

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ ПОИСКА ИСТОЧНИКА ПОДВОДНОГО ШЛЕЙФА, ОСНОВАННОМ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ГРУППЫ АНПА

Бабак Л. Н.¹,

*(Дальневосточный государственный технический
университет им. В.В.Куйбышева, Владивосток),*

Щербатюк А. Ф.²,

*(Институт проблем морских технологий
Дальневосточное отделение РАН, Владивосток)*

Рассмотрен алгоритм поиска источника шлейфа, основанный на аппроксимации границы шлейфа. При оценивании местоположения источника наибольшими весами обладают наиболее близкие оценки местоположения источника, полученные отдельными автономными необитаемыми подводными аппаратами. Приведены некоторые результаты моделирования работы группы из четырех подводных аппаратов по определению местоположения источника шлейфа.

Ключевые слова: поиск источника шлейфа, группа автономных необитаемых подводных аппаратов, траектории движения.

1. Введение

В последние годы все большее развитие получают исследования, связанные с изучением состояния морских акваторий и влияния на них антропогенных воздействий. Для этих целей проводятся специальные исследования с применением различных технических средств. Особое внимание привлекают процес-

¹ Лариса Николаевна Бабак, доцент.

² Александр Федорович Щербатюк, чл.-корр. РАН, д.т.н., зав. лаб.
(scherba@marine.febras.ru)

сы распространения примесей в воде, связанные с регулярной бытовой и промышленной деятельностью, а также с засорением морской среды единичными источниками загрязнений. Одним из примеров неоднородностей водной среды является шлейф, который образуется в результате сброса технологических отходов из трубы или от расположенного на дне источника растворенного вещества под воздействием имеющихся в данном районе течений. Задачами обследования могут быть локализация (оконтуривание) образовавшегося района с повышенной концентрацией примеси и определение местоположения источника растворенного вещества.

Такие платформы, как автономные обитаемые подводные аппараты /АНПА/, способны адаптивно исследовать процессы в зависимости от времени и на значительных дистанциях. Сеть интерактивных подводных аппаратов является распределением мобильных управляемых сенсоров с регулируемым пространственным разрешением и программируемым поведением для измерения пространственных градиентов параметров среды. В последние годы обитаемые подводные аппараты все шире используются для мониторинга водных акваторий [1-8]. В [7] описан эксперимент с применением АНПА *MARES* по обследованию состояния залива *Aveiro* на португальском побережье, в который сбрасываются сточные воды. В статье [6] приведены результаты исследования с использованием АНПА *REMUS* по изучению распространения загрязнения от точечного источника при наличии течений, где в качестве источника шлейфа использовался родаминовый краситель. Результаты использования АНПА *REMUS* для оценки 3-х мерного распределения концентрации растворенных органических веществ в заливе *Penobscot* описаны в [8]. В статье [4] рассмотрен эксперимент с использованием автономного водного аппарата (*autonomous surface vehicle – ASV*) по отслеживанию теплового потока, источником которого является ядерный реактор в *Calvert Cliffs*, США. Осенью 2008 и 2009 года ИПМТ выполнил исследования с использованием АНПА ММТ-3000, связанные с оценкой распространения шлейфа пресной воды от реки Безымянная, впадающей в бухту Воевода в районе острова Русский вблизи г. Владивостока [1].

Оценка выполнялась на основе измерений солености и температуры.

Опыт одновременного использования нескольких АНПА SAUVII для оценивания параметров водной среды рассмотрен в [5]. Еще одним примером использования групп АНПА являются исследования, проводимые в *SANDIA National Laboratories* (США) с применением малогабаритных подводных аппаратов *Ranger* (*Nekton Research*) [3]. В [9] описано использование подводных аппаратов *Ranger* для локализации источника шлейфа и съемки движения фронта солености в устье реки Нью-Порт на побережье Северной Каролины. Поиск источника шлейфа выполнялся тремя подводными аппаратами, которые запускались из трех разных точек и двигались к эпицентру шлейфа на основе расчета градиента концентрации, выполняя зигзагообразные траектории по высоте. Оценка распространения фронта солености выполнялась четырьмя АНПА, которые двигались параллельными зигзагообразными траекториями в вертикальной плоскости.

В данной статье рассмотрено решение задачи поиска источника шлейфа с помощью группы АНПА. Подводные аппараты параллельно выполняют измерения и обмениваются накопленными данными, которые используются для формирования траекторий движения каждого АНПА к источнику шлейфа. При поиске источника шлейфа используются не мгновенные значения градиентов концентрации, которые в реальной ситуации зашумлены из-за неоднородности и неравномерности движения воды в шлейфе, а данные, полученные из модельной аппроксимации границ шлейфа, в которой все выбросы в исходных измерениях сглаживаются с помощью МНК.

2. Описание алгоритма

Рассмотрим задачу оконтуривания границ шлейфа и определения местоположения точечного источника шлейфа. Разрабатываемый алгоритм предназначен для организации движения группы АНПА к месту нахождения точечного источника шлейфа. Допустим, что имеется плоское придонное течение, в кото-

ром расположен источник растворенного вещества. Вещество попадает в водный поток и образует шлейф, который расширяется по мере удаления от источника.

- плотность воды с примесью выше плотности морской воды и поэтому загрязненная вода локализуется вблизи дна и в вертикальной плоскости имеет вид слоя определенной толщины;
- в горизонтальной плоскости шлейф можно представить в виде кусочно-трапецевидных сегментов (рис. 1).

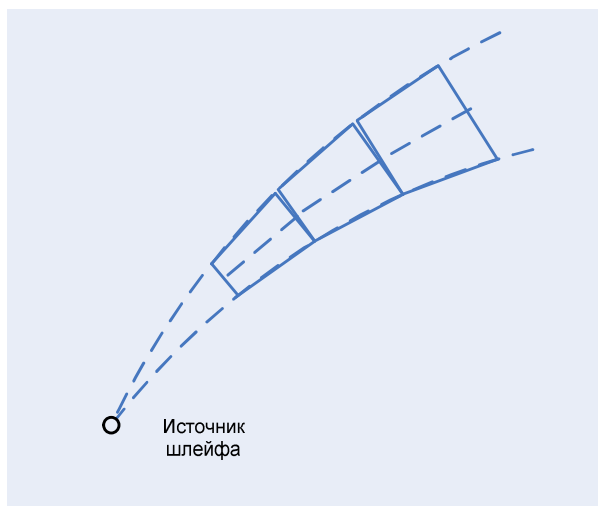


Рис. 1. Шлейф и его кусочно-трапецевидная аппроксимация

Для локализации местоположения источника шлейфа для каждого АНПА формируется траектория, направленная на пересечение шлейфа. Пересечению границы шлейфа соответствует ситуация, когда показания датчика концентрации растворенного вещества превышают заданный порог в течении нескольких измерений. Траектория движения АНПА формируется в виде мандра, пересекающего шлейф параллельными прямолинейными галсами, длина которых уменьшается по мере сужения ширины шлейфа. Границы шлейфа аппроксимируются прямыми линия-

ми $Line1$ ($y = k_1x + b_1$) и $Line2$ ($y = k_2x + b_2$) путем минимизации невязок:

$$(1) \min_{k,b} \sum_i (y_i - kx_i - b)^2 .$$

Параметры линий $Line1$ и $Line2$ определяются на основе МНК, в соответствии с выражениями:

$$(2) \begin{cases} \sum_i (y_i - kx_i - b) \cdot x_i = 0, \\ \sum_i (y_i - kx_i - b) = 0, \end{cases}$$

где (x_i, y_i) – координаты точек пересечения правой границы шлейфа для линии $Line1$ или левой границы шлейфа для линии $Line2$.

После попадания одного из АНПА в шлейф и аппроксимации границ фрагмента шлейфа, рассчитывается центральная линия шлейфа и все АНПА корректируют свою траекторию таким образом, чтобы кратчайшим образом пересечь данную линию и двигаться вдоль нее к источнику шлейфа. Когда АНПА выходит из шлейфа, он повторно выполняет движение в виде меандра и по точкам пересечения границы шлейфа уточняет ориентацию и положение центральной линии шлейфа. При этом за текущую центральную линию принимается линия, полученная тем АНПА, который находится на самом узком участке шлейфа, т.е. ближайшего к источнику шлейфа. Если один из АНПА пересекает текущую центральную линию, но не обнаруживает шлейф (находится за источником), то данный АНПА выполняет движение вдоль центральной линии по течению до обнаружения шлейфа. Предполагается, что АНПА обнаружил источник шлейфа, если при выполнении меандра поперек оси шлейфа на текущем галсе АНПА не пересек шлейф. В качестве оценки местоположения источника шлейфа принимаются координаты точки пересечения оси шлейфа и линии, лежащей посередине между текущим и предыдущим галсами меандра. При этом ошибки в определении местоположения источника шлейфа не превосходит радиуса циркуляции АНПА.

После определения всеми АНПА координат источника шлейфа (решений) оценивается результирующее местоположение источника шлейфа. При этом для каждого полученного местоположения источника находится ближайшее соседнее решение и определяется дальность до него D_k . в соответствии с соотношением:

$$(3) \quad D_k = \begin{cases} \min_i [(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2]^{0.5}, & \text{если } D_k \geq \Delta, \\ \Delta, & \text{если } D_k < \Delta. \end{cases}$$

Предполагается, что результирующее решение находится вблизи тех решений, которые наименее удалены друг от друга. Координаты предполагаемого местоположения источника шлейфа (x, y) вычисляются в соответствии с выражениями:

$$(4) \quad \begin{cases} \sum_{k=1}^N [x - x_k] / D_k = 0, \\ \sum_{k=1}^N [y - y_k] / D_k = 0, \end{cases}$$

где $k = 1, \dots, N$ – номер АНПА и соответствующего решения, N – число участвующих в эксперименте АНПА.

3. Некоторые результаты моделирования

Для моделирования работы алгоритма был разработан комплекс программ на языке С. В процессе моделирования задавались начальные местоположения АНПА и исходные параметры их движения. Система работает с некоторым заданным периодом времени ΔT , который в натуральных условиях определяется временем измерения концентрации примеси в воде бортовым датчиком.

Границы шлейфа моделировались двумя параболоми. Значение концентрации растворенного вещества в точке (x, y) определялось из условия, что масса вещества, проходящего через любой вертикальный разрез, перпендикулярный оси шлейфа, является величиной постоянной и равна A . В соответствии с экспериментальными данными, приведенными в [1], концентрация примеси в центре шлейфа максимальна и убывает к его гра-

ницам. В используемой модели шлейфа принято, что вдоль поперечного сечения концентрация линейно убывает от середины шлейфа до его границы. Исходя из этих условий, можно получить выражение для концентрации вещества в произвольной точке (x, y) для локального трапецевидного участка шлейфа:

$$(5) \quad K(x, y) = \begin{cases} \frac{A}{ax} \left(1 - \frac{|y|}{ax} \right), & (x > \varepsilon, |y| < ax), \\ 0, & \text{для всех остальных } (x, y), \end{cases}$$

где ось Ox направлена вдоль оси локального трапецевидного фрагмента шлейфа (рис. 2).

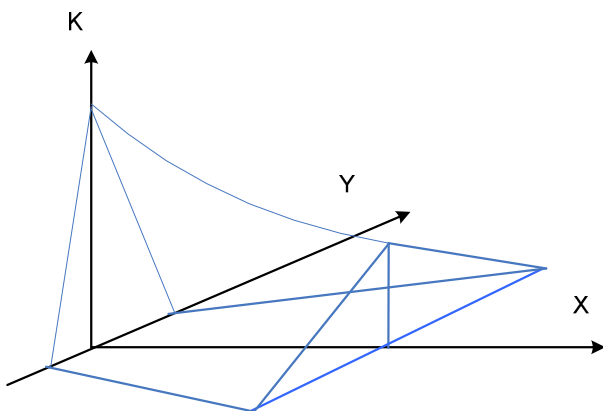


Рис. 2. Вид функции концентрации для локального трапецевидного участка шлейфа

Для моделирования концентрации растворенного в воде вещества в виде зашумленного процесса, значения концентрации, полученные в соответствии с выражением (5) складывались с равномерно распределенным на заданном интервале шумом.

На начальном этапе работы все АНПА движутся заданными курсами до тех пор, пока не будет обнаружен шлейф и получена аппроксимация границ фрагмента шлейфа. Затем организуется движение всех АНПА к предполагаемой оси шлейфа. На основе измерений, полученных всеми подводными аппаратами, уточня-

ется форма шлейфа. В процессе моделирования предполагалось, что комплексированная навигационная система АНПА обеспечивает необходимую точность определения местоположения АНПА [2].

Процесс моделирования движения четырех АНПА к шлейфу из заданных начальных местоположений показан на рис. 3.

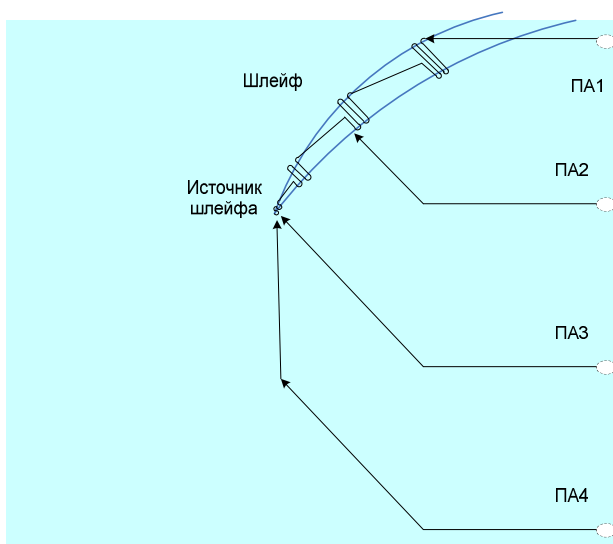


Рис. 3. Моделирование работы четырех АНПА для локализации шлейфа и поиска источника шлейфа

Направление шлейфа и местоположение его источника в начальный момент времени неизвестны. Эллипсами отмечены стартовые положения АНПА 1-4. На данном рисунке показан модельный эксперимент, когда на начальном этапе траектории подводных аппаратов были направлены вправо. После того, как АНПА 1 обнаружил шлейф, выполнил траекторию в виде меандра и передал информацию о положении осевой линии шлейфа другим АНПА, они скорректировали свои траектории и стали двигаться к рассчитанной центральной оси шлейфа.

В процессе моделирования работы, второй АНПА попадает в шлейф и выполняет процедуру определения осевой линии то

шлейфа. Когда первый АНПА выходит из шлейфа, он также выполняет процедуру определения осевой линии шлейфа. В итоге все АНПА достигают источника шлейфа. На рис. 4 изображена блок-схема алгоритма поиска источника шлейфа на основе использования группы АНПА.

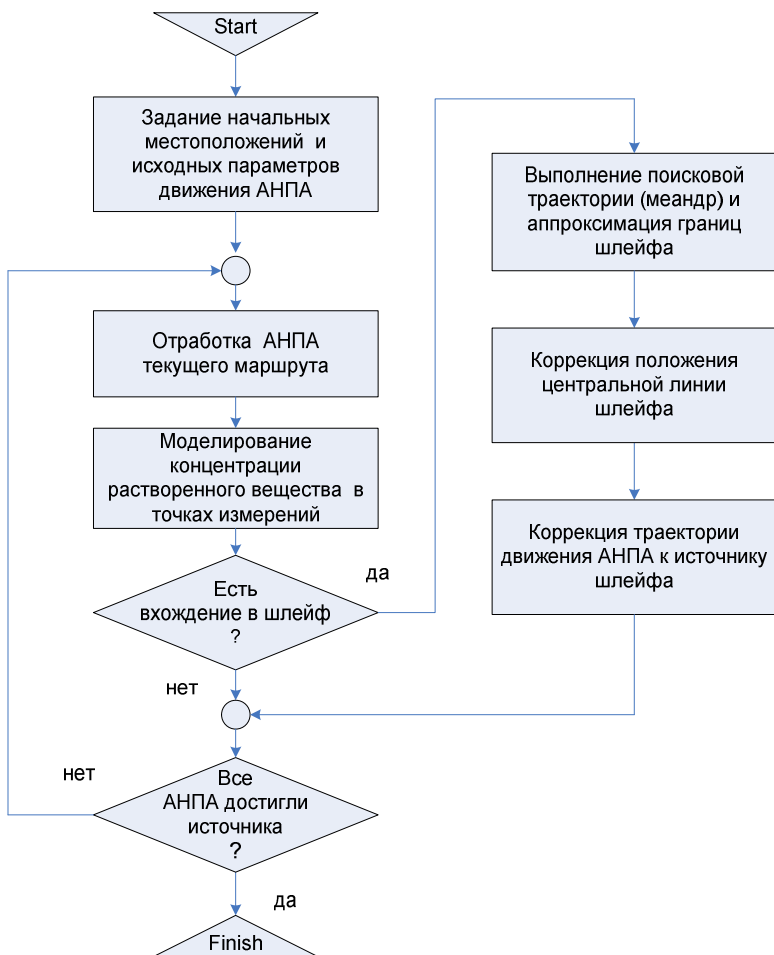
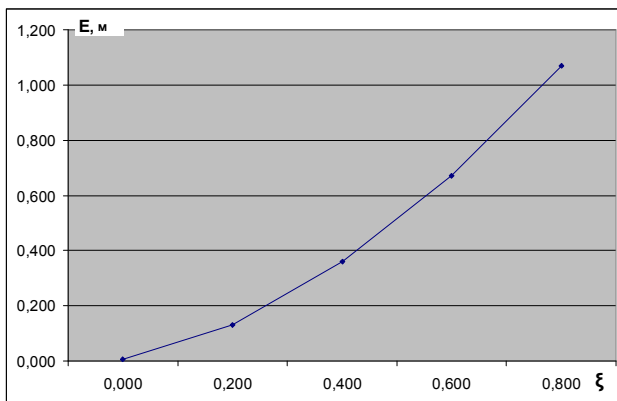
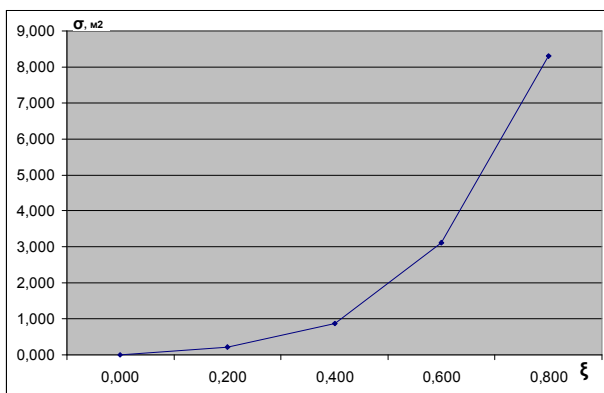


Рис. 4. Блок-схема алгоритма поиска источника шлейфа на основе использования группы АНПА

В процессе моделирования работа алгоритма исследовалась при разных значениях уровня шумов в измерениях концентрации растворенного вещества. Для получения статистических характеристик работы алгоритма использовался метод Монте-Карло. При этом для каждого набора параметров выполнялось по 30 прогонов программы, соответствующих разным случайным выборкам измерений.



а)



б)

Рис. 5. Среднее значение (а) и дисперсия (б) ошибки определения положения источника шлейфа, в зависимости от уровня шумов в измерениях

На рис. 5 (а) показан график зависимости среднего значения ошибки определения местоположения источника шлейфа для 30 реализаций при уровне шумов в измерениях от 0 до 80% от максимального значения концентрации, а на рис. 5 (б) показан график зависимости дисперсии ошибки определения местоположения источника шлейфа. Из результатов моделирования следует, что ошибка в определении местоположения источника шлейфа, вызванная шумом в измерениях, не превышает единицы метров. Полученная ошибка сравнима с ошибкой высокоточной навигационной системы АНПА. Данная точность достаточна для визуального обнаружения источника шлейфа при достижении подводным аппаратом предполагаемого местоположения источника, так как дальность видения под водой может составлять 8-15 метров.

4. Заключение

Рассмотренный в работе алгоритм поиска источника шлейфа основан на кусочно-линейной аппроксимации границ шлейфа. Для этого используется набор данных, собранный группой АНПА. Одним из достоинств алгоритма является то, что для поиска источника шлейфа используются не мгновенные значения градиентов концентрации, которые в реальной ситуации зашумлены из-за неоднородности и неравномерности движения воды в шлейфе, а данные, полученные из модельной аппроксимации границ шлейфа, в которой все выбросы сглаживаются из-за обработки исходных измерений с помощью МНК.

Использование группы АНПА позволяет повысить скорость локализации шлейфа, а также точность и надежность обнаружения источника шлейфа. Результаты моделирования подтверждают работоспособность и эффективность алгоритма. Данная работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 100800249а.

Литература

1. БАБАК Л.Н., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием авто-*

- номных необитаемых подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация и управление. - 2010 (в печати).*
2. ВАУЛИН Ю.В., МАТВИЕНКО Ю.В., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Навигационное обеспечение автономного необитаемого подводного аппарата ММТ-3000 // Материалы XIV международной конференции по интегрированным навигационным системам. - Санкт-Петербург, 2007. – С. 251-256.*
 3. BYRNE R. Algorithms and Analysis for Underwater Vehicle Plume Tracing / BYRNE R., ESKRIDGE S., HURTADO J. et al. // SANDIA National Laboratories report. - 2004.
 4. CANNELL Ch. J., GADRE A. S., STILWELL D. J. Boundary tracking and rapid mapping of a thermal plume using an autonomous vehicle // Proceedings of the OCEANS 2006 MTS/IEEE Conference, September 18-21, 2006, Boston, USA, ISBN CD-ROM: 1-4244-0115-1.
 5. CHAPPELL S., KOMERSKA R., BLIDBERG D. at al. Recent Field Experience Using Multiple Cooperating SAUVs. // Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07), August 19-22, 2007, Durham, New Hampshire, USA.
 6. FARRELL J.A. at al. Chemical Plume Tracing Experimental Results with a REMUS AUV. // Proceedings of the OCEANS 2003 MTS/IEEE Conference, September 22-26, 2003, San Diego, USA, p.p. 962-968.
 7. RAMOS P., MONEGO M., CARVALHO S. Spatial Distribution of a Sewage Outfall Plume Observed with an AUV. // Proceedings of the OCEANS 2008 MTS/IEEE Conference, September 15-18, 2008, Quebec, Canada.
 8. ROBBINS I. C., MOLINE M. A. Autonomous CDOM plume mapping in Penobscot bay, Maine: Remus operation and modularity. // Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07), August 19-22, 2007, Durham, New Hampshire, USA.
 9. SCHULZ B., HOBSON B. at al. Field results of multi-UUV missions using ranger micro-UUVs. // Proceedings of the OCEANS 2003 MTS/IEEE Conference, September 22-26, 2003, San Diego, USA, p.p. 956-961.

**ABOUT ONE ALGORITHM FOR UNDERWATER
PLUME SOURCE LOCALIZATION BASED ON MULTI
AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES USAGE**

Larisa Babak, Far East State Technical University, assistant professor (lightsome@yandex.ru).

Alexander Scherbatyuk, IMTP FEB RAS, PhD, head of laboratory (scherba@marine.febras.ru).

Abstract: The algorithm of underwater plume source localization based on approximation of plume boundary is considered in the paper. More close decisions from different autonomous underwater vehicles have bigger weights for plume source position estimation. Some modeling results of plume source localization for group of four autonomous underwater vehicles are supplemented.

Keywords: plume source localization, group of autonomous underwater vehicles, motion trajectory.

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии О. П. Кузнецовым*