УДК 621.317.08

А.В. РУДИК
Національний авіаційний університет
andrey4453117@gmail.com
В.А. РУДИК
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ПРИЛАДОВОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО РОБОТА

Для обчислення з високою точністю відстані до перешкоди за значеннями кількості лічильних імпульсів та швидкості ультразвуку в повітрі проведено розробку та аналіз моделей штучної нейронної мережі (ШНМ) типу Feed-forward (FF) і Cascade-forward (CF).

За результатами проведеного аналізу ШНМ типу Cascade-forward показали кращі результати, ніж ШНМ типу Feed-forward, при цьому CF-мережі за точністю мають приблизно однакові результати (для ШНМ з одним прихованим шаром MSE=1.577 мм, MAE=2.035 мм, а для ШНМ з двома прихованими шарами MSE=1.412 мм, MAE=1.892 мм). Однак за рахунок кращих точнісних характеристик для використання в приладових системах МР пропонується ШНМ CF-типу з двома прихованими шарами.

Ключові слова: штучна нейронна мережа, мобільний робот, приладова система, навчання, нейрон, передавальна функція, функція активації, середньоквадратична похибка, прихований шар.

A.V. RUDYK
National Aviation University
V.A. RUDYK
Kiev National University of Civil Engineering and Architecture

DEVELOPMENT THE ARTIFICIAL NEURAL NETWORK OF THE MOBILE-ROBOTS DEVICE SYSTEM

To calculate with high accuracy the distance to the obstacle by the number of counting pulses and the speed of ultrasound in the air, the models of an artificial neural network (ANN) of the Feed-forward (FF) and Cascade-forward (CF) type were developed and analyzed. The nature of the nonlinearity and the complexity of the relationship between the parameters are unknown in advance, so the number of hidden layers, neurons in the layers and the activation functions of neurons are chosen experimentally. As a result of the analysis, a set of 69 ANN models of different structures was developed and analyzed. For learning, the method of backward propagation of error was used. Based on the results of the analysis of 20 CF-type ANNs, the most accurate is an ANN consisting of 6 neurons with transfer function (TF) tansig and 9 neurons with TF purelin in the hidden layers and one neuron with TF purelin in the output layer. As a result of the training of this ANN with the duration of the 42nd epoch, the mean square error (MSE) of the training was 0.723 mm, and according to the results of the ANN testing on an additional sample, the MSE was 1.526 mm and the average absolute error was 1.965 mm.

Since in the learning process the full sample is divided into parts (60% for training, 20% for testing during training and 20% for testing), then the adequacy of the developed models was not tested on the training data vectors. For the final selection of the ANN structure, the samples for testing and testing were combined in a total size of 50, and the accuracy of the models that had previously shown the best results was checked on this combined sample. Based on the results of the analysis, the ANN of the CF-type showed better results than the ANN of the FF-type, while the CF networks have approximately the same accuracy (for an ANN with one hidden layer MSE=1.577 mm, MAE=2.035 mm, two hidden layers MSE=1.412 mm, MAE=1.892 mm). However, due to the best accuracy characteristics for use in MR systems, an ANN CF-type with two hidden layers is proposed.

Keywords: artificial neural network, mobile robot, instrument system, training, neuron, transfer function, activation function, mean square error, hidden layer.

Проведений в [1] аналіз показав, що існують досить сильні кореляційні взаємозв'язки між відстанню до перешкоди, вимірюваною ультразвуковим далекоміром мобільного робота (МР), та кількістю лічильних імпульсів і швидкістю ультразвуку в повітрі, яка є функцією групи кліматичних факторів. Тому саме ці параметри необхідно використовувати як інформаційні для визначення відстані до перешкоди.

Для збору даних при постановці експериментів МР переміщувався по прямій зі швидкостями 0.25 м/с, 0.5 м/с та 0.75 м/с, а час переміщення вибирався таким чином, щоб переміщення МР складало приблизно (3…5) м. При переміщенні МР зчитувалися показання ультразвукового далекоміра з частотою 5 Гц, кінцева точка переміщення фіксувалася за допомогою зовнішніх вимірювань, а за отриманими даними розраховувалися 10 проміжних позицій МР. Для дослідження взаємозв'язку між вищевказаними параметрами створено вибірку з 200 контрольних значень. Характер зв'язку між цими параметрами є складним і залежить від багатьох факторів, які важко встановити аналітично.

Для обчислення з високою точністю відстані до перешкоди за значеннями кількості лічильних імпульсів та швидкості ультразвуку в повітрі проведено розробку та аналіз моделей ШНМ типу *Feed-forward* (*FF*) і *Cascade-forward* (*CF*). Характер нелінійності та складність взаємозв'язку між параметрами заздалегідь невідомий, тому кількість прихованих шарів, нейронів у шарах та функції активації нейронів вибиралися експериментально. В результаті проведеного аналізу створено і проаналізовано набір з 69 моделей ШНМ різної структури. Для навчання використовувався метод зворотного поширення помилки. Значення

середньоквадратичної помилки ШНМ розраховується за формулою $E = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{L}\sum_{j}\left(y_j^k - m_{1,2}^k\right)^2$, де L – розмірність навчальної вибірки; $m_{1,2}$ – пара еталонних координат реальної позиції МР.

Для навчання ШНМ в якості еталонних значень використовуються координати реальної позиції робота, яка оцінюється за допомогою двох підходів – відеореєстрації робота за допомогою камери, закріпленої на стелі, і ручного вимірювання. Була здійснена спроба вимірювання реальної позиції на основі інфрачервоних далекомірів, але похибки даних сенсорів не дозволили зробити висновок про реальну якість роботи нейронної мережі. Для навчання нейронної мережі була підготовлена навчальна вибірка загальним розміром L = 120, при цьому власне для навчання використано вибірку розміром 70, а для перевірки при навчанні та тестування – вибірки розміром по 25.

Навчання і тестування проводилося засобами додатку *Neural network toolbox* пакету прикладного програмного забезпечення *MatLab* за допомогою функції *trainlm* з використанням алгоритму, що модифікує вагові коефіцієнти і зсуви за методом оптимізації Левенберга-Марквардта. Критерієм ефективності навчання була середньоквадратична помилка (СКП), а максимальна кількість епох становила 100 без часового обмеження процесу. Роботу кожної з створених моделей ШНМ було протестовано на додатковій вибірці з 25 значень, які не використовувались в процесі навчання. Основними критеріями для вибору оптимальної структури і параметрів ШНМ були середньоквадратична (*MSE*) та середня абсолютна (*MAE*) похибки при порівнянні дійсних значень з даними, отриманими в результаті роботи ШНМ. В результаті даного вибору було відкинуто надмірно адаптовані моделі, що не підходять для реалізації, а також ті, що мають відносно високі похибки за рахунок структури, що не відповідає характеру взаємозв'язку. Далі розглянемо деякі ШНМ, при моделюванні яких було отримано кращі результати.

За результатами аналізу 18 розроблених моделей типу *FF* з одним прихованим шаром найкращі результати за критерієм максимальної точності отримано при використанні ШНМ, яка має прихований шар (*Hidden Layer*), що складається з восьми нейронів з *tansig*-функцією активації, і вихідний шар (*Output Layer*), який складається з одного нейрона з *logsig*-функцією активації. Навчання ШНМ продовжувалось від 20 до 100 епох, при цьому СКП залежно від структури мережі (кількості нейронів у прихованому шарі) та кількості епох навчання знаходилася в межах від 1.357 мм до 2.352 мм. Вибіркові дані щодо результатів оцінки СКП навчання ШНМ в залежності від структур мереж типу *FF* і *CF* наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Результати оцінки СКП навчання ШНМ в залежності від структур мереж типу *FF* та *CF*

Кількість нейронів у прихованих шарах та кількість епох навчання (значення наведено в дужках)				Середньоквадратична похибка навчання ШНМ, мм			
Feed-forward		*Cascade-forward*		*Feed-forward*		*Cascade-forward*	
шар 1	шари 1 і 2	шар 1	шари 1 і 2	шар 1	шари 1 і 2	шар 1	шари 1 і 2
6 (100)	8 і 4 (40)	5 (25)	6 і 8 (28)	2.352	1.989	1.767	1.388
6 (50)	8 і 4 (26)	6 (26)	6 і 8 (36)	2.097	1.761	1.544	1.159
6 (20)	10 і 4 (30)	6 (32)	7 і 9 (32)	1.783	1.663	1.431	1.212
8 (100)	10 і 4 (16)	7 (26)	7 і 9 (40)	1.649	1.526	1.372	1.034
8 (50)	11 і 5 (26)	**7 (32)**	6 і 9 (36)	1.516	1.478	**1.045**	0.865
8 (20)	11 і 5 (16)	7 (40)	**6 і 9 (42)**	**1.357**	1.367	1.154	**0.723**
10 (50)	**11 і 7 (26)**	8 (22)	7 і 8 (30)	1.492	**1.143**	1.267	0.882
10 (20)	11 і 7 (16)	8 (30)	7 і 8 (44)	1.565	1.259	1.193	0.911
12 (50)	12 і 6 (30)	9 (26)	8 і 10 (32)	1.886	1.371	1.233	1.055

В процесі досліджень кількість нейронів у прихованому шарі змінювалась від 6 до 12. При збільшенні кількості нейронів до 15 ШНМ запам'ятовувала вхідні образи і на нових даних показувала незадовільні результати. При порівнянні значень відстані до перешкоди (поточного положення МР), отриманих за допомогою ШНМ, з дійсними значеннями визначено, що СКП становить 2.943 мм, а середня абсолютна похибка складає 3.862 мм. Найкращі результати при аналізі 16 мереж типу *FF* з двома прихованими шарами отримано при тестуванні ШНМ, приховані шари якої складаються відповідно з 11 та 7 нейронів з передавальними функціями *tansig*, а вихідний шар – з одного нейрона з аналогічною передавальною функцією. Навчання мережі тривало 26 епох, а СКП навчання складає 1.143 мм (табл. 1). За результатами тестування ШНМ на додатковій вибірці отримано СКП 2.492 мм та середню абсолютну похибку 3.251 мм.

При дослідженні каскадних ШНМ типу *CF* з одним прихованим шаром серед 15 варіантів максимальну точність при навчанні отримано в мережі, прихований шар якої складається з 7 нейронів з передавальними функціями (ПФ) *tansig*, а вихідний шар – з одного нейрона з ПФ *logsig*. Навчання ШНМ проходило 32 епохи, при цьому СКП навчання складає 1.045 мм (табл. 1). Однак при порівнянні дійсних значень з визначеними ШНМ СКП становила 2.247 мм, а середня абсолютна похибка – 2.919 мм.

Тому що точнісні характеристики даної каскадної ШНМ приблизно такі самі, що і у мережі типу *FF* з двома прихованими шарами, було розроблено, навчено і проаналізовано 20 ШНМ *CF*-типу з двома

прихованими шарами. За результатами проведеного аналізу найбільш точною є ШНМ (рис. 1), яка складається з 6 нейронів з ПФ *tansig* і 9 нейронів з ПФ *purelin* у прихованих шарах та одного нейрона з ПФ *purelin* у вихідному шарі. За результатами навчання такої ШНМ тривалістю 42 епохи отримано СКП навчання 0.723 мм (табл. 1), а за результатами тестування ШНМ на додатковій вибірці отримано СКП 1.526 мм та середню абсолютну похибку 1.965 мм.

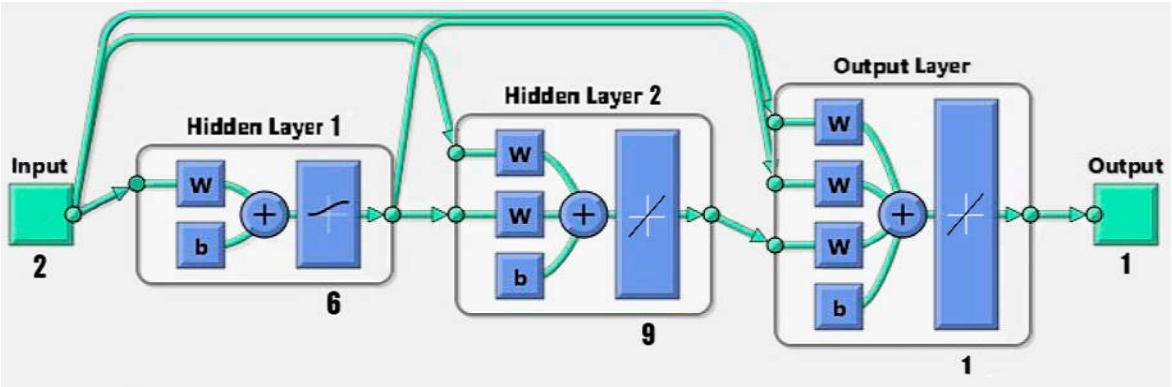

Рис. 1. Структура ШНМ типу Cascade-forward з двома прихованими шарами

Тому що в процесі навчання загальна вибірка розділена на частини (60% для навчання, 20% для перевірки при навчанні та 20% для тестування), то адекватність розроблених моделей не перевірялася на навчальних векторах даних. Для остаточного вибору структури ШНМ було об'єднано вибірки для тестування і перевірки при навчанні загальним розміром 50 та перевірено на цій об'єднаній вибірці точність моделей, що попередньо показали найкращі результати.

За результатами проведеного аналізу ШНМ типу *Cascade-forward* показали кращі результати, ніж ШНМ типу *Feed-forward*, при цьому *CF*-мережі за точністю мають приблизно однакові результати (для ШНМ з одним прихованим шаром *MSE*=1.577 мм, *MAE*=2.035 мм, а для ШНМ з двома прихованими шарами *MSE*=1.412 мм, *MAE*=1.892 мм). Однак за рахунок кращих точнісних характеристик для використання в приладових системах МР пропонується ШНМ *CF*-типу з двома прихованими шарами (рис. 1).

Розрахунок значення відстані до перешкоди (поточної координати МР) за результатами оцінки швидкості ультразвуку в повітрі та кількості лічильних імпульсів проводиться за такими формулами [2]:

$$L = f\left(w_1^{31} f(V_3) + w_2^{31} f(N) + \sum_{n=1}^{6} \left(a_n^1 w_n^{32}\right) + \sum_{k=1}^{9} \left(a_k^2 w_k^{33}\right) + b^3 \right);$$

$$a_n^1 = f\left(w_{1,n}^{11} f(V_3) + w_{2,n}^{11} f(N) + b_n^1\right); \qquad a_k^2 = f\left(w_{1,k}^{21} f(V_3) + w_{2,k}^{21} f(N) + \sum_{n=1}^{6} \left(a_n^1 w_{k,n}^{22}\right) + b_k^2 \right),$$

де f – функція активації нейрона; n, k – порядкові номери нейронів шарів; $f(V_3), f(N)$ – приведені сигнали швидкості ультразвуку в повітрі та кількості лічильних імпульсів; w_i^j, b_i^j – вагові коефіцієнти та зсуви нейронів; a_n^1, a_k^2 – вихідні сигнали нейронів першого і другого прихованих шарів.

Література

1. Рудык, А. В. Исследование влияния климатических факторов на оценку точности ультразвукового дальномера системы технического зрения мобильного робототехнического комплекса / А. В. Рудык // Вестник Азербайджанской Инженерной Академии. – 2018. – Т. 10, № 1. – С. 122-132.

2. Клепач, М. М. Методи та технічні засоби контролю якісних показників нафтопродуктів з використанням нейромережевих технологій: автореферет дис. на здобуття наук. ступ. к.т.н. / М. М. Клепач. – Івано-Франківськ : Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 2015. – 21 с.

References

1. Rudyk, A. V. Issledovanie vliyaniya klimaticheskih faktorov na otsenku tochnosti ultrazvukovogo dalnomera sistemyi tehnicheskogo zreniya mobilnogo robototehnicheskogo kompleksa / A. V. Rudyik // Vestnik Azerbaydzhanskoy Inzhenernoy Akademii. – 2018. – T. 10, # 1. – S. 122-132.

2. Klepach, M. M. Metody ta tekhnichni zasoby kontroliu yakisnykh pokaznykiv naftoproduktiv z vykorystanniam neiromerezhevykh tekhnolohii: avtoreferet dys. na zdobuttia nauk. stup. k.t.n. / M. M. Klepach. – Ivano-Frankivsk : Ivano-Frankivskyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet nafty i hazu, 2015. – 21 s.