



УДК 623.4
ГРНТИ 78.25.13

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ДИСКРЕТНОМ ВРЕМЕНИ

*Е.Е. КОЛТЫШЕВ, доктор технических наук, профессор
АО «УПКБ «Деталь» (г.Каменск-Уральский)
С.Л. ИВАНОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г.Воронеж)
А.Ю. ТРУЩИНСКИЙ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г.Воронеж)
А.А. ИСПУЛОВ, кандидат технических наук
ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина» (г.Воронеж)*

Решение задачи сопровождения в комплексах вооружения возлагается на информационно-управляющую систему. При этом важным моментом ее решения является описание процессов и явлений в дискретном времени. Для этого в статье обоснован вариант представления непрерывных систем их дискретными аналогами, являющийся альтернативным для метода Эйлера. Сравнительный анализ результатов моделирования показывает высокую сходимость параметров вектора состояния предлагаемого варианта с «истинными» значениями, а также уменьшение ошибки экстраполяции в десятки раз по сравнению с методом Эйлера.

Ключевые слова: непрерывная динамическая система, дискретная система, ряд Тейлора, фундаментальная матрица, экстраполяция.

REPRESENTATION OF NONLINEAR DYNAMICAL SYSTEMS IN DISCRETE TIME

*E.E. KOLTYSHEV, Doctor of Technical sciences, Professor
JSC «UPKB «Detal» (Kamensk-Uralsky)
S.L. IVANOV, Candudate of Technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.YU. TRUSHCHINSKIY, Candudate of Technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)
A.A. ISPULOV, Candudate of Technical sciences
MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy» (Voronezh)*

The solution of the maintenance task in weapons complexes is assigned to the management information system. At the same time, an important point of its solution is the description of processes and phenomena in discrete time. For this purpose, the article substantiates the variant of representation of continuous systems by their discrete analogs, which is an alternative for the Euler method. A comparative analysis of the simulation results shows a high convergence of the proposed variant state vector parameters with the «true» values, as well as a reduction in the extrapolation error by tens of times compared to the Euler method.

Keywords: continuous dynamical system, discrete system, Taylor series, fundamental matrix, extrapolation

Введение. Задача сопровождения траекторий целей является одной из основных задач, решаемых информационно-управляющими системами комплексов вооружения, военной и специальной техники. Наибольшую точность сопровождения обеспечивают системы, реализующие алгоритмы нелинейной калмановской фильтрации на основе кинематических или динамических моделей изменения наблюдаемых процессов. При разработке указанных



алгоритмов для цифровых систем принципиальное значение имеет описание изменения наблюдаемых процессов в дискретном времени.

Актуальность. В настоящее время при описании процессов в дискретном времени переход от нелинейных дифференциальных уравнений к разностным осуществляется, как правило, методом Эйлера путем замены соответствующих производных конечными разностями. Однако по мере увеличения шага дискретизации по времени (уменьшения темпа обновления информации) точность описания процессов указанным методом существенно снижется, что требует поиска альтернативных путей перехода из непрерывного в дискретное время. При этом причинами увеличения шага дискретизации может быть как ведения скрытного наблюдения за целью, так и отсутствие информации о цели, вызванное постановкой помех.

Таким образом, **целью работы** является обоснование возможного варианта перехода от непрерывного к дискретному времени при описании параметров взаимного перемещения летательного аппарата (ЛА) и цели в задаче сопровождения.

Математическое представление решаемой задачи. Геометрия задачи сближения ЛА с неподвижной целью в горизонтальной плоскости представлена на рисунке 1.

Система дифференциальных уравнений, описывающая кинематику, взаимное перемещение ЛА относительно неподвижной цели имеет вид:

$$\dot{D} = -V_{\text{сбл}}; D(0) = D_0; \quad (1)$$

$$\dot{V}_{\text{сбл}} = -\omega^2 D + a_{\text{бЛА}} \sin \beta_{\text{ЛА}}; V_{\text{сбл}}(0) = V_{\text{сбл}0}; \quad (2)$$

$$\dot{\beta}_{\text{ЛА}} = \omega - \frac{a_{\text{бЛА}}}{V_{\text{ЛА}}}; \beta_{\text{ЛА}}(0) = \beta_{\text{ЛА}0}; \quad (3)$$

$$\dot{\omega} = 2 \frac{V_{\text{сбл}}}{D} \omega - \frac{a_{\text{бЛА}} \cos \beta_{\text{ЛА}}}{D}; \omega(0) = \omega_0. \quad (4)$$

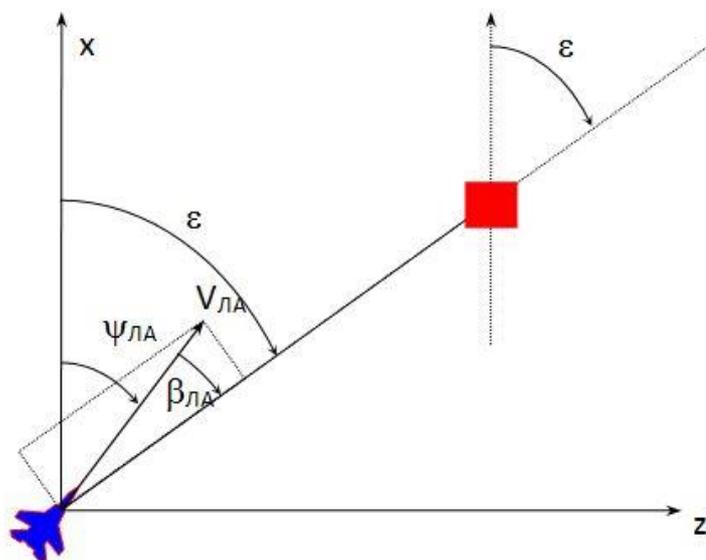


Рисунок 1 – Геометрия сближения ЛА с неподвижной целью



Определим представление (1)-(4) в матричном виде

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}), \quad (5)$$

$$\text{где } \mathbf{X}^T = [\Delta \quad V_{\text{сбл}} \quad \beta_{\text{ЛА}} \quad \omega]; \quad f(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} -V_{\text{сбл}} \\ -\omega^2 \Delta + a_{\text{бЛА}} \sin \beta_{\text{ЛА}} \\ \omega - \frac{a_{\text{бЛА}}}{V_{\text{ЛА}}} \\ 2 \frac{V_{\text{сбл}}}{\Delta} \omega - \frac{a_{\text{бЛА}} \cos \beta_{\text{ЛА}}}{\Delta} \end{bmatrix},$$

и разложим нелинейную функцию $f(\mathbf{X})$ в ряд Тейлора [1]:

$$f(\mathbf{X}) = \sum_{n=0}^k \frac{f^{(n)}(\mathbf{X}_0)}{n!} (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)^n = f(\mathbf{X}_0) + \frac{d}{d\mathbf{X}} f(\mathbf{X}_0) (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2}{d\mathbf{X}^2} f(\mathbf{X}_0) (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)^2 + \dots \quad (6)$$

$$\dots + \frac{1}{k!} \frac{d^k}{d\mathbf{X}^k} f(\mathbf{X}_0) (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0)^k$$

Ограничивая (6) последовательностью из первых двух слагаемых:

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}) \approx f(\mathbf{X}_0) + \frac{d}{d\mathbf{X}} f(\mathbf{X}_0) (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \approx f(\mathbf{X}_0) + \mathbf{F}(\mathbf{X}_0) (\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \approx f(\mathbf{X}_0) - \mathbf{F}(\mathbf{X}_0) \mathbf{X}_0 + \mathbf{F}(\mathbf{X}_0) \mathbf{X}, \quad (7)$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X}_0) = \frac{d}{d\mathbf{X}} f(\mathbf{X}_0)$ – матрица производных, с учетом известного вектора начальных условий \mathbf{X}_0 из (7) находим

$$\dot{\mathbf{X}} \approx \mathbf{F}(\mathbf{X}_0) \mathbf{X} + \mathbf{C}(\mathbf{X}_0), \quad (8)$$

где $\mathbf{C}(\mathbf{X}_0) = f(\mathbf{X}_0) - \mathbf{F}(\mathbf{X}_0) \mathbf{X}_0$.

Решение уравнения (8) с использованием фундаментальной матрицы определится формулой Коши [2]

$$\mathbf{X}(t) = \Phi(t, t_0) \mathbf{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \Phi(t, \tau) d\tau * \mathbf{C}(\mathbf{X}(t_0)), \quad (9)$$

где $\Phi(t, t_0)$ – фундаментальная матрица решения уравнения.

Рассмотрим значения вектора $\mathbf{X}(t)$ в соседние моменты времени на отрезке $[kT, (k+1)T]$ с учетом $\Phi[(k+1)T - kT] = \Phi(T)$. Используя представления решения (9) для момента времени t_{k+1} на основе значения на предыдущем шаге \mathbf{X}_k как начальное, получим:



$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi(T)\mathbf{X}_k + \int_{kT}^{(k+1)T} \Phi((k+1)T - \tau) d\tau * \mathbf{C}(\mathbf{X}_k), \quad (10)$$

где $T = t_{k+1} - t_k$ – шаг дискретизации.

Таким образом, для эквивалентного представления непрерывной системы (5) в дискретном времени необходимо определить матрицу производных \mathbf{F} , вектор-столбец $\mathbf{C}(\mathbf{X})$, фундаментальную матрицу $\Phi(T)$. При выводе требуемых матриц аргумент опущен. Матрица производных получена путем дифференцирования выражения (5) по вектору состояния

$$\mathbf{F} = \frac{d}{d\mathbf{X}} f(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ -\omega^2 & 0 & a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА} & -2D\omega \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА} - 2V_{\text{сбл}}\omega}{D^2} & \frac{2\omega}{D} & \frac{a_{\beta_{ЛА}} \sin \beta_{ЛА}}{D} & \frac{2V_{\text{сбл}}}{D} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

С учетом выражения для нелинейной функции $f(\mathbf{X})$ и $\mathbf{F}(\mathbf{X})$ вектор-столбец постоянных значений примет вид

$$\mathbf{C}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2D\omega^2 + a_{\beta_{ЛА}}(\sin \beta_{ЛА} - \beta_{ЛА} \cos \beta_{ЛА}) \\ -\frac{a_{\beta_{ЛА}}}{V_{ЛА}} \\ -\frac{a_{\beta_{ЛА}}(2\cos \beta_{ЛА} + \beta_{ЛА} \sin \beta_{ЛА})}{D} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Фундаментальная матрица представляет собой матричную экспоненту $\Phi(T) = e^{\mathbf{F}T}$ [2, 3]. Однако сложность и нелинейность системы дифференциальных уравнений (1)-(4) не позволяет вычислить фундаментальную матрицу таким образом. Как известно, матричная экспонента представляет собой ряд [1-3]:

$$e^{\mathbf{F}T} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{T^k}{k!} \mathbf{F}^k = \mathbf{I} + \mathbf{F}T + \frac{\mathbf{F}^2 T^2}{2} + \dots, \quad (13)$$

где \mathbf{I} – единичная матрица размером 4×4 .

Исходя из сложности кинематики взаимного перемещения фундаментальная матрица определялась в виде

$$\Phi(T) = \mathbf{I} + \mathbf{F}T + \frac{1}{2} \mathbf{F}^2 T^2 = \begin{bmatrix} \frac{T^2 \omega^2}{2} + 1 & -T & \dots \\ -T\omega^2 - \frac{T^2 \omega}{D} (a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА} - 2V_{\text{сбл}}\omega) & 1 - \frac{3T^2 \omega^2}{2} & \dots \\ -\frac{T^2}{D^2} \left(V_{\text{сбл}}\omega - \frac{a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА}}{2} \right) & \frac{T^2 \omega}{D} & \dots \\ \frac{T}{D^2} (a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА} - 2V_{\text{сбл}}\omega) & \frac{T^2}{D^2} \left(3V_{\text{сбл}}\omega - \frac{a_{\beta_{ЛА}} \cos \beta_{ЛА}}{2} \right) + \frac{2T\omega}{D} & \dots \end{bmatrix}$$



$$\begin{aligned}
 & \dots \quad \left. \begin{aligned} & -\frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma^2 \cos \beta_{\text{ЛА}}}{2} & T^2 \omega \text{Д} \\ & a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma (\cos \beta_{\text{ЛА}} - \omega \Gamma \cos \beta_{\text{ЛА}}) & \left(\frac{a_{\beta \text{ЛА}} \cos \beta_{\text{ЛА}}}{2} - 2V_{\text{сбл}} \omega \right) T^2 - 2\Gamma \text{Д} \omega \\ & \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma^2 \sin \beta_{\text{ЛА}}}{2\text{Д}} + 1 & T + \frac{\Gamma^2 V_{\text{сбл}}}{2} \\ & \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma^2}{\text{Д}} \left(\omega \cos \beta_{\text{ЛА}} + \frac{V_{\text{сбл}} \sin \beta_{\text{ЛА}}}{\text{Д}} \right) + \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma \sin \beta_{\text{ЛА}}}{\text{Д}} & T^2 \left(\frac{2V_{\text{сбл}}^2}{\text{Д}^2} - 2\omega^2 + \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \sin \beta_{\text{ЛА}}}{2\text{Д}} \right) + \frac{2\Gamma V_{\text{сбл}}}{\text{Д}} + 1 \end{aligned} \right\} (14)
 \end{aligned}$$

Второе слагаемое выражения (10) после соответствующих преобразований примет вид:

$$\Phi \mathbf{i}(\Gamma) = \int_{k\Gamma}^{(k+1)\Gamma} \Phi((k+1)\Gamma - \tau) d\tau = \begin{bmatrix} \Gamma & -\frac{\Gamma^2}{2} & 0 & 0 \\ \frac{-\Gamma^2 \omega^2}{2} & \Gamma & \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma^2 \cos \beta_{\text{ЛА}}}{2} & -\Gamma^2 \omega \text{Д} \\ 0 & 0 & \Gamma & \frac{\Gamma^2}{2} \\ \frac{\Gamma^2 (a_{\beta \text{ЛА}} \cos \beta_{\text{ЛА}} - 2V_{\text{сбл}} \omega)}{2\text{Д}^2} & \frac{\Gamma^2 \omega}{\text{Д}} & \frac{a_{\beta \text{ЛА}} \Gamma^2 \sin \beta_{\text{ЛА}}}{2\text{Д}} & \frac{\Gamma^2 V_{\text{сбл}}}{\text{Д}} + \Gamma \end{bmatrix} (15)$$

Следует отметить, что в выражении (15) в качестве фундаментальной матрицы использовалась линейная форма выражения (13). Таким образом, вектор экстраполированных параметров с учетом выражений (10)-(12), (14) и (15) примет вид

$$\mathbf{X}_{k+1} = \begin{bmatrix} \text{Д}_{k+1} \\ V_{\text{сбл}k+1} \\ \beta_{\text{ЛА}k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \Phi(\Gamma) \begin{bmatrix} \text{Д}_k \\ V_{\text{сбл}k} \\ \beta_{\text{ЛА}k} \\ \omega_k \end{bmatrix} + \Phi \mathbf{i}(\Gamma) \mathbf{C}. \quad (16)$$

Анализ выражения (16) показывает, что:

оно стало намного сложнее с аналитической точки зрения, это может вызвать некоторые трудности его реализации в вычислительных системах комплексов вооружения;

наличие в каждой составляющей вектора состояния параметра управления – бокового ускорения ЛА $a_{\beta \text{ЛА}}$, это позволит не только адекватно экстраполировать вектор состояния, но и синтезировать оптимальный закон управления ЛА с требуемой точностью.



Результаты моделирования. В целях проверки адекватности проведен сравнительный анализ точности экстраполяции параметров вектора состояния для предлагаемого варианта и метода Эйлера. В рамках метода Эйлера используются выражения

$$\mathbf{X}_{k+1}^{\varepsilon} = \begin{bmatrix} D_{k+1} \\ V_{\text{сблк}+1} \\ \beta_{\text{ЛА}k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_k - V_{\text{сблк}} T \\ V_{\text{сблк}} - T\omega_k^2 D_k + a_{\text{бЛА}} T \sin \beta_{\text{ЛА}k} \\ \beta_{\text{ЛА}k} + T\omega_k - \frac{a_{\text{бЛА}} T}{V_{\text{ЛА}}} \\ \left(1 + \frac{2TV_{\text{сблк}}}{D_k}\right) \omega_k - \frac{a_{\text{бЛА}} T \cos \beta_{\text{ЛА}k}}{D_k} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

В качестве показателя точности принята абсолютная ошибка между экстраполированным значением параметров вектора состояния и «истинным» значением соответствующих параметров.

«Истинное» значение вектора состояния получено следующим образом. Принято допущение, что координаты ЛА изменяются по следующим законам:

$$\begin{aligned} x(t) &= R \cos(\omega_{\text{кол}} t - \varphi_0); \\ z(t) &= R \sin(\omega_{\text{кол}} t - \varphi_0), \end{aligned} \quad (18)$$

где $R = 5000$ м – радиус разворота; $\omega_{\text{кол}} = \frac{2\pi}{30}$ рад/с – круговая частота колебаний; $\varphi_0 = 95$ град. – фаза. С учетом изменения координат по выражению (18) ЛА будет описывать траекторию в виде окружности. Тогда дальность, скорость сближения, угол пеленга и угловая скорость линии визирования будут изменяться по следующим выражениям:

$$D(t) = \sqrt{(x_{\text{ц}} - x(t))^2 + (z_{\text{ц}} - z(t))^2}; \quad (19)$$

$$V_{\text{сбл}}(t) = -\frac{d}{dt} D(t); \quad (20)$$

$$\beta_{\text{ЛА}}(t) = \varepsilon(t) - \psi_{\text{ЛА}}(t); \quad (21)$$

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \varepsilon(t), \quad (22)$$

где $x_{\text{ц}} = 10^4$; $z_{\text{ц}} = 10^4$ м – координаты неподвижной цели; $\varepsilon(t) = \arctan\left(\frac{z_{\text{ц}} - z(t)}{(x_{\text{ц}} - x(t))}\right)$ – угол линии

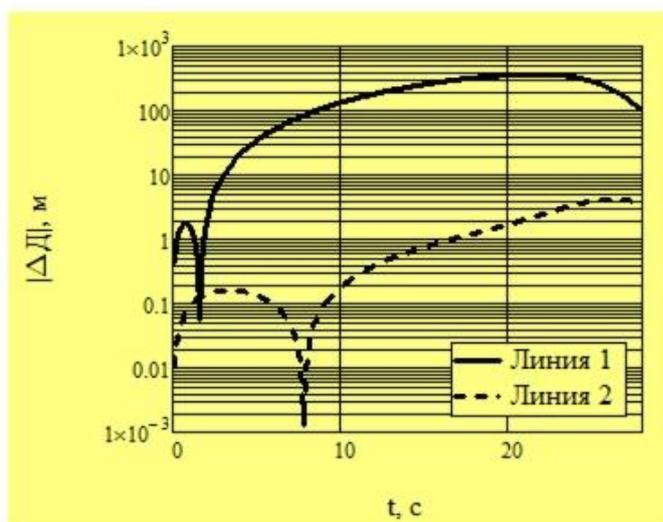
визирования; $\psi_{\text{ЛА}}(t) = \arctan\left(\frac{V_{z\text{ЛЛ}}(t)}{V_{x\text{Л}}(t)}\right)$ – угол курса ЛА; $V_{x\text{Л}}(t) = \frac{d}{dt} x(t)$, $V_{z\text{ЛЛ}}(t) = \frac{d}{dt} z(t)$ – проекции вектора скорости ЛА.

На рисунке 2 представлены значения абсолютной ошибки экстраполяции по модулю с учетом шага дискретизации равного 0,1 секунду, обозначения: *линия 1* ошибка для метода Эйлера; *линия 2* ошибка предлагаемого подхода. В таблице представлены максимальные значения ошибок для рассматриваемых вариантов при различных темпах обновления информации.

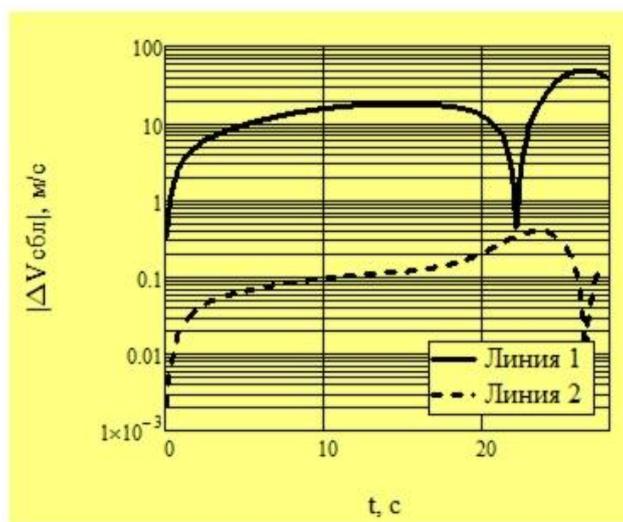


Таблица – Максимальные ошибки методов экстраполяции

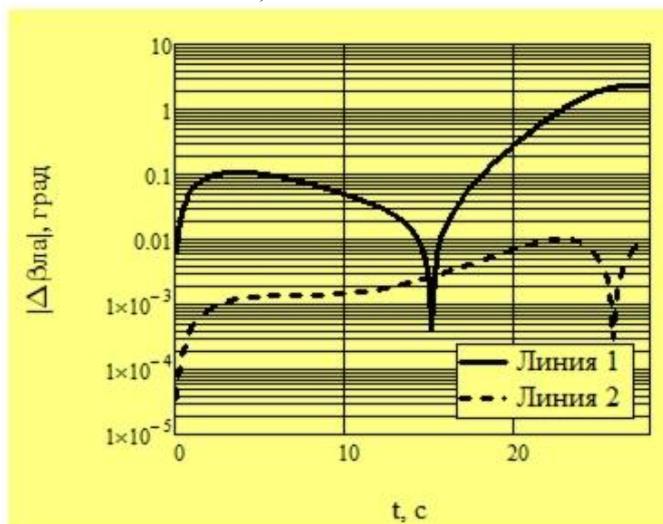
№ п/п	Метод	Шаг дискретизации, с											
		0,001				0,25				0,5			
		Д, м	V _{сбл} , м/с	β _{ла} , град	ω, град/с	Д, м	V _{сбл} , м/с	β _{ла} , град	ω, град/с	Д, м	V _{сбл} , м/с	β _{ла} , град	ω, град/с
1	Предлагаемый подход	0,004	10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	25	2,5	0,063	0,03	100	10	0,26	0,12
2	Метод Эйлера	3,6	0,5	0,2	0,03	925	115	5,6	0,9	1850	209	10,5	1,65



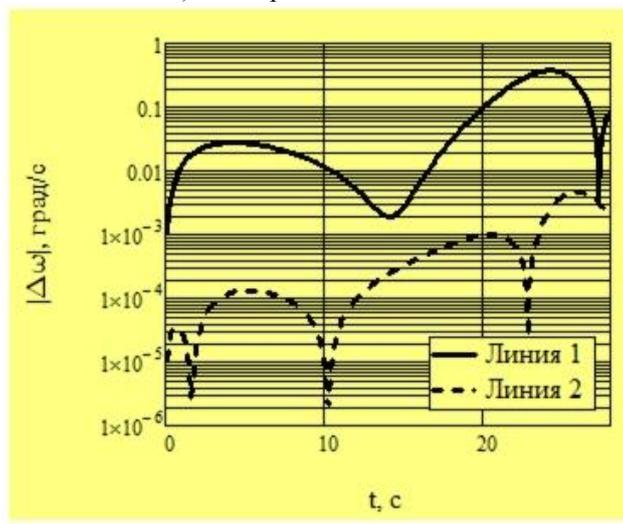
а) по дальности



б) по скорости сближения



в) по углу пеленга



г) по угловой скорости линии визирования

Рисунок 2 – Ошибки экстраполяции вектора состояния

Анализ изменения модуля ошибок вектора состояния от времени показывает, что: предлагаемый подход является работоспособным и адекватно учитывает изменение параметров вектора состояния при различных условиях наблюдения; использование метода Эйлера для представления непрерывных систем оправдано лишь при шаге дискретизации менее 0,01 секунды;



ошибки предлагаемого варианта по сравнению с «истинными» значениями вектора состояния (рисунок 2) по дальности не более 5 м, по скорости сближения не более 0,5 м/с, по углу пеленга не более 0,01 градуса, по угловой скорости линии визирования не более 0,005 град/с;

преимущество предложенного варианта (таблица) заключается в уменьшении ошибки экстраполяции по сравнению с методом Эйлера по дальности, скорости сближения, углу пеленга в сотни раз и по угловой скорости линии визирования в десятки раз при времени обновления информации меньше 0,1 секунды. При увеличении шага дискретизации до 0,5 секунд ошибки экстраполяции уменьшаются по всем параметрам в десятки раз;

существенным достоинством предлагаемого подхода является наличие параметра управления в каждой составляющей вектора состояния в виде бокового ускорения ЛА $a_{\text{бЛА}}$. Это позволит в дальнейшем синтезировать адекватный алгоритм траекторного управления;

недостатком данного подхода является громоздкость и сложность выражения экстраполятора (16), что может вызвать некоторые трудности при реализации его в вычислительной системе комплекса вооружения.

Вывод. Таким образом, в ходе проведенного исследования обоснован вариант эквивалентного представлению непрерывных нелинейных динамических систем их дискретными аналогами. Сравнительный анализ точности экстраполяции показал минимальные ошибки предлагаемого варианта по сравнению с «истинными» значениями, а также уменьшение ошибки экстраполяции минимум в десятки раз по сравнению с распространенным методом Эйлера при различных вариантах наблюдения. Практическая ценность полученных результатов обусловлена применением такого подхода в системах вооружения, в которых есть необходимость низкого темпа обновления информации вызванная, либо требованием скрытного наблюдения за целью, либо учетом преднамеренного подавления противником наших систем. Кроме того, в каждом параметре вектора состояния присутствует параметр управления (боковое ускорения ЛА), что позволит синтезировать оптимальный закон управления в соответствии с предъявляемыми требованиями точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. М.: Наука, 1974. 832 с.
2. Ярлыков М.С., Богачев А.С. Авиационные радиоэлектронные комплексы. М.: ВАТУ, 2008. 616 с.
3. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы. М.: Высш. шк., 1989. 263 с.

REFERENCES

1. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike. M.: Nauka, 1974. 832 p.
2. Yarlykov M.S., Bogachev A.S. Aviacionnye radio`elektronnye komplekсы. M.: VATU, 2008. 616 p.
3. Aleksandrov A.G. Optimal'nye i adaptivnye sistemy. M.: Vyssh. shk., 1989. 263 p.

© Колтышев Е.Е., Иванов С.Л., Трущинский А.Ю., Испулов А.А., 2020

Колтышев Евгений Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, начальник отдела Акционерного общества «Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Россия, 623409, г. Каменск-Уральский, Свердловской области, ул. Пионерская, 8.

Иванов Станислав Леонидович, кандидат технических наук, доцент 101 кафедры авиационных радиоэлектронных комплексов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.



Трущинский Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент 102 кафедры авиационных систем и комплексов радионавигации и радиосвязи, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

Испулов Аманбай Аватович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией Военно-воздушных сил), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж), Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, ispulovy@yandex.ru.