

УДК 62-503.57

L1 управление квадрокоптером с обратной связью по состоянию с неопределенностью и потерей управления

Цзи Юньпэн^(*)

tsyu23ua088@student.bmstu.ru

SPIN-код: 4913-3395

Селезнева Мария Сергеевна

ms.selezneva@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Представлен метод L1 адаптивного управления квадрокоптером с обратной связью по состоянию системы с неопределенностью и потерей эффективности управления. Схема управления состоит из двух компонентов: управляющего элемента с обратной связью по состоянию, и L1 адаптивного для компенсации неопределенностей системы. Для оценки состояний системы разработан наблюдатель состояния, а для обеспечения ограниченности параметров введены адаптивные законы с оператором проекции. Теория Ляпунова используется для доказательства устойчивости. Результаты моделирования демонстрируют, что данный метод обеспечивает высокую точность отслеживания и стабильность системы даже при значительных неопределенностях и потерях.

Ключевые слова: L1-управление, управление с обратными состояниями, неопределенность, теория Ляпунова

L1 state feedback control method of quadcopter with uncertainties and loss of control

Ji Yunpeng^(*)

tsyu23ua088@student.bmstu.ru

SPIN-code: 4913-3395

Selezneva Maria Sergeevna

ms.selezneva@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. This article presents the L1 method of adaptive quadcopter control with feedback on the state of the system with uncertainty and loss of control efficiency. The control circuit consists of two components: a state-feedback control element, and an adaptive L1 to compensate for system uncertainties. A state observer has been developed to evaluate the states of the system, and adaptive laws with a projection operator have been introduced to ensure that the parameters are limited. Lyapunov's theory is used to prove stability. The simulation results demonstrate that this method ensures high tracking accuracy and system stability even with significant uncertainties and losses.

Keywords: L1 control method, state feedback control, uncertainties, Lyapunov theory

Введение. Стабильность полета квадрокоптера — ключевая проблема управления. Существующие методы делятся на классические (PID, размещение полюсов, анализ Найквиста) и современные (например, Backstepping [1, 2],

скользящее управление [3–5], наблюдатели состояний [6–10]). Большинство из них устойчивы лишь при малых возмущениях или в линейных системах. Для нелинейных систем с большой неопределенностью эти методы теряют эффективность. В статье представлен L1 адаптивный метод управления с обратной связью, включающий наблюдатель, адаптивный закон и конфигурацию управления. Устойчивость доказана с помощью теории Ляпунова, проведены модельные эксперименты.

Материалы и методы. Математическая модель, описывающая динамическое движение квадрокоптера, имеет следующий вид [11]:

$$\begin{bmatrix} \dot{p} \\ \dot{q} \\ \dot{r} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(J_y - J_z)qr}{J_x} \\ \frac{(J_z - J_x)pr}{J_y} \\ \frac{(J_x - J_y)pq}{J_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U_1}{J_x} \\ \frac{U_2}{J_y} \\ \frac{U_3}{J_z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\omega}\mathbf{U}(t) + \mathbf{f}_1(t, \mathbf{X}(t))), \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{f}_1(t, \mathbf{X}(t))$ считается неопределенной нелинейной частью в системе.

Учитывая неопределенную нелинейную часть, воздействующую на систему, управляющий сигнал включает в себя два основных сегмента: 1) управление без учета неопределенности $\mathbf{U}_f(t)$, которое рассчитывается на основе теории управления с обратной связью по состояниям; 2) управление для компенсации неопределенности $\mathbf{U}_{ad}(t)$, которое обладает L1 адаптивностью (так называемое L1 управление).

Для проектирования управления с обратной связью по состояниям можем создать переходную матрицу усиления $\mathbf{K} \in \mathbb{R}^{m \times n}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(t) &= \mathbf{U}_f(t) + \mathbf{U}_{ad}(t), \quad \mathbf{U}_f(t) = -\mathbf{K}\mathbf{X}(t), \\ \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B} \left[\boldsymbol{\omega}(\mathbf{U}_f(t) + \mathbf{U}_{ad}(t)) + \boldsymbol{\Theta}(t)\|\mathbf{X}(t)\|_{\infty} + \boldsymbol{\sigma}(t) \right] \\ &= \mathbf{A}_m\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}(\boldsymbol{\omega}\mathbf{U}_{ad}(t) + \boldsymbol{\Theta}(t)\|\mathbf{X}(t)\|_{\infty} + \boldsymbol{\sigma}(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

Также введем оператор проекции $\text{Proj}(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{b})$. Когда функция оценки превышает ограничение, то оператор проекции тащит направление обновления оценки, чтобы оценка находилась в приемлемом диапазоне и система не расходилась. Обычно оператор проекции имеет следующий вид [12]:

$$\text{Proj}(\hat{\mathbf{a}}, \mathbf{b}) = \begin{cases} \mathbf{b} - \frac{\nabla g(\hat{\mathbf{a}}) \nabla g^T(\hat{\mathbf{a}})}{\|\nabla g(\hat{\mathbf{a}})\|^2} \mathbf{b}, & \text{if } g(\hat{\mathbf{a}}) \geq 0 \text{ and } \nabla g^T(\hat{\mathbf{a}})\mathbf{b} > 0. \\ \mathbf{b}, & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

На основе оператора проекции создаем адаптивный закон

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\Theta}}(t) &= \Gamma \text{Proj}\left(\hat{\Theta}(t), -\left(\mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}\right)^T \|\mathbf{X}_t\|_{\mathcal{L}_\infty}\right), \\
\dot{\hat{\sigma}}(t) &= \Gamma \text{Proj}\left(\hat{\sigma}(t), -\left(\mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}\right)^T\right), \\
\dot{\hat{\omega}}(t) &= \Gamma \text{Proj}\left(\hat{\omega}(t), -\left(\mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{B}\right)^T \mathbf{U}_{ad}^T(t)\right)
\end{aligned} \tag{5}$$

Для оценки состояний надо создать наблюдатель состояний [13]:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) &= \mathbf{A}_m \hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B} \left(\hat{\omega}(t) \mathbf{U}_{ad}(t) + \hat{\Theta}(t) \|\mathbf{X}_t\|_{\mathcal{L}_\infty} + \hat{\sigma}(t) \right), \\
\dot{\hat{\mathbf{X}}}(0) &= \mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0, \\
\hat{\mathbf{y}}(t) &= \mathbf{C} \hat{\mathbf{X}}(t)
\end{aligned} \tag{6}$$

Проектирование L1 адаптивного управления. Обозначим управление:

$$\mathbf{C}(s) = \omega \mathbf{K} \mathbf{D}(s) (\mathbb{I}_m + \omega \mathbf{K} \mathbf{D}(s))^{-1}; \tag{7}$$

$$\mathbf{U}_{ad}(s) = -\mathbf{K} \mathbf{D}(s) \hat{\boldsymbol{\eta}}(s); \tag{8}$$

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}(t) = \hat{\omega}(t) \mathbf{U}_{ad}(t) + \hat{\boldsymbol{\eta}}_1(t) - \mathbf{r}_g(t),$$

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}_1(t) = \hat{\Theta}(t) \|\mathbf{X}_t\|_{\mathcal{L}_\infty} + \hat{\sigma}(t); \tag{9}$$

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}(t) = \tilde{\omega}(t) \mathbf{U}_{ad}(t) + \tilde{\boldsymbol{\eta}}_1(t), \quad \mathbf{r}_g(s) = \mathbf{K}_g \mathbf{r}(s).$$

Определяем следующую граничную функцию [13] и ошибки оценки:

$$G = 4 \left[\max_{\omega \in \Omega} \text{tr}(\omega^T \omega) + (\Theta_b^2 + \sigma_b^2) m \right] + 4 \frac{\lambda(\mathbf{P})_{\max}}{\lambda(\mathbf{Q})_{\min} (\Theta_b d_\Theta + \sigma_b d_\sigma) m}; \tag{10}$$

$$\tilde{\omega}(t) = \hat{\omega}(t) - \omega,$$

$$\tilde{\Theta}(t) = \hat{\Theta}(t) - \Theta(t),$$

$$\tilde{\sigma}(t) = \hat{\sigma}(t) - \sigma(t),$$

$$\mathbf{e}(t) = \hat{\mathbf{X}}(t) - \mathbf{X}(t)$$

На основе граничной функции (10) и адаптивного закона можем создать функцию Ляпунова:

$$\begin{aligned}
V(\mathbf{e}(t), \tilde{\omega}(t), \tilde{\Theta}(t), \tilde{\sigma}(t)) &= \\
&= \mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \mathbf{e}(t) + \Gamma^{-1} [\text{tr}(\tilde{\omega}^T(t) \tilde{\omega}(t)) + \tilde{\Theta}^T(t) \tilde{\Theta}(t) + \tilde{\sigma}^T(t) \tilde{\sigma}(t)].
\end{aligned} \tag{11}$$

Теперь рассмотрим, что для $t \in [0, \tau]$ всегда выполняется

$$V(t) \leq \Gamma^{-1} G. \tag{12}$$

Перед этим нужно создать следующие допущения на ограничении

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\theta}(t)\|_{\infty}, \|\hat{\boldsymbol{\theta}}(t)\|_{\infty} &\leq \Theta_b; \\ \|\boldsymbol{\sigma}(t)\|_{\infty}, \|\hat{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|_{\infty} &\leq \sigma_b;\end{aligned}\tag{13}$$

$$\begin{aligned}\|\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)\|_{\infty} &\leq d_{\boldsymbol{\theta}}, \quad \|\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|_{\infty} \leq d_{\boldsymbol{\sigma}}; \\ \left\| \frac{\partial f_1(t, \mathbf{X}(t))}{\partial \mathbf{X}} \right\|_{\infty} &\leq d_{f_X}, \quad \|\mathbf{f}_1(t, \mathbf{X}(t))\|_{\infty} \leq F.\end{aligned}\tag{14}$$

Рассчитываем производную функции Ляпунова, учитывая (5)–(9)

$$\begin{aligned}\dot{V} &= 2\mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \dot{\mathbf{e}}(t) + \Gamma^{-1} \left[2\text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\omega}}^T(t) \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}(t)) + 2\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T(t) \dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}(t) + 2\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^T(t) \dot{\hat{\boldsymbol{\sigma}}}(t) \right] \\ &= 2\mathbf{e}^T(t) \mathbf{P} \left[\mathbf{A}_m \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}(\hat{\boldsymbol{\omega}}(t) \mathbf{U}_{ad}(t) + \tilde{\boldsymbol{\eta}}(t)) \right] \\ &\quad + \Gamma^{-1} \left\{ 2\text{tr}[\tilde{\boldsymbol{\omega}}^T(t)(\dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}(t) - \dot{\boldsymbol{\omega}})] + 2\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T(t)(\dot{\hat{\boldsymbol{\Theta}}}(t) - \dot{\boldsymbol{\Theta}}(t)) + 2\tilde{\boldsymbol{\sigma}}^T(t)(\dot{\hat{\boldsymbol{\sigma}}}(t) - \dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)) \right\} \\ &= -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) - 2\Gamma^{-1} \left[\text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\omega}}^T(t) \dot{\boldsymbol{\omega}}(t)) + \tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T(t) \dot{\boldsymbol{\Theta}}(t) + \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^T(t) \dot{\boldsymbol{\sigma}}(t) \right] \\ &\leq -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + 2\Gamma^{-1} |\tilde{\boldsymbol{\Theta}}^T(t) \dot{\boldsymbol{\Theta}}(t) + \tilde{\boldsymbol{\sigma}}^T(t) \dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)| \\ &\leq -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + 2\Gamma^{-1} (\|\hat{\boldsymbol{\Theta}}(t)\| \cdot \|\dot{\boldsymbol{\Theta}}(t)\| + \|\boldsymbol{\Theta}(t)\| \cdot \|\dot{\boldsymbol{\Theta}}(t)\| + \|\hat{\boldsymbol{\sigma}}(t)\| \cdot \|\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)\| + \|\boldsymbol{\sigma}(t)\| \cdot \|\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|) \\ &\quad + 2\Gamma^{-1} (\sqrt{m} \|\hat{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|_{\infty} \cdot \sqrt{m} \|\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|_{\infty} + \sqrt{m} \|\boldsymbol{\sigma}(t)\|_{\infty} \cdot \sqrt{m} \|\dot{\boldsymbol{\sigma}}(t)\|_{\infty}) \\ &\leq -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{e}(t) + 4\Gamma^{-1} (m\Theta_b d_{\boldsymbol{\Theta}} + m\sigma_b d_{\boldsymbol{\sigma}})\end{aligned}$$

Если бы существовало $\tau' \in [0, \tau_1]$ чтобы при $t = \tau'$ выполнялось $V(\tau') > \Gamma^{-1} G$, то сразу

$$\begin{aligned}V(\tau') &\leq \mathbf{e}^T(\tau') \mathbf{P} \mathbf{e}(\tau') + \Gamma^{-1} \left[\text{tr}(\tilde{\boldsymbol{\omega}}^T(\tau') \dot{\hat{\boldsymbol{\omega}}}(\tau')) + 4m\Theta_b^2 + 4m\sigma_b^2 \right] \\ &= \mathbf{e}^T(\tau') \mathbf{P} \mathbf{e}(\tau') + 4\Gamma^{-1} \left[\max_{\boldsymbol{\omega} \in \Omega} \text{tr}(\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}) + m\Theta_b^2 + m\sigma_b^2 \right] \\ &\Downarrow \\ \Gamma^{-1} G &< V(\tau') \leq \mathbf{e}^T(\tau') \mathbf{P} \mathbf{e}(\tau') + 4\Gamma^{-1} \left[\max_{\boldsymbol{\omega} \in \Omega} \text{tr}(\boldsymbol{\omega}^T \boldsymbol{\omega}) + m\Theta_b^2 + m\sigma_b^2 \right]\end{aligned}$$

которое приведет к

$$\begin{aligned}\mathbf{e}^T(\tau') \mathbf{P} \mathbf{e}(\tau') &> 4\Gamma^{-1} \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{P})}{\lambda_{\min}(\mathbf{Q})} (\Theta_b d_{\boldsymbol{\Theta}} + \sigma_b d_{\boldsymbol{\sigma}}) m \\ &\Downarrow \\ \dot{V}(\tau') &\leq -\mathbf{e}^T(\tau') \mathbf{Q} \mathbf{e}(\tau') + 4\Gamma^{-1} (m\Theta_b d_{\boldsymbol{\Theta}} + m\sigma_b d_{\boldsymbol{\sigma}}) \\ &\leq -4\Gamma^{-1} m (\Theta_b d_{\boldsymbol{\Theta}} + \sigma_b d_{\boldsymbol{\sigma}}) + 4\Gamma^{-1} (m\Theta_b d_{\boldsymbol{\Theta}} + m\sigma_b d_{\boldsymbol{\sigma}}) = 0\end{aligned}\tag{15}$$

Неравенство **Ошибка! Источник ссылки не найден.** показывает, что даже если при некоем $t = \tau' \in (0, \tau)$ выполняется $V(\tau') > \Gamma^{-1}G$, то в этом случае по **Ошибка! Источник ссылки не найден.** $\dot{V}(\tau') \leq 0$, таким образом функция Ляпунова уменьшается до того значения, которое снова удовлетворяет $V(t) \leq \Gamma^{-1}G$. С точки зрения расхода энергии функция Ляпунова ограничена в этом смысле, и соответственно, система устойчива.

Результаты. В системе принимаем следующие параметры квадрокоптера:

$$J_x = J_y = 0.0585 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \quad J_z = 0.105 \text{ kg} \cdot \text{m}^2; \quad \omega = \begin{bmatrix} 0.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0.75 & 0 \\ 0 & 0 & 0.75 \end{bmatrix};$$

$$d(t) = \left(0.5 \sin \pi t + 0.3 \sin \frac{7}{5} \pi t \right) \mathbb{I}_6; \quad \Gamma = 3 \times 10^7; \quad Q = \mathbb{I}_n.$$

Создаем желаемые полюсы $p = [-50 \quad -15 \quad -40 \quad -10 \quad -40 \quad -20]$, соответственно

$$K = \begin{bmatrix} 31.2 & 3.9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 62.4 & 4.68 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 105 & 9.1 \end{bmatrix}; \quad K_g = -(CA_m^{-1}B)^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} 2.925 & 0 & 0 \\ 0 & 2.34 & 0 \\ 0 & 0 & 4.2 \end{bmatrix};$$

$$P = \begin{bmatrix} 1.85 & 0.01 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.01 & 0.034 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.175 & 0.0125 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0125 & 0.0513 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.275 & 0.0125 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0125 & 0.0256 \end{bmatrix}.$$

Даем желаемые движения вдоль кривой, форма которой является функцией нормального распределения. Состояния крена, тангажа и рыскания показаны на рис. 1. Следовательно, на рис. 2 показаны адаптивные параметры для трех каналов. На рис. 2 показано сравнение методов PID, NDI с L1 управлением креном.

Обсуждение полученных результатов. Очевидно, что на рис. 1 реальные сигналы углов следят за желаемыми траекториями с высокой точностью, несмотря на высокую амплитуду внешнего возмущения. Наблюдатель состояний дает удовлетворительные результаты, совпадающие с желаемыми; под воздействием возмущения реальный сигнал в незначительной степени отклоняется от желаемого, но практически ошибка оценки приемлема. Причем, желаемый угол не больше 0,12 рад, а неопределенный сигнал 0,8 рад — доказывается, что адаптивный алгоритм может устранять влияние неопределенности даже при ее большой амплитуде.

Рис. 3 показывает, что частое изменение параметров указывает адаптивность спроектированного алгоритма управления — параметры «адаптируют-

ся» к системным коэффициентам, так что компенсируют неопределенную часть в системе.

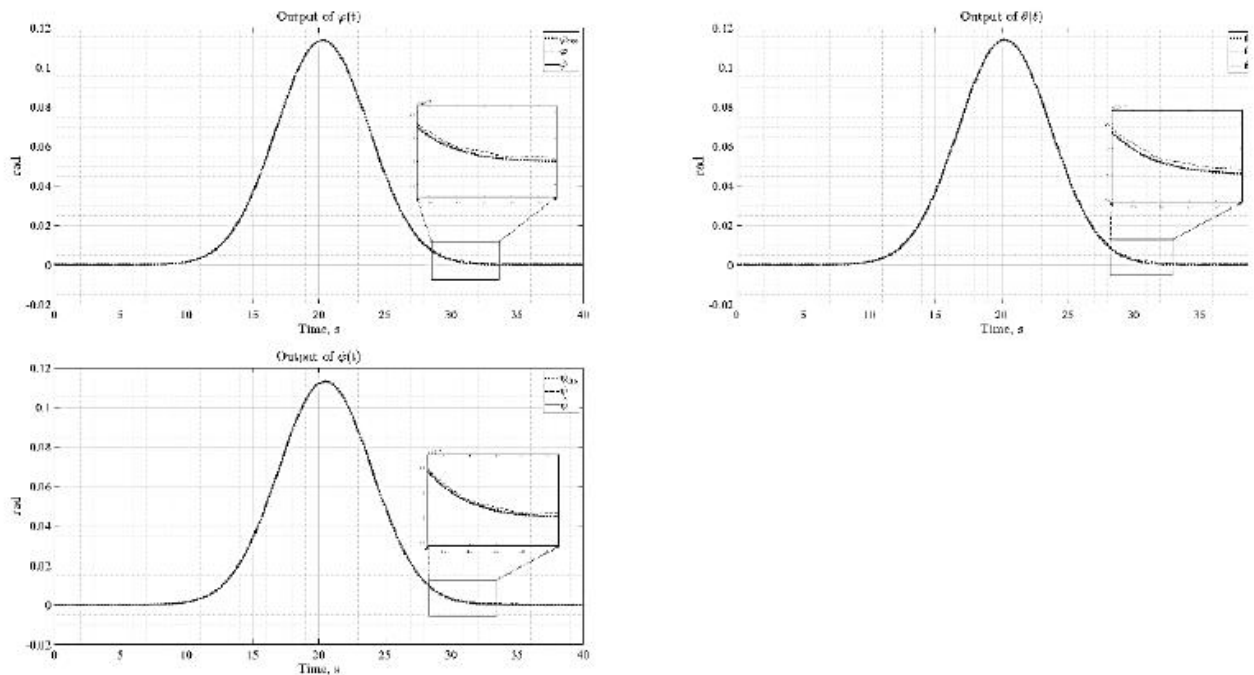


Рис. 1. Движение крена, тангажа и рыскания

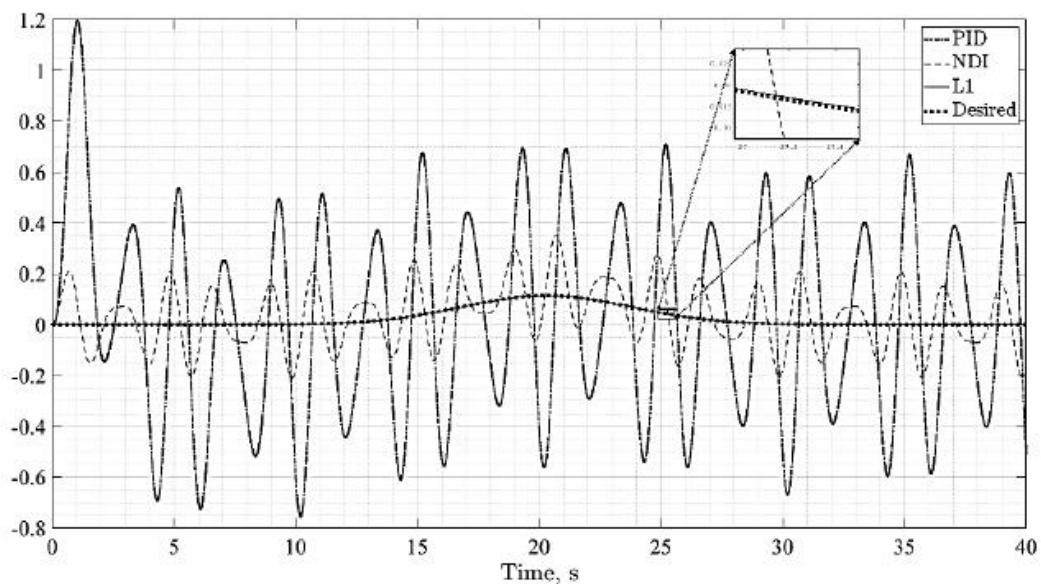


Рис. 2. Сравнение методов управления PID, NDI и L1

На рис. 2 из-за большого влияния неопределенности первые два метода потеряют точностью, хотя бы хранят устойчивость. С точки зрения приемлемости L1 управление обладает более высокой работоспособностью и робастностью компенсировать чрезвычайную неопределенность, которую невозможно разработать PID, NDI и другими классическими и современными методами.

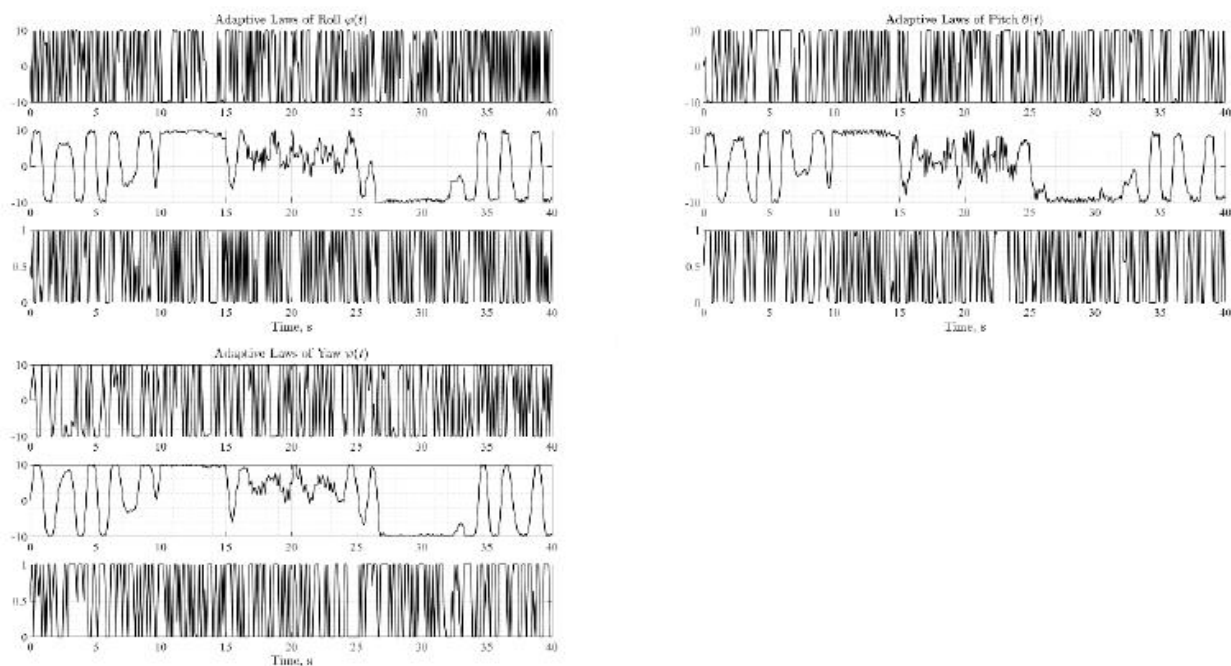


Рис. 3. Адаптивные параметры для углов

Закключение. Проектированный L1 адаптивный алгоритм управления с обратной связью по состоянию может гарантировать устойчивость динамики системы, несмотря на амплитуду неопределенности или нелинейной части. Наблюдатель состояний оценивает состояния системы с высокой точностью. Для компенсации неопределенности адаптивные параметры изменяются остро, не превышая граничное значение, а на основе которого управляющий сигнал колеблет. Теория Ляпунова гарантируют устойчивость спроектированного алгоритма.

Список источников

- [1] Dong L., Ding T., Huo Y. Fault-Tolerant Control of Aircraft Based on Adaptive Backstepping. *Journal of Shenyang University (Natural Science)*, 2023, no. 4, pp. 319–325. <https://doi.org/10.16103/j.cnki.21-1583/n.2023.04.001>
- [2] Wu K., Yang Y., Yao X. Fault Tolerant Control of Adaptive Six-Rotor VAV Based on Backstepping. *Control Engineering of China*, 2024, no. 1, pp. 35–42. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-0640.2024.01.004>
- [3] Ahn C.-I., Kim Y., Kim H. Adaptive Sliding Mode Controller Design for Fault Tolerant Flight Control System. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, 2006. <https://doi.org/10.2514/6.2006-6089>
- [4] Wang Jiasheng. *Fault Tolerant Control of Quadrotor UAV Based on Sliding Mode Theory*. Diss. Master of Engineering Sciences. Xi'an, 2024, 84 p. <https://doi.org/10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000914>
- [5] Zhen R., Liang D., Wu X. Fault-Tolerant Control of Quadrotor UAV Based on Prescribed Performance Sliding Mode. *Computer Simulation*, 2023, no. 12, pp. 99–107.
- [6] Wang H. *Research on fault-tolerant tracking and control of multi-quadrotor UAV based on observer*. Diss. Master of Engineering Sciences. Nanjing, 2024, 73 p. <https://doi.org/10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.000742>

- [7] Liu L. *Research on Fault-tolerant Control for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle Based on Extended State Observer*. Diss. Master of Engineering Sciences. Tianjin, 2024, 81 p. <https://doi.org/10.27360/d.cnki.gtlgy.2023.000033>
- [8] Qin L., He X., Yan R. Active Fault-Tolerant Control for a Quadrotor with Sensor Faults. *J Intell Robot Syst*, 2017, no. 2–4, pp. 449–467. <https://doi.org/10.1007/s10846-017-0474-0>
- [9] Zhang X., Zhang Y. Fault Tolerant Control for Quad-rotor UAV by Employing Lyapunov-based Adaptive Control Approach. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-8052>.
- [10] Zhu F. State estimation and unknown input reconstruction via both reduced-order and high-order sliding mode observers. *Journal of Process Control*, 2012, no. 1, pp. 296–302. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.07.007>
- [11] Ren Z., Liu Y., Jiang Z. Adaptive Fault-Tolerant Control of Quadrotor UAV Based on Fuzzy Gain Sliding Mode. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2024, no. 2, pp. 209–216. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2024.02.008>
- [12] Hu Q., Fei Q., Wu Q. An Improved L1 Adaptive Control for Attitude Regulation. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2015, no. 12, pp. 1267–1273. <https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2015.12.011>
- [13] Hovakimyan N., Cao C. *L1 Adaptive Control Theory: Guaranteed Robustness with Fast Adaptation*. Philadelphia, SIAM, 2010, 333 p.