

О навигации АНПА на основе акустического зондирования профиля дна¹

А.Б. Миллер, Б.М. Миллер

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия

Поступила в редколлегию 15.11.17

Аннотация—На основе алгоритма определения скорости АНПА (автономного необитаемого подводного аппарата) с помощью акустического зондирования профиля дна, предлагается метод определения текущего положения АНПА. Метод использует измерение скорости как дополнительный датчик абсолютной скорости, данные которого используются совместно с ИНС (инерциальной навигационной системой) как входные данные фильтра, определяющего положение АНПА.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АНПА, БПЛА, пеленгационные измерения, управление, наблюдаемость, метод наименьших квадратов, фильтр Калмана.

1. ВВЕДЕНИЕ

В нашей предыдущей работе [1] мы предложили алгоритм оценивания абсолютной скорости движения АНПА относительно дна, который использует измерения профиля дальности и его изменение в процессе движения. Данный подход аналогичен измерению скорости БПЛА относительно земной поверхности, основанному на так называемом плотном оптическом потоке (или поле скоростей смещения характерных элементов изображения), связанному с движением аппарата [2]. Отметим, что важной особенностью этого подхода является работа по всему изображению в целом без выделения т.н. “особых точек” и без выполнения трудоемкой операции совмещения соседних кадров. Аналогичным достоинством обладает и метод, предложенный в работе [3], которое было продемонстрировано лишь на примере определения мгновенной скорости. В данной работе мы предлагаем развитие этого подхода на случай движущегося аппарата с использованием комплексирования акустического метода, и например, данных от ИНС об ускорениях аппарата, хотя это не единственный путь и комплексирование с данными о положении акустических маяков, или доплеровскими измерениями скорости также представляет значительный интерес.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ниже представлена 2D модель движения АНПА под поверхностью воды. Предположим, что движение АНПА задается вектором $\mathbf{X}(t_k) = (X(t_k), Z(t_k))$. В каждый момент времени t_k эхолот АНПА производит набор измерений дальности $L(\mathbf{X}(t_k), \bar{\mathbf{e}}(\phi_i))$, где угол ϕ_i определяет направление i -го пучка, предполагая, что АНПА использует $i = 1..N$ таких лучей.

Такие измерения дают распределение дальностей до точек дна, а при перемещении аппарата соответствующие дальности меняются, причем скорость их изменения зависит как от наклона дна в области измерения, так и от скорости движения аппарата. Таким образом, первичное

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 16-31-60049 и 16-07-00677.

измерение распределения дальностей позволяет восстановить профиль дна в области измерения, а его изменение при смещении аппарата - скорость аппарата. Подробно метод измерения представлен в работе [1].

Первый этап работы состоит в оценке скорости АНПА, используя только измерения дальности, производимые эхолотом.

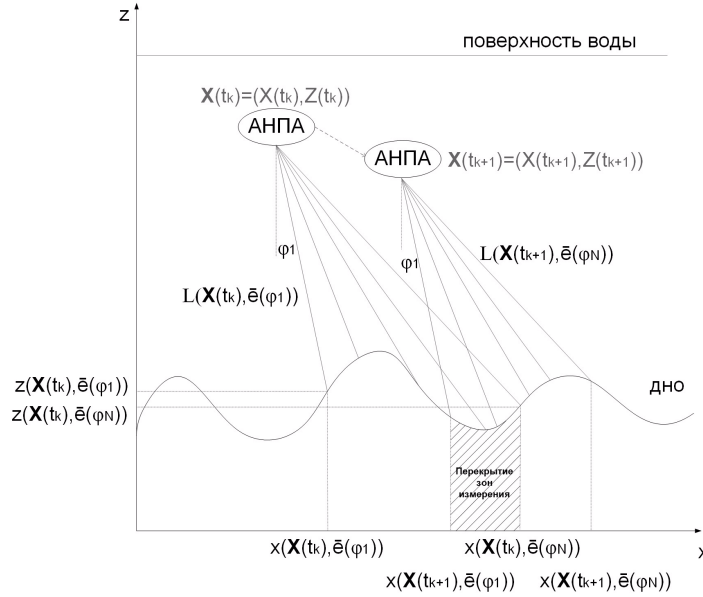


Рис. 1. 2D модель движения АНПА

Вектор $\bar{e}(\phi_i)$ задает i -ое измерение из N :

$$\bar{e}(\phi_i) = \begin{pmatrix} e_x(\phi_i) \\ e_z(\phi_i) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \end{pmatrix}.$$

Пусть профиль дна задается функцией $z = z(x)$. В момент времени t_k сигнал измерения в направлении $\bar{e}(\phi_i)$ достигает дна в точке:

$$\begin{pmatrix} x(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i)) \\ z(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X(t_k) \\ Z(t_k) \end{pmatrix} + L(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i)) \begin{pmatrix} e_x(\phi_i) \\ e_z(\phi_i) \end{pmatrix}.$$

Таким образом в общем виде можно записать:

$$Z(t_k) + e_z(\phi_i)L(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i)) = z(X(t_k) + e_x(\phi_i)L(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i))). \tag{1}$$

Дифференцируя данное выражение по времени t , получаем:

$$\frac{dZ}{dt} + e_z \frac{dL}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} \left(\frac{dX}{dt} + e_x \frac{dL}{dt} \right), \tag{2}$$

где элементы $\frac{dX}{dt}$ и $\frac{dZ}{dt}$ задают скорости АНПА. В предыдущей работе представлен алгоритм оценки данных элементов с использованием уравнения (2).

Данное уравнение является основным, и хотя только из этого скалярного уравнения определить значения производных $\frac{dX}{dt}$ и $\frac{dZ}{dt}$ невозможно, но мы имеем совокупность аналогичных уравнений, записанных для каждого направления луча, в которых значения этих производных

одинаковы. Таким образом, скорости можно оценить, например, методом наименьших квадратов и использовать их как измерения, дополнительные к измерениям скоростей, даваемых ИНС.

Алгоритм, описанный в [1], дает следующие оценки элементов движения АНПА:

$$\frac{dX}{dt} \simeq \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} M \frac{dL}{dt} - \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \sum_{i=1}^N M \frac{dL}{dt}}{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x}\right)^2},$$

$$\frac{dZ}{dt} \simeq \frac{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 \sum_{i=1}^N M \frac{dL}{dt} + \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} M \frac{dL}{dt}}{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x}\right)^2},$$
(3)

где

$$M = \frac{\partial z}{\partial x} e_x - e_z,$$

$$\frac{dL}{dt} \simeq \frac{L(\mathbf{X}(t_{k+1}), \bar{\mathbf{e}}(\phi_i)) - L(\mathbf{X}(t_k), \bar{\mathbf{e}}(\phi_i))}{\Delta t},$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} \simeq \frac{\left(L + e_x \frac{\partial L}{\partial e_x}\right) \left(-\frac{e_x}{e_z} L + e_z \frac{\partial L}{\partial e_x}\right) + \left(e_x \frac{\partial L}{\partial e_z} - \frac{e_z}{e_x} L\right) \left(e_z \frac{\partial L}{\partial e_z} + L\right)}{\left(L + e_x \frac{\partial L}{\partial e_x}\right)^2 + \left(e_x \frac{\partial L}{\partial e_z} - \frac{e_z}{e_x} L\right)^2},$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_x} \simeq \frac{L(\mathbf{X}(t_k), e_x(\phi_{i+1})) - L(\mathbf{X}(t_k), e_x(\phi_i))}{e_x(\phi_{i+1}) - e_x(\phi_i)},$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_z} \simeq \frac{L(\mathbf{X}(t_k), e_z(\phi_{i+1})) - L(\mathbf{X}(t_k), e_z(\phi_i))}{e_z(\phi_{i+1}) - e_z(\phi_i)}.$$

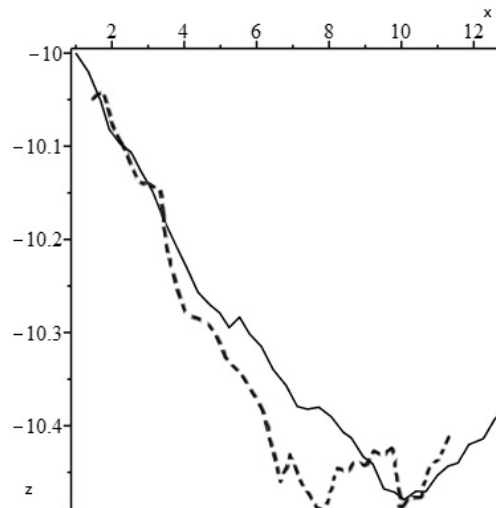


Рис. 2. Траектория АНПА: сплошная линия - реальная, прерывистая линия - оценка положения на основе 3

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Чтобы оценить качество оценки, мы используем следующие условия.

- $t_0 = 0, t_T = 40$
- АНПА движется из точки $(X_o, Z_o) = (1, -10)$ со скоростями $V_x := 0.3, V_y = -0.02 \cos(0.05t)$
- Ошибка измерения дальности имеет стандартное отклонение $SD_E = 0.1$
- Количество измерений, производимых в каждой точке траектории $N = 80$
- Направление i -го измерительного луча $\phi_i = 0.0285(i + 1) \frac{\pi}{10}$
- Неизвестный профиль дна задается в общем виде $z(x) = -20 + 0.001x^2 - 0.3 \sin(2.5x)$

Мы провели моделирование Монте-Карло с $k = 100$ выборками. В следующей таблице мы используем следующие обозначения:

- $E_X(t)$ ошибка оценки смещения АНПА по оси X в момент времени t
- $E_Z(t)$ ошибка оценки смещения АНПА по оси Z в момент времени t

t	$E_X(t)$	$E_Z(t)$
5	0.030	0.001
10	0.237	0.008
15	0.427	0.004
20	0.666	0.026
40	1.544	0.030

Таблица 1. Ошибка оценки смещения АНПА по осям x и z в моменты времени $t = 5, t = 10, t = 15, t = 20, t = 40$

На рисунке 3 представлено положение АНПА в момент времени t_0 и t_T .

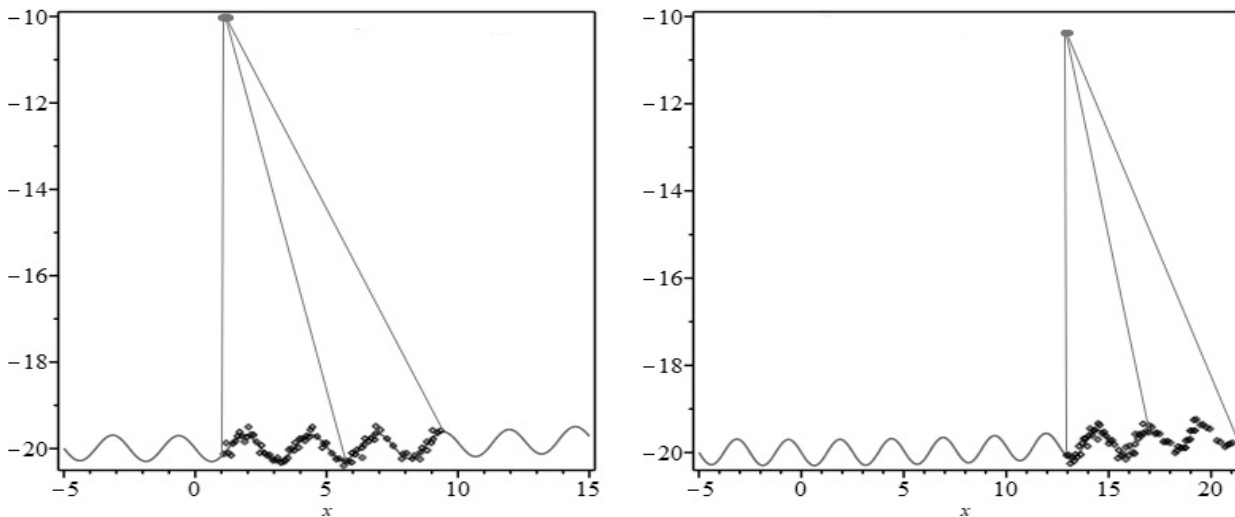


Рис. 3. АНПА, движущийся над профилем дна; слева - в момент времени t_0 , справа в момент времени t_T . Жирным обозначены точки дна, используемые для измерений.

3.1. Оценка положения АНПА

Рассмотрим следующую модель движения АНПА:

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \mathbf{X}(t_k) + \mathbf{V}(t_k)\Delta t + \mathbf{a}(t_k)\frac{\Delta t^2}{2},$$

$$\mathbf{V}(t_{k+1}) = \mathbf{V}(t_k) + \mathbf{a}(t_k)\Delta t + \mathbf{W}(t_k),$$

где $\mathbf{V}(t_k) = \begin{pmatrix} V_x(t_k) \\ V_z(t_k) \end{pmatrix}$ - скорости АНПА, $\mathbf{a}(t_k) = \begin{pmatrix} a_x(t_k) \\ a_z(t_k) \end{pmatrix}$ - ускорения АНПА, которые дает ее ИНС, $\mathbf{W}(t_k) = \begin{pmatrix} \sigma_x W_x(t_k) \\ \sigma_z W_z(t_k) \end{pmatrix}$ текущие возмущения в движении АНПА.

В качестве измерений будем использовать оценки элементов движения АНПА (3):

$$\mathbf{m}_V(t_k) = \begin{pmatrix} m_k^{V_x} \\ m_k^{V_z} \end{pmatrix} + \mathbf{W}_V(t_k) = \begin{pmatrix} \frac{dX}{dt} \\ \frac{dZ}{dt} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\mathbf{W}_V(t_k) = \begin{pmatrix} \sigma_{V_x} W_{V_x}(t_k) \\ \sigma_{V_z} W_{V_z}(t_k) \end{pmatrix}$ шум в измерениях скоростей АНПА.

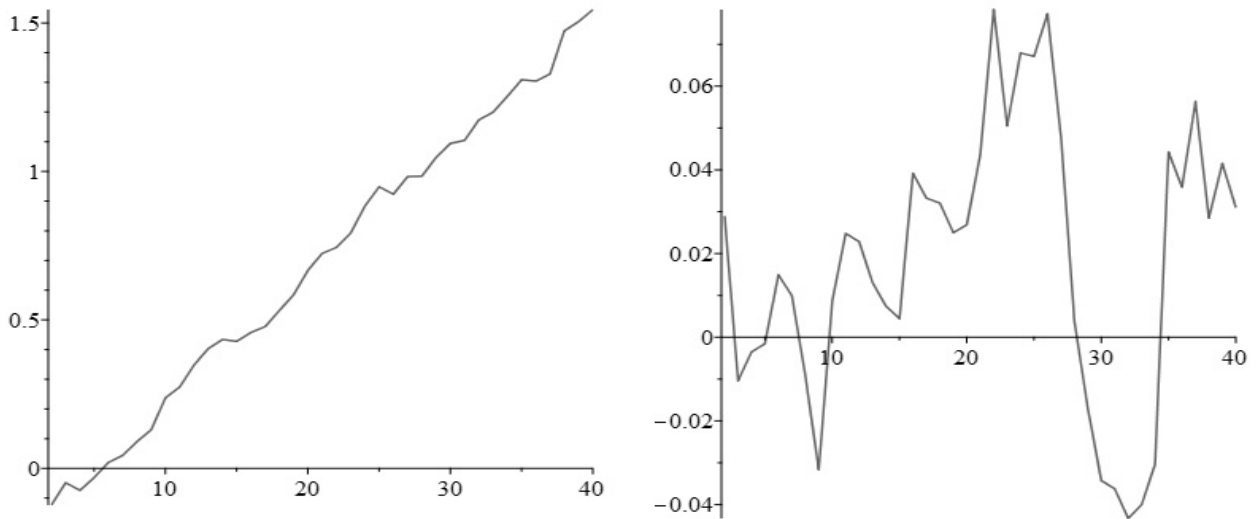


Рис. 4. Ошибка оценки координат АНПА; слева - по оси x , справа - по оси z

Тогда по аналогии с [4]:

$$\hat{\mathbf{X}}(t_{k+1}) = \hat{\mathbf{X}}(t_k) + \hat{\mathbf{V}}(t_k)\Delta t + \mathbf{a}(t_k)\frac{\Delta t^2}{2},$$

$$\hat{\mathbf{V}}(t_{k+1}) = \mathbf{K}_V(t_{k+1})\mathbf{m}_V(t_{k+1}) + (1 - \mathbf{K}_V(t_{k+1}))(\hat{\mathbf{V}}(t_k) + \mathbf{a}(t_k)\Delta t),$$

$$\mathbf{K}_V(t_{k+1}) = \begin{pmatrix} K_{V_x}(t_{k+1}) \\ K_{V_z}(t_{k+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\hat{P}^{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2}{\hat{P}^{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2 + \sigma_{V_x}^2} \\ \frac{\hat{P}^{V_z V_z}(t_k) + \sigma_z^2}{\hat{P}^{V_z V_z}(t_k) + \sigma_z^2 + \sigma_{V_z}^2} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{P}^{V_x V_x}(t_{k+1}) \\ \hat{P}^{V_z V_z}(t_{k+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{V_x}^2(\hat{P}^{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2)}{\hat{P}^{V_x V_x}(t_k) + \sigma_x^2 + \sigma_{V_x}^2} \\ \frac{\sigma_{V_z}^2(\hat{P}^{V_z V_z}(t_k) + \sigma_z^2)}{\hat{P}^{V_z V_z}(t_k) + \sigma_z^2 + \sigma_{V_z}^2} \end{pmatrix}.$$

4. ВЫВОДЫ

Таким образом, можно сделать вывод, что измерения в обоих направлениях достаточно хороши, чтобы использоваться при интеграции с ИНС. Существует множество способов улучшения предложенного алгоритма, например, его можно использовать вместе с локатором бокового обзора, используя каждую полосу обзора вдоль движения АНПА как отдельный набор измерений [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Миллер, Б. Миллер, *Определение скорости АНПА при помощи акустического зондирования профиля дна*, Информационные процессы, Том 17, № 3, 2017, стр. 165-171.
2. Б.М. Миллер, К.В. Степанян, А.К. Попов, А.Б. Миллер, *Навигация БПЛА на основе последовательностей изображений, регистрируемых бортовой видеокамерой*, Автоматика и телемеханика, № 12, 2017, стр.141-153.
3. John Folkesson, John Leonard, Jacques Leederkerken, and Rob Williams, *Feature Tracking For Underwater Navigation using Sonar*, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems San Diego, CA, USA, Oct 29 - Nov 2, 2007, pp. 3678-3684, 2007.
4. A. Popov, A. Miller, B. Miller, and K. Stepanyan *Optical Flow and Inertial Navigation System Fusion in UAV Navigation // International Conference Defence and Security, Unmanned/Unattended Sensors and Sensor Networks XII, September 26, Edinburgh, United Kingdom. 2016. Proceedings of SPIE. V. 9986. P. 998606-(1-16). <http://dx.doi.org/10.1117/12.2241204>*
5. А.В. Костоусов, В.Б. Костоусов *Моделирование гидролокатора бокового обзора с синтезированной апертурой*, Автоматика и телемеханика, № 2, 2008, стр. 16-29.

About navigation of the AUV on the basis of seabed acoustic sensing.

Miller A.B., Miller B.M.

In this work we propose a method for determining the current autonomous underwater vehicle (AUV) position based on the algorithm for determining of the AUV speed using seabed acoustic sensing. The method uses velocity measurement as an additional absolute velocity sensor, the data of which is used in conjunction with the inertial navigation system (INS) as input data of the filter determining the position of the AUV.

KEYWORDS: AUV, UAV, bearing-only measurements, Kalman filtering, control, least square method.