УДК 621.396: 681.5 DOI: 10.30748/nitps.2019.35.19

С.В. Герасимов

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ПОХИБКИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ КРИЛАТИХ РАКЕТ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Показана роль крилатих ракет при веденні бойових дій. Наведені особливості застосування крилатих ракет. Обґрунтовано, що під час польоту крилатою ракетою за визначеним маршрутом необхідно коригувати дані навігаційної системи. Знання цього питання дозволить аналізувати та обґрунтовувати тактико-технічні характеристики засобів протиповітряної оборони. Визначені недоліки існуючих навігаційних систем при роботі у режимі реального часу польоту. Пропонується для ефективного ураження цілей крилатими ракетами із заздалегідь невизначеним розташуванням в умовах застосування противником засобів протиповітряної оборони розробити модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах в умовах невизначеності. Визначені умови досягнення високої точності визначення параметрів навігації та дисперсії похибок визначення координат цілей системами управління крилатих ракет при польоті.

Ключові слова: *навігаційна система, крилата ракета, визначення координат, точність, реальний час польоту, невизначеність.*

Вступ

Постановка проблеми. Останні збройні конфлікти у світі та результати проведення операції Об’єднаних сил на сході України довели роль і значення безпілотних літальних апаратів у досягненні як часткових завдань, так і мети операції при веденні бойових дій. У той же час підвищується рівень застосування крилатих ракет для ураження найбільш важливих цілей противника. Особливостями застосування крилатих ракет є низький ступінь виявлення засобами протиповітряної оборони, висока точність ураження цілей, можливість точного слідування визначеним повітряним коридором до цілі, відносно низька швидкість польоту [1–6]. При цьому слід враховувати, що, зазвичай, маршрут польоту необхідно коригувати з використанням точок прив’язки до місцевості. Це обумовлює втрату визначеного курсу крилатої ракети при польоті над місцевістю з незмінним рельєфом (пустеля, водна поверхня тощо) [6–12]. Тому актуальним є дослідження питання функціонування навігаційних систем крилатих ракет в умовах відсутності додаткових орієнтирів щодо маршруту польоту (в умовах невизначеності). Знання цього питання дозволить аналізувати та обґрунтовувати тактико-технічні характеристики засобів протиповітряної оборони.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для надійного ураження цілей розроблені та застосовуються високоточні засоби ураження, що входять до складу різних класів повітряних ударних комплексів і систем [1–13]. Так, широко відомі високоточні повітряні засоби ураження, що самонаводяться на кінцевій ділянці маршруту польоту [2; 7; 10–11]. При цьому головною задачею наведення такої крилатої ракети є виведення її у потрібний район. Недоліком таких крилатих ракет є неспроможність здійснювати розпізнавання цілей у режимі реального часу, визначати та здійснювати ураження цілей при зміні навколишнього середовища (відмінного від введеного при формуванні польотного завдання) [2; 9].

Пропонується для ефективного ураження цілей крилатими ракетами в умовах застосування противником засобів протиповітряної оборони провести аналіз особливостей функціонування навігаційних систем в умовах невизначеності [9; 11], за результатами якого розробити модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах в умовах невизначеності.

Мета статті – розробка моделі оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу

Складна структура похибок навігаційних систем як функцій часу, неповторність їх реалізацій викликана впливом цілої низки невраховуваних факторів, які вимагають використання для їх опису моделей випадкових функцій [14–15].

В основі теоретично-імовірнісного підходу покладено поняття множини Ω елементарних подій

$\omega \in \Omega$, на підмножинах (подіях) $A \subset \Omega$ яких задані ймовірності $P(A)$ $(0 \le P(A) \le 1)$. Тут А – подія, що означає реалізацію елементарної події $\omega \in A$. При цьому

$$P(\Omega) = 1 . \qquad (1)$$

Під випадковою величиною *X* будемо розуміти функцію $X(\omega)$, що приймає значення на числовій осі залежно від випадкового результату ω.

Випадкова величина *X* повністю задається щільністю ймовірності $f(x)$, фізичний зміст якої визначається виразом [16–17]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = P(\omega \in A), \qquad (2)$$

де *A* – підмножина ω, при якій *X* приймає значення в інтервалі $[x,\ x + dx]$.

Рівність (2) можна записати в еквівалентному вигляді:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = P[x \le X < x + dx],$$

причому з (1) виходить:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 . \qquad (3)$$

При описі випадкової величини використовують перші два моменти щільності $f(x)$ – математичне очікування $m_x = M(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx$ і дисперсія $\sigma_x^2 = D(x) = M\left[(X - m_x)^2\right] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)^2 f(x)dx$.

Символ $M[\psi(X)]$, що позначає операцію знаходження математичного очікування функції $\psi(X)$, визначається рівністю [18–19]:

$$M[\psi(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) f(x)dx . \qquad (4)$$

Інтеграл береться за всіх можливих значеннях *X* з використанням щільності $f(x)$ і в силу (2) еквівалентний осередненому $\psi(X)$ за множиною можливих результатів $\omega \in \Omega$ з урахуванням заданих для підмножин *A* ймовірностей $P(A)$. Це пояснює застосовуваний для операції математичного очікування термін "осереднення за множиною реалізацій випадкової величини *X*".

Для двох випадкових величин *X* і *Y* вводимо двовимірну щільність, що задається рівністю

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,\ y)dxdy = P(x < X \le x + dx,\ y < Y \le y + dy),$$

причому справедливо представлення

$$f(x,\ y) = f(x) f(y/x) = f(y) f(x/y), \qquad (5)$$

де $f(x/y), f(y/x)$ – умовна щільність випадкової величини *X* при відомому значенні іншої випадкової величини *Y* = *y* (при відомій *X* = *x*). Умовна щільність інтерпретується рівністю, що використовують умовну ймовірність

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x/y)dx = P(x < X \le x + dx / Y = y).$$

При заданій двовимірній щільності $f(x, y)$ отримання одновимірної щільності $f(x)$ забезпечується в силу співвідношення

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y)dy . \qquad (6)$$

Дійсно, підстановка виразу (5) і використання рівності (3), справедливого, природно, і для умовної щільності $f(y/x)$, доводить (6).

При описі системи двох випадкових величин за допомогою перших двох моментів до вже введених математичного очікування та дисперсії величин *X* і *Y* додається кореляційний момент

$$\begin{aligned} K_{xy} &= M\left[(X - m_x)(Y - m_y)\right] = \\ &= \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} (x - m_x)(y - m_y)dxdy. \end{aligned} \qquad (7)$$

Помітимо, що рівність $K_{xy} = 0$ говорить про некорельованість випадкових величин *X* і *Y*, рівності $f(x/y) = f(x)$; $f(y/x) = f(y)$ – про їх незалежність.

Розгляд системи двох випадкових величин легко узагальнюється на випадок *n*-мірного випадкового вектора *X* з *n*-мірною щільністю $f(x) = f(x_1, ..., x_r)$. Співвідношення типу (5) у цьому випадку розуміється як n-кратний інтеграл при $dx = dx_1, ..., dx_i, ..., dx_r$. За другий момент виступає коваріаційна матриця

$$\begin{aligned} P_x &= M\left[(X - M(X))(X - M(X))^T\right] = \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 K_{x_1x_2} & \cdots & K_{x_1x_r} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ K_{x_rx_1} K_{x_rx_2} & \cdots & \sigma_{x_r}^2 \end{pmatrix}. \end{aligned} \qquad (8)$$

З (7) випливає $K_{x_ix_j} = K_{x_jx_i}$, тоді відзначимо симетрію матриці P_x (тобто $P_x^m = P_x$).

Ще одна властивість коваріаційної матриці – її невід'ємна визначеність, що задається нерівністю для квадратичної форми:

$$a^m P_x a \ge 0 , \qquad (9)$$

де a – довільний вектор (матриця-стовпець), відмінний від нульового. Нерівність (9) можна елементарно довести обчисленням дисперсії випадкової величини $Y = a^m X$, де X – вихідний випадковий вектор.

Проаналізуємо основні властивості матриці такого типу. Нехай для симетричної матриці A виконується нерівність

$$a^m Aa \geq 0 . \qquad (10)$$

Будемо використовувати для невід'ємної визначеної матриці умовну нерівність $A \geq 0$.

У разі, якщо нерівність в (10) виконується строго, тобто $a^m Aa > 0$, матриця A – позитивно визначена, що позначається нерівністю $A > 0$.

Зазначимо без доведення на можливість подання будь-якої симетричної матриці у вигляді [20]:

$$A = U^m diag\left(\lambda_i\right)U , \qquad (11)$$

де U – ортогональна матриця, що має властивість $U^{-1} = U^m$ або

$$U^m U = E = diag\left(1\right); \qquad (12)$$

$diag\left(\lambda_i\right)$ – діагональна матриця з елементами λ_i, $i = \overline{1,r}$; λ_i – завжди дійсні власні числа матриці A, що представляють собою результат характеристичного рівняння $\left|\lambda E - A\right| = 0$|.

Символ $\left|B\right|$ означає визначник матриці *B.*

Покажемо тепер, що з нерівності $A \geq 0$ слідує нерівність:

$$\lambda_i \geq 0 , \; i = \overline{1,r} . \qquad (13)$$

Для цього побудуємо квадратичну форму (10), використовуючи представлення (11). Ясно, що при $A > 0$ маємо $\lambda_i > 0$, $i = \overline{1,r}$.

Легко отримати для $A \geq 0$ такі властивості: діагональні елементи a_{ii} матриці А невід'ємні. Дійсно, з (11–12) маємо:

$$\sum_{i=1}^{r} \lambda_i u_{ij}^2 \geq 0; \qquad (14)$$

де u_{ij} – елементи матриці U на перетині i-го рядка j-го стовпчика; слід матриці A додатній. Це випливає з визначення сліду матриці та нерівності (14):

$$Sp\left(A\right) = \sum_{i=1}^{r} a_{ii} \geq 0 . \qquad (15)$$

Введемо позитивно визначену матрицю

$$\sqrt{A} = U^T diag\left(\sqrt{\lambda_i}\right)U .$$

Тоді легко встановити з використанням (12) рівності, що приводить до визначеної матриці

$$A = \sqrt{A}\sqrt{A} . \qquad (16)$$

Подібним чином доводиться невід'ємна визначеність матриць

$$A^{-1} = U^T diag\left(\frac{1}{\lambda_i}\right)U \geq 0 \qquad (17)$$

і

$$A^2 = U^T diag\left(\lambda_i^2\right)U \geq 0 . \qquad (18)$$

При позитивній визначеності матриці $A > 0$ нерівності (14–18) стають строгими нерівностями. Один із способів отримання невід'ємно визначеної матриці дається рівністю [20]:

$$A = BB^T , \qquad (19)$$

де В – будь-яка матриця. Якщо ранг B максимальний, маємо $A > 0$.

З (19) при невід'ємно визначеній матриці C з використанням (16) отримаємо:

$$A = BCB^T = B\sqrt{C}\left(B\sqrt{C}\right)^T \geq 0 , \qquad (20)$$

причому при $C > 0$ і B максимального рангу маємо $A > 0$.

Отримане співвідношення (20) представляє модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет при відсутності невизначеності. Беручи до уваги те, що невизначеність основних факторів навігаційних систем носить стохастичних характер, викладемо основні властивості та порядок урахування випадкових процесів у сучасних інерційних навігаційних системах крилатих ракет.

Випадковий процес $X\left(t\right)$ (другий аргумент при запису опускаємо) визначається завданням системи випадкових величин $X\left(t_1\right)$, ..., $X\left(t_n\right)$, отриманих при фіксації набору різних значень аргументу t. Опис процесу полягає в завданні n-мірної щільності $f\left(x_1, x_2, ..., x_n; t_1, ..., t_n\right)$ при будь-якому n.

Для стаціонарних процесів виконується

$$f\left(x_1, x_2, ..., x_n; t, t+\tau_1, ..., t+\tau_n\right) =$$
$$= f\left(x_1, x_2, ..., x_n; \tau_1, ..., \tau_{n-1}\right),$$

де τ_1, ..., τ_{n-1} – інтервали на осі часу між відповідними точками фіксації аргументу. Ясно, що одномірна щільність таких процесів не залежить від t: $f\left(x; t\right) = f\left(x\right)$, а для двовимірної щільності маємо:

$$f\left(x_1, x_2; t_1, t_2\right) = f\left(x_1, x_2; t_2 - t_1\right) = f\left(x_1, x_2; \tau\right).$$

Для стаціонарних процесів отримаємо:

$$\left\{\begin{array}{c} m_x\left(t\right) = m_x; \\ \sigma_x^2\left(t\right) = \sigma_x^2; \\ K_x\left(t_1,t_2\right) = M\left[\dfrac{\left(X\left(t_1\right) - m_x\right)}{\left(X\left(t_2\right) - m_x\right)^{-1}}\right] = K_x\left(\tau\right). \end{array}\right. \qquad (21)$$

Процеси, які мають властивості (21), тобто постійність математичного очікування та дисперсії й залежність кореляційної функції (кореляційним моментом двох значень процесу при t, що дорівнює t_1 і t_2) від інтервалу $\tau = t_2 - t_1$, класифікують як процеси, що стаціонарні в широкому сенсі.

Використання для опису випадкових величин і процесів тільки їх перших двох моментів виявляється вичерпним, якщо їх щільність гауссова, або нормальна, тобто коли для n-мірного вектора X маємо:

$$f(x) = \frac{\exp\left[-\frac{(x-m_x)^T P_x^{-1}(x-m_x)}{2}\right]}{\sqrt{(2\pi)^n}\sqrt{|P_x|}}, \quad (22)$$

де m_x – математичне очікування вектора X (матриця розміром [$n \times 1$]); $|P_x|$ – визначник коваріаційної матриці P_x; P_x^{-1} – матриця, зворотна коваріаційній.

При практичному визначенні характеристик випадкового процесу деякі переваги мають стаціонарні процеси, що мають ергодичну властивість [19]. При наявності цієї властивості маємо:

$$\lim_{T\to\infty} M\left[\frac{1}{T}\int_0^T X^n(t)\,dt - M\left(X^n\right)\right]^2 = 0. \quad (23)$$

Рівність (23) відкриває можливість при визначенні моментів $X(t)$, тобто значень $M\left(X^n\right)$, замінити усереднення за множиною розподілених за часом єдиною реалізацією $x(t)$ нескінченною довжиною процесу $X(t)$.

Введемо позначення

$$\overline{X_T^n} = \frac{1}{T}\int_0^T X^n(t)\,dt = 0 \quad (24)$$

і зауважимо, що

$$M\left[\overline{X_T^n}\right] = M\left[X^n\right], T \to \infty. \quad (25)$$

З використанням нерівності Чебишева [20]:

$$P\left[\left|\overline{X_T^n} - M\left[X_T^n\right]\right| \ge \varepsilon\right] \le \frac{M\left[\overline{X_T^n} - M\left[X^n\right]\right]^2}{\varepsilon^2},$$

тоді для ергодичного процесу $X(t)$ отримаємо:

$$\lim_{T\to\infty} P\left[\left|\overline{X_T^n} - M\left[X_T^n\right]\right| \ge \varepsilon\right] = 0$$

для любого $\varepsilon > 0$.

З урахуванням (24–25) маємо:

$$M\left[\overline{X_T^n} - M\left(X_T^n\right)\right]^2 = M\left[\frac{1}{T}\int_0^T\left(X^n(t) - M\left(X^n\right)\right)dt\right]^2 =$$

$$= \frac{1}{T^2}\int_0^T\int_0^T K_{x^n}(u-v)\,du\,dv,$$

де $K_{x^n} = M\left[\left(x^n(u) - M\left(X^n\right)\right)\left(x^n(v) - M\left(X^n\right)\right)\right]$ – кореляційна функція процесу $X^n(t)$.

Введення змінної $\tau = u - v$ запишемо:

$$M\left[\overline{X_T^n} - M\left(X_T^n\right)\right]^2 = \frac{2}{T}\int_0^T\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)K_{x^n}(\tau)\,d\tau. \quad (26)$$

З чого випливає, що для ергодичності процесу $X(t)$ при заданому n необхідно та достатньо виконання рівності:

$$\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_0^T\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)K_{x^n}(\tau)\,d\tau = 0. \quad (27)$$

Ця рівність, що визначає можливий вид кореляційної функції ергодичного процесу $X(t)$, задовольняється при

$$\left|\int_0^T K_{x^n}(\tau)\,d\tau\right| < \infty. \quad (28)$$

Достатньою умовою є також рівність:

$$\lim_{\tau\to\infty} K_{x^n}(\tau)\,d\tau = 0. \quad (29)$$

Умови (28) і (29) при $n = 1$ представляються істинними: наприклад, рівність (29) говорить про втрату кореляції значень $X(t)$ при далеко віддалених значеннях аргументу. При $n \ge 2$ в аналізі умови (27) беруть участь моменти не тільки $X(t)$ до другого порядку, а й старші. При гауссовому процесі $X(t)$ труднощів не виникає через можливість виразити старші моменти процесу $X(t)$ через його перші два моменти [20]:

$$K_{x^2}(\tau) = 2K_x^2(\tau). \quad (30)$$

Легко бачити, що в гауссівському випадку при виконанні умови (29) для $n = 1$ виявляється виконаним умова ергодичності та для $n = 2$, що відкриває можливість при визначенні дисперсії $X(t)$ замінити усереднене X^2 за множиною усередненого за часом будь-яку реалізацію $X^2(t)$.

На жаль, ергодична властивість, що має асимптотичний характер, формулу (23), не гарантує в загальному випадку близькість оцінок математичного очікування та кореляційної функції процесу, отриманих на кінцевому інтервалі часу, до істинних значень цих характеристик.

В окремому випадку гауссівського процесу можна переконатися в існуванні більш сильної властивості, коли оцінка, наприклад, дисперсії процесу з нульовим середнім

$$\hat{\sigma}_x^2(t;\Theta) = \frac{1}{\Theta}\int_{t-\Theta}^{t} X^2(\tau)\,d\tau, \quad (31)$$

відповідним вибором кінцевого значення Θ може бути наближена заданим чином до істинного значення дисперсії.

Точність наближення оцінимо величиною

$$D\left(\hat{\sigma}_x^2\right) = M\left[\hat{\sigma}_x^2(t;\Theta) - \sigma_x^2\right]^2.$$

З використанням (30) і (31) маємо після заміни змінних

$$D\left(\hat{\sigma}_x^2\right) = M\left[\frac{1}{\Theta}\int\limits_{t-\Theta}^{t}\left(X^2(\tau) - \sigma_x^2\right)d\tau\right]^2 = \\ = \frac{2}{\Theta}\int\limits_0^{\Theta}\left(1 - \frac{\tau}{\Theta}\right)K_x^2(\tau)\,d\tau. \quad (32)$$

Отриманий вираз (32) з урахуванням співвідношень (26–31) представляє модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет в умовах невизначеності.

Приймемо за запобіжну точність оцінки дисперсії процесу безрозмірну величину γ, пов'язану з дисперсією оцінки співвідношення $\gamma = \dfrac{D\left(\hat{\sigma}_x^2\right)}{\sigma_x^4}$.

Тоді для γ отримаємо:

$$\gamma = \frac{2}{\Theta}\int\limits_0^{\Theta}\left(1 - \frac{\tau}{\Theta}\right)k_x^2(\tau)\,d\tau,$$

де $k_x(\tau) = \dfrac{K_x(\tau)}{\sigma_x^2}$ – нормована кореляційна функція процесу $X(t)$.

Приймемо за інтервал кореляції процесу $X(t)$ величину

$$\tau_k = \int\limits_0^{\infty} k_x^2(\tau)\,d\tau.$$

Тоді при $\Theta >> \tau_k$ знайдемо:

$$\gamma \approx \frac{2\tau_k}{\Theta}. \quad (33)$$

Співвідношення (33) свідчить про досягнення високої точності визначення дисперсії процесу лише при $\Theta >> \tau_k$.

Істотно, що при цьому $\hat{\sigma}^2(t;\Theta)$ близька до $\dfrac{1}{T}\int\limits_0^T \hat{\sigma}^2(t;\Theta)\,dt$ при кінцевому $T >> \Theta$. З урахуванням цього факту зауважимо, що інтерес до гауссівських ергодичних процесів, що має посилену ергодичну властивість, викликан тим, що в навігаційних системах, як правило, є одинична реалізація кінцевої протяжності, стосовно якої повинен бути синтезований алгоритм обробки інформації, що забезпечує високу якість навігації.

У разі гауссівських ергодичних сигналів забезпечується визначення характеристик точності навігації, середніх за час T польоту при $T >> 0$.

Разом з тим у складі похибок навігаційної системи містяться компоненти, що не мають ергодичних властивостей і мають, наприклад, вид відомих функцій часу з параметрами, що змінюються від одного запуску системи до іншого. У цьому випадку повне розв'язання задачі аналізу точності навігації при використанні одиничної реалізації похибки неможливо; ця реалізація може бути використана для виділення та визначення властивостей ергодичної складової з оцінкою рівня неергодичної складової за множини запусків системи.

Зазначимо, що питання про змістовне введення імовірнісного простору має не тільки методичний характер, що забезпечує математичну коректність аналізу, але й розкриває зміст усереднених характеристик точності, що мають використовуватися в завданнях аналізу та синтезу навігаційних систем крилатих ракет.

Висновки

Встановлено, що навігаційні системи є основою сучасних крилатих ракет. Основна перевага їх у тому, що вони повністю автономні й не вимагають будь-якої інформації ззовні. Підвищення точності навігації крилатих ракет пов'язано з удосконаленням як вимірювальної апаратури, так і математичного забезпечення розв'язання задач обробки інформації.

Разом з тим практична реалізація методів інерціальної навігації пов'язана зі значними труднощами, викликаними необхідністю забезпечити високу точність і надійність роботи всіх пристроїв при заданих вагах і габаритах.

Із аналізу особливостей функціонування навігаційних систем в умовах невизначеності встановлено, що питання про змістовне введення імовірнісного простору має не тільки методичний характер, що забезпечує математичну коректність аналізу, але і розкриває зміст усереднених характеристик точності, що мають використовуватися в завданнях аналізу та синтезу навігаційних систем. Для цього розроблена модель оцінки похибки обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет в умовах невизначеності. Із застосуванням запропонованої моделі отримана умова досягнення високої точності обробки інформації у навігаційних системах крилатих ракет в умовах невизначеності. Отже, мета статті досягнута.

Список літератури

1. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля / В.В. Каретников, И.В. Пащенко, А.И. Соколов, И.Г. Кузнецов // Морская радиоэлектроника. – 2015. – № 2 (52). – С. 24-27.

2. Дмитриевский А.А. Внешняя баллистика / А.А. Дмитриевский, Л.Н. Лысенко. – М.: Машиностроение, 2005. – 608 с.

3. Rogers R.M. Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems / R.M. Rogers. – AIAA Educational Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, VA, 2003.

4. Grewal M.S. Global Positioning Systems, Inertial navigation and integration / M.S. Grewal, L.R. Weill, A.P. Andrews. – Wiley, New York, 2007.

5. Алешин Б.С. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б.С. Алешин, К.К. Веременко. – М.: Наука, 2006. – 424 с.

6. Global maritime distress and safety system (GMDSS) / Admiralty list of radio signals // Vol 5. NP 285. – 2000. – 338 p.

7. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии / Под общ. ред. А.А. Бобрикова. – СПб.: Галлея Принт, 2006. – 424 с.

8. Басов В.Г. Измерительные сигналы и функциональные устройства их обработки / В.Г. Басов. – Минск: БГУИР, 119 с.

9. Моисеев Г.В. Основы теории создания и применения имитационных авиационных комплексов: монография / Г.В. Моисеев, В.С. Моисеев. – М.: Издательский центр, 2013. – 208 с.

10. Харук А.И. Боевая авиация XXI века: Военная энциклопедия XXI / А.И. Харук. – М., 2011. – 304 с.

11. Павлушенко М. Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза / М. Павлушенко, Г. Евстафьев, И. Макаренко. – М.: Права человека, 2005. – 611 с.

12. Дрожжин А. Воздушные войны в Ираке и Югославии / А. Дрожжин, Е. Алтухов. – М.: Техника молодежи, 2008. – 80 с.

13. Средства поражения и боеприпасы / Под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ, 2008. – 984 с.

14. Friedman Norman. The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System / Norman Friedman. – Naval Institute Press, 2006. – 858 p.

15. Страхов А.Ф. Автоматизированные измерительные комплексы / А.Ф. Страхов. – М.: Энергоиздат, 1990. – 216 с.

16. Gerasimov S.V. Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities / S. Gerasimov, Iu. Shapran, M. Stakhova // Системи обробки інформації. – 2018. – № 1 (152). – С. 148-154. https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.21.

17. Theoretical basic concepts for formation of the criteria for measurement signals synthesis optimality for control of complex radio engineering systems technical status / A.Iu. Bratslavska, S.V. Gerasimov, G.M. Zubritskii, O.I. Timochko, O.O. Timochko // Системи обробки інформації. – 2017. – № 5 (151). – С. 151-157. https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.20.

18. Qriffiths B.E. Optimal control of jump-linear gaussian systems / B.E. Qriffiths, K.A. Loparo // Int. J. of control. – 1985. – Vol. 42, No. 4. – P. 791-819.

19. Герасимов С.В. Методика обгрунтування номенклатури параметрів контролю радіотехнічних систем і призначення їх допустимих відхилень / С.В. Герасимов, В.В. Грідіна // Системи обробки інформації. – 2018. – № 2 (153). – С. 159-164. https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20.

20. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.

References

1. Karetnikov, V., Pashchenko, I., Sokolov, A. and Kuznetsov, I. (2015), “K voprosu postroyeniya avtomatizirovannoy sistemy monitoringa parametrov vysokotochnogo navigatsionnogo polya” [To the question of constructing an automated system for monitoring the parameters of a high-accuracy navigation field], *Marine Radio Electronics*, No. 2 (52), pp. 24-27.

2. Dmitriyevskiy, A. and Lysenko, L. (2005), “*Vneshnyaya ballistika*” [*External ballistics*], Mashinostroyeniye, Moscow, 608 p.

3. Rogers, R.M. (2003), *Applied Mathematics in Integrated Navigation Systems*, AIAA Educational Series, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, Reston, VA.

4. Grewal, M.S., Weill, L.R. and Andrews, A.P. (2007), *Global Positioning Systems, Inertial navigation and integration*, Wiley, New York.

5. Aleshin, B. and Veremeenko, K. (2006), “*Oriyentatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob"yektov: sovremennyye informatsionnyye tekhnologii*” [*Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies*], Science, Moscow, 424 p.

6. Global maritime distress and safety system (GMDSS) (2000), *Admiralty list of radio signals*, Vol. 5, NP 285, 338 p.

7. Bobrikov, A. (2006), “*Otsenka effektivnosti ognevogo porazheniya udarami raket i ognem artillerii*” [*Evaluation of the effectiveness of fire damage by strikes of rockets and artillery fire*], Galleya Print, Saint Petersburg, 424 p.

8. Basov, V. (2013), “*Izmeritelnye sygnaly i funkcional’nye ustroistva ih obrabotki*” [*Measuring calls and functional units of their treatment*], BGUIR, Minsk, 119 p.

9. Moiseyev, G. and Moiseyev, V. (2013), “*Osnovy teorii sozdaniya i primeneniya imitatsionnykh aviatsionnykh kompleksov*” [*Fundamentals of the theory of creation and application of simulation aviation systems*], Publishing Center, Moscow, 208 p.

10. Kharuk, A. (2011) “*Boyevaya aviatsiya XXI veka: Voyennaya entsiklopediya XXI*” [*Military aviation of the XXI century: Military Encyclopedia XXI*], Moscow, 304 p.

11. Pavlushenko, M., Yevstaf'yev, G. and Makarenko, I. (2005), “*Bespilotnyye letatel'nyye apparaty: istoriya, primeneniye, ugroza*” [*Unmanned aerial vehicles: history, application, threat*], Human rights, Moscow, 611 p.

12. Drozhzhin, A. and Altukhov, Ye. (2008), “*Vozdushnyye voyny v Irake i Yugoslavii*” [*Air wars in Iraq and Yugoslavia*], Technique of youth, Moscow, 80 p.

13. Selivanov, V. (2008), “*Sredstva porazheniya i boyepripasy*” [*Means of destruction and ammunition*], Publishing House of Moscow State Technical University, Moscow, 984 p.

14. Norman, Friedman (2006), *The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System*, Naval Institute Press, 858 p.

15. Strakhov, A.F. (1990), “*Avtomatyzyrovannye yzmerytel'nye kompleksy*” [*Automated measuring complexes*], Énerhoyzdat, Moscow, 216 p.

16. Gerasimov, S., Shapran, Iu. and Stakhova, M. (2018), Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities, *Information Processing Systems*, Vol. 1(152), pp. 148-154. https://doi.org/10.30748/soi.2018.152.21.

17. Bratslavska, A., Gerasimov, S., Zubritskii, H., Timochko, A. and Timochko, A. (2017), Theoretical basic concepts for formation of the criteria for measurement signals synthesis optimality for control of complex radio engineering systems technical status, *Information Processing Systems*, Vol. 5(151), pp. 151-157. https://doi.org/10.30748/soi.2017.151.20.

18. Qriffiths, B.E. and Loparo, K.A. (1985), Optimal control of jump-linear gaussian systems, *Int. J. of control*, Vol. 42, No. 4, pp. 791-819.

19. Herasimov, S. and Gridina, V. (2018), Method justification nomenclature control parameters of radio systems and purpose of their permissible deviations, *Information Processing Systems*, No. 2 (153), pp. 159-164. https://doi.org/10.30748/soi.2018.153.20.

20. Bronshteyn, I. and Semendyayev, K. (1986), "*Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov*" [*Handbook of mathematics for engineers and students of technical colleges*], Nauka, Moscow, 544 p.

Надійшла до редколегії 21.03.2019

Схвалена до друку 9.04.2019

Відомості про автора:

Герасимов Сергій Вікторович
доктор технічних наук старший науковий співробітник
заступник начальника кафедри
Харківського національного університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
https://orcid.org/0000-0003-1810-0387

Information about the author:

Serhii Herasimov
Doctor of Technical Sciences Senior Research
Deputy Chief of the Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv
National Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
https://orcid.org/0000-0003-1810-0387

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТИ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ КРЫЛАТЫХ РАКЕТ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

С.В. Герасимов

Показана роль крылатых ракет при ведении боевых действий. Приведены особенности применения крылатых ракет. Обосновано, что во время полета крылатой ракетой по определенному маршруту необходимо корректировать данные навигационной системы. Знание этого вопроса позволит анализировать и обосновывать тактико-технические характеристики средств противовоздушной обороны. Определены недостатки работы существующих навигационных систем в режиме реального времени полета. Предлагается для эффективного поражения целей крылатыми ракетами с заранее неопределенным положением в условиях применения противником средств противовоздушной обороны разработать модель оценки погрешностей обработки информации в навигационных системах в условиях неопределенности. Определены условия достижения высокой точности определения параметров навигации и дисперсии погрешностей определения координат целей системами управления крылатых ракет при полете.

***Ключевые слова**: навигационная система, крылатая ракета, определения координат, точность, реальное время полета, неопределенность.*

MODEL OF EVALUATION OF INFORMATION PROCESSING IN THE NAVIGATION SYSTEMS OF WINGED ROCKETS UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

S. Herasimov

The role of cruise missiles in the achievement of both partial tasks and the goal of the operation as a whole in the course of combat operations is shown. The features of the use of cruise missiles are given. It is substantiated that during a flight a cruise missile on a specified route needs to adjust the data of the navigation system. Therefore, the actual question is the study of the operation of cruise missile navigation systems in uncertain conditions. Knowledge of this issue will allow us to analyze and substantiate the tactical and technical characteristics of the means of air defense. The deficiencies of existing navigation systems in real-time flight are identified. It is proposed for an effective defeat of targets with cruise missiles with an uncertain location in the conditions of the enemy's use of air defense capabilities to analyze the peculiarities of navigation systems functioning in conditions of uncertainty. The purpose of the article is to determine the main relations for the theoretical substantiation of the peculiarities of the functioning of navigation systems of cruise missiles in conditions of uncertainty. The complexity of the structure of the errors of navigation systems as functions of time, the uniqueness of their realizations, is determined by the influence of a number of ignored factors, which require the use of their models of random functions for their description. Since the uncertainty of the main factors of navigation systems is of a stochastic nature, the main properties and the procedure for taking random processes into account in modern inertial navigation systems are shown. The conditions for achieving high accuracy of determining the parameters of navigation and dispersion of errors in the determination of coordinates by cruise control systems during flight are determined. From the analysis of the peculiarities of the functioning of navigation systems in the conditions of uncertainty, it was established that the question of the meaningful introduction of a probabilistic space has not only a methodological nature. This provides the mathematical correctness of the analysis, reveals the content of the average accuracy characteristics to be used in the tasks of the analysis and synthesis of navigation systems of cruise missiles during the flight.

***Keywords:** navigation system, cruise missile, coordinate determination, accuracy, real time of flight, uncertainty.*