2. *Демиденко Г.В., Матвеева И.И.* Асимптотические свойства решений дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом // Вестник НГУ. Серия: математика, механика, информатика. 2005. Т. 5. № 3. С. 20–28.

АДАПТИВНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ДИСКРЕТНОГО ОБЪЕКТА В ℓ_1-ПОСТАНОВКЕ

В.Ф. Соколов

Коми научный центр, Сыктывкар, Россия
vfs-t@yandex.ru

1. Задача адаптивной оптимальной робастной стабилизации. Управляемый объект описывается дискретной моделью

$$a(q^{-1})y_{t+1} = b(q^{-1})u_t + v_{t+1}\,, \quad t = 0, 1, 2, \dots\,, \tag{1}$$

где $y_t, u_t, v_t \in \mathbb{R}$ — выход объекта, управление и суммарное возмущение в момент времени t, q^{-1} — оператор сдвига назад ($q^{-1}y_t = y_{t-1}$), $a(\lambda) = 1 + a_1\lambda + \ldots + a_n\lambda^n$, $b(\lambda) = b_1 + b_2\lambda + \ldots + b_m\lambda^{m-1}$. Возмущение v в модели (1) удовлетворяет ограничениям

$$|v_t| \le \delta_w w_t + \delta_y p_t^y + \delta_u p_t^u\,, \quad \sup_{t\ge 0} |w_t| \le 1\,, \tag{2}$$

где δ_w — норма внешнего ограниченного возмущения $\delta_w w \in \ell_\infty$, $\delta_y \ge 0$ и $\delta_u \ge 0$ — коэффициенты усиления неопределенностей по выходу и управлению, $p_t^y = \max_{t-\mu\le k<t} |y_k|$, $p_t^u = \max_{t-\mu\le k<t} |u_k|$. Конечная память неопределенностей μ выбирается конструктором достаточно большой без ущерба для гарантируемого качества управления.

Априорная информация о модели. Неизвестны $\delta_w, \delta_y, \delta_u$ и вектор коэффициентов $\xi := (a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m)^T \in \Xi$, где Ξ — известный ограниченный многогранник, и для любого $\xi \in \Xi$ корни полинома $b(\lambda)$ лежат вне круга $\{z \in \mathbb{C} \,\big|\, |z| \le 1\}$.

Задача адаптивной оптимальной стабилизации заключается в построении обратной связи, минимизирующей с заданной точностью показатель качества

$$J_\mu(\theta) := \sup_v \limsup_{t\to+\infty} |y_t| \to \min\,, \quad \theta := (\xi^T, \delta_w, \delta_y, \delta_u)^T\,.$$

Для модели с известным вектором коэффициентов ξ регулятор

$$b(q^{-1})u_t = (a(q^{-1}) - 1)y_{t+1} \tag{3}$$

гарантирует равенство $y_{t+1} = v_{t+1}$ и, в силу непредсказуемости суммарного возмущения v, является *оптимальным.* Сложность рассматриваемой задачи заключается в требовании оптимальности управления в условиях неидентифицируемости вектора ξ.

2. Оптимальное полиэдральное оценивание. Для решения задачи используются идеи множественного оценивания неизвестных параметров [1] и метода рекуррентных целевых неравенств [2]. Полиэдральные оценки формируются на основе целевых неравенств

$$|\hat{a}(q^{-1})y_{t+1} - \hat{b}(q^{-1})u_t| \leq \hat{\delta}_w + \hat{\delta}_y p^y_{t+1} + \hat{\delta}_u p^u_{t+1}\,,$$

эквивалентных описанию модели (1), (2) с вектором оценок параметров $\hat{\theta}$. Ключевым для обеспечения оптимальности адаптивного управления является оптимальное онлайн оценивание вектора θ, в котором идентификационным критерием служит наилучшая известная в ℓ_1-теории робастного управления асимптотическая (при $\mu \to +\infty$) верхняя оценка $J(\theta)$ показателя качества $J_\mu(\theta)$, имеющая вид [3]

$$J_\mu(\theta) \nearrow J(\theta) := \frac{\delta_w}{1 - \delta_y - \delta_u \|(a(\lambda) - 1)/b(\lambda)\|} \quad (\mu \to +\infty)\,, \qquad (4)$$

где символ $\nearrow$ означает монотонную сходимость снизу и $\|G(\lambda)\|$ обозначает ℓ_1-норму импульсной характеристики передаточной функции $G(\lambda)$. Предложена замена неизвестных параметров δ_y и δ_u неизвестным параметром $\delta = \delta_y + \delta_u\|(a(\lambda) - 1)/b(\lambda)\|$ позволяющая свести вычислительно сложную задачу оптимального онлайн оценивания с невыпуклым показателем $J(\theta)$ при линейных ограничениях и нелинейном ограничении $\delta_y+\delta_u\|(a(\lambda)-1)/b(\lambda)\| < 1$ (условие робастной устойчивости) к задаче дробно-линейного программирования, легко решаемой с помощью современного программного обеспечения. Настоящая работа устраняет для рассмотренного класса моделей актуальнейший с 1980-х гг. разрыв между теориями робастного управления и идентификации систем [4].

Библиографические ссылки

1. *Куржанский А.Б.* Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977, 392 с.
2. *Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А.* Адаптивное управление динамическими объектами. М.: Наука, 1981.
3. *Соколов В.Ф.* Адаптивное робастное управление дискретным скалярным объектом в ℓ_1-постановке // Автоматика и телемеханика. 1998. № 3. С. 107–131.

4. *Lamnabhi-Lagarrigue F., Annaswamy A., Engell C., et al.* Systems & Control for the future of humanity, research agenda: Current and future roles, impact and grand challenges // Annual Reviews in Control. 2017. Vol. 43. P. 1–64.

МЕТОДЫ ЛИНЕЙНОГО И ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ БЕЗОПАСНОГО СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ САМОЛЕТОВ

А.А. Спиридонов, С.С. Кумков

Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского, УрО РАН,
Екатеринбург, Россия
spiridonov@imm.uran.ru, sskumk@gmail.com

Практическая задача. Воздушное сообщение является важной частью пассажирских и грузовых перевозок. Движение самолетов организовано вдоль воздушных трасс, которые могут расходиться и сходиться. В точках соединения трасс возникает задача безопасного слияния потоков воздушных судов (ВС). Особенно важной эта задача является вблизи аэропортов для потоков ВС, прилетающих в данный аэропорт, так как эти потоки могут быть весьма плотными.

Соответственно, основной задачей является назначение новых моментов прибытия ВС в точку слияния. Назначенные моменты должны быть такими, что в результирующей очереди между соседними судами имеются достаточные временны́е промежутки, обеспечивающие отсутствие опасных сближений.

Выбор моментов прибытия должен быть согласован с промежутком возможного варьирования прибытия ВС. Этот промежуток обуславливается возможностью ускорения и задержки самолета вследствие изменения скорости его движения, а также наличия на маршруте его движения различных схем задержки или участков спрямления.

Кроме того, при выработке новых моментов прибытия должны учитываться различные практические запросы диспетчеров управления воздушным движением (УВД). Основное требование — минимизация отклонения назначенного момента прибытия от номинального, обуславливаемая минимизацией затрат горючего на маневры ВС. Кроме того, могут быть и другие требования, например, минимизация количества взаимодействий диспетчер – пилот. Или в случае варьирования момента прибытия вариация должна быть не слишком малой, так как малые вариации нетехнологичны. Могут накладываться ограничения на смену порядка прибытия ВС в точку слияния потоков и др.