

УПРАВЛЕНИЕ ЧРЕЗ МОДЕЛ НА БЕЗПИЛОТЕН САМОЛЕТ

CONTROL THROUGH MODEL OF UNMANNED AIRCRAFT УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМ САМОЛЕТОМ ЧЕРЕЗ МОДЕЛЪ

Доцент д-р инж. Йорданов Д.В., Професор д-р инж.Гецов П.С.
Институт за космически изследвания-БАН, София, България

Abstract: *The article shows a regime manual control RPV (Remotely Piloted Vehicle) through a model in Control Station (Ground pilot). The regime is in addition to autonomous flight and expand broaden the flight control. The closed-loop control system "Human operator-aircrafts model" is stability. The models pitch and roll are input in autopilot of RPV.*

KEYWORDS: CONTROL LOOP, SAFETY

1. Увод

При използването на безпилотни самолети за наблюдение и фотографиране съществуват особености в управлението на самолета в работната зона, която може да е отдалечена и представата за полета в пункта за управление се формира на базата на показанията на полетните параметри и изображението в района на полета. По тази информация операторът си изгражда т.н. "мислен модел" и планира своите действия за корекции на полета, който при отсъствие на пряка видимост се осъществява в автоматичен режим на управление. Съществуващите проблеми на ръчното пилотиране извън зоната на видимост се свеждат до **неустойчивост на контура**, обусловена от голямото закъснение на сигналите между самолета и пункта за управление. Това е установено в практиката [2], [3] и потвърдено при моделиране на безпилотния комплекс [1].

2. Начини за решаване на проблема

В [1] е разгледан способ за кратковременни корекции на траекторията чрез намеса на оператора в работата на автопилота (препрограмиране), който условно е наречен "управление чрез автопилот". Основният недостатък на този способ е, че не може да се използва за продължителни процеси на ръчно пилотиране защото се променя начина на управление по крен – операторът при създаване на крен трябва да държи манипулатора отклонен до тогава, докато завърши завой. В реалното визуално пилотиране, когато операторът по радиолинията изпраща командите директно върху елероните (чрез кормилни машини), отклонението на манипулатора е само за въвеждане и извеждане от крен, като в останалото време той заема неутрално положение. Този начин на управление е заложен във всички контури за ръчно управление на самолети. Задържането на лоста за управление повече от необходимото за влизане в завой с крен води до обръщане на самолета по гръб или въртене около надлъжната ос. За да се запази установеният от многогодишната практика способ за управление в ръчен режим, когато самолетът е извън зоната на видимост, в настоящата статия се предлага идея за управление условно наречена "**управление чрез модел**". Тя е проверена чрез компютърно моделиране в MATLAB-SIMULINK и потвърждава своята работоспособност, като има редица преимущества в безопасността на полета пред прякото управление на органите за управление от оператора. Моделът на пилота-оператор е елементарен, с предавателна функция $W(s) = K_{\text{пилот}} e^{-0.2s}$.

3. Решение на проучения проблем

Главното в идеята на управлението чрез модел е, че операторът в ръчен режим на управление работи с модел на системата "самолет-автопилот" (като на тренажор), а изходните от модела крен и тангаж се явяват входни параметри в законите на управление на автопилота на

реалния самолет. Реалният самолет повтаря движението на модела от пункта за управление. Автоматичен режим на полета е възможен в два варианта:

- Програмират се полети в модела на автопилота на Земята – в пункта за управление и получените от модела наклон и тангаж се предават по радиолинията на борда на безпилотния самолет като зададени за автопилота му параметри. За този вариант не е необходим бордови компютър за управлението, а само постоянна и надеждна радиолиния и работещ автопилот на борда на летящия обект. Операторът може да се намесва в управлението на модела без ограничения при работа на автопилота.
- При наличие на бордови компютър на реалния обект за управление полетите се програмират в него и автоматичният режим е автономен, като се запазва ролята на оператора за целесъобразни продължителни коригиращи действия осъществени чрез движение на манипулатора по установен от дългогодишната практика начин. Действията на оператора се осъществяват в затворен контур не с реалния самолет, а с модел на самолета. За този вариант радиолинията може да се използва за управление само по време на корекции от оператора, което в реални задачи е много малка част от общото време на полета. Като се има предвид, че радиолинията е критичния елемент на управлението на отдалечени обекти и е подложена на различни неблагоприятни въздействия и смущения, то очевидно е преимущество на този вариант за практическа реализация.

Изисква се автопилотът на борда на безпилотния самолет да работи от излитане до кацане. Автопилотът на модела (на Земята) може да се изключва и включва на определени етапи от полета, за да се реализират режимите на ръчно, комбинирано (оператор и автопилот) и автоматично управление. При отсъствие на управляващ сигнал от Земята автопилотът на безпилотния самолет продължава полета си в автоматичен режим с нулев наклон в хоризонтален полет (по първия вариант на автоматичния полет-без бордови компютър) или работи по програмата на полета в бордовия компютър автономно (по втори вариант на автоматичния полет).

Възможно е при наличие на бордови компютър идеята за програмиране на автоматичен полет в компютър на Земята да бъде резервен вариант в аварийни случаи при отказ на бордови компютър (например, програмирано извеждане на самолета в условия за аварийно парашутиране).

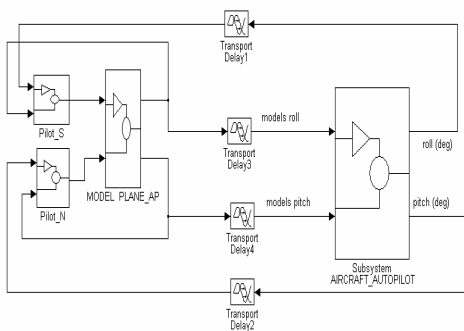
Основни предимства на схемата:

- Допуска се груба работа с лостове за управление по крен и тангаж от оператора. Командите към модела се коригират от предавателно число на моделирана система за управление, за да се запази устойчив контур на управление.

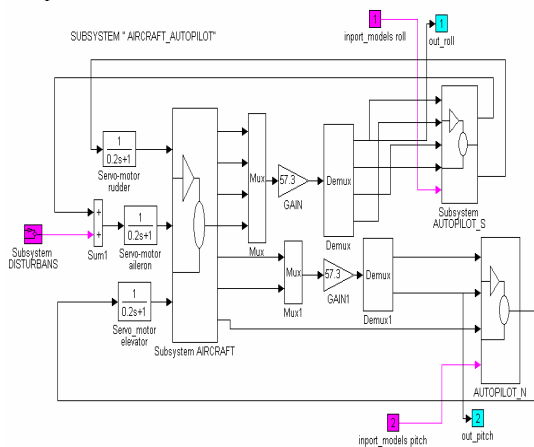
- Не се променя начинът на управление на апарата в ръчен режим на управление.
- Не е задължителна пълна адекватност между модела и реалния апарат по характеристики на устойчивост и управляемост. Моделът се настройва по средни и удобни за оператора характеристики на устойчивост и управляемост и аналогични масови и габаритни характеристики с реалния самолет.
- При пропадане на управляващия сигнал от модела реалният самолет продължава полет в автономен режим и се удължава разполагаемото време за успешна намеса на оператора в аварийна ситуация.
- За управление се ангажират възможно най-малко канали.

Недостатък : изисква се много голямо бързодействие на модела, но понеже моделът е на Земята в пункта за управление, то технически е изпълнимо да се използва бързодействащ компютър и модел подобен на тренажорните.

Идеята за управление чрез модел е показана в общия вид на компютърната реализация (фиг.1 и фиг.2). Всеки блок има няколко нива на подробност. Моделите са разработени за безпилотен самолет с маса 50kg. Целта на моделирането е да се провери работоспособността на метода за управление, да се потвърдят преимуществата на схемата и да се разкрият нейните специфични особености, свързани с практическата реализация.



Фиг.1. Общ вид на модела на безпилотен комплекс: Подсистемите “Pilot N”-за ръчно управление по тангаж, Pilot_S” за ръчно управление по наклон и моделът на подсистемата самолет-автопилот “MODEL PLANE_AP” са в пункта за управление на Земята, а подсистемата “AIRCRAFT-AUTOPILOT ” симулира движението на реалния обект.

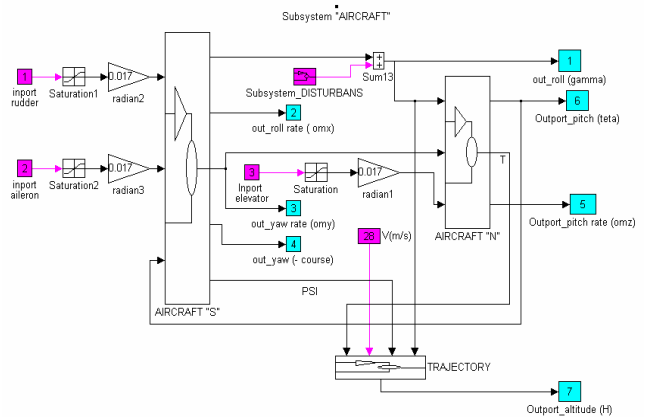


Фиг.2. Подсистема “AIRCRAFT-AUTOPILOT” – модел на реалния безпилотен обект

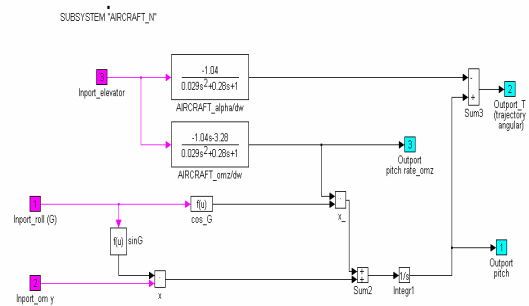
Реалният самолет и неговият модел в наземния пункт за управление са еднакви обекти и са моделирани по следните данни:

$$\begin{aligned}
 &C_y^\alpha=4.72, C_z^\beta=-0.31, C_z^{\delta_H}=-0.14, \\
 &m_z^{C_y}=-0.13, m_x^\beta=-0.058, m_y^\beta=-0.12, \\
 &m_z^{\omega_z}=-8.99, m_x^{\omega_x}=-0.66, m_y^{\omega_y}=-0.1, m_x^{\omega_y}=-0.11, \\
 &m_y^{\omega_x}=0.11, m_z^{\dot{\alpha}}=-4.3, \\
 &m_z^{\delta_a}=-1.09, m_x^{\delta_e}=-0.24, m_y^{\delta_H}=-0.07, m_x^{\delta_H}=-0.01, \\
 &S_{kp}=2.14m^2; l_{kp}=5.06m; b_{kp}=0.42m; I_x=21.4 \text{ kg}\cdot m^2; \\
 &I_y=29.3kg\cdot m^2; I_z=12.4kg\cdot m^2
 \end{aligned}$$

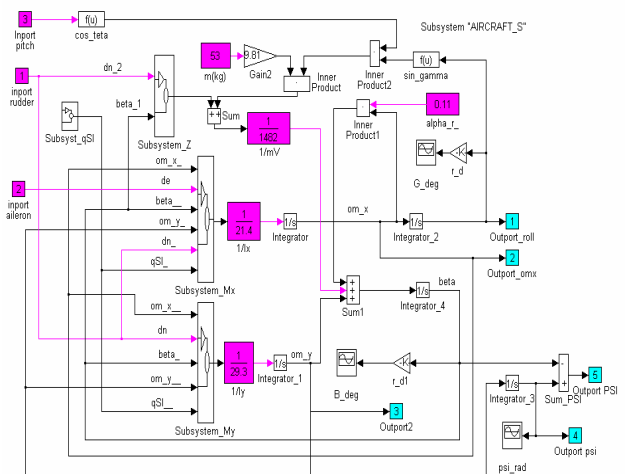
На фигури 2.1, 2.2, 2.3 са показани подсистемите на самолета



Фиг.2.1. Модел на подсистема AIRCRAFT



Фиг.2.2. Модел на самолета в надлъжното движение



Фиг.2.2. Модел на самолета в страничното движение

Автопилотите и на двата обекта за управление (в Subsystem “AIRCRAFT_AUTOPILOT” и в Subsystem “MODEL PLANE_AP”) по структура са еднакви, но се различават по формирането на зададените параметри. В Subsystem “AIRCRAFT”, който имитира реално летищия обект, автопилотът е включен постоянно, а в Subsystem “MODEL

PLANE_AP^{cc} се включва след фазата на ръчно управление по крен и тангаж от пилот-оператора .

Законите за управление на автопилотите в модела на Земята и на безпилотния апарат са следните:

Кормило за височина:

$$\delta_b^0 = 0.77\Delta\vartheta^0 + 0.44[\Delta\dot{\vartheta}^0 dt + 0.235 \omega_z^{0/s} .$$

$$\Delta\vartheta^0 = \vartheta^0 - \vartheta_{зад}^0;$$

Елерони:

$$\delta_e^0 = 0.75(\gamma^0 - \gamma_{зад}^0) + 0.0045\int(\gamma^0 - \gamma_{зад}^0)dt + 0.0045\omega_x^{0/s};$$

Кормило за направление:

$$\delta_n^0 = 0.02\omega_y^{0/s}$$

ϑ^0 - текущ ъгъл на тангажа в градуси;

$\omega_z^{0/s}$ - текуща ъглова скорост на тангажа в градуси за секунда;

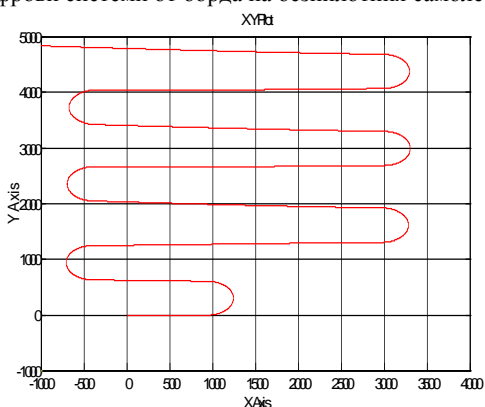
γ^0 - ъгъл на наклона (крен) в градуси;

$\omega_x^{0/s}$ - ъглова скорост на наклона в градуси за секунда.

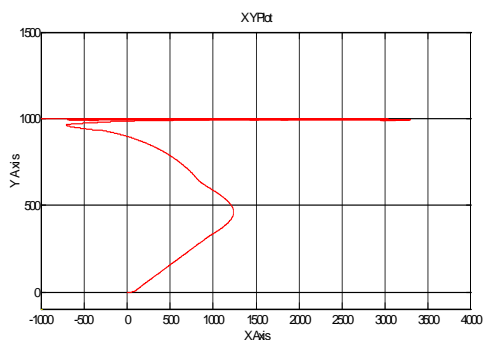
$\omega_y^{0/s}$ - ъглова скорост на рисканието в градуси за секунда

4. Резултати

На фигури 3 и 4 са показани хоризонтална и вертикална проекции на траекторията при полет по програма за патрулиране над полигон с размери 3500m x 4500m. Работната височина на полета е 1000m, като наборът на височина в началото до около 600m е изпълнен от оператора в ръчен режим по тип "възходяща лява спирала", а след това до 1000m от автопилота на модела. Показани са шест последователни работни трасета със завой в краищата, които покриват полигона и позволяват да бъде фотографирани с прецизни цифрови системи от борда на безпилотния самолет.



Фиг.3. Хоризонтална проекция на траекторията в плоскост XgZg на дясноориентирана координатна система O,Xg,Yg,Zg с център върху земната повърхност.



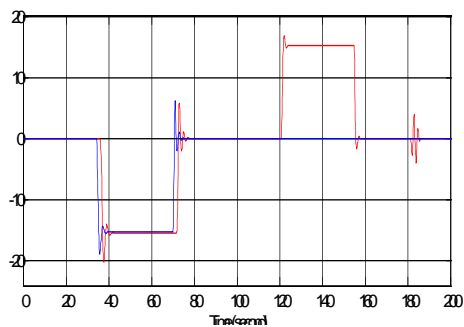
Фиг.4. Вертикална проекция на траекторията в плоскост XgYg на дясноориентирана координатна система O,Xg,Yg,Zg с център върху земната повърхност

По споменатите два варианта при моделиране на автوماتичен полет се получават практически еднакви резултати. Проверена е способността на бордовия автопилот да парира смущения по крен и рискание, моделирани с отклонение на кормилото за направление по синусоидален закон с честота 0.5Hz и амплитуда $\pm 15^0$.

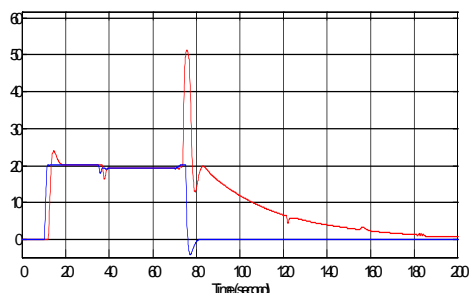
При моделирането е установено, че ако аеродинамичните характеристики на модела и на реалния самолет се различават в рамките на $\pm 50\%$, а геометричните и масовите съвпадат, то схемата работи удовлетворително, което потвърждава възможността да се създаде в бързодействащ компютър на пункта за управление сравнително универсален и удобен за оператора аеродинамичен модел, с възможности за настройка по геометрични и масови параметри на реалния самолет. Устойчивостта на контура за ръчно управление се гарантира от подбора на предавателното число на системата за управление между модела на оператора (Pilot N, Pilot_S), и модела на самолета (MODEL PLANE_AP) в пункта за управление.

Настройките на автопилотите на модела и реалния самолет също може да се различават. Те се подбират по условията за приемливи преходни процеси, без опасност от преминаване на границите на безопасния полет.

На фигури 5 и 6 са показани ъглите на крена и тангажа на модела, пилотиран от оператора в ръчен режим в пункта за управление на Земята до 70s...75s и същите параметри, повторени от модела на "летиращия" безпилотен самолет. След това време автопилотът на модела на Земята поддържа винаги нулеви параметри до края на полета, а управлението на безпилотния самолет се поема от програмата на бордовия компютър. Ако не се поддържат нулеви параметри по крен и тангаж от модела на системата самолет -автопилот на Земята (MODEL PLANE_AP), то при спирална неустойчивост на модела на Земята самолетът-модел задълбочава крена си и това се предава като зададен параметър на бордовия компютър. Следователно, моделът на Земята не трябва да се оставя без управление (от оператор или модел-автопилот). При прекъсване на програмата в бордовия компютър тези нулеви значения по крен и тангаж гарантират, че самолетът ще продължи аварийната си траектория в хоризонтален полет.

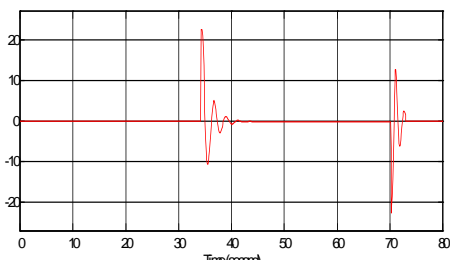


Фиг.5. Наклон на самолета в градуси в два последователни завоя - ляв и десен. Прекъснатата линия е за модела на Земята; цялата линия е за модела на безпилотната система "самолет-автопилот" с бордови компютър. Първият ляв завой е по команда на оператора в режим "управление чрез модел", а вторият (между t=120s и t=154s) - от програмата на бордовия компютър. Операторът в t=73s се изключва от режима на ръчно пилотиране и се включва автопилотът на модела за поддържане на нулеви значения на крена от модела. Между t=180s и t=183s е моделирано преднамерено смущение с разклащане на самолета чрез кормилото за направление. Автопилотът на безпилотния самолет не се изключва никога.



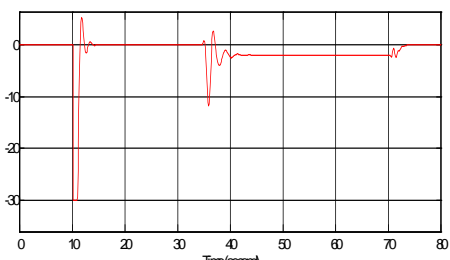
Фиг.6. Ъгъл на тангажа на самолета в градуси. Изпълнен е набор на височина до 1000 m по тип възходяща спирала в режим “управление чрез модел” от оператора между $t=10s$ и $t=75s$, а след това по програма в бордовия компютър за програмиран набор на височина от 600m до 1000m. Прекъснатата линия е за модела на Земята; цялата линия е за безпилотната система “самолет-автопилот” с бордови компютър. В $t=75s$ операторът се изключва от ръчен режим на управление по тангаж и се включва автопилотът на модела (на Земята) за поддържане на нулево значения на тангажа от модела. Автопилотът на безпилотния самолет не се изключва никога.

На фигури 7 и 8 са показани резултати от моделиране работата на оператора (движения на манипулатора).



Фиг.7. Странично отклонение на манипулатора (лоста) в градуси

При въвеждане на самолета от оператора в лява възходяща спирала (фиг.7- $t=34s$) първото движение на манипулатора е наляво и е с положителен знак - съответства на движение на десния елерон надолу. В $t=40s$ въвеждането е завършило и манипулаторът се връща в неутрално положение. При извеждане от наклон в $t=70s$ движенията са обратни. Коефициентът на усилване в модела на оператора е 50% от критичния.



Фиг.8. Надлъжно отклонение на манипулатора в градуси (по тангаж)

Показаното на фиг. 8 движение на манипулатора означава: въвеждане на самолета от оператора в изкачване с тангаж 20^0 след $t=10s$ и изпълнение на лява възходяща спирала между $t=34s$ и $t=70s$. Отклонението в посока “към себе си” е с отрицателен знак и съответства на движение на кормилото за височина нагоре. Коефициентът на усилване в модела на оператора е 50% от критичния.

Моделът на пилота (както и реалният оператор) движи манипулатора по колебателен закон в началото и в края на командите.

5. Заключение и изводи от моделирането

Приведените резултати и изследването на всички параметри при типови полети (по кръга, виражи и др.) потвърждават, че идеята за управление чрез модел е работоспособна и може да бъде реализирана на практика при бърз компютър на Земята. Автопилотите и на двата модела (на Земята и на реалния самолет) са астатични и подборът на предавателните им числа е съобразен с преходните процеси, при които не се надвишават ъгли на атака от $\alpha \approx 15^0$ и нормално претоварване $n_y = 2.5$. Автопилотите на модела и на безпилотния самолет управляват в режим стабилизация по двата канала – крен и тангаж, а в канала за рискание работят като демпфери. Ъглите на плъзгане при работа на автопилота са в рамките на $\beta \approx \pm 4^0 \dots 5^0$.

Има особености при включването и изключването на модела на автопилота в наземния пункт за управление. Те се състоят в следното.

При ръчно пилотиране в модела на Земята се изключват само интегралният и пропорционалният членове в закона за управление на модела на автопилота.

Ако не се изключват интегралните членове на автопилота, то при преминаване на автопилотен принцип на управление самолетът рязко променя положението си защото се реализира натрупана команда от интегратора през време на ръчния пилотаж. Ако не се изключи пропорционалният член, то при намеса на пилота автопилотът му се противопоставя и се намалява ефективността на ръчното управление.

Членовете съдържащи ъгловите скорости по крен, тангаж и рискание работят винаги при ръчно пилотиране (като режим демпфиране) и подобряват системата за управление, повишават критичния коефициент на пилота по двата канала.

Автопилотът на реалния самолет не се изключва никога и работи през цялото време на полета.

Идеята на моделираната технология за управление може да бъде използвана при антитерористични операции – за управление от Земята на отвлечен самолет.

Литература

1. Jordanov D., P.Gecov “Unmanned aircraft – modeling and control”, Third Scientific Conference with International Participaton SPACE, ECOLOGY, NANOTECHNOLOGY, SAFETY 27–29 June 2007, Varna, Bulgaria
2. Ростопчин В.В. -“Безпилотни авиационни системи” Интернет -AVIA.RU-Авторское,
3. Чистяков Н.В.- “Что такое ДПЛА (рассуждения)” Интернет -AVIA.RU-Авторское