

УДК 623:658.562

В.Г. Найденов, доктор технических наук, старший научный сотрудник
К.А. Тарасенко
Е.В. Першин

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБОСНОВАНИЮ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВНЫМ НАЗЕМНЫМ СРЕДСТВАМ ТРАЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПО ТОЧНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИМИ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В статье сформулирована актуальная научная задача обоснования требований к перспективным средствам траекторных измерений по точности получения ими первичных измерений, исходя из требований, предъявляемых к точности оценок вектора параметров движения испытываемых летательных аппаратов. Для решения данной задачи был использован численный оптимизационный метод крутого восхождения, который сочетает в себе многофакторное планирование и реализацию модельного эксперимента, линейный регрессионный анализ, а также градиентный метод максимизации показателя точности траекторного измерительного комплекса с учетом ограничения, накладываемого на требуемую точность этого комплекса. Разработанный методический подход может быть успешно применен при обосновании требований к траекторным измерительным средствам при разработке технических заданий на их создание.

Ключевые слова: траекторный измерительный комплекс; средства траекторных измерений; требования к средствам траекторных измерений; многофакторный эксперимент.

В настоящее время возникла актуальная научно-техническая задача обоснования требований к техническим характеристикам наземных средств траекторных измерений, используемых в составе траекторных измерительных комплексов.

До сих пор перспективные средства траекторных измерений (ТИ) разрабатывались, исходя из сравнения с техническими характеристиками зарубежных аналогов или путем модернизации существующих средств

ТИ с учетом постепенного улучшения их технических характеристик благодаря появлению более совершенных технологий и элементной базы. Научного подхода к обоснованию полного объема требований к техническим характеристикам перспективных средств ТИ до настоящего времени практически не существовало.

Задача обоснования требований к средствам траекторных измерений возникает при разработке технических заданий на создание перспективных средств ТИ. При этом основными техническими характеристиками таких средств являются следующие:

- максимальная дальность действия средства ТИ D_{max} по сопровождению летательного аппарата (ЛА);
- требуемые значения точности измерения дальности до ЛА, скорости изменения дальности до ЛА, а также допустимых погрешностей измерения азимута и угла места на летательный аппарат;
- требуемые скорости сопровождения следящими средствами ТИ летательных аппаратов по азимуту и углу места вдоль траекторий их полета.

Данные требования вытекают из условий проведения испытаний сложных технических комплексов (СТК), а также из необходимости выполнения требований к траекторному измерительному комплексу, предъявляемых со стороны испытываемых образцов СТК.

Наибольший интерес имеет место задача обоснования требований к значениям точности измерения средствами ТИ полученных ими первичных измерений.

В данной статье ограничимся рассмотрением задачи обоснования требований к характеристикам точности наземных средств ТИ, по выходной информации которых оцениваются координаты ЛА.

Наиболее важными из такого вида требований являются следующие:

- требуемое значение среднеквадратического отклонения (СКО) измерения дальности до сопровождаемого ЛА;
- требуемые значения СКО погрешностей измерения значений азимута и угла места на сопровождаемый средством ТИ летательный аппарат.

Траекторный измерительный комплекс является обеспечивающей системой и предназначен для обеспечения испытаний сложных технических комплексов. Поэтому обоснование требований к характеристикам точности определения первичных измерений средствами ТИ должно проводиться, исходя из требований, предъявляемых к траекторным измерительным комплексам со стороны СТК. Такими требованиями являются СКО погрешности измерения координат ЛА в заданной системе координат $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$.

Необходимо отметить, что задача обоснования требований к средствам траекторных измерения является обратной к задаче априорной оценки точности траекторного измерительного комплекса. Однако эти задачи принципиально отличаются тем, что задача обоснования требований к средствам ТИ является многозначной и имеет множество решений. В этом и заключается сложность решения такой задачи.

Для решения задачи обоснования требований к характеристикам точности средств ТИ необходимо выбрать единый критерий, по которому будут оцениваться рассматриваемые требования. Наиболее приемлемым критерием при решении такой задачи является интервальный вероятностный критерий, представляющий собой вероятность попадания вектора $\Delta\hat{\theta}(t)$ погрешности оценки вектора $\hat{\theta}(t)$ координат ЛА в момент времени t в область требований $B_{эл}$, определяющей точность оценки траекторным измерительным комплексом координат ЛА, которая, как правило, выбирается в виде эллипсоида.

Обоснование требований к характеристикам точности средств ТИ будем проводить с использованием численной процедуры, основанной на применении метода многофакторного планирования модельного эксперимента, который называется методом Бокса-Уилсона [1; 2]

Применение метода многофакторного планирования эксперимента предполагает составление и модельную реализацию многофакторного ортогонального плана, в котором в качестве факторов выступает вектор $E_L(t)$ СКО погрешностей измерительных каналов средств траекторных измерений в момент времени t , а в качестве «отклика» проведенных модельных экспериментов выступает интервальный показатель точности траекторного ИК. Тогда в математическом виде задачу обоснования требований к средствам траекторного ИК можно записать в следующем виде:

$$\text{определить } \Xi_{L(\text{opt})}(t) = \underset{\Xi_L(t) \in \Omega}{\text{Argmax}} \Psi(\Xi_L(t)) \quad (1)$$

$$\text{при ограничении } P(\Delta\hat{\theta}(t) \subset B_{\text{эл}}) = P_{\text{дов}}, \quad (2)$$

где $\Delta\hat{\theta}(t)$ – вектор погрешности оценки составляющих вектора $\hat{\theta}(t)$ координат ЛА в момент времени t ; Ψ – функция, связывающая вероятность $P(\Delta\hat{\theta}(t) \subset B_{\text{эл}})$ с вектором $\Xi_L(t)$ погрешностей измерения первичных параметров средствами ТИ; $P_{\text{дов}}$ – значение доверительной вероятности, которая выбирается близкой к единице; Ω – область изменения вектора $\Xi_L(t)$ для точки траектории, где были получены измерения в момент времени t .

Интервальный показатель точности (2) означает вероятность нахождения в момент времени t значения погрешности оценки вектора $\hat{\theta}(t)$ координат ЛА в заданную область требований, предъявляемых к траекторному ИК [3].

В предположении, что случайные величины \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} оценки координат ЛА являются независимыми, имеют нормальный закон распределения в каноническом виде, то вероятность события, заключающегося в том, что случайный вектор $\Delta\hat{\theta}(t)$ для рассматриваемого момента времени попадет в эллипсоид $B_{\text{эл}}$ требований, определяется следующей формулой [6]:

$$P\{\Delta\hat{\theta} \subset B_{\text{эл}}\} = \iiint_{B_{\text{эл}}} \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^3 \sigma_{\hat{x}}^{\oplus} \sigma_{\hat{y}}^{\oplus} \sigma_{\hat{z}}^{\oplus}} \left\{ \exp -\frac{1}{2} \left(\frac{(x-\delta_{\hat{x}})^2}{(\sigma_{\hat{x}}^{\oplus})^2} + \frac{(y-\delta_{\hat{y}})^2}{(\sigma_{\hat{y}}^{\oplus})^2} + \frac{(z-\delta_{\hat{z}})^2}{(\sigma_{\hat{z}}^{\oplus})^2} \right) \right\} dx dy dz,$$

где $\delta_{\hat{x}}$, $\delta_{\hat{y}}$ и $\delta_{\hat{z}}$ – систематические составляющие оценки погрешностей случайных величин \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} соответственно; $\sigma_{\hat{x}}^{\oplus}$, $\sigma_{\hat{y}}^{\oplus}$ и $\sigma_{\hat{z}}^{\oplus}$ – главные СКО оценки погрешностей соответственно случайных величин \hat{x} , \hat{y} и \hat{z} в заданной системе координат.

Вектор СКО погрешностей измерения первичных параметров средствами ТИ для случая использования радиолокационных или оптико-электронных средств, измеряющих дальность до ЛА, азимут и угол места по направлению на летательный аппарат, можно записать в следующем виде:

$$\Xi_L(t) = [\sigma_{D_1} \dots \sigma_{D_k}; \sigma_{\beta_1} \dots \sigma_{\beta_n}; \sigma_{\varepsilon_1} \dots \sigma_{\varepsilon_m}]^T,$$

где σ_{D_k} – СКО погрешности измерения дальности до ЛА k -м дальномерным каналом; σ_{β_n} – СКО погрешности измерения азимута на ЛА n -м угломерным измерительным каналом; σ_{ε_m} – СКО погрешности измерения угла места на ЛА m -м угломерным измерительным каналом.

Компоненты вектора Ξ_L представляют собой показатели качества средств ТИ, которые являются факторами, влияющими на показатель качества траекторного ИК, в качестве которого может быть выбран описанный выше интервальный показатель точности $P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{\varepsilon_L})$ траекторного измерительного комплекса. Тогда можно обозначить функциональную связь вида $P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{\varepsilon_L}) = \Psi(\Xi_L)$.

Для нахождения оптимального значения вектора СКО погрешности измерительных каналов $\Xi_{L(opt)}$ с использованием метода многофакторного планирования экспериментов необходимо выбрать начальное значение этого вектора $\Xi_L^{(0)}$. Компонентами такого вектора будут значения СКО погрешностей измерительных каналов средств ТИ, которые по абсолютной величине больше существующих значений погрешностей измерительных каналов радиолокационных средств ТИ, обладающих сравнительно низкой точностью.

Для решения поставленной задачи методом многофакторного планирования экспериментов необходимо провести нормирование рассматриваемых факторов, являющихся факторами, от которых зависит значение функции $\Psi(\Xi_L)$.

Будем считать, что все компоненты вектора Ξ_L являются натуральными значениями факторов и обозначим их как F_k , где $k = \overline{1, K}$. Преобразование первичных значений факторов в безразмерные величины (f_k , где $k = \overline{1, K}$) проводится с помощью операции нормирования по формуле:

$$f_k = \frac{F_k - F_{0k}}{\Delta F_k}, k = \overline{1, K}, \quad (3)$$

где $F_{0k} = 0,5 \cdot (F_k^{(H)} + F_k^{(B)})$ – основной уровень k -го фактора; $\Delta F = 0,5 \cdot (F_k^{(B)} - F_k^{(H)})$ – интервал варьирования фактора F_k в натуральных единицах; $F_k^{(B)}, F_k^{(H)}$ – соответственно верхнее и нижнее натуральные значения k -го фактора.

В этом случае при изменении фактора F_k в пределах от $F_k^{(H)}$ до $F_k^{(B)}$ значение f_k изменяется в пределах от -1 до $+1$.

Таблица 1 – Матрица планирования эксперимента при $K = 3$

Номер опыта	Значения нормированных факторов и оценок функции $\Psi(\Xi_L)$.				
	f_0	f_1	f_2	f_3	$\hat{\Psi}(\Xi_L)$
1	+1	-1	-1	-1	$\hat{\Psi}_1(\Xi_L)$
2	+1	+1	-1	-1	$\hat{\Psi}_2(\Xi_L)$
3	+1	-1	+1	-1	$\hat{\Psi}_3(\Xi_L)$
4	+1	+1	+1	-1	$\hat{\Psi}_4(\Xi_L)$
5	+1	-1	-1	+1	$\hat{\Psi}_5(\Xi_L)$
6	+1	+1	-1	+1	$\hat{\Psi}_6(\Xi_L)$
7	+1	-1	+1	+1	$\hat{\Psi}_7(\Xi_L)$
8	+1	+1	+1	+1	$\hat{\Psi}_8(\Xi_L)$

Для плана полного многофакторного эксперимента число опытов N всех неповторяющихся комбинаций из K рассматриваемых факторов, имеющих по два уровня, будет равно $N = 2^K$. При этом матрица планирования без взаимодействия различных уровней независимых переменных при $K = 3$ будет иметь вид, представленный в таблице 1.

Для уменьшения количества опытов можно построить матрицу дробного многофакторного эксперимента.

Матрица проведения дробного (полуреплики) многофакторного эксперимента приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица проведения дробного многофакторного эксперимента

Номер опыта	Значения нормированных факторов				Номер опыта	Значения нормированных факторов			
	f_0	f_1	f_2	f_3		f_0	f_1	f_2	f_3
1	+1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	-1
2	+1	+1	-1	-1	4	+1	+1	+1	+1

Полученный в результате проведения опытов многофакторного эксперимента статический материал дает возможность построить линейное регрессионное уравнение следующего вида:

$$\hat{\Psi}(\Xi_L) = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 \cdot f_1 + \dots + \hat{b}_k \cdot f_k + \hat{b}_K \cdot f_K, \quad (4)$$

где $\hat{\Psi}(\Xi_L)$ – оцениваемая касательная гиперплоскость в области проведения многофакторного эксперимента, позволяющая аппроксимировать в этой области функцию $\Psi(\Xi_L)$.

Коэффициенты регрессионной модели (4) могут быть оценены с использованием метода наименьших квадратов [6; 7]. Согласно этому методу находятся такие значения оценок \hat{b}_k величин b_k , которые минимизируют сумму квадратов отклонений (невязок) δ_n^2 опытных точек от величин, предсказанных регрессионным уравнением (4), то есть которые минимизируют функционал вида:

$$G = \sum_{n=1}^N \delta_n^2 = \sum_{n=1}^N (\hat{\Psi}(\Xi_L)_n - \sum_{k=0}^K \hat{b}_k f_{k_n})^2. \quad (5)$$

В результате минимизации функционала (5) может быть получено выражение для оценки вектора \hat{B} коэффициентов уравнения регрессии вида:

$$B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot \hat{\Psi},$$

где X – матрица многофакторного эксперимента; $\hat{\Psi}$ – вектор результатов оценок функции $\hat{\Psi}(\Xi_L)$ в точках реализации плана многофакторного эксперимента.

Важными этапами обработки результатов многофакторного эксперимента является проверка коэффициентов уравнения регрессии на значимость, а также проверка самой модели на адекватность.

Проверка коэффициентов уравнения регрессии на значимость для каждого коэффициента проводится независимо и может быть осуществлена по t -критерию Стьюдента.

Проверка регрессионной модели на адекватность проводится путем изучения разности между экспериментальными значениями функции $\hat{\Psi}(\Xi_L)$ и значениями, предсказанными по уравнению регрессии в точках проведения многофакторного эксперимента. Проверка адекватности модели может быть проведена, например, с использованием критерия χ^2 .

Для нахождения оптимального значения вектора $\Xi_{L(opt)}$, при котором траекторный ИК способен выполнить предъявляемые к нему требования,

необходимо правильно определить стратегию проведения повторных многофакторных экспериментов.

Реализация оптимальной стратегии проведения повторных многофакторных экспериментов достигается применением метода крутого восхождения. Метод крутого восхождения представляет собой пошаговое движение по поверхности функции $\Psi(\Xi_L)$, которое обеспечивается использованием градиентного метода в сочетании с проведением повторных многофакторных экспериментов.

Скорость возрастания функции $\Psi(\Xi_L)$ будет наибольшей в направлении градиента оцениваемой гиперплоскости, а сам градиент определяется формулой:

$$\text{grad}\hat{\Psi}(\Xi_L) = \frac{\partial\hat{\Psi}(\Xi_L)}{\partial f_1} I_1 + \frac{\partial\hat{\Psi}(\Xi_L)}{\partial f_2} I_2 + \dots + \frac{\partial\hat{\Psi}(\Xi_L)}{\partial f_K} I_K,$$

где I_K – орты ($k = \overline{1, K}$).

Таким образом, направление градиента совпадает с направлением наибольшего наклона гиперплоскости и определяется совокупностью величин $\frac{\partial\hat{\Psi}(\Xi_L)}{\partial f_k}$ ($k = \overline{1, K}$), оценками которых являются коэффициенты \hat{b}_k . Это означает, что направление крутого восхождения полностью определяется коэффициентами уравнения гиперплоскости (4).

Изменение основных значений факторов f_1, f_2, \dots, f_K пропорционально оценкам коэффициентов уравнения регрессии $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_K$ обеспечивает движение вдоль линии крутого восхождения, максимизируя величину функции $\Psi(\Xi_L)$.

Движение вдоль линии крутого восхождения заканчивается в случае выполнения ограничения (2). Экстремум функционала (1) будет лежать на границе области ограничений. В связи с этим в процессе поиска экстремума функции (1) при ограничении (2) возможен случай превышения значения оценок $\hat{\Psi}(\Xi_L)$ над значением порога $P_{\text{ДОВ}}$. В этом случае необходимо предусмотреть процедуру последовательного обратного поиска границы области ограничений. Если при движении по градиенту значение центра проведения многофакторного эксперимента $\Xi_L^{(0)}$ к области ограничений не превысит допустимой величины ε_0 , то может быть принято решение об остановке поиска оптимального значения вектора $\Xi_{L(\text{opt})}$.

Графическое изображение процесса поиска оптимальных значений требований к средствам ТИ показано на рисунке 1.

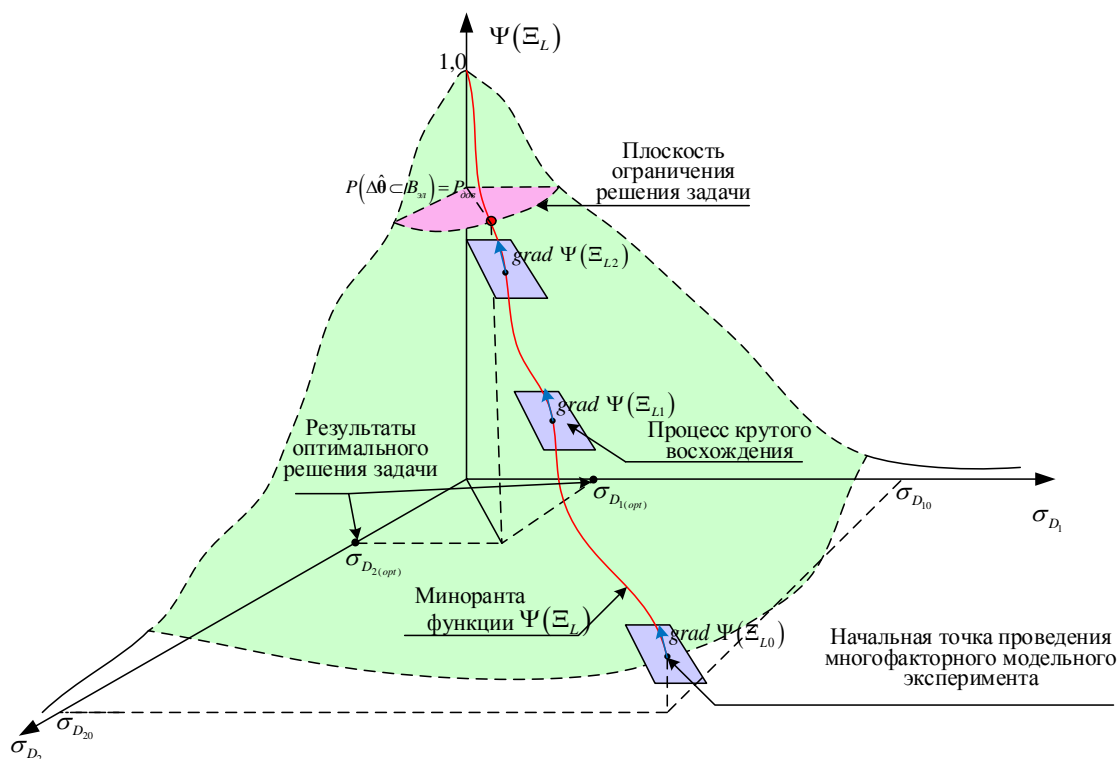


Рисунок 1 – Графическое изображение процесса поиска оптимальных значений требований к средствам траекторных измерений

Для более целостного понимания методического подхода к обоснованию требований к средствам траекторных измерений по точности получения ими первичных измерений на рисунке 2 приведен обобщенный алгоритм моделирования процесса обоснования требований к средствам ТИ.

В блоке 1 алгоритма проводится ввод исходных данных, к числу которых относятся:

- одна или несколько траекторий полета ЛА в заданной системе координат $OXYZ$;

- координаты точек расположения траекторных средств в заданной системе координат.

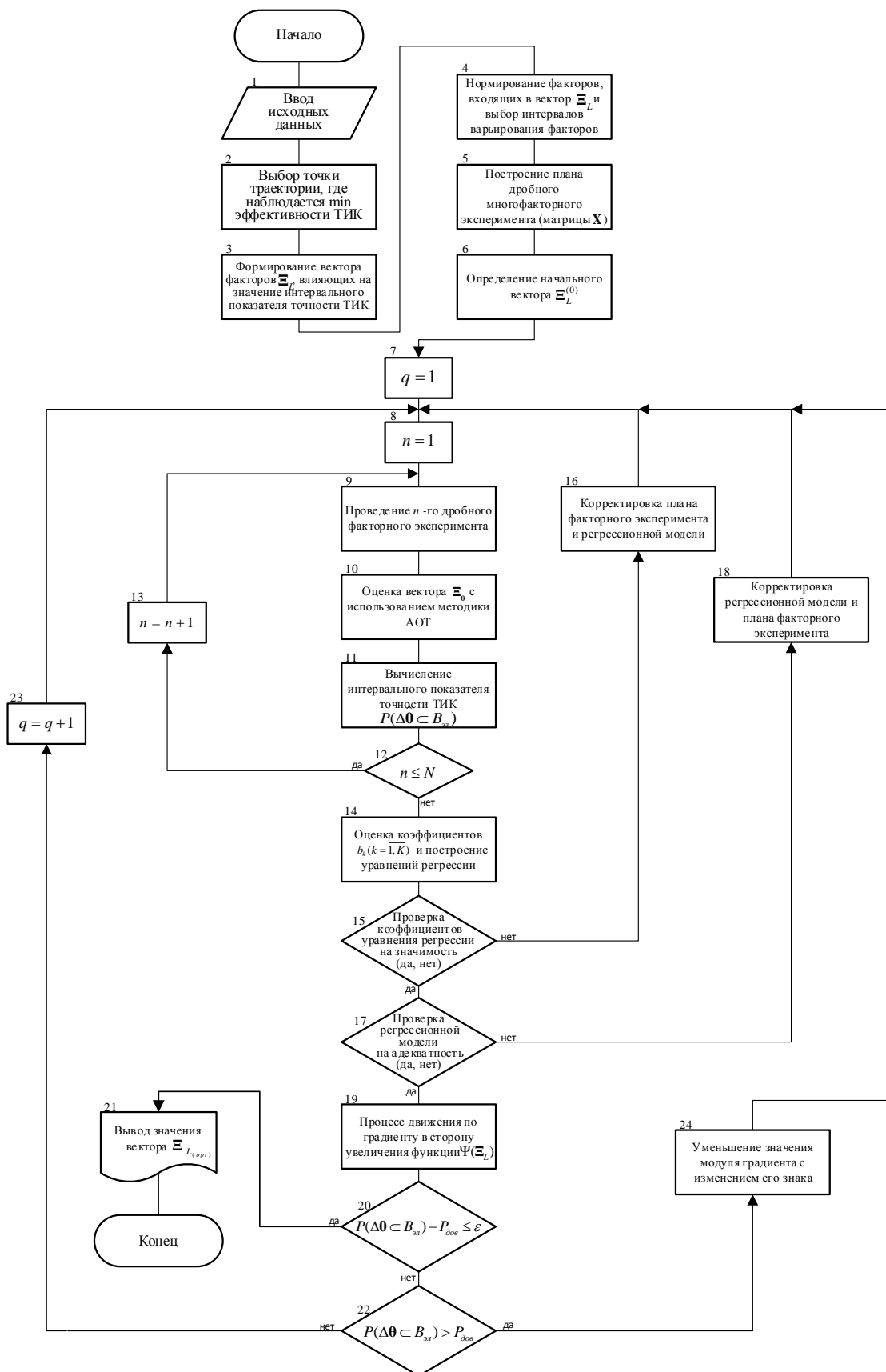


Рисунок 2 – Обобщенный алгоритм реализации методического подхода к обоснованию требований к средствам траекторных измерений

Далее в блоке 2 проводится выбор одной или нескольких точек траектории полета ЛА, где наблюдается минимальное значение интервального показателя точности траекторного ИК при одинаковых значениях составляющих вектора Ξ_L .

В блоке 3 алгоритма проводится формирование вектора факторов Ξ_L , влияющих на значение интервального показателя точности рассматриваемого траекторного ИК. Далее проводится нормирование факторов, входящих в вектор Ξ_L в соответствии с выражением (3), и выбор интервалов их варьирования.

Блок 5 алгоритма предусматривает построение матрицы X дробного многофакторного эксперимента, а в блоке 6 задается начальное значение вектора $\Xi_L^{(0)}$, откуда начинается поиск оптимального значения вектора требований $\Xi_{L(opt)}$.

В блоках 8...13 алгоритма проводится N экспериментов в рамках плана экспериментов X с вычислением N значений оценок функции $\hat{\Psi}(\Xi_L)$.

Далее в блоке 14 проводится с использованием метода наименьших квадратов оценка коэффициентов $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \dots, \hat{b}_K$ и построение линейного уравнения регрессии. Затем в блоках 15 и 17 проводится проверка коэффициентов уравнения регрессии на значимость по t - критерию Стьюдента и проверка регрессионного уравнения на адекватность по критерию χ^2 .

Блок 19 обозначает движение по градиенту в сторону увеличения функции $\Psi(\Xi_L)$ путем переноса в новое место центра проведения последующего факторного эксперимента.

Далее при выполнении условия, что $P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{эл}) - P_{дов} \leq \varepsilon_0$ (ε_0 – задано малое число), проводится вывод оптимальных значений требований к средствам ТИ, размещенным на измерительных пунктах (значение вектора $\Xi_{L(opt)}$). Если условие блока 20 не выполняется, то в блоке 22 организуется проверка выполнения условия $P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{эл}) > P_{дов}$. В случае невыполнения этого условия проводится дальнейшее движение по градиенту в сторону увеличения значения функции $\Psi(\Xi_L)$, а если данное условие выполняется, то процесс переноса центра последующего факторного эксперимента проходит в обратном направлении к предыдущему эксперименту с уменьшением значения модуля градиента, что позволит на какой-то итерации процесса поиска выполнить условие блока 20.

Апробация предложенного методического подхода определения требований к средствам ТИ была проведена путем моделирования процесса крутого восхождения по поверхности многомерной функции с целью поиска ее максимума при заданном ограничении на величину этой функции.

Реализуемость предложенного методического подхода была проведена путем моделирования процесса нахождения значений требований к точности измерения трех территориально разнесенных дальномерных измерительных каналов $(\sigma_{D1(\text{треб})}, \sigma_{D2(\text{треб})}, \sigma_{D3(\text{треб})})$ в предположении, что функция $\Psi(\Xi_L)$ имеет следующий вид:

$$\Psi(\Xi_L) = 1,0 - 0,003 \cdot \sigma_{D1}^2 - 0,0027 \cdot \sigma_{D2}^2 - 0,0028 \cdot \sigma_{D3}^2. \quad (6)$$

Внешний вид рассматриваемой функции (6) в изометрической проекции для первых трех слагаемых выражения (6) с использованием математического пакета программ Matlab показан на рисунке 3.

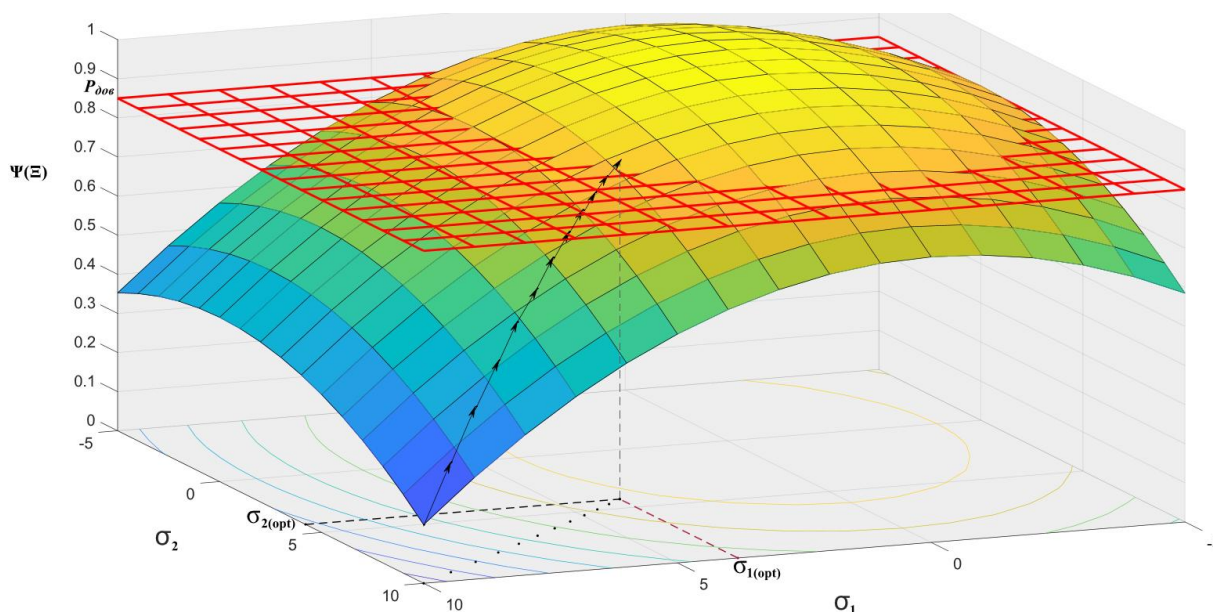


Рисунок 3 – Внешний вид функции $\Psi(\Xi_L)$ для первых трех слагаемых выражения (6)

В горизонтальной плоскости показаны оси, на которых откладываются величины σ_{D1} и σ_{D2} СКО погрешностей двух дальномерных измерительных каналов, а по вертикальной оси отсчитывается значение функции $\Psi(\Xi_L)$.

Моделирование работы рассмотренного алгоритма по определению требований к точности измерения трех дальномерных измерительных каналов проводилось из начальной точки с координатами

$$\sigma_{D_1}^{(0)} = 10\text{м}, \sigma_{D_2}^{(0)} = 10\text{м}, \sigma_{D_3}^{(0)} = 10\text{м}.$$

Значение функции $\Psi(\Xi_L)$, описанной выражением (6), в начальной точке проведения модельного эксперимента с указанными координатами равно 0,15.

Ограничением при проведении модельного эксперимента является условие, что функция $\Psi(\Xi_L)$ имеет значение 0,85, то есть вероятность $P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{\text{эл}})$ должна быть равна 0,85.

При реализации моделирования процесса обоснования требований использовалась полуреплика полного факторного эксперимента, позволяющая проводить только четыре модельных эксперимента. При проведении первого многофакторного эксперимента был выбран интервал варьирования трех факторов, равный 1 метру.

В результате проведения четырех модельных опытов были получены следующие значения оценок функции $\Psi(\Xi_L)$: $\hat{\Psi}_1(\Xi_L) = 0,312$, $\hat{\Psi}_2(\Xi_L) = 0,084$, $\hat{\Psi}_3(\Xi_L) = 0,08$, $\hat{\Psi}_4(\Xi_L) = 0,092$.

Далее с использованием полученных значений оценок функции $\Psi(\Xi_L)$ были вычислены коэффициенты линейного уравнения регрессии вида:

$$\hat{\Psi}(\Xi_L) = 0,142 - 0,06 \cdot \sigma_{D_1} - 0,054 \cdot \sigma_{D_2} - 0,056 \cdot \sigma_{D_3}. \quad (7)$$

После проверки коэффициентов уравнения регрессии (7) на значимость и самой регрессионной модели на адекватность был организован поиск оптимальных значений требований к точности измерений дальномерных каналов в направлении градиента от линейного уравнения регрессии (7). При этом сдвиг центра проведения последующего факторного эксперимента определялся значениями коэффициентов уравнения регрессии (7).

При величине ε_0 , равной 0,08, обозначающей допустимое отклонение значения $\hat{\Psi}(\Xi_L)$ от значения вероятности, равной 0,85, в 12-м многофакторном эксперименте состоялось выполнение условия

$P(\Delta\hat{\theta} \subset B_{\text{эл}}) - P_{\text{дов}} \leq \varepsilon_0$ и итерационный процесс поиска оптимального значения требований к точности рассматриваемых дальномерных измерительных каналов был остановлен.

Полученные значения требований к дальномерным измерительным каналам после остановки итерационного процесса имели следующие значения: $\sigma_{D_1(\text{треб})} = 3,81\text{м}$, $\sigma_{D_2(\text{треб})} = 4,21\text{м}$, $\sigma_{D_3(\text{треб})} = 4,07\text{м}$.

Результаты проведенного модельного эксперимента показали работоспособность разработанного методического подхода к обоснованию требований к средствам траекторных измерений.

Таким образом, разработан новый методический подход к обоснованию требований к средствам траекторных измерений, который позволяет принимать научно обоснованные решения при разработке технических заданий на создание перспективных средств траекторных измерений, используемых при испытаниях сложных технических комплексов.

Список использованных источников

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976.
2. Зедгенидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976.
3. Лоусон Ч., Жданюк Б.Ф. Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Советское радио, 1978.
4. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Высшая школа, 2007.
5. Найденов В.Г., Першин Е.В. Результаты исследования интервального показателя точности траекторного измерительного комплекса // Вооружение и экономика. 2017. № 3.
6. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М.: Наука, 1967.
7. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. М.: Наука, 1986.