Программное обеспечение идентификации и адаптивного управления (Пакет программ АДАПЛАБ- 3 в среде MATLAB)

А.Г. Александров,
вед. научн. сотр., д.ф.-м.н., проф.,
Институт проблем управления РАН,
alex7@ipu.rssi.ru, Москва

1. Введение

К настоящему времени разработан ряд методов идентификации объектов управления, описываемых линейными дифференциальными уравнениями. Эти методы условно можно разделить на две группы в зависимости от предположений о помехах измерения и внешних возмущениях, приложенных к объекту.

Первую группу составляют методы идентификации объектов, помехи и возмущения в которых случайные процессы с известными статистическими характеристиками. Это различные варианты метода наименьших квадратов и метода стохастической аппроксимации./1,2/. Вторая группа - это методы идентификации при неизвестных ограниченных помехах и возмущениях (с неизвестными статистическими характеристиками): рандомизированные алгоритмы /3, 4/ и конечно-частотная идентификация /5/.

В методе конечно-частотной идентификации испытательный сигнал представляет собой сумму гармоник с автоматически настраиваемыми (самонастраиваемыми) амплитудами и частотами. Число этих гармоник не превышает размерность вектора состояний объекта управления.

В теории адаптивного управления при неизвестных ограниченных внешних возмущениях также можно выделить несколько направлений.

Одно из направлений основано на методе рекуррентных целевых неравенств /1/. Важной особенностью этого направления является содержательность цели адаптивного управления, выраженной в форме ограничений (допусков) на отклонения установившегося выхода объекта. В этом методе адаптации регулятор непрерывно перестраивается, а при частотном адаптивном управлении /6/ изменение параметров регулятора происходит через достаточно большие промежутки времени (интервалы адаптации). Это обеспечивает линейность модели системы на этих интервалах (тогда, как в других методах модель системы нелинейна и трудно найти условия, при которых в процессе адаптации значения входа и выхода объекта не принимали бы недопустимо больших значений) и поэтому не возникает трудностей численной реализации алгоритма адаптации.

Пакет АДАПЛАБ-3 - это MATLAB-приложение для конечно-частотной идентификации и частотного адаптивного управления. АДАПЛАБ-3 предназначен для планирования эксперимента и моделирование процессов идентификации и адаптивного управления.

АДАПЛАБ -3 отличается от существующих программных систем следующим:

1. Внешние возмущения и помехи - произвольные, ограниченные функции.
2. Выходы и входы объекта в процессе идентификации и адаптации ограничены заданными числами.
3. Цель адаптивного управления - обеспечение заданных допусков на ошибки по регулируемым переменным.

АДАПЛАБ-3 отличается от предыдущей версии (АДАПЛАБ-М) /7,8/ тем, что для сокращения времени идентификации используется новый алгоритм настройки длительности идентификации, а в адаптивном управлении используется дискретный вариант аналитического конструирования регуляторов (LQ-оптимизации). Ниже приводится лишь отличие АДАПЛАБ-3 от пакета АДАПЛАБ-М.

2 Область применения

2.1 Идентификация

Поведение объекта описывается следующим разностным уравнением:

$$y[kh]+d_1 y[k(h-1)]+\ldots+d_n y[k(h-n)]=k_1 u[k(h-1)]+\ldots$$
$$\ldots+k_n u[k(h-n)]+f[k(h-1)] \quad (k=0,1,2,\ldots), \tag{1}$$

где $y(kh)$ – выход объекта, измеряемый в момент времени kh (h – интервал дискретности измерений), $u(kh)$ – управляемый вход, $f(kh)$ – неизвестное ограниченное внешнее возмущение:

$$|f(kh)| \le f^* \quad (k=0,1,2,\ldots), \tag{2}$$

где f^* - число, d_i и k_i $(i=\overline{1,n})$ – неизвестные числа, подлежащие определению, n – порядок объекта – известен.

Сигналы $u(kh)$ и $y(kh)$ должны быть ограничены:

$$|u(kh)| \le u\_,\ |y(kh)| \le y\_ \ (k=0,1,2,\ldots), \tag{3}$$

где $u\_$ и $y\_$ – заданные положительные числа, являющиеся границами диапазонов входного и выходного сигналов.

Число y_ таково, что выполняется условие:

$$|\bar{y}(kh)| \le y\_ \ ,(k=0,1,2,\ldots) \tag{4}$$

В котором $\bar{y}(kh)$ - «естественный » выход объекта (выход в режиме его нормальной эксплуатации), когда испытательный сигнал отсутствует.

Задача идентификации состоит в нахождении оценок коэффициентов объекта (1).

2.2 Адаптивное управление

Адаптивное управление для объекта (1) формируется регулятором с кусочно-постоянными коэффициентами

$$
\begin{aligned}
&g_{n-1}^{[i]}u^{(n-1)}+..+g_1^{[i]}\dot{u}+g_0^{[i]}u=r_{n-1}^{[i]}(y^{(n-1)}-\upsilon_{[i]}^{(n-1)})+\ldots \\
&\ldots+r_1^{[i]}(\dot{y}-\dot{\upsilon}_{[i]}+r_0^{[i]}(y-\upsilon_{[i]}))
\end{aligned}
\qquad (5)
$$

где i - номер интервала адаптации $(i=\overline{1,N})$, $\upsilon_{[i]}(kh)$ - испытательный сигнал.

По окончании адаптации регулятор имеет вид

$$
\begin{aligned}
&g_{n-1}u\left[k(h-1)\right]+..+g_1u\left[k(h-n+1)\right]+g_0u\left[k(h-n)\right]= \\
&=r_{n-1}y\left[k(h-1)\right]+..+r_1y\left[k(h-n+1)\right]+r_0y\left[k(h-n)\right]
\end{aligned}
\qquad (6)
$$

и обеспечивает выполнение требования к точности регулирования

$$
\left|y(kh)\right|\le y^* \quad (k=0,1,2,\ldots) \qquad (7)
$$

где y^* - заданное число. В процессе адаптации учитываются ограничения (3).

3. Директива идентификации.

К объекту (1) прикладывается гармонический испытательный сигнал

$$
u(kh)=\sum_{i=1}^{n}\ \rho_i\sin\omega_i kh, \quad k=\overline{0,N\ \ -1}, \qquad (8)
$$

где n – порядок объекта, N – количество тактов фильтрации.

Частотные параметры его входа (α_{ui},β_{ui}) и выхода (α_{yi},β_{yi}) находятся как

$$
\begin{aligned}
\alpha_{yi}(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} y(kh)\sin\omega_i kh,\\
\beta_{yi}(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} y(kh)\cos\omega_i kh,\\
\alpha_{ui}(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} u(kh)\sin\omega_i kh,\\
\beta_{ui}(N) &= \frac{2}{\rho_i N}\sum_{k=0}^{N-1} u(kh)\cos\omega_i kh.
\end{aligned} \tag{9}
$$

Они позволяют найти частотные параметры объекта:

$$
\alpha_i = \frac{\alpha_{yi}\alpha_{ui} + \beta_{yi}\beta_{ui}}{\alpha_{ui}^2 + \beta_{ui}^2}, \qquad \beta_i = \frac{-\alpha_{yi}\beta_{ui} + \beta_{yi}\alpha_{ui}}{\alpha_{ui}^2 + \beta_{ui}^2}, \quad i = \overline{1,n}. \tag{10}
$$

Оценки коэффициентов объекта (1) находятся как решение частотных уравнений

После этого испытание продолжается и через определенное количество интервалов фильтрации N, соответствующее периоду T минимальной испытательной частоты, частотные параметры входа и выхода находятся вновь, вычисляются оценки частотных параметров объекта (10), решаются частотные уравнения , находятся новые оценки $\hat{k}$ и $\hat{d}$ коэффициентов и проверяются условия их близости к результатам предыдущего набора интервалов фильтрации.

4.Функция AKORD3

Am-функция AKORD3 – функция синтеза регулятора при адаптивном управлении.

Расчетная часть функции имеет следующую структуру:

<akord3>=<dare><vost2><Srez3d><Formeps1><Dec2><formu1d><dare><vost2><radi5>

В основе алгоритма синтезатора регулятора лежит решение задачи АКОР (LQ-оптимизации) /9/

Объект (1) в форме Коши имеет вид:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= C_d x(k) \end{aligned} \tag{11}$$

Находится управление

$$u(k) = Kx(k), (k = 0,1,2...) \tag{12}$$

такое, чтобы минимизировался функционал:

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ x^T(k)Qx(k) + u^T(k)u(k) + \varepsilon_1{}^2 \left[\frac{u(k+1) - u(k)}{h} \right]^2 + \right.$$
$$\left. + \varepsilon_2{}^2 \left[\frac{u(k+2) - u(k+1)}{h} \right]^2 + \ldots + \varepsilon_\psi{}^2 \left[\frac{u(k+\psi) - u(k+\psi-1)}{h} \right]^2 \right\} \tag{13}$$

где $\varepsilon_i \;\; (i = \overline{1,\psi})$ – достаточно малые коэффициенты, $\psi = n-1$;

Q=Cd^{T}qCd, где коэффициент *q* определяется по формуле:

$$q = \frac{f^{*2}}{y\_^2}. \tag{14}$$

Вначале, используя функцию **dare (MATLAB),** для $\varepsilon_i = 0 \;\; (i = \overline{1,\psi})$ решается дискретное уравнение Риккати и

находится матрица К оптимального управления

Реализация этого управления затруднена тем, что не все переменные состояния объекта доступны непосредственному измерению, а можно измерять измерить лишь компоненты вектора y связанные с переменными состояния соотношением:

$$y(k) = C_d x(k) \tag{15}$$

В функции **vost2** используется прямой метод восстановления /9/, для того чтобы связать неизмеряемые переменные состояния объекта с иго измеряемым выходом.

Далее используя функцию **Srez3d** находится частота среза системы и вычисляются с помощью функции **Formeps1** коэффициенты функционала (13):

С помощью функции декомпозиции полинома (коэффициентами которого являются коэффициенты, рассчитанные ранее функцией **Formeps1) Dec2** находится гурвицев полином $e(s)$.

С помощью функции **formu1d** рассчитываются расширенные матрицы объекта управления для решения дискретных уравнений Риккати. Обозначим

$$x_{n+1}(k) = u(k), x_{n+2}(k) = \frac{u(k+1) - u(k)}{h} \tag{16}$$

Тогда

$$\begin{cases} hx_{n+2}(k) = x_{n+1}(k+1) - x_{n+1}(k) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ hx_{n+\psi}(k) = x_{n+\psi-1}(k+1) - x_{n+\psi-1}(k) \end{cases} \tag{29}$$

Или

$$\begin{cases} x_{n+1}(k+1) = x_{n+1}(k) + hx_{n+2}(k) \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ x_{n+\psi-1}(k+1) = x_{n+\psi-1}(k) + hx_{n+\psi}(k) \end{cases} \tag{30}$$

$$A_{ud} = \begin{vmatrix} A_d & B_d & 0 \\ 0 & & E_1 \end{vmatrix} \qquad B_{ud} = \begin{vmatrix} 0 \\ h \end{vmatrix}$$

$$Q_{ud} = \begin{vmatrix} Q & 0 \\ 0 & Ee_2 \end{vmatrix} \qquad R_{ud} = e_1(\psi + 1) \tag{31}$$

E_1- матрица размером $\psi \times \psi$, имеющая вид

$$E_1 = \begin{vmatrix} 1 & h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & h & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \qquad (32)$$

По расширенным матрицам $A_{ud}, B_{ud}, Q_{ud}, R_{ud}$ вновь с помощью функции **dare** решается дискретное уравнение Риккати и находится матрица управления.

Используя прямой метод восстановления, функцией **vost2** строится новый регулятор и с помощью функции **Radi5** вычисляется радиус r запасов устойчивости системы:

Литература.

1. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. Адаптивное управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1981.448с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991.432с.
3. Граничин О.Н., Поляк Б. Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. – М.: Наука, 2003.
4. Бунич А.Л., Бахтадзе Н.Н. Синтез и применение дискретных систем управления с идентификатором. – М.: Наука, 2003.
5. Alexandrov A.G. Finite-frequency method of identification // 10-th IFAC Sympos. Syst. Identification. Preprints. 1994. V. 2. P. 523-527.
6. Alexandrov A.G. Accurate adaptive control // Proceedings of the IASTED International Conference "Automation Control and Information Technology". Novosibirsk: ACTA Press, June 10-13 2002. ISNB: 0-

88986-342-3. P. 212-217.

7. Александров А.Г. , Орлов Ю.Ф. ADAPLAB-M: директива для идентификации с самонастройкой испытательного сигнала // Труды международной конференции " ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ",Москва,2005,ИПУ,CD-ROM:ISBN 5-201-14948-0, 1-10.

8. Александров А.Г. , Орлов Ю.Ф. ADAPLAB-M: директива для адаптивного управления с самонастройкой испытательного сигнала </A>// Труды международной конференции " ИДЕНТИФИКАЦИЯ СИСТЕМ И ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ",Москва,2005,ИПУ,CD-ROM:ISBN 5-201-14948-0, стр. 1-9.

9. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем Москва, Машиностроение, 1986, 272 с.