

ЙЕРАРХИЯ НА ЗАДАЧИТЕ ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА БЛА И ГРУПА ОТ БЛА

**Пламен Петров¹, Цветан Стоянов¹, Екатерина Йорданова-Дукова¹,
Бойчо Бойчев²**

¹*Технически университет – София, бул. “Климент Охридски” 8*

²*Институт за космически изследвания – БАН, София 1000, ул. “Московска” 6*

UNMANNED AIR VEHICLE CONTROL TASK HIERARCHY

**Plamen Petrov¹, Tsvetan Stoyanov¹, Ekaterina Yordanova-Dukova¹,
Boycho Boytchev²**

¹*Technical University of Sofia, Department of Aeronautics*

²*Space Research Institute - BAS*

Key words: *Unmanned air vehicle, automatic control.*

Abstract: *The Unmanned Air Vehicle (UAV) and the group of UAVs overall mission task is partitioned into a hierarchy of some automatic control tasks. The main problems in every hierarchy level are surveyed. UAV control tasks studied by authors and results are presented.*

Ускореното развитие на информатиката, комуникациите, теорията на управлението, извличането и обработката на сензорна информация и др. създадоха предпоставки за нови, оригинални концепции и конкретни технически решения в областта на безпилотните летателни апарати (БЛА). В тях се прилагат безпрецедентно високи нива на автоматизация и такива нови клонове на автоматиката като децентрализирано управление на комуникиращи агенти, колективно движение в сензорни мрежи и др. БЛА изпълняват предназначението си чрез едновременно и взаимосвързано реализиране на множество задачи за управление. Какви са тези задачи, какво е взаимодействието между тях и как те се решават е една важна и актуална тема в съвременните публикации по БЛА. Използването на йерархични модели на сложни компютърни взаимодействия доказва своята ефективност (например моделът OSI в цифровите комуникации). Ето защо е актуална потребността от създаване на концепция за различните нива на функционирането на отделен БЛА и група от БЛА. По този важен въпрос съществуват различни, понякога противоречиви мнения [1,2], но до общоприета архитектура на задачите за управление не е достигнато.

В настоящия доклад, на основата на собствен опит, се представя една йерархия на задачите за управление на БЛА и група от БЛА. Разглеждат се някои основни проблеми във всеки йерархичен слой, както и подходите и резултатите, до които авторите са достигнали при изследването на тези проблеми.

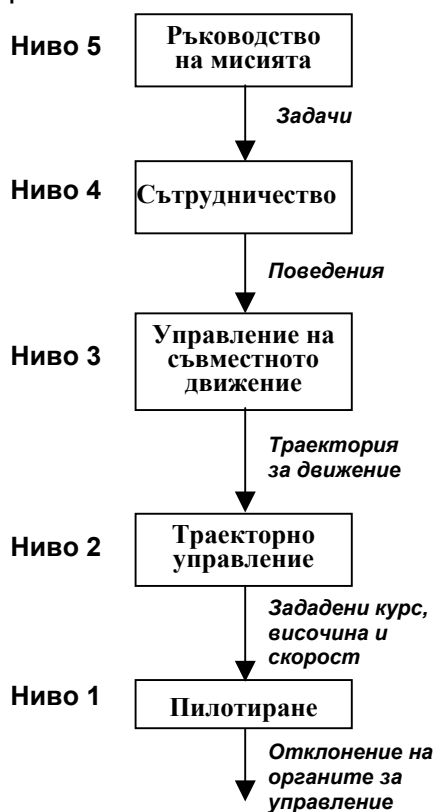
1. Задачи за управление на БЛА

Съгласно принципът на декомпозицията в системотехниката, с отчитане на общосистемните връзки, сложната система може да се разложи на подсистеми, които по-лесно се изследват. В резултат на това се получава една йерархична организация на функционирането. Ако декомпозицията се приложи към БЛА, то цялостното управление на група от такива апарати може да се раздели на йерархия от нива (подсистеми, слоеве), които си взаимодействат.

На базата на нашия опит, като коригираме и допълваме публикуваните подобни модели [1,2], ние предлагаме процесите на управление на група от БЛА да се разделят на пет функционални нива, както е показано на фиг. 1. Всеки от петте слоя има специфична роля в цялостното функциониране на системата.

Ниво 1. Пилотиране

Предназначението на подсистемата за пилотиране е да се осигури пространствена стабилизация на БЛА относно вектора на скоростта на центъра на масата (ц.м.) му. Използват се данните от пилотажния измервателен комплект. Изходното управляващо въздействие е върху кормилата и другите органите за управление на БЛА.



Фиг. 1 Йерархия на задачите за управление на БЛА

Ниво 2. Навигация (траекторно управление)

Предназначението на подсистемата за навигация е да се осигури движението на БЛА по определена пространствена траектория. Използват се измерванията от навигационна система: спътникова, инерциална, далекомерно-ъгломерна и др. Изходните управляващи въздействия са задания за курс, височина и скорост към подсистемата за пилотиране. Траекторното управление се реализира чрез пилотажния контур.

Ниво 3. Управление на съвместното движение

Предназначението му е да се осигури безконфликтно, координирано движение на всички БЛА в групата. Това се постига чрез две действия [1]: придвижване на някъде и изчакване на дадено място. В тази подсистема се решават задачите за откриване и избягване на конфликти и осъществяване на полет в строй (formation flight). Използва се цялата текуща информация за движението на няколко БЛА. Изходът от този слой е пространствена траектория за придвижване или изчакване, която се предава като задание на навигационната подсистема.

Ниво 4. Сътрудничество (коопериране)

Предназначението на тази подсистема е да генерира такова поведение на отделните БЛА, че да се изпълнява най-добре общата задача на цялата група. Поведението е подходяща, целенасочена

последователност от действия. Всички задачи към БЛА могат да се сведат към три основни поведения [1]:

- пътуване (traveling), което е еднократно преминаване по определен отворен път;
- обхождане (watching), което е повтарящо се преминаване по определен затворен път;
- следене (tracking), което е следване на конкретна движеща се или неподвижна точка.

Посистемата за сътрудничество използва информация от специалния сензорен комплект за наблюдение и разузнаване. Резултатът от процеса на сътрудничество е поведение на всеки БЛА.

Ниво 5. Ръководене на мисията

Военните и граждански мисии, които БЛА изпълняват са известни: разузнаване, откриване на цели, радиопротиводействие, радиоретрансляция, лазерна подсветка на цели, гранична охрана, опазване на околната среда, търсене и спасяване и др. Най-високото ниво в йерархията ръководи мисията като генерира задачи към групата от БЛА. Тези задачи могат да бъдат: среща на определено място (rendezvous), претърсване на район (foraging), осигуряване на покритие (coverage), разпределение на БЛА по задачи (цели), колективно преследване (pursuit), събиране на групата (flocking) и др. Тези задачи се отправят и решават в подсистемата за сътрудничество (слой 4). За ръководство на мисията се използва както информацията от разузнаването и наблюдението, така и от надсистемите в йерархията.

Всяко от петте нива на управление има свои специфични проблеми и методи за решаването им. Авторите са работили основно в подсистемите за пилотиране и навигация. По-долу се представят техните основни резултати и се прави преглед на изследванията в другите слоеве на управлението на БЛА.

2. Подсистема за пилотиране.

БЛА имат своя специфика, която съществено ги различава от ЛА с пилот на борда. При тях не важат ограниченията от физиологията на човека (към претоварване, продължителност на работа, риск и др.) и ръчното пилотиране е краткотрайно. Ето защо прякото пренасяне към БЛА на теорията и практиката на ЛА с пилот на борда не е правилно. Основните изисквания към автопилота на БЛА са надеждност, ниска цена, малки габарити, тегло и електропотребление. Това означава използване на малък брой сензори и проектиране на проста бордова система за автоматично управление (САУ), която осигурява зададени технически изисквания към качеството на управлението (точност, бързодействие, форма на кривите на преходните процеси и др.). За съжаление съвременната теория на автоматичното управление решава противоположната задача - използване на колкото се може повече информация и синтезиране на сложна САУ, която осигурява максимално качество в теоретичен смисъл (глобален екстремум на критерий за оптималност или разместване на всички полюси на системата). За разлика от класическата теория методът на пространството на състоянията трудно може да отсее от целия проблем най-важните аспекти и да се съсредоточи към прости управляващи устройства. Не се разполага с достатъчно средства за обосноваване структурен синтез на многомерни САУ, въпреки че задачата има много решения дори само в класа на регулаторите с постоянни обратни връзки (о.в.).

Нашият подход към синтеза на бордовите САУ на БЛА се свежда до решаването на следната задача:

Структурен синтез: Да се определят малък брой измеряеми променливи на полета, така че управляемостта и наблюдаемостта на системата да бъдат колкото

се може по-добри и от тези измерени изходи да се използват само най-ефективните постоянни отрицателни о.в., които най-добре корегират доминиращите полюси на БЛА. Най-прост е така полученият регулатор, който осигурява структурна устойчивост на многомерната САУ.

Параметричен синтез: При намерена структура на регулатора да се определят числените стойности на коефициентите на о.в., така че да се постигнат техническите качествени показатели на САУ: точност, бързодействие, форма на кривите на преходните процеси и др.

Количествената оценка на управляемостта и наблюдаемостта на обектите за управление се извършва с използването на нормалната канонична форма на нормирания им линеен математическия модел в пространството на състоянията [3]. Ефективността на о.в. изследваме с разширение на теорията на чувствителността на системите за управление, като се изчислява чувствителността на полюсите на системата от коефициентите на о.в. [4].

Реакцията на линейната многомерна САУ на входно въздействие е сума от движения, наречени моди, които се обуславят от всеки полюс на системата. Доминиращи се наричат тези полюси, които оказват най-голямо влияние на динамика на системата. За определяне на доминиращите полюси на обектите за управление въвеждаме следните мерки за значимостта на двойката комплексно спрегнати полюси $\alpha_k \pm j\omega_k$ в реакцията на i -тия изход на САУ при въздействие по j -тия и вход:

А) Амплитудна мярка

$$Q_{ikj} = \frac{\alpha_k \mu_{ikj} + \omega_k \eta_{ikj}}{\alpha_k^2 + \omega_k^2}. \quad (1)$$

Амплитудната мярка (1) има смисъла на установена стойност на компонентата в реакцията на i -тия изход на САУ при въздействие по j -тия и вход, обусловена от двойката полюси $\alpha_k \pm j\omega_k$.

Б) Колебателна мярка

$$\sigma_{ikj} = -\frac{\sqrt{\mu_{ikj}^2 + \eta_{ikj}^2}}{\xi_k \mu_{ikj} + \eta_{ikj}} \exp\left(\xi_k \arctg \frac{\mu_{ikj}}{\eta_{ikj}}\right). \quad (2)$$

Колебателната мярка (2) има смисъла на пререгулиране за същата модална компонента на движението на системата.

Във формули (1) и (2) числата μ_{ikj} и η_{ikj} се определят от елементите на матриците на управлението В и на измерването С в нормалната канонична форма на математическия модел на обекта за управление:

$$\mu_{ikj} = c_{ik} b_{jk} + c_{i,k+1} b_{k+1,j}; \quad \eta_{ikj} = c_{i,k+1} b_{kj} - c_{ik} b_{k+1,j}; \quad \xi_k = \frac{\alpha_k}{\omega_k}. \quad (3)$$

С този математически инструментариум се решават задачите, както на структурния, така и на параметричния синтез на бордовите САУ. С използване на обобщенията на мерките за значимостта на полюсите и дефиниране на подходящи целеви функции се постигат качествени показатели с ясен технически смисъл като: пререгулиране, статична грешка, степен на колебателност, степен на устойчивост, времетраене на преходния процес и др. Числените стойности на коефициентите на о.в. се намират чрез алгоритмични методи за оптимизация. С представения подход е синтезиран и създаден автопилота на безпилотния самолет "Ястреб" от комплекса

“Визьор”, който доказва своите качества в над 40 полета от пълния цикъл държавни изпитвания.

3. Подсистема за навигация

За БЛА с военно приложение от изключително важно значение е осигуряване на скритост и шумозащитеност на дистанционното управление. Един от най-ефективните способности за повишаването им е съкращаване на сумарното време за работа на излъчващите радиосредства. В [5] е предложен метод за решаване на този проблем чрез въвеждане на дискретизация на телеметричния контрол на навигационните координати и дистанционното управление. Той може да бъде прилаган едновременно с други, чисто радиотехнически методи за повишаване на шумозащитеността. Същността на метода се заключава в следното. Траекторното движение на БЛА се моделира в ПУ в реално време. Координатите на ц.м. относно правоъгълна координатна система, свързана с ПУ се определят от имитационен математически модел (ИММ). Натрупаната грешка при изчисление на координатите се коригира периодично с помощта на използваната навигационна система. Използва се дискретна корекция, като изчислените координати в момента на корекцията се заменят с координатите, получени от навигационната система. В процеса на управлението операторът следи върху екрана моделираната траектория на БЛА и сравнявайки я с желаната, формира управляващите въздействия във вид на зададени височина, скорост и курс на полета. Те се предават на борда на БЛА периодично (в периода на работа на радиосредствата) и се обработват от бордовата САУ. Важно условие за реализацията на предлагания дискретен метод за траекторно управление е точната стабилизация на ъгловото положение, скоростта и височината на полета, а също и премахване на ъгъла на плъзгане. Това съществено опростява ИММ и освобождава оператора от контрола на параметрите на вътрешните контури за управление.

Изборът на момента на корекция се определя от постигнатата точност на моделиране на траекторното движение на БЛА. Продължителността на интервалите на радиомълчание се избират от условието за изпълнение на неравенството

$$\sigma_{\Sigma}(t) \leq \sigma_{\text{дон}}, \quad (4)$$

където $\sigma_{\Sigma}(t)$ е сумарната средноквадратична радиална грешка при определяне на координатите преди корекцията. За нея можем да запишем:

$$\sigma_{\Sigma}(t) = \sigma_{\text{КОР}}(t) + \sigma_{\text{ИММ}}(t), \quad (5)$$

където $\sigma_{\text{КОР}}(t)$ и $\sigma_{\text{ИММ}}(t)$ са средноквадратични радиални грешки на корекционната система и на ИММ.

Сумарното време T на полета може да се представи по следния начин:

$$T = n(t_{\text{PM}} + t_{\text{P}}) = T_{\text{PM}} + T_{\text{P}}, \quad (6)$$

където: n – брой на циклите, t_{PM} и t_{P} - времена на радиомълчание и на работа на радиосредствата за един цикъл, T_{PM} и T_{P} - сумарни времена на радиомълчание и на работа на радиосредствата.

Степента на повишаване на шумозащитеността при реализацията на пазгледаната дискретизация на управлението може да се оцени с помощта на коефициента на “запълване” на радиовръзката с БЛА:

$$Q = T / T_{\text{P}}. \quad (7)$$

Колкото този коефициент е по-голям, толкова по-малка е вероятността за откриване и подавяне на системата за дистанционно управление със средствата за радиопротиводействие.

Увеличаването на продължителността на интервалите на радиомълчание намалява точността на управлението при следване на зададената траектория на полета. По тази причина максималното време на радиомълчание в един цикъл се ограничава не само от точността на ИММ, но и от максимално допустимото отклонение на БЛА от зададената траектория. При наличието на достатъчни изчислителни ресурси в ПУ (това в настоящия момент не е проблем) на базата на предложения дискретен метод може да се реализира не само автоматизация, но и оптимизация на траектория (външния) контур за управление на БЛА.

В [6,7] е предложен и изследван модифициран алгоритъм с прогнозиращ модел за оптимално дискретно управление на траекторното движение на БЛА. Алгоритъмът е разработен на базата на метода за оптимално управление по критерия за обобщена работа [8], според който търсеното управление u_{on} е оптимално при минимизиране на функционала:

$$J = W[x(t)] + \int_{t_i}^{t_k} Q d\tau + \frac{1}{2} \int_{t_i}^{t_k} \frac{u^2 + u_{on}^2}{k} d\tau . \quad (8)$$

Терминалната част на функционала дава условието за точно попадане на БЛА в крайния момент от интервала за оптимизация в зададената точка със зададени курс, височина и скорост:

$$W[x(t)] = \frac{1}{2} [\rho_x (x - x_k) + \rho_z (z - z_k) + \rho_\psi (\psi - \psi_k) + \rho_H (H - H_k) + \rho_v (V - V_k)] . \quad (9)$$

Подинтегралната функция $Q = Q_1 + Q_2$ е функция на ограниченията, където

$$Q_1 = \begin{cases} \beta_1 (V - V_{\min}) & \text{при } V < V_{\min} \\ 0 & \text{при } V_{\min} < V < V_{\max} \\ \beta_2 (V - V_{\max}) & \text{при } V > V_{\max} \end{cases} ; \quad Q_2 = \begin{cases} \beta_3 (\vartheta - \theta - \alpha_{kp}) & \text{при } \vartheta - \theta > \alpha_{kp} \\ 0 & \text{при } \vartheta - \theta \leq \alpha_{kp} \end{cases} \quad (10)$$

Включването и във функционала осигурява поддържане на скоростта на полета в областта на допустимите стойности и непревишаване на критичния ъгъл на атака.

Изчислените оптимални стойности на $\psi_{зад}$, $V_{зад}$ и $H_{зад}$ се предават на борда на БЛА в интервалите на радиовръзка и остават непроменени в течение на поредния цикъл на радиомълчание.

4. Управление на съвместното движение

Основната цел на управлението на съвместното движение на БЛА е да се предотврати сблъскване помежду им или с други препятствия. Ето защо основният проблем тук е откриването и решаването на конфликти. Конфликт се нарича всяко нарушаване на минимумите за безопасно сепарирание на БЛА. В по-общ смисъл конфликт може да има при различни опасности като: друг ЛА, повърхността на Земята, метеорологични явления, турбулентна следа и др.

Осигуряването на безконфликтното, координирано движение на всички БЛА в групата може да бъде централизирано от общ ПУ. Напоследък се акцентира на децентрализираното управление на съвместното движение от борда на самите БЛА. За откриването на конфликтите най-често се използват вероятностните методи [9]. Типичен метод за решаване на конфликтите е теорията на игрите. Определянето на маньовъра за избягване на конфликта, както и момента на започването му може да се формулира като задача за оптимално управление на динамична система. В последно време се публикуват много изследвания за безконфликтно движение с т. н. метод на потенциалните полета. Чрез него конфликтите между подвижни обекти се

решават по подобие на явлението отблъскване на заредени частици в потенциално поле. БЛА се третират като едноименни точкови електрически товари и се използват модифицирани уравнения на електростатиката, за да се генерират маневри за раздалечаване. За автоматичното решаване на конфликти между БЛА се предлагат и методи от теорията на изкуствения интелект като експертни системи, размити регулатори, генетични алгоритми и др [2].

5. Сътрудничество (коопериране) в група от БЛА

БЛА могат да бъдат напълно автоматични, ако се програмират да реагират с типови действия на предварително идентифицирани събития. Реалният свят обаче, е толкова сложен, и непредсказуем, особено в бойна обстановка, че такава пряко програмиране на функциите става почти невъзможно. Как тогава БЛА ще функционират при непредвидени обстоятелства, бързо развиващи се събития и ненормални условия? Освен това постижимо ли е образно казано “главата на оператора да бъде на борда на БЛА, а тялото му – на земята” [2]? И двата въпроса имат положителен отговор в една система с хибриден интелект, в която умът на пилота на борда се замени с изкуствен интелект (виртуален пилот) и се интегрира с човека-оператор в пункта за управление чрез радиолиния за предаване на данни. Това е ключът, който ще позволи един оператор да управлява все повече БЛА и те да действат гъвкаво и ефективно като летателни апарати с пилот на борда. И тъй като радиосвръзката с оператора (особено при военни приложения) е ограничена, БЛА трябва да функционират все повече автономно.

От друга страна, в резултат на развитието на технологиите, БЛА в една група вече комуникират помежду си в компютърна мрежа и представляват подвижна сензорна мрежа [10]. Това дава нови хоризонти пред науката за управлението. Много интензивно се развива в теорията т. н. управление в сътрудничество между много агенти (collaborative control between multiple agent) [11]. Нарастваща е тенденцията да се ограничи централизираното управление и се предостави все повече “интелигентност” и автономност на агентите, т.е. на отделните БЛА.

Системите с изкуствен интелект все повече взаимстват идеи от живата природа. За групата от БЛА са от значение проявленията на ятото от птици, пасажите от риби или рояците от пчели. Общото в тях е, че в резултат на елементарни, инстинктивни поведения на индивидите се изграждат системи с много сложно, целенасочено, съвместно функциониране. Тази идея е в основата на кооперираните многоагентни системи. Всеки агент може да извлича информация чрез сензори за средата около него, да комуникира със своите съседи, да обработва събраната и по двата начина информация и да взима решение за своето действие. Отнесено към БЛА това означава, че те работят в сътрудничество за изпълнение на мисията. Подходът на кооперираното управление на БЛА дава много интересни резултати в задачите за събиране на групата, разпределение на БЛА по задачи [12], претърсване на район [13], осигуряване на покритие и др. Използват се както известни математически методи (линейно програмиране, методи на Ляпунов, оптимизационни методи, мрежови потоци), така и нови атрактивни названия като теория на тима [13], устойчивост на рояци (stability of swarms) [14], изкуствен живот [2] и др.

Заклучение

Изграждането на йерархия на задачите за управление на БЛА облекчава проектирането, изграждането и изучаването на системите за управление на БЛА. Тя дава възможност на изследователи и производители да се фокусират в определени подсистеми, без да е необходимо да бъдат специалисти по всички аспекти на управлението. Достатъчно е да се знае как разработваното ниво на управление

кореспондира със съседните му подсистеми. При запазване на тези интерфейсни връзки, отделните слоеве на управление могат да се променят независимо един от друг, както и да се използват продукти на различни производители. Всичко това осигурява гъвкавост и ускорява развитието на БЛА.

Предложената йерархия е в сила при различна степен на автоматизация, т.е. както при автоматично, така и при ръчно или автоматизирано управление. Нивата на управление могат да се реализират на борда на БЛА (с изключение на ръководството на мисията), от ПУ или смесено – част от тях на борда, а другата част от ПУ. В зависимост от това степента на децентрализация и автономност на управлението е различна. В по-ниските слоеве на йерархията (пилотиране и навигацията) се използват при автоматично управление аналитични алгоритми за обработка на данни, а при ръчно управление – умения и правила. В по-високите нива се използват знания и обработка на знания.

Представената структура на управлението на БЛА не противопоставя йерархията (подход отгоре надолу), на поведенческата архитектура (подход отдолу нагоре)[2], защото отделните слоеве представят различни задачи, част от които са за отделния БЛА, а други – за групата от БЛА. По-долните подсистеми най-често са в един БЛА и са йерархично свързани (навигация, пилотиране). Нивото 4 (сътрудничество) се отнася за групата от БЛА и най-често има поведенческа (паралелна) вътрешна архитектура. Нивото 3 (управление на съвместното движение) заема междинно място и вътрешната му архитектура зависи от прилаганите методи за управление.

Голяма част от научно-техническите проблеми в нивата за пилотиране и навигация на БЛА могат да се считат за решени. При наличието на достъпни търговски продукти като апаратури за GPS спътникова навигация и цели универсални автопилоти, сензори и радиосредства (например Piccolo на фирмата Cloud Cap Technologies) оборудването на различни БЛА е значително облекчено. Не може обаче, да се счита, че създаването на комплекси за управление на БЛА е сведено до инженеринг.

Има основания да се очаква, че изграждането на горните нива на управление на БЛА ще се определя от продължаващото развитие на теорията и практиката на дистанционното извличане и обработка на сензорна информация, компютърните мрежи, изкуствения интелект и автономните системи.

Въпреки нарастващата автономност на БЛА, ролята на човека-оператор в ПУ ще се запази. Творческите способности и уменията на оператора и възможностите на автоматичното управление се допълват, а не се противопоставят. Степента на автоматизация и автономност на управлението на БЛА в различни мисии и ситуации може да е различна.

Литература:

1. Gaveney D., Sengupta R, Architecture and Application Abstractions for Multi-Agent Collaboration Projects, Proceedings of the 44th IEEE CDC, Spain, 2005.
2. Applications, concept and Technologies for Future Tactical UAVs, NATO, SCI-138, 2003.
3. Петров П., Наплатанов Д., Входно-изходни мерки за значимостта на полюсите на линейна многомерна система за автоматично управление, АИТ и АС, бр. 7, 1985.
4. Петров П., Синтез на многомерни системи за автоматично управление на БЛА, Дисертация, ЦИРАТ, 1986.
5. Стоянов Ц.Т. Система автоматического управления МДПЛА повышенной помехозащищенностью, Дисертация, Москва, 1986.

6. Стоянов Ц.Т. Метод за оптимизация на траекторното управление на летателните апарати при маршрутен полет, Сборник доклади от ЮНС "10 години катедра "Въздушен транспорт", София, 2003.
7. Стоянов Ц.Т. Метод за оптимизация автоматичното управление полета на дистанционно пилотируем летателен апарат, ЮНС ВМЕИ – Габрово, 1996.
8. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами, Москва, "Наука", 1986.
9. Kuhar J., Yang L., A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods, IEEE Trans. On Int. Transp. Systems, v. 1, No 4, 2000.
10. Cassandras C., Li W., Sensor Networks and Cooperative Control, 44th IEEE CDC, Bahamas, 2004.
11. Ryan A. and others, An Overview of Emerging Results in Cooperative UAV Control, 43rd IEEE CDC, Spain, 2005.
12. Sujit P. and others, Multi-UAV Task Allocation using Team Theory, Proceedings of the 44th IEEE CDC, Spain, 2005.
13. Girard A. and others, Border Patrol and Surveillance Missions using Multiple UAV, 44th IEEE CDC, Bahamas, 2004.
14. Franco E. and others Cooperative Control of Distributed Agents with Nonlinear Dynamics and Delayed Information Exchange: a Stabilizing Receding-Horizon Approach, Proceedings of the 44th IEEE CDC, Spain, 2005.