



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ

ИНСТИТУТ ПО РОБОТИКА

ОПТИМИЗИРАНЕ НА ТРАЕКТОРИЯ НА
БЕЗМОТОРНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ ЧРЕЗ
МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА ЗА ОЦЕНКА НА
АТМОСФЕРНАТА ДИНАМИКА

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД

*за придобиване на образователната и научна
степен*

“Доктор”

Научна област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.2. Електротехника,
електроника и автоматика

Научната специалност: Приложение на принципите и
методите на кибернетиката в различни области на науката

Инж. Александър Йосифов Шамлиев

Научен ръководител: Доц. Д-р Мая Димитрова

2020

Дисертантът е Инженер - индустриални машини и системи в Института по Роботика при Българската Академия на Науките - София. Работи в секция " Интерактивна роботика и системи за управление", гр.София.

Дисертационният труд се състои от увод и 5 глави с включено заключение, приноси и списък на използваната литература. Библиографската справка съдържа 104 заглавия, от които 8 на български език, 93 на английски (от които 5 адреса в интернет). Обемът на дисертацията е 132 страници. Изложението съдържа 69 фигури, чиито номера в автореферата съвпадат с тези в дисертацията. Номерацията на точките и подточките също съответства на тази от дисертационния труд.

Дисертационният труд е обсъден и насрочен за защита съгласно изискванията на ЗРАС в РБ и на Директора на ИР-БАН на заседание на Разширен секционен семинар на учените от секция ИРСУ , проведено на 03.12.2019 г. в гр. София.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на в зала на ИР-БАН, ул. „Акад. Георги Бончев“.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на ИР-БАН, на адрес: ул.“Акад.Георги Бончев“, блок 2, етаж 4.

Автор: инж. Александър Шамлиев

Заглавие: Определяне на оптимална траектория на безмоторни летателни апарати на базата на мултисензорна система за оценка на атмосферната динамика

СЪДЪРЖАНИЕ	
ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....	6
Актуалност на проблема	6
Апробация на резултатите от дисертационния труд.....	8
Научни публикации	9
КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	10
ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА	11
ГЛАВА I ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ЕНЕРГИЯТА В АТМОСФЕРАТА. АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА АВТОНОМНО УПРАВЛЕНИЕ НА БЕЗМОТОРНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ	12
1.1. Видове безмоторни летателни апарати	12
1.2. Динамика на полета	13
1.2.1. Механичен модел на летателния апарат	14
1.3. Определяне траекторията на полета на летателния апарат	17
1.3.1. Критерий за вертикална устойчивост на атмосферата	17
1.4. Анализ на методите за автономно управление на безмоторни летателни апарати.....	23
1.4.1. Рекурсивни методи.....	23
1.4.2. Метод чрез термо локация и термо камери	24
1.4.3. Метод чрез локализация на облаци	24
1.4.4. Облитане и сканиране	25
1.4.5. Алгоритми за динамично решене	25

1.4.6. Екстракция на енергията от турбуленцията в атмосферата.....	26
1.4.7. Изследване полета на птиците	26
1.4.8. Най-често използвани методи в практиката при пилотиране на безмоторни летателни апарати	26
1.4.9. Обобщение на глава 2	28
ГЛАВА III РАЗРАБОТВАНЕ НА МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА БАЗИРАНА НА МИКРОЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ СЕНЗОРИ.....	29
3. Микро електромеханични сензори	30
3.1. Летателният апарат като сензор.....	30
3.2. Мултисензорна система	32
3.3. Кратка техническа спецификация на разработената мултисензорна система.....	32
3.3.1. Обобщение на глава 3	33
ГЛАВА IV ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТРАЕКТОРИЯ НА БЕЗМОТОРЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ	34
4. Събиране на полетни данни	34
4.1. Осъществени полети	35
4.2. Класифициране на измерваните параметри.....	37
4.3. Локализация на активност и конвекция в атмосферата.....	38
4.4. Оптимизация на полета при изкачване в конвекционална термика	40
4.5. Оптимизация на полета в близост до конвекционална термика.	42
ГЛАВА V ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43

[104] Shamliiev, A., Mitrouchev, P., Dimitrova, M. Atmospheric Boundary Layer Dynamics Evaluation Using Piezo-Resistive Technology for Unpowered Areal Vehicles. *International Journal of Aviation Systems, Operations and Training* (IIASOT)

[105] Shamliiev, A. (2018) A Digital Pressure Sensor in Soaring Vehicles and Gliders. *Information Technologies and Control*, vol. 15, issue 4, ISSN: 1312-2622; Online ISSN: 2367-5357, DOI: 10.1515/itc-2017-0034, p. 20-37
https://www.researchgate.net/publication/328593189_A_Digital_Pressure_Sensor_in_Soaring_Vehicles_and_Gliders

[106] Shamliiev, A. (2017) A digital pressure sensor software optimization of vertical speed estimation for unpowered aerial vehicles and gliders. *Proceedings of International Conference Automatics and Informatics 2017*, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, 2017, ISSN:1313-1850, p. 61-64

[107] Penev, V., Rowlands, G., Shamliiev, A. (2016) A Discrete Kalman Filter Attitude Heading Reference System, Using a Low Cost Micro Electro-mechanical Inertial Measurement Unit. *Proceedings of the 6th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education* (ICAICTSEE – 2016), 2-3 декември 2016, UNWE, София ISSN 2367-7635; p.377 <http://icaictsee.unwe.bg/past-conferences/ICAICTSEE-2016.pdf>

- [86] https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BSTBMP280-DS001-18.pdf.
- [87] <http://www.ti.com/lit/ug/slau678a/slau678a.pdf>
- [88] <http://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=srchtrv&DocNm=MS561101BA03&DocType=Data+Sheet&DocLang=English>
- [89] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22008E.pdf>
- [94] Николета Маджарова, Борис Маджаров- Летателна експлоатация на въздухоплавателните средства, Катедра Въздушен транспорт, ТУ-СОФИЯ, 2001
- [97] Борис Маджаров, Динамика на полета, Катедра Въздушен транспорт, ТУ-СОФИЯ, 2005
- [98] Диан Гешев, Аеродинамика на летателните апарати, Катедра Въздушен транспорт, ТУ-СОФИЯ, 2006
- [99] Titterton, D., Weston, J. L., & Weston, J. (2004). Strapdown inertial navigation technology (Vol. 17). IET.
- [100] Диана Кюркчиева, Метеорология За дистанционно обучение издател: Университетско издателство "Еп. Константин Преславски" Шумен, ISBN 954-577-295-6
- [101] Ákos, Z., Nagy, M., Leven, S., & Vicsek, T. (2010). Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles. *Bioinspiration & biomimetics*, 5(4), 045003.
- [102] Scorer, R. S., and F. H. Ludlam. "Bubble theory of penetrative convection." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 79.339 (1953): 94-103.
- [103] Shamliev, A. (2018), Soaring flight trajectory optimization in convective thermals. *Complex Control Systems*, Volume 1, 2018, ISSN:1310-8255, 48-52 http://ir.bas.bg/ccs/2018/9_shamliev.pdf

5. Заключение	43
5.1. Бъдещи разработки.....	44
5.2. Справка за основните приноси в дисертационния труд.	45
5.3. Научно-приложни	45
5.4. Приложни.....	46
5.5. Участия в проекти	46
5.6. Благодарности.....	46
СЪКРАЩЕНИЯ.....	46
ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА	47

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Първите конкретни идеи за летателно средство се зараждат през Средновековието, когато Леонардо да Винчи през 15-ти век изготвя чертежи на планер [75]. Още оттогава датират и първите документиранни сведения за наблюдения на птици, реещи се без да си движат крилата. Необходими са били цели четири века, за да дойде моментът човек да осъществи полет с летателен апарат, потеглящ от въздуха — безмоторен планер. Това става през 1853 г. от англичанина Джордж Кайли и едновременно с него от германеца Ото Лилиентал. Те са първите хора, извършили многократно такива полети.

В България Васил Златаров и Харалампи Джамджиев през 1904 г. построяват двуплощни хвърчила („хараграфов“ тип) [93] няколко сравнително малки, но стабилни и сигурни в полет планери. С тях Златаров извършва показни полети по склоновете на Софийския военен лагер, с което той е първият българин, който лети с безмоторен самолет и поставя началото на безмоторното летене в България.

През първите години на 20 век полетите вече са утвърдени като транспорт, авиацията вече е индустрия. Но успоредно с това се произвеждат и безмоторни планери с подобрена аеродинамичност, разработени специално да се възползват от природните сили в атмосферата. Днес съществуват различни видове безмоторни самолети. Записани са безмоторни прелети с дължина над 15 000 км. С развитието на автономните безпилотни летателни апарати и високоефективните планери са създадени и комбинирани такива. Те използват техники на планиране и „извличане“ на енергия от атмосферата, което на практика удължава максималното полетно време и полетна дистанция или оптимизира използването на гориво или енергия, необходима за съответния полет.

Към днешна дата височинните рекорди на пилотируемите безмоторни летателни апарати достигат 22 км („Airbus Perlan II“ -

ЛА – Летателен апарат

ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [17] D.J. Edwards. Implementation details and flight test results of an autonomous soaring controller. In AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, Honolulu, Hawaii, August 2008.
- [26] G.J. Koch. Doppler lidar observations of an atmospheric thermal providing lift to soaring ospreys. Technical report, NASA Langley Research Center, 2005.
- [40] J.M. Wharington. Heuristic control of dynamic soaring. In 5 th Asian Control Conference, Melbourne, Australia, July 2004.
- [41] B. Woodward. The motion in and around isolated thermals. In 7 th, OSTIV Congress, Lezno, Poland, June 1958.
- [69] Cone C.D. (1964) The design of sailplanes for optimum thermal soaring performance, Technical Report TND 2052, NASA.
- [75] Laurenza D. (2007). Leonardo on Flight, Giunti Press, Milan, Italy.
- [80] Pagen D., (1992). Understanding The Sky, Published by Denis Paganan, 101, Mingoville, PA16856
- [84] T. Kiceniuk. (2001) Dynamic soaring and sailplane energetics. Technical Soaring, XXV edition
- [85] Ákos, Z., Nagy, M., Leven, S., & Vicsek, T. (2010). Thermal soaring flight of birds and unmanned aerial vehicles. *Bioinspiration & biomimetics*, 5(4), 045003.

5.4. Приложни

- › Реализиране на хардуерна система за анализ на динамичните характеристики на граничния слой на атмосферата.
- › Създаване на технически средства и методи за измерване на локални явления в атмосферата;

5.5. Участия в проекти

- › 3 месечно посещение в GSCOP Laboratory Grenoble, France (Erasmus+)
- › 1 месечно посещение в CEINE, Сантяго, Чили (CybSPEED)

5.6. Благодарности

Изразявам най-сърдечната си благодарност и признателност на моята научна консултантка Д-р Мая Димитрова за нейното ръководство и научни консултации, навременни съвети, критични забележки и конкретни препоръки, за подкрепата и по време на цялостната ми работата върху дисертационния труд. Също така благодаря на всички колеги от ИР-БАН за оказаната помощ, топлото отношение, интереса към работата ми и провокативните дискусии.

СЪКРАЩЕНИЯ

CO₂ – Въглероден диоксид
DUS – Финни прахови частици
GNSS - Global Navigation Satellite System
GPS – Global Positioning System
IMU – Inertial Measurement Unit
MCU – Microcontroller Unit
MEMS - Micro Electromechanical Measurement System
PID – Контролер за обратна връзка
БЛА – Безмоторен летателен апарат
ВС – Въздухоплавателно средство
ИВЧ – индивидуална въздушна частица
ИС – Интегрална схема

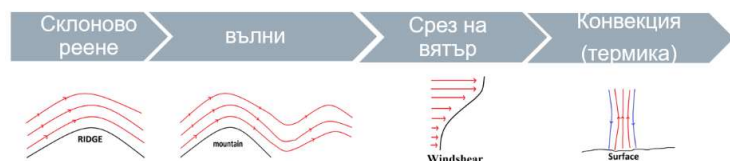
76,124 фита – 03 септември 2018 г.). Това постижение надминава официално докладвания най-висок хоризонтален полет на въздухоплавателно средство от Военно-въздушните сили на САЩ. Разузнавателният самолет U-2 Dragon Lady извършва полет на височина 73 737 фита на 17 април 1989 г. Машината U-2 се задвижва от двигател, който генерира 17 000 паунда тяга. За разлика от тях, Perlan 2 е без двигател, тежи едва 1500 паунда и се извисява на рекордни височини с помощта на редки стратосферни въздушни течения, образувани от планински ветрове, съчетани с полярния вихър.

Използването на енергия от атмосферата изисква техники, които се използват от пилотите на безмоторни летателни апарати и птиците. Твърдението, че идеята за полета при хората произлиза от птиците, както и че основните принципи на полета и до ден днешен се заимстват от птиците, несъмнено води и до необходимост от проучване на орнитологична литература и изследвания, свързани с птичия полет.

Идеята за автономен безмоторен полет с цел използване на динамичната енергия в атмосферата за първи път научно е представена едва преди 20 години от Джон Уарнингтън през 1998 г. В последствие са представени различни модели и методи, използващи различни алгоритми и високо-технологични методи.

Безмоторният принцип на полета ще намира все по-голямо приложение в безпилотните и дистанционно управляемите летателни апарати. Увеличаването на времето и дистанцията на полетните мисии е едно от най-големите предизвикателства в тази област. Очевидно е, че създаването на нови методи за извличане на енергия от атмосферата, несъмнено ще подпомогне развитието на безмоторния полет.

Основният принцип за използването на енергия от атмосферата се базира на намирането и извършването на полет в зони с възходящ въздушен поток. По този начин безмоторния летателен апарат набира височина, която му гарантира по-продължителен полет и като разстояние, и като време. На фигура 1.1 са показани различни видове възходящи движения на атмосферата.



Фигура 1.1 Възходящи движени в атмосферата

„Склоновият“ ефект и вълните са в резултат на срещата на движещите се въздушни маси с препятствие, докато конвекцията е резултат от термо-динамични процеси, породени от неравномерното нагряване на земната повърхност и атмосферата от Слънцето. Разбира се, в реалната атмосфера тези процеси не са изолирани един от друг и много често вертикалните движения на атмосферата са в резултат на комбинация от тях, като например конвергентните процеси.

Настоящият дисертационен труд представя нов метод за измерване в реално време състоянието на динамиката на атмосферата за целта на безмоторния полет. На база измерване параметрите на атмосферата се изработват алгоритми за оптимизиране на траекторията на безмоторния полет.

Апробация на резултатите от дисертационния труд

Повечето от резултатите в дисертационния труд са докладвани на редовните семинари и заседания на секция и на ежегодните семинари на ИП – БАН. Също така са представени пред колегите от университет CEINE, Сантяго, Чили, (в рамките на проекта CybSPEED), в GSCOP Laboratory Grenoble, France, в международната конференция “Robotics & Mehatronics and Social Implementations”, Варна 2018 и в конференция на САИ, “Automatics and Informatics” -2017г.

В глава 3 (3.1) е представен метод за използване на летателния апарат, като сензор. Разгледан е вариант, при който се установяват вертикални конвективни потоци в атмосферата, на базата на параметри на полета. Възможно е да се използва и определяне на различни скорости на вертикалния поток и по този начин да се установи център или граница на ядро на конвективна термика. Това може да стане, чрез измерване крена на летателния апарат при фиксирани кормила за управление.

Като странични „ефекти“, в процеса на разработка, са констатирани и някои интересни явления, които биха могли да се използват в анализ на замърсяване на въздуха и в системи за предупреждение за наднормено замърсяване. Това са резултати свързани с концентрация на летливи съединения, въглероден двуокис и фини прахови частици. От фигура 4.3 се вижда разпределението им във височина, при нестабилна атмосфера. Същите параметри са константи във височина до инверсияния слой на атмосферата при стабилна такава. Това означава, че нестабилността на атмосферата, играе ключова роля в разсейването на основните замърсители.

5.2. Справка за основните приноси в дисертационния труд.

5.3. Научно-приложни

- › Създаване на нов метод за оптимизиране на траекторията на безмоторния полет в граничния слой на атмосферата;
- › Разработени методи за подобрене измерванията от микро-електромеханични сензори при приложението им в безмоторни и дистанционно управляеми летателни апарати;
- › Създаване на технически средства и методи за измерване на локални явления в атмосферата;
- › Разработена методология за оптимизация на траекторията на полета на безмоторен летателен апарат.

в реална обстановка. На практика е показана възможност за измерване на микро явления, които за пръв път намират практическо приложение. Нещо повече – приложени са в методи за локализиране и оптимизиране на полет в конвективна термика. Резултатите опровергават част от твърденията, в някои от публикуваните изследвания до сега, относно размерите на конвективните термики, както и радиусите на завой в полет при такива явления. Тази дисертация, също доказва, че чрез използването на евтини и широко разпространени електро механични сензори, е възможно да се получат изключително добри резултати. При това, предимствата не спират до тук. За разлика от скъпите, относителни тежки и с висока консумация на електрическа енергия апаратури, като лидари, инфрачервени камери и камери, предложения подход може да се реализира с изключително ниско тегло и консумация. В допълнение, предложената софтуерна обработка е също сравнителни опростена, което улеснява практическото приложение и консумация на енергия. Последното, позволява обработката на всички данни да става на борда на безмоторния летателен апарат.

Крайния резултат на дисертацията е:

- Създадени два типа мултисензорни системи за измерване параметри на граничния слой на земната атмосфера;
- Измерени и обработени данни от над 30 полета на безмоторен летателен апарат в динамична атмосфера;
- На база на тези измервания са реализирани методи за оптимизация на траекторията на безмоторен летателен апарат. Резултатите от оптимизацията са анализирани в Глава 4.

5.1. Бъдещи разработки

Бъдещите разработки включват изработка на прототипни бройки на мултисензорната система представена в тази дисертация, които да могат да се използват на по-голям брой летателни апарати. Целта е да се съберат възможно най-голям брой полетни данни, за да може методите да се утвърдят и резултатите да са с по-голяма точност. В следствие е необходимо да се направи по-детайлна оценка на ефективността на предложените методи за оптимизация.

Научни публикации

- Shamliiev, A. (2018), Soaring flight trajectory optimization in convective thermals. *Complex Control Systems*, Volume 1, 2018, ISSN:1310-8255, 48-52
http://ir.bas.bg/ccs/2018/9_shamliiev.pdf
- Shamliiev, A., Mitrouchev, P., Dimitrova, M. Atmospheric Boundary Layer Dynamics Evaluation Using Piezo-Resistive Technology for Unpowered Areal Vehicles. *International Journal of Aviation Systems, Operations and Training (IJASOT)* – под печат
- Shamliiev, A. (2018) A Digital Pressure Sensor in Soaring Vehicles and Gliders. *Information Technologies and Control*, vol. 15, issue 4, ISSN: 1312-2622; Online ISSN: 2367-5357, DOI: 10.1515/itc-2017-0034, p. 20-37
https://www.researchgate.net/publication/328593189_A_Digital_Pressure_Sensor_in_Soaring_Vehicles_and_Gliders
- Shamliiev, A. (2017) A digital pressure sensor software optimization of vertical speed estimation for unpowered aerial vehicles and gliders. *Proceedings of International Conference Automatics and Informatics 2017*, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, 2017, ISSN:1313-1850, p. 61-64
- Penev, V., Rowlands, G., Shamliiev, A. (2016) A Discrete Kalman Filter Attitude Heading Reference System, Using a Low Cost Micro Electro-mechanical Inertial Measurement Unit. *Proceedings of the 6th International Conference on Application of Information and Communication Technology and Statistics in Economy and Education (ICAICTSEE – 2016)*, 2-3 декември 2016, UNWE, София ISSN 2367-7635; p.377
<http://icaictsee.unwe.bg/past-conferences/ICAICTSEE-2016.pdf>

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Първа Глава представя същността и актуалността на проблема за определяне на основните принципи за използване на енергия от атмосферата, представя целта и задачите на изследването, анализ основните модели да динамиката на безмоторния полет, основите на метеорологията и термодинамичните модели на конвекцията в атмосферата. Разгледани са и текущите решения и методи за създаване на автономен безмоторен полет и оптимизация на траекторията. Посочени са и основните нерешени задачи към този момент.

Втора глава представя основата на атмосферната динамика в контекста на безмоторния полет. Представени са основните принципи при пилотируемите безмоторни летателни апарати. В тази глава също се посочват основите, които залягат в текущия дисертационен труд.

Трета Глава представя разработените мултисензорни системи за анализ на динамиката на граничния приземен слой на земната атмосфера. На база на тези системи са събирани данни от тестови полети и впоследствие са предложени алгоритми за оптимизиране на траекторията на безмоторния летателен апарат. Тестовите полети са изпълнявани на дистанционно управляеми мултикоптерни и безмоторни платформи, както и на пилотируем парашутер.

Четвърта Глава е същността на дисертационната работа - представени са резултатите от направените измервания и са предложени алгоритми за оптимизация на траекторията на полета на безмоторен летателен апарат.

Пета Глава представлява обобщение и анализ на резултатите. Представени са и виждания за бъдещото развитие на подхода. Посочени са недостатъците и предимствата на метода, както и приложните и научно-приложните приноси на настоящия труд.

- Наличие на температурни флукутации;
- Навлизане в ядрото на конвекционална термика и превключване към алгоритъм за управление на ЛА в конвекционална термика;

В глава 4 са изложените решения за оптимизация на траекторията на летателен апарат, на база на направените измервания от сензорната система. Освен това, в тази глава се вижда реалната ефективност при използването на микро-електромеханични и дигитални сензори. Разработените софтуерни алгоритми и хардуерни решения описани в глава 3, показват своята ефективност в конкретното приложение. Чрез достигнатото бързодействие, високата точност и многото измерени параметри, успешно е показано анализирането и измерването в реално време на микро процеси и явления, които до този момент са се смятали теоретично или емпирично. Някои от изследваните микро явления, като например разлика в температурни градиенти във термичното ядро на конвективен процес и извън него, както и флукутации на температура на границата на ядрото, не са детайлно изследвани по този начин. Освен това и не са намирали практическо приложение до този момент.

ГЛАВА V ЗАКЛЮЧЕНИЕ

5. Заключение

Настоящият дисертационен труд представлява разработка на мултисензорна система за анализ на атмосферната динамика на граничния слой на земната атмосфера. На база на анализирани данни са представени алгоритми и подходи за оптимизация на траектория на безмоторен летателен апарат. Предложени са софтуерни и хардуерни решения при проектирането на сензорната система, които осигуряват желаните параметри на измерванията. Резултатите показват, че са достигнати характеристики, необходими за реализирането на проучване и анализ на атмосферната динамика на граничния слой на атмосферата. Само по себе си това проучване е уникално. Литературната справка не показва такъв тип данни и проучвания. Анализ на данните, показва възможността за на конвективния пръстен, теоретично описан от Woodward[41] (в следствие наблюдаван в лабораторни условия),

ключов момент не само за по-оптимална траектория, но и за използването на конвекцията като цяло.

Резултатите в този параграф са публикувани в [106].

4.5. Оптимизация на полета в близост до конвекционална термика.

В следващите фигури са разгледани корелационните зависимости и съответно изчислените корелационни коефициенти (R) на разгледаните параметри в 4.4 към вертикалната скорост на конвекцията:

- Температурен градиент;
- Критерии за устойчивост (като температурна разлика от влажната адиабата в диапазона $[-3C^{\circ}; 4 C^{\circ}]$;
- Разлика в температурните градиенти във ядрото на конвективна термика и извън нея $[0C^{\circ}/1000m; 3 C^{\circ}/1000m]$;
- Промяна на температурния градиент в близост до ядрото на конвективна термика $[-3C^{\circ}/1000m; 3 C^{\circ}/1000m]$;
- Скорост на низходящ поток;
- Амплитуда на температурните флуктуации в близост до ядрото на конвективна термика.

Алгоритъмът за оптимизация е по следната схема:

- Определяне на температурния градиент. Както е показано на фигура 4.7 и 4.15, при температурни градиенти по малки от $6 C^{\circ}/1000m$ не се очаква термична активност в атмосферата;
- Определяне устойчивостта на атмосферата. Съгласно фигура 4.8 и критериите за вертикална устойчивост (параграф 2.5.5), това е един от основните условия за наличието на конвекция в атмосферата;
- При наличието на предните две условия, започва мониторинг за низходящ поток или промяна на температурния градиент. При тяхното настъпване започва изпълнението на завои;
- Завоят се преустановява при следните три условия:
 - Когато стане по-голям от 360°

ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Целта на тази дисертационна работа е оптимизиране на траекторията на летателния апарат в конвективни вертикални движения на въздуха, като едновременно се покриват експлоатационните летателни характеристики и се извлича възможно най-много енергия от атмосферата.

За достигането на целта са формулирани следните задачи:

- Създаване на мултисензорна система за измерване параметрите на атмосферата;
- Измерване и запис на параметри на граничния слой на атмосферата;
- Обработка и анализ на измерените данни;
- На база на измерванията да се създаде метод оценка в реално време на атмосферната термична конвекция;
- Приложно и експериментално реализиране на методи за оптимизация на полета на безмоторен летателен апарат;

Разработени са мултисензорни системи, състоящи се предимно от микро електромеханични прибори. Използвана е и глобална спътникова навигационна система. Реализирани са множество полети с парапланер и мултикоптер.

Стремежът по време на разработването на настоящия труд е бил да се създадат методи за оптимизиране на безмоторния полет с изключително практична насоченост, които да могат да се приложат лесно в реална среда.

Част от изследванията представляват и реализираните тестови полети с разработените сензорни системи. Резултатите показват огромен потенциал за използване на предложения метод поради следното:

- практическо реализиране с ниска цена;
- малко тегло;
- ниска енергийна консумация;
- сравнително прости алгоритми, които могат да се изпълняват в реално време.

Трябва да се отбележи, че подходът за решението на целта и задачите коренно се различава от използваните до този момент методи. Разработеният принцип не противоречи на съществуващите разработки, а представлява алтернативно решение, което може да бъде лесно интегрирано и реализирано.

ГЛАВА I ОСНОВНИ ПРИНЦИПИ ПРИ ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ЕНЕРГИЯ ОТ АТМОСФЕРАТА. АНАЛИЗ НА МЕТОДИТЕ ЗА АВТОНОМНО УПРАВЛЕНИЕ НА БЕЗМОТОРНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

В глава 1 са разгледани фундаменталните и теоретични принципи, върху които е базирана разработената концепция в дисертацията. Това са принципи на полета на летателните апарати с неподвижно крило. Изведени са и са опростени основни принципи отнесени към контекста на целите и задачите на дисертацията. Глава 2 също представлява и литературен обзор на текущите разработки свързани с опити за автоматизация и оптимизация на безмоторни летателни апарати.

1.1. Видове безмоторни летателни апарати

В днешно време все по-трудно е да се класифицират летателните апарати, поради твърде голямо разнообразие. В зависимост от целите, летателните апарати се класифицират по определени критерии (принцип на полета, компоновка, вид на летателната задача, за която са предвидени да изпълняват, радиус на действие, максимално излетно тегло, силови установки, начин на управление и т.н.). Хартиените самолети са най-простите планери за изграждане и летене. Планери изработени от дърво или стиропор са евтино средство за студентите, докато изучават основите на аеродинамиката. Делтапланерите и парапланерите са пилотирувани самолети с платнени крила и минимална структура. Някои такива планери изглеждат като пилотирувани хвърчила, докато други приличат на маневрени парашути. Така наречените пилотируеми безмоторни планери (Sail planes) са планери, които имат стандартни части за въздухоплавателни средства, конструкция и системи за контрол на полета, но без двигател.

Радиус на завой	Средна скорост на изкачване	Абсолютен набор на височина
34 m	2 m/s	245 m
48 m	4 m/s	551 m
60 m	3 m/s	159 m

Таблица 4.4 Обобщение на резултатите

Оптималната траектория на полета при изкачване в конвекционална термика се изразява, чрез:

$$V' = \frac{r}{4\Gamma R} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right) = F(r, V_s)$$

Формула 20

Където лявата част на уравнението е формула 72, описваща фигура 2.10, а дясната част на уравнението е функцията от фигура 2.3 - Зависимостта от радиус на завой и скоростта на пропадане.

Показаните резултати предоставят метод за подобряване подбирането радиус на завой в конвективната термика. Стратегията е да използва максимално скоростта на изкачване в конвекцията. Резултатите показват, че могат да се извършват различни завойи и да се постигнат различни резултати в зависимост от условията в реално време. Освен това, този метод, може да бъде полезен в алгоритъм за вземане на решение за използване на конвективен възходящ поток в атмосферата. Основните предимства на предложения подход са:

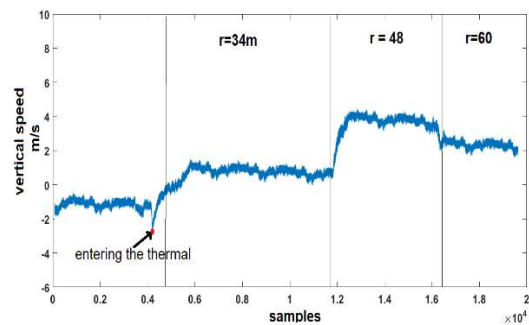
- Осигуряване на по-голяма скорост на изкачване;
- Оценка на вертикалната скорост в конвективна термика;
- Възможност за използване на по-тесни конвективни явления.

Резултатите изложени в този параграф доказват, че е не ефективно използването на зависимост скорост на възходящия поток към радиуса на ядро на конвективна термика, както е направено в [41] и [61]. В допълнение, регулиране на завоя не се разглежда в нито едно изследване от литературният обзор в Глава 1. А именно определяне радиус на завой може да се окаже

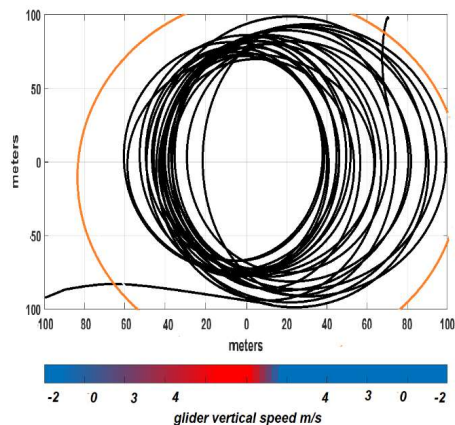
Резултатите в този параграф са публикувани в [103].

4.4. Оптимизация на полета при изкачване в конвективна термика

На фигура 4.12 са показани вертикалните скорости на изкачване във всеки един етап.



Фигура 4.12 Вертикални скорости при различни радиуси на завой в изолирана конвекционална термика



Фигура 4.13 Траекторията от фигура 4.11 в хоризонтална проекция *
Траекторията е апроксимирана с функцията "nlinfit" на Matlab

Настоящата работа разглежда безмоторни летателни апарати с аеродинамичен принцип на работа с неподвижно крило. По време на експериментите са използвани парапланери и радиоуправляем безмоторен летателен апарат. Използвани са основни и опростени принципи на аеродинамиката и динамиката на полета.

1.2. Динамика на полета

Динамиката на полета е наука за принципите и законите на полета на пилотируеми и автономни летателни апарати. Тя обхваща широк кръг от въпроси:

- Теория на летенето;
- Описването на движението на летателния апарат;
- Синтез на законите за управление;
- Изграждане на методи за пилотиране;
- Съхраняване на условия за безопасност.

Научните задачи, които трябва да се решат са:

- Определяне на законите за движение на летателните апарати (определяне траекторията на полета);
- Определение на силите и моментите, необходими за извършване на полет по зададен закон за управление на движението;

В авиационното инженерство е прието, че задачите от първото направление се наричат прави, а от второто обратни.

Динамиката на полета пряко зависи от аеродинамичните характеристики на летателния апарат. Това означава, че приложимостта и качествата на летателните апарати зависят от доброто съчетаване на аеродинамичните, летателните и маневрените характеристики на апарата с характеристиките му на устойчивост и управляемост в областта на експлоатационните режими на полет.

1.2.1. Механичен модел на летателния апарат

В настоящия труд се приемат следните условия, които са в съответствие с динамиката на полета:

- Летателният апарат (ЛА) се разглежда като абсолютно твърдо тяло с постоянна маса;
- Силите и моментите са приложени върху механичен модел.
- Когато се говори за движение на тяло се разбира преместването му в пространството и времето относно някакво друго тяло, задаващо системата на отчитане.
- В конкретната работа разглеждаме инерциална система [97]

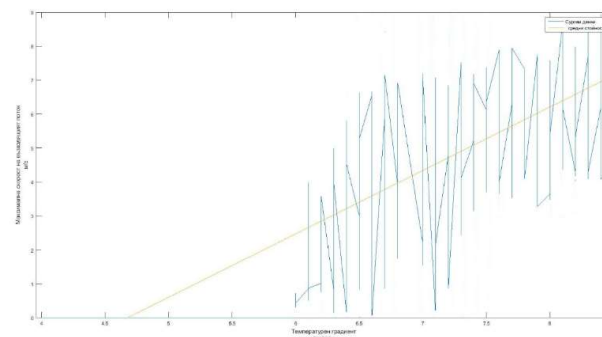
Липсата на теглителна сила означава, че е невъзможно да се изпълнява установен хоризонтален полет (изключваме въздействието на външни сили и фактори). Установен хоризонтален полет означава, че параметрите на полета, скорост и височина, остават константни. Необходимо е $Y=M$ – подемната сила да е равна на масата на ЛА. С други думи, при хоризонтален полет е необходимо да се увеличи ъгълът на атака с цел увеличаване на подемната сила. Това от своя страна води до увеличаване на челното съпротивление и намаляване на скоростта. Накрая се достигат критичните ъгли на атака и скорости, при които вече хоризонталния полет не може да продължи. Т.е. съгласно формула 7 следва, че максималното значение на коефициента на подемна сила, съответства на критическото значение на ъгъла на атака и обикновено не се използва по време на полет, поради опасността от сваляне на ЛА.

За потребна скорост удовлетворяваща $Y=M$: [98]

$$V = \sqrt{\frac{2G}{C_y^\alpha f_h S}}$$

Формула 1

Където C_y^α е коефициентът на подемна сила при определен ъгъл на атака.



Фигура 4.7 Максималното вертикално изкачване, като функция от температурния градиент

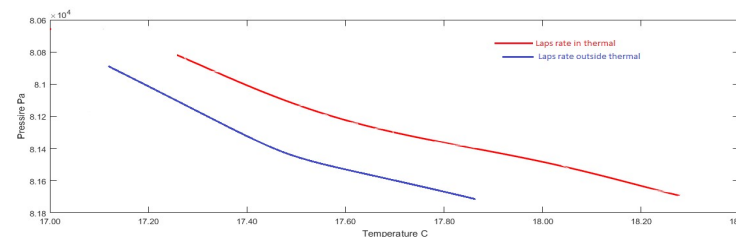
Вертикалните изкачвания се изчисляват със следната формула:

$$V' = V_c' - V_d'$$

Формула 19

Където V_c е скоростта на изкачване на летателния апарат, а V_d' е скоростта му на снижение спрямо радиус на завои на полета (Фигура 2.2).

При по детайлен анализ на данните, се установява разлика в температурите, както и в температурните градиенти при ядрото на конвективна термика и извън нея.



Фигура 4.8 Температурни градиенти в конвекционална термика и извън нея

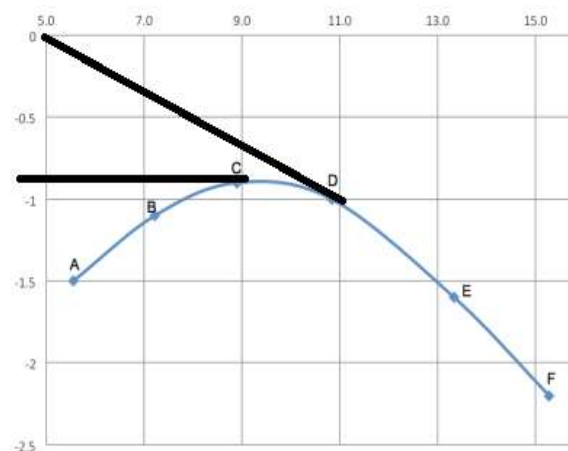
	Пряко измерени параметри	Непряко (изчислени параметри)
Физични параметри на атмосферата	Температура	Температурен градиент База на облаците (точка на насищане) Суха адиабата Влажна адиабата Критерии за стабилност на атмосферата
	Налягане	
	Относителна влажност	
		Височина на полета
Навигационни параметри	Инерциална навигация Глобална спътникова навигация	Височина на полета Посока на полета Курс Изменение на курса Радиус на завиване
Качествени параметри на атмосферата	Фини прахови частици Летливи органични съединения	Критерии за стабилност на атмосферата

Таблица 4.2 Класификация на измерените параметри

4.3. Локализация на активност и конвекция в атмосферата

Критериите за вертикална устойчивост (2.5.5) е показано, че могат да се установят, на база на измервания от разработената мултисензорна система (Таблица 4.3). На фигура 4.7 е показана максимално вертикално изкачване, като функция от температурния градиент.

Обикновено безмоторните летателни апарати се „тримират“ в конфигурация, която осигурява определено аеродинамично качество. На фигура 2.2, са показани различни видове конфигурации от скорост на полета и скорост пропадане“ на снижаването на летателния апарат. В теорията за поляра на ЛА се използва зависимостта на коефициента на челно съпротивление и подъемната сила от ъгъла на атака, но в практиката се използват и зависимости като фигура 2.1. Данните са изведени от тестови полети с парапланер на база на разработената сензорна система описана в Глава III.



Фигура 2.2 Аеродинамична поляра на парапланер

Друга важна особеност на безмоторните летателни апарати, на която трябва да се обърне внимание е изпълнението на вираж-завой. Аналогично на установения хоризонтален полет и тук е невъзможно изпълнението на установен вираж. Нещо повече, при изпълнението на вираж, безмоторния ЛА, за да запази скоростта си $V = \text{const}$ и $\alpha = \text{const}$, ще загуби от подъемната си сила. Уравненията за криволинейно движение на безмоторен ЛА:[97]

$$m \frac{dV}{dt} = -X$$

Формула 2

$$0 = -G + Y \cos \gamma - Z \sin \gamma$$

Формула 3

$$mV \frac{d\psi}{dt} = Y \sin \gamma - Z \cos \gamma$$

Формула 4

γ – ъгъл на тангаж

ψ – ъгъл на ролане

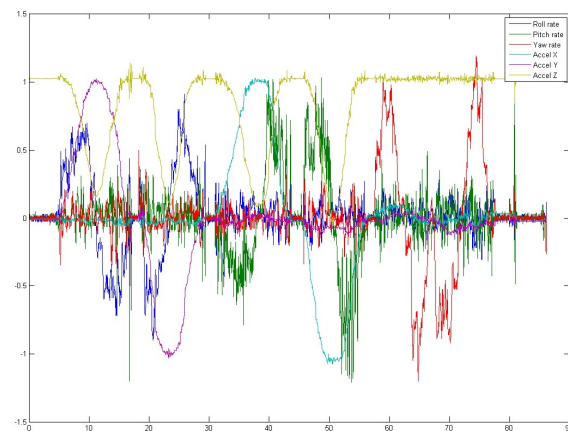
За текущия ъгъл на завъртане: [97]

$$r_z = \frac{mV^2}{Y \sin \gamma}$$

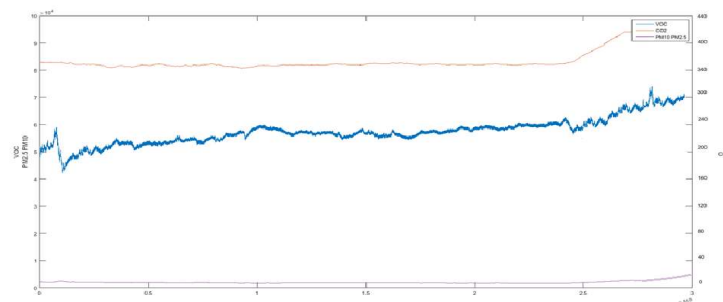
Формула 5

Т.е за да се намали радиусът на кривината r_z при хоризонталното маневриране в съответствие с формула 12 трябва да се увеличава $Y \sin \gamma$. Следователно колкото по-голям е наклонът γ , толкова по-голяма скорост и ъгъл на атака са необходими за да се създава сила уравнивяваща теглото – $Y \cos \gamma = G$. Това от своя страна означава, запазвайки ъгъла на атака и скоростта на полета, снижението или пропадането във височина на безмоторния летателен апарат ще се увеличава експоненциално с намаляване радиуса на завой.

На фигура 2.3, е изведена зависимостта от радиуса на завой и скоростта на пропадане на парапланер при константен ъгъл на атака и въздушна скорост. Данните отново са изведени от тестови полети с парапланер на база на разработената сензорна система описана в глава III.



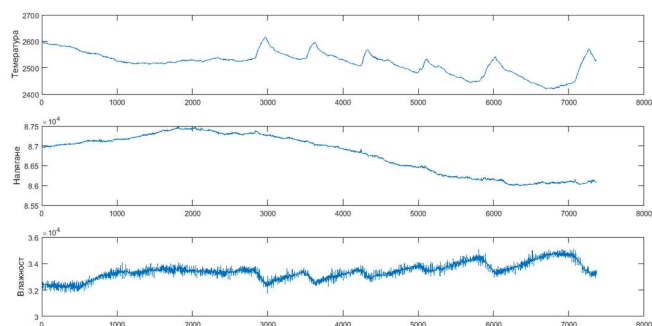
Фигура 4.5 Данни от акселерометри и инерционни сензори



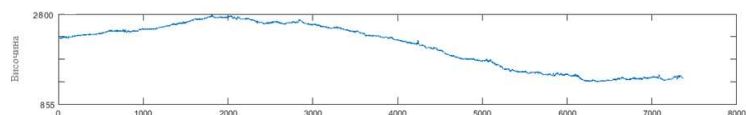
Фигура 4.6 Данни от сензор за летливи органични съединения (VOC), CO2 и фини прахови частици

4.2. Класифициране на измерваните параметри

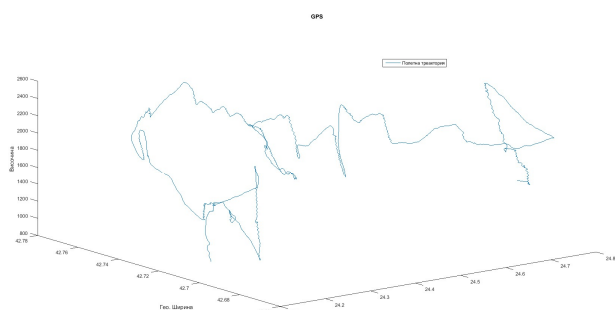
Класифицирането на измерените параметри използвани в тази дисертация е разпределено, както е показано в таблица 4.2



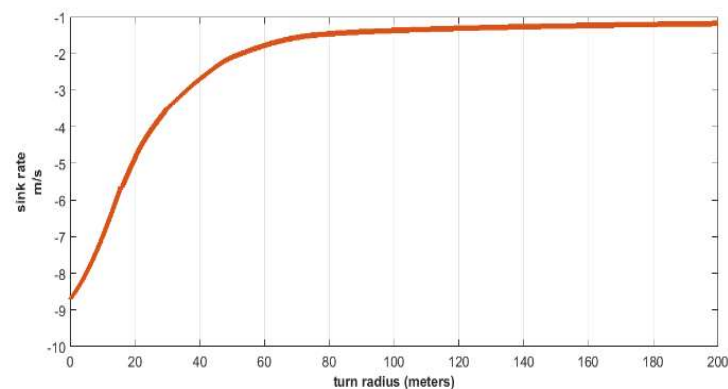
Фигура 4.1 Измервания от сензор за температура, налягане и влажност (отгоре надолу)



Фигура 4.2 Изчислена височина (на основата на барометричните измервания)



Фигура 4.3 Траектория на безмоторен полет получена от GPS приемник в правоъгълна координатна система



Фигура 2.3 Зависимостта от радиус на завои и скоростта на пропада

1.3. Определяне траекторията на полета на летателния апарат

В настоящата работа, като основен метод за определяне на траекторията на летателния апарат са използвани данните от спътниковата навигационна система. Но използването на инерциални сензори, позволява много по-точно определяне на траекторията. В общия случай за определяне на траекторията се използват само показанията на спътниковата навигационна система, но в случай на необходимост на по-прецизни координати, благодарение на използваните инерциални сензори, са използвани микроелектромеханични сензори.

1.3.1. Критерий за вертикална устойчивост на атмосферата

Устойчивостта на флуидите в гравитационно поле зависи от вертикалното разпределение на плътността им. Дефиницията на вертикалния температурен градиент [80] :

$$\frac{dT}{dz} = \gamma$$

Формула 6

$$\frac{d\rho}{\rho dz} = \frac{1}{T}(\gamma - \Gamma_A)$$

Формула 7

$$\Gamma_A = \frac{g}{R}$$

Формула 8

Което дава възможност за извеждане на условия за устойчивост на атмосферата.

Възможни са следните случаи:

а) ако $\gamma > \Gamma_A$ то $d/dz > 0$ (плътността расте с височината), атмосферата е силно неустойчива, тъй като по-плътните слоеве са разположени над по-разредените и малки смущения ще доведат до изплуване на топли маси въздух нагоре и спускане на по-тежки и по-студени надолу. Възниква конвекция, откъдето идва и названието на параметъра Γ_A . Такива големи температурни градиенти се наблюдават лятно време в следобедните часове в приземния въздушен слой;[84]

б) ако $\gamma < \Gamma_A$, то $d/dz < 0$ и атмосферата е устойчива (няма конвекция). При адиабатните вертикални движения състоянието на устойчивост може да се оцени чрез сравняване на зависимостта $T_0(z)$, наречена крива на стратификацията, с кривата на състоянието $T_i(z)$ на избраната ИВЧ. Всъщност по-удобно е да се сравнят температурните градиенти: [80]

$$-\frac{dT}{dz} = \gamma$$

Формула 9

$$-\frac{dT_i}{dz} = \frac{g}{C_p} = \gamma_a = 9.8^\circ C/km$$

Формула 10

Принципната реализация на експерименталните измервания и анализа на данните е непрекъснат процес. Важен момент е, непрекъснатото подобрене и модифициране на мултисензорната система.

В глава 3 е представена разработката на хардуерните модули за събирането на данните.

Начало на изследването беше започнато само с два сензора. В последствие бяха добавяни повече сензори, както и микрокомпютър, а алгоритмите за управлението и обработката на данните непрекъснато беше изменян. Това позволи освен подобрене на мултисензорната система, още от самото начало да бъдат събирани и обработвани данни.

4.1. Осъществени полети

На таблица 4.1 са показани общия брой осъществени полета и съответните измерени параметри.

	<i>T</i>	<i>P</i>	<i>H</i>	<i>GPS</i>	<i>INS</i>	<i>VOC</i>	<i>DUS</i>
<i>Полетни часове</i>	32	32	32	16	12	1,5	2,5
<i>Брой полети</i>	45	45	45	25	20	2	1

Таблица 4.1 Осъществени полети

T – измерване на температура

P – измерване на налягане

H – измерване на височина

GPS – данни от ГНСС

INS – данни от инерциални сензори (MEMS)

VOC – данни за органични съединения

DUS – данни за фини прахови частици

На фигури от 4.1 до 4.5 са показани примерни измервания от безмоторен полет, изобразени в графики.

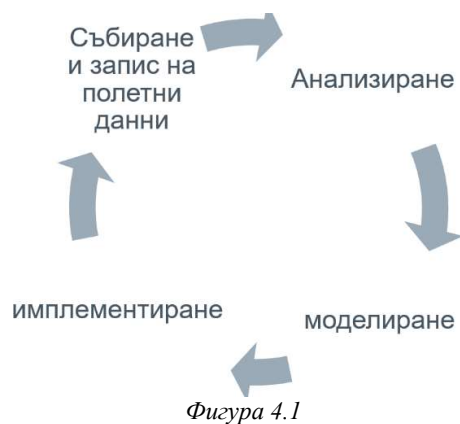
данни. Нещо повече: до този момент не е реализирана такъв тип много сензорна система с цел изследване на конвективните процеси в атмосферата.

Експериментите реализирани с тази система е необходимост и единствено условие за изпълнението на задачите в тази дисертация. Видовете данни и начина, по който са получени е много важен. Те са получени експериментално, което подчертава желанието за реализиране на изследване с изключително практическа насоченост. Задълбочената литературната справка (глава 2), не показва публикувани данни от този тип и в тази конфигурация. Следователно, проектирането и направените измервания с мултисензорната система е неразделна част от същността на дисертацията. Проектирани са два вида устройства – едно за запис на данни, и едно за визуализация на данните в полет.

ГЛАВА IV ОПТИМИЗАЦИЯ НА ТРАЕКТОРИЯ НА БЕЗМОТОРЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ

4. Събиране на полетни данни

Подходът за събиране на данни и разработване на новия метод за оптимизиране полетна траектория на безмоторен ЛА е показана на фигура 4.1



Ако приемем за простота, че $\gamma = \text{const}$ (атмосферата е политропна), то устойчивостта на атмосферата зависи от съотношението между γ и γ_a :

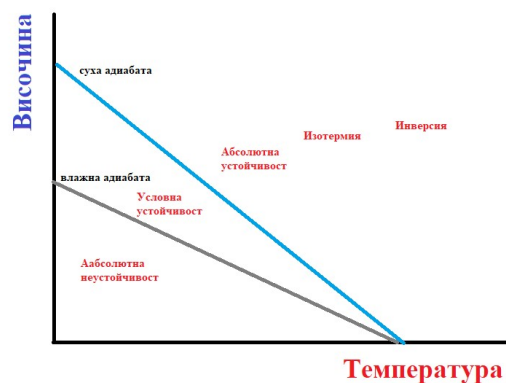
а) ако $\gamma < \gamma_a$ и ИВЧ, имаща на изходното ниво z_0 температура $T_i(z_0) = T_0(z_0)$, е принудена да се издига адиабатно, то тя ще се окаже на ниво $z > z_0$ по-студена от околната атмосфера, а поради това и по-тежка. Следователно тя ще се стреми да се върне към изходното ниво z_0 . Ако същата ИВЧ е принудена да се спуска адиабатно надолу ($dz < 0$), то тя ще се окаже по-топла от околния въздух и поради това пак ще се стреми да се върне на изходното ниво z_0 . Следователно, при $\gamma < \gamma_a$ съществува устойчиво равновесие, което не позволява да се развият конвективни движения;

б) при $\gamma > \gamma_a$ чрез аналогични разсъждения се стига до заключението, че атмосферата е неустойчива - при малки вертикални импулси ще възникне конвекция;

в) при $\gamma = \gamma_a$ движещата се адиабатно по вертикалата ИВЧ на всяко ниво среща въздух с температура, равна на собствената ѝ. Това състояние на атмосферата се нарича конвективно равновесие.

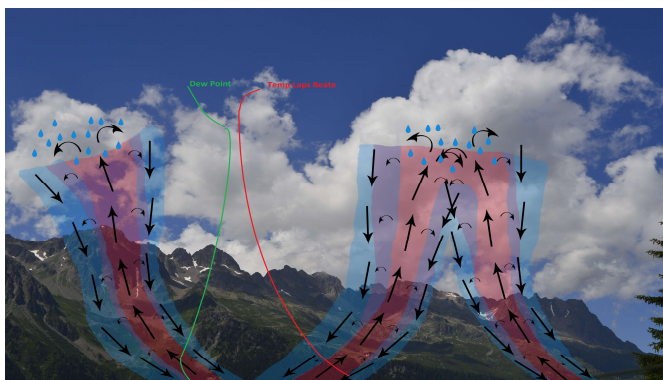
В реалната тропосферата $\gamma = 6.50^\circ\text{C}/\text{km}$ и следователно средно тя е устойчиво стратифицирана. Но в отделни случаи са възможни големи отклонения. Изотермиите (при $\gamma = 0$) и инверсиите ($\gamma < 0$) са състояния на много силна устойчивост. Обратно, свръхадиабатните градиенти $\gamma \gg \gamma_a$ са свързани с възникване на интензивна конвекция.

При влажно адиабатни процеси състоянието на устойчивост може да се определи чрез аналогичен анализ, като на мястото на g се поставя влажно адиабатния температурен градиент γ_a^1 , а на мястото на температурата T - виртуалната T_v .



Фиг 2.8. Критерий за вертикална устойчивост

Реалният профил $T(z)$ (профилът на температурния градиент) е сложна крива и то най-вече при стойности на z (височината) в граничния (приземен) слой на атмосферата. При този слой, атмосферата не може да се приеме за политропна. За това в метеорологията се използват интегрални методи за изследвания. Те дават количествена оценка за степента на устойчивост за големи части на атмосферата. На фигура 2.8 са показани температурния градиент и токът на оросяване на фона на конвекционалната термична активност.



Фиг 2.9. Конвекционална активност на планински масив

	Сензор	Интервал (sample rate)	Интерфейс	Производител
Налягане	BMP180 BMP280 BME280 BME680	20Hz	I2C	Bosch
Влажност	BMP180 BMP280 BME280 BME680	20Hz	I2C	Bosch
Температура	BMP180 BMP280 BME280 BME680	20Hz	I2C	Bosch
IMU	MPU9255	180Hz	I2C	InvenSense
Органични и летливи съединения	BME680	20Hz	SPI	Bosch
CO2	SCD30	10Hz	SPI	NDIR Technology
Финни прахови частици	GP2Y1010AU0F	1Hz	Analog	Sharp
GPS	L86	1Hz	UART	Quectel

Фигура 3.3 Използвани сензори

Помощният софтуер, който е използван е:

- TI RTOS [87];
- IMU Motion Driver Lib [87];
- SD Card Driver Libray [87];
- Bosch driver libraries for BMP and BME sensors [86];
- CCS (Code Composer Studio versions 7, 8, 9, 10) [87];

Използваните развойни системи са:

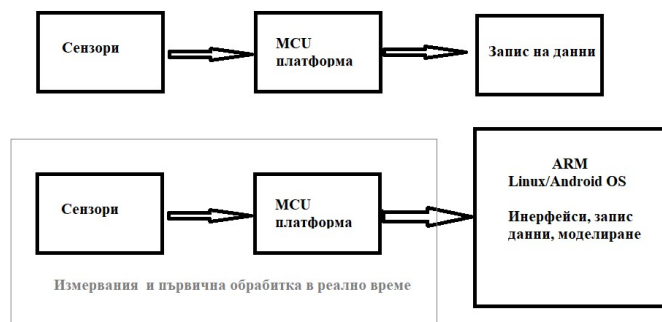
- Lincpad MSP430FR5299 [87]
- Lincpad MSP430FR5994 [87]
- AM3358 Arm Cortex-A8, 3D Graphics

3.3.1. Обобщение на глава 3

Проектирането и техническото реализиране на мултисензорната система, не е с научно приложни или научни приноси, но реално е част от текущата разработка и е необходим елемент за реализирането на експериментите и събирането на необходимите

3.2. Мултисензорна система

На фигура 3.16 е показана опростена блок схема на сензорната система. Разработени са два варианта, които използват едно ядро от сензори и микроконтролер. Това позволява обработка на измерените данни в реално време.



Фигура 3.16 Блок схема мултисензорна система

По-детайлна блок схема е показана на фигура 3.17 в изложението на дисертацията.

3.3. Кратка техническа спецификация на разработената мултисензорна система

В този параграф накратко са изложени основните технически характеристики, параметри и използвани софтуерни и хардуерни елементи.

2.1. Същност на явлениято конвекция в атмосферата

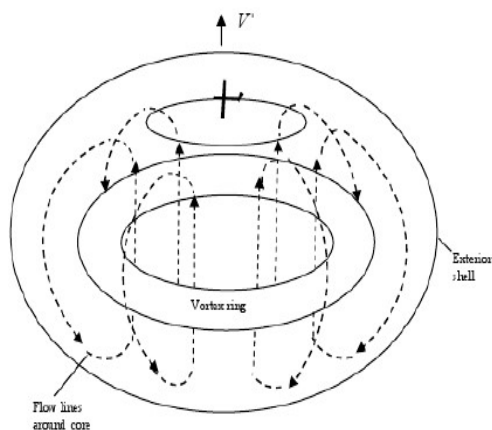
За по детайлна картина на явлениято термична конвекция в атмосферата са разгледани изследвания и публикации на Morton. (1956), Scorer [102] (1957), Woodward (1959) [41], Turner (1963), и Johari (1992)[32]. Те изучават циркулациите и движения на въздух във и около изолиран термик както в напречно така и в хоризонтално сечение.

Изолираният конвекционален термик (или накратко термика) е порция въздух, издигащ се през общата маса, защото е по-лек от околността. Топлият въздух, произтичащ от слънчевото нагряване, се издига и придобива структурата на вихровия пръстен, чиято възходяща скорост в центъра обикновено е по-голяма от скоростта на изкачване на цялата топлина според C.D. Cone. Той се доближава до свободна термична система с вихрова вихрова пръстена система, при която съотношението на радиуса на пръстена към сърцевината (R/a) е по-малко от 10. При издигането на пръстена, то е придружено от оградащо тяло или обвивка от по-студен въздух, събран от околната атмосфера. Фигура хх илюстрира вътрешната структура на такава топлина. Охлаждащият въздух непрекъснато циркулира в затворени поточни линии около вихровото ядро, което води до непрекъснат възходящ ток в централната област на черупката. Средната скорост, с която топлинните повишения спрямо атмосферата се определят от:[41]

$$V' = \frac{r}{4\Gamma R} \left(\ln \frac{8R}{a} - \frac{1}{4} \right)$$

Формула 11

където може да се определи цялото поле на скоростта, ако са дадени циркулацията - Γ , радиусът на пръстена - R и радиусът на сърцевината - a .



Фигура 2.11. Термично ядро (пръстен) (Woodward)[41]

Важно е да се отбележи, че по време на възходящото движение става непрекъснато смесване на въздух между околната среда и термиката – т.е процесите не са чисто адиабатни. В повечето случаи обаче, този процес се приема за чисто адиабатен.

Woodward [40] също предлага примерни зависимости от скоростта на вертикалното изкачване и размера (радиуса) на термика в напречно сечение

Тези изследвания са базирани на лабораторни резултати и симулации. Ludlam и Scorer [102] на основа на своята теория на мехурите, предлагат физичен модел на образуването на конвективни облаци. Това става, ако термик от влажен въздух достигне нивото на кондензация. Отделената скрита топлина води до увеличаване прегряването на въздуха в термика, което води до засмукването на други термици в образуващия се облак. Частичното смесване на външния с вътрешния въздух, загубата на топлина при изпарение на облачните капки, радиационното охлаждане и това в следствие на разширението на въздуха, постепенно понижават вертикалната скорост на облачен термик.

скоростта на атмосферната топлина, действащ върху ЛА, ще го накара да се издигне.

По-горният метод е валиден при ЛА при фиксирани кормила за вертикално управление.

При режими на полета, при които пилот или система за управление активно използва кормила за управление на височината на полета, е необходимо да се направи компенсация. Тази компенсация се нарича обща компенсация. [97]

Общата енергия на ЛА е: [97]

$$E_t = E_k + E_p$$

Формула 13

$$\Delta E_t = \Delta E_k + \Delta E_p$$

Формула 14

- E_t е общата енергия;
- E_k кинетичната енергия;
- E_p потенциалната енергия;

$$E_p = mgh$$

Формула 15

- m – масата на ЛА
- g – земното притегляне
- h – височината

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2$$

Формула 16

V – въздушната скорост на ЛА

$$E_{tot} = mgh + \frac{1}{2} mV^2$$

Формула 17

И следователно:

$$\Delta h = \frac{\Delta E_{tot}}{mg} - \frac{\Delta V^2}{2g}$$

Формула 18

3. Микро електромеханични сензори

Основните технически предимства и широкото разпространение на тази технология, поднася много предимства:

- Голяма техническа и практическа информация;
- Непрекъснато подобрене и модифициране на продуктите на пазара;
- Лесна интеграция, непрекъснато подобряване на характеристиките им;
- Много малки тегло, размери и ниска консумация на ел. енергия;
- Масовото им производство и разпространение е допринесло за тяхната надеждност и ниска цена.
- Вградени аналогово-цифрови преобразуватели в сензорите и съответно дигитален интерфейс, което прави, настройката, калибрацията и работа с тях изключително лесна;
- Автоматична калибрация/ фабрична калибрация;
- Вградени миниатюрни процесори, за предварителна преработка на измерванията;

Същевременно в днешно време, с широкото публично разпространение на дистанционно управляемите летателни апарати, използването на MEMS сензори доказва и своите предимства и евентуални пазарни претенции в авиационната индустрия.

Всички тези предимства на тази технология дават зелена светлина и много възможности за изследвания в областта на темата на настоящата дисертация.

3.1. Летателния апарат като сензор

При набор на височина, метода за идентификация на конвекционалната термика е оценка на вертикалната скорост на въздушния поток при смяна на енергията на безмоторен летателен апарат и полярната му скорост. Енергийната “печалба” от конвекционална термика е във формата на надморска височина, предизвикана от скоростта на издигане. Вертикалният компонент на

При това на периферията на облака, още преди прекратяване на вертикалното му нарастване, възникват възходящи движения за сметка охлаждането. Облак образуван само от един термик се разсейва бързо – след минути, поради смесването с околния по сух въздух.

Съставът на конвективен термик не е хомогенен. Преобладаващият низходящ пренос на въздух е свързан с циркулация на въздуха както е показано на фигура 2.11.

1.4. Анализ на методите за автономно управление на безмоторни летателни апарати

1.4.1. Рекурсивни методи

Първите публикувани източници за създаване на автономен алгоритъм за управление на безмоторен летателен апарат използвайки енергия от атмосферата е John Wharington.[40] През 1998г. той предлага рекурсивен евристичен метод, чрез който определя крена на летателния апарат ϕ на базата локализация на разстоянието до центъра на конвекционалната термика: [41]

$$\phi = \frac{\pi}{2} [a_2(1 - a_1) \sin \theta + a_1]$$

Формула 12

Параметрите $|a_1| \leq 1$, $|a_2| \leq 1$

За локация на термиката, John Wharington [40] използва неврони мрежи на база на регресивни изчисления на базата на навигационните данни (географска ширина и дължина) и вертикалната скорост на ЛА.

Още John Wharington [40] отбелязва един голям недостатък на неговият метод - сложността от изчисленията на алгоритъмът и невъзможността за интегрирането му в система в реално време. Резултатите са му базирани на симулации.

1.4.2. Метод чрез термо локация и термо камери

Няколко изследвания и разработки за локализиране на конвективни процеси в атмосферата с приложение в безмоторни ЛА, на базата на термо локация са реализирани и публикувани. Като пример Naseem Akhtar [61] в своята дисертация демонстрира възможността, термо камера да локализира топли точки на земята. Концепцията се основава на това, че по топлите земни повърхности се очаква да са тригери на конвективни термики.

В конкретната разработка се използва визуална локализация в реално време от управляема безпилотна платформа. Използва се метод в реално време за изчисляване на триизмерното местоположение на фиксирания обект. Целта е да се използва инфрачервена камера с въртяща се платформа (жиростабилизирана) на летателния апарат. Аналоговият изход от камерата се предава на наземната станция. Софтуер за обработка на изображения е разработен с помощта на библиотека с отворен код за компютърно виждане, разработена от Cranfield University, Великобритания. Чрез този принцип, обработката на изображения и алгоритъма за локализирането на топлите точки се извършва от наземната станция, което освобождава от изчислителен ресурс бордната система.

1.4.3. Метод чрез локализация на облаци

Съгласно 1.5.5, купестите облаци са резултат на термалната конвекция в атмосферата. Използвайки този факт, се създава обратна задача – да се намери „причината“ за образуването на купестите облаци. Основно са използвани два подхода :

- С обработка на видео изображения от бордна видео камера (Martin Stolle)[33];
- С обработка данни от наземен доплеров лидар Grady J. Koch.[26]

Успоредно с визуалното определяне на облаците, Martin Stolle [33] разработва и сравнителен метод, чрез който определя големината

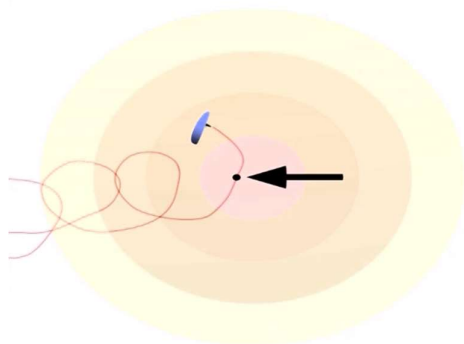
ГЛАВА III РАЗРАБОТВАНЕ НА МУЛТИСЕНЗОРНА СИСТЕМА БАЗИРАНА НА МИКРОЕЛЕКТРОМЕХАНИЧНИ СЕНЗОРИ

Реализирането на мултисензорната система се базира на направено задълбочено проучване на актуалните технологии и методи в сензориката и вградените микро компютърни системи. Основанието за използването на микро електромеханични сензори също е изложено в тази глава.

Проектирането и реализирането на такава измервателна система, участва като съпътстваща и необходима част от реализирането на измерванията и експериментите. Въпреки това, в процеса на разработката и са приложени комбинация от методи, технологии и алгоритми, които до известна степен биха претендирали за нучно-приложни постижения. Измерването и обработката на голямо количество данни с голяма точност, чувствителност и разделителна способност (при поддържане на високи нива на точност) е голямо предизвикателство, дори и в днешно време. За това се наложи да се предложи нов подход за разработката на тази система.

Към този момент, няма развита концепция, за реализирането на такъв тип система с цел изследване на конвекцията в граничния слой на атмосферата. Сама по себе си, технологията за измерване на параметрите на атмосферата от безмоторен летателен апарат в този аспект е уникална. Всички публикувани изследвания свързани с термодинамиката на конвекцията са лабораторни или теоретични, а тези, свързани с конвективните процеси в атмосферата, са по-скоро емпирични. Проектирането на много сензорна система, на пръв поглед не представлява техническо предизвикателство в днешно време. Но въпреки това, реализирането на такава система включва следните подзадачи:

- Бърза обработка на данните;
- Ниска енергийна консумация;
- Оптимизация работата на сензорите за целите на измерванията;
- Избиране на подходяща филтрация и режими на работа на сензорите;
- Софтуерна и хардуерна оптимизация на системата.



Фигура 2.24 „Thermal Ball“ [81]

При този метод се маркира на точката с най-силен възходящ поток. По – разширен алгоритъм изчислява отместването на тази точка спрямо посоката на вятъра.

1.4.9. Обобщение на глава 2

В Глава 2, не случайно са представени опростено теоретичните и фундаментални физични принципи, на които се базира реализираната концепция на дисертацията, заедно с литературния обзор. Ясно се вижда, че използваните методи, концепции и модели, свързани с управлението на безмоторни летателни апарати използвани към момента, нямат връзка с изложените физични принципи, показани в началото на главата. Принципиите на динамиката на безмоторният полет, заедно с теоретичните изследвания на термодинамиката на конвективните процеси и динамиката на граничния слой на атмосферата, безспорно са в основата на безмоторните полети. Именно това, не е изследвано до този момент в текущите разработки на тази тематика.

и продължителността на живот на конвекциите под облаците. Резултата от всичко това е представено в стимулационен вид.

Подходът на Grady J. Koch [26] е свързан с дистанционно наблюдаване на атмосферната конвекция и облачност с Доплеров лидар и едновременно с това, за да може да потвърди резултатите наблюдава рещи птици в наблюдаваната от него зона.

1.4.4. Облитане и сканиране

Интересен проблем при планирането е когато ЛА, което се опитва да е едновременно изследвател и експлоататор на неизвестно поле на вятъра. Това въвежда изискване за създаване на карта на полето с конвективните процеси в района на изследване. Тази задача е усложнен от факта, че обикновено вятъра и конвекцията не може да бъде наблюдавани от малък БЛА с общи бордови сензори. Освен това, динамичните процесите са само валидни за определен период от време.

Разглежда се БЛА с възможност за оценка на вектора на вятъра, използващ сензор за данни за въздушната скорост и инерционни сензори. Предполага се, че сензор за данни за въздуха измерва скоростта и посоката на въздушен поток спрямо центъра на масата на самолета и инерционния център. Сензорът измерва ускорението и скоростта на превозното средство в неподвижно състояние спрямо инерционна рамка.

1.4.5. Алгоритми за динамично решене

Масово в пилотируемите безмоторни ЛА се използват възходящ поток, получен от линейно постъпателно движение на маса въздух, пресрещайки препятствие - хълм, склон или други обекти. Аналогично е и вертикалното движение при фронтове преминаващи през планински масиви – образуването на така наречените вълни.

Наблюдавайки птиците (и по специално Албатросите), хората са забелязали че е възможно да се използва и така наречения срез на

вятъра, чрез извършването на динамични завои да се поддържа определена височина на полета. Този срез на вятъра албатросите намират в морето получен от вълните.

1.4.6. Екстракция на енергията от турбулентия в атмосферата

Chinmay K. Patel [68] показва метод, при който създава закон за управление на БЛА в турбулентна среда. За разлика от детерминистичния случай на синусоидален вертикален порив, извличането на енергия от реалистична турбулентия, изисква контрол по закони, които се представят добре в различни случайни пориви. Измервания, направени на ниски височини в границите на земния слой са показали, че турбулентните спектри са представителни за естествената турбулентия. В формулировката на K.Patel, е използван „замразени порив“, а спектърът на мощността на порива се приема следвайки функцията за мощността на спектрална плътност (PSD) на Dryden [68].

1.4.7. Изследване полета на птиците

Както беше споменато още в увода на настоящата работа, вдъхновението за полета на човека, най-вероятно е дошъл от птиците. Не случайно множество изследвания свързани с аеродинамиката на летателните апарати са взаимствани от птиците.

Интересни резултати са получени при сравняването на планирането на сокол, бял щъркел и парапланер управляван от опитен пилот [85].

1.4.8. Най-често използвани методи в практиката при пилотиране на безмоторни летателни апарати

Важен източник на информация за безмоторния полет са ръководствата и наръчниците за пилоти на безмоторни летателни апарати, както и методи и решения на производителите на навигационни прибори за подпомагане на пилотирането. За разлика от научните публикации и изследвания в областта на автономният безмоторен полет, издадените ръководства за

пилотиране на безмоторници датират от създаването на авиацията и по-точно от началото на полета на летателен апарат по тежък от въздуха. За това тези източници макар и не толкова с научна стойност имат доказана ефективност в практиката. За това те са ценен източник на информация използван в този труд.

На кратко основните принципи (или най-добри практики са следните):

- При продължително пропадане (когато скоростта на снижение е по-голяма) се прави завой – наляво или надясно. Смята се, че при този случай се преминава тангенциално до конвекционална термика;
- Винаги се прави завой към издигащото се крило.
- Когато се преминава през възходящ поток на ниска височина, се прави завой;
- Ако има достатъчно надморска височина, не се изпълнява завой докато не се установи мястото на максималната скорост на изкачване;
- Ако при навлизане в термика е объркана посоката на завой – завоя се преустановява за момент и следва 270 градуса завой – т.е. процедура за връщане към ядрото на термиката;
- Ако има възходящ поток в голяма площ, изпълнението на завоите да е с минимален крен;
- Когато възходящият поток се увеличава, се намалява крена;
- Ако се загуби възходящ поток на термика, се прави един широк 360 ° завой, след това се намаля радиуса на завоя, при повторно влизане в термика;
- При полет в конвекционален термик, ЛА се установява в точката с най-голяма подемна сила;
- При полет в низходящ поток срещу вятъра, ЛА се установява в режим със по-голяма скорост (т.С, т.Д или т.Е от фигура 2.2)

Широко употребяван метод при уредите за безмоторно летене е така наречения „Thermal assistent“ или „Thermal Ball“ – фигура 2.24.