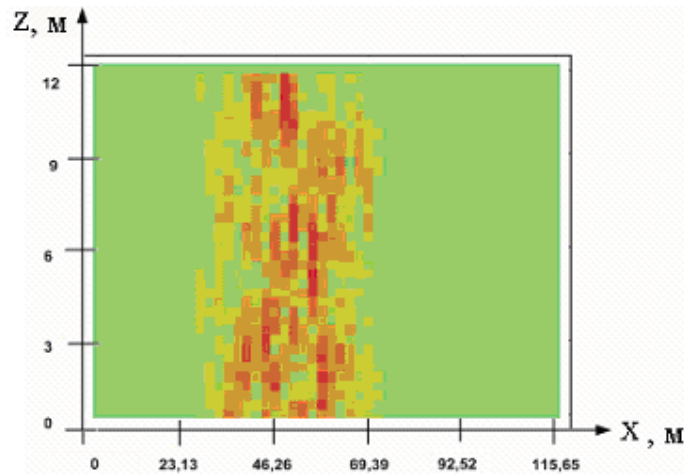


Рис. 1. Эхограмма газового факела для случая $r = 0,5$ м

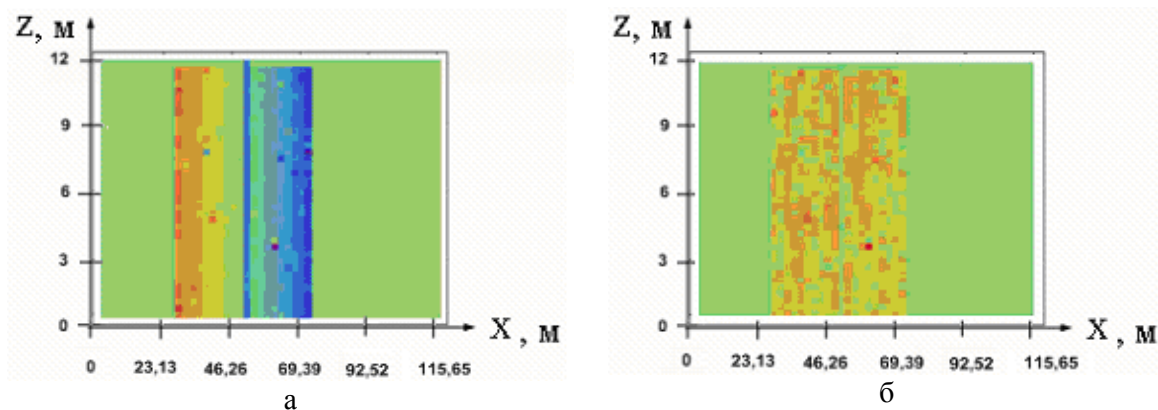


Рис.2. Угловая диаграмма факела вдоль курса корабля (а) и поперек курса корабля (б) для $r = 0,5$ м

по размерам описывается плотностью вероятности вида (8). При выбранных условиях ширина озвученного объема вблизи дна составляет $L = 0,1128 H \approx 45,12$ м, а интервал между соседними зондированиями вдоль курса $\Delta x = \Delta t \cdot V_s = 2,313$ м. Число зондирований при проходе диаграммы направленности мимо точечного объекта равно $N = 20$; разрешение по дальности эхолота составляет $h = C \cdot T/2 \approx 0,75$ м.

Как видим, угол $\hat{\phi}$ вдоль курса корабля (рис. 2 а) монотонно уменьшается при приближении к факелу от больших положительных значений (красный цвет) к отрицательным (синий цвет), меняя знак на траверсе факела (синяя вертикальная линия). Дальнейшее увеличение размеров факела ведет к размытию регулярной структуры угловых диаграмм, а реализации фазовых углов вдоль их сечений приобретают шумовой характер.

На рис. 3 - 5 приведены примеры зависимости СКО оценки положения источника газовыделений (находящегося на глубине 400 м)

$$S_x = \sqrt{M[\hat{x}_f - x_f]^2} ; S_y = \sqrt{M[\hat{y}_f - y_f]^2}$$

относительно истинных значений его горизонтальных координат $x_f = 50$ м и $y_f = 10$ м от определяющих параметров: радиуса факела r , количества отсчетов по дальности K , используемых при усреднении по глубине и отношения мощности шума P_n к мощности сигнала P_s на выходе линейной части приемника (до фазового детектора). Эти зависимости получены при достаточно высокой концентрации пузырьков $Kb = 31$ шт/элемент разрешения с использованием всех выборок (около 20 зондирований) вдоль курса корабля при 100 прогонах модели. В качестве шума при моделировании использовался гауссовский процесс с некоррелированными отсчетами. Черным цветом на графиках отображены характеристики оценок с обычным усреднением, а красным – с медианной обработкой.

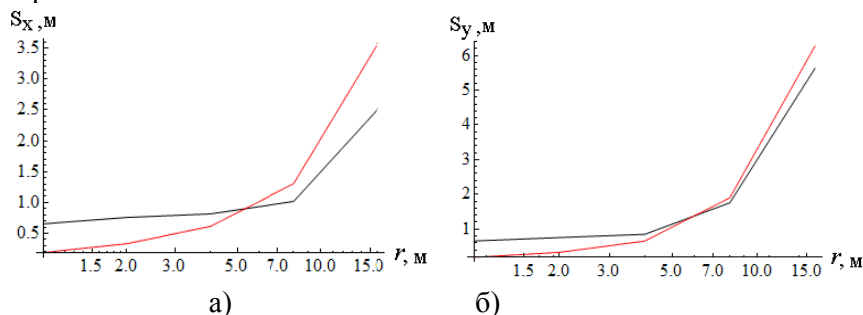


Рис. 3. Зависимости СКО оценивания координат газового факела от его радиуса r : а) по оси x ; б) по оси y

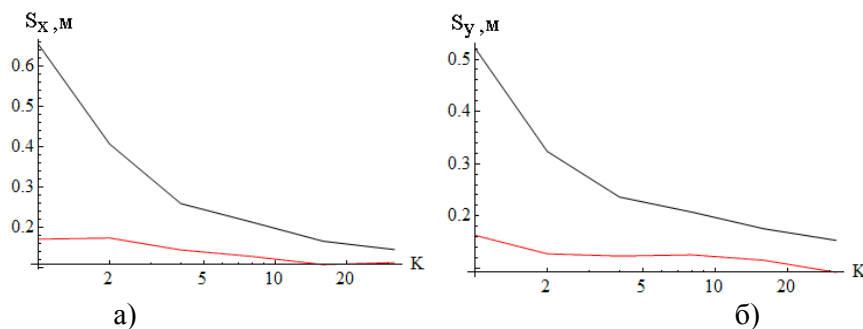


Рис. 4. Зависимости СКО оценивания координат газового факела от числа отсчетов по вертикали K при $Kb = 31$, $r = 1$ м: а) по оси x ; б) по оси y

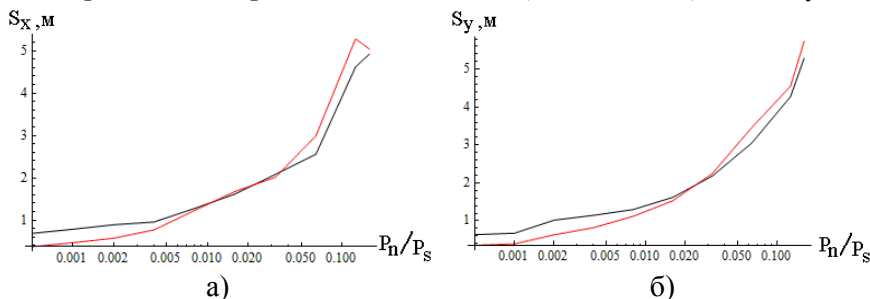


Рис. 5. Зависимость СКО оценивания координат газового факела от отношения мощности шума P_n к мощности сигнала P_s : а) по оси x ; б) по оси y

Анализ результатов моделирования показал, что для малых (в сравнении с шириной луча) радиусов газовых факелов точность оценок координат практически не

зависит от смещения центров факела от курса корабля (по оси y) до тех пор, пока они остаются в пределах диаграммы направленности антенны. При этом значения СКО составляют $(0,4 - 0,8) \cdot r$ и слабо зависят от числа пузырьков в элементе разрешения при $Kb \geq 5-7$. С увеличением площади основания факела S_f ошибки измерения его координат монотонно возрастают и при $S_f / S_s \geq 0,05-0,07$ (здесь S_s – площадь «озвученного» на дне пятна), как правило, наблюдается быстрый нелинейный рост СКО, что фактически исключает возможность коррекции местоположения протяженных газовыделяющих участков по фазовым характеристикам эхо-сигналов.

Наряду с размерами факела, основными параметрами, определяющими значение СКО, являются объемы выборок в алгоритмах усреднения и соотношение сигнал / шум. Так, увеличение числа отсчетов по вертикали K ведет к снижению СКО, пропорциональному $1/\sqrt{K}$ (см. рис. 4). В тоже время с увеличением отношения P_n/P_s погрешности определения координат быстро возрастают и уже при 10%-ном шуме значения СКО достигают 5-6 м (см. рис. 5). Следует отметить также, что медианная обработка данных в алгоритмах оценивания обеспечивает в большинстве случаев более высокую точность, чем арифметическое усреднение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана имитационная модель объемного рассеяния звука в газовых факелах, учитывающая распределение пузырьков по размерам и скорости их всплытия. Методом численного моделирования оценена потенциальная точность определения координат газовыделяющих источников по фазовым характеристикам эхо-сигналов с использованием антенны «расщепленный луч». Установлено, что основными параметрами, определяющими СКО оценок координат источников, являются размеры факела, отношение сигнал/шум и объемы выборок. Получены зависимости СКО от определяющих параметров.

Медианная обработка данных в алгоритмах оценивания обеспечивает в большинстве случаев более высокую точность, чем арифметическое усреднение и может быть рекомендована для практических оценок координат источников в натуральных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнюков Е. Ф., Пасынков А. А., Любицкий А. А. и др. Геология континентальной окраины Черного моря. – Киев.: ОМГОР НАНУ, 2007. – 81 с.
2. Егоров В. Н., Артемов Ю. Г., Гулин С. Б. Метановые сипы в Черном море. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ- Гидрофизика», 2011. – 407 с.
3. Simmonds J., McLennan D. Fisheries acoustics. – Blackwell Science, 2005. – 437 p.
4. Middleton D. Doppler effects for randomly moving scatterers and platforms // J. Acoust. Soc. Am. – 1977 – **61**, № 5. – P.1231–1250.
5. Lyubitskiy A. A. Remote acoustic diagnosis of gas release sources on seabed // Journal of Geology, series B. – 2008. – № 31-32. – P.33–38.