

УДК 623:658.562

В.Г. НАЙДЕНОВ, доктор
технических наук, старший
научный сотрудник
К.А. ТАРАСЕНКО

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ ДОПЛЕРОВСКИМ СИСТЕМАМ ПО ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИМИ РАДИАЛЬНОЙ СКОРОСТИ

В статье представлена новая методика обоснования технических требований к доплеровским измерителям, которая позволяет принимать научно обоснованные решения при разработке тактико-технических заданий на создание перспективных доплеровских измерительных систем. Обоснование требований проведено с использованием усовершенствованного алгоритма, реализующего метод Нелдера и Мида, который позволяет решать задачи нелинейного математического программирования с ограничением в виде равенства в области изменения исследуемого функционала.

Ключевые слова: доплеровские измерительные средства; технические требования к доплеровским измерителям; деформируемый многогранник; оптимальное решение.

При испытаниях сложных технических комплексов (СТК) имеется необходимость в измерении скоростных параметров летательных аппаратов (ЛА) на траекториях их полета.

Наиболее точные измерения скоростных параметров могут быть получены с использованием доплеровских радиолокационных и радиотехнических измерительных средств, а также с применением аппаратуры, использующей для работы сигналы от спутниковых навигационных систем (СНС). Поскольку не во всех случаях возможно применить измерительную аппаратуру, использующую для работы сигналы СНС, широко применяются при испытаниях сложных технических комплексов наземные следящие и не следящие доплеровские измерительные средства.

Как правило, при испытаниях СТК предъявляются требования к траекторным измерительным комплексам по точности оценки составляющих вектора скорости полета летательных аппаратов [1; 2]. Однако доплеровские измерительные средства измеряют значение модуля вектора радиальной скорости полета ЛА, а для оценки составляющих этого вектора в качестве дополнительных первичных измерительных параметров

используются углы азимута β и места ε в направлении на ЛА в местной топоцентрической системе координат. Поэтому точность оценки составляющих вектора скорости ЛА в полигонной измерительной системе координат будет определяться погрешностями измерения как модуля вектора радиальной скорости полета ЛА, так и погрешностями измерения углов азимута и места в направлении на ЛА. В связи с этим возникла научная задача обоснования технических требований к погрешности измерения доплеровскими измерителями первичных параметров, которые необходимы при формировании тактико-технических заданий на разработку перспективных средств траекторных измерений межвидового применения.

Для решения такой задачи необходимо выбрать единый критерий, по которому будут обосновываться рассматриваемые требования. В качестве такого критерия эффективности измерительной системы может выступать интервальный показатель, который представляет собой вероятность события, состоящего в попадании погрешностей оценки составляющих вектора скорости ЛА $\Delta\hat{V} = [\hat{V}_x \hat{V}_y \hat{V}_z]^T$ в пределы заданной доверительной области B требований к точности оценки составляющих этого вектора. Данный показатель аналогичен показателю, который разработан в работе [3] и используется для обоснования требований к средствам траекторных измерений по измерению ими параметров положения ЛА.

На рисунке 1 представлены эллипсоид рассеяния погрешности оценки составляющих вектора скорости полета ЛА и доверительная область требований B , предъявляемая к точности траекторного измерительного комплекса.

В предположении, что случайные величины $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ являются независимыми и имеют нормальный закон распределения, рассматриваемый интервальный показатель эффективности может быть записан в следующем виде [4]:

$$P\{\Delta\hat{V} \in B\} = \iiint_B \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{\hat{V}_x}^{\oplus} \sigma_{\hat{V}_y}^{\oplus} \sigma_{\hat{V}_z}^{\oplus}} \left\{ \exp -\frac{1}{2} \left[\frac{(\hat{V}_x - \delta_{\hat{V}_x})^2}{(\sigma_{\hat{V}_x}^{\oplus})^2} + \frac{(\hat{V}_y - \delta_{\hat{V}_y})^2}{(\sigma_{\hat{V}_y}^{\oplus})^2} + \frac{(\hat{V}_z - \delta_{\hat{V}_z})^2}{(\sigma_{\hat{V}_z}^{\oplus})^2} \right] \right\} d\hat{V}_x d\hat{V}_y d\hat{V}_z, \quad (1)$$

где $\delta_{\hat{V}_x}, \delta_{\hat{V}_y}, \delta_{\hat{V}_z}$ – систематические составляющие погрешностей оценки случайных величин $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ соответственно;

$\sigma_{\hat{V}_x}^{\oplus}, \sigma_{\hat{V}_y}^{\oplus}, \sigma_{\hat{V}_z}^{\oplus}$ – главные среднеквадратические отклонения (СКО) погрешностей оценки случайных величин $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$ в скоростной системе координат $O\dot{X}\dot{Y}\dot{Z}$.

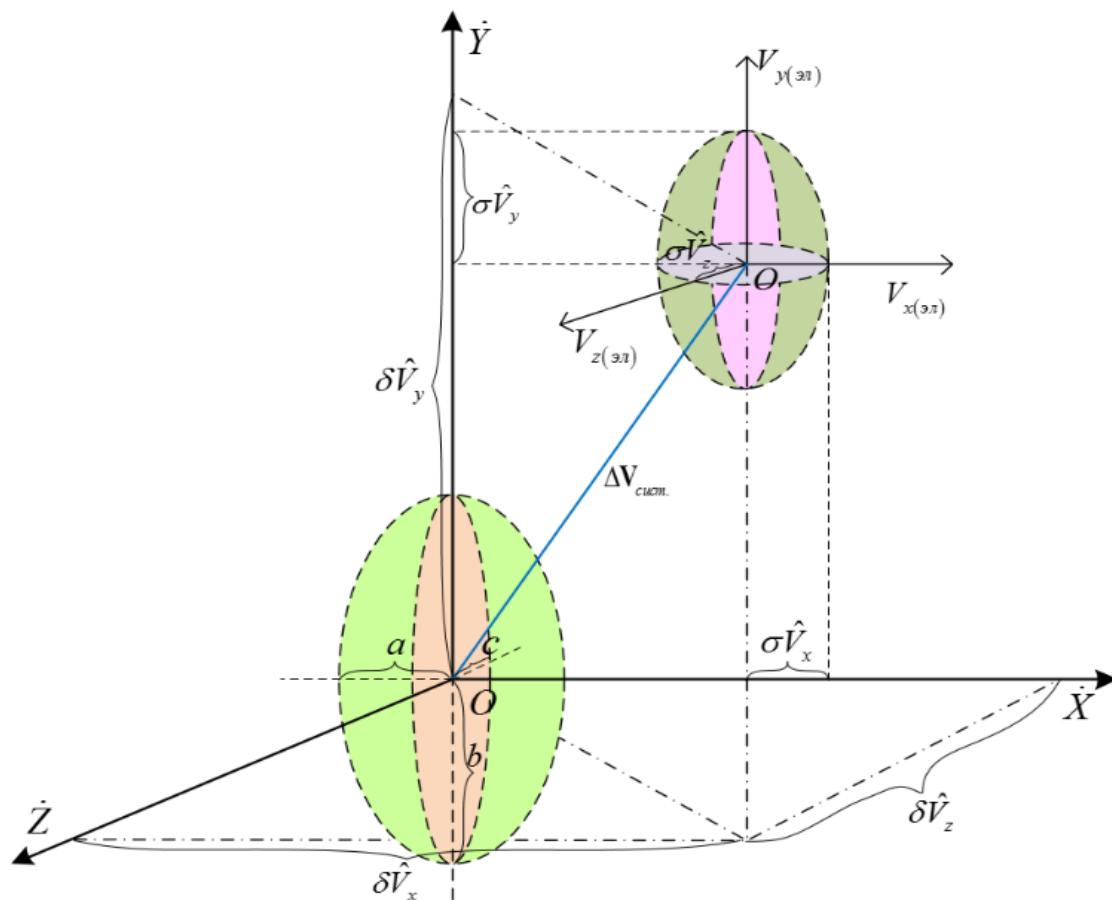


Рисунок 1 – Эллипсоид рассеяния погрешности оценки составляющих вектора скорости полета ЛА и доверительная область требований к точности траекторного измерительного комплекса

Для вычисления данного интеграла необходимо предварительно оценить значения среднеквадратических погрешностей оценки составляющих вектора скорости ЛА ($\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$). При этом существуют два варианта, когда оценки составляющих вектора скорости ЛА можно получить как по измерениям одного доплеровского измерительного средства, так и по измерениям комплекса территориально разнесенных доплеровских измерителей.

Рассмотрим второй вариант, когда измерение вектора скорости ЛА проводится с использованием трех доплеровских измерителей. Выражения для первого варианта можно без труда получить из второго путем исключения соответствующих слагаемых второго и третьего измерителей.

На рисунке 2 приведена схема, поясняющая принцип оценки составляющих вектора скорости ЛА в случае наличия трех территориально разнесенных доплеровских измерителей, что характерно для следящих радиолокационных доплеровских средств траекторных измерений. При этом рассмотрим случай, когда все три доплеровских измерителя расположены в плоскости XOZ полигонной измерительной системы координат $OXYZ$.

Проекции суммарного вектора V_s могут быть оценены по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \hat{V}_x &= -V_{r_1} \cdot \cos(\varepsilon_1) \cdot \cos(\beta_1) - V_{r_2} \cdot \cos(\varepsilon_2) \cdot \cos(\beta_2) - V_{r_3} \cdot \cos(\varepsilon_3) \cdot \cos(\beta_3); \\ \hat{V}_y &= V_{r_1} \cdot \sin(\varepsilon_1) + V_{r_2} \cdot \sin(\varepsilon_2) + V_{r_3} \cdot \sin(\varepsilon_3); \\ \hat{V}_z &= V_{r_1} \cdot \cos(\varepsilon_1) \cdot \sin(\beta_1) + V_{r_2} \cdot \cos(\varepsilon_2) \cdot \sin(\beta_2) + V_{r_3} \cdot \cos(\varepsilon_3) \cdot \sin(\beta_3). \end{aligned} \quad (2)$$

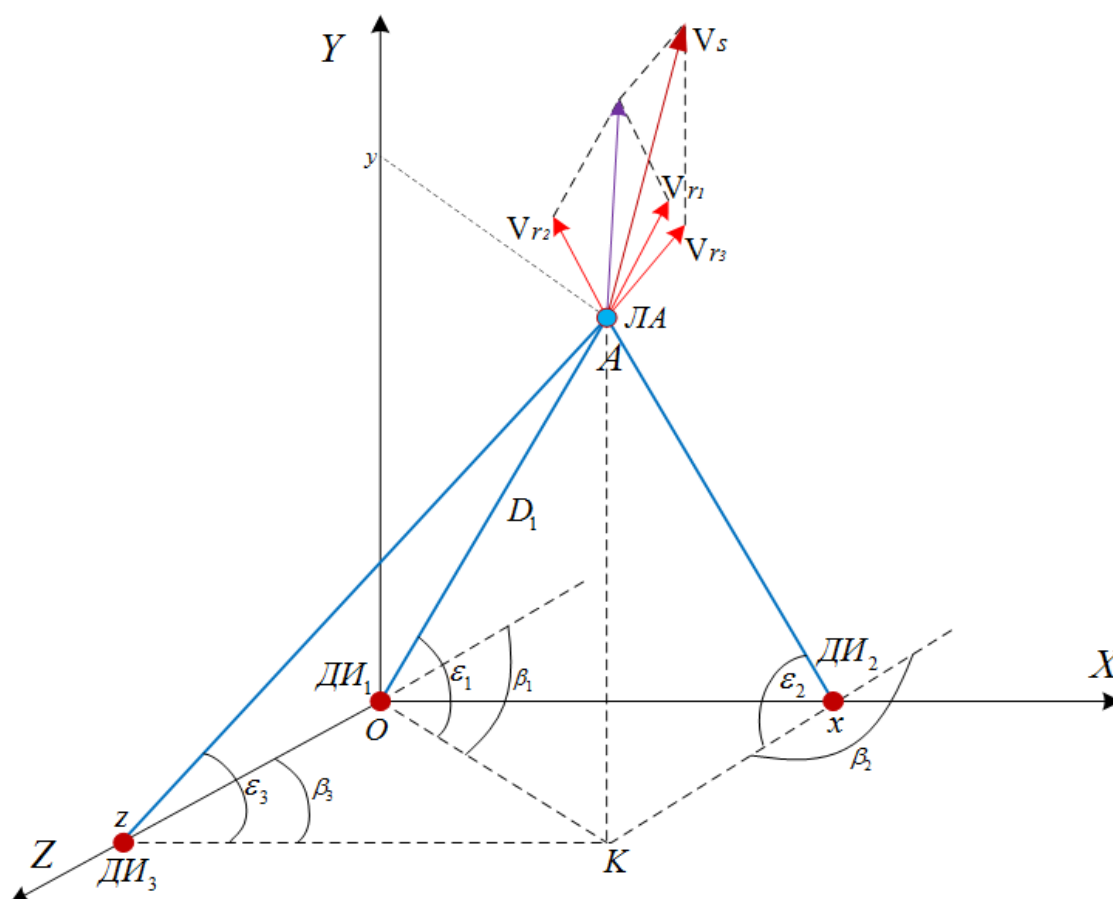


Рисунок 2 – Схема, поясняющая принцип оценки составляющих вектора скорости ЛА в случае наличия трех территориально разнесенных доплеровских измерителей

Используя метод получения косвенных оценок погрешности измерительной системы [5] и учитывая выражения (2), можно записать следующие соотношения для определения среднеквадратических отклонений погрешностей оценки составляющих суммарного вектора V_s скорости полета ЛА:

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{V}_x} &= \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{\partial \hat{V}_x \cdot \sigma_{V_{r_i}}}{\partial V_{r_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_x \cdot \sigma_{\beta_i}}{\partial \beta_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_x \cdot \sigma_{\varepsilon_i}}{\partial \varepsilon_i} \right)^2 \right]}; \\ \sigma_{\hat{V}_y} &= \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{\partial \hat{V}_y \cdot \sigma_{V_{r_i}}}{\partial V_{r_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_y \cdot \sigma_{\beta_i}}{\partial \beta_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_y \cdot \sigma_{\varepsilon_i}}{\partial \varepsilon_i} \right)^2 \right]}; \\ \sigma_{\hat{V}_z} &= \sqrt{\sum_{i=1}^3 \left[\left(\frac{\partial \hat{V}_z \cdot \sigma_{V_{r_i}}}{\partial V_{r_i}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_z \cdot \sigma_{\beta_i}}{\partial \beta_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial \hat{V}_z \cdot \sigma_{\varepsilon_i}}{\partial \varepsilon_i} \right)^2 \right]}. \end{aligned} \quad (3)$$

После взятия частных производных в соотношениях (3) получим следующие выражения:

$$\begin{aligned} \sigma_{\hat{V}_x} &= \sqrt{\sum_{n=1}^3 \left[\left(-\cos \varepsilon_n \cdot \cos \beta_n \cdot \sigma_{V_{r_n}} \right)^2 + \left(V_{r_n} \cdot \sin \varepsilon_n \cdot \cos \beta_n \cdot \sigma_{\varepsilon_n} \right)^2 + \left(V_{r_n} \cdot \cos \varepsilon_n \cdot \sin \beta_n \cdot \sigma_{\beta_n} \right)^2 \right]}; \\ \sigma_{\hat{V}_y} &= \sqrt{\sum_{n=1}^3 \left[\left(\sin \varepsilon_n \cdot \sigma_{V_{r_n}} \right)^2 + \left(V_{r_n} \cdot \cos \varepsilon_n \cdot \sigma_{\varepsilon_n} \right)^2 \right]}; \\ \sigma_{\hat{V}_z} &= \sqrt{\sum_{n=1}^3 \left[\left(\cos \varepsilon_n \cdot \sin \beta_n \cdot \sigma_{V_{r_n}} \right)^2 + \left(-V_{r_n} \cdot \sin \varepsilon_n \cdot \sin \beta_n \cdot \sigma_{\varepsilon_n} \right)^2 + \left(V_{r_n} \cdot \cos \varepsilon_n \cdot \cos \beta_n \cdot \sigma_{\beta_n} \right)^2 \right]}. \end{aligned}$$

Поскольку в рассматриваемом методическом подходе не вычисляется ковариационная матрица вектора оценки скорости ЛА, то значения среднеквадратических погрешностей $\sigma_{\hat{V}_x}, \sigma_{\hat{V}_y}, \sigma_{\hat{V}_z}$ могут рассматриваться при вычислении интервального показателя точности $P\{\Delta \hat{V} \subset B\}$ в качестве главных среднеквадратических отклонений погрешностей случайных величин $\hat{V}_x, \hat{V}_y, \hat{V}_z$.

С учетом того, что требования к погрешности измерения траекторных первичных параметров (углов места и азимута) обоснованы в работе [6], то вектор СКО погрешностей измерения радиальных скоростей тремя доплеровскими измерителями можно записать в следующем виде:

$$\Xi_{V_s} = [\sigma_{V_{r_1}} \sigma_{V_{r_2}} \sigma_{V_{r_3}}]^T,$$

где $\sigma_{V_{rk}}$ – СКО погрешности измерения радиальной скорости ЛА k -м доплеровским измерителем ($k = \overline{1, \dots, K}$).

Функциональную связь между вектором Ξ_{Vs} и интервальным показателем точности $P\{\Delta\hat{V} \subset B\}$ обозначим в следующем виде:

$$P\{\Delta\hat{V} \subset B\} = f(\Xi_{Vs}).$$

Таким образом, имеем нелинейный функционал $f(\Xi_{Vs})$, который тяжело дифференцируется, а также вектор Ξ_{Vs} в пространстве E^K , являющийся областью определения функционала $f(\Xi_{Vs})$. Требуется найти оптимальное значение вектора $\Xi_{Vs}^{(opt)}$, где значение этого функционала равно требуемому значению доверительной вероятности $P_{дов}$. Тогда в математическом виде задачу обоснования технических требований к доплеровским измерителям можно записать в следующем виде:

$$\text{определить } \Xi_{Vs}^{(opt)} = \underset{\Xi_{Vs} \in \Omega}{\text{Argmax}} f(\Xi_{Vs}) \quad (4)$$

$$\text{при ограничении } P\{\Delta\hat{V} \subset B\} = P_{дов}, \quad (5)$$

где $f(\Xi_{Vs})$ – функционал, связывающий вероятность $P\{\Delta\hat{V} \subset B\}$ с вектором Ξ_{Vs} погрешностей измерения первичных параметров доплеровскими средствами измерений;

$P_{дов}$ – значение доверительной вероятности, которая выбирается близкой к единице;

Ω – область изменения вектора Ξ_{Vs} .

Обоснование требований к точности измерения доплеровскими измерителями радиальной скорости будем проводить с использованием алгоритма решения задачи нелинейного математического программирования с ограничением в виде равенства в области изменения исследуемого функционала, который разработан в работе [7]. Данный алгоритм является усовершенствованным алгоритмом, реализующим метод Нелдера и Мида [8; 9], который, в свою очередь, применим только для решения классических задач безусловной оптимизации.

Согласно разработанному алгоритму для нахождения оптимального значения вектора СКО погрешности Ξ_{Vs} необходимо выбрать начальное значение этого вектора $\Xi_{Vs}^{(0)}$ и сформировать исходный симплекс. Компонентами такого вектора будут значения СКО погрешностей измерения первичных параметров, которые заранее по абсолютной величине больше значений погрешностей существующих доплеровских измерителей.

После того, как исходный симплекс сформирован, вычисляются значения функционала $f(\mathbb{E}_{V_s})$ в каждой из вершин заданного симплекса. При этом из вершины A , где функционал имеет минимальное значение, проводится проектируемая прямая через центр «тяжести» симплекса. Затем точка A исключается из рассмотрения и строится новый симплекс из оставшихся прежних точек и одной новой точки C , расположенной на проектируемой прямой на определенном расстоянии от центра «тяжести» симплекса. Такой полученный симплекс называется «отражением». Продолжение такой процедуры, в которой каждый раз вычеркивается вершина, где значение функционала минимально, а также использование правил уменьшения размеров симплекса, регулирования шага и изменения направления поиска оптимального решения, позволяют осуществить поиск, не используя производные от исследуемого функционала.

Симплекс в предлагаемом алгоритме представляет собой «деформируемый многогранник», который может изменять свою форму с помощью операций «отражения», «растяжения», «сжатия» и редукции.

Деформация симплекса происходит до момента, когда значение $f(\mathbb{E}_{V_s})$ в одной из вершин симплекса не окажется в заданном интервале, верхняя G_{\max} и нижняя G_{\min} границы которого определяются выражениями:

$$G_{\max} = P_{\text{дов}} + \varepsilon/2, G_{\min} = P_{\text{дов}} - \varepsilon/2, \quad (6)$$

где ε – допустимая величина интервала ограничений с центром в точке $P_{\text{дов}}$.

Графическое изображение процесса поиска оптимальных значений технических требований к доплеровским средствам измерений для случая двух измерительных каналов показано на рисунке 3.

Для определения значений требований к доплеровским измерителям по точности измерения ими радиальной скорости $\sigma_{V_r}^{(\text{треб.})}$ необходимо из всех найденных значений $\sigma_{V_{r1}}^{(opt)}$, $\sigma_{V_{r2}}^{(opt)}$ и $\sigma_{V_{r3}}^{(opt)}$ для одной рассматриваемой точки траектории полета ЛА, удовлетворяющих заданным ограничениям, выбрать минимальное значение. Поскольку оптимальное значение функционала находится для каждой из M рассматриваемых точек плановых траекторий полета ЛА, то выражение для определения $\sigma_{V_r}^{(\text{треб.})}$ будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{V_r}^{(\text{треб.})} = \min_{m=1, M} \{ \sigma_{V_{r1}, m}^{(opt)}, \sigma_{V_{r2}, m}^{(opt)}, \sigma_{V_{r3}, m}^{(opt)} \}. \quad (7)$$

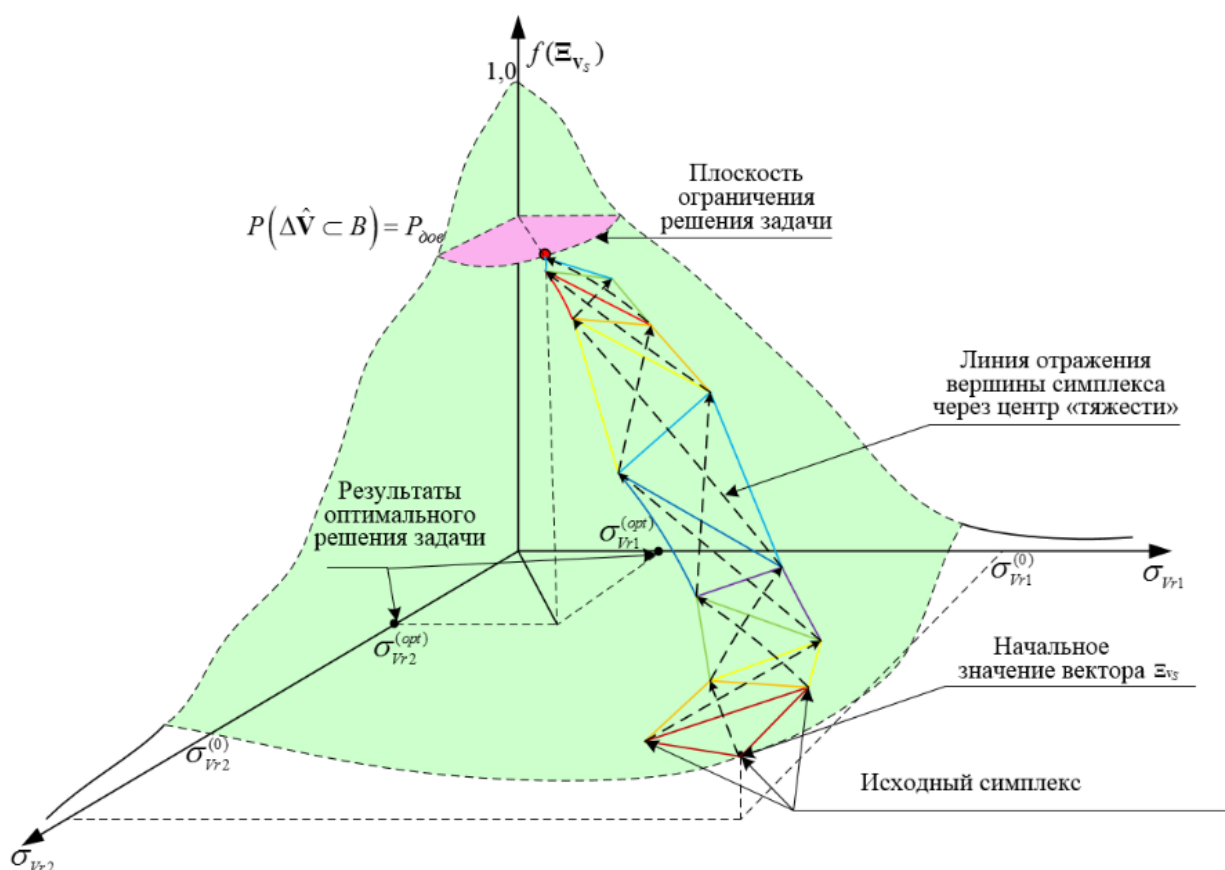


Рисунок 3 – Графическое изображение процесса поиска оптимальных значений технических требований к доплеровским средствам измерений

Апробация разработанной методики обоснования технических требований к перспективным доплеровским измерителям была проведена с использованием алгоритма решения задачи нелинейного математического программирования с ограничением в виде равенства в области изменения исследуемого функционала $f(\Xi_{v_s})$ с использованием математического пакета программ Matlab [10].

Проверка работоспособности предложенного методического подхода была проведена путем моделирования процесса нахождения значений технических требований к СКО погрешности измерения значений радиальных скоростей тремя территориально разнесенными доплеровскими измерителями. Исходные данные, используемые при моделировании, указаны в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание исходных данных для апробации разработанной методики

Наименование характеристики	Обозначение	Численное значение
Координаты ЛА в момент измерения радиальной скорости, км	x_0, y_0, z_0	4; 3; 3,5
Координаты измерителя №1, км	x_1, y_1, z_1	0; 0; 5
Координаты измерителя №2, км	x_2, y_2, z_2	0; 0; 0
Координаты измерителя №3, км	x_3, y_3, z_3	5; 0; 0
Значение радиальной скорости, измеренной измерителем №1, м/с	V_{r1}	96
Значение радиальной скорости, измеренной измерителем №2, м/с	V_{r2}	112
Значение радиальной скорости, измеренной измерителем №3, м/с	V_{r3}	220
Погрешность измерения азимута, минут	σ_β	20
Погрешность измерения угла места, минут	σ_ϵ	20
Систематические погрешности по измерению радиальной скорости, м/с	$\delta_{\hat{v}_x}, \delta_{\hat{v}_y}, \delta_{\hat{v}_z}$	0; 0; 0
Требования по точности оценки составляющих вектора скорости (полуоси эллипсоида рассеяния), м/с	a, b, c	3; 3; 3
Требуемое значение доверительной вероятности	$P_{\text{дов}}$	0,8
Значения верхней и нижней границ заданного интервала	$G_{\text{max}}, G_{\text{min}}$	0,8025; 0,7975

Функционал $f(\mathbf{E}_{V_S})$, составленный по приведенным исходным данным, будет иметь следующий вид:

$$f(\mathbf{E}_{V_S}) = \iiint_B \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{\hat{v}_x}^\oplus \sigma_{\hat{v}_y}^\oplus \sigma_{\hat{v}_z}^\oplus} \left\{ \exp -\frac{1}{2} \left[\frac{\hat{v}_x^2}{(\sigma_{\hat{v}_x}^\oplus)^2} + \frac{\hat{v}_y^2}{(\sigma_{\hat{v}_y}^\oplus)^2} + \frac{\hat{v}_z^2}{(\sigma_{\hat{v}_z}^\oplus)^2} \right] \right\} d\hat{v}_x d\hat{v}_y d\hat{v}_z, \quad (8)$$

$$\text{где } \sigma_{\hat{v}_x}^\oplus = \sqrt{0,08\sigma_{V_{r1}}^2 + 0,33\sigma_{V_{r2}}^2 + 0,55\sigma_{V_{r3}}^2 + 0,02};$$

$$\sigma_{\hat{v}_y}^\oplus = \sqrt{0,33\sigma_{V_{r1}}^2 + 0,24\sigma_{V_{r2}}^2 + 0,41\sigma_{V_{r3}}^2 + 0,03};$$

$$\sigma_{\hat{v}_z}^\oplus = \sqrt{0,59\sigma_{V_{r1}}^2 + 0,43\sigma_{V_{r2}}^2 + 0,04\sigma_{V_{r3}}^2 + 0,03}.$$

Для графического отображения процесса поиска оптимальных значений технических требований к доплеровским средствам измерений (рисунок 4) по осям трехмерной системы координат откладываются величины $\sigma_{V_{r1}}, \sigma_{V_{r2}}, \sigma_{V_{r3}}$ СКО погрешности измерения радиальных скоростей ЛА каждым из трех измерителей. Также на графике отображена поверхность равного уровня, в каждой точке которой значение функционала $f(\Xi_{Vs})$ равно заданному значению доверительной вероятности $P_{\text{доб}}$. Таким образом, на данном рисунке в трехмерной системе координат отображена зависимость значений функции $f(\Xi_{Vs})$ от трех переменных $\sigma_{V_{r1}}, \sigma_{V_{r2}}, \sigma_{V_{r3}}$.

Моделирование работы рассмотренного алгоритма по определению требований к доплеровским измерителям по точности измерения ими радиальной скорости проводилось из начальной точки с координатами $\sigma_{V_{r1}}^{(0)} = 3 \text{ м/с}, \sigma_{V_{r2}}^{(0)} = 3 \text{ м/с}, \sigma_{V_{r3}}^{(0)} = 3 \text{ м/с}$.

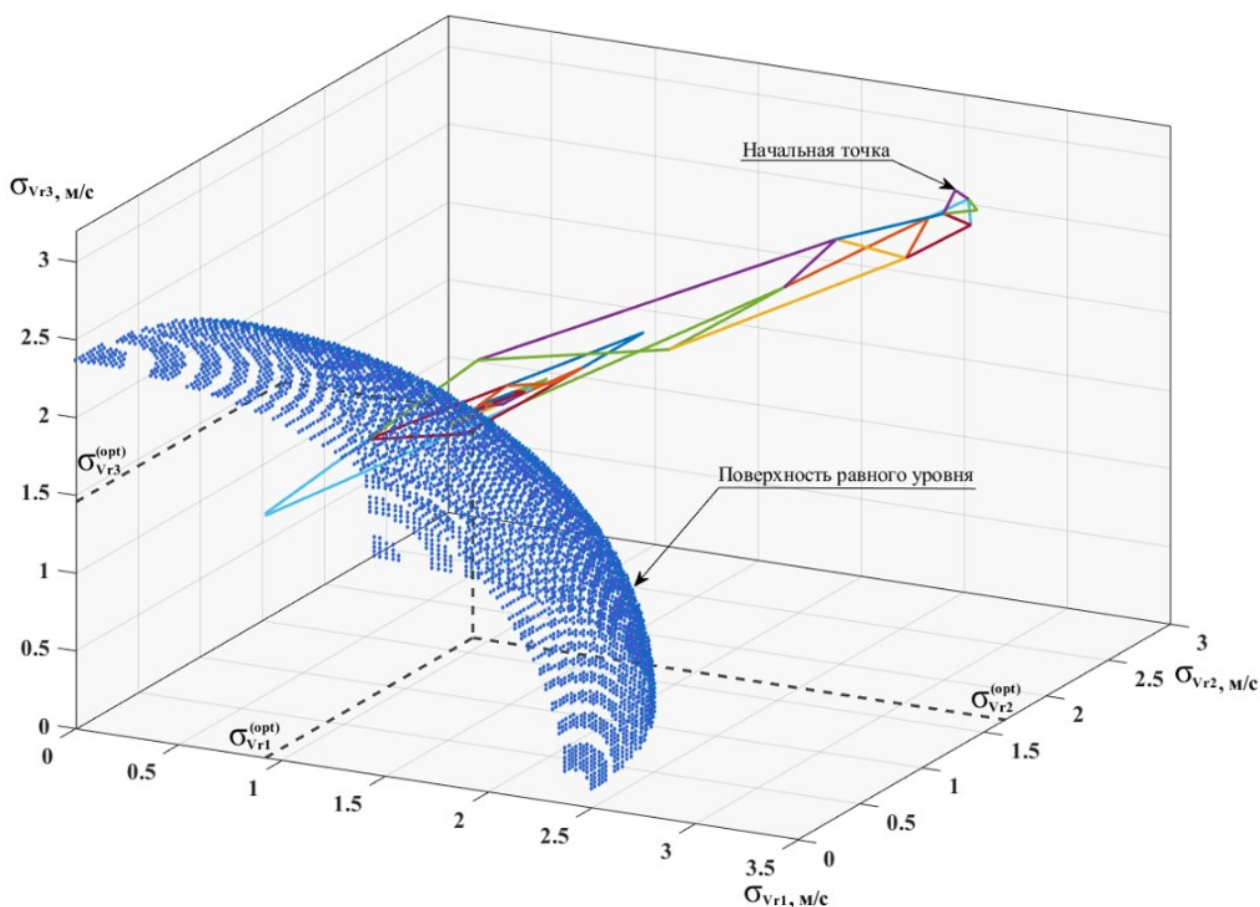


Рисунок 4 – Визуализация процесса поиска оптимального значения вектора $\Xi_{Vs}^{(opt)}$

Значение функционала $f(\mathbb{E}_{V_s})$, описанного выражением (8), в начальной точке с указанными координатами равно 0,1982.

Зондирующий симплекс D при заданном расстоянии t между двумя вершинами симплекса, равным 0,15 метров, имеет вид:

$$D^{(0)} = \begin{bmatrix} 3,000 & 3,141 & 3,035 & 3,035 \\ 3,000 & 3,035 & 3,141 & 3,035 \\ 3,000 & 3,035 & 3,035 & 3,141 \end{bmatrix}.$$

На первом этапе поиска оптимального решения были получены следующие значения функционала:

$$f^{(0)}(x_1) = 0,1982; f^{(0)}(x_2) = 0,1873; f^{(0)}(x_3) = 0,1872; f^{(0)}(x_4) = 0,1870.$$

После определения максимального и минимального значений функционала и вычисления центра «тяжести» симплекса, выполнялась операция «отражения» с дальнейшей деформацией многогранника (операции «растяжения», «сжатия» или редукции). После обновления значений функционала для новых вершин симплекса итерационный процесс поиска продолжался.

Оптимальные значения требований к точности рассматриваемых дальномерных измерительных каналов были получены после обработки алгоритмом двадцати пяти циклов вычислений.

Полученные значения требований к доплеровским измерителям по точности измерения ими радиальной скорости после остановки итерационного процесса имели следующие значения:

$$\sigma_{V_{r1}}^{(opt)} = 0,92 \text{ м/с}, \sigma_{V_{r2}}^{(opt)} = 1,67 \text{ м/с}, \sigma_{V_{r3}}^{(opt)} = 1,46 \text{ м/с}.$$

Требуемое значение требований к доплеровским измерителям по точности измерения ими радиальной скорости $\sigma_{V_r}^{(треб.)}$ для заданной точки траектории полета ЛА было определено из выражения

$$\sigma_{V_r}^{(треб.)} = \min\{\sigma_{V_{r1}}^{(opt)}, \sigma_{V_{r2}}^{(opt)}, \sigma_{V_{r3}}^{(opt)}\} = 0,92 \text{ м/с}.$$

Результаты проведенного модельного эксперимента показали работоспособность разработанной методики по обоснованию технических требований к перспективным доплеровским измерителям по точности измерения ими радиальной скорости.

Таким образом, в статье разработана новая методика по обоснованию технических требований к доплеровским измерителям, которая позволяет принимать научно обоснованные решения при разработке тактико-технических заданий на создание перспективных доплеровских измерительных систем, используемых при испытаниях сложных технических комплексов.

Список использованных источников

1. Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Советское радио, 1978.
2. Агаджанов П.А., Дулевич В.Е., Коростелева А.А. Радиотехнические методы измерений и математическая обработка данных. М.: Советское радио, 1969.
3. Найденов В.Г., Першин Е.В. Результаты исследования интервального показателя точности траекторного измерительного комплекса // Вооружение и экономика. 2017. №3.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2007.
5. Основы испытаний летательных аппаратов / Под ред. А.Н. Кринецкого. М.: Машиностроение, 1989.
6. Найденов В.Г., Тарасенко К.А., Першин Е.В. Методический подход к обоснованию требований к перспективным наземным средствам траекторных измерений по точности получения ими первичных измерений // Вооружение и экономика. 2021. №1.
7. Найденов В.Г., Тарасенко К.А. Разработка алгоритма решения задачи нелинейного математического программирования с ограничениями в виде равенства в области изменения исследуемого функционала // Вооружение и экономика. 2021. №4.
8. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Под ред. М.Л. Быховского. М.: Мир, 1975.
9. Введение в нелинейное программирование / Под ред. К.-Х. Эльстера. М.: Наука, 1985. – 263 с.
10. Дьяконов В.П. MATLAB+Simulink Основы применения. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.