

Научная статья
УДК 623.55.023:519.242

Методика проектирования траекторных измерительных комплексов с использованием интервального показателя точности оценки параметров движения летательных аппаратов

Владимир Герасимович Найденов

Аннотация. В статье разработана усовершенствованная методика проектирования рациональных структур траекторных измерительных комплексов с использованием интервального показателя точности оценки параметров движения испытываемых летательных аппаратов. Разработан алгоритм вычисления значений интервального показателя точности траекторного измерительного комплекса. Представлены результаты исследования интервального показателя точности. Даны рекомендации по порядку сравнения значений оценки точности вектора параметров движения летательных аппаратов с предъявляемыми требованиями. Методика позволяет повысить точность и достоверность процесса проектирования рациональных структур траекторных измерительных комплексов, используемых для обеспечения испытаний сложных технических комплексов.

Ключевые слова: траекторный измерительный комплекс; интервальный показатель точности; летательный аппарат; область требований

Для цитирования: Найденов В.Г. Методика проектирования траекторных измерительных комплексов с использованием интервального показателя точности оценки параметров движения летательных аппаратов // Вооружение и экономика. 2026. №1(75). С. 29-37.

Original article

The Methodology of Trajectory Measuring Systems Design with the Use of an Interval Indicator of Aircraft Motion Parameters for Accuracy Estimation

Vladimir G. Naidenov

Abstract. The article has developed an improved methodology of rational structures design of trajectory measuring complexes with the use of an interval indicator of aircraft motion for parameters accuracy estimation. An algorithm for values calculation of the accuracy interval indicator of the trajectory measuring complex has been developed. The study results are presented. Recommendations are given on the procedure for comparison of the vector accuracy estimation of aircraft motion parameters with the requirements. The methodology allows for the accuracy and reliability improvement of the rational structures design process of trajectory measuring complexes used to provide complex technical systems tests.

Keywords: trajectory measuring complexes; interval accuracy indicator; aircraft; area of requirements

For citation: Naidenov V.G. The Methodology of Trajectory Measuring Systems Design with the Use of an Interval Indicator of Aircraft Motion Parameters for Accuracy Estimation. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2026; 75(1): 29-37. (In Russ.).

Выбор рациональных структур траекторных измерительных комплексов (ТИК) испытательных центров предполагает применение методов оптимизации структур таких комплексов по выбранным критериям с использованием соответствующих математических моделей, позволяющих анализировать качество различных вариантов построения ТИК.

При обосновании технических требований к траекторным измерительным комплексам, проектировании новых и модернизации существующих комплексов, а также при планировании натурных измерительных экспериментов важное значение имеет правильный выбор показателей точности ТИК.

Необходимо отметить, что в настоящее время в практике проектирования ТИК доминирует способ сравнения «точечных» оценок, характеризующих возможности ТИК, с требованиями к нему, заданных в виде среднеквадратических значений погрешностей оценок составляющих вектора параметров движения летательного аппарата (ЛА), что не позволяет получить гарантированный результат, поскольку сравниваемые значения являются случайными величинами [1-3].

В монографии [1] показано, что в результате оценки вектора параметров движения ЛА $\hat{\theta}(t)$ для момента времени t вся информация об этом векторе заключена в его плотности распределения вероятности $f(\hat{\theta}(t))$.

В случае, когда плотность распределения вероятности вектора $\hat{\theta}(t)$ подчинена нормальному закону, то точность оценки этого вектора для момента времени t характеризуется его математическим ожиданием $M(\hat{\theta}(t))$ и ковариационной матрицей $K_{\hat{\theta}}(t)$.

Однако непосредственное использование матрицы $K_{\hat{\theta}}(t)$ в качестве показателя точности достаточно затруднительно. Поэтому в монографии [1] предлагается использовать различные скалярные характеристики этой матрицы, такие как след ковариационной матрицы, определитель ковариационной матрицы или максимальное значение собственного числа ковариационной матрицы. Однако эти показатели не имеют физической размерности и не могут сравниваться с требованиями, предъявляемыми к показателям точности траекторного измерительного комплекса. Кроме того, эти показатели характеризуют только случайную составляющую погрешности ТИК и не оценивают его систематическую составляющую погрешности.

Кроме того, в настоящее время в практике проектирования траекторных измерительных систем в качестве критерия оптимизации очень часто используется такой показатель, как пространственный геометрический фактор (GDOP – Geometrical delusion of precision), который является количественной характеристикой погрешности определения координат ЛА, связанной с особенностями пространственного положения средств траекторных измерений и сопровождаемого ими летательного аппарата [4-6].

Значение пространственного геометрического фактора, являющегося скалярной величиной, зависит от взаимного расположения измерительных средств, пространственного положения средств траекторных измерений (ТИ) и сопровождаемого ими летательного аппарата, а также от используемого метода измерения координат ЛА. Так, значение пространственного геометрического фактора $\Gamma_{\Pi}(t)$ может быть вычислено по следующей формуле:

$$\Gamma_{\Pi}(t) = \sqrt{Sp[\mathbf{G}^T(t) \cdot \mathbf{G}(t)]^{-1}}, \quad (1)$$

где: $\mathbf{G}(t)$ – матрица частых производных измеряемых параметров положения ЛА по оцениваемым параметрам движения ЛА в конкретной точке траектории.

Например, при дальномерном методе измерения координат ЛА поверхностью положения для i -го средства траекторных измерений является сфера радиусом D_i с центром, расположенным в точке стояния средства ТИ. При наличии как минимум трех средств ТИ координаты ЛА определяются путем решения следующей системы уравнений [4]:

$$D_1(t) = \sqrt{[x_{c1} - x(t)]^2 + [y_{c1} - y(t)]^2 + [z_{c1} - z(t)]^2};$$

$$D_2(t) = \sqrt{[x_{c2} - x(t)]^2 + [y_{c2} - y(t)]^2 + [z_{c2} - z(t)]^2};$$

$$D_3(t) = \sqrt{[x_{c3} - x(t)]^2 + [y_{c3} - y(t)]^2 + [z_{c3} - z(t)]^2},$$

где: x_{ci}, y_{ci}, z_{ci} – координаты точки стояния i -го средства ТИ;
 $x(t), y(t), z(t)$ – текущие координаты ЛА.

В этом случае матрица частых производных $\mathbf{G}(t)$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{G}(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial D_1(t)}{\partial x} & \frac{\partial D_1(t)}{\partial y} & \frac{\partial D_1(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial D_2(t)}{\partial x} & \frac{\partial D_2(t)}{\partial y} & \frac{\partial D_2(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial D_3(t)}{\partial x} & \frac{\partial D_3(t)}{\partial y} & \frac{\partial D_3(t)}{\partial z} \end{bmatrix},$$

где: $\frac{\partial D_i(t)}{\partial x} = \frac{x_{ci} - x(t)}{D_i(t)}$; $\frac{\partial D_i(t)}{\partial y} = \frac{y_{ci} - y(t)}{D_i(t)}$; $\frac{\partial D_i(t)}{\partial z} = \frac{z_{ci} - z(t)}{D_i(t)}$.

Для радиолокационного метода измерения координат ЛА матрица частных производных $G(t)$ имеет следующий вид:

$$G(t) = \begin{bmatrix} \frac{\partial D(t)}{\partial x} & \frac{\partial D(t)}{\partial y} & \frac{\partial D(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial \beta(t)}{\partial x} & \frac{\partial \beta(t)}{\partial y} & \frac{\partial \beta(t)}{\partial z} \\ \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial x} & \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial y} & \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial z} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где: $D(t)$, $\beta(t)$, $\varepsilon(t)$ – текущие значения дальности от радиолокатора до ЛА, а также углов азимута и места на летательный аппарат соответственно.

Элементы матрицы (2) определяются частными производными от следующих выражений:

$$D(t) = \sqrt{[x_c - x(t)]^2 + [y_c - y(t)]^2 + [z_c - z(t)]^2};$$

$$\beta(t) = \arccos \frac{z_c - z(t)}{\sqrt{[x_c - x(t)]^2 + [z_c - z(t)]^2}};$$

$$\varepsilon(t) = \arcsin \frac{y_c - y(t)}{\sqrt{[x_c - x(t)]^2 + [y_c - y(t)]^2 + [z_c - z(t)]^2}}.$$

Подставляя в выражения частных производных координаты точек стояния средств ТИ и измеренные значения координат сопровождаемого ЛА на заданный момент времени t , можно получить численные значения матрицы $G(t)$ и затем вычислить значение пространственного геометрического фактора по формуле (1).

Однако необходимо отметить, что GDOP не может быть использован в качестве показателя точности ТИК, поскольку не учитывает погрешности средств траекторных измерений, а позволяет оценивать только степень ухудшения точности ТИК за счет неоптимального размещения средств ТИ этого комплекса по отношению к сопровождаемому ЛА. Конечно, при фиксированных значениях погрешностей средств ТИ величина GDOP оказывает существенное влияние на точность измерения координат ЛА, поскольку учитывает взаимное положение этого ЛА и средств траекторных измерений. Поэтому геометрический фактор может быть использован только для выбора рационального варианта расстановки средств ТИК в случае одинакового состава этих средств вдоль испытательной трассы, а также, например, для выбора оптимального «созвездия» космических аппаратов спутниковых навигационных систем.

Проведенный анализ показателей точности ТИК показал, что ни один из рассмотренных показателей не позволяет полно и достоверно характеризовать точность того или иного траекторного измерительного комплекса и позволять проводить сравнение вариантов построения такого комплекса с предъявляемыми требованиями.

В связи с этим автором предлагается использовать для этой цели интервальный показатель точности ТИК, который может широко применяться в практике проектирования ТИК, предназначенных для обеспечения проведения натурных испытаний сложных технических систем. При этом в качестве показателя точности $Q(t)$ измерительного комплекса предложено выбрать значение вероятности P нахождения оценки вектора параметров движения ЛА $\hat{\theta}(t)$ в пределах заранее заданной области пространства ε малого объема, т.е.

$$Q(t) = P(|\hat{\theta}(t) - \theta_0(t)| < \varepsilon) = P(|\Delta\hat{\theta}(t)| < \varepsilon),$$

где: $\theta_0(t)$ и $\Delta\hat{\theta}(t)$ – истинное значение вектора параметров движения ЛА и погрешность оценки этого вектора в момент времени t соответственно.

Показатель точности $Q(t)$ представляет интервальную и гарантированную оценку точности ТИК и учитывает как случайную, так и систематическую составляющие погрешности оценки вектора $\hat{\theta}(t)$. Однако ранее практическое применение такого показателя точности для

проектирования ТИК было затруднено. Это связано с тем, что разработчики сложных технических систем, для испытаний которых применяются ТИК, не обосновывают такую величину, как допустимое значение вероятности попадания вектора $\Delta\hat{\theta}(t)$ в заданную доверительную область требований B , да и форма и размеры этой области, как правило, не задаются. Кроме того, представляет определенную трудность вычисление значения вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}(t) \subset B\}$ для доверительных областей требований B , имеющих произвольную форму.

В связи с этим и возникла задача проведения исследования рассматриваемого интервального гарантированного показателя точности ТИК для получения обоснованных ответов на все интересующие вопросы и рассмотрения возможности его широкого практического применения в практике натурных испытаний сложных технических систем.

В статье рассматривается случай, когда оцениваемый вектор $\theta(t)$ параметров движения ЛА для заданного момента времени t траектории его полета имеет нормальное распределение и задается в следующем виде:

$$\theta(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t) \ \dot{x}(t) \ \dot{y}(t) \ \dot{z}(t)]^T = [\theta_1(t) \ \theta_2(t)]^T,$$

где: $\theta_1(t) = [x(t) \ y(t) \ z(t)]^T$, $\theta_2(t) = [\dot{x}(t) \ \dot{y}(t) \ \dot{z}(t)]^T$ – вектор координат ЛА и вектор скорости ЛА соответственно.

Известно, что в случае нормального закона распределения случайного вектора оценки параметров движения ЛА $\hat{\theta}(k)$ в качестве показателей точности ТИК, характеризующих случайную составляющую погрешности оценки этого вектора, выступает его ковариационная матрица $K_{\hat{\theta}}(t)$. При этом рассматриваются две ковариационные матрицы $K_{\hat{\theta}_1}(t)$ и $K_{\hat{\theta}_2}(t)$ векторов $\hat{\theta}_1(k)$ и $\hat{\theta}_2(k)$, характеризующие случайную составляющую погрешности оценки вектора координат ЛА и вектора составляющих его скорости соответственно.

Необходимо отметить, что при нормальном законе распределения погрешности оценки параметров движения ЛА, например, вектора координат траектории полета ЛА, поверхность, где наблюдается равная плотность распределения погрешности оценки вектора параметров движения ЛА, представляет собой эллипсоид. В связи с этим представляется правомерным определить в качестве доверительной области B требований, предъявляемых к точности ТИК, эллипсоид с полуосями a , b и c , центр которого находится в точке истинного положения ЛА в момент времени t , а направления осей совпадают с направлениями осей наземной системы координат.

На рисунке 1 изображен в системе координат $OXYZ$ для выбранной точки траектории полета ЛА эллипсоид рассеяния погрешности оценки вектора координат траектории полета ЛА $\hat{\theta}_1 = [\hat{x} \ \hat{y} \ \hat{z}]^T$ с главными осями рассеяния $X_{(эл)}$, $Y_{(эл)}$, $Z_{(эл)}$, которые не совпадают с осями наземной испытательной системы координат $OXYZ$. При этом считается, что летательный аппарат находится в начале системы координат $OXYZ$.

Отрезок прямой линии, соединяющей центр эллипсоида рассеяния погрешности оценки вектора $\hat{\theta}_1$ с началом системы координат $OXYZ$, имеет проекции $\delta_{\hat{x}}$, $\delta_{\hat{y}}$, $\delta_{\hat{z}}$ на оси системы координат $OXYZ$, которые характеризуют систематическую составляющую вектора $\Delta\hat{\theta}_1$ погрешности оценки вектора параметров движения ЛА траекторным измерительным комплексом.

Кроме того, на рисунке показаны проекции $\sigma_{\hat{x}}^{\oplus}$, $\sigma_{\hat{y}}^{\oplus}$, $\sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$ полуосей эллипсоида рассеяния на главные оси рассеяния $X_{(эл)}$, $Y_{(эл)}$, $Z_{(эл)}$, которые представляют собой главные среднеквадратические отклонения (СКО) случайных величин $\hat{x}$, $\hat{y}$, $\hat{z}$ в координатах $O_{(эл)}X_{(эл)}Y_{(эл)}Z_{(эл)}$ и характеризуют случайную составляющую вектора $\Delta\hat{\theta}_1$.

Как видно из рисунка, за исключением случая, когда направления главных осей рассеяния $X_{(эл)}$, $Y_{(эл)}$, $Z_{(эл)}$ совпадают в пространстве с направлениями осей наземной системы координат, значения главных СКО случайных величин $\hat{x}$, $\hat{y}$, $\hat{z}$, то есть истинных погрешностей, всегда будут больше значений проекций $\sigma_{\hat{x}}$, $\sigma_{\hat{y}}$, $\sigma_{\hat{z}}$ полуосей эллипсоида рассеяния на оси

наземной системы координат $OXYZ$. Поэтому сравнение точности ТИК с предъявляемыми к нему требованиями путем сопоставления их с проекциями полуосей рассеяния эллипсоида точности на оси наземной системы координат не является правомерным и приводит к заведомому снижению точности проектируемого ТИК.

Для обоснования допустимого значения вероятности попадания вектора $\Delta\hat{\theta}(t)$ в заданную доверительную область требований B , установления оптимальной формы и требуемых размеров этой области проведем исследования с использованием разработанного алгоритма вычисления показателя точности ТИК $Q(t) = P\{\Delta\hat{\theta}(t) \in B\}$.

В предположении, что случайные величины $\hat{x}$, $\hat{y}$ и $\hat{z}$ являются независимыми и имеют нормальный закон распределения в каноническом виде, вероятность события, заключающегося в том, что вершина случайного вектора $\Delta\hat{\theta}_1$ попадает в рассматриваемый эллипсоид требований B , определится следующей формулой:

$$P\{\Delta\hat{\theta}_1 \in B\} = \iiint_B \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{\hat{x}}^{\oplus} \sigma_{\hat{y}}^{\oplus} \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x-\delta_{\hat{x}})^2}{(\sigma_{\hat{x}}^{\oplus})^2} + \frac{(y-\delta_{\hat{y}})^2}{(\sigma_{\hat{y}}^{\oplus})^2} + \frac{(z-\delta_{\hat{z}})^2}{(\sigma_{\hat{z}}^{\oplus})^2} \right] \right\} dx dy dz,$$

где: $\delta_{\hat{x}}$, $\delta_{\hat{y}}$ и $\delta_{\hat{z}}$ – систематические составляющие погрешностей оценки соответственно случайных величин $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$;

$\sigma_{\hat{x}}^{\oplus}, \sigma_{\hat{y}}^{\oplus}$ и $\sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$ – главные СКО погрешностей соответственно случайных величин $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ в координатах $O_{(\text{эл})}X_{(\text{эл})}Y_{(\text{эл})}Z_{(\text{эл})}$.

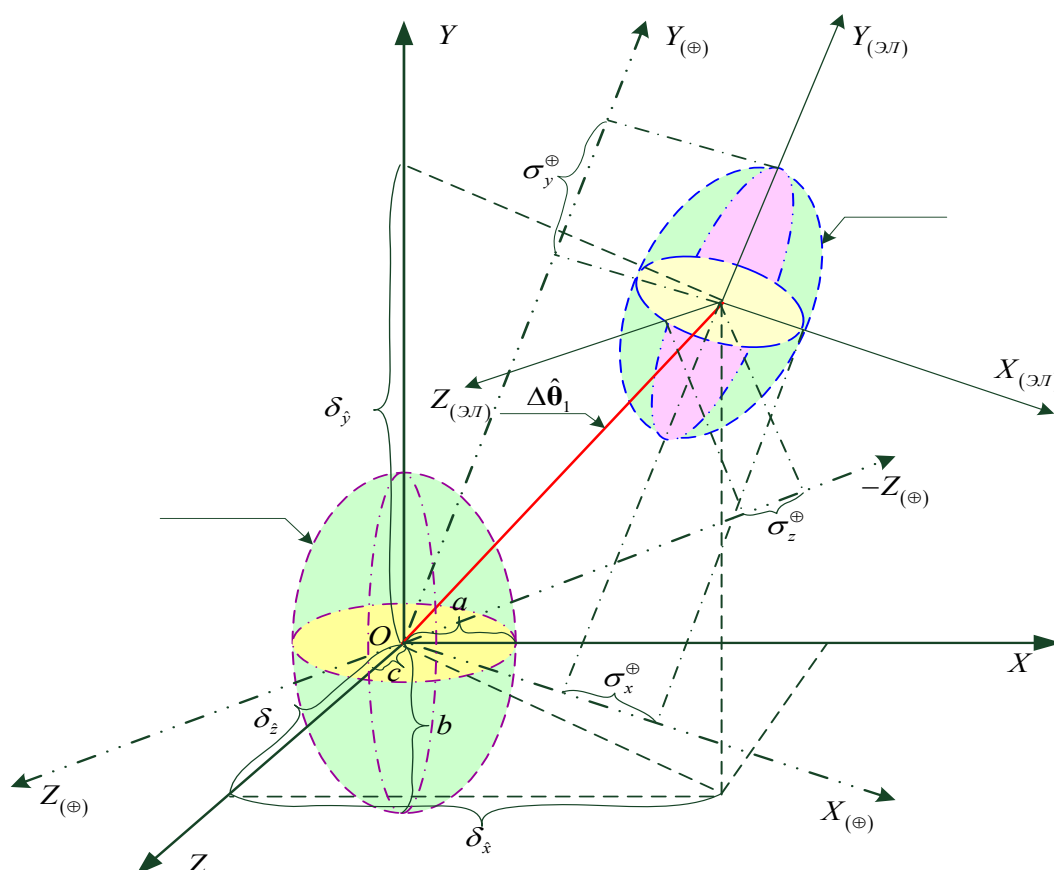


Рисунок 1 – Эллипсоид рассеяния погрешности оценки координат траектории полета ЛА и область требований к точности ТИК

Определение значений главных СКО $\sigma_{\hat{x}}^{\oplus}, \sigma_{\hat{y}}^{\oplus}, \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$ случайных величин $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ может быть проведено путем приведения ковариационной матрицы $K_{\hat{\theta}_1}$, полученной по результатам априорной оценки точности ТИК, к ее каноническому виду $K_{\hat{\theta}_1}^{\oplus}$ в соответствии со следующим преобразованием [2]:

$$K_{\hat{\theta}_1}^{\oplus} = \begin{bmatrix} \lambda_{\hat{x}} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{\hat{y}} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{\hat{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{\hat{\theta}_1}^{(1)} & U_{\hat{\theta}_1}^{(2)} & U_{\hat{\theta}_1}^{(3)} \end{bmatrix}^T \cdot K_{\hat{\theta}_1} \cdot \begin{bmatrix} U_{\hat{\theta}_1}^{(1)} & U_{\hat{\theta}_1}^{(2)} & U_{\hat{\theta}_1}^{(3)} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где: $U_{\hat{\theta}_1}^{(1)}, U_{\hat{\theta}_1}^{(2)}$ и $U_{\hat{\theta}_1}^{(3)}$ – собственные векторы ковариационной матрицы $K_{\hat{\theta}_1}$; $\lambda_{\hat{x}}, \lambda_{\hat{y}}$ и $\lambda_{\hat{z}}$ – собственные значения этой ковариационной матрицы.

Необходимо отметить, что вероятность попадания случайного вектора $\Delta\hat{\theta}_1$ в заданную произвольную область при нормальном законе рассеивания можно определить аналитически лишь в отдельных случаях. В остальных случаях нужно рационально организовать процедуры численного интегрирования плотности вероятности распределения вектора $\hat{\theta}_1(k)$ по заданной области.

При исследовании интервального показателя точности ТИК были использованы процедуры численного интегрирования с помощью программного пакета Maple.

В декартовой системе координат эллипсоид с полуосями a, b и c ограничен слева поверхностью $z = c\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$, а справа – поверхностью $z = -c\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}}$. Проекцией этого эллипсоида на плоскость XOY является эллипс $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$. Следовательно, вычисление значения вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\}$ сводится к вычислению трехкратного интеграла вида:

$$P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\} = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{\hat{x}}^{\oplus} \sigma_{\hat{y}}^{\oplus} \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}} \int_{-a}^a \int_{-b\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}}^{b\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}}} \left\{ \int_{-c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}}^{c\sqrt{1-\frac{x^2}{a^2}-\frac{y^2}{b^2}}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-m_x)^2}{(\sigma_x^{\oplus})^2} + \frac{(y-m_y)^2}{(\sigma_y^{\oplus})^2} + \frac{(z-m_z)^2}{(\sigma_z^{\oplus})^2}\right]\right) dz \right\} dy \Bigg| dx.$$

При интегрировании переменная y изменяется от $b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$ до $-b\sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2}}$.

На рисунке 2 приведено семейство зависимостей значения вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\}$ от величин главных СКО погрешностей оценки координат траектории полета ЛА в предположении, что $\sigma_{\hat{x}}^{\oplus} = \sigma_{\hat{y}}^{\oplus} = \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$ и при отсутствии систематических погрешностей оценки координат ЛА.

Из графиков рисунка 2 видно, что при увеличении значений главных СКО погрешностей оценки координат траектории полета ЛА значение вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\}$ уменьшается. Кроме того, при одних и тех же значениях $\sigma_{\hat{x}}^{\oplus}, \sigma_{\hat{y}}^{\oplus}, \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$, но с уменьшением размеров a, b и c эллипсоида требований к точности ТИК вероятность $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\}$ имеет меньшее значение.

Результаты исследований показали, что достаточно высокий уровень вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\} \geq 0,8$ имеет место, когда значения главных СКО погрешностей оценки координат траектории полета ЛА приблизительно в 1,8 раза меньше размера самой малой полуоси эллипсоида требований к точности ТИК.

На рисунке 3 приведена структурная схема предлагаемой усовершенствованной методики проектирования траекторных измерительных комплексов с использованием рассмотренного интервального показателя точности траекторных измерительных комплексов, предназначенных для проведения испытаний перспективных образцов сложных технических комплексов.

Основу предлагаемой методики проектирования траекторных измерительных комплексов составляют программные средства, реализующие частную методику априорной оценки точности ТИК, а также разработанный алгоритм вычисления интервального показателя $Q(t) = P\{\Delta\hat{\theta}(t) \subset B\}$ точности ТИК.

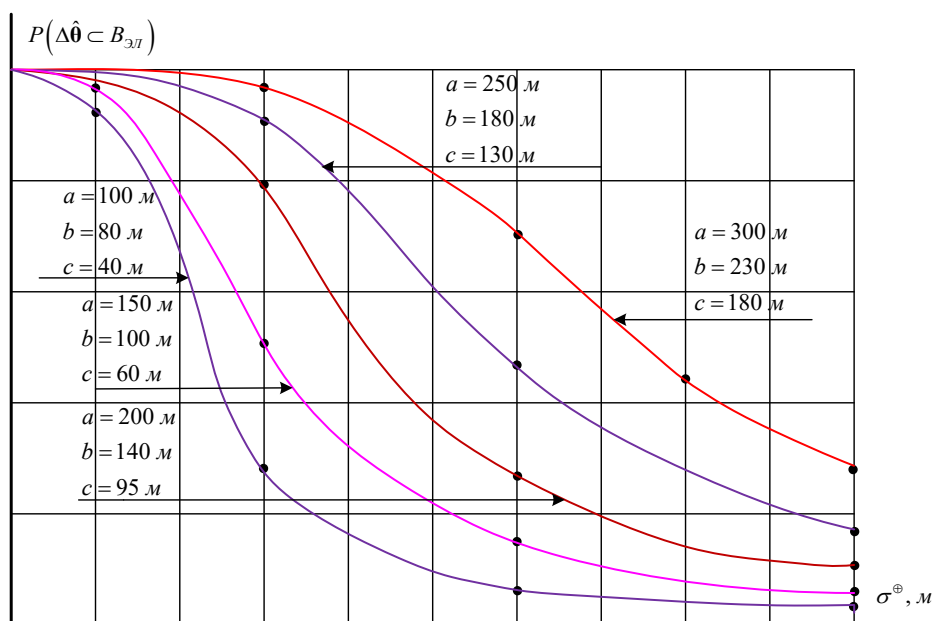


Рисунок 2 – Семейство зависимостей значения вероятности $P\{\Delta\hat{\theta}_1 \subset B\}$ от величин главных СКО погрешностей оценки координат траектории полета ЛА

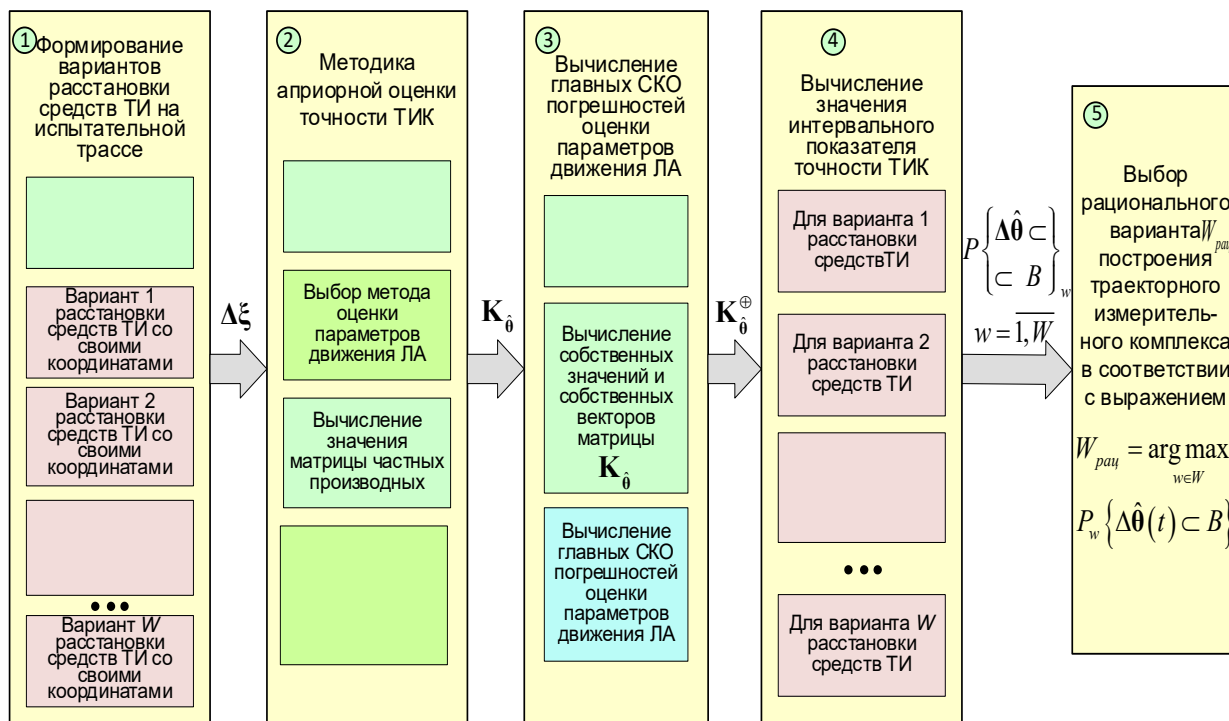


Рисунок 3 – Структура усовершенствованной методики проектирования траекторных измерительных комплексов

Блок 1 структурной схемы предполагает формирование вариантов расстановки средств ТИ на измерительных пунктах, исходя из конфигурации испытательных трасс, типов и технических характеристик применяемых траекторных измерительных средств, а также летно-технических данных испытываемых летательных аппаратов. Процесс формирования вариантов расстановки средств ТИ на измерительных пунктах, как правило, проводится опытными специалистами с использованием экспертного подхода.

В блоке 2 рассматриваемой схемы реализуется частная методика априорной оценки точности проектируемого ТИК, которая позволяет решать задачу получения оценок ковариационной матрицы вектора параметров движения ЛА вдоль траектории его полета с учетом выбранного метода, измерения параметров движения ЛА, вероятностных характеристик погрешностей измерения первичных параметров средствами траекторных измерений, а также с учетом метода совместной статистической обработки первичных измеряемых параметров средствами траекторных измерений.

Рассмотрим основные положения наиболее часто используемой на практике упрощенной методики априорной оценки точности ТИК, исходными данными для которой является следующая информация:

координаты размещаемых средств ТИ на испытательной трассе и их технические характеристики, включающие и вероятностные характеристики точности измерения ими первичных параметров;

параметры планируемых траекторий полета испытываемых летательных аппаратов.

Предположим, что модель измерений средствами ТИ имеет следующий вид:

$$\xi(t) = \xi_{\text{ист}}(t) + \Delta\xi(t),$$

где: $\xi(t)$, $\xi_{\text{ист}}(t)$ – соответственно реальное и истинное значения вектора результатов первичных траекторных измерений средствами ТИ размерностью I на момент времени t ; $\Delta\xi(t)$ – вектор погрешностей измерений, составляющие компоненты которого не коррелированы по времени и имеют параметры $N(0, \sigma_{\xi_i}^2)$.

Так как вектор первичных траекторных измерений $\xi(t)$ в общем случае связан нелинейной зависимостью с вектором оцениваемых параметров движения ЛА $\theta(t)$, то расчет погрешности оценки вектора параметров движения ЛА $\Delta\hat{\theta}(t)$ в предположении, что статистическая обработка траекторной информации проводится, например, с использованием метода наименьших квадратов, ведется по линеаризованной схеме в соответствии со следующим алгоритмом [1; 2]:

$$\Delta\hat{\theta}(t) = [G(t) \cdot P \cdot G^T(t)]^{-1} G(t) \cdot P \cdot \Delta\xi(t),$$

где: $G(t)$ – матрица частых производных измеряемых параметров средствами ТИ по оцениваемым параметрам движения ЛА в конкретной точке траектории;

P – весовая матрица учета приоритетов для первичных траекторных измерений средств ТИ.

Введя обозначение $[G(t) \cdot P \cdot G^T(t)]^{-1} G(t) \cdot P = H(t)$, получим выражение для ковариационной матрицы $K_{\hat{\theta}}(t)$ оцениваемого вектора параметров движения ЛА, которое будет иметь следующий вид:

$$K_{\hat{\theta}}(t) = M[\Delta\hat{\theta}(t) \cdot \Delta\hat{\theta}^T(t)] = M[(H(t) \cdot \Delta\xi(t)) \cdot (H(t) \cdot \Delta\xi(t))^T] = H(t) \cdot K_{\Delta\xi}(t) \cdot H^T(t), \quad (4)$$

где: $K_{\Delta\xi}(t)$ – ковариационная матрица вектора погрешностей первичных траекторных измерений.

Из выражения (4) видно, что погрешность измерения вектора параметров движения ЛА траекторным измерительным комплексом напрямую зависит от значения матрицы частых производных $G(t)$, которая, в свою очередь, определяет значение пространственного геометрического фактора.

В блоке 3 структурной схемы методики проектирования траекторных измерительных комплексов в соответствии с выражением (3) проводится вычисление значений главных СКО погрешностей оценки параметров движения ЛА, которые непосредственно входят в выражение для интервального показателя точности ТИК.

Вычисление значений интервального показателя точности ТИК для рассматриваемых вариантов построения ТИК проводится в блоке 4 рассматриваемой структурной схемы. При этом необходимо учитывать заданные значения требований к точности оценки параметров движения ЛА.

Выбор рационального варианта $W_{\text{рац}}$ построения траекторного измерительного комплекса для конкретной точки траектории полета ЛА проводится в блоке 5 предлагаемой структурной схемы по максимальному значению вероятностного интервального показателя точности в соответствии со следующим выражением:

$$W_{\text{рац}} = \underset{w \in W}{\operatorname{argmax}} P_w \{ \Delta \hat{\theta}(t) \subset B \},$$

где: $P_w \{ \Delta \hat{\theta}(t) \subset B \}$ – значение интервального показателя точности ТИК для w -го варианта построения траекторного измерительного комплекса.

Таким образом, в статье разработана усовершенствованная методика проектирования рациональных структур траекторных измерительных комплексов с использованием интервального показателя точности оценки параметров движения испытываемых ЛА. Приведен алгоритм вычисления значений интервального показателя точности ТИК. Рассмотрены результаты исследования этого интервального показателя точности и даны рекомендации по выбору доверительной области требований к ТИК, а также по порядку сравнения полученных значений точности оценки траекторным измерительным комплексом вектора параметров движения ЛА с предъявляемыми к ТИК требованиями. Кроме того, показана роль пространственного геометрического фактора при оценке точности проектируемых ТИК и возможность использования его для выбора рациональных структур ТИК.

В целом, разработанная методика позволяет повысить точность и достоверность процесса проектирования рациональных структур ТИК, используемых для обеспечения испытаний сложных технических систем.

Список источников

1. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Советское радио, 1978. 384 с.
2. Буренок В.М., Найденов В.Г., Поляков В.И. Математические методы и модели в теории информационно-измерительных систем. М.: Машиностроение, 2011. 336 с.
3. Сильвестров С.Д., Лазарев В.М., Корниенко А.И., Паншин М.И. Точность измерения параметров движения космических аппаратов радиотехническими методами. М.: Советское радио, 1970. 319 с.
4. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой навигационной системы ГЛОНАСС. Красноярск: СФУ, 2012. 260 с.
5. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. М.: Эко-Трендз, 2000. 267 с.
6. Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. 2-е изд. М.: Радио и связь, 1993. 408 с.
7. Агаджанов П.А., Дулевич В.Е., Коростелев А.А. Космические траекторные измерения. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных. М.: Советское радио, 1969. 504 с.

Информация об авторе

В.Г. Найденов – доктор технических наук, старший научный сотрудник.