

## NEURAL NETWORK ASSESSMENT OF WEAK DISTURBANCES ON CONTROLLED LEVITATING PROBE

M. Nalyvajchuk, V. Gnidenko

National Technical University of Ukraine «KPI»

V. Yatsenko

Space Research Institute NASU-DKAU.

---

**Key words:**

Probe  
Dynamic model  
Gravimeter  
Simulation  
Optimization  
Control effect  
Dimensional vector  
Neural network  
Training sequence  
Adaptive filtering

---

**ABSTRACT**

The article deals with the problem of detecting the weak effects on the nonlinear dynamic system of measurement. A new approach to the evaluation of the weak gravitational effects on the nature of the levitating test body is. Suggested the approach is based on a neural network algorithm with adaptive filtering. The solution to the problem of the asymptotic stability of the measurements is given.

---

**Article history:**

Received 05.10.2012  
Received in revised form  
10.10.2012  
Accepted 15.10.2012

---

**Corresponding author:**

M. Nalyvajchuk  
E-mail:  
nnv@scs.ntu-kpi.kiev.ua

---

## НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ ОЦІНЮВАННЯ СЛАБКИХ ВПЛИВІВ НА КЕРОВАНЕ ЛЕВІТУЮЧЕ ПРОБНЕ ТІЛО

М.В. Налывайчук, В.В. Гніденко

Національний технічний університет України «КПІ»

В.О. Яценко

завідувач відділу дистанційних методів та перспективних приладів  
Інститут космічних досліджень НАНУ-ДКАУ

*Розглядається задача виділення слабких впливів на динамічну систему при нелінійному вимірюванні. Пропонується новий підхід до оцінювання слабких впливів гравітаційного характеру на левітуюче пробне тіло. Підхід заснований на використанні нейромережі спільно з алгоритмом адаптивної фільтрації. Розв'язується задача асимптотичної стійкості вимірювань.*

**Ключові слова:** пробне тіло, динамічна модель, гравіметр, моделювання, оптимізація, керуючий вплив, нейронна мережа, навчальна послідовність, адаптивна фільтрація.

Підхід заснований на використанні нейронної мережі та алгоритму адаптивної фільтрації, дозволяє визначити невідомий вхідний вплив за експериментально вимірним положенням та швидкістю пробного тіла. Нейронна мережа діє на вихідний сигнал вимірювача зміщення пробного тіла як зворотна динамічна система. Блок-схема

експериментального пристрою представлена на рис. 1. На відміну від відомих підходів до вирішення проблеми оцінювання невідомих сил, діючих на пробне тіло [1, 2], запропоновані алгоритми дозволяють забезпечити робастність і високу точність сенсора.

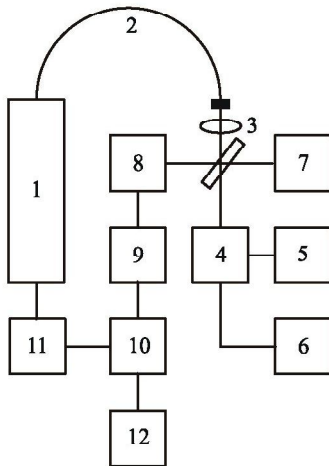


Рис. 1. Схема оптичної вимірювальної системи

1 — криостат з вставкою, на якому змонтована оптична головка; 2 — оптичний кабель; 3 — фокусуєчий об'єктив; 4 — головка з лазерним діодом; 5 — блок живлення лазерного діода; 6 — блок стабілізації температури; 7 — інтерферометр Фарбі — Перо ИФП-1; 8 — фотоприймач; 9 — синхронний детектор; 10 — мікроконтролер з вбудованим ЦАП і АЦП; 11 — модулятор; 12 — блок клавіатури та індикації.

## 1. НЕЙРОМЕРЕЖЕВЕ ОЦІНЮВАННЯ СЛАБКИХ ВПЛИВІВ НА ЛЕВІТУЮЧЕ ПРОБНЕ ТІЛО

Нехай динаміка пробного тіла описується рівнянням

$$\dot{x}(t) = f_0(x, t) + \sum_{i=1}^m f_i(x, t) u_i(t) = f_0(x, t) + F(x, t) u(t), \quad (1.1)$$

де  $x(t) - l$  — мірний вектор стану;  $f_0(x, t) - l$  — мірний вектор, нелінійно залежить від  $x$ ;  $u(t) = m$  — мірний вектор вхідних змінних;  $u_i(t)$  — керуючий вплив;  $u_5(t) = r(t) + s(t)$  — адитивна суміш корисного сигналу з шумом.

В даній роботі потрібно визначити невідомий вектор вхідних впливів  $u(t)$ , дозволяючий виділити корисний сигнал  $r(t)$  за допомогою адаптивного фільтра.

Припустимо, що вимірювач (СКВІД або лазерна система) вектора стану системи (1) описується співвідношенням

$$y(t) = h(x, t) + \omega(t), \quad (1.2)$$

де  $y(t)$  — двовимірний вектор спостереження, що складається з компонент положення і швидкості пробного тіла;  $h(x, t)$  — двовимірний вектор, нелінійно залежний від  $x$ ;  $\omega(t)$  — двовимірний вектор шумів спостереження. Для оцінки невідомого вектора  $u(t)$  нам необхідно знайти оцінку похідних вектора стану  $\frac{d\hat{x}(t)}{dt}$ .

Припустимо, що ця оцінка визначається чисельно за допомогою полінома  $n$ -го ступеня.

$$\hat{x}_i(t) = \sum_{j=0}^n c_{ji} t^j, \quad i = 1, \dots, l. \quad (1.3)$$

Коефіцієнти полінома визначаються одним із існуючих методів. Оцінку похідної стану  $x_i(t)$  отримуємо за допомогою виразу:

$$\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} = \sum_{j=0}^n c_{ji} j t^{(j-1)}, \quad i = 1, \dots, l. \quad (1.4)$$

Підставляючи  $\hat{x}(t)$  і  $\frac{d\hat{x}_j(t)}{dt}$  в рівняння (1) отримуємо

$$\left[ \frac{d\hat{x}_j(t)}{dt} - f_0(x, t) = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t) \right], \quad (1.5)$$

де  $v(t)$  — вектор шуму розмірності  $l$ , пов'язаний з невизначеністю точності оцінювання та адекватності моделі. Визначимо нову змінну  $z(t)$  за допомогою співвідношення:

$$z(t) = [d\hat{x}(t) - f_0(\hat{x}, t)] = F(\hat{x}, t)u(t) + v(t). \quad (1.6)$$

Припустимо, що на вхід тришарової нейронної мережі подається сигнал  $z(t)$ . У процесі тренування встановлюються вагові коефіцієнти, які мінімізують помилку між вхідними впливами і тими, що генеруються за допомогою моделі.

У кожному експерименті формується безліч впливів  $u(k)$ , за якими обчислюється вектор  $y(k)$ . На перший шар нейронної мережі подається навчальна послідовність

$$n^T(k) = [y_1(k) \dots y_l(k), y_1(k-1) \dots y_l(k-1), y_1(k-l) \dots y_l(k-l)] = [n_1(k) n_2(k) \dots n_l(k)] \quad (1.7)$$

Вихід  $i$ -го нейрона другого шару в момент часу  $k$  визначається виразом

$$\gamma_i(k) = q \left[ \sum_{j=1}^l \alpha_{ij} n_j(k) \right], \quad i = \overline{1, N}, \quad (1.8)$$

де  $\alpha_{ij}$  — невідомі вагові коефіцієнти;  $N$  — число нейронів;  $q$  — нелінійність, обумовлена виразом

$$q(x) = \frac{1}{[1 + \exp(-x)]} \quad (1.9)$$

Вихід  $i$ -го нейрона останнього шару дає наступну оцінку невідомого вектора  $\hat{u}(k)$ :

$$u_i(k) = \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \sigma_j(k), \quad i = 1, \dots, m \quad (1.10)$$

де  $\beta_{ij}$  — невідомі ваги. Отримана оцінка використовується для наступної фільтрації сигналу.

## 2. АСИМПТОТИЧНА СТІЙКІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ

Система рівнянь для змінних стану  $y_1, \dots, y_6$  і функціонал  $z_1$  описують відображення  $y_1 \rightarrow z_1$  інтерферометра, допускаючий лінійне представлення. Вводячи функцію  $z = \beta y_1 + \nu y_2$ , де  $\beta$  — константа, і прирівнюючи  $\beta 1j = 0, j = 2, \dots, 5$ , одержуємо білінійну систему

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 + a_3 y_1 \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_5 + a_4 y_1 \end{bmatrix} u_1^2 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_6 \end{bmatrix} u_3 + \begin{bmatrix} 0 \\ a_7 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$z = \alpha y_1 + \beta y_2. \quad (2.2)$$

Тут  $a_1 = a_{11}, a_2 = a_{17}, a_3 = a_{18}, a_4 = a_{110}, a_5 = a_{19}, a_6 = a_{16}, a_7 = a_{111}$ . Нехай  $u_3(t) = 0, u_4(t) = 0$ . Отримаємо умови асимптотичної стійкості білінійної системи із лінійної системи вимірювання. Лінеаризуючи (2.2) навколо точки  $y_1 = 0, y_2 = 0$  стійкої рівноваги пробного тіла при  $u_1(t) = 0$ , отримуємо

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ a_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ a_2 \end{bmatrix} u_1, \quad z = [\beta \nu] [y_1 \ y_2] T. \quad (2.3)$$

## АВТОМАТИЗАЦІЯ

Систему (2.3) запишемо в більш загальному вигляді:

$$\dot{x} = Ax + Bu_1, \quad z = Cx. \quad (2.4)$$

Визначимо керування

$$u_1 = K(z), \quad K(0) = 0. \quad (2.5)$$

забезпечуючи асимптотичну стійкість незбуреного руху  $x = 0$ .

Із керування лінеаризованої системи

$$\dot{x} = Ax + Bu_1 \quad (2.6)$$

виглядає стабільність лінійної системи (2.2) лінійним рівнянням  $u_1 = Fx$  [10].

Нехай  $\Theta(\lambda) = a_1\lambda + a_2\lambda^2 + a_3$  — будь-який ненормований багаточлен, всі корені якого мають від'ємні дійсні частини. Знайдемо таку матрицю  $K$ , щоб корені характеристичного полінома матриці  $A + BKC$  співпадали з коренями полінома  $\Theta(\lambda)$ .

В силу керованості системи (2.6) існує матриця  $F = \|f_j\|$  ( $j = 1, 2$ ) така, що  $A + BF$  мають заданий спектр. Отже, існування шуканої матриці  $K$  еквівалентно існуванню розв'язку рівняння

$$KC = F. \quad (2.7)$$

Введемо наступні визначення :

$$C_1 = \alpha, \quad C_2 = \beta, \quad E_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T, \quad E_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

Для існування матриці  $K$ , яка задовольняє рівняння (2.7), необхідно і достатньо виконання умови (2.9)

$$FQ = 0, \quad Q = E_2 - E_1 C_1^{-1} C_2, \quad (2.9)$$

в якій враховується (2.3),

$$Q = \begin{bmatrix} -\alpha^{-1}\beta \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Якщо елементи матриці (2.10) розглядати як координати вектора  $q$  в двовимірному просторі, то умова (2.9) означає, що вектор  $s = \{f_j\}, j = 1, 2$ , повинен бути колінеарним вектору  $q = \{1, \alpha^{-1}\beta\}$ . Отже, при фіксованій орієнтації осі чутливості квантового інтерферометра, рівняння (2.9) задовольняє одну параметричну множину матриць  $F$  вигляду

$$F = [f_1\alpha^{-1} \quad \beta f_1]. \quad (2.11)$$

Щоб характеристичний поліном матриці  $A + BF$  співпадав з заданим поліномом  $\Theta(\lambda)$ , необхідно щоб виконувалися умови  $f_1 = -(a_3 + a_1)\alpha_2^{-1}$ ,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = -a_2\alpha^{-1}\beta f_1$ . Таким чином, при  $\alpha_1 = 1$ ,  $a_2 \neq 0$ ,  $\alpha \neq 0$  матриця  $K = FE_1 C_1^{-1}$  зворотного зв'язку по виходу визначається виразом

$$K = [f_1\alpha^{-1}] \quad (2.12)$$

і керування  $u_1 = Kz = f_1\alpha^{-1}z$  забезпечує асимптотичну стійкість положення рівноваги (2.2) в деякій області  $H$  зміни  $x$ .

### Висновки

Запропоновано нову ідею щодо можливості використання нейронної мережі для визначення невідомого вхідного впливу за експериментально виміряними положенням та швидкістю левітуючого пробного тіла. Показано, що ідеї та методи теорії керування можуть бути використані для стабілізації левітуючого пробного тіла. Побудовано нейромережний алгоритм оцінювання слабких гравітаційних збурень. Запропоновані алгоритми забезпечать більш стабільну роботу приладів на основі ефекту магнітної левітації.

**Література**

1. Яценко В.А. Адаптивное оценивание воздействий на макроскопическое тело в управляемой потенциальной яме // Кибернетика. — 1989. № 2. С. 81 – 85.
2. Кнюпов П.С., Яценко В.А. Оценивание неизвестных параметров почти периодического сигнала по управляемым билинейным наблюдениям // А и Т 1992. — №3. — С. 65 – 73.

**НЕЙРОСЕТЕВОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СЛАБЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА УПРАВЛЯЕМОЕ ЛЕВИТИРУЮЩЕЕ ПРОБНОЕ ТЕЛО**

**Н.В. Наливайчук, В.В. Гвиденко**

*Национальный технический университет Украины «КПИ»*

**В.А. Яценко**

*Институт космических исследований НАНУ-ДКАУ.*

*Рассматривается задача выделения слабых воздействий на динамическую систему при нелинейном измерении. Предлагается новый подход к оценке слабых воздействий гравитационного характера на левитирующее пробное тело. Подход основан на использовании нейросети совместно с алгоритмом адаптивной фильтрации. Решается задача асимптотической устойчивости измерений.*

**Ключевые слова:** *пробное тело, динамическая модель, гравиметр, моделирование, оптимизация, управляющее воздействие, мерный вектор, нейронные сети, учебная последовательность, адаптивная фильтрация.*