

ИЗСЛЕДВАНИЯ ЗА РЕАЛИЗАЦИЯ НА АВТОНОМЕН ПОЛЕТ НА БЕЗПИЛОТЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ

Йордан ХАДЖИЕВ
ТУ-София, филиал Пловдив
България

Христиан ПАНАЙОТОВ
ТУ-София, филиал Пловдив
България
hristian@tu-plovdiv.bg

Димо ЗАФИРОВ
ТУ-София, филиал Пловдив
България
zafirov@tu-plovdiv.bg

Резюме: Целта на изследванията, представени в настоящия доклад, е да се извършат хардуерни симулации (Hardware-in-the-Loop) с автопилот ArduPilot, да се оценят неговите възможности за извършване на автономен полет, в т.ч. и кацане, и в следствие да се проведат полетни изпитвания за постигане на автономно кацане в реални условия. Параметрите на полета са анализирани и част от данните са представени в доклада. Полетните изпитвания за реализиране на автономно кацане дават положителен резултат.

Ключови думи: ArduPilot, Ардуино, автономен полет, хардуерна симулация, безпилотен летателен апарат, БЛА.

1. Въведение

В последните години се наблюдава огромен растеж в развитието и експлоатацията на безпилотните летателни апарати. Според прогнозите на авиационните специалисти се очаква след 2020 година техния брой да надхвърли 30 000 броя. Тяхната приложимост освен във военната авиация вече намира място и в много цивилни сфери, а търсенето тепърва ще нараства многократно. В много от страните например се извършва наблюдение на железопътната мрежа с безпилотни самолети. Потенциалът на България за разработка, производство и продажба на безпилотни летателни апарати е много голям.

Много от мисиите, които се очаква да се изпълняват от БЛА, изискват известна степен на автономност, което налага сериозно проучването на възможностите в тази област. В [1] са определени 10 степени на автономност на БЛА. Като най-ниска "0-Дистанционно управляеми" се определя степента, при която БЛА е постоянно управляван от оператор. При най-високата степен "10-Наподобяващи човек" БЛА е напълно автономен и изпълнява много

трудни мисии при сложни условия без намесата на човек. Докато платформите за БЛА се развива много бързо през последните години, технологиите осигуряващи висока степен на тяхната автономност са все още слабо развити, което създава пречки за по-широкото им използване [4].

С развитието на авиониката и миниатюризацията на използваните устройства ще се увеличава степента на автономност на UAV, което ще позволява надеждно изпълнение на все по-сложни мисии.

2. Мотивация

Настоящата работа е резултат от дейността по докторска работа с тема „Изследвания за реализация на автономен полет на безпилотен летателен апарат със съчленено крило“. Изследванията са реализирани с автопилот ArduPilot и телеметрична апаратура, интегрирани в безпилотен самолет Eflite Apprentice. Аеродинамичните характеристики на самолета са пресметнати и използвани за провеждането на хардуерни симулации (Hardware-in-the-Loop) с автопилота. Данните от тези симулации са

анализирани и е пристъпено към полетно изпитване и извършване на автономно кацане.

3. Интеграция на автопилот ArduPilot

Автопилотът ArduPilot (фиг. 1) е платформа с отворен код, базирана на микроконтролерната развойна платка за изграждане на прототипи Arduino.

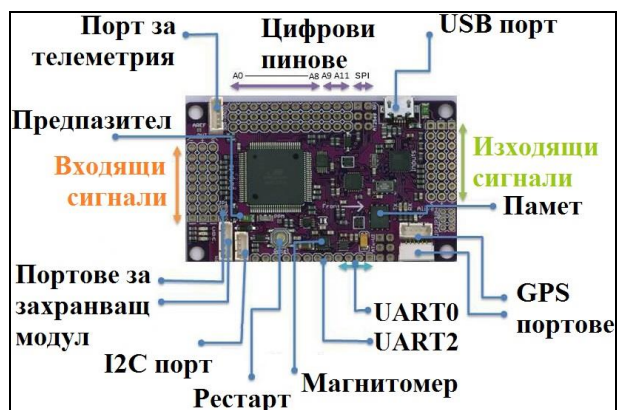


Фиг. 1 ArduPilot 2.5

Снабден е с инерционна измервателна система (IMU - Inertial Measurement Unit), включваща комбинация от акселерометър, жирокоп и магнетомер. Също така има бордови сензор за измерване на барометричното налягане, дигитален компас и връзка с GPS модул. Системата разполага с:

- 14 цифрови вход/изход (могат приемат сигнали от on/off сензори; или да подават напрежение от 5 волта)
- 8 аналогови входа (могат да приемат показания от аналогови сензори)
- 8 аналогови изхода (използват ШИМ за да маскират цифровите изходи като аналогови)

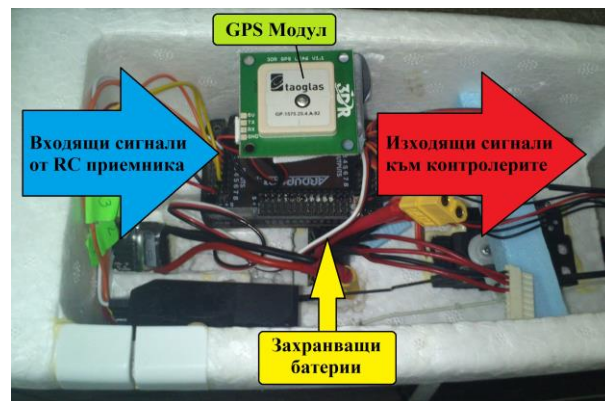
Архитектурата на платформата ArduPilot е показана на фиг.2:



Фиг. 2 Разположение на портовете

Автопилотът ArduPilot е интегриран в самолет „Eflite Apprentice“ (фиг.3), като е монтиран и датчик за въздушна скорост. Връзката с наземната станция се осъществява посредством “3DR Radio

telemetry” модем свързан с автопилота, а ръчното управление чрез конзола Futaba 9CAPS която изпраща сигнал на бордови RC приемник, също свързан с автопилота.



Фиг. 3 Интеграция на ArduPilot в самолета

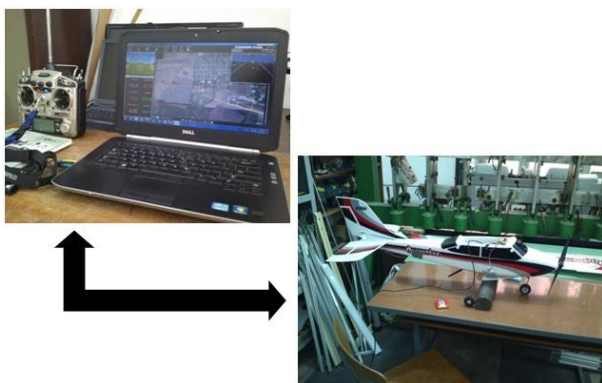
4. Хардуерни симулации с ArduPilot

Преди полетните експерименти са проведени редица хардуерни симулации, даващи ни представа за поведението на самолета в реален полет и най-вече позволявайки ни да тестваме автопилота на „безопасно” ниво. За да се симулира динамиката на полета в условия близки до реалните, аеродинамичните характеристики на самолета са пресметнати за различни ъгли на атака по метода на дискретните вихри с помощта на софтуера AVL.

Табл.1

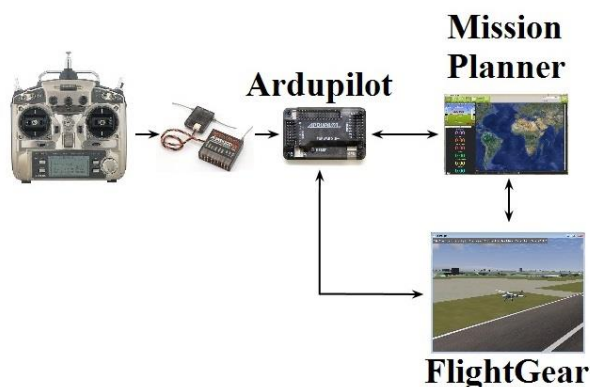
	$\alpha = -2^\circ$	$\alpha = 0^\circ$	$\alpha = 2^\circ$	$\alpha = 4^\circ$	$\alpha = 6^\circ$	$\alpha = 8^\circ$
CL	0.139	0.318	0.497	0.674	0.850	1.024
CD	0.017	0.020	0.026	0.035	0.047	0.062
CLa	5.145	5.132	5.104	5.061	5.003	4.932
Cma	-0.906	-0.901	-0.891	-0.877	-0.858	-0.835
CYb	-0.191	-0.191	-0.192	-0.192	-0.192	-0.191
Clb	0.002	-0.010	-0.023	-0.036	-0.048	-0.060
Cnb	0.078	0.078	0.078	0.080	0.083	0.086
CYp	0.008	0.043	0.078	0.113	0.147	0.181
Clp	-0.494	-0.492	-0.489	-0.486	-0.481	-0.474
Cnp	-0.009	-0.023	-0.038	-0.052	-0.067	-0.081
CLq	8.961	8.974	8.979	8.975	8.962	8.941
Cmq	-13.65	-13.64	-13.61	-13.57	-13.51	-13.43
CYr	0.174	0.174	0.172	0.167	0.160	0.151
Clr	0.046	0.083	0.121	0.158	0.194	0.230
Cnr	-0.078	-0.079	-0.081	-0.084	-0.086	-0.090
CLd_elev	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Cmd_elev	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015	-0.015	-0.014
Cyd_rudd	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
CLd_ail	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003

С част от получените резултати (табл.1) е създаден нелинеен модел на самолета [3] който се ползва директно от платформата FlightGear.



Фиг.4 Провеждане на хардуерни (HiL) симулации с ArduPilot и наземна станция

Посредством USB порт (фиг.4) автопилота се свързва с APM Mission planner, стартиран на наземния компютър. На същия компютър се зарежда и FlightGear чрез конфигурационен файл, осигуряващ връзката му с Mission Planner. На автопилота се инсталира специално създаден за симулации фърмуер [2]. По време на симулация FlightGear има обратна връзка с автопилота и така се осигуряват реални условия на полет съобразени с конкретните аеродинамични характеристики на самолета, чийто модел сме създали. Блокова схема на връзките в хардуерната симулация е показана на фиг.5.

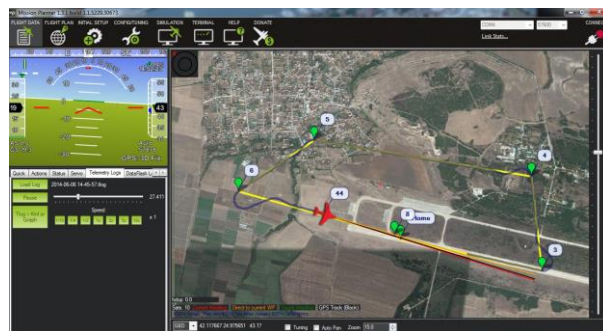


Фиг. 5 Схема на хардуерна симулация с ArduPilot

При симулациите е установено че при полетна височина $H=100\text{m}$ навигационната точка, от която БЛА трябва да започне снижението за кацане трябва да се намира на разстояние $L=1000\div 1400\text{m}$ от точката на опиране на колесника, за да постигнем ъгъл на глисадата $\theta \approx 4^\circ$ (1).

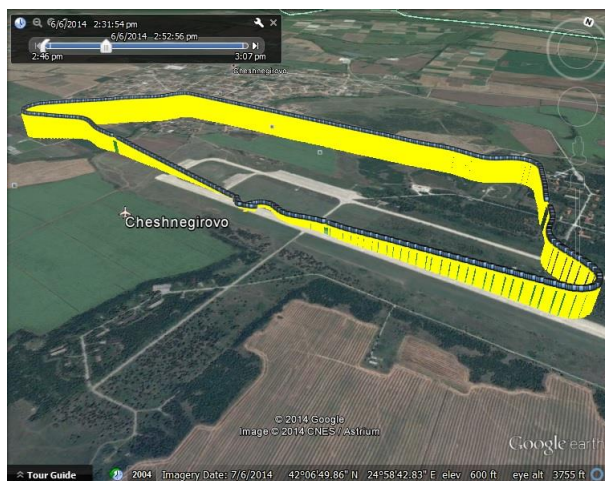
$$\tan \theta = H / L \quad (1)$$

При достигане на последната точка от зададената мисия, ArduPilot насочва самолета към зададената точка на кацане и поддържа посоката до достигане на 3 метра от точката, при което изключва силовата установка. Полетният план на симулацията е съобразен с тези особености (фиг.6).



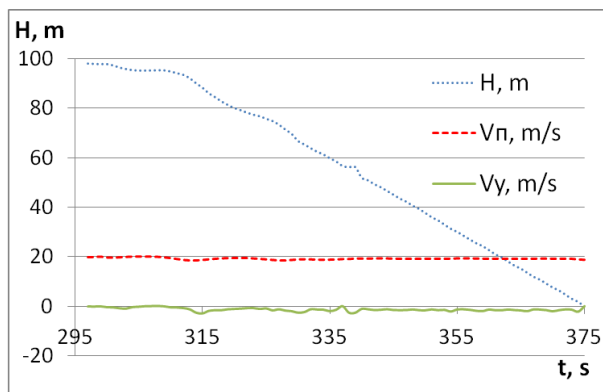
Фиг. 6 Хардуерно симулирана мисия на ArduPilot

При тези симулации успешно е извършено автономно кацане на автопилота без ръчно управление. Траекторията на полета е представена на фиг.7.



Фиг. 7 Симулация на автономно кацане над летище Чешнегирово

На фиг.8 са представени данни от полета за момента от началото на снижение на височината до опирането на колесника на пистата. Вижда се че автопилота изпълнява кацането стабилно и поддържа добра пътна скорост V_n . С оглед на тези резултати е преминато към по-нататъшен етап от изпитванията – реални полети с автопилота.



Фиг. 8 Изменение на височината, пътната скорост и вертикалната скорост

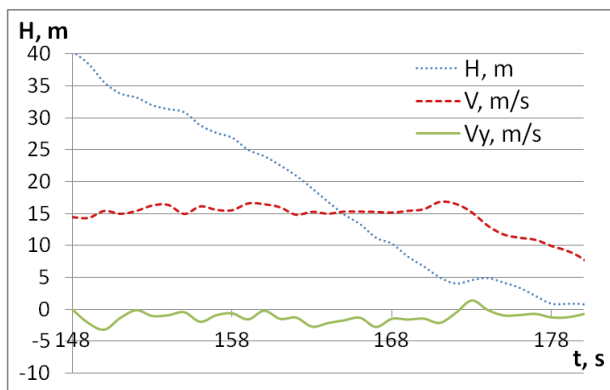
5. Полетни изпитвания

На летище Чешнегирово са проведени полетни експерименти с вече изпитания в симулации БЛА. Автопилотът е изведен в режим на автоматично изпълнение на зададена мисия, която завършва с успешно постигнато автономно кацане. Траекторията на извършения полет е показана на фиг.9.



Фиг.9 Траектория от полетни изпитвания с авиопилот ArduPilot

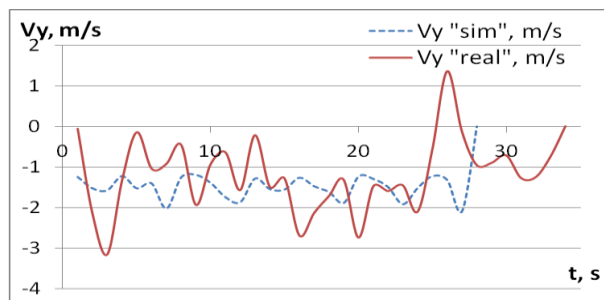
Данни от полета за момента на кацането са представени на фиг.10. Наблюдава се малко по-нестабилно снижение на самолета в сравнение с това при симулациите, както може да се види и на графиките на фиг.11 и фиг.12, сравняващи някои данни от полета с тези от симулацията. При анализа на данните установяваме че при симулацията средата е стандартна спокойна атмосфера, а данните от полета показват записан неустановен вятър със скорост около 3-4 m/s. Най-вероятно тази особеност е причината за разликата в данните и по-стабилното поведение на самолета при симулациите.



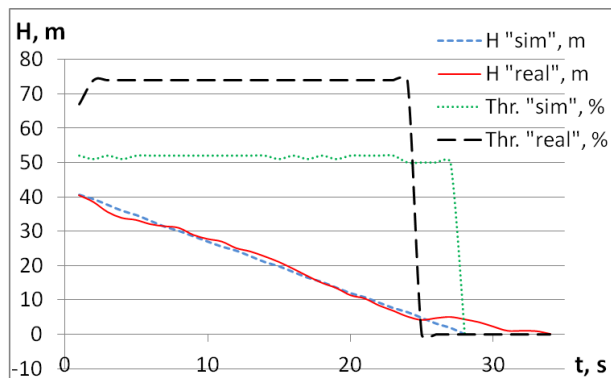
Фиг. 10 Изменение на височината, въздушната скорост и вертикалната скорост при кацане

Друга особеност която забелязваме е, че при симулираното кацане автопилота малко по-късно спира двигателя за разлика от реалното кацане при което това се случва на около 4m височина (фиг.12). Така при реалния полет имаме доста по

ниска скорост на кацане в момента на опиране на колесника на пистата. Причините за тази разлика ще бъдат изследвани в бъдещата работа.



Фиг.11 Сравнение на вертикалните скорости V_y при симулирано и реално кацане



Фиг.12 Сравнение на полетната височина и управляващ сигнал на двигателя (%) при симулирано и реално кацане

6. Заключение и бъдеща работа

Подготвена е симулационна лаборатория която ни позволява успешно да изпитваме и сравняваме различни полетни платформи, като по проекта се предвижда да се извършат симулационни и полетни изследвания на съпоставими безпилотни самолети с нормална аеродинамична схема и със съчленено крило и да се анализират техните предимства и недостатъци.

7. Благодарности

Авторите изказват благодарности за финансирането на проект № 142ПД0025-24 от НИС при ТУ-София, по който са извършени изследванията.

Литература

- [1] Hui-Min Huang, James Albus, Ph.D., Autonomy Levels For Unmanned Systems (ALFUS) Framework, 2007
- [2] <http://plane.ardupilot.com/>, 3DRobotics
- [3] Jeff Scott, Bipin Sehgal, UIUC Aero Model Users Guide for FlightGear Flightsim, University of Illinois
- [4] Dimo Zafirov, Autonomous VTOL Joined Wing UAV, Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference, 2013

Jordan HADZHIEV
TU-Sofia, branch Plovdiv
Bulgaria

Hristian PANAYOTOV
TU-Sofia, branch Plovdiv
Bulgaria
hristian@tu-plovdiv.bg

Dimo ZAFIROV
TU-Sofia, branch Plovdiv
Bulgaria
zafirov@tu-plovdiv.bg

Abstract:

The goal of the following research is successfully to be performed hardware-in-the-loop simulations with the autopilot ArduPilot and to evaluate its capabilities to achieve autonomous flight and autonomous landing, and after successful simulations to perform flight experiments for achieving autonomous landing in real flight conditions. The flight parameters are analyzed and some of the data is presented in this publication. The flight tests have been successfully accomplished.

Keywords: *ArduPilot, Arduino, autonomous flight, hardware-in-the-loop, unmanned aerial vehicle, UAV.*

RESEARCH TO REALIZATION OF AUTONOMOUS FLIGHT OF THE UAV