УДК 629.7.018.7:681.3.06:621.396.96

МИЛЬШТЕЙН А.В., аспирант (ДонНТУ);
ПАСЛЕН В.В., к.т.н, доцент (ДонНТУ).

Методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений

Введение

За последнее время авиационная техника продвинулась значительно вперед. Вместе с этим возросли требования, предъявляемые к определению местоположения воздушных объектов. Внешнетраекторные измерения (ВТИ) предназначаются для определения параметров траекторий летательного аппарата – координат, вектора скорости, углового положения в пространстве и др. Для ВТИ используются радиотехнические (радиолокаторы, фазовые пеленгаторы, радиодальномеры) и оптические (кинотеодолиты, кинотелескопы, лазерные дальномеры) средства. Оптические средства ВТИ обладают высокой точностью, но применение их ограничено метеоусловиями, радиотехнические средства, уступая оптическим в точности, независимы от метеоусловий, имеют множество модификаций и широко используются.

Для повышения надёжности и эффективности обработки данных ВТИ объекты измерений оборудуются специальными бортовыми средствами: трассерами или импульсными лампами, функционирование которых фиксируется оптическими средствами, специальными отражателями для лазерных дальномеров, приемоответчиками для радиолокаторов, передатчиками непрерывного излучения, взаимодействующими с фазовыми пеленгаторами, и т. п.

Постановка проблемы

Современные средства ВТИ характеризуются многопараметричностью (измеряются не только координаты, но и составляющие вектора скорости, разности координат и др.), многоканальностью (обеспечиваются одним средством измерения параметров одновременно несколько летательных аппаратов), большой дальностью действия, высокими точностью, надёжностью, а также степенью автоматизации, позволяющей обрабатывать данные на ЭВМ и получать параметры траектории летательного аппарата.

Метод измерения (пеленгационный, дальномерно-угломерный, дальномерный, разностно-дальномерный) выбирается в зависимости от требуемой точности получения параметров траектории и зоны испытаний. Пеленгационный метод ВТИ основан на измерении направления линии визирования летательного аппарат двумя средствами, удалёнными друг от друга на расстояние, называемое базой; реализуется кинотеодолитами или фазовыми пеленгаторами. Дальномерно-угломерный метод состоит в определении с одного измерительного пункта составляющих вектора положения летательного аппарата в полярной системе координат; реализуется радиолокатором или дальномером и электронно-оптическими средствами измерения углового положения. Дальномерный метод (или его модификация – разностно-дальномерный метод) реализуется тремя или более дальномерами, удалёнными друг от друга. Если в состав первичных параметров не входят их производные, то скорость летательного аппарата рассчитывается путём дифференцирования координат.

Точность определения параметров траектории летательного аппарата средствами ВТИ зависит от инструментальной погрешности измерения первичных параметров, методов измерения траектории и от положения летательного аппарата относительно измерительных средств. Погрешность измерений координат составляет от одного до нескольких м, а погрешность измерений скорости — от долей до нескольких м/с.

Траекторная информация обладает пространственной и временной избыточностью [8]. Реализация пространственной и временной избыточности измерений при переходе от первичных ко вторичным параметрам положения может осуществляться совместно или последовательно. Для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных ВТИ используется метод нелинейного оптимального адаптивного сглаживания. Для реализации сглаживания данным методом в работах [1-6] были описаны две клеточно-матричные структуры базисных функций, позволяющие описывать вектор положения объекта в пространстве. В работе [7] были исследованы структуры линейно-независимых базисных функций (ЛНБФ), описанных в работах [1-6] и способы построения на их основе Λ-ортогональных базисных функций (Λ-ОБФ). Учитывая вышеизложенное, в данной работе будет рассмотрена методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений.

Основная часть

Рассмотрим методику адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений с использованием следующей структуры ЛНБФ:

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

где $\varphi(t,\tau)=(t-t_0)^0\tau_l^0(t-t_0)^0\tau_l^1(t-t_0)^0\tau_l^2...(t-t_0)^m\tau_l^0(t-t_0)^m\tau_l^1(t-t_0)^m\tau_l^2$;

τ_l– вторая независимая переменная базисной функции.

Исходными данными для осуществления процесса сглаживания являются следующие величины:

ξ_i^j – данные измерений j первичной координаты (например, дальность, азимут, угол места в i-й момент времени);

n – число точек на интервале сглаживания;

N – число подлежащих обработке первичных координат;

m_{max} – максимально возможная степень сглаживающего полинома.

Методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания данных траекторных измерений предусматривает:

1. Нахождение начального приближения вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома.

2. Определение максимально правдоподобной оценки (МПО) вектора коэффициентов сглаживающего полинома и формирование достаточных статистик.

3. Проверку статистик на значимость и формирование оптимального вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома.

4. Вычисление и вывод на печать сглаженных значений вторичных координат положения летательного аппарата (ЛА).

В общем виде последовательность решения задачи можно представить:

$$\varphi \to \varphi^0 \to \xi \to \xi^* \to r^* \to \underset{\uparrow}{\hat{C}_\nu} \to \hat{r}_\nu \to \Delta\hat{\xi}_\nu \to F_\nu \to \Phi_\nu \to P_\nu \to J_\nu \to$$

$$\to \alpha_\nu \to U_\nu \to \Delta\hat{A}_\nu \to \hat{A}_\nu \to \hat{A}_{\nu+1} \to \hat{r}_{\nu+1} \to |r_\nu| > \underset{нет}{\overset{\leftarrow да}{\varepsilon}} \to U_n \to P \to \overset{\downarrow}{\widetilde{A}} \to$$

$$\to F_{1,\nu} \to m \le \underset{нет}{\overset{\leftarrow да}{m_{\max}}} \to \text{если } F_{1,\nu} > F_{1,\nu,\alpha} \text{ то } a^*_{kl} = a_{kl} \text{ иначе } a^*_{kl} = 0 \to A^* \to \hat{r}^s$$

Более подробно ее можно представить следующим образом:

1. Формируем систему ЛНБФ структуры (1) с учетом максимально возможной степени сглаживающего полинома.

2. Формируем вектор измерений, состоящий из $N \cdot n$ элементов (где N – количество измеряемых первичных координат, n – число точек на интервале сглаживания).

3. По минимальному набору первичных координат рассчитываем вторичные координаты и формируем вектор несглаженных значений вторичных координат.

Если имеются данные РЛС, то вторичные координаты в местной системе координат рассчитываются по формулам [8]:

$$X = R \cdot \cos\beta \cdot \cos\alpha,$$
$$Y = R \cdot \sin\beta,$$
$$Z = R \cdot \cos\beta \cdot \sin\alpha,$$

где X, Y, Z – значения вторичных координат;

R, α, β – измеренные значения первичных координат дальности, азимута и угла места.

Если имеются данные двух КТС, то вторичные координаты в местной системе координат рассчитываются по формулам [8]:

$$X = -R_\Gamma \cdot \sin\alpha_1,$$
$$Y = R_\Gamma \cdot tg\beta,$$
$$Z = R_\Gamma \cdot \cos\alpha_1,$$
$$R_\Gamma = \frac{-\beta \sin\alpha_2}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)},$$

где β – длина базы угломерной системы;

α_1, β_1 – азимут и угол места первой КТС;

α_2 – азимут второй КТС.

4. Пересчитываем вторичные координаты из местной системы координат в стартовую систему координат.

5. Путем решения системы уравнения вида $\varphi^T\varphi C = \varphi^T r^*$ находим оценку коэффициентов сглаживающего полинома по формуле $\hat{C} = (\varphi^T\varphi)^{-1}\varphi^T r^*$.

6. По формуле $\hat{r}_0 = \varphi\hat{C} = \varphi(\varphi^T\varphi)^{-1}\varphi^T r^*$ находим начальное приближение вектора сглаженных значений вторичных координат.

7. По сглаженным значениям вторичных координат $\hat{r}_0$ вычисляем сглаженные значения начального приближения первичных координат $\hat{\xi}_0$ и формируем из них вектор со структурой идентичной структуре, приведенной в п.2.

Формулы пересчета из вторичных координат (стартовой системы) в первичные координаты (местной системы) имеют вид [8]:

$$R = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Y - Y_j)^2 + (Z - Z_j)^2},$$
$$\alpha = arctg\frac{(Z - Z_j)}{(X - X_j)},$$
$$\beta = arctg\frac{(Y - Y_j)}{R_{xz}},$$

где $R_{xz} = \sqrt{(X - X_j)^2 + (Z - Z_j)^2}$;

X_j, Y_j, Z_j – координаты станций, выполняющих измерения j-го первичного параметра;

X, Y, Z – вторичные координаты точки (объекта измерений) в простанстве в стартовой системе координат.

8. Определяем вектор отклонений $\Delta\xi_0 = \xi - \hat{\xi}_0$ данных ξ измерений от вычисленных первичных параметров $\hat{\xi}_0$, полученных на начальном этапе с использованием сглаживания полиномом m-го порядка.

9. По вычисленным значениям вторичных параметров рассчитываем проекции градиентов соответствующих первичных данных измерений по формулам, приведенным в [8], и формируем матрицу проекций градиентов.

10. По вычисленным значениям проекций градиентов, соответствующих первичным данным измерений и структуре ЛНБФ (1), формируем Якобиеву матрицу Φ с общим элементом:

$$\Phi^j_{i,kl} = \sum_{u=x}^{x,z} \left[\frac{\partial \xi^j_i}{\partial r^j_i} \varphi_{kl}(t_i, \tau_u) \right],$$

где $U = X, Y, Z$;

$l = 0, 1, 2$;

j – тип первичной координаты;

или в матричной форме $\Phi = F\varphi$ (где F – матрица проекций градиентов).

При этом положение элемента $\Phi^j_{i,kl}$ в матрице будет определяться следующим образом:

–циклически изменяющиеся индексы j и i, обозначающие соответственно тип (номер) измеряемого параметра и номер точки измерений, определяют номер строки в соответствии с упорядоченным расположением элементов вектора ξ^j_i измерений;

–циклически изменяющиеся индексы l и k, обозначающие соответственно составляющую вычисляемого вектора положения (т.е. степень по аргументу τ) и степень по аргументу t, определяют номер столбца в соответствии с упорядоченным расположением компонент a_{kl} вектора A.

11. На базе системы ЛНБФ структуры (1) строим систему Λ-ОБФ из условия равенства нулю недиагональных элементов основной матрицы $J^T_{vkl} \Lambda J_{vkl} = 0$. Для построения Λ-ОБФ воспользуемся рекуррентной формулой

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

$$\alpha_{\chi\lambda,kl} = -\frac{\Phi^j_{kl} \Lambda J_{\chi\lambda}}{J^j_{\chi\lambda} \Lambda J_{(0)\chi\lambda}}. \quad (3)$$

Из значений вспомогательных коэффициентов (3), полученных в процессе построения Λ-ОБФ на v шаге приближений, формируем верхнюю треугольную матрицу α_v, диагональные элементы которой равны нулю.

12. Из значений вспомогательных коэффициентов (3) формируем верхнюю треугольную матрицу U_v с общим элементом, рассчитанным по формуле

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

Диагональные элементы этой матрицы равны единице.

Причем матрица U накапливается от одной итерации к другой и имеет вид $P_v = \varphi U_1 U_2 ... U_v = \varphi U_\Pi$, после завершения итеративного процесса.

13. По формуле

$$\Delta\hat{A}_v = (J^T_v \Lambda J_v)^{-1} J^T_v \Lambda \Delta\xi_v$$

$$\Delta\hat{A}_{\nu} = (J_{\nu}^{T} \Lambda J_{\nu})^{-1} J_{\nu}^{T} \Lambda \Delta\xi_{\nu}$$

рассчитываем вектор приращений последовательных приближений оценок коэффициентов сглаживающего полинома.

14. Найденная поправка $\Delta\hat{A}$ должна быть сложена с $\hat{A}_{\nu}$, соответствующим той же системе Λ-ОБФ, а не с $\hat{N}_{\nu}$, соответствующим системе ЛНБФ. Для этого необходимо операцию пересчета $\hat{N}_{\nu}$ в $\hat{A}_{\nu}$ проводить на этапе каждого приближения, так как Λ-ОБФ от итерации к итерации изменяется. Пересчет $\hat{N}_{\nu}$ в $\hat{A}_{\nu}$ производим по формуле $\hat{r}(t, C) = \varphi C = \varphi IC = \varphi UU^{-1}C = P\hat{A}$, или $\hat{A}_{\nu} = (I - \alpha_{\nu})\hat{C}_{\nu}$ (где I – единичная матрица).

15. По основному алгоритму $\hat{A}_{\nu+1} = \hat{A}_{\nu} + \Delta\hat{A}_{\nu} = \hat{A}_{\nu} + (J_{\nu}^{T} \Lambda J_{\nu})^{-1} J_{\nu}^{T} \Lambda \{\xi - \xi[r(t, A_{\nu})]\}$ находим очередное приближение вектора оценок сглаживающего полинома.

16. По формуле $\Delta\hat{r}_{\nu} = P_{\nu}\Delta\hat{A}_{\nu}$ находим вектор приращений вторичных координат.

17. По формуле $\Delta\hat{r}_{\nu} = \hat{r}_{\nu} + \Delta\hat{r}_{\nu}$ вычисляем (ν+1)-приближение вторичных координат.

18. Проверяем условие

$$\left|\Delta\hat{r}_{\nu}\right| \le \varepsilon,$$

где ε = 0,1 – 0,5 м – константа, введенная для завершения итеративного процесса.

Если составляющие вектора $\Delta\hat{r}_{\nu}$ не удовлетворяют этому условию, то происходит переприсваивание $\hat{C}_{\nu} := \hat{A}_{\nu+1}$; $\hat{r}_{\nu} := \hat{r}_{\nu+1}$; $\varphi_{\nu}(t, \tau) := P_{\nu}(t, \tau)$ и начиная с пункта 5, процесс повторяется до выполнения условия пункта 19.

Если составляющие вектора $\Delta\hat{r}_{\nu}$ удовлетворяют этому условию, то последнее приближение вектора оценок коэффициентов сглаживающего полинома считается их максимально правдоподобной оценкой.

19. По критерию Фишера рассчитываем статистику по формуле

$$F_{1,\nu} = \frac{\hat{\alpha}_{\chi k}^{2}}{\hat{\sigma}_{\hat{\alpha}_{\chi k}}^{2}},$$

представляющая отношение квадрата оценки коэффициента полинома к оценке его дисперсии (где χ = 0, 1, 2; k = 0, ..., m_{max}).

20. Проверяем каждый компонент вектора коэффициентов сглаживающего полинома на значимость путем сравнения соответствующей статистики с табулированным пороговым уровнем, зависящим от числа степеней свободы и заданной доверительной вероятности.

Если соответствующая статистика больше порогового уровня, то проверяемый компонент остается в составе вектора коэффициентов сглаживающего полинома, если статистика меньше порогового уровня, то значение проверяемого компонента приравнивается к нулю.

Выполнив проверку, получаем оптимальный вектор оценок коэффициентов сглаживающего полинома $\hat{A}_{opt}$.

Умножив оптимальный вектор оценок сглаживающего полинома $\hat{A}_{opt}$ на систему Λ-ОБФ, получим значения вторичных координат положения ЛА.

21. Далее процесс повторяется с пункта 2, то есть обрабатывается следующий шаг локально-скользящего сглаживания (ЛСС).

22. Результаты сглаживания выводятся на печать в виде, удобном для потребителя

Выводы

В работе предложена методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания, позволяющая осуществить совместную обработку многопараметрических данных измерений с пространственной и временной избыточностью. При этом структура вектора коэффициентов сглаживающего полинома адаптируется к стохастической форме траектории ЛА.

Список литературы

1. Мильштейн А. В. Метод нелинейного сглаживания в обработке данных траекторных измерений / А. В. Мильштейн, В. В. Паслен // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк : ДонІЗТ. – Випуск 28. – 2011. – С. 94–101.

2. Мильштейн А. В. Новое в практике нелинейного сглаживания при обработке данных траекторных измерений / А. В. Мильштейн, И. В. Дрозда, В. В. Паслен // Автоматизація технологічних об`єктів та процесів. Пошук молодих: Збірник наукових праць XII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку, 17-20 квітня 2012 р. – Донецьк : ДонНТУ, 2012. – С. 55-57.

3. Milshtein O. To the question of application the structures of basic functions / O. Milshtein, I. Drozda, Y. Savytskaja, V. Paslon // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science - Proceedings of the 11th International Conference, TCSET'2012, Lviv – Slavske, 21 – 24 February 2012. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2012. P. 413.

4. Мильштейн А. В. Выбор структуры ортогональных базисных функций / А. В. Мильштейн, В. В. Паслен // Новітні технології в телекомунікаціях: Збірник тез V Міжнарод. наук.-техн. сімпозіуму, 17-21 січня 2012 р. – К., 2012. – С. 93–95.

5. Мильштейн А. В. Исследование структур базисных функций / А. В. Мильштейн, К. И. Мотылев, В. В. Паслен // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк : ДонІЗТ. – Випуск 29. – 2012. – С. 23–29.

6. Мильштейн А. В. О возможности применения базисных функций двух переменных в практике траекторных измерений / А. В. Мильштейн, И. В. Дрозда, Я. А. Савицкая, В. В. Паслен // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2012: 8-я Международная молодёжная научно-техническая конференция, 23-27 апреля 2012 г. – Севастополь, 2012. – С. 330.

7. Мильштейн А. В. Исследование способов построения Λ-ортогональных базисных функций двух переменных / А. В. Мильштейн, К. И. Мотылев, В. В. Паслен // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк : ДонІЗТ. – Випуск 30. – 2012. – С. 19–27.

8. Огоднийчук Н. Д. Обработка траекторной информации. Ч. I / Н. Д. Огороднийчук. – Киев : КВВАИУ, 1981. – 141 с.

Аннотации:

В работе рассмотрена методика адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений, которая применяется для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных траекторных измерений.

У роботі розглянуто методику адаптивного нелінійного оптимального згладжування багатопараметричних даних вимірювань, яка застосовується для спільної реалізації просторової і часової надмірності даних траєкторних вимірювань.

In the article the methods of adaptive nonlinear optimal smoothing of polyvalent data of measurements, which are used for the joint implementation of spatial and temporal redundancy of the data of trajectory measurements, were considered.