

Труды МАИ. 2024. № 135
Trudy MAI, 2024, no. 135

Научная статья
УДК 535.233.42+623.465.757
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179698>

МЕТОДИКА АНАЛИЗА, ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРНЫХ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПОЛУАКТИВНЫХ СИСТЕМ НАВЕДЕНИЯ

Алексей Анатольевич Маслиев¹, Игорь Федорович Хисматов²

¹Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
Москва, Россия

²Московский научно-исследовательский телевизионный институт,
Москва, Россия

¹panoramasix@mail.ru

²abu-sergey@yandex.ru ✉

Аннотация. Исследование посвящено повышению зачётности лётных испытаний лазерных полуактивных систем наведения (ЛПСН) за счет прогнозирования дальностей обнаружения лазерного пятна на полигоне по результатам анализа статистической выборки проведенных ранее экспериментов. Анализируемая статистическая выборка формируется методом математического моделирования, входной информацией для которого являются результаты регистрации дальности обнаружения лазерного пятна, характеристики аппаратуры подсвета и приема, метеоусловий и отражательных свойств используемой мишени. На основе линеаризации относительно математического ожидания вектора входной

информации математической модели получено выражение для дисперсии ошибки расчёта порогового потока энергии на приемнике оптического излучения в зависимости от дисперсий ошибок используемой информации. Определены относительные веса погрешностей входной информации в структуре ошибки расчёта порогового потока излучения, выполнена оценка согласованности расчётных значений её дисперсии экспериментальным данным, результаты которой подтвердили адекватность разработанной математической модели в части воспроизведения факторов, действующих в системе «подсвет-мишень-приёмник». Прогнозирование дальностей обнаружения лазерного пятна выполняется в зависимости от планируемых траекторных условий, характеризующихся прозрачностью атмосферы на трассах, углами подсвета и визирования мишени. Показателем достоверности прогнозирования является вероятность обнаружения пятна в заданном диапазоне дальностей, которая оценивается на основе информации о метеоусловиях, траекторных параметров и полученных оценок дисперсии результатов моделирования порогового потока.

Разработана математическая модель распределения потока энергии излучения на приемнике ЛПСН в зависимости от характеристик траекторий приёма и подсвета полигонных мишеней, метеоусловий. Математическая модель отличается от известных применением экспериментально определяемых индикатрис коэффициентов яркости, распределенных по поверхности полигональной модели мишени, что позволяет учитывать в расчётах её оптические и геометрические характеристики, которые оказывают существенное влияние на результаты

функционирования ЛПСН. Результаты математического моделирования подтверждены натурными лётными экспериментами.

Установлено, что оптимальными условиями проведения лётных экспериментов по критерию минимума дисперсии расчётных значений порогового потока являются условия, в которых дальность обнаружения максимальна.

Применение разработанного методического аппарата при планировании лётных испытаний позволит снизить степень неопределённостей, повысить обоснованность результатов анализа, а также разрабатывать процедуры поиска оптимальных условий проведения лётных экспериментов, исключающих неоднозначности в интерпретации их результатов.

Ключевые слова: лазерные полуактивные системы, статистическая проверка гипотез, структура погрешностей, лётные испытания, моделирование, методика анализа и прогнозирования

Для цитирования: Маслиев А.А., Хисматов И.Ф. Методика анализа, прогнозирования и оптимизации траекторных условий применения лазерных полуактивных систем наведения // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179698>

Original article

THE SYSTEM OF METHODS FOR ANALYZING, PREDICTING AND OPTIMIZATION OF TRAJECTORY CONDITIONS OF LASER SEMI-ACTIVE GUIDANCE SYSTEMS

Alexey. A. Masliev¹, Igor F. Khismatov²✉

¹State Research Institute of aviation systems, Moscow, Russia

²Moscow Scientific-Research Television Institute, Moscow, Russia

¹panoramasix@mail.ru

²abu-sergey@yandex.ru✉

Abstract. The study is devoted to improving the performance of flight tests of laser semi-active guidance systems (LPS) by predicting the ranges of the laser spot at the test site based on the results of the analysis of a statistical sample of previously conducted experiments. The analyzed statistical sample is formed by the method of mathematical modeling, the input information for which is the results of recording the detection range of the laser spot, the characteristics of the illumination and reception equipment, weather conditions and reflective properties of the target used. Based on the linearization of the relative mathematical expectation of the input information vector of the mathematical model, an expression is obtained for the variance of the error in calculating the threshold energy flux at the optical radiation receiver, depending on the variances of the information used. The relative weights of the errors of the input information in the structure of the error in calculating the threshold radiation flux were determined, an assessment of the consistency of the calculated values of its dispersion with experimental data was performed, the results of which confirmed the adequacy of the developed mathematical model in terms of reproducing the factors acting in the "sublight-target-receiver" system. The prediction of the detection ranges of the laser spot is performed depending on the planned trajectory conditions, characterized by the transparency of the atmosphere on the tracks, the illumination angles and the sight of the target. An indicator of the reliability of forecasting

is the probability of spot detection in a given range of ranges, which is estimated based on information about weather conditions, trajectory parameters and the obtained estimates of the variance of the results of threshold flow modeling.

A mathematical model has been developed for the distribution of the radiation energy flux at the LPS receiver, depending on the characteristics of the trajectories of reception and illumination of polygon targets, weather conditions. The mathematical model differs from the known ones by using experimentally determined indicators of brightness coefficients distributed over the surface of the polygonal target model, which makes it possible to take into account its optical and geometric characteristics in calculations, which have a significant impact on the results of the LPS function. The results of mathematical modeling have been confirmed by field flight experiments.

It has been established that the optimal conditions for conducting flight experiments according to the criterion of the minimum variance of the calculated threshold values are conditions in which the detection range is maximum.

The use of the developed methodological apparatus in the planning of flight tests will reduce the degree of uncertainty, increase the reliability of the analysis results, as well as develop procedures for searching for optimal conditions for conducting flight experiments, eliminating discrepancies in the interpretation of their results.

Keywords: semi-active laser systems, statistical hypothesis testing, error structure, flight tests, modeling, methods of analysis and forecasting

For citation: Masliev A.A., Khismatov I.F. The system of methods for analyzing, predicting and optimization of trajectory conditions of laser semi-active guidance systems. *Trudy MAI*,

Введение

В настоящее время происходит развитие лазерных полуактивных систем наведения в направлении расширения диапазона условий и усложнения режимов применения. Новые типы ЛПСН, а также системы, позволяющие регистрировать лазерное пятно на испытательном полигоне, обязательно проходят проверку в наземных и лётных испытаниях, проведение которых сопряжено со случаями незачетных полетов — в них невозможно со значимой для практики достоверностью объяснить причину того или иного исхода, опираясь на существующие подходы к планированию экспериментов с ЛПСН. Это связано, прежде всего, с тем, что на формирование результата функционирования ЛПСН оказывают влияние множество случайных факторов [1]. Поэтому задачи подготовки и анализа результатов испытаний ЛПСН требуют разработки новых методов решения, основанных на моделировании [2, 3] по исходным данным, характеризующим как внешние условия проведения экспериментов, так и свойства самих ЛПСН в части проверяемых режимов функционирования [4].

В частности, для повышения обоснованности решений, принимаемых по результатам анализа функционирования ЛПСН в уже проведённых, а также для нахождения оптимальных условий при планировании новых лётных экспериментов [5, 6] необходимо использование методического аппарата расчётной оценки реакции ЛПСН на изменения траекторных параметров подсвета и приёма отражённого мишенной обстановкой излучения [7].

Оценка реакции ЛПСН основана на использовании математической модели формирования изображений на приемнике оптического излучения (ПОИ) ЛПСН и оценки в них характеристик излучения [8, 9] сложной мишенной обстановки [10-12]. Математическое моделирование позволяет проводить статистический анализ [13], результаты которого используются для прогнозирования вероятности обнаружения ЛПСН лазерного пятна в условиях планируемых лётных экспериментов, характеризуемых дальностями, направлениями подсвета и приёма отражённого излучения, геометрической конфигурацией и оптическими характеристиками мишени, метеоусловиями [14].

Применение математического моделирования регистрируемых изображений положено в основу нового подхода к организации и анализу результатов лётных экспериментов с авиационными ЛПСН, ключевой особенностью которого является оптимизация условий применения как самих ЛПСН, так и систем регистрации лазерного пятна [15].

Математическая модель потока энергии на фотоприемнике при прямом подсвете поверхности мишени

Схема взаимного расположения поверхностей мишени и лазерного пятна на ней приведена на рисунке 1.

Разобьём поверхность мишени на прямоугольные фрагменты (рисунок 1), яркость каждого из них на входном зрачке ЛПСН в направлении точки на её ПОИ с координатами (x, y) определяется по формуле [16]:

$$L_{V2}(x, y) = \frac{\tau_{a2} E_c(x, y)}{\pi} \beta_c(\theta_{11}(x, y), \theta_{V2}(x, y)), \quad (1)$$

где β_c — коэффициент яркости фрагмента пятна на мишени в направлении точки на ПОИ с координатами (x, y) , отн. ед.; $\theta_{11}(x, y), \theta_{V2}(x, y)$ — углы облучения и визирования фрагмента мишени с координатами (x, y) на ПОИ, рад; τ_{a2} — коэффициент пропускания атмосферы на трассе визирования, отн.ед, $E_c(x, y)$ — освещённость рассматриваемого фрагмента мишени.

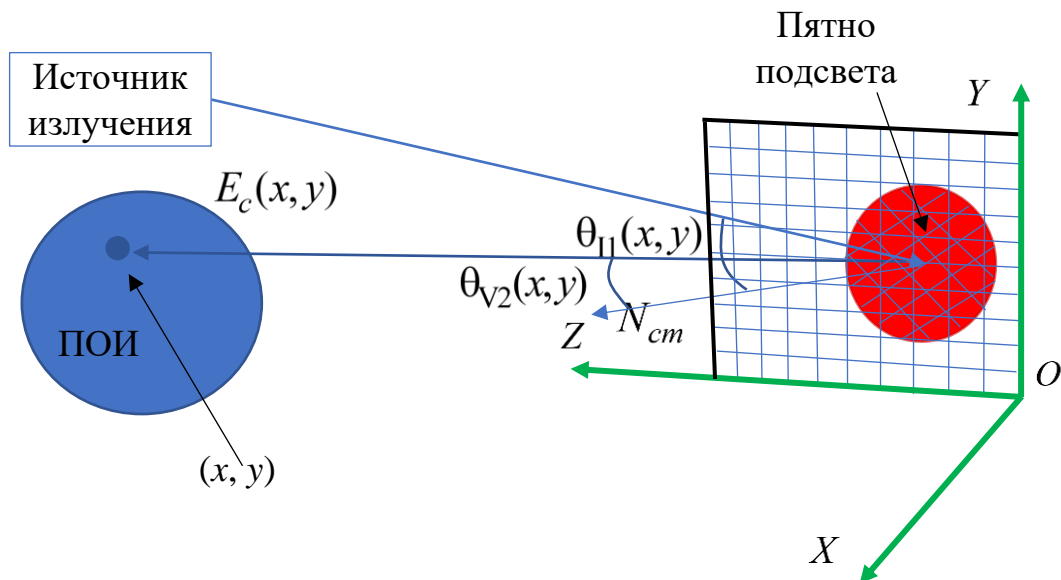


Рисунок 1 – Взаимное расположение мишени и пятна лазерного подсвета при прямом подсвете участка мишени

Освещённость фрагмента мишени излучением системы подсвета определяется по формуле [17]:

$$E_c(x, y) = \frac{0,8W_{\text{и}}\tau_{a1}}{\tau_{\text{и}}l_{\text{П}}^2\Omega_{\text{л}}} \cos \theta_{11}(x, y), \quad (2)$$

где $W_{\text{и}}$ — энергия импульса лазерного излучения, Дж; τ_{a1} — коэффициент пропускания атмосферы на трассе подсвета, отн.ед; $\tau_{\text{и}}$ — длительность импульса лазерного излучения; $l_{\text{п}}$ — дальность системы подсвета от лазерного пятна, м; $\Omega_{\text{п}}$ — телесный угол лазерного луча подсвета, ср.

Поток энергии Φ излучения на ПОИ, приходящий от фрагмента мишени, определяется выражением:

$$\Phi = \frac{0,8W_{\text{и}}}{\tau_{\text{и}}} \tau_{a1} \tau_{a2} \tau_0 \left(\frac{f'}{l_{\text{в}}} \right)^2 \sin^2(\sigma'_a) \times \sum_x \sum_y \beta_c(\theta_{\text{п1}}(x, y), \theta_{\text{в2}}(x, y)) \cos(\theta_{\text{п1}}(x, y)) \cos(\theta_{\text{в2}}(x, y)), \quad (3)$$

где τ_0 — коэффициент пропускания оптической системы, отн.ед; f' — заднее фокусное расстояние оптической системы ЛПСН, отн.ед; $l_{\text{в}}$ — дальность визирования пятна системой регистрации ЛПСН, м; σ'_a — задний апертурный угол оптической системы ЛПСН, рад.

При анализе функционирования ЛПСН на больших удалениях от мишени, на которых происходит обнаружение лазерного пятна, располагаемого на плоских поверхностях, например, стенах зданий, зависимостью коэффициента яркости от положения фрагмента мишени можно пренебречь. В этом случае можно записать выражение для расчёта порогового потока $\Phi_{\text{п}}$, соответствующего дальности $l_{\text{об}}$ обнаружения пятна в ЛПСН:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{0,8W_{\Pi}}{\tau_{\Pi}} \tau_{a1} \tau_{a2} \tau_0 \beta_c(\theta_I, \theta_V) \left(\frac{f'}{l_{об}} \right)^2 \sin^2(\sigma'_a) \times \\ \times \sum_x \sum_y \cos(\theta_{\Pi}(x, y)) \cos(\theta_{V2}(x, y)), \quad (4)$$

где θ_I, θ_V — углы облучения и визирования мишени лазерного подсвета, полученные осреднением величин $\theta_{\Pi}(x, y), \theta_{V2}(x, y)$ по координатам на мишени; $l_{об}$ — дальность обнаружения лазерного пятна, м.

Методика анализа вероятностных характеристик порогового потока лазерных полуактивных систем наведения по результатам их испытаний

Целью методики анализа является оценка закона распределения и вероятностных характеристик расчётного потока Φ_{Π} энергии на ПОИ, соответствующего моменту обнаружения лазерного пятна, а также определение весов погрешностей исходной информации в структуре погрешностей расчёта порогового потока Φ_{Π} [18].

Для статистического анализа используются данные лётных экспериментов с ЛПСН заданного типа, которые могут быть выполнены с применением различных ЛА и станций подсвета, мишеней с различными геометрическими конфигурациями и оптическими характеристиками, в различных погодных условиях. В результатах экспериментов должна присутствовать информация об условиях обнаружения лазерного пятна, включая дальность захвата, высоту полета, направления захода на мишень и др.

Статистической обработке подлежит величина Φ_{Π} потока энергии излучения на ПОИ, значение которой рассчитывается по формуле (4) для дальностей обнаружения лазерного пятна, зарегистрированных в каждом анализируемом натурном эксперименте. По полученным результатам методами математической статистики [19] оцениваются закон распределения рассчитанного порогового потока излучения на приемнике ЛПСН и его характеристики: математическое ожидание $m_{\Phi_{\Pi}}$ и дисперсия $D_{\Phi_{\Pi}}$:

$$m_{\Phi_{\Pi}} = \sum_{i=1}^n \Phi_{\Pi i} / n, \quad D_{\Phi_{\Pi}} = \sum_{i=1}^n (\Phi_{\Pi i} - m_{\Phi_{\Pi}})^2 / (n-1), \quad (5)$$

где $\Phi_{\Pi i}$ — полученный путем моделирования пороговый поток излучения в i -й реализации; n — количество реализаций.

В связи с относительно небольшим количеством реализаций, получаемых в натуральных лётных экспериментах, оцениваются также доверительные интервалы для полученных значений математического ожидания и дисперсии. Значения их границ, а также предположения о законах распределения оценок вероятностных характеристик, известные из математической статистики, позволяют делать выводы о достоверности прогнозов исходов планируемых экспериментов.

Доверительные интервалы $I_{m_{\Phi_{\Pi}}}$ и $I_{D_{\Phi_{\Pi}}}$ для математического ожидания и дисперсии при нормальном распределении определяются по известным формулам [19]:

$$m_{\Phi_{\Pi}} \in I_{m_{\Phi_{\Pi}}} = \left[m_{\Phi_{\Pi}} - \frac{t_{\beta} \cdot \sqrt{D_{\Phi_{\Pi}}}}{\sqrt{n}}, m_{\Phi_{\Pi}} + \frac{t_{\beta} \cdot \sqrt{D_{\Phi_{\Pi}}}}{\sqrt{n}} \right], \quad t_{\beta} = \arg \Phi^* \left(\frac{1+\beta}{2} \right), \quad (6)$$

$$I_{D_{\Phi_{\Pi}}} = \left[\frac{D_{\Phi_{\Pi}}(n-1)}{\chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2}; \frac{D_{\Phi_{\Pi}}(n-1)}{\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2} \right], \quad (7)$$

где $\arg \Phi^*$ — функция, обратная функции Лапласа; t_{β} — коэффициент, который находится по соответствующей таблице [19]; $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$, $\chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$ — критические точки χ^2 критерия Пирсона.

Для определения весов погрешностей исходной информации об условиях лётных экспериментов, используемой для расчета порогового потока Φ_{Π} , в структуре случайных факторов можно выделить две группы: первую составляют те из них, которые обусловлены ошибками информации о контролируемых параметрах условий экспериментов и самой аппаратуры ЛПСН; вторую группу — все остальные, то есть неконтролируемые факторы, к которым относятся, например, те параметры аппаратуры, которые не проверяются при эксплуатации.

На основании этого, представим дисперсию $D_{\Phi_{\Pi}}$ в виде суммы:

$$D_{\Phi_{\Pi}} = D_{\Phi_{\text{р}}} + D_{\Phi_{\text{и}}}, \quad (8)$$

где $D_{\Phi_{\text{р}}}$, $D_{\Phi_{\text{и}}}$ — дисперсии составляющих погрешности расчёта потока Φ_{Π} , обусловленных погрешностями входной информации математической модели и неконтролируемыми факторами соответственно.

Необходимо определить дисперсию $D_{\Phi_{\text{р}}}$ и компоненты ошибки расчёта порогового потока по априорной информации о дисперсиях погрешностей исходной информации об условиях эксперимента.

Приближённое решение задачи основано на определении дисперсии полного

дифференциала $d\Phi_{\text{п}}$ потока по всем независимым переменным.

$$d\Phi_n(\mathbf{X}) = \sum_i \frac{\partial \Phi_n(\mathbf{X})}{\partial x_i} dx_i, \quad (9)$$

где $\Phi_{\text{п}}$ — пороговый поток энергии излучения на изображении пятна на приёмнике в момент превышения порога обнаружения лазерного пятна, Вт; \mathbf{X} — вектор параметров системы подсвета, условий подсвета и визирования вида: $\mathbf{X} = (\tau_{a1}, \tau_{a2}, \beta_c, W_{\text{и}}, \tau_{\text{и}})^T$; x_i — компонент вектора \mathbf{X} .

На основании (9) дисперсия $D_{\text{Фр}}$ погрешности $\Delta\Phi_{\text{пр}}$ расчёта потока излучения, соответствующего моменту превышения порога обнаружения лазерного пятна, может быть определена по формуле:

$$D_{\text{Фр}} = D[\Delta\Phi_{\text{пр}}(\mathbf{X})]_{\{x_i=c_i\}} = \sum_i \left(\left(\left(\frac{\partial \Phi_{\text{п}}(\mathbf{X})}{\partial x_i} \right) \right)_{\{x_i=c_i\}} \right)^2 \cdot D[\Delta x_i], \quad (10)$$

где $D[\bullet]$ — дисперсия величины в квадратных скобках; Δx_i — погрешность i -ой входной величины; $D[\Delta x_i]$ — дисперсия погрешности i -ой входной величины; c_i — значение i -ой входной величины.

В частные производные формулы (10), кроме значений $\{x_i = c_i\}$ компонентов вектора \mathbf{X} , необходимо подставлять значение дальности $l_{\text{об}}$ обнаружения пятна, соответствующее математическому ожиданию $m_{\text{Фп}}$, условиям визирования и подсвета $\theta_{\text{г}}$, $\theta_{\text{в}}$, а также параметрам $\{x_i = c_i\}$. Формула (4) для потока энергии излучения на ПОИ от лазерного пятна на мишени позволяет выразить дальность $l_{\text{об}}$ обнаружения пятна системой регистрации ЛПСН через величину порогового потока $\Phi_{\text{п}}$.

$$l_{об} = b \sqrt{\frac{a(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)}{\Phi_{II}}}, \quad (11)$$

где $a(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$ — величина, зависящая от условий наблюдения и параметров излучателя:

$$a(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V) = \frac{0,8W_{II}}{\tau_{II}} \tau_{a1} \tau_{a2} \beta_c(\theta_I, \theta_V) \cos(\theta_I) \cos(\theta_V); \quad (12)$$

b — коэффициент, зависящий от параметров приёмной оптической системы ЛПСН:

$$b = \tau_0^{0,5} f' \sin(\sigma'_a); \quad (13)$$

θ_I, θ_V — углы облучения и визирования мишени лазерного подсвета.

Зависимость частных производных выражения (10) от значений компонентов вектора \mathbf{X} показывает характер зависимости значений дисперсии $D_{Фр}$ ошибки $\Delta\Phi_{пр}$ от условий регистрации лазерного пятна в лётных экспериментах. Анализируя формулу (4), можно заметить обратную квадратичную зависимость частных производных $\partial\Phi_{II}(\mathbf{X})/\partial x_i$ от дальности обнаружения, из чего можно сделать вывод о превалировании её влияния на значения дисперсии $D_{Фр}$ разброса расчётных значений порогового потока. Это является основанием к поиску оптимальных условий проведения экспериментов по критерию минимума дисперсии ожидаемых значений порогового потока. Например, условия, в которых дальность обнаружения максимальна, предпочтительнее. Они характеризуются атмосферными условиями, в которых прозрачность трасс максимальна, малыми углами подсвета и визирования,

выбором мишени с максимальными отражающими свойствами в диапазоне длин волн ЛПСН.

Полученная формула расчёта дисперсии D_{Φ_p} позволяет определить относительные вклады погрешностей (неопределенностей) каждой входной величины x_i математической модели в погрешность расчёта порогового потока Φ_p . Выявление характера зависимости дисперсии D_{Φ_p} от дисперсий $D[\Delta x_i]$ частных ошибок входной информации, параметров системы подсвета, условий подсвета и визирования может быть положено в основу методики обоснования требований к точности измерений условий планируемых экспериментов по критерию получения требуемой достоверности прогноза исходов этих экспериментов.

Оценка согласованности получаемых по формуле (10) расчётных значений дисперсии D_{Φ_p} экспериментальным данным может быть выполнена методами проверки статистических гипотез. Постановка задачи следующая. Пусть имеется некоторая выборка объема n экспериментальных данных, по которыми определено значение дисперсии D_{Φ_p} . Также от разработчика изделия ЛПСН известна дисперсия D_{Φ}^* разброса порогового значения потока, при котором происходит захват лазерного пятна. Рассматриваются две гипотезы: H_0 — значение дисперсии D_{Φ_p} соответствует экспериментальному значению D_0 ; H_1 — альтернативная гипотеза о том, что значение дисперсии D_{Φ_p} не соответствует экспериментальному значению D_0 . Принимается допущение о нормальном распределении экспериментальных данных. Требуется проверить достоверность обеих гипотез при заданном уровне значимости α .

Экспериментальное значение дисперсии D_0 определяется по формуле:

$$D_0 = D_{\Phi\Pi} - D_{\Phi}^* \quad (14)$$

По экспериментальным данным находится значение χ^2 статистики (выборочной функции) [19]:

$$\chi^2 = (n-1)D_{\Phi\Pi}/D_0 \quad (15)$$

Для заданного уровня значимости α по таблицам квантилей определяются

критические значения $\chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$ и $\chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$ статистики, которые сравниваются с полученным по формуле (15) экспериментальным значением. На основе сравнения

принимается решение: гипотеза H_0 верна, если $\chi^2 < \chi_{\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$ или $\chi^2 > \chi_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1}^2$, гипотеза

H_1 верна в обратном случае.

На основании (14) истинность гипотезы H_0 позволяет сделать вывод о том, что составляющая разброса расчётных значений порогового потока, обусловленная действием факторов второй группы, то есть неконтролируемых факторов, с большой вероятностью может характеризоваться дисперсией D_{Φ}^* , которая обусловлена разбросом технических характеристик образцов ЛПСН. Другой вывод, который можно сделать при наличии такого факта, состоит в том, что разработанная математическая модель потока энергии на фотоприемнике ЛПСН в полной мере отражает основные действующие факторы в рассматриваемой системе при подсвете поверхности мишени и приёме отражённого от него излучения.

Методика прогнозирования дальности обнаружения пятна при планировании испытаний лазерных полуактивных систем наведения

Прогнозирование дальности обнаружения пятна при планировании лётных экспериментов необходимо для повышения уровня их зачётности, что может быть достигнуто определением таких условий, в которых уменьшается степень неопределенности предполагаемого результата функционирования ЛПСН [20].

Целью, достигаемой применением методики, является определение диапазона дальностей $l_{об} \in [l_{обmin} , l_{обmax}]$, в котором с вероятностью не ниже заданного расчетного значения $P_{об}$ лазерное пятно на мишени может быть обнаружено аппаратурой ЛПСН в условиях $\mathbf{X} = \{c_i\}$ планируемого эксперимента. Расчётное значение вероятности $P_{об}$ рассматривается при этом как показатель достоверности прогноза результатов функционирования ЛПСН.

Для прогнозирования используются результаты статистического анализа значений порогового потока $\Phi_{п}$ энергии излучения на ПОИ, полученные в проведенных ранее экспериментах. Ошибки $\Delta l_{об}$ прогноза дальности $l_{об}$, выполняемого расчётом по формуле (11), вызваны неопределенностью значения порогового потока $\Phi_{п}$, которая является следствием погрешностей информации об условиях обрабатываемых экспериментов, используемой при определении $\Phi_{п}$. Поэтому поток $\Phi_{п}$, входящий в выражение (11), в прогнозных расчетах дальности обнаружения необходимо рассматривать как случайную величину.

На основании этого запишем формулу для приближенной оценки дисперсии $D_{l_{об}}$ ошибки $\Delta l_{об}$ прогноза дальности $l_{об}$ по расчётным данным порогового потока в

условиях, характеризуемых значениями вектора $\mathbf{X} = \{c_i\}$, углами θ_I, θ_V облучения и визирования мишени лазерного подсвета:

$$D_{l_{об}}(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V) = \left[\left(\frac{\partial l_{об}}{\partial \Phi_{п}} \right)^2 D_{\Phi_{п}} \right]_{(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)} + D_{\Phi_{и}}, \quad (16)$$

где дисперсия $D_{\Phi_{п}}$ ошибки расчёта (10) порогового потока $\Phi_{п}$ на ПОИ и производная $\partial l_{об} / \partial \Phi_{п}$ должны соответствовать условиям планируемого эксперимента.

В предположении о нормальном законе распределения ошибки $\Delta l_{об}$ найденное значение $D_{l_{об}}(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$ позволяет определить значение показателя $P_{об}$ достоверности прогноза обнаружения лазерного пятна в условиях $(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$:

$$P_{об}(l_{об} \in [l_{об\min}, l_{об\max}] | \mathbf{X}, \theta_I, \theta_V) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi D_{l_{об}}}} \int_{l_{об\min}}^{l_{об\max}} \exp\left(-\frac{(l - m_{l_{об}})^2}{2D_{l_{об}}}\right) dl \right]_{(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)}, \quad (17)$$

где $m_{l_{об}}$ — прогнозируемое значение математического ожидания дальности обнаружения лазерного пятна в планируемых условиях $\mathbf{X} = \{c_i\}$ лётного эксперимента.

Вероятность $P_{об}$ дает лицу, принимающему решения, информацию о достоверности прогнозируемого исхода для условий планируемого эксперимента.

Методика прогнозирования дальности обнаружения пятна лазерной полуактивной системой наведения при планировании лётных экспериментов представлена следующими операциями:

- 1 подготовка информации о параметрах эксперимента $(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$;
- 2 расчёт значения дисперсии $D_{l_{об}}$ для условий $(\mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$;

3 расчёт прогнозируемой вероятности $P_{об} (l_{об} \in [l_{обmin}, l_{обmax}] | \mathbf{X}, \theta_I, \theta_V)$;

4 выдача рекомендаций для принятия решения о проведении эксперимента в заданных условиях или об их изменении в целях повышения достоверности прогноза получаемых результатов.

Информация о параметрах эксперимента включает:

- условия подсвета (высота, дальность подсвета, тип траектории);
- условия визирования пятна (местоположение и ориентация системы, визирующей лазерное пятно, относительно мишени);
- характеристики станции подсвета (угол расходимости лазерного луча, мощность);
- характеристики регистратора (диаметр чувствительной площадки, диапазон спектральной чувствительности);
- параметры метеоусловий во время проведения эксперимента (температура, влажность, метеорологическая дальность видимости);
- параметры мишени (тип материала, размеры, ориентация относительно горизонтальной поверхности, геометрические параметры);
- параметры подстилающей поверхности (тип материала, геометрические параметры);
- параметры визирующей системы (фокусное расстояние, диаметр объектива).

Например, при условии проведения девятнадцати экспериментов и доверительной вероятности $\beta = 0,95$ доверительные интервалы $I_{мФп}$ и $I_{ДФп}$ для математического ожидания и дисперсии рассчитанного порогового потока излучения

на приёмнике оптического излучения ЛПСН равны: $I_{m\Phi\Pi} = [0,79m_{\Phi\Pi} ; 1,21m_{\Phi\Pi}]$, $I_{D\Phi\Pi} = [0,57D_{\Phi\Pi} ; 2,19D_{\Phi\Pi}]$. Распределение вкладов погрешностей информации о контролируемых параметрах экспериментов, являющихся входными величинами математической модели Φ_{Π} , показано на рисунке 2.

Соотношение дисперсий $D_{\Phi p}$ и $D_{\Phi и}$ в долях от общей дисперсии $D_{\Phi\Pi}$ следующее:

$$D_{\Phi p} = 0,81 D_{\Phi\Pi}; D_{\Phi и} = 0,19 D_{\Phi\Pi} .$$

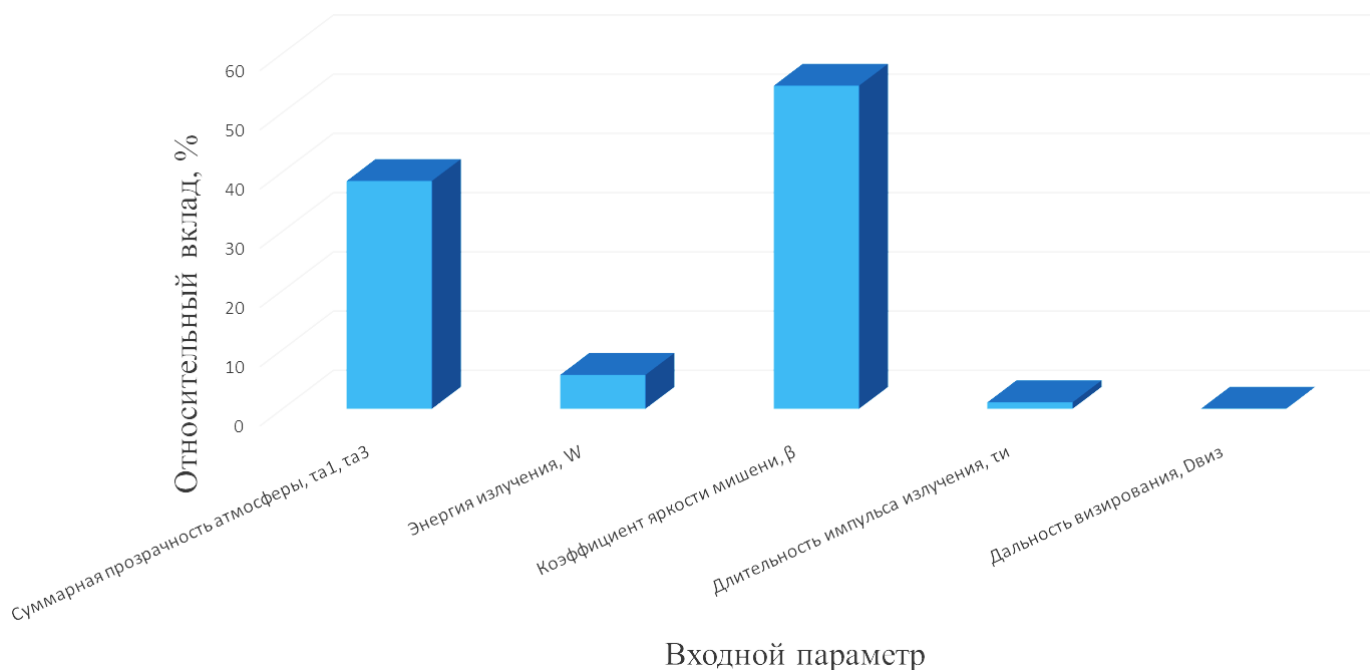


Рисунок 2 — Вклады погрешностей входных параметров в дисперсию ошибок расчёта порогового потока

Выводы

1 Математическая модель потока энергии на приёмнике оптического излучения ЛПСН при подсвете лазерными системами воздушного и наземного базирования разработана на основе экспериментально определяемых индикатрис коэффициентов их яркости, что позволяет моделировать сигнальные отклики многоплощадочных приёмников оптического излучения, воспроизводя распределения потока излучения

по площади изображения пятна в зависимости от геометрической конфигурации, отражательных характеристик и направления подсвета мишеней в различных метеоусловиях.

2 Повышение достоверности результатов анализа и прогноза исхода лётных экспериментов при исследовании режима обнаружения лазерного пятна аппаратурой ЛПСН возможно в двух направлениях:

- уменьшение разброса погрешностей информации о контролируемых параметрах условий экспериментов, аппаратуры систем подсвета и ЛПСН путём повышения точности проводимых измерений и контроля, расширения перечня измеряемых параметров;

- совершенствование метода оценки плотности распределения порогового потока излучения на ПОИ при обнаружении пятна по статистической выборке результатов лётных экспериментов;

- выполнение оптимизации условий эксперимента путем определения таких из них, которые максимизируют прогнозируемую вероятность его исхода.

3 Оптимальными условиями проведения лётных экспериментов, определяемыми по критерию минимума дисперсии ожидаемых значений порогового потока, являются условия, в которых дальность обнаружения максимальна.

Список источников

1. Буравлев А.И. Боевое применение и эффективность комплексов авиационного вооружения. - М.: ВВИА, 1992. - 240 с.

2. Левшин Е.А. Возможности метода полунатурного моделирования при проведении испытаний авиационных оптико-электронных следящих систем // Материалы II Всероссийской научно-практической конференции «АВИАТОР» (11–13 февраля 2015): сборник статей. – Воронеж: ВУНЦ, 2015. С. 67-72.
3. Косинский М.Ю., Шатский М.А. Разработка моделей и методики для анализа и прогнозирования надёжности бортовых систем управления космических аппаратов на основе теории нечётких множеств и искусственных нейронных сетей // Труды МАИ. 2014. № 74. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49315>
4. Маслиев А.А., Горин А.В., Хисматов И.Ф. Методика выбора порога чувствительности регистратора лазерного пятна подсвета от авиационных прицельных систем при планировании лётных экспериментов // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2021. № 4 (56). С. 87-97.
5. Мокрова М.И. Алгоритм выбора оптимальной высоты полёта БЛА при мониторинге пожарной обстановки // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 23-27 ноября 2020): тезисы докладов. - М.: Изд-во «Перо», 2020. С. 80-81.
6. Бухалев В.А. Оптимальное сглаживание в системах со случайной скачкообразной структурой. - М.: Физматлит, 2013. - 188 с.
7. Маслиев А.А., Горин А.В., Хисматов И.Ф. Динамическая настройка чувствительности регистратора пятна авиационной системы лазерного подсвета в лётных испытаниях // Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке» (Москва, 21–22 апреля 2022): тезисы докладов. -

М.: ГосНИИАС, 2022. С. 97-98.

8. Тиранов Д.Т. Моделирование индикатрис коэффициентов яркости диффузно и направленно отражающих материалов при направленном облучении // Оборонная техника. 2010. № 6–7. С. 33–36.

9. Иванов В.П., Курт В.И. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. - Казань: ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. - 596 с.

10. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. - М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

11. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. - М.: Машиностроение, 1977. – 600 с.

12. Агишев Р.Р. Лазерное зондирование окружающей среды: методы и средства. - М.: Физматлит, 2019. - 264 с.

13. Воробьев А.Л., Журик Ю.П., Краснов А.М., Шашков С.Н. Методика вероятностного анализа процесса наблюдения в цифровых телевизионных системах видимого диапазона // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=28279&PAGEN_2=2

14. Хисматов И.Ф. Методика воспроизведения метеоусловий при имитационном моделировании авиационных оптико-электронных систем // Труды МАИ. 2019. № 108. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=109572>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-18](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18)

15. Стариков В.М. Мобильный полигонный комплекс сбора данных для информационного обеспечения лётного эксперимента // Всероссийская научно-техническая школа-семинар «Передача, прием, обработка и отображение

информации о быстротекущих процессах» (Сочи, 1-4 октября 2019): сборник докладов. – Сочи: 2019. С. 661-668.

16. Маслиев А.А., Хисматов И.Ф., Горин А.В. Математическая модель потока входного излучения лазерной полуактивной системы наведения при облучении плоской наземной мишени // Труды ГосНИИАС. Вопросы авионики. 2020. № 2. С. 13-26.

17. Левшин Е.А., Хисматов И.Ф. Моделирование и оценка авиационных оптико-электронных систем самонаведения: монография. - Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2022. – 400 с.

18. Буравлев А.И. Методы оценки эффективности применения высокоточного оружия. - М.: ИД Академии Жуковского, 2018. - 232 с.

19. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Высшая школа, 2001. – 576 с.

20. ГОСТ 50779.11-2000 Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. - М.: Стандартинформ, 2002. 38 с.

References

1. Buravlev A.I. *Boevoe primeneniye i effektivnost' kompleksov aviatsionnogo vooruzheniya* (Combat use and effectiveness of aviation weapons systems), Moscow, VVIA, 1992, 240 p.

2. Levshin E.A. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «AVIATOR»*, Voronezh, VUNTs, 2015, pp. 67-72.

3. Kosinskii M.Yu., Shatskii M.A. *Trudy MAI*, 2014, no. 74. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49315>

4. Masliev A.A., Gorin A.V., Khismatov I.F. *Prikaspiiskii zhurnal: upravlenie i vysokie tekhnologii*, 2021, no. 4 (56), pp. 87-97.
5. Mokrova M.I. *19 Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika»: tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo «Pero», 2020, pp. 80-81.
6. Bukhalev V.A. *Optimal'noe sglazhivanie v sistemakh so sluchainoi skachkoobraznoi strukturoi* (Optimal smoothing in systems with a random discontinuous structure), Moscow, Fizmatlit, 2013, 188 p.
7. Masliev A.A., Gorin A.V., Khismatov I.F. *Yubileinaya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Aviatsionnye sistemy v XXI veke»: tezisy dokladov*. Moscow, GosNIIAS, 2022, pp. 97-98.
8. Tiranov D.T. *Oboronnaya tekhnika*, 2010, no. 6–7, pp. 33–36.
9. Ivanov V.P., Kurt V.I. *Modelirovanie i otsenka sovremennykh teplovizionnykh priborov* (Modeling and evaluation of modern thermal imaging devices), Kazan', FNPTs NPO GIPO, 2006, 596 p.
10. Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. *Teoriya opticheskikh sistem* (Theory of optical systems), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 448 p.
11. Miroshnikov M.M. *Teoreticheskie osnovy optiko-elektronnykh priborov* (Theoretical foundations of optoelectronic devices), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 600 p.
12. Agishev R.R. *Lazernoe zondirovanie okruzhayushchei sredy: metody i sredstva*. (Laser environmental sensing: methods and tools), Moscow, Fizmatlit, 2019, 264 p.
13. Vorob'ev A.L., Zhurik Yu.P., Krasnov A.M., Shashkov S.N. *Trudy MAI*, 2011, no. 49, URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28279&PAGEN_2=2

14. Khismatov I.F. *Trudy MAI*, 2019, no. 108. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=109572>. DOI: [10.34759/trd-2019-108-18](https://doi.org/10.34759/trd-2019-108-18)
15. Starikov V.M. *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya shkola-seminar «Peredacha, priem, obrabotka i otobrazhenie informatsii o bystrotekushchikh protsessakh»*: sbornik dokladov. Sochi, 2019, pp. 661-668.
16. Masliev A.A., Khismatov I.F., Gorin A.V. *Trudy GosNIIAS. Voprosy avioniki*, 2020, no. 2, pp. 13-26.
17. Levshin E.A., Khismatov I.F. *Modelirovanie i otsenka aviatsionnykh optiko-elektronnykh sistem samonavedeniya: monografiya* (Modeling and evaluation of aviation optoelectronic homing systems: monograph), Voronezh, Izdatel'sko-poligraficheskii tsentr «Nauchnaya kniga», 2022, 400 p.
18. Buravlev A.I. *Metody otsenki effektivnosti primeneniya vysokotochnogo oruzhiya* (Methods of evaluating the effectiveness of the use of high-precision weapons), Moscow, ID Akademii Zhukovskogo, 2018, 232 p.
19. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei* (Probability Theory), Moscow, Vysshaya shkola, 2001, 576 p.
20. *GOST 50779.11-2000. Statisticheskie metody. Statisticheskoe upravlenie kachestvom. Terminy i opredeleniya* (GOST 50779.11-2000. Statistical methods. Statistical quality management. Terms and definitions), Moscow, Standartinform, 2002, 38 p.

Статья поступила в редакцию 26.12.2023

Одобрена после рецензирования 26.03.2024

Принята к публикации 26.04.2024

The article was submitted on 26.12.2023; approved after reviewing on 26.03.2024; accepted for publication on 26.04.2024