S E N S 2 0 0 8
Fourth Scientific Conference with International Participation
SPACE, ECOLOGY, NANOTECHNOLOGY, SAFETY
4–7 June 2008, Varna, Bulgaria

OPTIMAL COORDINATOR OF CONTROL SYSTEM FOR UNMANNED COMBAT AIR VEHICLE

Valentina Tsekova

Rakovski Defence and Staff College, Defence Advanced Research Institute
e-mail: valsof20@hotmail.com

Key words: *unmanned combat air vehicle, coordinator, statistic characteristics*

Abstract: *The unmanned combat air vehicle (UCAV) is used to attack stationary and mobile objects on the ground, in the sea and in the air. Optimal coordinator for the attacked targets is synthesised in the paper. Some statistic characteristics and signals of the objects are used.*

ОПТИМАЛЕН ИЗМЕРВАТЕЛ НА КООРДИНАТИ ЗА СИСТЕМА ЗА УПРАВЛЕНИЕ НА БЕЗПИЛОТЕН ЛЕТАТЕЛЕН АПАРАТ ОТ УДАРЕН ТИП

Валентина Цекова

ВА „Г. С. Раковски" - Институт за перспективни изследвания за отбраната
e-mail: valsof20@hotmail.com

Ключови думи: *безпилотен летателен апарат от ударен тип, координатор, статистически характеристики*

Резюме: *Безпилотните летателни апарати (БЛА) от ударен тип се използват за поразяване на стационарни и мобилни наземни, морски и въздушни цели. В представения доклад е синтезиран оптимален измервател на координатите (координатор) на атакуваните цели. За това са използвани някои от статистическите им характеристики и тези на отразените от тях сигнали.*

Въведение

През последните години се проявява голям интерес към разработването на безпилотни летателни апарати (БЛА) от ударен тип. Те могат да изпълняват както самостоятелно, така и във взаимодействие с ВВС задачи, свързани с поразяване на различни цели на противника като: командни пунктове, радиолокационни станции, свързочни възли, щабове, артилерията на огневи позиции, плавателни съдове, бронетанкова техника, летища и други важни стационарни и мобилни цели в интерес на сухопътните войски (СВ), ВВС и ВМС [6].

Ударните БЛА поразяват определена цел чрез използване на управляеми или неуправляеми ракети или чрез пряко свое попадение в нея. Ефективността на всеки боен БЛА зависи изключително много от точността на насочването му към атакуваната цел. Точността от своя страна се определя от системата му за управление (СУ), която реализира полета на БЛА по траектория в зависимост от избрания метод за насочване. Основен елемент на СУ е измервателят на координати (координатор). Той измерва координатите на атакуваната цел в координатна система, чието начало съвпада с центъра на масата на БЛА. Следователно ефективността на бойния БЛА ще зависи и от качествата на измервателя на координати.

При използване на преките методи за насочване, които имат най-проста схемна реализация и техническо изпълнение [4], координаторът е неподвижен и неговата надлъжна ос съвпада с надлъжната ос на безпилотния самолет. По този начин през цялото време на полета надлъжната ос на БЛА е насочена към целта. Системата за управление на бойния БЛА може да се разглежда като система, състояща се от координатор, който измерва ъгловото положение на целта спрямо надлъжната ос на БЛА и от безпилотен самолет, който с изпълнителните си органи и кинематичното звено отработва (отстранява) този ъгъл на разсъгласуване, стремейки се да го сведе до нула. Поради това е необходимо координаторът да определя координатите на целта с минимално възможна грешка т.е. да бъде оптимален.

При съществуващите методи за синтез и проектиране на координатори обикновено се задават характеристиките: на целите, които ще бъдат атакувани; на информационните сигнали, които ще бъдат измервани от координатора и на предполагаемите смущения. По тези данни се определя неговата структурата.

В практиката никога не се разполага с всички необходими данни, а само с налични статистически характеристики. Те обаче могат да се различават съществено от използваните в разчета, тъй като зависят от много фактори – турбулентност на средата, маневри и автоколебания на целта и БЛА, метеорологични условия, смущения от противника и др. [5]. Поради това параметрите на координатора не трябва да зависят силно от условията, при които се използва. Те трябва да се изменят автоматично, тъй като скоростта, с която трябва да се оценява приетата информация и да се взема решение, е доста по-висока от възможната за човека скорост.

Оптимален измервател на координати

Определянето на структурата и параметрите на оптималния координатор, измерващ координатите на атакуваната цел, може да бъде осъществено чрез използване на един от статистическите методи, чийто критерий за оптималност е максимумът на апостериорната вероятност [1, 5].

При този метод значението на измервания ъгъл (координати на атакуваната цел) се оценява по избрани значения на входните реализации на приетия информационен сигнал. Следователно за оценка на неизвестния параметър (измервания ъгъл) λ се приема това значение $\lambda_{изх}$, при което апостериорната вероятност има максимум.

Ако априорната вероятност на измервания ъгъл $\lambda(t)$ се означи с $P_{pr}(\lambda)$ и функцията на правдоподобие с $P[y/\lambda]$, то апостериорната вероятност ще бъде [2, 7]:

(1) $$P_{ps}(\lambda) = KP_{pr}(\lambda)P[\mathbf{y}/\lambda],$$

където

(2) $$K = \frac{1}{\int P_{pr}(\lambda)\ P[\mathbf{y}/\lambda]dt} = \text{const}\,.$$

От формула (1) се вижда, че за да се определи апостериорната вероятност, е необходимо да са известни априорното разпределение на измервания параметър и функцията на правдоподобие [3]. При определяне на априорното разпределение на измервания ъгъл трябва да се излиза от следното. Измерваният ъгъл на целта е стохастичен процес, тъй като зависи от множество случайни фактори като: курса на целта и на БЛА, маневрите на целта и БЛА, техните автоколебания, точността на прицелване на БЛА в момента на атаката, турбулентността на средата и др. Въздействието на голям брой случайни явления върху стохастичен процес довежда до неговото нормално разпределение. За това може да се приеме, че измерваният ъгъл е разпределен нормално и неговата априорна вероятност ще бъде [1]:

(3) $$P_{pr}(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\boldsymbol{\pi}\det\mathbf{R}}}\ \exp\left\{-\frac{(\lambda_{изх} - \lambda_{ср})^2}{2\mathbf{R}}\right\},$$

където $\mathbf{R} = |R(t_i,t_j)|$ - корелационна матрица; $\lambda_{ср} = \lambda_{ср1}$ ...... $\lambda_{срn}$ - вектор стълб на средното значение на измервания ъгъл; $\lambda_{изх} = \lambda_{изх1}$ ...... $\lambda_{изхn}$ - вектор стълб на измереното значение на ъгъла.

Функцията на правдоподобие ще има вида [1]:

(4) $$P[\mathbf{y}/\lambda] = K^{'}\exp\left\{\frac{1}{\mathbf{N_0}}\left[\int_0^T \mathbf{u}(t,\lambda)\mathbf{u}(t,\lambda_0)dt + \int_0^T \mathbf{u}(t,\lambda)\mathbf{n}(t)dt\right]\right\},$$

и

(5) $$K^{'} = K\exp\left\{-\frac{1}{2\mathbf{N_0}}\int_0^T\left[\mathbf{y}^2(t) + \mathbf{u}^2(t,\lambda)\right]dt\right\},$$

където К – константа, независеща от y и λ; $\mathbf{y}(t) = \mathbf{u}(t) + \mathbf{n}(t)$ – вектор ред на приеманата реализация; $\lambda_0 = \lambda_{01} \ldots\ldots \lambda_{0n}$ - вектор стълб на истинското значение на измервания ъгъл; $\mathbf{u}(t,\lambda)$ – полезен сигнал; $\mathbf{n}(t)$ – бял шум с единична спектрална плътност; $\mathbf{N}_0$ - спектрална плътност на шума; [O, T] – временен интервал, през който се извършва наблюдението.

Първият член под знака на експонентата във формула (4) представлява автокорелационна функция на приемания сигнал по измервания ъгъл, а вторият - взаимнокорелационната функция на сигнала и шума.

Строго погледнато формула (4), отнасяща се за функцията на правдоподобие, е вярна само ако измерваният ъгъл е постоянен. В практиката обикновено $\lambda(t)$ е променлив, но скоростта, с която се изменя, е много по-малка от скоростта, с която се изменят всички останали случайни променливи в приетата реализация, неподлежащи на измерване. Поради това по тях може да се извърши осредняване.

Ако интервалът от време [0, T], през който се извършва наблюдението, се избере да бъде значително по-голям от времето на корелация на най-бавните случайни променливи във входната реализация y(t) и същевременно - значително по-малък от интервала, в който измерваният ъгъл $\lambda(t)$ се изменя, то функцията на правдоподобие може да се разглежда като функция от “замразен” в този интервал от време ъгъл. При това нейният логаритъм може да бъде апроксимиран със своето квадратично разложение относно всяка точка, която със сигурност е близка до стойността на измервания ъгъл. Такава точка може да съответства например на средното значение на измервания ъгъл $\lambda(t)$. Следователно апроксимацията на функцията на правдоподобието може да бъде записана по следния начин:

$$\begin{aligned} &\mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right] = \exp\Big\{\ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial\lambda_{\text{изх}i}} \ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right](\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}}) + \\ &+ \frac{1}{2}\frac{\partial^2}{\partial\lambda_{\text{изх}i}\partial\lambda_{\text{изх}j}} \ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right](\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}})^2\Big\}. \end{aligned} \tag{6}$$

При тази апроксимация са взети само три члена, тъй като измерването може да се счита за достатъчно точно и следователно върхът на функцията на правдоподобие е достатъчно тесен. Ако приемем обозначенията:

$$\mathbf{Z} = \frac{\partial \ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right]}{\partial\lambda_{\text{изх}i}} = \mathrm{Z}_i \text{ - вектор стълб} \tag{7}$$

и

$$\mathbf{A} = -\frac{\partial^2 \ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right]}{\partial\lambda_{\text{изх}i}\partial\lambda_{\text{изх}j}} = \mathrm{A}_{ij} \text{ - квадратна матрица,} \tag{8}$$

то след заместването им в (6) се получава, че функцията на правдоподобие е равна на:

$$\mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right] = \exp\left\{\ln \mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right] + \mathbf{Z}(\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}}) - \frac{1}{2}\mathbf{A}(\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}})^2\right\}. \tag{9}$$

За апостериорната вероятност на измервания ъгъл се получава следното равенство след заместване на (3) и (9) във формула (1):

$$\begin{aligned} &\mathrm{P}_{ps}(\lambda_{\text{изх}}) = \frac{\mathrm{P}\left[\mathbf{y}(t),\lambda_{\text{ср}}\right]}{\sqrt{2\boldsymbol{\pi}\det\mathbf{R}}}\,\mathrm{x} \\ &\mathrm{x}\,\exp\left\{\mathbf{Z}(\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}}) - \frac{1}{2}\mathbf{A}(\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}})^2 - \frac{(\lambda_{\text{изх}} - \lambda_{\text{ср}})^2}{2\mathbf{R}}\right\}. \end{aligned} \tag{10}$$

Тъй като логаритъмът е функция, която нараства монотонно от своя аргумент, то максимумът на апостериорната вероятност съвпада с максимума на логаритъма й. Поради това ще се търси максимумът на следната функция:

(11) $$\ln P_{ps}(\lambda_{изх}) = \ln \frac{P\lfloor \mathbf{y(t)}, \lambda_{ср} \rfloor}{\sqrt{2\pi \det \mathbf{R}}} + \mathbf{Z(}\lambda_{изх} - \lambda_{ср}) - \frac{1}{2}(\mathbf{A} + \frac{1}{\mathbf{R}})(\lambda_{изх} - \lambda_{ср})^2 .$$

При достатъчно големи отношения на сигнала към шума апостериорната вероятност има максимум, който с голяма вероятност съвпада с истинското значение на измервания параметър. Отношението на сигнала към шума трябва да бъде достатъчно голямо, но не много голямо, тъй като в такъв случай отпада задачата за оптимизация. Поради това като оптимална оценка на измервания ъгъл може да бъде взет коренът на следното диференциално уравнение:

(12) $$\frac{\partial \ln P_{ps}(\lambda_{изх})}{\partial \lambda_{изхi}} = 0 .$$

След полагане на (11) в (12) се получава диференциалното уравнение:

(13) $$\frac{\partial \ln P_{ps}(\lambda_{изх})}{\partial \lambda_{изхi}} = \mathbf{Z} - \mathbf{C}(\lambda_{изх} - \lambda_{ср}) = 0 ,$$

където **C = A + 1/R** - квадратна матрица, а **1** – единична матрица.

От полученото равенство (13) се вижда, че измереният ъгъл е равен на

(14) $\lambda_{изх} = \mathbf{C^{-1} Z} + \boldsymbol{\lambda_{ср}}$ **,**

където $\mathbf{C^{-1}}$ се определя от следното уравнение:

(15) $$\mathbf{C^{-1}(AR + 1) = R} .$$

За облекчаване на работата се преминава от матричен запис към запис в разгърната форма на уравненията (14) и (15):

(16) $$\lambda_{изхn} = \sum_{k=1}^{n} C^{-1}_{nk} Z_k + \lambda_{срn}$$

и

(17) $$C^{-1}_{nk} + \sum_{i=1}^{n} C^{-1}_{ni} \sum_{j=1}^{n} A_{ij} R_{ik} = R_{nk} .$$

Равенството (17) може да бъде опростено силно при условие, че измерваният параметър λ(t**)** се изменя бавно. Тогава матрицата **A** е диагонална, като първото диференциране на логаритъма на функцията на правдоподобие по $\lambda_{изхi}$ се извършва само на подинтервала около t_i , а второто - по $\lambda_{изхj}$, образуващо матрицата на подинтервала около t_j. Трябва да се отбележи, че матрицата е различна от нула само при съвпадащи времена т.е. при $t_i = t_j$. Тогава вместо (17) може да се запише:

(18) $$C^{-1}_{nk} + \sum_{i=1}^{n} C^{-1}_{ni} A_i R_{ik} = R_{nk} .$$

За синтезиране на структурната схема на оптималния координатор е необходимо да се получат непрекъснати аналози на съотношенията (16) и (18). За целта може да се извърши пределен преход, считайки че стъпката на дискретността се стреми към нула, т.е. $\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \rightarrow 0$, а броят на стъпките се стреми към безкрайност, т.е. $m \rightarrow \infty$. За извършване на прехода е необходимо да се определи как матриците **A,** $\mathbf{C^{-1}}$ и **R** се стремят към граница. За члена, намиращ се в n – тия ред и k – я стълб в корелационната матрица **R,** може да бъде записано $R_{nk} = R(t_n,t_k)$.

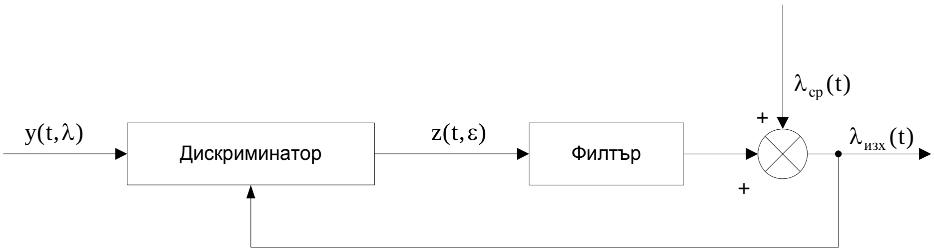
Ако се обозначи $t_n = t$ и $t_k = \tau$, то $R_{nk} = R(t,\tau)$. Тъй като и трите матрици имат еднакъв характер, то $C_{nk}^{-1} = C^{-1}(t_n,t_k) = C^{-1}(t,\tau)$ и $A_{nk} = A(t_n,t_k) = A(t,\tau)$. По такъв начин за измервания ъгъл се получава:

(19) $$\lambda_{изх}(t) = \lim_{\substack{\Delta t \to 0,\\ m \to \infty}} \sum_{k=1}^{m} C_{nk}^{-1} Z_k \Delta t_i + \lambda_{ср}(t) = \int_{t_0}^{t} C^{-1}(t,\tau) Z(\tau) d\tau + \lambda_{ср}(t).$$

В този случай за филтъра се получава

(20) $$C^{-1}(t,\tau) + \int_{t_0}^{t} C^{-1}(s,\tau) A(s) R(s,\tau) ds = R(t,\tau).$$

На базата на полученото интегрално уравнение (19) може да бъде построена следната блокова схема на оптималния измервател на координати, показана на фиг. 1.



Фиг. 1. Оптимален измервател на координати

Оптималният координатор се състои от дискриминатор и филтър. На входа на координатора постъпва информационният сигнал $y(t, \lambda)$, който преминава през дискриминатора, измерващ разсъгласуването. Изходният сигнал на дискриминатора е пропорционален на величината на разсъгласуването. Той постъпва на входа на филтъра (изглаждащи вериги). Към сигнала на изхода на филтъра се прибавя средното значение на измервания ъгъл $\lambda_{ср}(t)$. Така се получава оптималната оценка на измерваната ъглова координата на целта $\lambda_{изх}(t)$, към която е насочен ударния БЛА.

Заключение

Използваният в доклада принцип на максимума на апостериорната вероятност позволява да бъде синтезиран оптимален измервател на координати за ударен БЛА. Този подход за определяне на параметрите на координатора може да се прилага при проектиране на нови ударни БЛА, когато не са известни в достатъчна степен характеристиките на целите и на безпилотния самолет и условията на тяхното бойно използване, а се разполага само с някои техни статистически характеристики.

Получените формули за параметрите на оптималния координатор показват, че той трябва да притежава параметри, които да не зависят силно от ситуациите и условията, при които се използва ударния БЛА. При това измененията на параметрите на координатора трябва да стават без участието на човек, тъй като скоростта, с която трябва да се оценява приетата информация и да се взема решение, е значително по-висока от възможната за човека скорост.

Литература:

1. Б а к у т П. А., И. А. Большаков и др. Вопросы статистической теории радиолокации, М.: Советское радио, 1964.
2. В е н т ц е л ь Е. С. Теория вероятностей, М.: Наука, 1964.
3. И в ч е н к о Г. И., Ю. И. Медведев. Математическая статистика, М.: Высшая школа, 1984.
4. П о п о в Х. С., Е. Г. Цеков. Оптимален оптически координатор на самонасочващи се ракети. Доклад, Сборник трудове на ВА “Г.С.Раковски”, 1975.
5. П о т р я г и н Л. С. Математическая теория оптимальных процессов, М.: Фитматгиз, 1961.
6. Ц е к о в а В. Т. Безпилотни летателни апарати – настояще и бъдеще. Доклад, Сборник доклади от юбилейна научна конференция на ВА “Г.С.Раковски”, стр.226-234, 2007.
7. Ц е к о в а В. Т., Е. Г. Цеков. Оптимален следящ координатор за система за управление на самонасочващ се БЛА. Доклад, Сборник доклади от научна конференция с международно участие на ВТУ “Т. Каблешков”, стр.493 – 496, 2003.