

ОНЛАЙН-ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ПРЕВЫШЕНИЯ ОШИБКИ РЫСКАНИЯ АНПА С ПОМОЩЬЮ А-ПРОФИЛЕЙ

Липко И.Ю.

Севастопольский государственный университет, Севастополь

Ключевые слова: оценка времени присутствия, большие отклонения, инстантон, стабилизация курса.

Аннотация. Статья посвящена теме оценки времени присутствия автономного необитаемого подводного аппарата в положении, ограниченном заданным углом курса. Новизна заключается в использовании нескольких траекторий наиболее вероятного движения. Для решения задач используются методы теории больших отклонений, численного интегрирования. Показаны результаты компьютерной симуляции реального аппарата и метрики качества прогноза.

A-PROFILE METHOD FOR ONLINE ESTIMATION OF TIME WHEN AUV YAW ERROR EXCEEDS THE THRESHOLD

Lipko I.U.

Sevastopol State University, Sevastopol

Keywords: time estimation, large deviation, instanton, AUV course keeping.

Abstract. The article is devoted to the estimating the time of presence of an autonomous uninhabited underwater vehicle in a position limited by a given course angle. The novelty lies in the use of several trajectories of the most probable movement. Methods of the theory of large deviations and numerical integration are used to solve problems. The results of a computer simulation of a real apparatus and a prediction quality metric are shown.

Введение. В статье рассматривается задача прогноза времени, которое осталось до момента превышения заданного порога отклонения курса от уставки. Задача актуальна в случаях применения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для их автоматического докования, передачи данных оптическим и лазерным способами [1, 2]. В данном материале используется АНПА MiddleAUV [3]. **Цель** – спрогнозировать время, в течение которого ещё не будет достигнуто превышение ошибки для заданного угла стабилизации. Эта цель достигается **методами** теории больших отклонений, решения оптимизационной задачи Лагранжа-Понтрягина и численного моделирования.

Постановка задачи и гипотеза решения. Пусть АНПА описывается дифференциальным уравнением с внешним возмущением и малым параметром:

$$\dot{x} = Ax + \varepsilon \sigma \xi(t), \quad x(0) = x_0 \quad (1)$$

где x – вектор состояния, A – матрица системы, σ – волатильность, образующая матрицу диффузии $a = \sigma \sigma^T$, $\xi(t)$ – гауссовский белый шум, x_0 – начальное состояние, ε – малый параметр.

Пусть задан курсовой угол, на котором должен стабилизироваться АНПА. Величина ошибки отклонения от этого курса задана пороговым значением x_{thr} , которое состояние объекта x_c не должно превышать. По сути, порог x_{thr} разделяет фазовую плоскость на безопасную область функционирования E и опасную D

(рис. 1). Необходимо в текущий момент времени t_c для состояния объекта $x_c(t_c)$ оценить время T_{thr} , которое осталось до момента времени t_i , когда состояние $x_c(t_i)$ превысит заданный уровень x_{thr} .

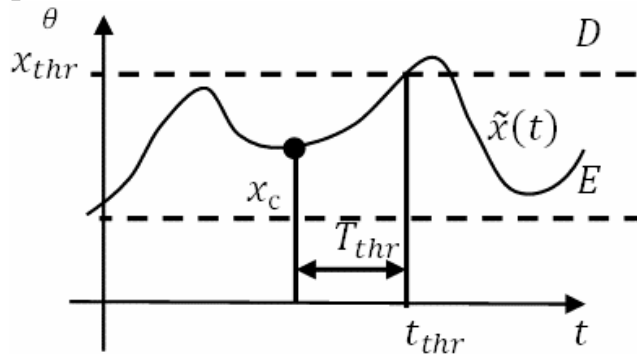


Рис. 1. Текущее состояние, окно прогноза и порог превышения

Гипотеза о решении этой задачи состоит в получении наиболее вероятных траекторий движения (инстантонов) к нескольким порогам, включая x_{thr} и меньше, и сопоставлении текущего состояния x_c на эти инстантоны. Для уравнения (1) инстантон может быть получен аналитически как

$$x^* = \arg \min_{x(-\infty)=0, x(0)=x_{thr}} V(O, x_{thr}), \tag{3}$$

ввиду оценки Вентцеля-Фрейдлина [4]:

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \epsilon^2 P(x \in D) = - \min_{y \in D \cup \partial D} V(t, x, y), \tag{4}$$

где $V(t, x, y) = \min_{\varphi_0=x, \varphi_t=y} S_t(\varphi)$ – квазипотенциал из состояния x в состояние y в

течение времени t , $V(O, x_{thr}) = V(\infty, 0, x_{thr})$, $S_T(x) = \int_0^T (\dot{x} - Ax)\sigma\sigma^T(\dot{x} - Ax)dt$ это функционал действия, T – длина инстантона.

Поскольку пересечение может происходить также и вдоль более дальних порогов $x_{thr_N} > x_{thr_{N-1}} > \dots > x_{thr_1} > x_{thr_0} = x_{thr}$, принадлежащих множеству инстантонов X^* , то оценка проводится вдоль соответствующих этим порогам инстантонов и оптимизация выполняется и времени и по инстантонам:

$$T_{thr} = T - \arg \min_{x^* \in X^*} \arg \min_{t \in [0, T]} \|x_c - x^*(t)\|. \tag{6}$$

Результаты симулирования. Для проверки алгоритма оценки оставшегося времени было просимулировано движение АНПА к порогу $x_{thr}=5^\circ$ и отобрано 500 траекторий, пересекающих его за 15 секунд. Так на рисунке 2 показаны эти траектории и оценки времени на 5-секундном интервале времени перед пересечением порога в 5° .

Таблица 1 показывает эти метрики MSE и MAE качества оценок для разных интервалов прогноза: сравнивается прямая оценка времени с отфильтрованной. Для окон времени размером в 2 - 10 с метрики гораздо лучше. Фильтрация даёт сглаженную оценку.

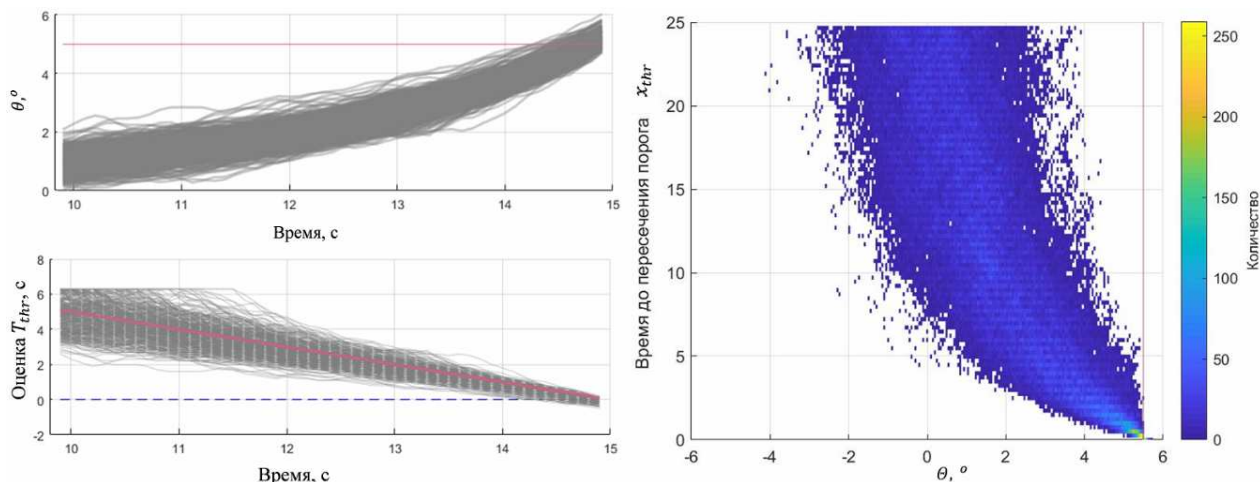


Рис. 2. Траектории и оценки времени в каждый момент времени (слева); распределение времени выхода при воздействии внешних возмущений (справа)

Табл. 1. Метрики качества оценок

| Окно времени, с / Режим | MAE | MSE |
|-----------------------------|-------------|---------------|
| 15 / Прямая оценка / Фильтр | 2.85 / 2.83 | 15.54 / 15.50 |
| 10 / Прямая оценка / Фильтр | 1.16 / 1.13 | 2.62 / 2.56 |
| 5 / Прямая оценка / Фильтр | 0.47 / 0.44 | 0.41 / 0.35 |
| 2 / Прямая оценка / Фильтр | 0.25 / 0.27 | 0.10 / 0.12 |

Заключение. Для автономного подводного аппарата с ПИД-регулятором курсового угла построен алгоритм оценивания времени нахождения курсового угла в заданных пределах. Вычислены наиболее вероятные траектории движения. Разработан алгоритм проецирования на несколько а-профилей, ведущих к нескольким пороговым значениям. Получены оценки в окне продолжительностью до 7 секунд.

Список литературы

1. Половко С.А., Проценюк А.С., Целуйко В.В. Опыт создания системы подводной стыковки для организации совместных действий // Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». – СПб: ООО Типография Фурсова, 2022. – С. 152-153.
2. Мартынов В.Л. Методология повышения эффективности подводных аппаратов. – СПб.: Мор. подвод. оружие – Гидроприбор, 2016. – 258 с.
3. Lipko I. Identification of the Horizontal Movement of the Underwater Vehicle MiddleAUV // 2022 International Russian Automation Conference. – Sochi, 2022. – P. 820-825. – doi: 10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896256.
4. Вентцель А.Д., Фрейдлин М.И. Флуктуации в динамических системах под действием малых случайных возмущений. – М.: Наука, 1979. – 424 с.

Сведения об авторе:

Липко Иван Юрьевич – старший преподаватель.