

### Трафік системи із несанкціонованим зовнішнім впливом

*Для безпілотних систем характерна радіоелектронна протидія їх функціонуванню. У разі, коли використовується одразу декілька дронів-безпілотників, що утворюють рій, і несанкціонованому впливу піддається їх частина, виявлення впливу таким чином атаки можна виявити порівнянням траєкторій більшості безпілотників із їх частиною, підверненою атаці. За нашим припущенням траєкторії не атакованих безпілотників мають сильно корельовані траєкторії відповідно до ідентичності цілей і поставлених завдань. Таким чином некорельованість частини трафіка є ознакою атаки, виявлення якої є нашою задачею.*

Сьогодні безпілотні технології знаходять все більше застосувань. Однак зростає загроза з боку кіберзлочинців, які атакують і знищують безпілотні літальні апарати. Поставлена задача вимагає ефективного захисту безпілотників від атак. Для досягнення цієї мети можна використовувати декілька шляхів.

Найочевидніший – застосувати кореляційний аналіз до траєкторій безпілотників. Цей метод порівнює траєкторії безпілотників, які були атаковані, і тих, що уникли атаки. Оскільки траєкторії атакованих безпілотників будуть суттєво відмінні від тих, що уникли атаки, кореляційний аналіз може ефективно виявляти та запобігати подібним атакам у майбутньому.

Інший шлях полягає у формуванні управління, що забезпечує цілевизначення їх совокупності. У цьому випадку розбіжність між фактичною траєкторією і заданим управлінням може бути використана як критерій атаки. У цьому випадку для виявлення невідповідностей між траєкторією і управлінням також може бути використаний кореляційний аналіз.

Крім того, можливий комбінований підхід, який поєднує обидві способи одночасно. Наприклад, кореляційний аналіз може бути використаний для виявлення невідповідностей між траєкторією і управлінням, а управління може бути налаштоване таким чином, щоб запобігти таким атакам.

Актуальність теми підтверджується великою кількістю публікацій, наприклад [1-2].

Для досягнення бажаної траєкторії безпілотник використовує методи траєкторного управління для визначення оптимальної траєкторії руху літального апарату. У ряді випадків цей процес можна вирішити без розділення компонентів траєкторії та стабілізації, що значно спростує обчислювальний процес. Зосередимось на траєкторному управлінні безпілотниками в боковій площині. Рівняння бокового руху мають вигляд:

$$\dot{\Psi} = \frac{g}{V} \operatorname{tg} \gamma, \quad \dot{z} = V \sin \Psi,$$

де  $\Psi$  – кут заданого шляху,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $V$  – земна швидкість,  $\gamma$  – кут крену,  $z$  – бокове відхилення.

Цю систему можна доповнити диференціальними рівняннями для пройденого шляху:  $\dot{x} = V \cos \Psi$ , його будемо застосовувати у разі жорстко заданої траєкторії, що обмежує пройдений шлях. В більшості практичних випадків немає необхідності використовувати диференціальні рівняння для пройденої відстані, оскільки траєкторія не є строго визначеною і може змінюватися під час руху. У цьому випадку керування рухом може бути досягнуто за рахунок зміни кута крену. При лінеаризації системи, можна обрати закон управління в вигляді:

$$\gamma_{\text{зад}} = k_z z + k_z \dot{z}.$$

При цьому коефіцієнти зворотного зв'язку можуть бути визначені з умови асимптотичної експоненційної стійкості замкненої системи. Окремою задачею є відстеження заданого крену за допомогою елеронів. Цей підхід дозволяє додатково забезпечити стійкість системи та відстежувати задані траєкторії.

В теорії автоматичного управління, методи синтезу лінійних систем, що базуються на визначенні коренів характеристичного рівняння, методи аналітичного конструювання регуляторів з використанням методу динамічного програмування, принципу максимуму Понтрягіна та інших варіаційних методів є найпоширенішими. В нашому випадку системи другого порядку будь який метод швидко приводить до результату.

Ми не розглядаємо рух в вертикальній площині, на який можна покласти функцію додаткового маскуючого маневрування.

Розглянемо використання комбінації різних методів синтезу регуляторів. Оскільки кожен метод може мати свої обмеження та недоліки, одним із підходів може бути комбінування різних методів для отримання більш точного та ефективного результату. Проте, при використанні декількох методів синтезу регуляторів ми стикаємося з перевизначеністю задачі та неоднозначністю кінцевого результату. Також, необхідно враховувати, що кожен новий метод може привести до збільшення обчислювальних витрат та складності алгоритму управління. Тому, для забезпечення певної якості перехідних процесів та досягнення бажаного результату, можна використовувати певну умову якості як додаткову інформацію. Наприклад в задачах стабілізації оптимальні регулятори забезпечують стійкість, а умова якості є додатковою до умови стійкості.

Розглянемо побудову регулятора за принципом максимуму. Принцип максимуму є одним з основних методів побудови оптимального регулятора.

Для побудови регулятора за принципом максимуму, ми задаємо мінімізований функціонал, який в даному випадку має вигляд:

$$I = \int_0^\infty (\Psi \quad z \quad \gamma) G \begin{pmatrix} \Psi \\ z \\ \gamma \end{pmatrix} dt = \int_0^\infty \omega dt.$$

Далі, для побудови регулятора, необхідно знайти функцію Гамільтона  $H$ , яка має вигляд:

$$H = \omega + \Phi_1 \frac{g}{V} \text{tg} \gamma + \Phi_2 V \sin \Psi,$$

де  $\Phi_1, \Phi_2$  – спряжені координати.

Також необхідно визначити систему диференціальних рівнянь для спряжених координат, яка має вигляд:

$$\frac{d\Phi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \Psi} = -\frac{\partial \omega}{\partial \Psi} - \Phi_2 V \cos \Psi, \quad \frac{d\Phi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial \omega}{\partial z}.$$

Похідна функції Гамільтона має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial \gamma} H = \Phi_1 \frac{g}{v} \frac{1}{\cos^2 \gamma}.$$

Для знаходження управління  $\gamma$  ми використовуємо систему другого порядку, яка є низьким порядком для технічних систем, але потребує нетривіального алгоритму обчислень.

Ми використовуватимемо рішення, яке було отримано шляхом лінеаризації вихідної системи. Ми спробуємо підібрати початкові значення спряжених координат та підінтегральний вираз в мінімізованому функціоналі, щоб максимально наблизити рішення до отриманого за принципом максимуму.

Застосування одразу двох методів розв'язання задачі доцільне із наступних міркувань. В постановці із квадратичним функціоналом забезпечується асимптотична експоненціальна стійкість замкненої системи. В постановці із спряженими змінними за принципом максимуму забезпечується наприклад максимум швидкодії. Формалізувати вибір між цими двома постановками не маємо «опори в фізиці задачі». Тобто аналітика не дає підстав для однозначного вибору. Тому «багатоваріантність рішення» є основою для покращення цілеспрямованості його пошуку. Наприклад, частина траєкторії може бути визначеною за допомогою одного методу, а інша частина за допомогою іншого. Також можливе почергове включення різних методів.

Конкретне рішення передбачається одержувати шляхом багаторазового моделювання замкненої системи. Стандарт обчислювальної практики полягає в одержанні хоча б одного прийняттого розв'язку. Але низький порядок вихідної системи дозволяє посилити зусилля, діючи за декількома напрямками.

Для пошуку оптимального розв'язку ми застосуємо метод пошуку з випадковим визначенням напрямку. Цей підхід можна використовувати для обчислення управління в задачах зміни лінії заданого шляху, тощо.

### Список літератури

1. Політ Валькірій. США та Китай змагаються у створенні роїв безпілотників із колективним розумом. ФОКУС. URL: <https://focus.ua/uk/voennye-novosti/498988-polet-valkiriy-ssha-i-kitay-sorevnuyutsya-v-sozdanii-roev-bespilotnikov-s-kollektivnym-razumom> (дата звернення: 10.04.2023).
2. Коли дрони збиваються у рій. АрміяInform – Інформаційне агентство АрміяInform. URL: <https://armyinform.com.ua/2020/05/14/koly-drony-zbyvayutsya-u-rij/> (дата звернення: 10.04.2023).