Tạp chí Tin học và Điều khiển học, T. 12, S. 4 (1996) (35–44)

NHẬN DẠNG CÁC ĐỐI TƯỢNG MIMO ỔN ĐỊNH VỚI GIỚI HẠN BẤT ĐỊNH CHO TRƯỚC

VŨ NGỌC PHÀN

Abstract. The modern control theory is mainly dealing with MIMO systems. In this case the dimension of the state vector as well as transfer function matrix may be high. In contrast to the large scale systems where the problem could be solved via the separation of the primary system in the subsystems, the MIMO control theory takes the system as an unitary object in consideration. Of course, a MIMO system is really more complicated than the SISO one. The identification problem of the MIMO systems involves many difficulties and that is the reason for why the adaptive algorithms have been applied to the MIMO systems only in a small measure up to now. In contrast, the robust control approach is seeming to be an useful tool for solving the control task with model uncertainties. Alone the number of publications on this issue in the past can prove this assertion right enough [12].

However, it is to see the fact that the available results of the MIMO system identification are very restricted. There are no proper facilities to overcome the difficulties expressed in [1]. The 4SID algorithm is recently attracting attension but the use of this algorithm requires the stipulations which could be not perpetually fulfilled [8]. The present paper proposes an approach for complete the MIMO system identification with given uncertainty bounds. At first, some models of MIMO plants are described in Section 2 in order to look for the way solving the identification problem. Section 3 repeats the conventional identification method developed by Landau for SISO system and later completed by other researchers. Section 4 deals with the improvement of the algorithm of Section 3 in order to fit for the MIMO systems. Finally, in Section 5, an multi-approach is provided for solving the MIMO system identification problem. At the first stage the identification is done to receive the raw model. Then, the tracking quality of the system with a robust controller designed based on the raw model will be checked. The uncertainty bound analysis gives the information to adjust the raw model.

1. KHÁI QUÁT

Lý thuyết điều khiển hiện đại quan tâm chủ yếu đến các hệ nhiều đầu vào nhiều đầu ra (Multi - Input Multi - Output), gọi tắt là các hệ MIMO. Các hệ MIMO có số chiều của vectơ trạng thái cũng như số chiều của ma trận hàm truyền lớn. Khác với cách tiếp cận của lý thuyết các hệ thống lớn (large scale systems) trong đó vấn đề được giải quyết trên cơ sở phân rã thành các hệ thống con, lý thuyết các hệ MIMO nhìn nhận hệ thống như một tổng thể thống nhất.

Hiển nhiên hệ MIMO phức tạp hơn nhiều so với hệ một đầu vào một đầu ra (Single Input Single Output), gọi tắt là SISO. Việc nhận dạng các đối tượng MIMO gặp rấ tnhiều khó khăn và đó chính là nguyên nhân tại sao các phương pháp tự thích nghi áp dụng vào hệ MIMO cho đến nay ít được chú ý. Trái lại, điều khiển bền vững (robust control) tỏ ra là công cụ đắc lực trong việc giải quyết vấn đề điều khiển khi mô hình có chứa bất định. Chỉ riêng số lượng các công trình nghiên cứu trong thời gian gần đây cũng đủ nói lên điều đó [12].

Tuy vậy, ta nhận thấy một thực tế là vấn đề nhận dạng các đối tượng MIMO mới thu được những kết quả còn hạn chế. Những khó khăn nhắc đến trong [1] đến nay vẫn chưa có lời giải thỏa đáng. Gần đây phươn gpháp 4SID đang được nhiều người quan tâm nhưng ứng dụng nó cần những điều kiện không dễ gì có được [8]. Bài này đề xuất một phương pháp nhận dạng đối tượng MIMO với ngưỡng bất định cho trước. Trước hết một số dạng mô hình MIMO được trình bày ở phần 2 để làm cơ sở định hướng giải quyết vấn đề nhận dạng. Phần 3 nhắc lại phương pháp nhận dạng tham số cổ điển được Landau đề xuất cho hệ SISO và nhiều người sau này hoàn thiện. Phần 4 trình bày những cải tiến phương pháp nhận dạng nêu trong phần 3 so cho nó có thể áp dụng vào hệ MIMO. Cuối cùng, trong phần 5, một các tiếp cận nhiều mức được đưa ra để giải quyết bài toán nhận dạng. Trước hết tiến hành nhận dạng để được mô hình thô. Sau đó dựa vào mô hình này ta sẽ kiểm tra tím bám chắc chắn của hệ trên cơ sở một điều khiển bền vững. Trên cơ sở xác định lại ngưỡng bất định, dạng mô hình ban đầu sẽ được bổ sung và quá trình nhận dạng được lập lại cho đến khi thỏa đáng.

2. MỘT SỐ DẠNG MÔ HÌNH CỦA HỆ MIMO

Trong bài này ta quan tâm đến các đối tượng điều khiển tuyến tính rời rạc hoặc các đối tượng liên tục đã được rời rạc hóa một cách thỏa đáng. Ký hiệu $y(k)$ là vectơ đầu ra m chiều, $u(k)$ là vectơ đầu vào 1 chiều, trong đó k chỉ thời điểm thứ k. Ta giả thiết $l \leq m$. Ta dùng d để chỉ toán tử dịch chuyển lùi, nghĩa là:

$$dy(k+1) = y(k) \tag{1}$$

Một số đối tượng với l đầu vào và m đầu ra có thể biểu diễn dưới các dạn gmô hình sau:

- M1 $$A(d)y(k) = B(d)u(k) \tag{2}$$

$$A(d) = I + \sum_{\mu=1}^{n_A} A_\mu d^\mu \tag{3}$$

$$B(d) = \sum_{\nu=1}^{n_A} B_\nu d^\nu \tag{4}$$

Ở đây n_A là bậc cao nhất của mọi phần tử hàm truyền. Số tham số cần phải xác định là

$$N(P) = 2mln_A \tag{5}$$

Đây là mô hình tổng quát nhất, phản ánh đầy đủ mọi quan hệ của đối tượng MIMO. Tuy nhiên số tham số cần xác định rất lớn và vì thế gây nhiều khó khăn cho quá trình nhận dạng.

- M2 $$y(k) = G(d)u(k) \tag{6}$$

$$G(d) = (g_{ij}(d)),\ i = 1, 2, ..., m\,;\ j = 1, 2, ..., l \tag{7}$$

$$g_{ij}(d) = \sum_{\nu=1}^{n(i,j)} b_{ij,\nu} d^{\nu} \,/\, (1 + \sum_{\mu=1}^{n(i,j)} a_{ij,\mu} d^{\mu}) \tag{8}$$

Ở đây $n(i,j)$ là bậc cao nhất của hàm truyền giữa đầu ra thứ i và đầu vào thứ j và đặc trưng cho tính động lực của quan hệ vào ra đó. Dễ dàng nhận ra rằng, $n(i,j) \leq n_A$ với mọi i, j. Mô hình M2 thực chất là một trường hợp riêng của mô hình tổng quát M1. Giả sử $A(d)$ không suy biến. Khi đó $A(d)$ và $B(d)$ chính là kết quả việc phân tích G(d) thành hai ma trận nguyên tố cùng nhau (coprime factorization). Nói cách khác

$$G(d) = A^{-1}(d)B(d) \tag{9}$$

Số tham số tối đa của mô hình cần phải xác định là

$$N(p) = 2\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{l} n(i,j) \tag{10}$$

Ở các dạng mô hình M1 và M2, các mối quan hệ chéo được phản ánh đầy đủ thể hiện qua các phần tử hàm truyền giữa đầu vào và đầu ra không cùng chỉ số. Nhược điểm của các mô hình trên là số tham số cần xác định khá lớn, gây nhiều khó khăn trong quá trình nhận dạng. Việc làm giảm bớt khó khăn này đi liên với việc đơn giản hóa cấu trúc của $A(d)$ cũng như của $B(d)$. Phương pháp ma trận thưa là một kỹ thuật tuy rất cổ điển nhưng đến tận ngày nay vẫn có ý nghĩa lý luận và thực tiễn rất phong phú [5].

Như ta đã biết, ma trận $A(d)$ có thể đưa về dạng đường chéo tương đương với dạng Smith - McMillan trong trường hợp ma trận hàm truyền của hệ liên tục [9]. Ngoài ra ta cũng biết rằng, các cực của ma trận hàm truyền được đặc định bởi $A(d)$. Từ những điều trên đây ta có thể đi đến các mô hình đơn giản hơn mô hình M1 và M2.

- M3 $$D(d)y(k) = B(d)u(k) \tag{11}$$

$$D(d) = \operatorname{diag}(a_i(d))\ ;\ i = 1, 2, \ldots, m \tag{12}$$

$$B(d) = (b_{ij}(d))\ ;\ i, j = 1, 2, \ldots, m \tag{13}$$

$$a_i(d) = 1 + \sum_{\mu=1}^{n(i)} a_{i,\mu} d^{\mu} \tag{14}$$

$$b_{ij}(d) = \sum_{\nu=1}^{n(i,j)} b_{ij,\nu} d^{\nu} \tag{15}$$

Số các tham số cần xác định là

$$N(p) = \sum_{i=1}^{m} i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n(i,j) \tag{16}$$

Mô hình M3 hàm nghĩa mỗi đầu ra của hệ đều chịu tác động của tất cả các đầu vào. Ta có thể xét trường hợp ngược lại, trong đó mỗi đầu ra chỉ chịu tác động của một đầu vào tương ứng. Tương tác chéo xuất hiện thông qua sự phản hồi của các đầu ra lân cận. Về mặt toán học, điều vừa trình bày thể hiện ở chỗ, bây giờ ma trận $B(d)$ là ma trận đường chéo còn ma trận $A(d)$ là ma trận có đủ mọi phần tử. Đó là mô hình M4 dưới đây.

- M4 $$A(d)y(d) = D(d)u(k) \tag{17}$$

$$A(d) = (a_{ij}(d)) \tag{18}$$

$$B(d) = \operatorname{diag}(b_i(d)) \tag{19}$$

$$b_i(d) = \sum_{\mu=1}^{n(i)} b_{i,\mu} d^{\mu} \tag{20}$$

$$a_{ii}(d) = 1 + \sum_{\nu=1}^{n(i,i)} a_{ii,\nu} d^{\nu} \tag{21a}$$

$$a_{ii}(d) = \sum_{\nu=1}^{n(i,i)} a_{ii,\nu} d^{\nu} \quad i \neq j \tag{21b}$$

Số tham số cần xác định trong mô hình này là

$$N(p) = \sum_{i=1}^{m} i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n(i,j) \tag{22}$$

- Các mô hình M3 và M4 đã cho p hép giảm bớt số tham số cần xác định. Tuy nhiên đó vẫn chưa phải là đích cuối cùng ta mong muốn. Một trong những cách làm giảm bớt số tham số xuống ít hơn nữa là giả thiết ma trận đường chéo $D(d)$ ở công thức (12) có các phần tử hoàn toàn giống nhau. Điều này hoàn toàn hợp lý vì như trên đã nói, ma trận $A(d)$ cũng như $D(d)$ đặc định toàn bộ cực của ma trận hàm truyền. Tuy nhiên bậc của đa thức này phải đủ lớn, bằng tổng số cực của ma trận hàm truyền. Ta có mô hình M5 biểu diễn dưới đây.

- M5
$$h(d)y(k) = B(d)u(k) \tag{23}$$

$$h(d) = 1 + \sum_{\mu=1}^{n} h_{\mu} d^{\mu} \tag{24}$$

$$B(d) = (b_{ij}(d)) \; ; \; i, j = 1, 2, \ldots, m \tag{25}$$

$$b_{ij}(d) = \sum_{\nu=1}^{n(i,j)} b_{ij,\nu} d^{\nu} \tag{26}$$

Số tham số cần xác định trong mô hình M5 là

$$N(p) = \sum_{i=1}^{m} i + \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{m} n(i,j) \tag{27}$$

Mô hình M5 có ưu điểm hơn các mô hình khác ở chỗ nó cho phép xác định nhanh các cực của ma trận hàm truyền, điều ma tra khi thiết kế các hệ MIMO rất quan trọng. Gần đây mô hình M5 đã được D. S. Bayard (1994) sử dụng trong nhận dạng các đối tượng có bậc động lực cao [5].

Như trên kia đã nhắc tới, các thuật toán ma trận thưa (sparse matrix) giúp ích rất nhiều trong việc giảm bớt độ phức tạp khi làm việc với các hệ MIMO. Nói chung trong hệ thống.MIMO, tương tác chéo không phải lúc nào cũng xuất hiện ở mọi phần tử và không phải lúc nào cũng xuất hiện với cường độ mạnh như nhau. Như vậy, nếu có những hiểu biết về hệ thống ta có thể bỏ đi những phần tử thích hợp trong các ma trận diễn tả mô hình vừa trình bày trên kia.

4. THUẬT TOÁN NHẬN DẠNG CẢI TIẾN

Việc duy trì $P(k)$ luôn luôn xác định dương tại mọi thời điểm là việc làm khó khăn, đặc biệt khi $P(k)$ có số chiều lớn. Dưới đây đây trình bày một biện pháp khắc phục khó khăn này. Để đơn giản cách viết, từ đây về sau ta bỏ chỉ số i trong các công thức.

Ta đặt
$$Q(k) = P^{-1}(k) = T^T(k)T(k) \tag{40}$$
trong đó $T(k)$ là ma trận tam giác trên. Áp dụng (40) vào (38) ta thu được
$$T^T(k+1)T(k+1) = \gamma(k)T^T(k)T(k) + \beta(k)\varphi(k)\varphi^T(k) \tag{41}$$
Cần nhớ rằng, số chiều của ma trận $Q(k)$ là $[(m+1)n]^2$. Nếu $M(k)$ là một ma trận trực giao cấp $[(m+1)n+1]^2$ thì ta có thể viết (41) dưới dạng
$$T^T(k+1)T(k+1) = F(k)M^T(k)M(k)F^T(k) \tag{42}$$
trong đó
$$F(k) = [\gamma^{1/2}(k)T^T(k) \quad \beta^{1/2}(k)j(k)] \tag{43}$$
Từ (42) suy ra
$$M(k)F^T(k) = [T^T(k) \quad o^T]^T \tag{44}$$
Để xác định $T(k)$ chỉ cần tìm $M(k)$ sao cho (44) thỏa mãn. Một ma trận $M(k)$ như vậy có thể tìm được bằng cách sau:

Đặt
$$M(k) = M_r(k)M_{r-1}(k)...M_1(k) \tag{45}$$
trong đó
$$M_\eta(k) = (z_{\mu,\nu}(k)) \quad \eta = 1, 2, ..., r \tag{46}$$
và
$$z_{\eta,\mu\nu}(k) = \begin{cases} c & \text{khi } \mu = \nu = \eta \text{ hay } r = 1 \\ s & \text{khi } \mu = \eta,\ \nu = r+1 \\ -s & \text{khi } \mu = r+1,\ \nu = \eta \end{cases} \tag{47}$$
$$c = \frac{\gamma(k)t(k)}{\sqrt{\beta(k)\lambda^2(k) + \gamma(k)t^2(k)}} \tag{48}$$
$$s = \frac{\beta^{1/2}(k)\lambda(k)}{\sqrt{\beta(k)\lambda^2(k) + \gamma(k)t^2(k)}} \tag{49}$$

Để xác định $Q(k)$ ta nhân hai vế của (37) với các vế tương ứng của (38) và thu được
$$P^{-1}(k+1)\Theta(k+1) = \gamma(k)P^{-1}(k)\Theta(k) + \beta(k)\varphi(k)y(k+1) \tag{50}$$

hoặc

$$Q(k+1)\Theta(k+1) = \gamma(k)Q(k)\Theta(k) + \beta(k)\varphi(k)y(k+1) \tag{51}$$

với

$$T(k+1)\Theta(k+1) = q(k+1) \tag{52}$$

Phương trình (51) sẽ trở thành

$$T^T(k+1)q(k+1) = \gamma(k)T^T(k)q(k) + \beta(k)\varphi(k)y(k+1) \tag{53}$$

hoặc

$$T^T(k+1)q(k+1) = F(k)M^T(k)M(k)\delta(k) \tag{54}$$

trong đó

$$\delta(k) = [\gamma^{1/2}(k)q(k) \;\; \beta^{1/2}(k)y(k+1)] \tag{55}$$

Từ (44), (54) và (55) suy ra

$$T^T(k+1)M(k)\delta(k) = T^T(k+1)q(k+1) \tag{56}$$

Vì $T(k)$ xác định dương nên ta có

$$q(k+1) = M(k)\delta(k) \tag{57}$$

Như ta thấy, việc xác định quy về việc xác định $q(k)$ theo các phương trình (57) và (52).

5. NHẬN DẠNG ĐỐI TƯỢNG MIMO ỔN ĐỊNH

Khi thiết kế điều khiển bền vững ta cần biết mô hình danh định (nominal model) kèm theo sự mô tả những bất định [11]. Như vậy vấn đề nhận dạng đối tượng trong điều khiển bền vững bao gồm việc xác định cấu trúc và tham số của mô hình danh định cùng với việc mô tả những bất định [3]. Như trong [11] đã nêu, mặc dù điều khiển bền vững cho phép ổn định hóa một đối tượng khi không biết chính xác cực của ma trận hàm truyền của nó nhưng cần phải biết số lượng những cực không ổn định. Như vậy nhiệm vụ của quá trình nhận dạng là phải chỉ ra số lượng của các cực không ổn định. Phương pháp nhận dạng trình bày dưới đây có giá trị cho những đối tượng ổn định, có nghĩa là ma trận hàm truyền không chứa cực không ổn định. Giả thiết này cần thiết vì trong quá trình nhận dạng ta sử dụng bộ điều khiển để kiểm tra tính chất bám của hệ. Bộ điều khiển này được thiết kế trong quá trình nhận dạng nên sự không đầy đủ thông tin có thể làm mất ổn định toàn bộ hệ thống.

Bài toán. *Cho một số đối tượng ổn định. Biết số đầu vào, số đầu ra và bậc động lực của hệ. Xây dựng mô hình với giới hạn cho trước về những bất định chứa trong mô hình thu được.*

Cách giải quyết:

- Chọn một dạng mô hình diễn tả ở phần 2 của bài này trong đó cố gắng làm thưa các ma trận trên cơ sở những thông tin ban đầu về đối tượng.
- Tiến hành nhận dạng đối tượng bằng các thuật toán trình bày ở phần 3 và 4 của bài này. Có thể tham khảo thêm các thuật toán trong [2, 4, 5].
- Chọn một dạng tín hiệu thích hợp và thiết kế bộ điều khiển bám chắc chắn theo tinh thành trình bày trong [10] cho mô hình danh nghĩa vừa tìm được ở bước trên. Có thể tham khảo thêm [13].
- Áp dụng bộ điều khiển bám chắc chắn vào đối tượng. Phân tích sai số bám và từ đó tính toán bất định chứa trong mô hình.
- Kiểm tra xem những bất định mô hình có thỏa mãn giới hạn cho trước hay không.
- Nếu giới hạn bất định thỏa mãn yêu cầu cho trước thì kết thúc quá trình nhận dạng. Trong trường hợp giới hạn bất định không thỏa mãn yêu cầu cho trước, dựa vào các thông tin thu được ở các bước trước, chọn lại hoặc thay đổi ít nhiều dạng mô hình cũ và lập lại các công việc đã nêu.

6. KẾT LUẬN

Nhận dạng các đối tượng MIMO là một vấn đề khá phức tạp, cho đến nay vẫn chưa giải quyết được một cách thỏa đáng. Những khó khăn mà ta đã gặp trong khi nhận dạng các đối tượng SISO (như sự tích lũy của sai số tính toán, sự không hội tụ của các thuật toán nhận dạng tham số khi không biết chính xác bậc động lực của mô hình v.v...) xuất hiện ở đây với mức độ cao hơn. Tương tác chéo giữa các phần tử của đối tượng làm cho việc chọn một cấu trúc mô hình trở nên khó khăn ngay cả khi biết trước bậc động lực của chúng. Bài này đưa ra một cách tiếp cận vấn đề nhận dạng đối tượng MIMO ổn định. Việc mở rộng và cải tiến để áp dụng cho những đối tượng không ổn định có thể sẽ là một vấn đề nghiên cứu rất hấp dẫn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. K. Dickmann, *Identifikation vol Mehrgobesystemen*, RT 31 (183) H.11 und H.12.

2. R. G. Hakvoort, P. Van Den Hof, *Consistent parameter bounding Identification for linearly parameterized model sets*, Automatica, **31** (7) (1995), 957 - 969.
3. T. Zhou, K. Kimura, *Simultaneous identification of nominal model, parametric uncertainty and unstructured uncertainty for robust control*, Automatica, **30** (3) (1994), 391 - 402.
4. P. Van Den Hof, *Model sets and parametrizations for identification of multivariable equation error models*, Automatica, **30** (3) (1994), 433 - 446.
5. D. S. Bayard, *High order multivariable transferfunction curve fitting: Algorithms, sparse matrix methods and experimental results (MIMO with common d(s))*, Automatica, **30** (9) (1994), 1439 - 1444.
6. P. Dorato and al., *Bibliography on robust control*, Automatica, **29** (1) (1993), 201 - 213.
7. A. L. Tits, M. K. H. Fan, *On smal-μ theorem*, Automatica, **31** (8) (1995), 1199 - 1201.
8. Y. M. Cho, T. Kailath, *Fast subspace - based system identification: An instrumental variable approach (4SID for MIMO)*, Automatica, **31** (6) (1995), 903 - 905.
9. Vũ Ngọc Phàn, *Multi-input multi-output control systems*, Document of Research Project KC-02-09 of Institute of Information Technology, 1994.
10. Vũ Ngọc Phàn, *Robust control of MIMO systems with reference input uncertainty*, Document of Research Prject CS-21 of Institute of Information Technology, 1995.
11. Vũ ngọc Phàn, *Robustness of multi-input multi-output control systems*, Document of Research Projrect CS-21 of Institute of Information Technology, 1995.
12. P. Dorato and all., *Bibliography on robust control*, Automatica, **29** (1) (1993), 201 - 213.
13. O. M. Grasselli, S. Longhi, A. Tornanbe, *Robust tracking and performance for multivariable systems under physical parameter uncertainties*, Automatica, **29** (1) (1993), 169 - 179.

Phân viện Tự động

Viện Công nghệ thông tin

Nhận bài ngày 2-11-1995