

УДК: 629.7.018.7:53.087

DOI: 10.53816/20753608_2024_2_69

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА СЛЕДЯЩИЕ СИСТЕМЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА ЗА ЗОНОЙ ФОРСАЖА ЛЕТАЮЩИХ ЛАБОРАТОРИЙ

MATHEMATICAL MODEL OF EXTERNAL INFLUENCES ON TRACKING SYSTEMS OF THE INFRARED RANGE BEHIND THE FORCING ZONE OF FLYING LABORATORIES

По представлению чл.-корр. РАН С.М. Мужичека

А.И. Маликов¹, М.С. Сергеев², А.С. Тараскин³, Е.С. Воякина⁴

¹929-й ГЛИЦ МО РФ им. В.П. Чкалова, ²ПАО «Ил», ³ЛИИ им. М.М. Громова, ⁴ФАУ ГосНИИАС

A.I. Malikov, M.S. Sergeev, A.S. Taraskin, E.S. Voyakina

Предложена усовершенствованная математическая модель внешних воздействий на следящую систему инфракрасного диапазона за зоной факела форсажа летающей лаборатории. Получены рекомендации по повышению зачетности летных экспериментов, сокращению затрат и сроков проведения летных испытаний систем защиты летательных аппаратов.

Ключевые слова: математическая модель, летные эксперименты, летающие лаборатории, комплекс защиты, следящие системы.

An improved mathematical model of external influences on the tracking system of the infrared range behind the zone of the afterburner flame of a flying laboratory is proposed. Recommendations are given to improve the creditability of flight experiments, reduce the costs and timing of flight tests of aircraft protection systems.

Keywords: mathematical model, flight experiments, flying laboratory, protection system, tracking systems.

Современные и перспективные комплексы защиты (КЗ) самолетов и вертолетов от управляемых ракет (УР) обеспечивают подавление головки самонаведения (ГСН) путем воздействия направленным излучением. Для направления воздействия на ГСН в состав КЗ включены инфракрасные (ИК) системы обнаружения атакующих управляемых ракет и слежения за этими УР по угловым координатам [1, 2]. При проведении летных испытаний (ЛИ) КЗ используются специализированные летающие лаборатории (ЛЛ), на которых размещены измерительные ГСН (ИГСН) [3].

В настоящее время проблемой проведения ЛИ является обеспечение точного выдерживания условий проведения летных экспериментов (ЛЭ) с привлечением ЛЛ. Для решения данной проблемы проводится предполетное математическое моделирование, обеспечивающее определение участков траектории, на которых должен быть выполнен ЛЭ. Используемая в существующих методиках ЛИ математическая модель воздействия КЗ на ИГСН обеспечивает расчет относительного положения следящей системы в районе размещения ИГСН на ЛЛ.

Один из недостатков существующей математической модели заключается в том, что не учитывается особенность применения форсажного режима работы двигателя ЛЛ и влияние бокового ветра на условия проведения ЛЭ. Планирование ЛЭ с использованием недостаточно точных результатов математического моделирования приводит к снижению зачетности ЛЭ и необоснованному уменьшению числа возможных реализаций с имитацией атак УР.

Целью работы является усовершенствование математической модели внешних воздействий на следящие системы устройств комплексов защиты, что обеспечит повышение зачетности летных экспериментов, сокращение затрат и сроков проведения летных испытаний.

Достигнуть поставленной цели удалось путем включения дополнительных блоков, учитывающих случайный характер внешних воздействий на следящие системы от зоны ИК-излучения форсажа, а также параметров ЛЭ, связанных с наличием бокового ветра и применением статистической обработки результатов моделирования. Структурная схема усовершенствованной модели представлена на рис. 1.

На рис. 2 в горизонтальной плоскости показано взаимное положение поля зрения следящей системы КЗ, ИГСН на ЛЛ и участка в районе факела форсажа для трех точек траектории полета ЛЛ при сближении с ЛА (КЗ).

С учетом геометрических соотношений, на максимальной дальности ЛЭ $D_{\max}$ размеры



Рис. 1. Структурная схема усовершенствованной математической модели внешних воздействий на следящую ИК-систему

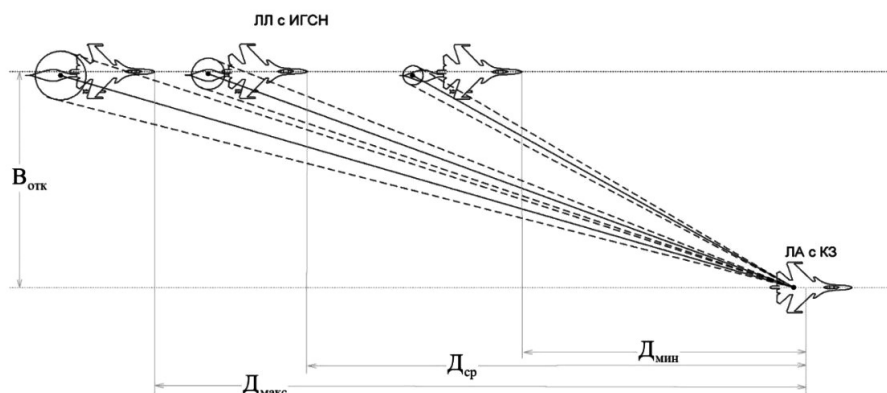


Рис. 2. Схема взаимного положения ЛА (КЗ) и ИГСН на ЛЛ с включенным форсажем одного (правого) двигателя

пятна следящей системы будут наибольшими и ИГСН будет находиться в пределах зоны видимости даже при отклонении его максимума от ИГСН $B_{отк}$. На средней дальности $D_{ср}$ максимум следящей системы направлен на ИГСН. На минимальной дальности $D_{мин}$ максимум следящей системы отклонен от ИГСН, размеры поля зрения будут минимальными и возможность выполнения ЛЭ будет сохранена при условии, если ИГСН останется в пределах этого поля зрения (приблизится к краю) [4].

При наличии бокового ветра на рабочих высотах проведения ЛЭ участки траектории полета, обеспечивающие условия проведения ЛЭ, могут быть расширены за счет дополнительного маневрирования по курсу с целью выдерживания требуемого направления на следящие системы. На рис. 3 изображено отклонение курса ЛА от линии заданного пути (ЛЗП) на угол α .

При разработке дополнительных блоков усовершенствованной математической модели учитывались следующие характеристики ИК-из-

лучения от зоны факела форсажа ЛЛ: расстояние от среза сопла до точки максимума интенсивности; статистические характеристики потока (мощности) ИК-излучения от зоны факела форсажа. Указанные характеристики могут быть определены путем обработки данных ЛЭ с использованием методов пространственных и временных распределений температуры физических объектов [5].

На рис. 4 приведено тепловое изображение (форма термограммы) ЛА, привлекаемого в качестве ЛЛ, при использовании режима форсажа правого двигателя.

На рис. 5 приведены результаты обработки термограмм в форме зависимостей относительной силы ИК-излучения от дальности от среза сопла участка в зоне форсажа.

Анализ результатов натурных работ показал, что кроме перемещения максимума интенсивности излучения необходимо учитывать случайный характер порождаемых этим излучением внешних воздействий.

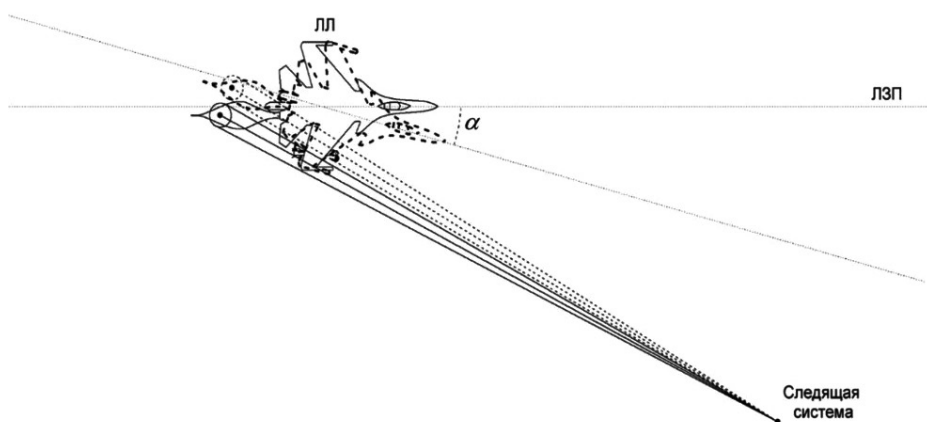


Рис. 3. Относительное положение ЛЛ и следящей системы при дополнительном маневрировании ЛЛ по курсу

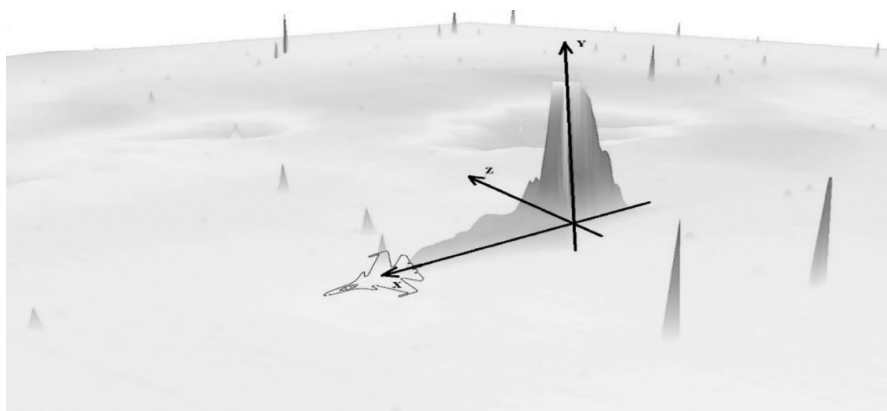


Рис. 4. Форма термограммы ИК-излучения ЛА при форсаже

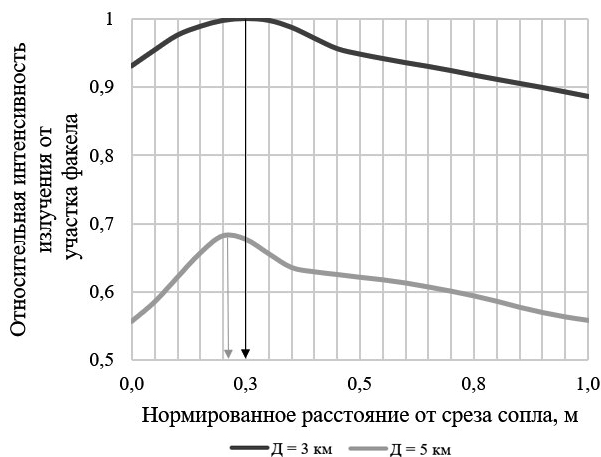


Рис. 5. Зависимости нормированной энергетической силы излучения участков зоны форсажа от дальности от среза сопла двигателя для различных дальностей до ЛЛ

Для оценки статистических характеристик потока (мощности) ИК-излучения от зоны факела форсажа проводилась обработка серии спектрограмм, полученных для относительно короткого интервала дальности. Результаты обработки спектрограмм приведены на рис. 6.

Проанализировав зависимости на рис. 6 можно сделать вывод, что интенсивность ИК-излучения от зоны факела форсажа носит случайный характер, который может быть учтен при переходе от детерминированной к статистической модели. В дополнение к анализу изображенных на рис. 6 зависимостей, качественный анализ

термограммы на рис. 4 позволяет заключить, что на систему слежения за зоной факела форсажа будет действовать случайный пространственно-временной входной сигнал. Такое воздействие будет определять основные ошибки сопровождения участка зоны форсажа ЛЛ с максимальной энергетической силой излучения [6, 7].

С учетом полученных данных установлено, что наиболее точно перемещение максимума излучения описывается уравнениями диффузии вида [8]:

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = -A_x(t) \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + \frac{1}{2} B_x(t) \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial p(y,t)}{\partial t} = -A_y(t) \frac{\partial p(y,t)}{\partial y} + \frac{1}{2} B_y(t) \frac{\partial^2 p(y,t)}{\partial y^2}, \quad (2)$$

где $A_x(t), A_y(t)$ — нестационарные коэффициенты сноса; $B_x(t), B_y(t)$ — нестационарные коэффициенты диффузии; $p(x,t), p(y,t)$ — плотности вероятности.

Квазистационарное решение уравнений (1), (2) имеет вид [9]:

$$p(x,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi B_x t}} \exp \left(-\frac{(x - A_x t)^2}{2 B_x t} \right);$$

$$p(y,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi B_y t}} \exp \left(-\frac{(y - A_y t)^2}{2 B_y t} \right).$$

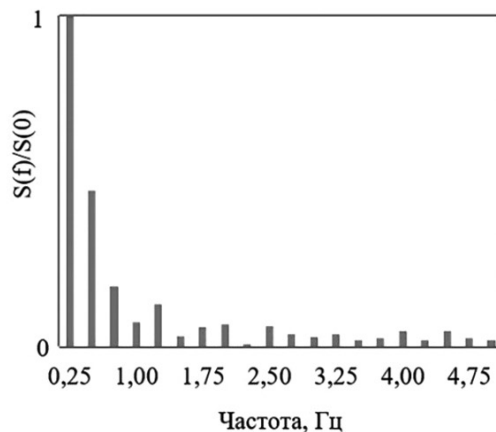
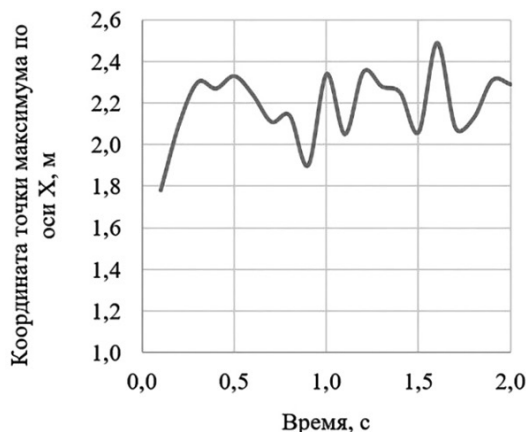


Рис. 6. Регистрация изменений координат точки максимума ИК-излучения в поле зрения следящей системы при сопровождении зоны факела форсажа ЛЛ и нормированный спектр, где $S(f)$ — спектральная плотность мощности

В усовершенствованной модели используется следующий алгоритм моделирования изменения пространственной координаты $X[n]$ точки максимума излучения зоны факела форсажа:

$$X[n] = X_m[n] + X_\phi[n];$$

$$X_m[n] = X_0 - n\Delta X;$$

$$X_\phi[n] = X_\phi[n-1] + \sigma \cdot \xi[n] \cdot \sqrt{1-\rho^2};$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}};$$

$$\rho = \exp(\Delta t_m \Delta f_{\text{эф}}),$$

где ΔX — ошибка оценки; σ — среднеквадратичное отклонение; $\xi[n]$ — случайная величина

с единичной дисперсией; ρ — коэффициент корреляции; $\Delta f_{\text{эф}}$ — эффективная ширина спектра; Δt_m — длина интервала корреляции.

Результаты математического моделирования [10] на языке программирования Python 3 с пояснениями приведены на рис. 7, 8.

Полученные результаты соответствуют условиям полета с нулевым углом сноса. Возможны различные способы использования этих результатов в реальных условиях выполнения ЛЭ. Первый способ предусматривает выполнение полета с постоянным углом скольжения на всем участке траектории. Этот способ гарантирует выполнение ЛЭ в заданных диапазонах дальности, но усложняет ЛЭ, поскольку требует выдерживания угла скольжения на участках с периодическим включением форсажа одного двигателя и достаточно сложных операций по неоднократному захвату цели измерительной ГСН. Второй

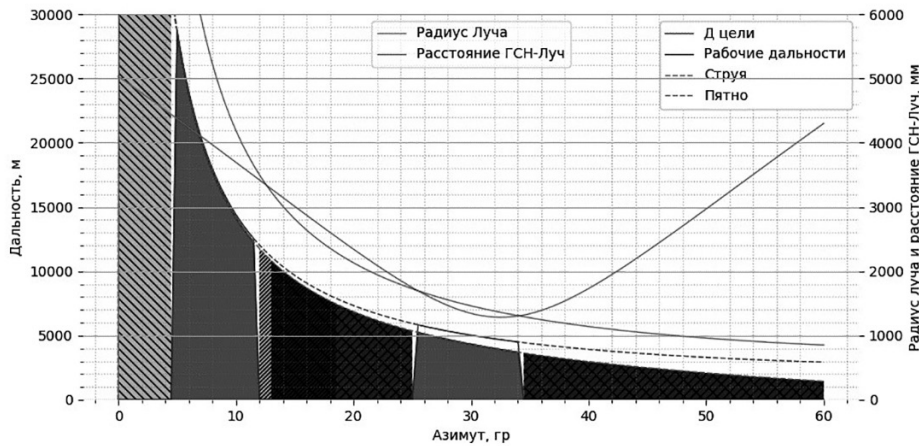


Рис. 7. Результат применения существующей математической модели

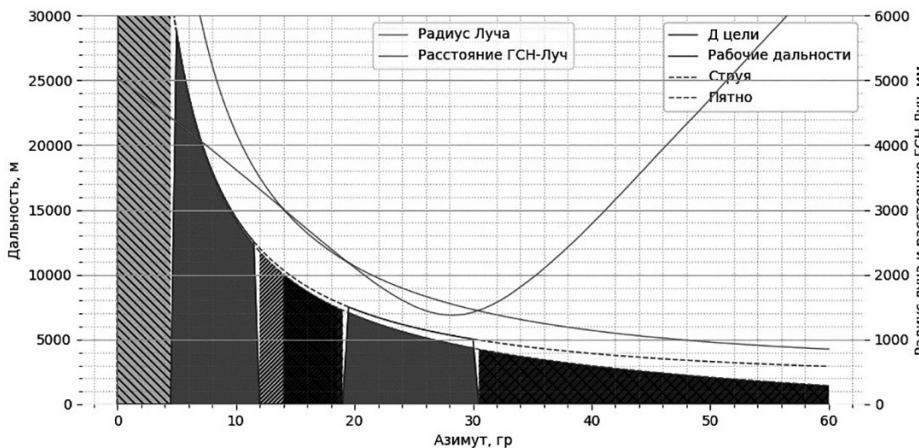


Рис. 8. Результат применения усовершенствованной математической модели

способ предусматривает коррекцию полетного задания по результатам предполетного моделирования, проводимого непосредственно перед полетом с учетом данных о направлении и скорости ветра на высоте выполнения ЛЭ. Этот способ делает ЛЭ менее сложным, но зависит от наличия и точности метеорологических данных, которые редко используются при проведении летных испытаний. Наиболее перспективным можно рассматривать способ выполнения ЛЭ с переменным углом скольжения, рассчитанным по данным предполетного математического моделирования об оптимальном изменении курса на всем участке траектории сближения ЛЛ с КЗ. Основным преимуществом такого способа является существенное расширение участков траектории, на которых выполняются условия для выполнения ЛЭ. Реализация данного способа не требует данных о направлении и скорости ветра на высотах ЛЭ, но предусматривает учет ограничений по углу скольжения для ЛЛ.

Таким образом, для учета ошибок сопровождения от зоны факела форсажа ЛЛ необходим переход от детерминированной к статистической математической модели, использующей характеристики случайных входных сигналов ИК-системы слежения за атакующими УР.

Рассмотренная усовершенствованная математическая модель внешних воздействий на следящие системы позволяет повысить точность определения диапазонов дальности с обеспечением условий проведения летного эксперимента.

Повышение зачетности летных экспериментов, сокращение затрат и сроков проведения летных испытаний комплексов защиты летательных аппаратов может быть достигнуто за счет существенного расширения участков траектории, на которых выполняются условия для летного эксперимента, путем дополнительного маневрирования по курсу на этапе сближения летающей лаборатории с целью.

Литература

1. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 284 с.
2. Ястребов М.А. Математическая модель преобразования сигнала в оптическом координаторе головки самонаведения. Контенант. 2020. Т. 19, № 5-1. С. 43–49.
3. Зиненков Ю.В., Кондратюк В.И., Аксенов С.П. и др. Разработка летающей лаборатории на базе легкого беспилотного летательного аппарата // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2022. Т. 26. № 2 (96). С. 41–52.
4. Максимов М.В., Горгонов Г.И. Радиоэлектронные системы наведения. М.: Радио и связь, 1982. 304 с.
5. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 544 с.
6. Росин М.Ф., Булыгин В.С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 312 с.
7. Фукс-Рабинович Л.И., Епифанов М.В. Оптико-электронные приборы: учебное пособие для оптико-механических и приборостроительных техникумов. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1979. 362 с.
8. Вакин С.А., Шустов Л.Н. Основы радиоэлектронной борьбы: учебное пособие. Часть I. М.: Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1998. 118 с.
9. Росин М.Ф., Булыгин В.С. Статистическая динамика и теория эффективности систем управления: учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1981. 312 с.
10. Вандер Дж. Плас. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб.: Питер, 2020. 576 с.