

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ КУРСОМ МОРСЬКИХ СУДЕН НА ОСНОВІ НЕЙРОМЕРЕЖОВОЇ МОДЕЛІ ДОВГОЇ КОРОТКОТЕРМІНОВОЇ ПАМ'ЯТІ

В. М. Іваненко, В. М. Федунів, З. Я. Дорофєєва

Дунайський інститут водного транспорту
Державного університету інфраструктури та технологій

Анотація: На даний час актуальними є питання безпечного управління морськими суднами. Ефективна стратегія управління судном може оптимізувати витрату палива, зменшити втрати ходового часу, знизити собівартість. Однією з найважливіших систем суднової автоматики є система управління курсом, від якості роботи якої залежить економічна ефективність, захищеність зовнішнього середовища, надійність і безпека мореплавання. Для побудови високоякісних систем управління рухом морського судна важливе значення має математична модель об'єкта управління. Як показує аналіз відповідних досліджень, більшість аналітичних математичних моделей є досить спрощеними і часто не враховують фактори невизначеності, нестационарності та нелінійності, що мають місце в реальних умовах руху морських суден. У зв'язку з цим значну перспективу мають методи дослідження, які не спираються на припущення про апріорну визначеність структури та параметрів рівнянь математичної моделі. До таких методів відносяться технології, що використовують нейронні мережі. На основі аналізу відомих моделей руху морських суден зроблено вибір на користь застосування нейромережових моделей довгої короткострокової пам'яті та визначено ефективність даного підходу, що дозволяє значно підвищити точність представлення динаміки морського судна і при цьому послабити структурні обмеження, притаманні традиційним моделям, а також забезпечити обробку довготривалих залежностей на відміну від класичних рекурентних нейронних мереж.

Ключові слова: морське судно, рух, курс, математична модель, аналітичний вираз, рекурентна нейронна мережа, довга короткотермінова пам'ять.

HEADING CONTROL SYSTEM FOR MARINE VESSELS BASED ON A NEURAL NETWORK MODEL OF LONG-TERM SHORT-TERM MEMORY

V. M. Ivanenko, V. M. Fedunov, Z. Ya. Dorofieieva

Danube Institute of Water Transport,
State University of Infrastructure and Technologies

Abstract: At present, the issues of safe management of sea vessels are becoming more and more urgent. An effective ship management strategy can optimize fuel consumption, reduce lost sailing time, and reduce production costs. One of the most important ship automation systems is the heading control system, the quality of which determines economic efficiency, environmental protection, reliability and safety of navigation. For the construction of high-quality control systems for the movement of a sea vessel, a mathematical model of the control object is of no small importance. As the analysis of relevant studies shows, most analytical mathematical models are rather simplified and often do not take into account the factors of uncertainty, nonstationarity and nonlinearity that occur in real conditions of the movement of ships. In this regard, research methods that do not rely on the assumption of a priori certainty of the structure and parameters of the

equations of a mathematical model have significant prospects. These methods include technologies that use neural networks. Based on the analysis of known models of the movement of sea vessels, a choice was made in favor of using neural network models of long short-term memory and the effectiveness of this approach was determined, which can significantly improve the accuracy of representing the dynamics of a sea vessel and weaken the structural limitations inherent in traditional models, as well as provide processing. long-term dependencies in contrast to classical recurrent neural networks.

Keywords: *marine vessel, movement, heading, mathematical model, analytical expression, recurrent neural network, long short-term memory.*

На даний час дедалі актуальнішими є питання безпечного управління морськими суднами. Це пояснюється необхідністю забезпечити умови безпечного мореплавання при інтенсивності судноплавства, що збільшується, коли потрібно здійснення складних маневрів, прогнозування можливої нестандартної ситуації, врахування непередбачуваних зовнішніх впливів та ін. Ефективна стратегія управління судном може оптимізувати витрату палива, зменшити втрати ходового часу, знизити собівартість. Однією з найважливіших систем суднової автоматики є система управління курсом, від якості роботи якої залежить економічна ефективність, захищеність зовнішнього середовища, надійність і безпека мореплавання.

Морські судна різних типів значною мірою є складними, апіорно невизначеними за своїми характеристиками керованими динамічними об'єктами, що функціонують у недостовірно відомому середовищі та різноманітних умовах, опис яких завжди є неповним. Істотною причиною невизначеності динаміки морських суден є як неточність та неповнота інформації про об'єкт та умови його функціонування, так і похибка вимірювань, що використовуються для формування керуючих впливів у процесі руху, неповнота знань про зовнішні обурення, наприклад, про різкі перепади вітрових та хвильових впливів, течії та ін.

Безпека та ефективність мореплавання значною мірою визначається ступенем автоматизації процесу управління курсом руху морського судна. Для побудови високоякісних систем управління рухом морського судна важливе значення має математична модель об'єкта управління. Наявність адекватної математичної моделі дозволяє вирішувати як завдання аналізу динаміки морського судна, так і проблеми щодо вдосконалення систем управління рухом, розробки та тестування нових типів регуляторів.

Сучасна теорія автоматичного управління створила багатий арсенал засобів для побудови математичних моделей динамічних об'єктів. До них належать: теорія нелінійних, адаптивних, інтелектуальних та інших систем. Більшість згаданих методів, орієнтованих, зокрема, на вирішення завдань ідентифікації, використовує припущення про популярність аналітичної структури диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що становлять математичну модель.

У загальному випадку, аналітичні моделі динаміки морських суден є достатньо ефективними при вирішенні задач аналізу та синтезу алгоритмів і систем управління. Однак, як показує аналіз відповідних досліджень, більшість аналітичних математичних моделей є досить спрощеними і часто не враховують

фактори невизначеності, нестаціонарності та нелінійності, що мають місце в реальних умовах руху морських суден.

У зв'язку з цим, значну перспективу мають методи дослідження, які не спираються на припущення про апріорну визначеність структури та параметрів рівнянь математичної моделі. До таких методів відносяться технології, що використовують нейронні мережі. Застосування нейронних мереж є доцільним, коли математична модель об'єкта є частково або повністю невідомою. Широке застосування нейронних мереж зумовлено ще й тим, що вони є нелінійними за своєю суттю і тому можуть моделювати нелінійні властивості руху морських суден. Ефективність використання штучних нейронних мереж полягає, в першу чергу, у їх здатності до адаптації або навчання в реальному часі за мінімальної апріорної інформації про об'єкт управління.

Таким чином, виникає завдання побудови математичних моделей в умовах часткової або повної апріорної невизначеності їх структури, які адекватні динаміці об'єктів, що спостерігається. У ряді останніх робіт вирішення завдань, пов'язаних з цією проблемою, виконується у класі рекурентних нейронних мереж (RNN). Одна з привабливих ідей RNN полягає в тому, що вони потенційно можуть пов'язувати попередню інформацію з поточним завданням. При цьому коли дистанція між актуальною інформацією та місцем, де вона знадобилася, є невеликою, RNN можуть навчитися використанню інформації з минулого. На жаль, у міру зростання цієї відстані RNN втрачають здатність пов'язувати інформацію (рис. 1). Таким чином, у RNN мають місце проблеми з обробкою значних довготривалих залежностей, що, у свою чергу, неприпустимо у завданнях управління курсом морських суден.

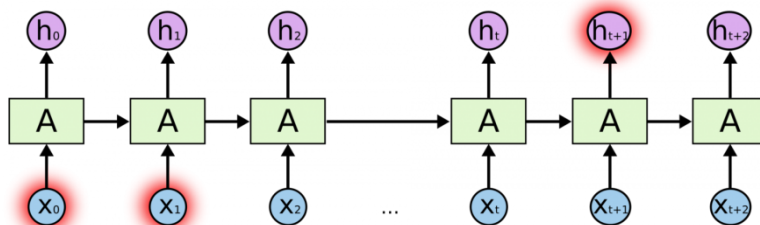


Рисунок 1 – Візуальне представлення проблеми з обробкою значних довготривалих залежностей у RNN

Для подолання проблеми з обробкою значних довготривалих залежностей використовується довга короткострокова пам'ять (Longshort-termmemory; LSTM). LSTM – особливий різновид архітектури рекурентних нейронних мереж, здатний до навчання значних довгострокових залежностей.

Таким чином, у даній доповіді, на відміну від класичного розуміння параметричної або структурно-параметричної ідентифікації, під нейромережевою ідентифікацією динамічного об'єкта мається на увазі побудова LSTM з динамікою, близькою до динаміки морського судна, що досліджується.

У загальному випадку, рекурентні нейронні мережі є адекватним математичним апаратом для представлення динамічних систем. Аналогічно

традиційним моделям динамічних систем, вихідні змінні рекурентних нейронних мереж, що функціонують у дискретному часі, залежать від їх значень у попередні моменти, а також поточних значень зовнішнього вхідного сигналу. Будь-яка рекурентна нейронна мережа має форму ланцюга модулів нейронної мережі, що повторюються. У звичайній RNN структура одного такого модуля є дуже простою, наприклад, він може бути одним шаром з функцією активації $\tanh$ – гіперболлічний тангенс (рис. 2).

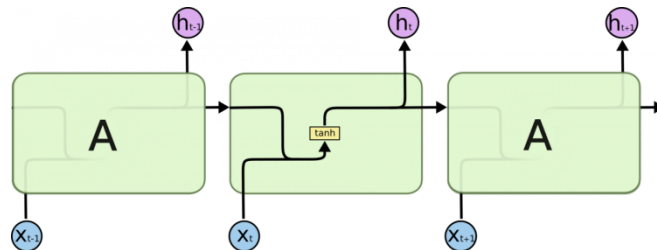


Рисунок 2 – Модуль, що повторюється в стандартній RNN, складається з одного шару

Структура LSTM також нагадує ланцюг, але модулі виглядають інакше. Замість одного шару нейронної мережі вони містять чотири, і ці шари взаємодіють особливим чином (рис. 3).

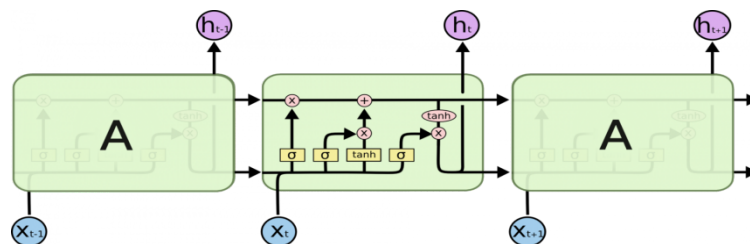


Рисунок 3 – Модель, що повторюється в LSTM, складається з чотирьох взаємодіючих шарів

Ключовий компонент LSTM – це стан осередку (cellstate) – горизонтальна лінія, що проходить у верхній частині схеми. Стан осередку нагадує конвеєрну стрічку. Вона проходить безпосередньо через весь ланцюг, беручи участь лише у кількох лінійних перетвореннях. Інформація може легко переходити по ньому, не змінюючись. Тим не менш, LSTM може видаляти інформацію зі осередку; цей процес регулюється структурами, які називаються фільтрами (gates). Фільтри дозволяють пропускати інформацію на підставі певних умов. Вони складаються з шару сигмоїдальної нейронної мережі та операції поточкового множення. Сигмоїдальний шар повертає числа від нуля до одиниці, які позначають, яку частку кожного блоку інформації слід пропустити далі через мережу. Нуль у разі означає “не пропускати нічого”, одиниця – “пропустити все”. У LSTM три такі фільтри, що дозволяють захищати та контролювати стан осередки.

Проблема навчання (налаштування), як у цілому RNN, так і зокрема LSTM, є оптимізаційною задачею, яка може бути розв’язана шляхом розмикання

зворотного зв'язку та застосування алгоритмів навчання нейромереж прямого поширення, що мають широкі можливості апроксимації нелінійних функцій.

Метою навчання (налаштування) мережі є визначення вагових коефіцієнтів, за яких реакція мережі на конкретну вхідну дію мінімально відрізняється від реакції моделі судна. При виконанні процедури навчання LSTM на її вхід, як і на вхід моделі судна, подається деякий вплив (значення положення пера руля судна), а також вихідні значення вихідних координат LSTM у попередні моменти дискретного часу математичної моделі руху морського судна (швидкість нищпорення), що і складає навчальну вибірку для нейронної мережі. Як критерій оцінки близькості поведінки LSTM та моделі судна використовується такий вираз:

$$I = \sum_{i=0}^N (x_{LSTM}(i) - x(i))^2 = \sum_{i=0}^N e(i)^2 \rightarrow \min,$$

де $x(i)$ – кутова швидкість повороту судна (швидкість нищпорення);

$x_{LSTM}(i)$ – вихід LSTM;

$i = \overline{1, N}$ – дискретний час;

N – довжина навчальної вибірки.

Після навчання LSTM проводилося тестування при змінених (не входили в навчальну вибірку) вхідних впливах, що показало високий ступінь подібності отриманої нейромережевої динаміки та моделі морського судна.

Висновки. На основі аналізу відомих моделей руху морських суден зроблено вибір на користь застосування нейромережевих моделей довгої короткострокової пам'яті та визначено ефективність даного підходу, що дозволяє значно підвищити точність представлення динаміки морського судна і при цьому послабити структурні обмеження, притаманні традиційним моделям, а також забезпечити обробку довготривалих залежностей на відміну від класичних рекурентних нейронних мереж. За результатами розробки алгоритмів нейромережевої ідентифікації динаміки морського судна виконано їх програмну реалізацію з використанням мови програмування Python та бібліотеки глибокого навчання TensorFlow.

ЛІТЕРАТУРА

1. Anderson, M. L. (2010). Neural reuse: a fundamental organizational principle of the brain. *Behav. Brain Sci.* 33, 245–266.
2. Amerongen, J. van Adaptive Steering of Ships: PhD thesis of Job van Amerongen. Delft University of Technology, 2005. P. 156.
3. Witkowska A. A., Tomera M., Smierzchalski R. Backstepping approach to ship course control. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.* 2007. Vol. 17, No. 1. P. 73–85.
4. Cangelosi, A., and Schlesinger, M. (2013). *Developmental Robotics: From Babies to Robots*. Cambridge, MA: MIT Press/Bradford Books.
5. Cisek, P. (2012). Making decisions through a distributed consensus. *Curr. Opin. Neurobiol.* 22, 927–936.
6. Cisek, P., and Kalaska, J. F. (2010). Neural mechanisms for interacting with a world full of action choices. *Annu. Rev. Neurosci.* 33, 269–298.

7. Hope, T., Stoianov, I., and Zorzi, M. (2010). Through neural stimulation to behaviour manipulation: a novel method for analysing dynamical cognitive models. *Cogn. Sci.* 34, 406–433.

Іваненко Віталій Миколайович старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Ізмаїл. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3271-5257>; vivanen@ukr.net.

Федунов Валерій Миколайович старший викладач кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Ізмаїл. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5092-2511>; valeriy.fedunov@gmail.com.

Дорофєєва Зоя Яківна старший викладач кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Ізмаїл. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3354-578X>; zoya.dorofeeva76@gmail.com.