<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-96-106>

УДК 629.7.016

Разработка методического и программного обеспечения обработки информации и экспериментальной оценки точности измерительной системы «Сажень-ТА»

С. М. Симонов, Ю. К. Кисин, А. В. Некрасов, М. В. Шамшин

Федеральное бюджетное учреждение «Войсковая часть 09703»,
Северодвинск, Архангельская область, Российская Федерация

Приведены алгоритмы определения параметров траектории по информации системы «Сажень-ТА». Рассмотрены вопросы экспериментальной оценки точности измерительной системы «Сажень-ТА» по эталонным данным аппаратуры спутниковой навигации. Приведены результаты математического моделирования.

Ключевые слова: летательный аппарат, параметры траектории, измерения, оценки точности измерительной системы, эталон

Для цитирования: Симонов С. М., Кисин Ю. К., Некрасов А. В., Шамшин М. В. Разработка методического и программного обеспечения обработки информации и экспериментальной оценки точности измерительной системы «Сажень-ТА» // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 96–106. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-96-106>

For citation: Simonov S. M., Kisin Yu. K., Nekrasov A. V., Shamshin M. V. Development of a methodological approach and software for information processing and experimental assessment of the accuracy of the “Sazhen-TA” measuring system // Vestnik Koncerna VKO “Almaz – Antey”. 2020. No. 1. P. 96–106. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-96-106>

Поступила 16.03.2020

Одобрена 07.05.2020

Опубликована 21.05.2020

Введение

С введением в состав измерительного комплекса траекторной системы «Сажень-ТА» актуальной задачей является разработка методического и программно-математического обеспечения (ПМО) обработки и экспериментальной оценки точности измерений данной системы.

Система «Сажень-ТА» из двух комплектов размещается в районе стартовых позиций для измерений на начальном участке полета летательного аппарата (ЛА). В оптическом и инфракрасном диапазоне измеряются азимут и угол места. Рассматриваются задачи определения координат траектории ЛА по угловым измеряемым параметрам и оценки точности получаемой траектории. Программное обеспечение разработано на алгоритмических языках программирования PASCAL, C#,

что позволяет адаптировать его применение к операционной системе ОС МСВС, принятой и внедряемой в Вооруженных Силах Российской Федерации.

Содержание статьи определяется актуальностью задачи определения точности системы «Сажень-ТА» при работе измерительного комплекса в условиях морского полигона. С учетом объектов летных испытаний осуществляется выбор эталонных средств, по которым проводится экспериментальная оценка точности системы «Сажень-ТА». Данная задача экспериментальной оценки точности потребовала на первом этапе разработки методического и программного обеспечения обработки информации системы «Сажень-ТА» по определению экспериментальной траектории и на втором этапе создания соответствующих алгоритмов и программ определения экспериментальной точности измерительной системы «Сажень-ТА».

© Симонов С. М., Кисин Ю. К., Некрасов А. В., Шамшин М. В., 2020

Алгоритмы определения траектории летательного аппарата конечным методом и методом наименьших квадратов по информации системы «Сажень-ТА»

Задача определения координат траектории осуществляется по двум измерительным средствам методом наименьших квадратов (МНК) [1] и конечным методом по пересечению двух лучей, определяемых измеряемыми азимутами и углами места двух систем «Сажень-ТА» в соответствии с [1–3].

Рассматривается задача $(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) \rightarrow (x, y, z)$ – определения координат летательного аппарата (ЛА) по азимутам и углам места, измеренным с двух систем «Сажень-ТА». Данная задача, как отмечено в [2, 3], эквивалентна задаче определения координат ЛА для двух фазовых пеленгаторов, измеряющих направляющие косинусы, которая рассмотрена в известной монографии по методам статистической обработки траекторных измерений [1].

Связь направляющих косинусов $(\cos \theta_x, \cos \theta_z)$ с азимутом и углом места (α, γ) [2, 3] определяется формулой:

$$\begin{aligned} \cos \theta_x &= \sin \gamma \cdot \cos \alpha, \\ \cos \theta_z &= \sin \gamma \cdot \sin \alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

В [1] есть формулы определения координат объекта для двух фазовых пеленгаторов, измеряющих направляющие косинусы.

Координаты ЛА в местной системе координат (МСК) 1-го измерительного средства (ИС) могут быть определены по формуле:

$$\begin{aligned} x_1 &= D_1 \cdot \cos \theta_{x1}, y_1 = D_1 \cdot \cos \theta_{y1}, \\ z_1 &= D_1 \cdot \cos \theta_{z1}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, необходимо определить величину D_1 – расстояние между ЛА и точкой стояния 1-го ИС.

Способ решения задачи поясняет рисунок 1 [1], на котором показаны углы δ, φ, ψ , используемые в дальнейших расчетах.

На рисунке 1 введены следующие обозначения: $O_1X_1Y_1Z_1$ и $O_2X_2Y_2Z_2$ МСК двух измерительных средств с номерами 1 и 2. Точки O_1 и O_2 – места расположения измерительных средств. Точка S – текущее местоположение ЛА.

Величина D_1 определяется следующим образом:

$$D_1 = \frac{b \cdot \sin \varphi}{\sin \psi}, \quad (3)$$

где b – расстояние между двумя ИС, b_1^0 – единичный вектор (показан на рисунке 1 и вычисляется в соответствии с [1]). Углы треугольника O_1O_2S определяются из соотношений:

$$\cos \delta = D_1^0 \cdot \Phi_1^T \cdot b_1^0, \cos \varphi = -D_2^0 \cdot \Phi_2^T \cdot b_1^0, \quad (4)$$

$$\sin \delta = \sqrt{1 - \cos^2 \delta}, \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}, \quad (5)$$

Рис. 1. Определение координат ЛА по двум измерительным средствам

где Φ_1, Φ_2 – матрицы направляющих косинусов для перехода из МСК измерительных средств в гринвичскую систему координат (ГСК) [1]; $D_1^0 = (\cos \theta_{x1}, \cos \theta_{y1}, \cos \theta_{z1})$, $D_2^0 = (\cos \theta_{x2}, \cos \theta_{y2}, \cos \theta_{z2})$.

Системы координат ГСК и МСК определяются в соответствии с [1, с. 194, 198].

Геоцентрическая относительная (гринвичская) система координат (ГСК) – прямоугольная трехмерная система координат $OX_{\Gamma}Y_{\Gamma}Z_{\Gamma}$, начало которой расположено в центре земного эллипсоида, ось OX_{Γ} которого расположена в плоскости экватора и направлена в сторону нулевого (гринвичского) меридиана, ось OZ_{Γ} направлена по оси вращения Земли в сторону Северного полюса, ось OY_{Γ} дополняет систему координат до правой.

Местная система координат (МСК) – прямоугольная трехмерная система координат $OX_MY_MZ_M$, связанная с поверхностью Земли, начало которой расположено в точке с геодезическими координатами: B_M (геодезическая широта), L_M (геодезическая долгота), h_M (высота над поверхностью земного эллипсоида); ось OY_M направлена по внешней нормали к поверхности земного эллипсоида; ось OX_M лежит в плоскости, касательной к земному эллипсоиду в точке O , и составляет с плоскостью меридиана начала системы координат угол A_M (геодезический азимут), отсчитываемый от направления на север по часовой стрелке; ось OZ_M дополняет систему координат до правой.

Для МСК системы «Сажень-ТА» $A_M = 0$.

Формулы связи направляющих косинусов с азимутом и углом места $(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) \rightarrow (\cos \theta_{x1}, \cos \theta_{z1}, \cos \theta_{x2}, \cos \theta_{z2})$ задаются соотношением (1).

Таким образом, задача $(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2) \rightarrow (x, y, z)$ определения координат объекта по азимутам и углам места, измеренным с двух измерительных средств, тоже решена. Выходными результатами являются параметры траектории в ГСК.

Определение параметров траектории по азимутам и углам места, измеренным с двух измерительных средств, осуществляется и МНК в ГСК.

Решение задачи МНК осуществляется итерационно, на каждом шаге решая систему нормальных уравнений [1, 4, 5].

Для каждого момента времени измерений итерационным способом осуществляется определение оцениваемых координат траектории по формуле:

$$\hat{X}_{(k+1)} = \hat{X}_{(k)} + \Delta X_{(k+1)},$$

$$\Delta X_{(k+1)} = (A_{(k)}^T \cdot W \cdot A_{(k)})^{-1} \cdot A_{(k)}^T \cdot W \cdot [H - Y(\hat{X}_{(k)})], \quad (6)$$

где $\hat{X}_{(k+1)}$, $\hat{X}_{(k)}$ – оценки координат траектории в ГСК на итерациях $k+1$ и k ;

$\Delta X_{(k+1)}$ – поправка к параметрам траектории на итерации $k+1$;

$A_{(k)}$ – матрица частных производных от измеряемых параметров двух ИС по оцениваемым параметрам траектории в ГСК с k -той итерации;

H – вектор измерений (измеряемые параметры $(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2)$);

$Y(\hat{X}_{(k)})$ – вектор измеряемых параметров, вычисленный по оценке координат на k -той итерации;

W – обратная матрица к ковариационной матрице ошибок измерений K_Y ;

K_Y – диагональная квадратная матрица 4-го порядка с дисперсиями паспортных погрешностей системы «Сажень-ТА» на диагонали.

Начальное приближение $\hat{X}_{(0)}$ задается по данным априорной расчетной траектории.

Матрица частных производных от измеряемых параметров двух ИС по оцениваемым параметрам траектории в ГСК имеет блочный вид:

$$A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix},$$

где A_1, A_2 – соответствующие матрицы частных производных для первого и второго ИС.

При этом каждая из указанных матриц имеет вид:

$$B \cdot \Phi^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial \alpha}{\partial x} & \frac{\partial \alpha}{\partial y} & \frac{\partial \alpha}{\partial z} \\ \frac{\partial \gamma}{\partial x} & \frac{\partial \gamma}{\partial y} & \frac{\partial \gamma}{\partial z} \end{pmatrix} \cdot \Phi^T,$$

где B – матрица частных производных от измеряемых параметров по параметрам траектории в МСК (опуская индекс номера ИС);

Φ – матрица направляющих косинусов связи МСК ИС с гринвичской системой координат [1];

x, y, z – координаты ЛА в МСК.

Элементы матрицы B вычисляются по формулам:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial x} = -\frac{z}{R_1}; \frac{\partial \alpha}{\partial y} = 0; \frac{\partial \alpha}{\partial z} = \frac{x}{R_1};$$

$$\frac{\partial \gamma}{\partial x} = -\frac{x \cdot y}{R_1 \cdot R^2}; \frac{\partial \gamma}{\partial y} = \frac{R_1}{R^2}; \frac{\partial \gamma}{\partial z} = -\frac{z \cdot y}{R_1 \cdot R^2};$$

где $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$, $R_1 = \sqrt{x^2 + z^2}$.

При вычислении расчетных значений элементов вектора измеряемых параметров $Y(\hat{X}_{(k)})$ по координатам на k -той итерации азимут и угол места для каждого ИС определяются по формулам, опуская индекс итерации:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{z}{x}\right), \gamma = \arctg\left(\frac{y}{R_1}\right),$$

где x, y, z – координаты ЛА в МСК (для данного ИС).

При вычислении арктангенса применяется соответствующая процедура языка программирования, определяющая угол в интервале $(0, 2\pi)$.

При проведении расчетов следует учитывать возможный переход для расчетного значения азимута из I четверти в IV четверть и наоборот.

Переход в измеряемых параметрах от азимута и угла места к параметрам в виде направляющих косинусов по формуле (1) позволяет работать с непрерывными функциями и ослабить требования к начальному приближению в итерационном процессе. В программах реализована обработка обоих видов измеряемых параметров.

Точность параметров траектории движения ЛА определяется ковариационной матрицей:

$$K_X = (A_{(k)}^T \cdot W \cdot A_{(k)})^{-1}, \quad (7)$$

где k соответствует номеру последней итерации в формуле (6).

Рассмотренные методы определения параметров траектории по угловым измерениям применимы как для активного, так и для пассивного участков полета ЛА.

Возможно также определение параметров траектории ЛА по результатам измерений только одной системы «Сажень-ТА» – как координат точки пересечения луча, определяемого азимутом и углом места с плоскостью полета ЛА. Данный способ применим на участке измерений, где параметры траектории находятся «почти» в одной плоскости. Для поиска участков траектории, расположенных в «почти» одной плоскости, применяется специальная процедура. В указанной процедуре по трем выбранным точкам траектории определяется плоскость и вычисляются расстояния от остальных точек траектории до выбранной плоскости. Если для всех точек выбранного участка траектории вычисленные расстояния не превосходят малое число ε , то точки траектории находятся «почти» в одной плоскости. Число ε выбирается на уровне погрешностей определения параметров траектории МНК по двум измерительным средствам в соответствии с матрицей K_X .

На этапе моделирования расчеты по выбору участков траектории, точки которого находятся «почти» в одной плоскости, осуществляются по расчетной траектории. Расчетная траектория выдается разработчиком ЛА. Параметры данной траектории при моделировании принимаются за истинные значения.

Пусть имеется участок точек траектории, расположенных «почти» в одной плоскости, и на данном участке имеются измерения по одной системе «Сажень-ТА». Конечные формулы решения задачи определения траектории по одной системе «Сажень-ТА» будут получены нахождением координат точки пересечения луча (l_1), определяемого углами (α_1, γ_1) и плоскостью.

Плоскость может быть определена по трем точкам в ГСК: $M_1 = (x_1, y_1, z_1)$, $M_2 = (x_2, y_2, z_2)$ и $M_3 = (x_3, y_3, z_3)$.

В общем уравнении плоскости $A \cdot x + B \cdot y + C \cdot z + D = 0$ коэффициенты плоскости определяются в соответствии с уравнением (8) [6, 7]:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0. \quad (8)$$

В МСК первого измерительного средства луч (l_1) лежит на прямой, задаваемой уравнением в параметрической форме:

$$\vec{r}_1 = \vec{a}_1 \cdot t + \vec{r}_0, \quad (9)$$

где $\vec{a}_1 = \begin{pmatrix} \cos \theta_{x1} \\ \cos \theta_{y1} \\ \cos \theta_{z1} \end{pmatrix}$, $\vec{r}_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

В ГСК уравнение прямой луча (l_1), имеет вид:

$$\vec{r}_2 = \vec{a}_2 \cdot t + \vec{r}_{02}, \quad (10)$$

где $\vec{a}_2 = \Phi_1 \cdot \vec{a}_1 = \begin{pmatrix} a_{x2} \\ a_{y2} \\ a_{z2} \end{pmatrix}$, $\vec{r}_{02} = \begin{pmatrix} x_{02} \\ y_{02} \\ z_{02} \end{pmatrix}$, $\vec{b}_1$ – вектор

свободных членов для перехода из МСК в ГСК.

Пересечение луча (l_1), задаваемого уравнением (10), с плоскостью (П) соответствует параметру t_1 :

$$t_1 = \frac{-(A \cdot x_{02} + B \cdot y_{02} + C \cdot z_{02} + D)}{A \cdot a_{x2} + B \cdot a_{y2} + C \cdot a_{z2}}. \quad (11)$$

Координаты ЛА в ГСК определяются по формуле:

$$\vec{r}_2(t_1) = \vec{a}_2 \cdot t_1 + \vec{r}_{02}, \quad (12)$$

Способ решения задачи по определению координат траектории ЛА на участке полета,

та, точки которого находятся «почти» в одной плоскости, по данным с одного (первого или второго) комплекта системы «Сажень-ТА» поясняет рисунок 2.

На рисунке 2 введены следующие сокращения и обозначения: ОИС-1 – оптическое измерительное средство с номером 1 и $O_1X_1Y_1Z_1$ – МСК данного измерительного средства; ССК – стартовая система координат, $O_cX_cY_cZ_c$ – начало и оси ССК, M_1, M_2, M_3, M_4 – точки в которых получены угловые измерения азимута и угла места: $(\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2, \alpha_3, \gamma_3, \alpha_4, \gamma_4)$.

На рисунках 3–5 приведены отклонения координат ЛА, определенных тремя методами от эталона. По горизонтальной оси представлены номера измерений (и на всех других рисунках), по вертикальной оси представлены отклонения координат ЛА в км.

Графики рисунков 3–5 показывают практическое совпадение определения траектории МНК и пересечением лучей по двум системам «Сажень-ТА» и приемлемую точность определения траектории по одной системе «Сажень-ТА» на «почти» плоском участке полета.

На рисунке 6 приведены расстояния в метрах до плоскости от текущих точек траектории при определении координат траектории ЛА на «почти» плоском участке полета.

Рис. 2. Определение координат траектории ЛА на «почти» плоском участке полета по данным с одного (первого или второго) комплекта системы «Сажень-ТА»

На рисунке 7 приведены угол между лучом и плоскостью и угол пересечения лучей в градусах. Если угол между лучом и плоскостью близок к нулю, то в этом случае погрешность определения траектории по одной системе «Сажень-ТА» будет большая. В данном случае задача определения траектории по измерениям в одной системе «Сажень-ТА» плохо наблюдаема [1, 4, 5]. Угол пересечения лучей (линий визирования) двух систем «Сажень-ТА» рекомендуется в руководстве по эксплуатации обеспечивать более 10 градусов.

Разработка методического и программного обеспечения экспериментальной оценки точности измерительной системы «Сажень-ТА»

Эффективность разработанного методического и программного обеспечения оценивается на основе математического моделирования. Экспериментальная оценка точности осуществляется на уровне измеряемых параметров (азимут и угол места) системы «Сажень-ТА» и экспериментальных параметров траектории, определяемых по информации системы

Рис. 3. Отклонения по координате X значений результатов обработки от истинных тремя методами
— МНК X, — два луча X, — луч с плоскостью X

Рис. 4. Отклонения по координате Y значений результатов обработки от истинных тремя методами
— МНК Y, — два луча Y, — луч с плоскостью Y

Рис. 5. Отклонения по координате Z значений результатов обработки от истинных тремя методами
— МНК Z, — два луча Z, — луч с плоскостью Z

Рис. 6. Расстояния до плоскости от текущих точек траектории

Рис. 7. Угол между лучом и плоскостью и угол пересечения лучей

— угол между лучом и плоскостью,
— угол пересечения лучей

«Сажень-ТА» в соответствии с алгоритмами первого раздела.

При математическом моделировании за истинную траекторию принимается расчетная траектория. По данной траектории моделируются угловые измерения двух систем «Сажень-ТА» с внесением случайных ошибок «измерений» датчиком псевдослучайных чисел с нормальным законом распределения с СКО, соответствующим паспортным величинам для оптического канала – 5 угловых секунд, для инфракрасного канала – 10 угловых секунд (с данным уровнем СКО проведены все расчеты по моделированию).

Методика оценки точности измерений с применением эталонного измерительного средства осуществляется в соответствии с [1, гл. 6]. Моделирование эталонной траектории осуществляется внесением случайных ошибок в расчетную траекторию датчиком псевдослучайных чисел с нормальным законом распределения с СКО, соответствующими данным ковариационной матрицы по результатам обработки информации АПСН. По данным эта-

лонной траектории рассчитываются угловые измеряемые параметры систем «Сажень-ТА».

Вычисляется вектор случайного процесса:

$$\Delta \vec{q}_j(t_i) = \vec{q}_{juз}(t_i) - \vec{q}_{jэм}(t_i), \quad (13)$$

где $q_{juз}$, $\vec{q}_{jэм}$ – измеренный и эталонный вектор соответственно, t_i – момент времени измерений, i – номер измерения, j – номер сеанса измерений.

Составляющие векторов в (13) соответствуют угловым измерениям ($\alpha_1, \gamma_1, \alpha_2, \gamma_2$) или координатам экспериментальной траектории (x, y, z).

На рисунке 8 приведена реализация случайного процесса отклонений экспериментальных параметров траектории по МНК по информации двух измерительных средств от эталонных данных в километрах.

На рисунке 9 приведена реализация случайного процесса отклонений измерений двух систем от эталонных данных в угловых секундах.

Графики рисунка 9 показывают, что «случайные ошибки» смоделированных угловых измерений в данной реализации для двух измерительных систем не превосходят трех СКО паспортных величин для инфракрасного канала – 10 угловых секунд, даже с учетом погрешностей эталонной траектории.

Исследование случайных процессов $\Delta \vec{q}_j(t_i)$ осуществляется, как и в [1, гл. 6], в предположении, что данные процессы стационарные и эргодические и оценка статистических характеристик проводится в рамках одной реализации, поэтому далее индекс j (номер сеанса измерений) опускается.

Оценка статистических характеристик проводится на уровне оценок математического ожидания и СКО.

Случайные процессы $\Delta \vec{q}_j(t_i)$ представляются в виде трех составляющих медленно меняющихся (систематических) ошибок (ММО) и быстро меняющихся (случайных) ошибок (БМО), а также погрешностей эталонных данных:

$$\Delta \vec{q}_j(t_i) = \vec{\delta}_{ММО}(t_i) + \vec{\delta}_{БМО}(t_i) + \vec{\delta}_{ЭТ}(t_i). \quad (14)$$

Далее предполагается, что по норме для векторов погрешностей выполняется условие $\|\vec{\delta}_{ЭТ}(t_i)\| \ll \|\vec{\delta}_{ММО}(t_i)\| + \|\vec{\delta}_{БМО}(t_i)\|$ и погрешностью эталонных данных можно пренебречь.

Рис. 8. Отклонения экспериментальных параметров траектории по МНК от эталонных данных
— МНК – эталон X, — МНК – эталон Y, — МНК – эталон Z

Рис. 9. Отклонения измерений двух систем от эталонных данных
— $\Delta\alpha$ 1 ИС, — $\Delta\gamma$ 1 ИС, — $\Delta\alpha$ 2 ИС, — $\Delta\gamma$ 2 ИС

Оценка $\delta_{ММО}(t_i)$ осуществляется аппроксимацией экспериментальных данных по МНК алгебраическими полиномами или ортогональными полиномами Чебышева [1, 8].

Сглаживание осуществляется независимо по каждой координате вектора $\Delta\vec{q}_j(t_i)$.

Моделирование введения медленно меняющихся ошибок $\delta_{ММО}(t_i)$ осуществляется по угловым измерениям по формулам вида:

$$\tilde{\alpha}_k(t_i) = \alpha_k(t_i) + v \cdot t_i, \quad \tilde{\gamma}_k(t_i) = \gamma_k(t_i) + v \cdot t_i,$$

где v – коэффициент линейного изменения ММО, задается в программе моделирования.

Влияние систематических ошибок по угловым измерениям на определение параметров траектории осуществляется после проведения обработки по алгоритмам первого раздела сравнением с параметрами траектории без систематических ошибок в угловых измерениях.

Выделение медленно меняющихся ошибок в реализации случайного процесса осуществляется аппроксимацией ортогональными полиномами Чебышева 3-й степени с примене-

нием программного комплекса WinLTX, разработанного НИЦ ЭТУ СПб.

Результаты моделирования представлены в километрах на рисунке 10.

Графики рисунка 10 показывают существенное влияние на экспериментальную траекторию систематических погрешностей измерений и эффективное выделение систематических погрешностей аппроксимацией отклонений между измеренными и эталонными данными ортогональными полиномами Чебышева.

На рисунке 11 приведены в километрах средние квадратичные отклонения (СКО) экспериментальных параметров траектории МНК по дисперсиям ковариационной матрицы K_X в соответствии с (7).

Графики с обозначениями СКО X 2ИС, СКО Y 2ИС, СКО Z 2ИС соответствуют СКО, получаемым при обработке двух измерительных средств.

Сравнение графиков на рисунках 11 и 8 показывает что «случайные ошибки» экспериментальной траектории в данной реализации

Рис. 10. Отклонения экспериментальных параметров траектории по МНК от эталонных данных при внесении систематических ошибок в измерения
— ΔX , — ΔY , — ΔZ , — ΔX сглаженные, — ΔY сглаженные, — ΔZ сглаженные

Рис. 11. СКО экспериментальных параметров траектории по МНК
— СКО X 2ИС, — СКО Y 2ИС, — СКО Z 2ИС

не превосходят трех СКО экспериментальных параметров траектории по МНК, даже с учетом погрешностей эталонной траектории.

В таблице 1 приведена оценка математического ожидания и СКО в метрах быстро меняющихся (случайных) ошибок определения экспериментальной траектории по эталонным данным.

Данные в таблице 1 согласуются с результатами обработки измерений МНК с учетом погрешностей «эталонной» траектории.

При обработке реальной информации экспериментальная оценка точности системы «Сажень-ТА» осуществляется применением в качестве эталона данных АПСН.

Выводы

1. Разработаны алгоритмы и программы определения экспериментальных параметров траектории летательного аппарата по азимуту и углу места, измеренных системой «Сажень-ТА».

2. Разработано методическое и программное обеспечение экспериментальной оценки точности измерительной системы «Сажень-ТА» с применением эталонных данных аппаратуры спутниковой навигации.

3. Математическим моделированием подтверждена работоспособность предлагаемых алгоритмов.

Таблица 1

Оценка математического ожидания и СКО БМО по эталонным данным

	X	Y	Z
Мат. ожидание	-0,79	-0,51	-1,18
СКО	7	118	59

Список литературы

1. Жданюк Б. Ф. *Основы статистической обработки траекторных измерений*. М.: Советское радио, 1978. 384 с.
2. Кисин Ю. К. О применении алгоритмов на основе метода наименьших квадратов и конечных формул в задачах обработки траекторных измерений // *Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей»*. 2016. № 3. С. 74–79.
3. Землянов А. Б., Кисин Ю. К. Определение параметров траектории летательного аппарата по минимальному набору угловых измерений // *Морская радиоэлектроника*. 2017. № 2. С. 56–58.
4. Мудров В. И., Кушко В. Л. *Методы обработки измерений*. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
5. Барабанов О. О., Барабанова Л. П. *Математические задачи дальномерной навигации*. М.: Физматлит, 2007. 272 с.
6. Выгодский М. Я. *Справочник по высшей математике*. М.: Астрель – АСТ, 2006. 991 с.
7. Александров А. Д., Нецветаев Н. Ю. *Геометрия*: Учебное пособие. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. 672 с.
8. Хрущева И. В., Щербаков В. И., Леванова Д. С. *Основы математической статистики и теории случайных процессов*: Учебное пособие. СПб.: Лань, 2009. 336 с.

Об авторах

Симонов Сергей Михайлович – канд. техн. наук, заместитель начальника 1-го научного центра по научно-испытательной работе Федерального бюджетного учреждения «Войсковая часть 09703», Северодвинск, Архангельская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

Кисин Юрий Константинович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-испытательного отдела Федерального бюджетного учреждения «Войсковая часть 09703», Северодвинск, Архангельская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

Некрасов Александр Владимирович – начальник научно-испытательного отдела Федерального бюджетного учреждения «Войсковая часть 09703», Северодвинск, Архангельская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

Шамшин Михаил Владимирович – младший научный сотрудник научно-испытательного отдела Федерального бюджетного учреждения «Войсковая часть 09703», Северодвинск, Архангельская область, Российская Федерация.

Область научных интересов: методы полигонных испытаний летательных аппаратов.

Development of a methodological approach and software for information processing and experimental assessment of the accuracy of the “Sazhen-TA” measuring system

Simonov S. M., Kisin Yu. K., Nekrasov A. V., Shamshin M. V.

Military Unit No. 09703, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russian Federation

This paper presents algorithms for determining trajectory parameters using the information provided by the “Sazhen-TA” system. Issues associated with experimental assessment of the accuracy of the “Sazhen-TA” measuring system on the basis of reference data from satellite navigation equipment are considered. The results of mathematical modelling are presented.

Keywords: aircraft, trajectory parameters, measurements, measuring system accuracy parameters, reference

Information about the authors

Sergey Mikhailovich Simonov – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head for R&D of the First Scientific Centre, Military Unit No. 09703, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russian Federation.

Research interests: methods for polygon testing of aircrafts.

Yuri Konstantinovich Kisin – Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher, R&D Department, Military Unit No. 09703, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russian Federation.

Research interests: methods for polygon testing of aircrafts.

Alexander Vladimirovich Nekrasov – Head of R&D Department, Military Unit No. 09703, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russian Federation.

Research interests: methods for polygon testing of aircrafts.

Mikhail Vladimirovich Shamshin – Junior Researcher, R&D Department, Military Unit No. 09703, Severodvinsk, Arkhangelsk Region, Russian Federation.

Research interests: methods for polygon testing of aircrafts.