

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО НЕЛИНЕЙНОГО СГЛАЖИВАНИЯ ДАННЫХ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Щербов И. Л.¹

(ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический
университет», Донецк, ДНР)

Рассмотрена работа алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений. Разработанный алгоритм осуществляет совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью. Для получения независимых оценок вектора коэффициентов сглаживающего полинома в работе алгоритма используются структуры линейно независимых и Λ -ортогональных базисных функций, осуществляющие совместную обработку различных типов измеряемых первичных координат местоположения испытываемых объектов, полученных от внешнетраекторных измерительных средств. Для начала итеративного процесса нахождения максимально достоверного значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге сглаживания предложен способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома, который для каждого последующего шага локально-скользящего сглаживания данных измерений позволяет использовать значение, которое было получено на предыдущем шаге сглаживания. Примененные в работе алгоритма методики проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома позволили оптимизировать процесс определения значимых коэффициентов сглаживающего полинома. Применение разработанного способа выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома и предложенных методик позволило уменьшить время на обработку данных траекторных измерений. По результатам проведенного экспериментального исследования установлено, что разработанный алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических траекторных измерений повышает точность и достоверность определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах и обеспечивает устойчивость в работе при обработке данных измерений со сбоями и грубыми ошибками измерений.

Ключевые слова: алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания, сглаживающий полином, вектор коэффициентов сглаживающего полинома, линейно независимые базисные функции, Λ -ортогональные базисные функции.

¹ Игорь Леонидович Щербов, к.т.н., проректор (scherbov@yandex.ru).

1. Введение

Испытания летательного аппарата (ЛА) представляет собой сложный и ответственный процесс научно-исследовательской деятельности, направленный на получение наиболее полного понимания свойств и поведения объекта испытаний и в конечной стадии – принятия решения о вводе его в эксплуатацию.

В случае отсутствия точной и достоверной информации о траектории движения ЛА возможно принятие неправильного решения о характеристиках испытуемого объекта или качестве работы его бортовых пилотажно-навигационных комплексов, что в дальнейшем может привести к негативным последствиям при его эксплуатации.

Лётные испытания проводятся на специализированных полигонах, оборудованных многофункциональными траекторными измерительно-вычислительными комплексами, в состав которых входят внешнетраекторные измерительные средства.

Благодаря совместным измерениям, проводимым внешнетраекторными измерительными средствами, создается временная и пространственная избыточность полученной первичной информации о местоположении объекта. Временная избыточность связана с высоким темпом съема информации, а пространственная избыточность является результатом многократного дублирования проводимых измерений различными средствами. Временная и пространственная избыточность первоначально создавалась с целью повышения точности и достоверности измерений

На начальном этапе при обработке данных внешнетраекторных измерений сглаживание осуществлялось графоаналитическим способом с применением простых алгоритмов, которые использовали минимальный необходимый набор первичных координат $m = 3$). Совершенствование алгоритмов сглаживания и использование пеленгационных методов оценки местоположения объекта по информации минимально-избыточного объема ($m = 4$) позволило повысить точность и достоверность получаемых результатов, что в свою очередь определило их широкое применение.

На следующем этапе совершенствования алгоритмов обработки траекторной информации начал использоваться обобщенный (статистический) метод, который основывался на методе наименьших квадратов. Вычисление статистической оценки пространственного положения ЛА осуществлялось помощью рекуррентного соотношения через ряд последовательных приближений. Применение данного метода позволило при проведении обработки траекторной информации использовать алгоритмы, учитывающие пространственную избыточность данных измерений, а в дальнейшем и временную избыточность получаемых данных измерений [6, 13, 14, 17, 20, 22].

Однако в рассмотренных алгоритмах не вся получаемая от внешнетраекторных измерительных средств информация принимается в обработку, что обусловлено наличием зон низкой точности внешнетраекторных измерительных средств, сбоями в работе, отсутствием возможности проводить совместную обработку данных измерений, обладающих временной и пространственной избыточностью и т.д.

Возможности современной вычислительной техники создали предпосылки совершенствования применяемых алгоритмов, входящих в математическое и программное обеспечение траекторных измерительно-вычислительных комплексов, для определения параметров положения ЛА пространстве.

Таким образом, повышение точности и достоверности определения пространственного положения ЛА является актуальной научно-технической задачей и имеет практическое значение.

Для решения данной задачи необходимо по имеющимся первичным данным внешнетраекторных измерений (наклонная дальность, азимут и угол места) полученным в равноотстоящие моменты времени от радиолокационных и кинотеодолитных станций, установленных в определённых точках траекторного измерительно-вычислительного комплекса, получить максимально достоверные значения вторичных координатах (X , Y , Z), определяющих местоположение летательного аппарата в пространстве.

Вариант решения поставленной задачи представлен в предлагаемом алгоритме адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений.

2. Алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений

При разработке алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений учитывались следующие результаты проведенных исследований:

1. Анализ применяемых способов обработки данных внешнетраекторных измерений позволяет сделать вывод о целесообразности использования способа локально-скользящего сглаживания. Данный способ в сравнении с кусочно-локальным сглаживанием и сплайновой обработкой данных, благодаря применяемой последовательности обработки интервалов сглаживания траектории полета ЛА, позволяет получить наиболее точные результаты.

При этом необходимо учесть, что другие рассмотренные способы обработки данных внешнетраекторных измерений по своей сути представляют собой частные случаи локально-скользящего сглаживания [22, 28, 29].

2. Из разработанных и исследованных структур линейно независимых базисных функций (ЛНБФ), позволяющих осуществлять совместное описание избыточных (временных и пространственных) данных траекторных измерений, для разработки алгоритмов адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений было принято решение использовать структуру ЛНБФ двух переменных. Данное решение основано на том, что для структуры ЛНБФ с одной переменной существует необходимость нахождения трех составляющих вектора коэффициентов сглаживающего полинома (для каждой вторичной координаты положения ЛА отдельно).

Структура ЛНБФ, содержащая в своем составе две переменные, имеет преимущество, так как в состав вектора коэффициентов сглаживающего полинома одновременно включены

тройки элементов вторичных координат ЛА [7, 8, 15, 22, 25, 27, 30–35].

3. При определении максимально достоверной оценки значения вектора коэффициентов сглаживающего полинома был применён разработанный итеративный алгоритм и предложенный способ выбора начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома на первом шаге локально-скользящего сглаживания [22–24].

4. Были использованы разработанные методики проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома:

- с оптимизацией степени сглаживавшего полинома;
- с оптимизацией структуры сглаживающего полинома

Структура 1;

- с оптимизацией структуры сглаживающего Структура 2 [2, 3, 11, 12, 22, 26, 36].

Работа алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений представлена на рис. 1.

Рассмотрим более детально работу алгоритма адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений для первого шага локально-скользящего сглаживания.

1. Начало работы алгоритма.
2. Ввод исходных данных.

При формировании массива исходных данных необходимо учитывать состав внешнетраекторных измерительных систем, входящих в состав траекторного измерительно-вычислительного комплекса и физические процессы, используемые для получения результатов измерений. В представленном алгоритме принимались в обработку полученные значения измеренных первичных координат ЛА с применением радиолокационных и кинотеодолитных станций. Кроме этого, в состав исходных данных входят данные, необходимые для проведения вычислений примененного способа ЛСС и другие параметры.

3. Формируется система линейно независимых базисных функций (ЛНБФ), имеющая структуру:

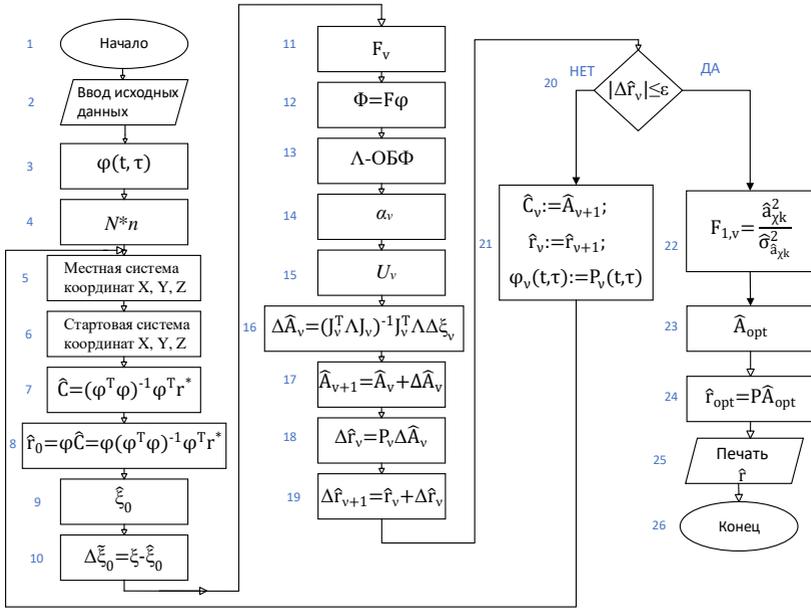


Рис. 1. Алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений

$$(1) \varphi(t, \tau) = \begin{vmatrix} \varphi_{00}(t, \tau_x) \varphi_{01}(t, \tau_x) \varphi_{02}(t, \tau_x) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_x) \varphi_{m1}(t, \tau_x) \varphi_{m2}(t, \tau_x) \\ \varphi_{00}(t, \tau_y) \varphi_{01}(t, \tau_y) \varphi_{02}(t, \tau_y) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_y) \varphi_{m1}(t, \tau_y) \varphi_{m2}(t, \tau_y) \\ \varphi_{00}(t, \tau_z) \varphi_{01}(t, \tau_z) \varphi_{02}(t, \tau_z) \dots \varphi_{m0}(t, \tau_z) \varphi_{m1}(t, \tau_z) \varphi_{m2}(t, \tau_z) \end{vmatrix},$$

где $\varphi(t, \tau) = (t - t_0)^0 t^0 (t - t_0)^0 t^1 (t - t_0)^0 t^2 \dots (t - t_0)^m t^0 (t - t_0)^m t^1 (t - t_0)^m t^2$; t – текущий момент времени; t_0 – момент времени, соответствующий середине интервала сглаживания; τ – вторая независимая переменная базисной функции; $l = x, y, z$; m – степень сглаживающего полинома.

С учетом максимально возможной степени сглаживающего полинома сформированная система ЛНБФ имеет следующий вид:

$$(2) \quad \phi(t, \tau) = \begin{pmatrix} \tau_{x_1}^{0,0} & \tau_{x_1}^{1,0} & \tau_{x_1}^{2,0} & \dots & \tau_{x_1}^{0,k} & \tau_{x_1}^{1,k} & \tau_{x_1}^{2,k} & \dots & \tau_{x_1}^{0,m} & \tau_{x_1}^{1,m} & \tau_{x_1}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{x_i}^{0,0} & \tau_{x_i}^{1,0} & \tau_{x_i}^{2,0} & \dots & \tau_{x_i}^{0,k} & \tau_{x_i}^{1,k} & \tau_{x_i}^{2,k} & \dots & \tau_{x_i}^{0,m} & \tau_{x_i}^{1,m} & \tau_{x_i}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{x_n}^{0,0} & \tau_{x_n}^{1,0} & \tau_{x_n}^{2,0} & \dots & \tau_{x_n}^{0,k} & \tau_{x_n}^{1,k} & \tau_{x_n}^{2,k} & \dots & \tau_{x_n}^{0,m} & \tau_{x_n}^{1,m} & \tau_{x_n}^{2,m} \\ \tau_{y_1}^{0,0} & \tau_{y_1}^{1,0} & \tau_{y_1}^{2,0} & \dots & \tau_{y_1}^{0,k} & \tau_{y_1}^{1,k} & \tau_{y_1}^{2,k} & \dots & \tau_{y_1}^{0,m} & \tau_{y_1}^{1,m} & \tau_{y_1}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{y_i}^{0,0} & \tau_{y_i}^{1,0} & \tau_{y_i}^{2,0} & \dots & \tau_{y_i}^{0,k} & \tau_{y_i}^{1,k} & \tau_{y_i}^{2,k} & \dots & \tau_{y_i}^{0,m} & \tau_{y_i}^{1,m} & \tau_{y_i}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{y_n}^{0,0} & \tau_{y_n}^{1,0} & \tau_{y_n}^{2,0} & \dots & \tau_{y_n}^{0,k} & \tau_{y_n}^{1,k} & \tau_{y_n}^{2,k} & \dots & \tau_{y_n}^{0,m} & \tau_{y_n}^{1,m} & \tau_{y_n}^{2,m} \\ \tau_{z_1}^{0,0} & \tau_{z_1}^{1,0} & \tau_{z_1}^{2,0} & \dots & \tau_{z_1}^{0,k} & \tau_{z_1}^{1,k} & \tau_{z_1}^{2,k} & \dots & \tau_{z_1}^{0,m} & \tau_{z_1}^{1,m} & \tau_{z_1}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{z_i}^{0,0} & \tau_{z_i}^{1,0} & \tau_{z_i}^{2,0} & \dots & \tau_{z_i}^{0,k} & \tau_{z_i}^{1,k} & \tau_{z_i}^{2,k} & \dots & \tau_{z_i}^{0,m} & \tau_{z_i}^{1,m} & \tau_{z_i}^{2,m} \\ \dots & \dots \\ \tau_{z_n}^{0,0} & \tau_{z_n}^{1,0} & \tau_{z_n}^{2,0} & \dots & \tau_{z_n}^{0,k} & \tau_{z_n}^{1,k} & \tau_{z_n}^{2,k} & \dots & \tau_{z_n}^{0,m} & \tau_{z_n}^{1,m} & \tau_{z_n}^{2,m} \end{pmatrix}.$$

4. Вектор измерений определяется на основе полученных данных измеренных координат (N) и количества точек в интервале сглаживания (n).

5. Вычисляются значения вторичных координат пространственного положения ЛА в декартовой системе координат (X, Y, Z), на основе полученных от внешнетраекторных измерительных систем первичных координат [13, 18,19, 21, 22].

Формулы пересчета первичных координат во вторичные для радиолокационных станций имеют вид

$$\begin{aligned} X &= R \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha; \\ (3) \quad Y &= R \cdot \sin \beta; \\ Z &= R \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha, \end{aligned}$$

где R – дальность, α – азимут, β – угол места.

Формулы пересчета первичных координат во вторичные для кинотеодолитных станций имеют вид

$$\begin{aligned}
 X &= -R_{\sigma} \cdot \sin \alpha_1; \\
 Y &= R_{\sigma} \cdot \operatorname{tg} \beta_1; \\
 (4) \quad Z &= R_{\sigma} \cdot \cos \alpha_1; \\
 R_{\sigma} &= \frac{-d \cdot \sin \alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)},
 \end{aligned}$$

где α_1, β_1 – азимут и угол места первой кинотеодолитной станции; α_2 – азимут второй кинотеодолитной станции; d – длина базы угломерной системы.

6. Формируется база значений вторичных координат в стартовой системе координат.

С этой целью проводится пересчет полученных значений вторичных координат местной системы координат, вычисленных на предыдущем этапе работы алгоритма [1].

7. Определяется значение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома \hat{C} .

С этой целью на основе матрицы, составленной из базисных функций (ϕ) и основной матрицы системы уравнений ($\phi^T \phi$), имеющей вид

$$(5) \quad \phi^T \phi \cdot C = \phi^T r^*,$$

определяем значение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома:

$$(6) \quad \hat{C} = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T r^*,$$

где r^* – вектор-столбец вторичных координат.

8. Проводится расчет начального приближения вектора сглаженных значений вторичных координат:

$$(7) \quad \hat{r}_0 = \phi \cdot \hat{C} = \phi (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T r^*.$$

9. Определение сглаженных значений начального приближения первичных координат (ξ_0) осуществляется на основе значений, полученных на предыдущем шаге работы алгоритма.

Формируется вектор сглаженных значений начального приближения первичных координат (состоящий из $N \cdot n$ точек) [13, 18, 19, 21, 22].

10. По результатам сравнения имеющихся данных измерений положения ЛА в пространстве и имеющихся сглаженных

значений первичных параметров ЛА строится вектор отклонений:

$$(8) \quad \Delta \hat{\xi}_{\xi_0} = \xi - \hat{\xi}_0,$$

11. Формируется матрица проекций градиентов F_v . [11–14, 16].

12. По вычисленным значениям проекций градиентов, соответствующих первичным данным измерений и структуре ЛНБФ, формируется матрица Якоби Φ [13, 14, 18, 19, 21, 22]:

$$(9) \quad \Phi_{i,kl}^j = \sum_{u=x}^{y,z} \left[\frac{\partial \xi_i^j}{\partial r_i^j} \phi_{kl}(t_i, \tau_u) \right],$$

где $u = X, Y, Z$; $l = 0, 1, 2$; $k = 0, 1, 2$; $j = 1, \dots, N$ – тип первичной координаты; $i = 1, \dots, n$ – число точек на интервале сглаживания.

Или в матричной форме:

$$(10) \quad \Phi = F\phi,$$

где F – матрица проекций градиентов.

Положение элементов в полученной матрице определяется исходя из следующих условий:

- номер строки соответствует типу измеряемого параметра и номеру точки измерений (индексы j и i);
- номер столбца соответствует степени по аргументу τ и степени по аргументу t (индексы l и k).

13. На базе системы ЛНБФ, полученной на третьем шаге работы алгоритма, строится система Λ -ортогональных базисных функций (Λ -ОБФ) из условия равенства нулю недиагональных элементов основной матрицы:

$$(11) \quad J_{vkl}^T \Lambda J_{vkl} = 0.$$

Построение Λ -ОБФ осуществляется по формуле

$$(12) \quad P_{kl}(t, \tau) = \sum_{\chi=0}^{k-1} \sum_{\lambda=0}^2 \alpha_{\chi\lambda,kl} P_{\chi\lambda}(t, \tau) + \sum_{\chi=0}^k \sum_{\lambda=0}^{l-1} \alpha_{\chi\lambda,kl} P_{\chi\lambda}(t, \tau) + \phi_{kl}(t, \tau),$$

$$\text{где } \alpha_{\chi\lambda,kl} = - \frac{\Phi_{kl}^T \Lambda J_{\chi\lambda}}{J_{\chi\lambda}^T \Lambda J_{00\chi\lambda}}.$$

14. Верхняя треугольная матрица α_v формируется в результате построения Λ -ОБФ из значений коэффициентов $\alpha_{\chi\lambda,kl}$. Диагональные элементы сформированной матрицы равны единице.

15. Из значений вспомогательных коэффициентов $\alpha_{\chi\lambda,kl}$ формируется верхняя треугольная матрица U_v , диагональные элементы которой равны единице, а элементы, расположенные выше главной диагонали, вычисляются следующим выражением:

$$(13) \quad U_{\chi\lambda,kl} = \sum_{p=0}^k \sum_{q=0}^{l-1} U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl} + \sum_{p=0}^{k-1} \sum_{q=0}^2 U_{\chi\lambda,pq} \alpha_{pq,kl}.$$

При этом матрица U накапливается от одной итерации к другой и после завершения итеративного процесса имеет следующий вид:

$$(14) \quad U = \begin{pmatrix} 1 & U_{00,01} & U_{00,02} & \dots & U_{00,kl} & \dots & U_{00,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & U_{\chi\lambda,kl} & \dots & U_{\chi\lambda,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -\alpha_{00,01} & -\alpha_{00,02} & \dots & -\alpha_{00,kl} & \dots & -\alpha_{00,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & \dots & -\alpha_{\chi\lambda,kl} & \dots & -\alpha_{\chi\lambda,m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}^{-1}.$$

16. Вектор приращений последовательных приближений оценок коэффициентов сглаживающего полинома определяется по формуле

$$(15) \quad \Delta \hat{A}_v = (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \Delta \xi_v.$$

17. Проводится вычисление очередного приближения вектора оценок сглаживающего полинома с использованием итеративного алгоритма:

$$(16) \quad \hat{A}_{v+1} = \hat{A}_v + \Delta \hat{A}_v = \hat{A}_v + (J_v^T \Lambda J_v)^{-1} J_v^T \Lambda \{ \xi - \xi[r(t, A_v)] \}.$$

18. Определяется вектор приращений вторичных координат:

$$(17) \Delta \hat{r} = P_v \Delta \hat{A}_v.$$

19. Вычисляется $v + 1$ приближение вторичных координат:

$$(18) \Delta \hat{r}_{v+1} = \hat{r}_v + \Delta \hat{r}_v.$$

20. Проверяется условие

$$(19) |\Delta \hat{r}_v| \leq \varepsilon,$$

где ε – константа, введенная для завершения итеративного процесса (исходя из практики обработки данных внешнетраекторных измерений, устанавливается в пределе от 0,1 м до 0,5 м).

21. Если составляющие вектора $\Delta \hat{r}$ не удовлетворяют заданному условию, то происходит операция переприсваивания:

$$(20) \hat{C}_v := \hat{A}_{v+1}; \quad \hat{C}_v := \hat{A}_{v+1}; \quad \hat{r}_v := \hat{r}_{v+1}.$$

После проведения данной операции, процесс повторяется до выполнения условия, начиная с пункта 5.

22. Если составляющие вектора $\Delta \hat{r}_v$ удовлетворяют заданному условию, то последнее приближение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома принимается как максимально достоверное значение и алгоритм переходит к следующему этапу вычислений.

Для получения необходимых значений статистик применяется критерий Фишера:

$$(21) F_{1,v} = \frac{\hat{\alpha}_{\chi^k}^2}{\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi^k}}^2},$$

где $\hat{\alpha}_{\chi^k}^2$ – квадрат оценки коэффициента полинома; $\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi^k}}^2$ – оценка дисперсии оценки коэффициента полинома; $\chi = 0, 1, 2$; $k = 0, \dots, m_{max}$ и представляют собой независимые случайные величины, распределенные по законам χ^2 с одной и V степенями свободы [10, 22, 25].

Значение оценки дисперсии оценки коэффициента полинома, используемое для определения в вычислении статистики, находится по следующему выражению [7, 22, 25]:

$$(22) \hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi^k}}^2 = \frac{(J_{\chi^k}^T \Lambda J_{\chi^k})^{-1} \Delta \xi^T \Lambda \Delta \xi}{V},$$

где V – степень свободы; $\Delta\xi$ – вектор отклонений первичных координат от их расчетных значений при разных степенях сглаживаемого полинома; $J_{\chi k}^T \Lambda J_{\chi k}$ – χk -й элемент диагонали основной матрицы ($\chi = k$); Λ – весовая матрица с диагональными элементами, обратными дисперсиям ошибок измерений.

Учитывая (21) и (22), степень свободы каждого коэффициента сглаживающего полинома будет определяться выражением (23) $V = N \cdot n - 3(m_{max} + 1)$,

где N – количество обрабатываемых первичных координат; n – количество точек на интервале сглаживания; m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома [9, 10, 22, 24].

Распределение получаемых статистик, распределённых по закону Фишера, представлено на рис. 2.

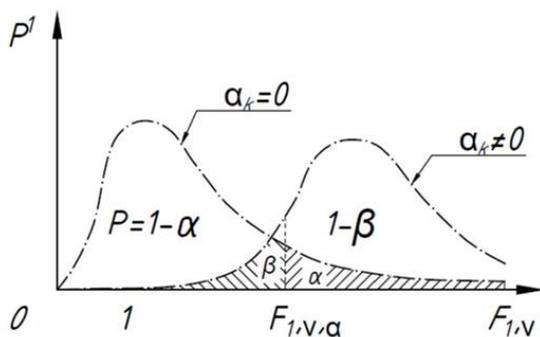


Рис. 2. Множество распределения Фишера

Если $\alpha_{\chi k} = 0$, то статистика с заданной доверительной вероятностью не превзойдет порогового уровня $F_{1,v,\alpha}$, определяемого с учетом заданного уровня α значимости (вероятности ложного обнаружения $\alpha = 1 - P$). Сравнивая статистику $F_{1,v}$ с пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$, можно осуществить проверку гипотезы о равенстве нулю коэффициента $\alpha_{\chi k}$. При этом если действительно $\alpha_{\chi k} = 0$, то с доверительной вероятностью $P = 1 - \alpha$ будет осуществлено правильное не обнаружение коэффициента или с вероятностью α – ложное его обнаружение.

Если $\alpha_{jk} \neq 0$, то получим множество распределений Фишера с параметрами нецентральности, не равным нулю. В этом случае сравнение статистики $F_{1,v}$ с тем же пороговым уровнем $F_{1,v,\alpha}$ с вероятностью β приводит к ложному необнаружению коэффициента и с вероятностью $(1 - \beta)$ – к правильному его обнаружению. Вероятность $(1 - \beta)$ называют мощностью критерия [5, 14, 22].

23. Каждый коэффициент вектора коэффициентов сглаживающего полинома проверяется на значимость методом сравнения полученной статистики с установленным пороговым значением.

Если значение проверяемого коэффициента больше или равно установленному пороговому значению, то коэффициент входит в состав коэффициентов сглаживающего полинома. Если значение проверяемого коэффициента меньше установленного порогового значения, значение коэффициента приравнивается к нулю.

Результатом проведенной проверки является вектор оценок коэффициентов сглаживающего полинома \hat{A}_{opt} , который будем считать оптимальным.

24. Вычисляются значения вторичных координат положения ЛА:

$$(24) \hat{r}_{opt} = P \hat{A}_{opt},$$

где \hat{A}_{opt} – оптимальный вектор оценок сглаживающего полинома, P – система Л-ОБФ.

25. Вывод полученных результатов на печать.

26. Конец работы алгоритма.

С целью разработки рекомендаций по внедрению разработанного алгоритма было проведено экспериментальное исследование его функционирования в нормальных условиях работы и работоспособность при воздействии аномальных ошибок измерений [14, 22, 23, 26, 28].

Экспериментальное исследование осуществлялось путём имитационного моделирования.

Методика эксперимента. Моделировались значения вторичных координат, которые по формулам простых методов пе-

решивались в первичные координаты. Затем к полученным значениям первичных координат прибавлялись значения ошибок измерений, распределённых по нормальному закону. Полученные первичные данные измерений подвергались идеальному сглаживанию и нелинейному адаптивному сглаживанию (под идеальным сглаживанием принимались результаты сглаживания при точно известной степени (структуре) сглаживающего полинома, осуществляемое методом наименьших квадратов). По результатам обработки определялись значения вторичных координат положения ЛА в пространстве. [4, 16, 22, 23, 25, 28].

На рис. 3–5 представлены временные графики разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат без воздействия аномальных ошибок измерений и с при воздействии аномальных ошибок измерений (одиночный сбой + 400 м).

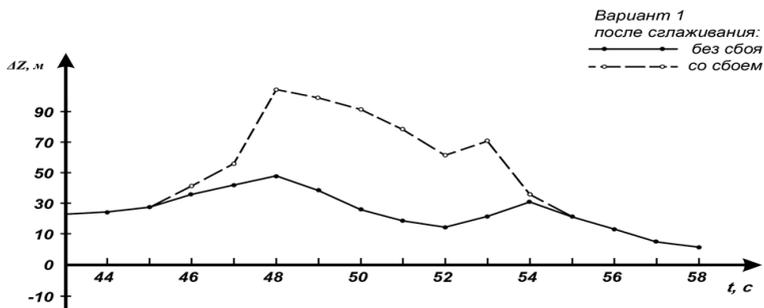


Рис. 3. График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1

Одиночный сбой + 400 м в данные измерений вводился для РЛС 1.

Из приведенных графиков видно, что разность между полученными сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ и соответствующими истинными значениями вторичных координат при одиночном сбое + 400 м уменьшается с уве-

личением количества РЛС, участвующих в обработке данных траекторных измерений.

Можно сделать вывод, что при обработке данных внешнетраекторных измерений разработанным алгоритмом точность и достоверность определения вторичных координат пространственного положения ЛА возрастает с увеличением избыточности обрабатываемой информации [4, 16, 22, 23, 25, 28].

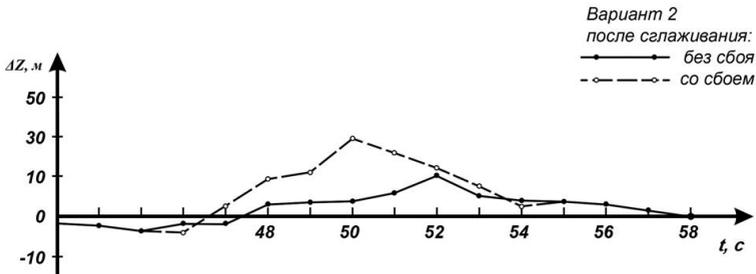


Рис. 4. График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1 и РЛС 2

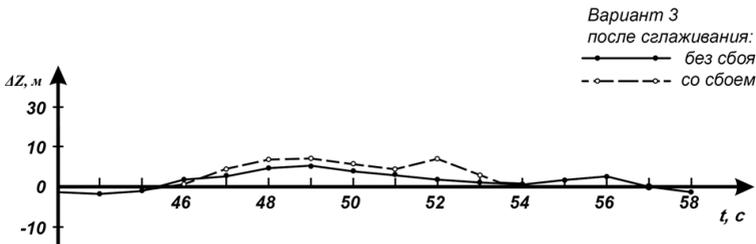


Рис. 5. График зависимости разности между сглаженными значениями вторичных координат вдоль оси $Z(t)$ для РЛС 1, РЛС 2 и РЛС 3

3. Заключение

В результате проведенных исследований разработан алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопа-

раметрических измерений, который позволяет по имеющейся первичной информации, обладающей пространственной и временной избыточностью для любого заданного момента времени, с высокой степенью точности и достоверности определить в декартовой системе координат вторичные параметры пространственного положения ЛА. Разработанный алгоритм осуществляет совместную обработку данных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью, что отличает его от ранее разработанных алгоритмов.

По результатам экспериментального исследования, проведенного методом математического моделирования, установлено, что разработанный алгоритм повышает точность и достоверность определения вторичных координат пространственного положения ЛА в траекторных измерительно-вычислительных комплексах. Кроме того, доказано, что алгоритм устойчив в работе при обработке данных измерений со сбоями и грубыми ошибками измерений, а также сохраняет работоспособность при воздействии аномальных ошибок измерений.

В ходе проводимых исследований установлено, что алгоритм адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений, может быть применён для оценки производных (скоростей и ускорений) сглаженных значений вторичных координат положений летательного аппарата.

Литература

1. БУРМИСТРОВ С.К. *Справочник офицера Воздушно-космической обороны*. – Тверь: ВА ВКО, 2006. – 564 с.
2. ГОЛУБКОВ А.В., СТОЛЯРОВА И.В. *Анализ гибридной стохастической модели движения объекта по сложной траектории // Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии*. – 2019. – №2. – С. 24–29.
3. ГОЛУБКОВ А.В. *Обнаружение и идентификация режима движения объекта по сложной траектории // Дифференциальные уравнения, математическое моделирование и вычислительные алгоритмы: Сборник материалов международной конференции, Белгород, 25–29 октября 2021 года*. –

- Белгород: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, 2021. – С. 87–89.
4. ГОРБУНОВ А.А., ПРИПАДЧЕВ А.Д. *Автоматизированные методы обработки результатов эксперимента.* – Оренбург: Оренбургский государственный университет, ЭБС АСВ, 2016. – 99 с.
 5. КАЗАКОВ В.Г., ГРОМОВА Е.Н. *Планирование экспериментальных исследований и статистическая обработка данных // Основы научных исследований в промышленной теплоэнергетике.* – С.-Пб.: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2020. – 85 с.
 6. КИСИН Ю.К. *О применении алгоритмов на основе метода наименьших квадратов и конечных формул в задачах обработки траекторных измерений // Вестник концерна ВКО «Алмаз-Антей».* – №3(18). – 2016. – С. 59–65е.
 7. КУЗНЕЦОВ А.А., ЖУКОВ Ю.О. КУЗНЕЦОВА О.Н. *Методика повышения точности траекторных измерений с использованием алгоритмов оперативной оценки координат маневрирующих летательных аппаратов // Вестник метролога.* – 2023. – №3. – С. 31–34.
 8. КУЗНЕЦОВ А.А., ЖУКОВ Ю.О. *Снижение динамических ошибок траекторных измерительных комплексов с использованием алгоритмов обработки измерительной информации, полученных на базе динамических моделей движения // Вестник метролога.* – 2020. – №3. – С. 31–36.
 9. КУШНАРЕВ П.И., ОГОДНИЙЧУК Н.Д., ЛАКЕЕВ А.М. *Статистические методы контроля точности траекторных измерительных средств // Эффективность обработки информации в системах траекторных измерений.* – М.: Министерство обороны СССР, 1968. – С. 109–112.
 10. МЕДВЕДЕВ Д.М. *Структуры и алгоритмы обработки данных в системах автоматизации и управления.* – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 100 с.
 11. НИКИТИНА-КОШКИНА К.Э., НИКИТИН-КОШКИН С.А., КОШКИНА Г. В. и др. *Методика обнаружения траектории летательного // Моделирование нелинейных процессов*

- и систем: Материалы седьмой международной конференции, Москва, 20–23 декабря 2023 года. – Москва: Янус-К, 2024. – С. 158–159.
12. НИКИТИН-КОШКИН С.А., КОШКИНА Г.В., СТУКАЛОВА Н.А. *Моделирование нелинейных процессов и систем* // Материалы седьмой международной конференции, Москва, 20–23 декабря 2023 года. – Москва: Янус-К, 2024. – С. 158–159.
 13. ОГОДНИЙЧУК Н.Д. *Обработка траекторной информации. Ч. I.* – Киев: КВВАИУ, 1981. – 141 с.
 14. ОГОДНИЙЧУК Н.Д. *Обработка траекторной информации. Ч. II.* – Киев: КВВАИУ, 1986. – 224 с.
 15. ПАСЛЁН В.В., МИЛЬШТЕЙН А.В., МОТЫЛЕВ К.И. *Исследование структур базисных функций* // Сборник научных трудов. – Вып. 29. – Донецк: Донецкий институт железнодорожного транспорта, 2012. – С. 23–30.
 16. ПОНОМАРЕВ В.Б., ЛОШКАРЕВ А.Б. *Математическая обработка результатов инженерного эксперимента* // Мин-во науки и высшего образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 104 с.
 17. СОЛДАТОВ А. С. *Концепция создания перспективной информационно-измерительной системы для летных испытаний авиационной техники с применением технологий индустрии 4.0* // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2021. – №20. – С. 167–177.
 18. СТЕПАНОВА Е.А., СКУЛКИНА Н.А., ВОЛЕГОВ А.С. *Основы обработки результатов измерений* – Екатеринбург: Уральский федеральный университет, ЭБС АСВ, 2014. – 96 с.
 19. ЦЕЛЫХ А.Н., ЦЕЛЫХ А.А., КОТОВ Э.М. *Современные методы прикладной информатики в задачах анализа данных.* – Ростов-на-Дону, Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, 2021. – 130 с.
 20. ШАРОВ С.Н., ТОЛМАЧЕВ С.Г., СОЛОВЬЕВА В.В. *Синтез генератора динамического шума сигналов управления БПЛА в режиме сопровождения заданного объекта* // Сб. научных работ X Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика»: (п. Нижний Архыз, КЧР Россия 28.09-02.10.2021 г.); Южный федераль-

- ный университет. – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального университета, – С. 92–98.
21. ШПАКОВ П.С., ЮНАКОВ Ю.Л. *Математическая обработка результатов измерений*. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 410 с.
 22. ЩЕРБОВ И.Л. *Алгоритмы адаптивного нелинейного сглаживания данных многопараметрических измерений*: дис. канд. техн. наук. – Таганрог, 2023. – 145 с.
 23. ЩЕРБОВ И.Л. *Апробация работы алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных траекторных измерений* // Известия высших учебных заведений. Электроника. – Т. 28, вып. 3. – М., Зеленоград: НИУ «МИЭТ», 2023. – С. 378–384.
 24. ЩЕРБОВ И.Л. *Информационная технология обработки данных траекторного контроля* // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – №1. – С. 71–77.
 25. ЩЕРБОВ И.Л. *Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений* // Информатика и кибернетика. – 2020. – №4(22). – С. 5–12.
 26. ЩЕРБОВ И.Л. *Исследование методов проверки значимости коэффициентов сглаживающего полинома* // Известия ЮФУ. Технические науки. – Вып. 3 (230). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2023. – С. 134–143.
 27. ЩЕРБОВ И.Л. *Исследование области определения параметров базисной функции двух аргументов при построении λ -ортогональной базисной функции* // Известия ЮФУ. Технические науки. – Вып. 6 (230). – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2022. – С. 106–116.
 28. ЩЕРБОВ И.Л. *Математическое моделирование обработки данных траекторного контроля* // Материалы международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы обеспечения национальной безопасности в условиях современности» (17 декабря 2020 г.). – Донецк, 2020. – С. 25–32.

29. ЩЕРБОВ И.Л., ПАСЛЁН В.В. *Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функции* // Вестник Академии гражданской защиты. Вып. 1 (25). – Донецк: АГЗ, 2021. – С. 48–53.
30. AMELINA N., EROFEEVA V., GRANICHIN O. *Consensus-based distributed algorithm for multisensor-multitarget tracking under unknown-but-bounded disturbances* // IFAC-PapersOnLine. – 2020. – Vol. 53, Iss. 2. – P. 3589–3595. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1756.
31. BAR-SHALOM Y., LI X.R., KIRUBARAJAN T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation* // Theory, Algorithms, and Software. – New York: Wiley, 2001. – 558 p.
32. BLOM H.A.P., BAR-SHALOM Y. *The Interacting Multiple Model Algorithm for Systems with Markovian Switching Coefficients* // IEEE Trans. Automatic Control. – 1989. – Vol. 33, No. 8. – P. 780–783.
33. GRIFFITHS H.D. *From a Different Perspective: Principles, Practice and Potential of Bistatic Radar* // IEEE Int. RADAR2003. – Australia. – 3–5 September, 2003. – P. Ra031000.pdf.
34. MICHAEL C. *Radar the Next Generation – Sensors as Robots* // IEEE Int. RADAR2003. – Australia. – 3–5 September, 2003 – P. Ra031002.pdf.
35. PASLYON V.V. SHCHERBOV I.L., MIKHAILOV M.V. et al. *Joint processing of ground and air information* // Materials of Final Int. Scientifically-Practical Conf. “The Science: theory and practice.” – Vol. 27. Engineering science. – Praha: Publishing House “Education and Science”, s.r.o.; Prague, Czechia – Dnepropetrovsk, Ukraine – Belgorod, Russian, 2005. – P. 6–9.
36. TSYGANOV A.V., TSYGANOVA YU.V., GOLUBKOV A.V. et al. *Adaptive estimation of a moving object trajectory using sequential hypothesis testing* // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: «Математическое моделирование и программирование». – 2019. – Т. 12, №1. – С. 156–162. – DOI: 10.14529/mmp190115.

ALGORITHM OPERATION FOR ADAPTIVE NONLINEAR SMOOTHING OF MULTIPARAMETER MEASURING DATA

Igor Scherbov, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University", Donetsk, DPR, Vice Rector (scherbov@yandex.ru).

Abstract. The paper considers the operation of an adaptive nonlinear smoothing algorithm for multiparameter measurement data. This algorithm allows for the joint processing of measurement data with spatial and temporal redundancy, which improves the accuracy and reliability of determining the secondary parameters of the test objects' positions. The algorithm uses structures of linearly independent and Λ -orthogonal basis functions, which allow for the joint processing of various types of measured primary coordinates of the test objects' positions obtained from external trajectory measuring instruments, to obtain independent estimates of the smoothing polynomial coefficient vector. The proposed method for selecting the initial approximation of the smoothing polynomial coefficient vector to begin the iterative process of finding the most reliable value of the smoothing polynomial coefficient vector at the first smoothing step allows for each subsequent step of locally moving smoothing of the measurement data to use the value obtained at the previous step of locally moving smoothing. The applied in the work algorithm methods of checking the significance of the coefficients of the smoothing polynomial, allowed to optimize the process of determining the significant coefficients of the smoothing polynomial. The application of the developed method of selecting the initial approximation of the vector of coefficients of the smoothing polynomial and the proposed methods allowed to reduce the time for processing the data of trajectory measurements. According to the results of the conducted experimental study it was established that the developed algorithm of adaptive nonlinear smoothing of data of multiparameter trajectory measurements increases the accuracy and reliability of determining the secondary coordinates of the spatial position of the aircraft in trajectory measuring and computing complexes and ensures stability in operation when processing measurement data with failures and gross measurement errors.

Keywords: adaptive nonlinear smoothing algorithm, smoothing polynomial, vector of coefficients of the smoothing polynomial, linearly independent basis functions, Λ -orthogonal basis functions.

УДК: 004.942+519.254+519.876.5+621.396.96

ББК: 32.81+22.143+22.171

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии А.А. Ворониным.*

Поступила в редакцию 03.09.2024.

Опубликована 31.01.2025.