

Определение скорости АНПА при помощи акустического зондирования профиля дна¹

А.Б. Миллер, Б.М. Миллер

Институт проблем передачи информации, Российская академия наук, Москва, Россия
e-mail: amiller@iitp.ru, bmiller@iitp.ru

Поступила в редколлегию 30.09.2017

Аннотация—В данной работе предложен алгоритм измерения скорости АНПА (автономно-необитаемого подводного аппарата), основанный на измерении дальности при помощи акустического зондирования. Главным преимуществом алгоритма является то, что он дает абсолютную скорость АНПА относительно дна в отличие от общих подходов, которые обычно дают скорость относительно воды. Этот подход может служить дополнительным инструментом коррекции при комплексировании данных, полученных современными датчиками скорости, такими как доплеровский лаг и другими.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: АНПА, БПЛА, акустические измерения, оценивание, метод наименьших квадратов

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы навигация АНПА находится в центре внимания исследователей и инженеров. Поскольку для получения положения относительно внешней среды в воде доступны только акустические измерения, акустические средства, интегрированные с инерциальной навигационной системой (ИНС), остаются единственными средствами для точной навигации во время автономной миссии АНПА.

В последние годы достигнут значительный прогресс в области подводных акустических измерений. Начиная с первых идей акустической визуализации [1], и удачных разработок [2], [3], современные навигационные системы используют интеграцию ИНС и акустических средств, включая оборудование для доплеровского лага с учетом отслеживания дна и отслеживания воды [4]. Однако интеграция с ИНС вызывает серьезные проблемы начальной выставки показаний лага, которые приводят к увеличению смещения оценок положения и скорости во время долгосрочной миссии без возможности коррекции позиции АНПА [5], [6].

В подводных приложениях намного сложнее использование подхода на основе обнаружения т.н. “особых” точек хорошо известного в воздушной беспилотной навигации [7]. Поэтому в подводной навигации для этого требуется предварительное картографирование рабочей области и, по крайней мере, необходима карта глубины, чтобы использовать подход навигации по ландшафту [8], [9]. В то же время в навигации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) идея так называемого плотного оптического потока становится довольно популярной, поскольку она дает абсолютную скорость БПЛА, используя только значение текущей высоты. Здесь мы предлагаем аналогичный подход, основанный на текущих измерениях карты дальности до дна.

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 16-31-60049 и 16-08-01076.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Ниже представлена общая модель движения АНПА под поверхностью воды. Трехмерную модель можно рассматривать так же, как и 2D, здесь мы просто иллюстрируем идею (Рис. 1). Предположим, что в момент времени t_k эхолотатор АНПА производит набор измерений дальности $L(\theta_i, \phi_i, t_k)$, где (θ_i, ϕ_i) является направлением i -го пучка, предполагая, что АНПА использует $i = 1, \dots, N$ таких лучей.

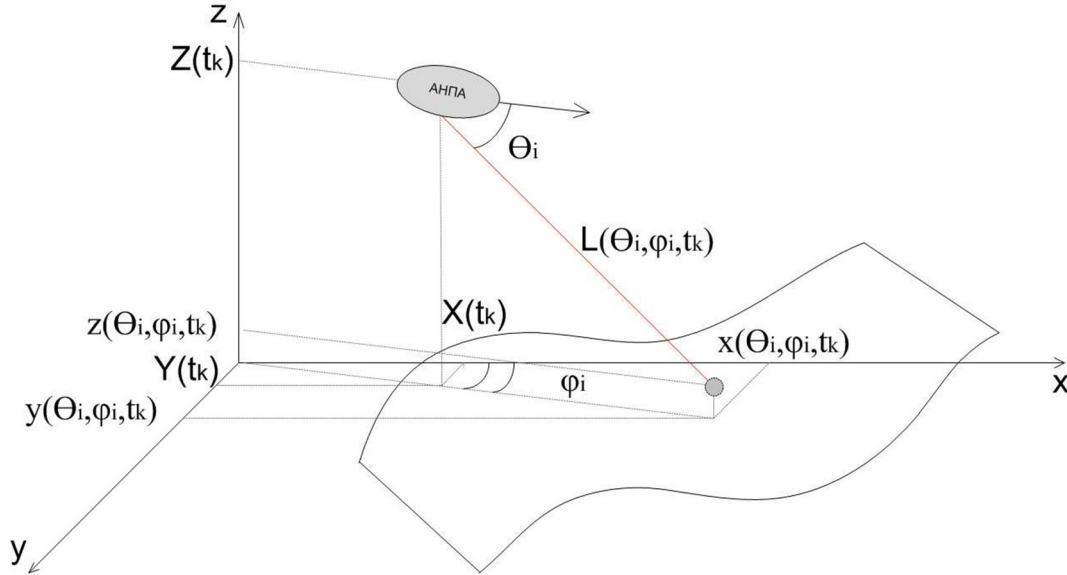


Рис. 1. 3D модель движения АНПА

Проблема заключается в том, как оценить скорости АНПА, используя только измерения дальности, производимые эхолотатором. Здесь мы предлагаем решение задачи для двумерного движения, когда АНПА движется вперед по оси x и в вертикальной плоскости z (Рис. 2). В этом случае АНПА в момент времени t_k многолучевой локатор производит набор N измерений $L(\phi_i, t_k)$.

Пусть движение АНПА задается вектором:

$$\mathbf{X}(t_k) = \begin{pmatrix} X(t_k) \\ Y(t_k) \end{pmatrix}.$$

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

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

В момент времени t_k положение АНПА $\mathbf{X}(t_k)$, таким образом сигнал измерения в направлении $\bar{\mathbf{e}}(\phi_i)$ достигает дна в точке:

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

где $L(\mathbf{X}(t_k), \bar{\mathbf{e}}(\phi_i))$ – результаты измерений, используемые в дальнейших вычислениях.

Таким образом если профиль дна задается функцией $z = z(x)$, то в общем виде можно записать:

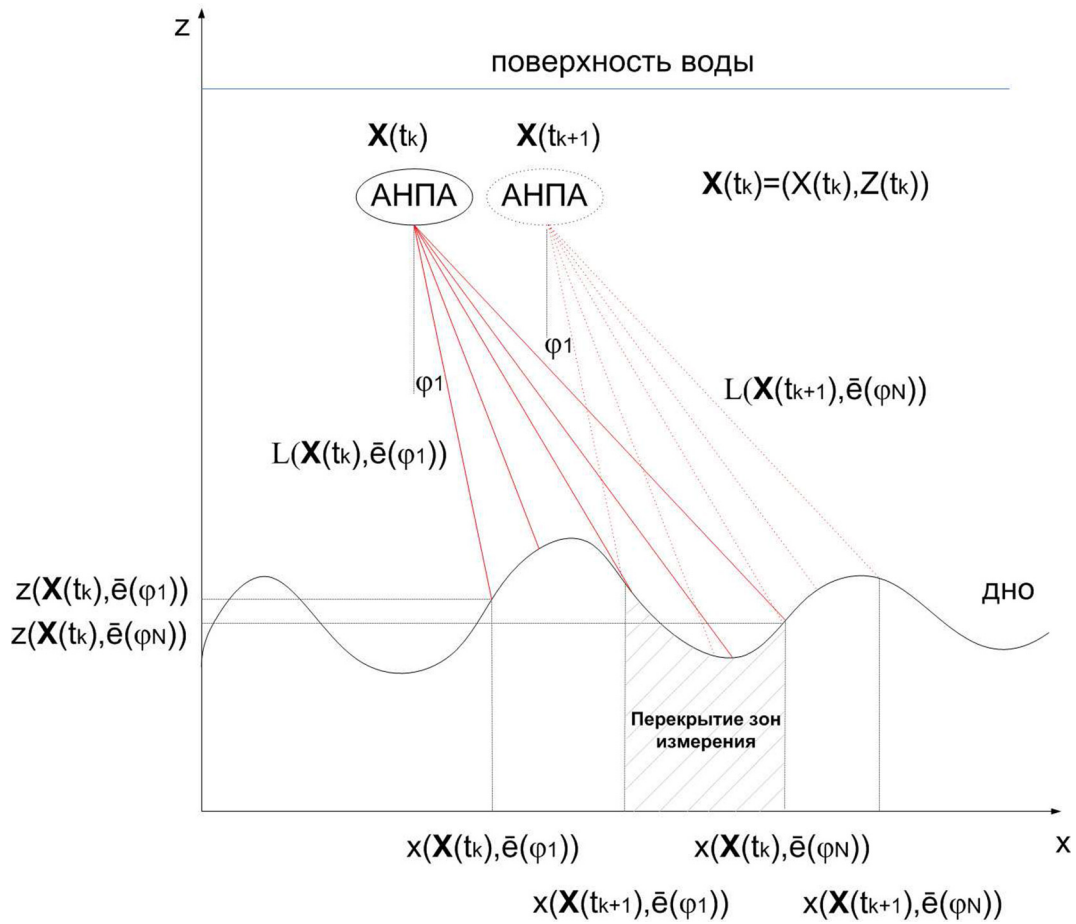


Рис. 2. 2D модель движения АНПА

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

Дифференцируя данное выражение по времени t , получаем:

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

В полученном выражении элементы $\frac{dX}{dt}$ и $\frac{dZ}{dt}$ задают скорости АНПА. Задача состоит в оценивании данных элементов. В следующем разделе представлен алгоритм для оценки $\frac{dX}{dt}$, $\frac{dZ}{dt}$ с использованием уравнения (2).

3. ОЦЕНКА ЭЛЕМЕНТОВ ДВИЖЕНИЯ АНПА

Алгоритм в общем виде:

1. Выражение $\frac{dL}{dt}$ может быть определено, используя последовательные измерения $L(\mathbf{X}(t_k), \bar{e}(\phi_i))$, и $L(\mathbf{X}(t_{k+1}), \bar{e}(\phi_i))$.
2. Частная производная $\frac{\partial z}{\partial x}$ определяется следующим образом:
 - Берется частная производная $\frac{\partial}{\partial e_x}$ для (1):

$$\frac{\partial z}{\partial x} \left(L + e_x \frac{\partial L}{\partial e_x} \right) = \frac{\partial e_z}{\partial e_x} L + e_z \frac{\partial L}{\partial e_x},$$

где с учетом соотношения $e_x^2 + e_z^2 = 1$ имеем $\frac{\partial e_z}{\partial e_x} = -\frac{e_x}{e_z}$ и $\frac{\partial e_x}{\partial e_z} = -\frac{e_z}{e_x}$ или с использованием новых обозначений:

$$\frac{\partial z}{\partial x} a = b.$$

– Затем берем частную производную $\frac{\partial}{\partial e_z}$ для (1):

$$\frac{\partial z}{\partial x} \left(e_x \frac{\partial L}{\partial e_z} + \frac{\partial e_x}{\partial e_z} L \right) = e_z \frac{\partial L}{\partial e_z} + L$$

или с использованием новых обозначений:

$$\frac{\partial z}{\partial x} c = d.$$

– Таким образом получаем следующую систему:

$$\frac{\partial z}{\partial x} \begin{pmatrix} a \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b \\ d \end{pmatrix}.$$

Решая систему с использованием метода наименьших квадратов, получаем следующую оценку производной профиля дна:

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{ab + cd}{a^2 + c^2}.$$

3. Теперь можно вычислить $\frac{dX}{dt}$, $\frac{dZ}{dt}$.

– Для удобства перепишем (2):

$$\Delta Z(t_k) - \frac{\partial z}{\partial x} \Delta X(t_k) = -\Delta L(t_k) \left(e_z - \frac{\partial z}{\partial x} e_x \right)$$

– Введем новые обозначения: $M = -\left(e_z - \frac{\partial z}{\partial x} e_x \right)$. Оцениваем $\Delta Z(t_k)$, $\Delta X(t_k)$ с помощью м.н.к.:

$$\sum_{i=1}^N \left(\Delta \hat{Z}(t_k) - \frac{\partial z}{\partial x} \Delta \hat{X}(t_k) - M \Delta L(t_k) \right)^2 \rightarrow \rightarrow \min_{\Delta \hat{X}(t_k), \Delta \hat{Z}(t_k)}$$

Стандартные вычисления дают следующие оценки:

$$\Delta \hat{X}(t_k) = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} M \Delta L(t_k) - \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \sum_{i=1}^N M \Delta L(t_k)}{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2},$$

$$\Delta \hat{Z}(t_k) = \frac{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 \sum_{i=1}^N M \Delta L(t_k) + \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} M \Delta L(t_k)}{-\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial z}{\partial x} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial z}{\partial x} \right)^2}$$

4. В итоге получаем следующие оценки:

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

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

где

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

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

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

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

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

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ

При моделировании использовались следующие начальные условия.

- АНПА двигается из точки (X_o, Z_o) в точку (X_T, Z_T)
- Количество измерений, производимых в каждой точке траектории N
- Направление i -го измерительного луча $\phi_i = 0.0285(i + 1) \frac{\pi}{10}$
- Дно задается в общем виде $z(x) = 0.2x^2 - 2x - 30$

Для каждого N мы проводим моделирование Монте-Карло с $k = 100$ выборками. В следующих таблицах для $N = 10$ (Таблица 1) и $N = 20$ (Таблица 2) мы используем следующие обозначения:

- $\Delta X_{real} = X_T - X_o$ реальное смещение АНПА по оси x
- $\Delta Z_{real} = Z_T - Z_o$ реальное смещение АНПА по оси z
- $\Delta X_{est}(i) = \frac{dX}{dt}(i) \Delta t$ оценка смещения АНПА по оси x , полученная в i выборке, $i = 1..k$
- $\Delta Z_{est}(i) = \frac{dZ}{dt}(i) \Delta t$ оценка смещения АНПА по оси z , полученная в i выборке, $i = 1..k$
- $M_x = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta X_{est}(i)$ средняя оценка смещения АНПА по оси x
- $M_z = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Delta Z_{est}(i)$ средняя оценка смещения АНПА по оси z
- $\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\Delta X_{est}(i) - \Delta X_{real})^2}$ среднее квадратическое отклонение по оси x
- $\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\Delta Z_{est}(i) - \Delta Z_{real})^2}$ среднее квадратическое отклонение по оси z

ΔX_{real}	M_x	ΔZ_{real}	M_z	σ_x	σ_z
0.25	0.292	0.25	0.241	0.042	0.008
0.5	0.587	0.5	0.450	0.087	0.049
1	1.184	1	0.777	0.184	0.222
1.5	1.784	1.5	0.989	0.284	0.510
2	2.382	2	1.094	0.382	0.905

Таблица 1. For $N = 10$

ΔX_{real}	M_x	ΔZ_{real}	M_z	σ_x	σ_z
0.25	0.269	0.25	0.256	0.019	0.006
0.5	0.536	0.5	0.484	0.036	0.015
1	1.063	1	0.856	0.063	0.143
1.5	1.576	1.5	1.125	0.076	0.374
2	2.074	2	1.294	0.074	0.705

Таблица 2. For $N = 20$

5. 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 в качестве обновления данных локатора бокового обзора, используя каждую полосу вдоль движения АНПА как отдельный набор измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jerry L. Sutton, *Underwater Acoustic Imaging*, Proceedings of the IEEE, Vol. 67, No. 4, pp. 554–566, April 1979.
2. Dennis Lindwall, *3D underwater imaging using vector acoustic sensors*, Geophysics, Vol. 7J. No. 1, pp. Q1–Q7, January–February 2008.
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. Øyvind Hegrenæs and Einar Berglund, *Doppler Water-Track Aided Inertial Navigation for Autonomous Underwater Vehicle*, OCEANS 2009-EUROPE, May 2009, pp.1–10.
5. Wanli Li, Wenqi Wu, Jinling Wang, and Liangqing Lu, *Fast SINS Initial Alignment Scheme for Underwater Vehicle Applications*, The Journal of Navigation 2013, Vol. 66, pp. 181–198.
6. Qiu Ying Wang, Yi Bing Lia, Ming Diaoa., Wei Gaob, Fei Yuca, *Moving base alignment of a fiber optic gyro inertial navigation system for autonomous underwater vehicle using Doppler velocity log*, Optik Vol. 126, pp. 3631–3637, 2015.
7. S. Karpenko, I. Konovalenko, A. Miller, B. Miller and D. Nikolaev, *UAV Control on the Basis of 3D Landmarks Bearing-Only Observations*, Sensors. 2015. Vol. 15. No. 12. pp. 29802–29820. <http://dx.doi.org/10.3390/s151229768>.
8. Pengyun Chen¹, Ye Li, Yumin Su, Xiaolong Chen and Yanqing Jiang, *Review of AUV Underwater Terrain Matching Navigation*, The Journal of Navigation 2015, Vol. 68, pp. 1155–1172.
9. K.B. Anonsen and O. Hallingstad, *Terrain Aided Underwater Navigation Using Point Mass and Particle Filters*, 2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium 2006, pp.1027–1035.
10. A. Popov, B. Miller, A. Miller, and K. Stepanyan *Optical Flow as a Navigation Means for UAVs with Opto-electronic Cameras* // Proceedings of 56th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences, March 9–10, Tel-Aviv and Haifa, Israel. 2016. ThL2T5.2.
11. 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>

Determining of the AUV Velocity with the Aid of Acoustical Sondage of the Ground Profile

Miller A.B., Miller B.M.

In the article the method of the AUV (autonomous underwater vehicle) velocity measurement have been suggested. The method is based on acoustic sondage of the distance to the ground. The main advantage of the algorithm is that it gives the absolute velocity of AUV as opposed to the common ones giving velocity with respect to the water. This approach can serve as a complementary correction means in the fusion of data obtained from modern velocity sensors such as Doppler lag at alias.

KEYWORDS: AUV, UAV, acoustic sondage, estimation, least square method.