О ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛА, ПОЛУЧЕННОГО С ГИДРОЛОКАТОРА БОКОВОГО ОБЗОРА АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

А.А. Сущенко

Рассматриваются теоретические проблемы, связанные с измерением акустического сигнала, полученного гидролокатором бокового обзора (ГБО) автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) , когда существенное влияние на измеряемый сигнал оказывают рассеивающие свойства морской среды. В рамках кинетической модели, основанной на уравнении переноса акустического излучения, сформулирована прямая задача построения сигнала, полученного с ГБО, и обратная задача - картографирование морского дна по измерениям, полученным с ГБО. Проводится анализ прямой задачи в случае точечной передающей антенны и с учетом однократного рассеяния в среде.

Из множества факторов, влияющих на качество гидролокационного изображения, наиболее существенными, наряду с траекторными нестабильностями движения подводного носителя гидролокационной антенны, являются рассеивающие свойства морской среды, вызванные, например, флуктуациями плотности и коэффициента сжимаемости[1]. В связи с этим при математическом моделировании рассматриваемого процесса представляется важным исследование класса моделей, учитывающих многократное рассеяние акустических волн в случайно-неоднородной среде [2,3]. Существуют два основных подхода к рассмотрению проблемы многократного рассеяния звуковых волн: статистический и феноменологический. При статистическом рассмотрении исходят из стохастических волновых уравнений с последующим усреднением по ансамблю реализаций флуктуирующих полей. При феноменологическом подходе предметом исследования является уравнение переноса, выражающее закон сохранения энергии излучения.

В данной работе мы будем придерживаться феноменологического подхода, основанного на нестационарном интегро-дифференциальном уравнении переноса для плотности распределения звуковых волн с соответствующими граничными и начальными условиями. В рамках этой модели исследуется задача определения отражающих свойств морского дна по измерениям, полученным с носителя ГБО, движущегося с некоторой постоянной скоростью V вдоль заданной траектории. Получено уравнение для нахождения сигнала и проанализированы его приближения при использовании точечной передающей антенны и при учете однократного рассеяния.

Для простоты будем рассматривать среду G , совпадающую с пространством $\mathbb{R}^3$ и состоящую всего из двух зон: G_1 и G_2 . Область $G_2 = \{\mathbf{r} = (r_1, r_2, r_3) \in \mathbb{R}^3 : r_3 < -l\}, \quad l > 0,$ интерпретируется как донная часть океана, а область $G_1 = \{\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3 : r_3 > -l\} \setminus \gamma_a(t)$ - как водная часть за вычетом некоторой поверхности $\gamma_a(t)$, на которой размещены излучающая и приемная антенны (см. рис. 1а). Отметим, что пространственное местоположение носителя антенн $\gamma_a(t)$ зависит от времени.

Распространение акустических волн в случайно-неоднородной среде может быть описано уравнением переноса излучения [4-6]:

$$\left(\frac{1}{v}\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{k}\cdot\nabla_r + \mu(\mathbf{r},\mathbf{k})\right) f(\mathbf{r},\mathbf{k},t) = \int_\Omega \sigma(\mathbf{r},\mathbf{k}',\mathbf{k}) f(\mathbf{r},\mathbf{k}',t)\, d\mathbf{k}', \tag{1}$$

где функция $f(\mathbf{r},\mathbf{k},t)$ интерпретируется как плотность энергии волны в момент времени t в точке $\mathbf{r}$, распространяющейся с волновым вектором $\mathbf{k}$. Не нарушая общности рассуждений, можно считать, что волновой вектор $\mathbf{k}$ принадлежит единичной сфере $\Omega = \{\mathbf{k} \in \mathbb{R}^3 : |\mathbf{k}| = 1\}$. Коэффициент μ , называемый коэффициентом ослабления, представим в виде

$$\mu(\mathbf{r},\mathbf{k}) = \mu_a(\mathbf{r},\mathbf{k}) + \mu_s(\mathbf{r},\mathbf{k}), \quad \mu_s(\mathbf{r},\mathbf{k}) = \int_\Omega \sigma(\mathbf{r},\mathbf{k},\mathbf{k}')\, d\mathbf{k}',$$

где μ_s, μ_a - коэффициенты рассеяния и поглощения, а функция $\sigma(\mathbf{r},\mathbf{k}',\mathbf{k})$ - сечение рассеяния. Величина σ зависит от флуктуаций плотности среды $\rho(\mathbf{r})$ и ее сжимаемости $\kappa(\mathbf{r})$, где $\mathbf{r} \in G_i$. Скорость распространения звуковой волны постоянна $v = 1500 м/с$.

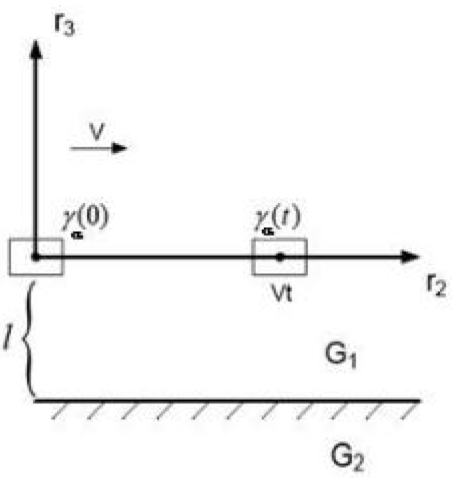

Рис. 1а

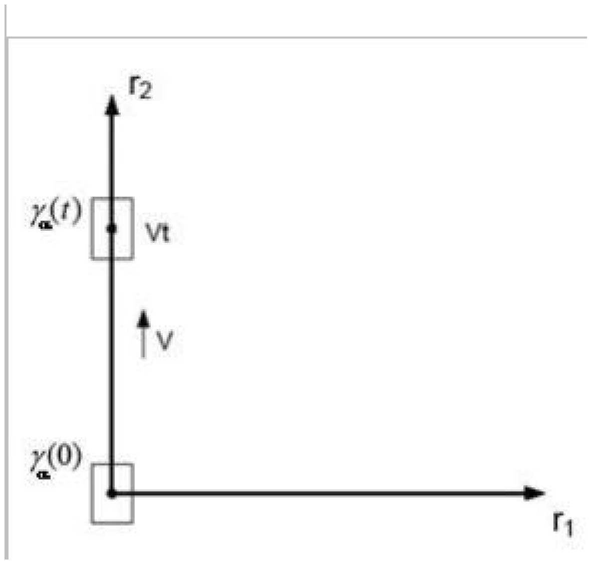

Рис. 1б

В момент времени $t = 0$ источники звука в среде отсутствуют, то есть начальное условие для функции f имеет вид

$$f(\mathbf{r},\mathbf{k},0) = 0, \quad (\mathbf{r},\mathbf{k}) \in G \times \Omega . \tag{2}$$

Будем полагать, что поверхность антенны $\gamma_a(0)$ представляет собой достаточно малую прямоугольную часть плоскости $z_2 = 0$, центр симметрии которой расположен в начале координат (рис. 1а, 1б). Все точки множества $\gamma_a(t)$ с течением времени перемещаются в пространстве R^3 с постоянной скоростью $\mathbf{V} = (0, V, 0)$, то есть

$$\gamma_a(t) = \{\mathbf{z} + t\mathbf{V}, \mathbf{z} \in \gamma_a(0)\}.$$

На множестве $\gamma_a(t)$ задаются граничные условия [6]:

$$f^-(\mathbf{z},\mathbf{k},t) = h(\mathbf{z},\mathbf{k},t), \quad (\mathbf{z},\mathbf{k},t) \in \gamma_a(t) \times \Omega \times [0,T], \tag{3}$$

$$\int_\Omega S_a(\mathbf{z},\mathbf{k}) f^+(\mathbf{z},\mathbf{k},t)d\mathbf{k} = H(\mathbf{z},t), \quad (\mathbf{z},\mathbf{k},t) \in \gamma_a(t) \times \Omega \times [0,T]. \tag{4}$$

Здесь $f^\pm(\mathbf{z},\mathbf{k},t) = \lim_{\varepsilon \to +0} f(\mathbf{z} \mp \varepsilon\mathbf{k},\mathbf{k},t)$, $h(\mathbf{z},\mathbf{k},t)$ - плотность энергии передающей антенны, $H(\mathbf{z},t)$ - интенсивность на входе приемной антенны и функция S_a определяет диаграмму направленности приемных антенн, расположенных по обе стороны поверхности $\gamma_a(t)$. При $\mathbf{k} \in \{\mathbf{k} = (k_1,k_2,k_3) \in \Omega : k_1 > 0\}$ функция $S_a(\mathbf{z},\mathbf{k})$ определяет диаграмму направленности "по правому борту", а при $\mathbf{k} \in \{\mathbf{k} = (k_1,k_2,k_3) \in \Omega : k_1 < 0\}$ - "по левому" (см. рис. 1б).

Ограничимся случаем, когда отражающие свойства дна на границе раздела $\gamma_d = \{\mathbf{z} \in \mathrm{R}^3 : z_3 = -l\}$ определяются диффузным отражением, то есть

$$f^-(\mathbf{z},\mathbf{k},t) = \frac{\sigma_d(\mathbf{z})}{4\pi} \int_\Omega f^+(\mathbf{z},\mathbf{k}',t)d\mathbf{k}', \quad \mathbf{z} \in \gamma_d, \tag{5}$$

где функция $\sigma_d(\mathbf{z})$ является коэффициентом отражения поверхности γ_d и описывает степень неоднородности дна океана. Резкие изменения этой функции могут указывать на наличие искусственных придонных объектов, сильно отличающихся по своим отражающим свойствам от естественного ландшафта дна.

Рассмотрим случай, когда в среде G_1 учитывается только однократное рассеяние и передающая антенна является точечной:

$$h(\mathbf{z},\mathbf{k},t)=\frac{\delta\,(\mathbf{z}-\mathbf{V}t)s_a(\mathbf{z},\mathbf{k})}{|\,\mathbf{n}(\mathbf{z})\cdot\mathbf{k}\,|}\sum_{i=0}^{p}\delta\,(t-t_i),\quad \mathbf{z}\in\gamma_a(t), \tag{6}$$

где δ - поверхностная дельта-функция и s_a - диаграмма направленности передающей антенны. При этих предположениях при $\mathbf{z}=\mathbf{V}t$ получаем следующее соотношение

$$\widetilde{H}(\mathbf{V}t,t)=\widetilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t,t)+\widetilde{H}_G(\mathbf{V}t,t) \tag{7}$$

Здесь $\widetilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t,t)$ и $\widetilde{H}_G(\mathbf{V}t,t)$ есть отраженная от дна и однократно рассеянная части принимаемого сигнала в точках траектории носителя антенны $\gamma_a(t)$.

Если коэффициент ослабления излучения в среде G_1 постоянен ($\mu = const$), то

$$\widetilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t,t)=\frac{l}{\pi}\frac{\exp(-\mu vt_i')}{(vt_i')^2\,|\,y_1(t_i',l)\,|}\sigma_d\big(y_1(t_i',l),Vt\big) \tag{8}$$

$$\widetilde{H}_G(\mathbf{V}t,t)=\frac{\sigma}{2\pi}\frac{\exp(-\mu vt_i')}{vt_i'}\arccos\left(\frac{2l}{(vt_i')}\right) \tag{9}$$

где $t_i'=t-t_i$, $y_1(t_i',l)=(\frac{v^2}{4}(t_i')^2-l^2)^{1/2}$, $\sigma_d\sim 10^{-1}$, $\mu\geq\sigma\sim 10^{-4}\sigma_d$, $V=1м/с$, $l=10м$.

Рис. 1. Моделирование морского дна. ($\sigma_d(\mathbf{z})$)

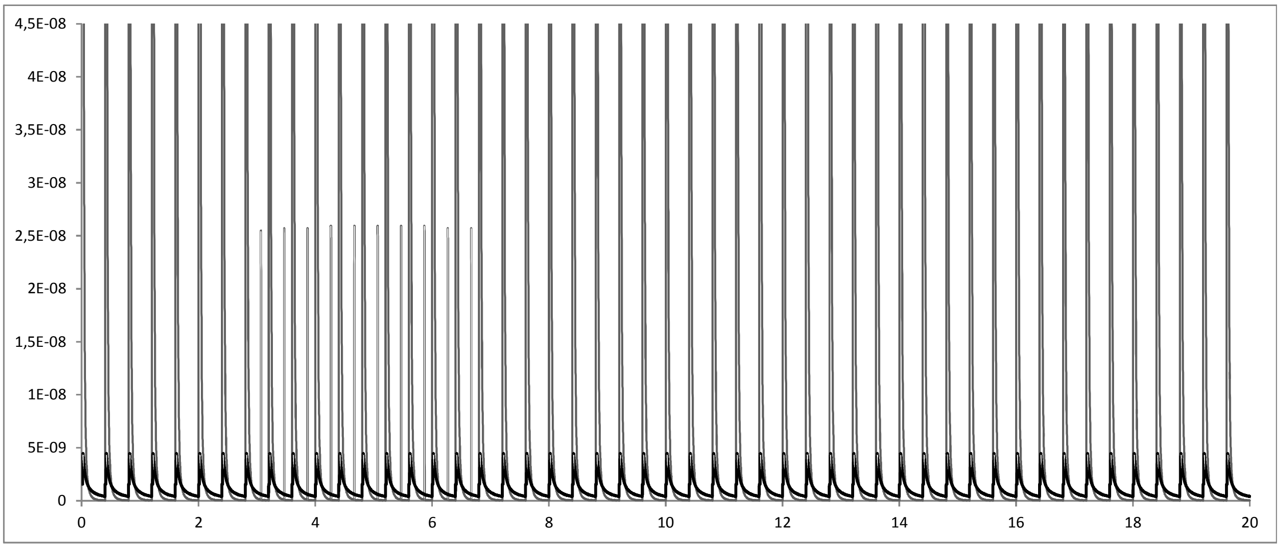

Рис. 2. Сигнал $\widetilde{H}(\mathbf{V}t,t)$. $\widetilde{H}_\gamma(\mathbf{V}t,t)$ - серая кривая. $\widetilde{H}_G(\mathbf{V}t,t)$ - черная кривая

Для детального исследования принятого сигнала $\widetilde{H}(\mathbf{V}t,t)$ необходимо выбрать узкий промежуток по времени, в том месте, где принятый сигнал соответствует расположению объекта.

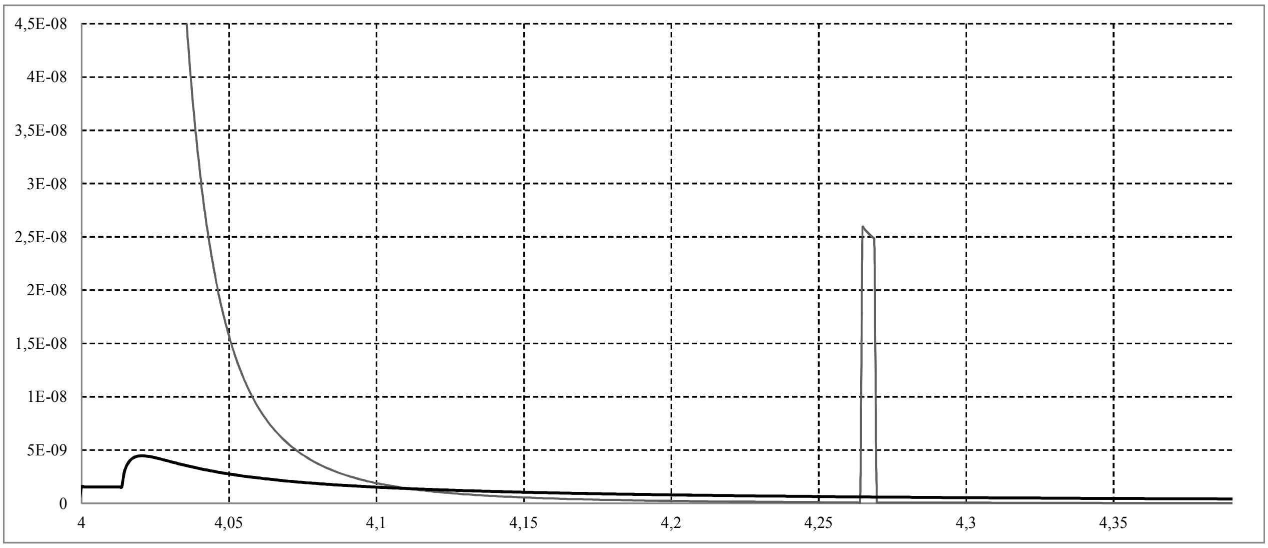

Рис. 3. Фрагмент сигнала. - серая кривая. - черная кривая

Пик на графике $\widetilde{H}_{\gamma}(\mathbf{V}t,t)$ (Рис. 3) соответствует сигналу, принятому от объекта на Рис.1. Из Рис.3 видно, что большую часть времени рассеянный сигнал больше, чем отраженный. На дальности 300 м рассеянный сигнал превышает отраженный в 13 раз.

Для расчета формул (8), (9) требуются значительный вычислительные ресурсы, т. к. частота дискретизации сигнала зависит от длины измеряемой полосы. К примеру для полосы 10 * 300 м2 необходимо произвести не менее 50000 измерений. При этом для улучшения разрешения изображения морского дна количество измерений необходимо увеличивать. Как правило, за одну съемку гидролокатор проходит расстояние не менее 1 км. Для подобных областей необходимы ресурсоемкие вычисления. Для реализации алгоритма был выбран параллельный подход. Вычисления проводились на кластере ДВФУ, с использованием технологии mpi.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 11-01-98521) и НОЦ СКТ “Дальний Восток”.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Матвиенко Ю.В., Воронин В.А., Тарасов С.П., Скнаря А.В., Тутынин Е.В., Пути совершенствования гидроакустических технологий обследования морского дна с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов //Подводные исследования и робототехника, 2008. Т. 2. № 8. С. 4-15.
2. Исимару А., Распространение и рассеяние волн в случайно - неоднородных средах. М. Мир, 1,2, 1981.
3. Ярощук И.О., Гулин О.Э., Метод статистического моделирования в задачах гидроакустики. Владивосток, Дальнаука, 2002.
4. Bal G., Keller J.B., Papanicolaou G., and Ryzhik L. Transport theory for acoustic waves with reflection and transmission at interfaces // Wave Motion. 1999. Vol. 30. P. 303-327.
5. Bal G. Kinetics of scalar wave fields in random media // Wave Motion. 2005. Vol. 43. P. 132-157.
6. Прохоров И. В., Золотарев В. В., Агафонов И. Б., Задача акустического зондирования во флуктуирующем океане //Дальневосточный математический журнал, 2011. Т. 11. № 1. С. 76–87.