



AUTONOMOUS AERIAL SYSTEM

Sia Lozanova*

Institute of Robotics at Bulgarian Academy of Sciences, Sofia 1113, Bulgaria

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 September 2018

Accepted 22 November 2018

Keywords:

autonomous aerial platform, multirotor, balloon with helium, electric power battery, sensors, Archimedes lifting force

ABSTRACT

Unmanned aerial system containing balloon filled with Helium connected to quadrocopter and sensor module is experimentally investigated for a first time. This unusual construction design is an effective solution to the deficiency of all multirotors from their limited battery capacity. It has been established that the platform's flight time is proportional to the vertical Archimedes force. A drastic increase of flight time is achieved with commensuration of weight and lifting force, and the shortest - in the absence of a balloon. The operation of the system is safe, predictable and always reproducible. The movement of a bear population in a forest area and a new archaeological mound is established by the platform.

© 2018 Journal of the Technical University of Gabrovo. All rights reserved.

ВЪВЕДЕНИЕ

Мултикоптерните технологии вече са неотменима част от нашето ежедневие, включително развлечение, сигурност, здраве, земеделие и др. Някои от най-актуалните им приложения са например дрон-робот с два манипулатора за захващане и пренасяне на товари до трудно достъпни или рискови зони; пръскане с хербицидни препарати на насаждения за прецизно земеделие; точно локализиране, доставка на лекарства и помощни средства на пострадали при лавини, бедствия или аварии; въздушна фотография за инспекция на офшорни обекти; обследване на състоянието на вътрешните повърхности на тунели и мостове; оценка и контрол на кабелите и компонентите на далекопроводите; многообразни приложения в т.н. „шпионски“ технологии и др. [1,2]. Драстичното развитие на тази област, включваща до такава степен перфектен хардуер и софтуер, вече се определя като ново поколение въздушни роботи с елементи на изкуствен интелект. На фона на твърде високата степен на зрялост на електронни елементи, процесори, микро- и нано- сензори и алгоритми за управление, времетраене на полет средно около 20 min е наистина сериозен дисбаланс. Това експлоатационно време не се съотнася с напредъка поради ограниченията на акумулаторните батерии. Ако има вече сведения за използване на дълговечни ядрени модули за захранване на бойните дроне, в цивилните платформи се правят опити проблемът с престоя им във въздуха да се реши чрез различни йонно-литиеви акумулатори, подкрепени със суперкондензатори, соларни панели, а напоследък с водородни клетки, произвеждащи DC енергия. Например, вариант на водороден мултиротор е осъществил престой във въздуха около 4 часа, което е окуражаващ резултат, [2]. Наличието обаче на втечен и/или под ви-

соко налягане водород в близост до бързооборотни електродвигатели внася в системата риск от взрив. Също така тези технологии са проблематични от необходимостта да се осъществява повече от един път конверсия на енергията до крайния ѝ електрически еквивалент.

В настоящата статия за първи път се предлага нестандартно решение на ограниченията на батерията на мултироторите, използващо подемната Архимедова сила за драстично удължаване на престоя им във въздуха.

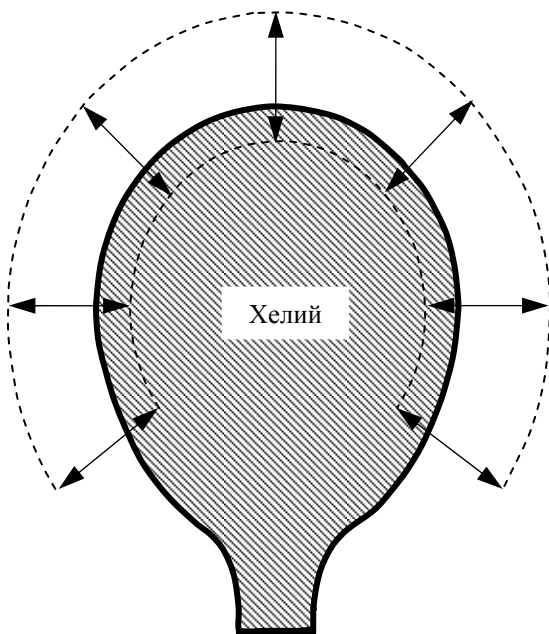
ОСОБЕНОСТИ НА СИЛАТА НА АРХИМЕД ПРИ БАЛОНИТЕ

а) Полетът на балон или аеростат във въздуха се осъществява от универсалната по своето действие вертикална подемна сила на Архимед F_A . Възникването ѝ се обяснява с факта, че по-ниските атмосферни слоеве, поради действие на теглото на по-горните са по-силно сгъстени като т.н. „хидростатично“ налягане върху долната част на балона е по-голямо, отколкото върху горната. В резултат равнодействащата сила F_A (разликата на силите върху долната и горната част на балона) е насочена нагоре. Силата F_A е равна на теглото на изместения от тялото обем V на газа (атмосферата) и е приложена в центъра на тежестта на изместения обем въздух, $F_A = \rho g V$, където ρ е плътността на атмосферата, g – земното ускорение. Ако теглото на обвивката и намиращия се в нея работен газ е по-малко от теглото на изместения от нея въздух, балонът ще започне да се издига нагоре. Когато тези тегла са приблизително равни, балонът ще бъде в безразлично равновесие. Ако теглото на платформата - обвивката заедно с намиращия се в

* Corresponding author. E-mail: lozanovasi@abv.bg

нея газ и прикаченият товар (мултикоптер, сензори и др.) е по-голямо от това на изместения въздух от запълнения с газ балон, системата ще пада надолу. Следователно, за да може да се осъществи ефективен полет, теглото на платформата трябва да бъде по-малко или почти равно на разликата в теглата на лекия газ, запълващ обвивката и теглото на изместения от балона обем въздух, [3]. Независимо, че описаната сила на Архимед F_A при газовете обяснява перформанса на въздушните системи (различни видове дирижабли, балони, аеростати и др.), особеностите на тази закономерност изискват отделен коментар.

б) Да разгледаме силите, действащи на балонната обвивка, запълнена с по-лек от въздуха работен газ, например хелий He_2 . За целта се използва постановка, при която долната страна на обвивката е отворена като там налягането на хелия е равно на това на атмосферния въздух, фиг. 1.



Фиг. 1. Силите, действащи върху балон, запълнен с по-лек от въздуха газ (Хелий)

При издигане на този балон нагоре в атмосферата, налягането на хелия в обвивката и това на заобикалящия въздух *едновременно намаляват*, [3]. Налягането на по-лекия хелий при изкачването нагоре намалява по-бавно, отколкото това на въздушната среда в областта на балона. На обвивката отвътре навън ще действа по-високо налягане като най-съществена е разликата в наляганята на хелия и въздуха в горната част на балона. Ето защо така генерираната сила в горната част на обвивката отвътре навън и насочена вертикално нагоре е по-голяма по стойност от силата, действаща отвън и насочена отгоре надолу. Разликата в тези две сили е ключова за издигането на балона или за уравновесяване на теглото, т.е. обвивката заедно с теглото на мултикоптера, сензорния модул, акумулатор и др. Фактически поддържащата сила F_A се определя от разликата в наляганята отвътре навън и съответно отвън навътре в горната част на балонната обвивка по отношение на референтна система, свързана със земната повърхност. Този резултат е от принципно значение за действието на новата безпилотна автономна система.

с) Преди началото на полет обвивката на балона се запълва с хелий до ниво, че силата F_A да надвишава общото тегло P на системата, $F_A > P$. В резултат теглото на изместения от балона въздух е по-голямо от теглото на обвивката, на хелия вътре в нея и прикачения към балона товар. По тази причина балонът започва да се издига вертикално нагоре. Съгласно избраната от нас постановка, фиг. 1, когато балонът достигне слоя въздух с по-ниско налягане, хелият He_2 се разширява и част от него напуска балона от долния отвор. Така на дадена височина намалява едновременно както външното (на въздуха), така и вътрешното (на хелия) в обвивката налягане. В резултат се редуцира и силата F_A . Накрая на определена височина платформата преустановява издигането си и остава в безразлично равновесие, $F_A \approx P$. Може да се каже, че долният отвор на балона, фиг. 1, е клапан за автоматично управление на издигането му. За да се спусне системата на земната повърхност е наложително изпускане от обвивката на част от хелия, за да се намали изместения обем въздух, т.е. да е в сила $F_A < P$.

ПЛАТФОРМАТА МУЛТИРОТОР- БАЛОН

От анализа на силата на Архимед F_A могат да се направят следните важни за действието на иновативната система балон-мултиротор изводи:

а. Балонът генерира подемна сила F_A , пропорционална на обема V на обвивката си чрез количеството запълващ я работен газ, $V = 4/3\pi r^3$ (при сферична обвивка с радиус r) като силата F_A не зависи от формата на балона.

б. Максималната продължителност за пребиваване на платформата балон-мултиротор във въздуха е при съизмирима подемна сила F_A с общото тегло P , $F_A \approx P$, а най-кратко - в отсъствие на балон, $F_A = 0$. В случая не се отчита подемната тяга L на двигателите на дрона, която е до няколко пъти по-голяма от теглото му.

в. Ако силата F_A превишава общото тегло P , $F_A > P$, платформата неконтролирано ще се издига нагоре без възможност за завръщане, ако не са взети мерки за автоматично изпускане на част от газа от обвивката или двигателите на мултиротора не реверсират подемната тяга. В общия случай този режим на работа е рисков и не е за предпочитане.

г. Източникът на силата F_A може да се сепарира чрез повече от един балон, сумарното действие на които да формира необходимата предварително планирана сила F_A за издигане на мултиротора.

д. Натоварването на двигателите на работещ квадрокоптер, свързан с балон т.е. консумацията на електрическа енергия от акумулаторния му блок се определя от съотношението $k = P/F_A$ или разликата $\Delta P = P - F_A$, а не от абсолютната стойност на теглото P , т.е. ефектът е оптимален при $k \approx 1$.

е. Продължителният престой на системата във въздуха дава възможност за разполагане на високочувствителен магнитометър на основата на магнитоуправляем повърхностен ток в сензорите на Хол за перманентен контрол на обекти в пресечен терен за целите на националната сигурност [4].

ж. Новата автономна система може да пренася товари с тегло многократно превишаващо това на самия мултиротор, стига товарът да е компенсирани от вертикалната сила, $F_A \approx P$. Този неочакван извод е в резултат от необичайните възможности на платформата.

з. Връзката между балона и квадрокоптера следва да е „мека“, осъществена, например с корда. При твърда връзка страничното предвижване на балона, евентуално от появил се вятър, ще води до крен на квадрокоптера и ще възникват проблеми с управлението му.

и. Хелият He_2 като работен газ е за предпочитане вместо популярния и разпространен за подобни цели водород H_2 . Причината е предотвратяването на взрив, тъй като водородът и кислородът образуват в широк диапазон от концентрации взривна смес. Хелият He_2 е със специфично тегло $\gamma = 0.18 \text{ g/l}$, а водородът H_2 - с $\gamma = 0.09 \text{ g/l}$.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЕН МЕТОД И АПАРАТУРА

а) Експериментите са осъществени както в подходяща зала с височина около 30 m, така и извън лаборатория с: еластични метеорологични балони тип Totex Corp., Япон с тегло на обвивката 450 g, запълнени с хелий He_2 ; квадрокоптер Phantom 2; оптичен сензорен модул във видимата и инфрачервената част на спектъра, разположен на квадрокоптера; капронова съединителна корда между дрона и балона с променлива дължината l ; помощни тежести, конфигурирани в пластмасова гондола за постигане на различно съотношение между силата F_A и теглото P , включващо теглата на: дрон, батерия и оптичен сензор P_1 ; обвивка на балона P_2 ; гондола P_3 и допълнително поставян товар P_4 в гондолата, т.е. $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Теглото на хелия He_2 не е отчетено. Формата на този тип балони в първо приближение е сферична. Обемът на хелия се установява чрез диаметъра d на обвивката, и израза $V = (4/3)\pi(d/2)^3$. Определянето на подемната сила F_A на повърхността на земята при различно запълване на балона с хелий става с електронна везна. Част от опитите са проведени, когато платформата е съединена с наземна станция чрез друга корда с дължина до 100 m с цел провеждане на продължително и детайлно наблюдение или обследване чрез квадрокоптера от фиксирана височина $h = \text{const}$ на определен периметър от земната повърхност.

б) Експериментите методично са осъществени в следния порядък. След като батерията е напълно заредена и на квадрокоптера е добавен товар $P_2 = 450 \text{ g}$, равен на теглото на обвивката на балона, се определя времето му на престой във въздуха на произволна височина, например $h \approx 15 \text{ m}$. Тягата L на носещите винтове на мултиротора, която се регулира дистанционно от земята, поддържа апарата само на фиксираната височина. Престоят се установява с пет последователни опити до спадане всеки път на капацитета на батерията до 10 %, след което резултатите се усредняват. Експериментите са проведени в зала. След това в гондолата се поставят допълнителни товари P_4 , не надвишаващи теглото P_1 . Максималното тегло, окачено в гондолата съставлява $P_4 = P_{max} = 1750 \text{ g} \approx 1700 \text{ g}$: $P_{max} \approx P_1 + P_2 + P_3 = 1240 \text{ g} + 450 \text{ g} + 60 \text{ g}$. При всеки от тези експерименти с различно натоварване на гондолата отново е определена

продължителността на полета до спадане на капацитета на батерията до 10 %. След това квадрокоптерът се свързва към запълнения с хелий балон, генериращ съответни подемни сили $F_{A,i}$, определени от количеството на работния газ в обвивката му, но ненадхвърлящи общото тегло на платформата, $F_A \leq P_1 + P_2 + P_3 + P_{max} \leq 3400 \text{ g}$.

РЕЗУЛТАТИ

На фиг. 2 е представена фотография на новата автономна система, съдържаща балон, аналогична на решение от [5].



Фиг. 2. Фотография на системата балон-мултиротор в режим на издигане. Балонът е тип Totex Corp., Япон, запълнен с Хелий. Квадрокоптерът е тип Phantom 2

При диаметър на балона $d \approx 1.30 \text{ m}$ силата е $F_A \approx 1000 \text{ g}$. Установено е, че при едни и същи външни условия и височина на издигане $h \approx 15 \text{ m}$ продължителността t на полета на платформата при общ товар $2P_{max} = 3400 \text{ g}$ и различни стойности на подемната сила F_A , при $\Delta P = 2P_{max} - F_A$, зависимостта е обратнопропорционална, $t \approx 1/\Delta P$. С увеличаване на силата F_A параметърът ΔP намалява, ефективното тегло на системата се редуцира и продължителността t на полета нараства. Когато теглото $2P_{max}$ и силата F_A са приблизително равни, $2P_{max} \approx F_A$, времето t достига до около $t \approx 55 \text{ min}$. Този впечатляващ резултатът в нашия случай е при $\Delta P \approx 120 \text{ g}$. Най-кратък е престоят на платформата, около $t \approx 10 \text{ min}$, с тегло 3400 g при отсъствие на балон, $F_A = 0$. Престоят на системата във въздуха без допълнително натоварване ($P_{max} = 1700 \text{ g}$) и подемна сила $F_A = 0$ съставлява $t \approx 19 \text{ min}$. Престоят е също $t \approx 19 \text{ min}$ при тегло $2P_{max} = 3400 \text{ g}$, но при подемна сила на Архимед $F_A = -1700 \text{ g}$. Зависимостта $t \approx 1/\Delta P$ е универсална – при различни допълнителни товари $1700 \leq P \leq 3400 \text{ g}$ и съответни сили $F_{A,i}$. Оптималната дължина l на „меката“ връзка е около $l \approx 1.0 \text{ m}$.

От необичайното решение, фиг. 2, са се възползвали екип, изследващ биоразнообразието и археолози, съответно в тъмната и светлата част на деня. Изучаването на такива обекти изисква достатъчна продължителност

без преустановяване на наблюдението. В първия случай в горска зона на Родопите през м. май 2018 г. системата е била аквизирана през нощта за около 130 min на височина $h \approx 55$ m и е била съединена със земята с капронова корда, като $F_A > P_{max}$. С апарата Phantom 2 е осъществено предвижване и сканиране с термовизионната камера в периметър от около 40 m. По време на наблюдението в наземната станция е получена видеоинформация за два обекта – единият по-голям, а другият по-малък. След това визуално е констатирана мечка и малко мече. С новата система археолози са обследвали детайлно област с площ от около 3.5 дка в Старозагорско, на която има археологични артефакти в могили. Наблюденията с платформата при непрекъсната продължителност на експеримента от отколо 90 min на височина $h \approx 50$ m са установили, че има още една слабо различима от терена могила, което е било от значение за археолозите.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложената въздушна система е с широк спектър на приложения. Действието ѝ е безопасно, предсказуемо и винаги възпроизводимо. Ключовото ѝ достоинство е драстично увеличеният престой на мултикоптера във въздуха.

Новата конструкция с елементи на изкуствен интелект я прави стратегически инструмент за продължителен въздушен контрол и наблюдение. Разработката е особено целесъобразна за регистрирането и контрола на фини прахови частици, аерозоли, патогени или радионуклеиди в силно замърсени, урбанизирани зони или атомни централи. Новият робот подлежи на модифициране и адаптиране към многообразието от проблеми за решаване.

Авторът изказва благодарност на ФНИ-МОН за финансовата подкрепа на изследванията по проект № ДН 07/18 от 15.12.2016

REFERENCE

- [1] Clarke R., Understanding the drone epidemic, Computer Law&Security Review, v. 30, issue 3, June 2014, pp. 230-246.
- [2] www.intelligent-energy.com.
- [3] Landsberg G.S., Physics, v.1, Nauka, Moskva, p. 575, 1966.
- [4] Roumenin C., S. Lozanova, S. Noykov, Experimental evidence of magnetically controlled surface current in Hall devices, Sensors and Actuators, A 175, (2012) pp. 45-52.
- [5] Roumenin C., S. Lozanova et al., Flying device, BG Patent Appl. № 111969/31.03.2015.