

Ц. ЛИ, Ф. СУНЬ, Ф. Ю, В. ГАО

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОНЕЧЕТКОЙ СЕТИ В МОРСКОЙ СИСТЕМЕ ОРИЕНТАЦИИ И КУРСУКАЗАНИЯ

Обсуждается морская бесплатформенная система ориентации и курсоказания (СОК), основанная на принципах бесплатформенной инерциальной навигационной системы (ИНС). В данной системе колебания ошибок ориентации и курса ограничиваются с помощью демпфирующей сети при коррекции показаний от электромагнитного лага. Для снижения ошибок ориентации и курса введена нейронечеткая сеть автоматического управления коэффициентом демпфирования в зависимости от условий маневров. Результаты испытаний подтверждают эффективность предложенного метода.

Введение

Большинство современных бесплатформенных систем, вырабатывающих данные об ориентации и курсе, состоят из гироскопов и акселерометров средней точности, а также электромагнитных лагов [1, 2]. Чтобы повысить долговременную точность системы, применяются данные электромагнитного лага и методика демпфирования, ограничивающая колебания погрешностей. Коэффициент демпфирования обычно задается на постоянном уровне. Глубокий анализ показывает, что это приводит к дополнительным ошибкам ориентации и курса в силу больших погрешностей электромагнитного лага. Для решения данной проблемы предлагается использовать в системе нейронечеткую сеть, чтобы автоматически подстраивать коэффициент демпфирования под различные условия маневров.

1 Принцип работы бесплатформенной системы определения ориентации и курса

Сначала определим системы координат (СК), используемые в тексте:

- (1) СК, связанная с объектом (b): СК бесплатформенных инерциальных датчиков с началом в центре масс триады гироскопов и акселерометров и осями, параллельными номинально правоориентированным взаимно ортогональным осям чувствительности чувствительных элементов.
- (2) Инерциальная СК (i): СК, зафиксированная в инерциальном пространстве.
- (3) Навигационная СК (n): в данном случае это местная СК. Ось x_n направлена на восток (E), y_n – на север (N), ось z_n – вертикально вверх (U).

Бесплатформенная система состоит из трех волоконно-оптических гироскопов и трех акселерометров, которые позволяют измерять мгновенную угловую

Цянь Ли. Доктор. Харбинский инженерный университет, Колледж автоматизации. Харбинский инженерный университет, Колледж научных исследований (Китай).

Фэн Сунь. Харбинский инженерный университет, Колледж автоматизации.

Фэй Ю. Харбинский инженерный университет, Колледж научных исследований.

Вэй Гао. Харбинский инженерный университет, Колледж автоматизации.

Научный редактор перевода д.т.н. Н.В. Колесов.

* См., например, [Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейр Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. (Прим. науч. ред.)]

скорость ω_{ib}^b (включая скорость вращения Земли) и ускорение f^b (включая ускорение силы тяжести) движущихся кораблей в СК b . Все измерения гироскопов и акселерометров производятся относительно СК i . В соответствии с принципом работы бесплатформенной ИНС система использует измерения для расчета матрицы ориентации C_b^n [3-4]. Методика демпфирования используется для ограничения колебаний погрешностей.

Горизонтальная демпфирующая сеть выбирается следующим образом: [5]:

$$H(s) = 1 + \frac{A}{s + \omega_1} + \frac{B}{s + \omega_2}, \quad (1)$$

где

$$\omega_1 = \left(a \pm \sqrt{a^2 - 4b} \right) / 2, \quad \omega_2 = b / \omega_1, \quad A = [(c - a)\omega_1 - (d - b)] / (\omega_1 - \omega_2), \quad B = c - a - A. \quad (2)$$

В соответствии с теорией управления и характеристическим уравнением системы [6] получаем следующие параметры:

$$\begin{aligned} a &= (n_1 + n_2 + 2)\zeta\omega_s, & b &= (2n_1 + 2n_2 + n_1n_2)\zeta^2\omega_s^2, \\ c &= \zeta\omega_s(2\xi^2n_1n_2 + n_1 + n_2), & d &= n_1n_2\xi^2\omega_s^2 \end{aligned}$$

где ω_s – частота Шулера равна, ξ – коэффициент демпфирования.

Чтобы убедиться, что демпфирующая сеть не влияет на установившийся режим системы, $H(s)$ должно приближаться к 1 после этапа настройки. В соответствии с требованиями к n_1, n_2 и $H(s)$ методом подбора выбраны значения $n_1 = 14, n_2 = 5$.

Горизонтальная демпфирующая сеть может погасить только колебания Шулера, а вызванные вращением Земли колебания, продолжают присутствовать в ошибке рыскания. Поэтому для демпфирования колебаний, вызванных вращением Земли, требуется сеть азимутального демпфирования $Y(s)$. Метод создания $Y(s)$ состоит в принятии вышеупомянутого $H(s)$ [7]. Функцию можно сдвинуть в соответствующий частотный диапазон путем замены

$$s \rightarrow \frac{\omega_s}{\Omega} s.$$

Таким образом, мы имеем

$$Y(s) = 1 + A \frac{\Omega}{\omega_s} \left/ \left(s + \omega_1 \frac{\Omega}{\omega_s} \right) \right. + B \frac{\Omega}{\omega_s} \left/ \left(s + \omega_2 \frac{\Omega}{\omega_s} \right) \right. \quad (3)$$

Из анализа выражения очевидно следует, что погрешности внешней скорости, введенной в систему, могли вызвать ошибки, а значит, повлиять наработку ориентации и курса.

2 Адаптивное управление коэффициентом демпфирования

Исходя из принципа работы электромагнитного лага и результатов эмпирического анализа его применения, можно сказать, что погрешность измерения лага растет в случае зигзагообразных маневров, быстрых изменений скорости и маневров с изменением курса, т.е. при произвольных интенсивных маневрах. В этих случаях для ослабления эффекта демпфирования и уменьшения погрешности, вносимой ошибками лага, нужно изменять коэффициент демпфирования. Ниже мы представляем адаптивную нейронечеткую сеть (Adaptive Network-

based Fuzzy Inference System – ANFIS), предназначенную для реализации этой задачи.

2.1 Архитектура адаптивной нейронечеткой сети

Для анализа в адаптивной нейронечеткой сети [8] необходимо наличие нескольких блоков входных данных. Для измерения изменений скорости выбран акселерометр, установленный по оси y_b СК, связанной с объектом. Зигзагообразные маневры и изменения курса определяются с помощью производной от угла курса, выработанного системой. Оба эти измерения используются в качестве входных данных для адаптивной нейронечеткой сети. Следует отметить, что измеренное продольное ускорение нужно сначала отфильтровать, чтобы исключить перекрестное ускорение.

Ниже обсуждаются три шага реализации адаптивной нейронечеткой сети.

2.1.1. Нечеткие правила «если — то». На основе вышеприведенного анализа и экспериментальных данных, полученных в ходе большого количества морских испытаний, построены следующие восемь правил [9]:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Если } f_y \text{ равно } M_1 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_1, \text{ то } \xi_1 \text{ равно } C_1 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_1 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_2, \text{ то } \xi_2 \text{ равно } C_2 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_2 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_1, \text{ то } \xi_3 \text{ равно } C_3 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_2 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_2, \text{ то } \xi_4 \text{ равно } C_4 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_3 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_1, \text{ то } \xi_5 \text{ равно } C_5 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_3 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_2, \text{ то } \xi_6 \text{ равно } C_6 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_4 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_1, \text{ то } \xi_7 \text{ равно } C_7 \\ \text{Если } f_y \text{ равно } M_4 \text{ и } \dot{\psi} \text{ равно } N_2, \text{ то } \xi_8 \text{ равно } C_8 \end{array} \right\},$$

где f_y – измерение акселерометра, установленного по оси y_b СК, связанной с объектом; $\dot{\psi}$ – производная от курса, выработанного системой; $C_1, \dots, C_8$ – выходные величины нечетких правил «если – то»; $M_1, M_2, M_3, M_4, N_1, N_2$ – лингвистические значения, определенные из инженерной практики, как показано в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Определение $M_1, M_2, M_3, M_4, N_1, N_2$

Параметр	Определение
M_1	$0 \leq f_y \leq 0,1 \text{ м/с}^2$
M_2	$0,1 \text{ м/с}^2 < f_y \leq 0,2 \text{ м/с}^2$
M_3	$0,2 \text{ м/с}^2 < f_y \leq 0,3 \text{ м/с}^2$
M_4	$ f_y > 0,3 \text{ м/с}^2$
N_1	$ \dot{\psi} \leq 2 \text{ град/с}$
N_2	$ \dot{\psi} > 2^\circ / \text{с}$

2.1.2 Функция принадлежности. Все используемые функции принадлежности являются обобщенными колокольными функциями:

$$\mu_{M_i}(f_y) = 1 / \left(1 + \left(\frac{f_y - c_i}{a_i} \right)^{2b_i} \right), i = 1, 2, 3, 4,$$

$$\mu_{N_j}(\dot{\psi}) = 1 / \left(1 + \left(\frac{\dot{\psi} - c'_j}{a'_j} \right)^{2b'_j} \right), j = 1, 2,$$
(4)

где $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3, 4), a'_j, b'_j, c'_j (j = 1, 2)$ – параметры функций принадлежности для посылок нечетких правил, которые можно определить с помощью параметрического обучения.

2.1.3 Выходные параметры адаптивной сети нечеткого вывода. Каждое нечеткое правило «если–то» формирует заключение, следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} \xi_1 &= p_1 f_y + q_1 \dot{\psi} + r_1 & \xi_2 &= p_2 f_y + q_2 \dot{\psi} + r_2 \\ \xi_3 &= p_3 f_y + q_3 \dot{\psi} + r_3 & \xi_4 &= p_4 f_y + q_4 \dot{\psi} + r_4 \\ \xi_5 &= p_5 f_y + q_5 \dot{\psi} + r_5 & \xi_6 &= p_6 f_y + q_6 \dot{\psi} + r_6 \\ \xi_7 &= p_7 f_y + q_7 \dot{\psi} + r_7 & \xi_8 &= p_8 f_y + q_8 \dot{\psi} + r_8 \end{aligned} \right\},$$
(5)

где $p_i, q_i, r_i (i = 1, 2 \dots 8)$ – параметры заключений, которые можно определить с помощью параметрического обучения. Результирующий выходной сигнал адаптивной сети нечеткого вывода является суммой всех входных сигналов:

$$\xi = \sum_{i=1}^8 \omega_i \xi_i / \sum_{i=1}^8 \omega_i = \sum_{i=1}^8 \bar{\omega}_i \xi_i,$$
(6)

где $\xi_i = p_i f_y + q_i \dot{\psi} + r_i, \bar{\omega}_i = \omega_i / \sum_{k=1}^8 \omega_k (i = 1, 2 \dots 8)$, $\omega_1, \omega_2 \dots \omega_8$ представляют степень выполнения каждого правила и могут быть получены путем умножения функций принадлежности:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \mu_{M_1}(f_y) \cdot \mu_{N_1}(\dot{\psi}) & \omega_2 &= \mu_{M_1}(f_y) \cdot \mu_{N_2}(\dot{\psi}) \\ \omega_3 &= \mu_{M_2}(f_y) \cdot \mu_{N_1}(\dot{\psi}) & \omega_4 &= \mu_{M_2}(f_y) \cdot \mu_{N_2}(\dot{\psi}) \\ \omega_5 &= \mu_{M_3}(f_y) \cdot \mu_{N_1}(\dot{\psi}) & \omega_6 &= \mu_{M_3}(f_y) \cdot \mu_{N_2}(\dot{\psi}) \\ \omega_7 &= \mu_{M_4}(f_y) \cdot \mu_{N_1}(\dot{\psi}) & \omega_8 &= \mu_{M_4}(f_y) \cdot \mu_{N_2}(\dot{\psi}) \end{aligned} \right\}.$$
(7)

Таким образом, мы построили адаптивную сеть. Шесть функций принадлежности ассоциируются с каждым входным сигналом, а пространство входов разделено на восемь нечетких подпространств, каждое из которых управляется своим нечетким правилом «если – то». Посылка правила очерчивает нечеткое подпространство, а заключение задает выходной сигнал в рамках этого нечеткого подпространства.

2.2 Параметрическое обучение

С помощью параметрического обучения требуется определить 18 параметров посылок $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3, 4), a'_j, b'_j, c'_j (j = 1, 2)$ и 24 параметра заключений $p_i, q_i, r_i (i = 1, 2 \dots 8)$. Для идентификации параметров применяется метод

градиентного спуска обратного распространения, чтобы скомпенсировать ошибку выбором значений параметров на предшествующих шагах вычислений. Такой метод называется обратным временным распространением [10].

Чтобы получить массив данных обучающей выборки, применяются динамическая модель корабля, обеспечивающая условия маневра, и имитатор бесплатформенной системы, вырабатывающий выходные данные гироскопов и триады акселерометров средней точности [11]. Значение азимутального смещения φ^u выбирается в качестве критерия эффективности

$$E = \sum_{k=1}^m E_k = \sum_{k=1}^m (\varphi_k^u)^2, \quad (8)$$

где m – количество образцов φ_k^u . Таким образом, мы стремимся, чтобы сумма квадратов значений φ_k^u была минимальна. С помощью вышеупомянутой процедуры и имитационных испытаний происходит обучение и обновление предполагаемых и последующих параметров после сотен периодов.

3. Испытания и анализ

Морские испытания проводятся для проверки качества работы представленной бесплатформенной системы, в частности эффекта адаптивного управления коэффициентом демпфирования.

Система состоит из триады волоконно-оптических гироскопов средней точности и триады акселерометров. Применяются волоконно-оптические гироскопы производства Харбинского инженерного университета. Эталонную ориентацию вырабатывает система RHINS производства IXSEA, работающая в интегрированном режиме. Точность выработки курса составляет 0,01 град, точность выработки качек – 0,01 град (точность выражается в среднеквадратических величинах). Основные параметры и их значения гироскопов и акселерометров рассматриваемой БИНС приведены ниже.

Т а б л и ц а 2

Параметр	Гироскоп	Акселерометр
Постоянное смещение нуля	< 0,01 град/ч	$5 \times 10^{-5} g$
Случайная погрешность	0,003 град/ч	$2 \times 10^{-5} g / \sqrt{Hz}$
Масштабный коэффициент	10×10^{-6}	50×10^{-6}

Испытания были проведены в феврале 2011 г. и продолжались более трех дней. После выставки в доке судно осуществило успешное плавание, пройдя через Восточно-Китайское, Желтое моря, и в частности залив Бохайвань. В процессе испытания производились зигзагообразные маневры, изменения скорости и маневры с изменением курса. Курс и скорость судна, выработанные системой RHINS, представлены на рис. 1 и 2.

На основе сохраненных данных был проведен анализ трех методов (рис. 3–5 и табл. 3):

метод 1: демпфирование не используется.

метод 2: думпфирование осуществляется с постоянным коэффициентом 0,5. Такой коэффициент считается традиционным и используется часто.

метод 3: демпфирование осуществляется с автоматическим изменением коэффициента за счет управления адаптивной нейронечеткой сети.

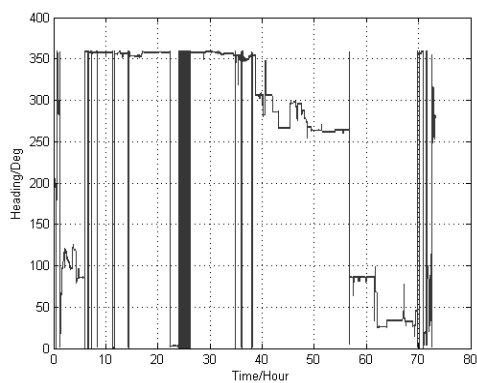


Рис. 1. Курс корабля

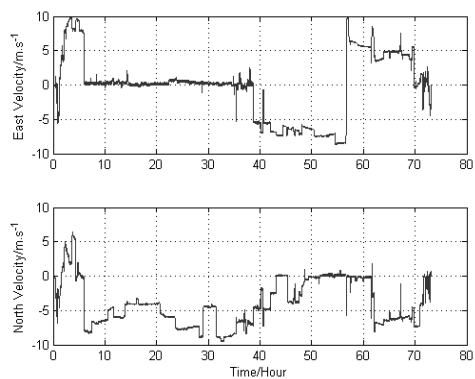


Рис. 2. Скорость корабля

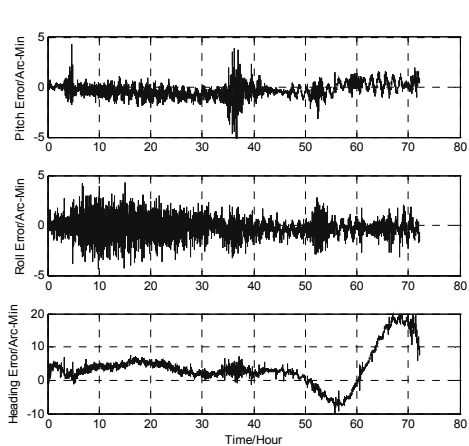


Рис. 3. Погрешности метода 1
(дифферент, крен, курс)

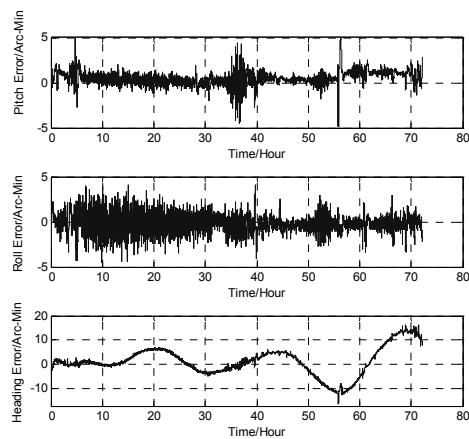


Рис. 4. Погрешности метода 2
(дифферент, крен, курс)

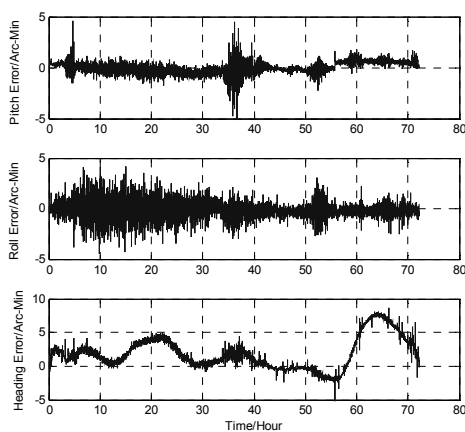


Рис. 5. Погрешности метода 3
(дифферент, крен, курс)

Т а б л и ц а 3

Показатели качества методов (СКО)

Погрешность (угл. мин)	Метод 1	Метод 2	Метод 3
Дифферент	0,79	0,84	0,73
Крен	0,60	0,72	0,54
Курс	7,68	5,89	4,14

Из анализа рис. 3, 4, и 5 видно, что при использовании метода 1 в погрешностях ориентации и курса присутствуют колебания Шулера и колебания, вызванные вращением Земли. Нескомпенсированные дрейфы гироскопов приводят к росту погрешностей ориентации и особенно курса на длительных интервалах. К третьему дню погрешность курса достигла 20 угл. мин, и возникла необходимость применения демпфирующей сети.

Рассмотрим результаты работы метода 2. Использование коэффициента демпфирования 0,5 нецелесообразно при наличии зигзагообразных маневров, изменений скорости и маневров с изменением курса. В то время как демпфирование влияет на случайные дрейфы гироскопов, большие ошибки внешней скорости приводят к возникновению дополнительных погрешностей ориентации и скорости. Таким образом, следует менять коэффициент демпфирования в зависимости от условий маневра. Рис. 3 и табл. 2 подтверждают преимущество метода 3. Не только крен и дифферент, но и курс вырабатывается методом 3 с более высокой точностью, чем методами 1 и 2.

Выводы

В статье представлена морская система определения ориентации и курса на основе волоконно-оптических гироскопов и акселерометров средней точности. Чтобы достичь высокой точности определения ориентации и курса на длительных интервалах, предлагается использование данных электромагнитного лага и демпфирующей сети. В отличие от обычных систем демпфирования в данном случае осуществляется автоматическое управление коэффициентом демпфирования с помощью адаптивной нейронечеткой сети. Описывается архитектура и процесс обучения адаптивной нейронечеткой сети. Результаты испытаний подтверждают робастность метода к ошибкам измерения лага.

Благодарности

Исследование проводилось при частичной поддержке Национального научного фонда Китая (№. 51179039), гранта Исследовательского фонда Центрального университета (№ HEUCF110429) и гранта докторантского фонда университета (№ 20102304110021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Terry, T. and Emanuel, L., The AN/WSN-7B marine gyrocompass and navigator [C], Proceedings of the 2000 National Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2000, pp. 348–357.
2. Hue, Y.-K., Teixeira, F. L., San Martin, L. E., and Bittar, M., Modeling of EM logging tools in arbitrary 3-D borehole geometries using PML-FDTD, IEEE Geosciences and Remote Sensing Letters, 2005, no. 2(1), pp. 78–81.

3. **Demoz, G., Hayward, R.C., and Powell, J.D.**, Design of multi-sensor attitude determination system, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2004, no. 40(2), pp. 627–649.
4. **Xingbo, L.**, Study on the Measuring of the Instantaneous Movements of the Ships based on SINS, Harbin Engineering University, 2009.
5. **Weiren, L. and Liangjie, Zh.**, Adaptive hybrid intelligent control of an INS level damp network, Journal of Harbin Institute of Technology, 2005.11, no. 37(11).
6. **Salychev, O. S.**, Applied Inertial Navigation: Problems and Solution, BMSTU Press, Russian, Moscow, 2004, pp. 191–209.
7. **Yonggang, P.**, A study on engineering application of fuzzy control, PhD thesis, Zhejiang University, 2008.
8. **Ahjebery, K.M., Ismaeel, S.A., and Alqaissi, A.M.**, Implementation of an intelligent INS navigator based on ANFIS, IEEE 2009 6th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices, 2009.
9. **Malleswaran, M., Mary Anita, J., Sabreen, S.N., and Vaidehi, V.**, Real-time INS/GPS data fusion using hybrid adaptive network based fuzzy inference, 2010 11th Int. Conf. Control, Automation, Robotics and Vision, December 2010.
10. **Sun, F.**, Integrated Navigation System, Harbin Engineering University, China, 1996, pp. 151–159.
11. **El-Shafie, A., Hussain, A., and Elmagd Nour Eldin, A.**, ANFIS-based model for real-time INS/GPS data fusion for vehicular navigation system, IEEE 2009 International Conference on Computer Technology and Development, 2009.

Abstract. A kind of marine strapdown attitude and heading reference system (AHRS) based on the principle of strapdown inertial navigation system (INS) is discussed here. With an electromagnetic (EM) log aided, the oscillations included in the attitude and heading errors are bounded by damping network. Furthermore, in order to decrease attitude and heading errors aroused by EM log measurements, we introduce an adaptive network-based fuzzy inference system to control the damping ratio automatically in terms of the vessel maneuvers conditions. The results of test demonstrate the validity of proposed method.

Key words: network-based fuzzy, strapdown attitude and heading reference system

Материал поступил 3.09.13