Tổng hợp thuật toán thích nghi dùng mạng nơ ron cho hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa

The synthesis of adaptive algorithm using neural network for the angle coordinate tracking system of radar target

Nguyễn Tăng Cường, e-Mail: ntcuong210@gmail.com
Lê Hải Hà, e-Mail: lehaiha@gmail.com
Học viện Kỹ thuật quân sự

Tóm tắt:

Bài báo nghiên cứu xây dựng thuật toán thích nghi cho hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa trong điều kiện có yếu tố bất định trong phương trình trạng thái mục tiêu. Yếu tố bất định thể hiện ở trường hợp không có được mô hình trạng thái chuẩn xác (mô hình bất định về bộ tạo hình từ tạp trắng ngẫu nhiên), nhưng giới hạn xét hệ hệ liên tục và giới nội. Bài báo đề xuất giải pháp khắc phục thông tin bất định dựa trên tiếp cận xây dựng bộ lọc thích nghi tối ưu các quá trình giới nội sử dụng tuyến tính hóa theo chuỗi Taylor và mạng nơ ron kết hợp với tối ưu hóa tín hiệu điện áp điều khiển truyền động bám góc quay ăng ten ra đa. Phần mô phỏng so sánh hiệu quả của thuật toán mới với các thuật toán trước đây sẽ được trình bày trong các bài báo khác.

Từ khóa: bộ lọc thích nghi, mạng nơ ron, tọa độ góc, mục tiêu ra đa, trạng thái bất định.

Abstract:

The research paper presents the a synthesis of adaptive algorithm for radar tracking system to determine the angle coordinate of radar target in systems with linear process models acted upon by uncertain state inputs. The uncertain state inputs represent the effect of unmodeled disturbances acting on the system and but are assumed to be continuous and bounded. The neural network is trained online to estimate the uncertain inputs. The paper solution presents an approach for construction of adaptive optimal filter with adaptive state estimation for a class of bounded process based on combination of linearization by Taylor series approximation, of augmenting linear system by neural network adaptive element, and of using optimal voltage control for servo tracking system of antenna angle.

Keywords: adaptive filter, neural network, angle coordinate, radar target, uncertain state.

Ký hiệu

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\mathbf{B}$, $\mathbf{G}_{\xi u}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{K}$, $\mathbf{D}$		Ký hiệu của ma trận
$\mathbf{f}$, $\mathbf{x}$, $\mathbf{u}$, ξ, $\mathbf{z}$,		Ký hiệu của các véc tơ

1. Đặt vấn đề

Xét đặt vấn đề cho bài toán tổng hợp thuật toán thích nghi của hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa trong điều kiện có yếu tố bất định trong phương trình trạng thái mục tiêu ra đa trên một mặt phẳng nằm ngang (hoặc mặt phẳng thẳng đứng). Hệ xác định tọa độ góc tuân theo phương trình trạng thái dạng tổng quát sau đây [1,2,6]

$$\begin{aligned}
\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{f}(\mathbf{x},t) + \mathbf{Bu} + \xi_{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B_1 g_1}(\mathbf{x}(t),\mathbf{z_1}(t)),\\
\dot{\mathbf{z}}_1(t) &= \mathbf{f}_{\mathbf{z}_1}(\mathbf{x}(t),\mathbf{z}_1(t),\mathbf{z}_2(t)),\ \ \mathbf{z}_1(0) = \mathbf{z_{10}}\\
\dot{\mathbf{z}}_2(t) &= \mathbf{f}_{\mathbf{z}_2}(\mathbf{x}(t),\mathbf{z}_1(t),\mathbf{z}_2(t)),\ \ \mathbf{z}_2(0) = \mathbf{z_{20}}
\end{aligned} \tag{1}$$

Kênh quan sát

$$\mathbf{u}_{\text{пр}}(\mathbf{t}) = \mathbf{u_c}(\mathbf{x},\mathbf{t}) + \zeta_{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{m}$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x_0}$$

Hoặc biểu diễn ở dạng tường minh cho phương tình trạng thái mở rộng $x = [x_{ot}, x_Y]^T$

$$\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{ot}} = \mathbf{f_{ot}}(\mathbf{x_{ot}},\mathbf{t}) + \xi_{\mathbf{ot}} + \mathbf{B_{1ot} g_{1ot}}(\mathbf{x_{ot}}(\mathbf{t}),\mathbf{z_1}(\mathbf{t})) \tag{2}$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{\mathbf{y}} = \mathbf{f_y}(\mathbf{x_y},\mathbf{t}) + \xi_{\mathbf{y}} + \mathbf{B_{1y} g_{1y}}(\mathbf{x_y}(\mathbf{t}),\mathbf{z_1}(\mathbf{t})) + \mathbf{Bu} \tag{3}$$

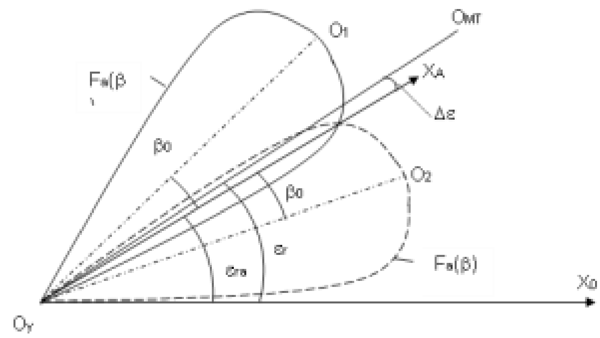
Trong đó, $\mathbf{x_y}$ - vectơ trạng thái n_1 chiều đặc trưng cho các thông số tác động chỉnh định; $\mathbf{x_{ot}}$ - vectơ trạng thái n_2 chiều đặc trưng cho các thông số được chỉnh định; $x = [x_y, x_{ot}]^T$ - vectơ trạng thái mở rộng $n_x = n_1 + n_2$ chiều;

Như vậy: $\mathbf{x} = [\mathbf{x_{ot}},\mathbf{x_Y}]^T \in D_x \subset R^{n_x}$, $\mathbf{z_1} \in D_{z_1} \subset R^{n_{z_1}}$ và $z_2 \in D_{z_2} \subset R^{n_{z_2}}$ là các trạng thái của hệ thống, D_x, D_{z_1}, D_{z_2} là các tập đóng, $\mathbf{f}(\mathbf{x}): D_x \to R^{n_x}$ là một hàm phi tuyến đã biết trong miền D; $\mathbf{f}(\mathbf{x},\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \mathbf{f_{OT}}(\mathbf{x_{OT}}) \\ \mathbf{f_y}(\mathbf{x_y}) \end{bmatrix}$; $\mathbf{B_1} = \begin{bmatrix} \mathbf{B_{1ot}}, \mathbf{0} \\ \mathbf{0}, \mathbf{B_{1Y}} \end{bmatrix}$ ma trận các hệ số đã biết, $\mathbf{u_c}(\mathbf{x}(\mathbf{t}))$ là hàm véc tơ đã biết,

$\mathbf{f}_{\mathbf{z}_1}(\mathbf{x},\mathbf{z}_1,\mathbf{z}_2): \mathrm{D}_x \times D_{z_1} \times D_{z_2} \to R^{n_{z1}}$ và

$\mathbf{f}_{\mathbf{z}_2}(\mathbf{x},\mathbf{z}_1,\mathbf{z}_2): D_x \times D_{z_1} \times D_{z_2} \to R^{n_{z2}}$ là các hàm chưa biết rõ mô hình, có đầu vào là các quá trình động học; $z_1(t), z_2(t)$ ẩn chưa biết rõ, $x_x(t)$ và $z_u(t)$ - các tạp trắng;

$\mathbf{g}_1(\mathbf{x},\mathbf{z}_1) = [\mathbf{g}_{1otT}(\mathbf{x}_{ot},\mathbf{z}_1), \mathbf{g}_{1Y}(\mathbf{x}_Y,\mathbf{z}_1)]^T : D_x \times D_{z_1} \to D_{g_1}$ là hàm chưa biết rõ mô hình, z_1 có giới hạn trên $\overline{z}_1$ và $\mathbf{u}_{np}(t)$ là một vector các giá trị đo lường được. $n_Z = n_{z_1} + n_{z_2}$ kích cỡ chiều chưa biết của động học chưa rõ mô hình, nên $n = n_x + n_z$ cũng là chưa biết; m – hằng số.



H. 1 *Mô hình Radar đo góc :*

Cụ thể hóa các tham số của hệ phương trình (1) qua quy chiếu theo nguyên lý hoạt động rút gọn của hệ đo góc O_y như là một thành phần cấu thành của trạm ra đa (hình 1) [2, 3, 4]. Hệ đo O_y phải bám sát mục tiêu O_{MT} có tọa độ góc ε_r tương đối với hướng đã định O_yX_o với điều khiển góc quay anten ε_{ra}. Kết hợp phương trình (1) tọa độ góc mục tiêu ra đa này có phương trình trạng thái dạng cụ thể sau:

$$\dot{\varepsilon}_r = -k_e e_r + x_{om}(t) + B_1 g_1(x(t), z_1(t)) \quad (4)$$

Ở đây k_ε – hệ số tỷ lệ đã biết; $\xi_{ot}(t)$ – tạp trắng có kỳ vọng toán học bằng 0 và mật độ phổ một chiều $G_{\xi\ ot}$.

Hệ đo góc có phần thiết bị dẫn động ăng ten để quay góc ăng ten sao cho hướng cân bằng tín hiệu ăng ten - O_yX_A – di chuyển bám theo góc mục tiêu với tốc độ góc theo phương trình

$$\dot{\varepsilon}_{ra} = b_{u\varepsilon} u_{\varepsilon r} \quad (5)$$

Ở đây ε_{ra} – góc quay của ăng ten tương đối với trục O_yX_o; $u_{\varepsilon r}$ – điện áp điều khiển và thể hiện thành phần vec tơ điều khiển u trong (1); $b_{u\varepsilon}$ – hệ số tỷ lệ. Ở dạng ma trận-vec tơ, có thể biểu diễn:

$$x^T = [x_1\ x_2] = [\varepsilon_r \varepsilon_{ra}], F = \begin{bmatrix} -k_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B^T = [0 b_{u\varepsilon}]$$

$\varepsilon_r(t_0)$ và $\varepsilon_{ra}(t_0)$ là các đại lượng ε_r và ε_{ra} vào thời điểm ban đầu đo t_0. Trong bài báo, phương pháp xác định tọa độ góc được xét là phương pháp biên độ đơn xung định hướng mục tiêu, trong đó khảo sát trong một mặt phẳng nằm ngang (hoặc mặt phẳng đứng) hai giản đồ định hướng $F_a(\beta)$ của ăng ten (hình 1); góc β được tính tương đối với các hướng O_yO_1 và O_yO_2 (hướng cực đại của giản đồ định hướng). Các góc giữa hướng cân bằng tín hiệu và các hướng O_yO_1 và O_yO_2 là β_0. Phương pháp biên độ đơn xung sử dụng hai giản đồ định hướng cùng hai kênh máy thu trừ và cộng tín hiệu để có các điện áp đầu ra máy thu có dạng [2,3,4]:

$$u_{np1} = U[F_a(\beta_0+\Delta\varepsilon) - F_a(\beta_0-\Delta\varepsilon)]\cos[\omega(t-2Д/c)+\varphi_0] + \zeta_{u1}(t)$$

$$u_{np2} = U[F_a(\beta_0+\Delta\varepsilon) - F_a/(\beta_0-\Delta\varepsilon)]\cos[\omega(t-2Д/c)+\varphi_0] + \zeta_{u1}(t)$$

Trong đó U – biên độ của tín hiệu trong hướng cực đại của giản đồ định hướng; ω – tần số sóng mang liên tục của tín hiệu ra đa chiếu xạ; R – khoảng cách từ điểm O_y đến mục tiêu O_{MT}; φ_0 – pha ban đầu; Δε – góc giữa hướng mục tiêu và hướng cân bằng tín hiệu; $\zeta_{u1}(t)$ và $\zeta_{u1}(t)$ – tạp trắng có kỳ vọng toán học bằng 0 và có và mật độ phổ một chiều $G_{\xi u1}$ và $G_{\xi u2}$. Những tạp này được coi là không tương quan với nhau và ta có ma trận nhiễu kênh quan sát

$$\mathbf{G}_{\xi u} = \begin{bmatrix} G_{\xi u1} & 0 \\ 0 & G_{\xi u2} \end{bmatrix}$$

Nếu biểu diễn từng hàm số $F_a(\beta)$ thành các chuỗi lũy thừa đối với các giá trị nhỏ Δε lân cận góc $\beta = \beta_0$ và chỉ giữ lại đến thành phần tuyến tính của chuỗi, ta được:

$$u_{np1} = k_p(\varepsilon_\Gamma - \varepsilon_{\Gamma a})\cos\psi(t) + \zeta_{u1}(t) \quad (6)$$

$$u_{np2} = U_\Sigma \cos\psi(t) + \zeta_{u1}(t) \quad (7)$$

Ở đây: $k_p = 2U \dfrac{\partial F_a(\beta)}{\partial \beta}|(\beta = \beta_0)$

$$\psi(t) = \omega(t - \frac{2Д}{c}) + \varphi_0$$

$$U_\Sigma = 2UF_a(\beta_0)$$

Các điện áp máy thu u_{np1} và máy thu u_{np2} được gọi tương ứng là các tín hiệu kênh "trừ" và kênh "cộng". Khi giải bài toán về tổng hợp hệ đo góc tối ưu, các đại lượng pha $\psi(t)$, hệ số k_p và điện áp U_Σ được coi như đã biết. Các phương trình kênh quan sát (6) và (7) có thể biểu diễn dưới dạng phương trình ma trận - véc tơ sau:

$$\mathbf{u}_{np}(\mathbf{t}) = \mathbf{Hx} + \boldsymbol{\zeta}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t}) + \mathbf{m} \quad (8)$$

Trong đó: $\mathbf{u}_{np}^{\mathbf{T}}(t) = (u_{np1}, u_{np2})$;

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} k_p cos\psi & -k_p cos\psi \\ 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$$\boldsymbol{\zeta}_{\mathbf{u}}(\mathbf{t})^T(t) = [\zeta_{u1}(t), \zeta_{u2}(t)];$$

$$\mathbf{m}^T = [0 \quad U_\Sigma \cos\psi]$$

Để giải quyết bài toán đặt ra, bài báo sẽ xây dựng thuật toán bộ lọc bộ lọc tuyến tính cận tối ưu thích nghi (dùng mạng nơ ron), đồng thời với xác định cấu trúc hệ kín bám góc mục tiêu ra đa với điện áp phản hồi tối ưu điều khiển góc quay ăng ten ra đa.

2. Xây dựng thuật toán thích nghi dùng mạng nơ ron cho hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa

Lời giải bài toán xây dựng thuật toán thích nghi dùng mạng nơ ron tổng quát cho lớp các hệ bám vô tuyến điện tử đã được trình bày trong công trình [6]. Hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa trong điều kiện có yếu tố bất định trong phương trình trạng thái mục tiêu là một trường hợp riêng cụ thể của lớp các hệ bám vô tuyến điện tử nêu trên. Do vậy, bài báo này dựa trên cách tiếp cận và kết quả ở [2,6] để phát triển thuật toán thích nghi dùng mạng nơ ron cho hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa.

Theo [2,6], dạng tuyến tính hóa của phương trình trạng thái (1) và (3) như sau:

$$\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{x} + \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \xi_{\mathbf{x}} + \mathbf{B}_1\mathbf{g}_1(\mathbf{x}(\mathbf{t}),\mathbf{Z}(\mathbf{t})) \tag{9}$$

Trong đó:

- Hàm véc tơ: $f(\hat{x},t) = \begin{bmatrix} f_{ot}(\hat{x}_{ot},t) \\ f_y(\hat{x}_y,t) \end{bmatrix}$

- Ma trận khối: $\mathrm{F}(\hat{x},t) = \begin{bmatrix} F_{ot}(\hat{x}_{ot},t) & O_1 \\ O_2 & f_y(\hat{x}_y,t) \end{bmatrix}$

Ở đây: $\mathbf{F}_{ot}(\hat{\mathbf{x}}_{ot},\mathbf{t}) = \left.\dfrac{\partial \mathbf{f}_{ot}(\mathbf{x}_{ot},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{x}_{ot}}\right|(\mathbf{x}_{ot} = \hat{\mathbf{x}}_{ot})$

$$\mathbf{F}_y(\hat{\mathbf{x}}_y,\mathbf{t}) = \left.\frac{\partial \mathbf{f}_y(\mathbf{y},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{x}_y}\right|(\mathbf{x}_y = \hat{\mathbf{x}}_y)$$

Là ma trận chuyển vị Jacobi kích thước ($n_{2x}n_2$) và ($n_{1x}n_1$), 0_1 và 0_2 là ma trận số không kích thước ($n_{2x}n_1$) và ($n_{1x}n_2$).

Khi triển khai đầy đủ:

$$\mathbf{F}_{ot}(\hat{\mathbf{x}}_{ot},\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_{ot1}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot1}} & \dfrac{\partial f_{ot1}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{ot1}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{otn2}} \\ \dfrac{\partial f_{ot2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot1}} & \dfrac{\partial f_{ot2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{ot2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{otn2}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{\partial f_{otn2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot1}} & \dfrac{\partial f_{otn2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{ot2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{otn2}(\hat{x}_{ot},t)}{\partial x_{otn2}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_y(\hat{\mathbf{x}}_y,\mathbf{t}) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_{y1}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y1}} & \dfrac{\partial f_{y1}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{y1}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{yn2}} \\ \dfrac{\partial f_{y2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y1}} & \dfrac{\partial f_{y2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{y2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{yn2}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{\partial f_{yn2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y1}} & \dfrac{\partial f_{yn2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{y2}} & \cdots & \dfrac{\partial f_{yn2}(\hat{x}_y,t)}{\partial x_{yn2}} \end{bmatrix}$$

Theo [2,6], kênh quan sát phi tuyến (8) xấp xỉ gần đúng bởi phương trình tuyến tính (tuyến tính hóa tại điểm ước lượng $\hat{x}$.

$$\mathbf{U}_{np}(\mathbf{t}) = \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{x} + \mathbf{u}_c(\hat{\mathbf{x}},\mathbf{t}) - \mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}})\hat{\mathbf{x}} + \xi_n(\mathbf{t}) + \mathbf{m} \tag{10}$$

Trong đó: $\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) = \left.\dfrac{\partial \mathbf{u}_c(\mathbf{x},\mathbf{t})}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\mathbf{x}=\hat{\mathbf{x}}} = \dfrac{\partial \mathbf{u}_c(\mathbf{x},\mathbf{t})}{\partial \hat{\mathbf{x}}}$ - là ma trận chuyển vị Jacobi ;

$$\mathbf{H}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial u_{c1}(\hat{x},t)}{\partial \hat{x}_1} & \cdots & \dfrac{\partial u_{c1}(\hat{x},t)}{\partial \hat{x}_m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \dfrac{\partial u_{cm}(\hat{x},t)}{\partial \hat{x}_1} & \cdots & \dfrac{\partial u_{cm}(\hat{x},t)}{\partial \hat{x}_m} \end{bmatrix} \tag{11}$$

Với các bước tuyến tính hóa như trên, bài toán có các hàm phi tuyến tường minh f(x), $u_c(x)$ có thể đưa được về dạng sử dụng kết quả của lý thuyết lọc tối ưu tuyến tính.

Các thành phần bất định trong phương trình trạng thái (2) và (3) sẽ được ước lượng xấp xỉ dùng mạng nơ ron theo các sai số động học được trình bày như sau.

Áp dụng định lý 1 trong [1] : xét véc tơ trạng thái n_x chiều x(t) của hệ phi tuyến quan sát được :

$$\begin{aligned} &\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(\mathbf{t})) \\ &\mathbf{u}_{np}(\mathbf{t}) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(\mathbf{t})) + \mathbf{m} \end{aligned} \tag{12}$$

Xét các tọa độ **x(t)** nằm trong khối cầu n_x - chiều bán kính $\overline{r}$ thuộc R^{n_x} .

$$B_r = \left\{ x(t) \in R^{n_x}, x(t) \leq \overline{r} \right\}$$

Giả định đầu ra (lượng quan sát) của hệ thống $\mathbf{u}_{np}(\mathbf{t}) \in R^m$ có vi phân đến bậc (n_x-1) là giới nội.

Khi đó với số $\varepsilon^* > 0$, sẽ tồn tại một tập các trọng số giới nội và có thời gian trễ dương: d > 0 sao cho hàm f(x(t)) trong (12) có thể xấp xỉ hóa trên tập đóng B_r bằng mạng nơron tham số tuyến tính.

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}(\mathbf{t})) = \mathbf{M}^{\mathbf{T}}\sigma(\mu(\mathbf{t})) + \varepsilon(\mu(\mathbf{t})), \|M\|_F \leq M^*$$

Với $M_F \leq M^*, \varepsilon(\mu(t))_F \leq \varepsilon^*$

Sử dụng véc tơ đầu vào :

$$\begin{aligned} &\mu(\mathbf{u}_{np}(t), d) = \left[\Delta_d^{(0)} u_{np}^T(t) \ldots \Delta_d^{(n-1)} u_{np}^T(t)\right]^T \in R^{nm} \\ &\|\mu(t)\| \leq \mu^* \end{aligned} \tag{13}$$

Trông đó các ký hiệu thành phần vi phân (sai phân) hữu hạn xác định bởi:

$$\begin{aligned} &\Delta_d^{(0)} u_{np}^T(t) \triangleq u_{np}^T(t) \\ &\Delta_d^{(1)} u_{np}^T(t) \triangleq \frac{u_{np}^T(t) - u_{np}^T(t-d)}{d} \\ &\cdots \\ &\Delta_d^{(k)} u_{np}^T(t) \triangleq \frac{\Delta_d^{(k-1)} u_{np}^T(t) - \Delta_d^{(k-1)}(t-d)}{d} \end{aligned}$$

k=1,2,… và $\mu^* > 0$ là giới nội và đơn điệu trong B_r.

Sử dụng định lý 1 trên để xem xét xấp xỉ hàm $g_1(x, z_1)$ dùng mạng nơ ron được xác định trên tập đóng.

$$D_{g_1} = \left\{ (x, z_1) : x \in D_x \leq R^{n_x}; z_1 \in D_{z_1} \leq R^{n_{z_1}} \right\}$$

Với D_{z_1} và D_x là các tập đóng.

$$\begin{aligned} &\mathrm{g}_1(\mathrm{x}, \mathrm{z}_1) = M^T \sigma(\mu(\mathrm{t})) + \varepsilon(\mu(t)) \\ &\|M\|_F \leq M^*, \|\varepsilon(\mu)\| \leq \varepsilon^* \end{aligned} \tag{14}$$

Trong đó M^* ký hiệu giới hạn trên đã biết của chuẩn Frobenius của các trọng số trong phương trình (14), μ là vector các thành phần vi phân hữu hạn của giá trị đo lường $u_{np}(t)$ trong (13) ; $\sigma(\mu(t))$ - hàm sigmoid cho mạng nơ ron $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$

Áp dụng lý thuyết lọc tối ưu tuyến tính cho các phương trình trạng thái tuyến tính hóa (7) và xấp xỉ hàm bất định bởi mạng nơ ron (14), nhận được sơ đồ tổng quát của bộ lọc tối ưu thích nghi như sau:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{x}},\mathbf{t}) + \mathbf{K_M}\left[\mathbf{u_{np}}(\mathbf{t}) - \mathbf{u_c}(\hat{\mathbf{x}},\mathbf{t}) - \mathbf{m}\right] + \mathbf{Bu} + \mathbf{B_1}.\vartheta_{ad}(t) \quad (15a)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}(\hat{\mathbf{x}})\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{K_M}\left[\mathbf{u_{np}}(\mathbf{t}) - \mathbf{u_c}(\hat{\mathbf{x}},\mathbf{t}) - \mathbf{m}\right] + \mathbf{Bu} + \mathbf{B_1}.\vartheta_{ad}(t) \quad (15b)$$

Trong đó: $\mathbf{K_M = 2DH^T(\hat{x})G_{\xi n}^{-1}}$ là ma trận các hệ số khuếch đại của bộ lọc, D là ma trận hàm tương quan hậu nghiệm, $G_{\xi n}$ là ma trận cường độ tạp trắng kênh quan sát, $\vartheta_{ad}(t) = M^T\sigma(\mu(t))$ là véc tơ đầu ra mạng nơ ron thực hiện xấp xỉ hóa hàm bất định $g_1(x, z_1)$, $\hat{M}$ – ước lượng của trọng số được chỉnh định online. Luật chỉnh định mạng nơ ron cho $\hat{M}$ là:

$$\dot{M}(t) = \Gamma_M\left\{\sigma(\mu(t))\bar{u}_{np}^T(t) + k_\sigma(\bar{u}_{np}(t))\hat{M}(t)\right\} \quad (16)$$

Trong đó: $\bar{u}_{np} \triangleq u_{np}(t) - \hat{u}_{np}(t), k_\sigma -$ hệ số luật chỉnh, (xem (2) và $\Gamma_M > 0 -$ tốc độ học của mạng nơ ron.

Ký hiệu $e(t) \triangleq x(t) - \hat{x}(t)$ ta có thể đưa ra sai số động học của bộ lọc như sau :

$$\begin{aligned} e(t) = {} & f(x(t)) - f(\hat{x}(t)) + B_1g_1(x(t), z_1(t)) - \\ & - B_1\vartheta_{ad}(t) - K_M\left[u_{np}(t) - u_c(\hat{x},t) - m\right] \end{aligned} \quad (17)$$

Thay thế $\vartheta_{ad}(t) = M^T\sigma(\mu(t))$, phương trình (14) vào (17), thành phần sai số của các trọng số mạng nơ ron, có thể viết lại sai số động học e(t) dưới dạng khác:

$$\begin{aligned} e(t) = {} & f(x(t)) - f(\hat{x}(t)) + B_1M(t)\sigma(\mu(t)) + \\ & + B_1\xi(\mu(t)) - K_M\left[u_{np}(t) - u_c(\hat{x},t) - m\right] \end{aligned}$$

$$\dot{M}(t) = -\Gamma_M\left\{\sigma(\mu(t))\bar{u}_{np}^T(t) + k_\sigma(\|\bar{u}_{np}(t)\|)\hat{M}(t)\right\} \quad (18)$$

Trong phương trình bộ lọc thích nghi (15), thành phần ma trận phương sai hậu nghiệm D được tìm từ phương trình Ricatti sau :

$$\mathbf{\dot{D} = F(\hat{x})D + DF^T(\hat{x}) - 2DH^T(\hat{x})D + 0,5G_{\xi x}} \quad (19)$$

Trong đó $G_{\xi x}$ - ma trận cường độ tạp trắng $\xi_x(t)$;

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{\varepsilon_r} & D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}} \\ D_{\varepsilon_{ra}\varepsilon_r} & D_{\varepsilon_{ra}} \end{bmatrix}$$ - Ma trận phương sai hậu nghiệm ;

Bài toán xác định điện áp tối ưu điều khiển truyền động ăng ten $u_{\varepsilon r}$ được tìm từ điều kiện tối thiểu hóa phiếm hàm chất lượng :

$$I = M_{dk}\left\{(\varepsilon_r - \varepsilon_{ra})^2 + \lambda_K\int_{t_0}^{t} u_{\varepsilon r}^2(\tau)\,d\tau\right\} \quad (20)$$

Ở đây, $M_{dk}\{.\}$ – ký hiệu phép toán lấy kỳ vọng xác suất trong điều kiện quan sát thể hiện $U_{np}(t)$ (xử lý tín hiệu quan sát). Trong điều kiện bài toán này với những phương trình trạng thái, quan sát là tuyến tính và với tiêu chuẩn chất lượng dạng (20), thì ta có thể tìm điều khiển tối ưu theo phương pháp nguyên lý cực đại Pôntraghin cho điều khiển cục bộ (local control) và tìm được vec tơ điều khiển tối ưu $u_{\varepsilon r}$ như đã trình bày trong [2]:

$$u = u_{\varepsilon r} = \frac{b_{u\varepsilon}}{\lambda_K}(\hat{\varepsilon}_r - \hat{\varepsilon}_{ra}) \quad (21)$$

Trong đó $\hat{\varepsilon}_r$, $\hat{\varepsilon}_{ra}$ là những giá trị ước lượng góc ε_r và ε_{ra}.

Thay các giá trị vật lý của các ma trận và véc tơ của hệ xác định góc mục tiêu như trong các công thức ở phần đặt vấn đề của bài báo vào các biểu thức (15b) và (19) và triển khai tường minh dưới dạng vô hướng ta nhận được :

- Phương trình khối đánh giá của bộ lọc tạo lập các ước lượng cận tối ưu xác định góc mục tiêu ra đa e_r và góc quay ăng ten ε_{ra}

$$\dot{\hat{\varepsilon}}_{\varepsilon} = -k_\varepsilon\hat{\varepsilon}_{\varepsilon} + D_{\varepsilon_r}z_{dc1} + D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}}z_{dc2} + B_1\vartheta_{ad}(t) \quad (22)$$

$$\dot{\hat{\varepsilon}}_{\varepsilon a} = b_{u\varepsilon}u_{\varepsilon_r} + D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}}z_{dc1} + D_{\varepsilon_{ra}}z_{dc2} \quad (23)$$

(các điều kiện ban đầu cho (22) và (23) là các góc $\varepsilon_r(t_0)$ và $\varepsilon_{ra}(t_0)$).

Trong đó :

z_{dc1}, z_{dc2} - các đại lượng vô hướng tạo thành vec tơ z_{dc} của bộ phân biệt

$$z_{dc1} = \frac{2k_p\cos\psi}{G_{\xi u1}}[u_{np1}(t) - k_p(\hat{\varepsilon}_r - \hat{\varepsilon}_{ra})\cos\psi) \quad (24)$$

$$z_{dc2} = -z_{dc1} \quad (25)$$

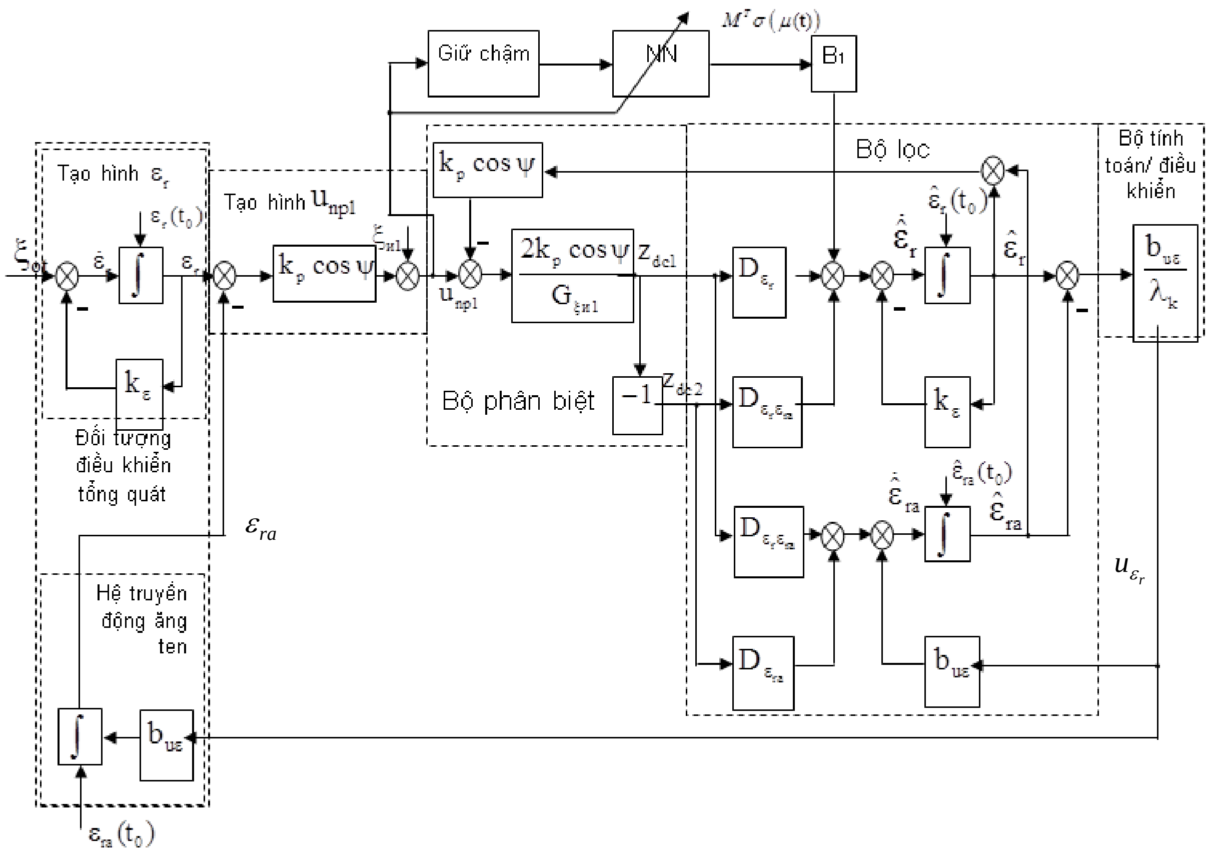
Phương trình khối chính xác của bộ lọc tạo lập các phương sai hậu nghiệm của sai số lọc

$$\dot{D}_{\varepsilon_r} = \frac{-2k_\varepsilon D_{\varepsilon_r} - k_p^2(D_{\varepsilon_r} - D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}})^2}{G_{\xi u1}} + 0,5G_{\xi ot} \quad (26)$$

$$\dot{D}_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}} = \frac{-k_\varepsilon D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}} + k_p^2(D_{\varepsilon_r} - D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}})(D_{\varepsilon_{ra}} - D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}})}{G_{\xi u1}} \quad (27)$$

$$\dot{D}_{\varepsilon_{ra}} = \frac{-k_p^2(D_{\varepsilon_{ra}} - D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}})^2}{G_{\xi u1}} \quad (28)$$

Trong các phương trình (24) - (28) tất cả các thông số đều đã biết, trừ các phương sai ban đầu khi $t = t_0 - D_{\varepsilon_r}(t_0), D_{\varepsilon_{ra}}(t_0)$ và $D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}}(t_0)$. Các điều kiện ban đầu này cần xác định từ ý nghĩa vật lý thực tế. Sau khi giải được các phương trình này, có thể tìm ra quy luật biến đổi của D_{ε_r}, $D_{\varepsilon_{ra}}$ và $D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}}$ theo thời gian và dưới dạng các chương trình tương ứng đưa vào các bộ khuếch đại với các hệ số truyền D_{ε_r}, $D_{\varepsilon_{ra}}$ và $D_{\varepsilon_r\varepsilon_{ra}}$ (hình 2). Sơ đồ cấu trúc động học (hình 2) của hệ thích nghi dùng mạng nơ ron để xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa trong điều kiện bất định của phương trình trạng thái mục tiêu ra đa được tổng hợp có kết hợp với mạch tạo góc bám sát ε_r tối ưu.



H. 2 *Sơ đồ cấu trúc động học của hệ thích nghi dùng mạng nơ ron để xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa trong điều kiện bất định của phương trình trạng thái*

3. Kết luận

Điểm mới đóng góp về mặt khoa học của bài báo so với các công trình đã được công bố là đề xuất và xây dựng được cấu trúc hệ xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa đơn xung trên cơ sở tổng hợp thuật toán bộ lọc tuyến tính cận tối ưu thích nghi với chỉnh định dùng mạng nơ ron theo thông tin từ kênh quan sát để khắc phục yếu tố có thành phần hàm bất định trong phương trình trạng thái. Thuật toán lọc thích nghi được xây dựng ở đây không chỉ đưa ra các ước lượng cho góc mục tiêu ε_r, góc quay ăng ten ε_{ra} , mà còn kết hợp đồng thời với xây dựng đặc tính phân lập tối ưu [6], tổ hợp được với điện áp điều khiển tối ưu góc quay ăng ten để nâng cao chất lượng toàn hệ thống. Dẫn dắt chứng minh các kết quả thuật toán trong bài báo khi thực hiện riêng biệt công đoạn xây dựng bộ lọc thích nghi và công đoạn xây dựng điện áp điều khiển tối ưu truyền động ăng ten có cơ sở khoa học tin cậy dựa trên định lý phân tách riêng hai công đoạn tối ưu hóa này (lọc tối ưu và điều khiển tối ưu) mà không ảnh hưởng đến tính khoa học tổng quát (đúng cho các hệ tuyến tính ngẫu nhiên). Do nội dung của bài báo đã khá lớn, nên phần mô phỏng so sánh hiệu quả của thuật toán mới với các thuật toán trước đây sẽ được trình bày riêng biệt trong các bài báo khác (nội dung mô phỏng cũng có dung lượng khá lớn do có nhiều điểm tinh tế nên cần được giải trình chi tiết, tin cậy các luận cứ khoa học). Phương hướng nghiên cứu phát triển tiếp theo của các tác giả là mở rộng giải quyết bài toán xây dựng hệ thích nghi dùng mạng nơ ron để xác định tọa độ góc mục tiêu ra đa đơn xung với đặc tính phi tuyến của bộ phân biệt.

Tài liệu tham khảo

[1] E. Lavretsky, N. Hovakimyan, and Calise A.: *Upper bounds for approximation of continuous time dynamics using delayed outputs and feedforward neural networks*. IEEE Transaction on Automatic Control, 48(9):1606-1610, 2003.

[2] М.В. Максимов, В.И. Меркупов : *Радиоэлектронные следящие системы*. Москва «Радио и связь», 1990.

[3] Первачев С.В: *Радиоавтоматика.* Москва «Радио и связь», 1982.

[4] Артемьев. В. М. н другне: *Управление в системах с разделением времени*. Минск, вышейшая школа, 1987.

[5] Nguyễn Tăng Cường, Vũ Đức Trường: *Xây dựng thuật toán lọc thích nghi sử dụng tuyến tính hóa thống kê và mạng nơ ron*. Hội nghị toàn quốc lần thứ 6 về Cơ Điện tử - VCM-2012.

[6] Lê Hải Hà, Nguyễn Vũ Hoài Nam, Nguyễn Tăng Cường: *Tổng hợp thuật toán lọc xấp xỉ tuyến tính thích nghi với đặc tính phân biệt tối ưu.* Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật.-Số 169(7- 2015) - Học viện KTQS.

Lê Hải Hà sinh năm 1973, tốt nghiệp chuyên ngành Tên lửa phòng không của Học viện Kỹ thuật Quân sự năm 1998. Từ năm 1998 đến nay anh là giảng viên của Bộ môn Tự động và Kỹ thuật tính, Khoa Kỹ thuật điều khiển, HVKTQS. Hướng nghiên cứu chính là thiết kế và thực hiện, khai thác các hệ thống đo lường, điều khiển trong quân sự, các hệ thống nhúng và hệ thống mạng công nghiệp.

Nguyen Tang Cuong was born in 1950, Ass. Professor, Ph.D, Lecture in Le Quy Don Technical University. He received University Education, Ph.D Degree and Post-graduate Technology Practics from Minsk Air Defence Missile Engineering University, and Bauman Moscow State Technical University. He published more than 80 scientific papers in technical related fields of Automation, Flight Equipment Control, Computer System, Signal Processing and Industrial Control System.