

УДК 623.46

doi: 10.53816/23061456_2025_5–6_103

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ АДАПТИВНОЙ ИНФРАКРАСНОЙ НАВОДЯЩЕЙ ГОЛОВКИ ВРАЩАЮЩИХСЯ СНАРЯДОВ

ADAPTIVE INFRARED OPTIMIZATION ISSUES THE GUIDING HEAD OF ROTATING PROJECTILES

Канд. техн. наук Г.В. Алиева

Ph.D. G.V. Alieva

Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

С целью стабилизации траектории полета управляемых снарядов часто используется вращательное движение снарядов. Вращение снаряда создает значительные трудности для сканирующей системы снаряда, осуществляющей наведение на цель. Для решения указанной проблемы используется метод сканирования пространства путем установки линейки фоточувствительных устройств в радиальном направлении на плоскости формирования изображения сканирующей системы головки наведения вращающегося снаряда. Сформулированы и решены две оптимизационные задачи реализации адаптивного управления фокусным расстоянием оптики снаряда: управление фокусным расстоянием, в зависимости от дистанции до объекта; управление фокусным расстоянием, в зависимости от ширины детектора на дальнем секторе диска обнаружения ухода от траектории. Определено, что в первом случае требуется реализация прямой зависимости между функцией и аргументом адаптивного уравнения, а во втором случае — обратной зависимости.

Ключевые слова: наведение на цель, оптимизация, адаптивное управление, фокусное расстояние, наводящая головка.

In order to stabilize the flight path of guided projectiles, the rotational motion of the projectiles is often used. The rotation of the projectile creates significant difficulties for the projectile's scanning system, which aims at the target. To solve this problem, the space scanning method is used by installing a line of photosensitive devices in the radial direction on the imaging plane of the scanning system of the guidance head of a rotating projectile. Two optimization problems for implementing adaptive control of the focal length of projectile optics are formulated and solved: (a) control of the focal length, depending on the distance to the object; (b) control of the focal length, depending on the width of the detector in the far sector of the trajectory departure detection disk. It is determined that in the first case, a direct relationship between the function and the argument of the adaptive equation is required, and in the second case, an inverse relationship.

Keywords: targeting, optimization, adaptive control, focal length, pointing head.

Известно, что вращательное движение снарядов, управляемых в инфракрасном (ИК) диапазоне часто используется с целью стабилизации траектории полета снаряда [1–4]. Вращение

снаряда создает значительные трудности для сканирующей системы снаряда, осуществляющей наведение на цель. Для решения указанной проблемы используется метод сканирования

пространства. Этот принцип реализуется путем установки линейки фоточувствительных устройств в радиальном направлении на плоскости формирования изображения сканирующей системы головки наведения вращающегося снаряда. Вариант такой установки линейки фотодетекторов показан на рис. 1 [5].

Основной недостаток такого решения заключается в том, что сила сигнала, получаемого с такого детектора, зависит от расстояния детекторного элемента в линейке до оптической оси. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум для более удаленных элементов. Для решения данной проблемы используются двумерные детекторы с таким распределением элементов, при котором можно было бы скомпенсировать ухудшение отношения сигнал/шум, используя метод интегрирования с временной задержкой. На рис. 2 дана иллюстрация такого решения проблемы. При таком решении компенсация ослабления осуществляется за счет интегрирования сигналов нескольких детекторов с некоторой задержкой во времени [6].

Согласно [7], вероятность обнаружения цели определяется по методу Джонсона. В этом методе выделены три качественных уровня обнаружения:

- детектирование;
- распознавание;
- идентификация.

Детектирование означает появление объекта в наблюдаемом изображении. Распознавание

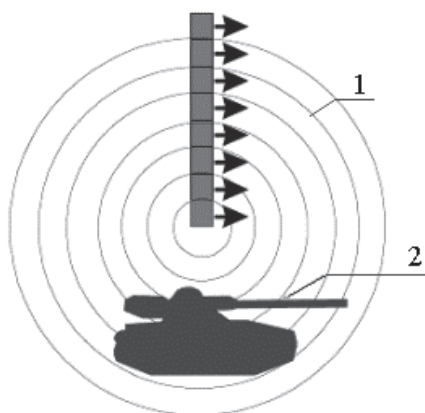


Рис. 1. Иллюстрация радиальной установки фоточувствительной линейки на плоскости изображения наводящей головки вращающегося снаряда: 1 — фоточувствительная головка; 2 — цель

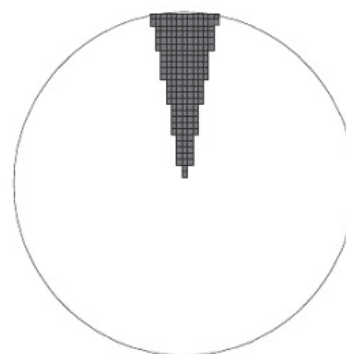


Рис. 2. Иллюстрация 2D-детектора, установленного на плоскости изображения головки ИК-наведения

предусматривает точное определение типа объекта. Идентификация предполагает выявление основных характеристик объекта (тип, скорость движения, класс и др.).

Согласно методу Джонсона, наблюдаемый объект заменяется на тест в виде четырех полос и далее расстояние между наблюдаемым объектом и штриховым изображением увеличивается в таких пределах, где штрихи еще можно различить.

Для принятия решения по вышеприведенным уровням обнаружения подобных двумерных объектов требуется некоторое количество циклов повторения теста. Соответствующие данные приведены в таблице.

Согласно [8], требуемый размер детектора определяется по формуле

$$l = \frac{\sqrt{hw} \cdot f \cdot L}{2n}, \quad (1)$$

где h — высота;
 w — ширина;
 n — количество циклов теста;
 f — фокусное расстояние;
 L — расстояние до объекта.

Таблица

Обнаружения двумерного объекта

Классы обнаружения	Количество циклов теста
Детектирование	0,75
Распознавание	3,0
Идентификация	6,0

Вопросы вероятности обнаружения и вычисления термального и пространственного разрешения системы наведения вращающегося снаряда исследованы в работе [8]. В настоящей работе исследуется возможность оптимального выбора таких показателей, как f , L , l для достижения обнаружения минимальной величины эквивалентной площади объекта.

Материалы и методы

В формуле (1) определим эквивалентную поверхностную площадь S объекта в виде

$$S = h \cdot w. \quad (2)$$

С учетом формул (1) и (2) получим

$$l = \frac{\sqrt{S} \cdot f \cdot L}{2n}. \quad (3)$$

Из формулы (3) находим

$$S = \frac{4n^2 \cdot l^2}{f^2 \cdot L^2}. \quad (4)$$

Рассмотрим конструкцию адаптивного снаряда, в котором предусмотрены следующие возможности:

- изменение расстояния до цели L ;
- изменение показателя l ;
- изменение фокусного расстояния f .

Требуется проведение такой перестановки адаптивных функций управления

$$f = \varphi(L); \quad (5)$$

$$f = \psi(l), \quad (6)$$

при которых усредненная величина S по времени полета снаряда достигла бы минимума, то есть снаряд мог бы обнаружить еще более мелкие объекты.

В общем случае показатели S , l , f , L могут быть представлены в качестве функций времени подлета к цели, следовательно, имеем

$$S(t) = \frac{(4n) \cdot l(t)^2}{f(t)^2 \cdot L(t)^2}. \quad (7)$$

Интегрируя выражение (7) по t , находим

$$\frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} S(t) dt = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} \frac{(4n) \cdot l(t)^2}{f(t)^2 \cdot L(t)^2} dt, \quad (8)$$

где t_m — максимальная величина t .

Далее приняв $S(t)$, $l(t)$, $f(t)$ и $L(t)$ в качестве линейных функций времени, можно получить выражение для нахождения средней поверхностной площади:

$$\frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} S(t) dt = S_{\text{ср}}. \quad (9)$$

С учетом формулы (5) выражение (8) перепишем в виде

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{t_m} \int_0^{t_m} \frac{(4n) \cdot l^2}{\varphi(L)^2 \cdot L^2} dL. \quad (10)$$

Аналогичным образом, с учетом функции (6) получим

$$S_{\text{ср}} = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} \frac{(4n)^2}{\psi(l) \cdot L^2} dl. \quad (11)$$

С учетом вышеизложенного можно сформулировать две задачи оптимизации адаптивного устройства наведения на цель.

Определение оптимального вида функции $\varphi(L)$, при которой $S_{\text{ср}}$ достигает минимума, то есть становится возможным обнаруживать более мелкие объекты.

Определение оптимального вида функции $\psi(l)$, при которой $S_{\text{ср}}$ также достигает минимума.

Для решения первой из вышеизложенных задач примем ограничительное условие

$$\int_0^{L_m} \varphi(L) dL = C_1. \quad (12)$$

Для второй оптимизационной задачи примем аналогичное ограничительное условие

$$\int_0^{l_m} \psi(l) dl = C_2. \quad (13)$$

Смысл ограничительных условий (12) и (13) заключается в ограниченности технологических

возможностей реализации адаптивного управления величиной фокусного расстояния.

С учетом выражений (10) и (12) целевой функционал F_1 вариационной оптимизации имеет вид

$$F_1 = \frac{1}{L_m} \int_0^{l_m} \frac{4n \cdot l^2}{\varphi(L)^2 \cdot L^2} dL + \lambda_1 \left[\int_0^{l_m} \varphi(L) dL - C_1 \right], \quad (14)$$

где λ_1 — множитель Лагранжа.

С учетом выражений (11) и (13) аналогичный целевой функционал имеет вид

$$F_2 = \frac{1}{l_m} \int_0^{l_m} \frac{4n \cdot l^2}{\psi(l)^2 \cdot l^2} dl + \lambda_2 \left[\int_0^{l_m} \psi(l) dl - C_2 \right]. \quad (15)$$

Рассмотрим решения оптимизационных задач (14) и (15). Согласно [9, 10], решение такого типа вариационных задач конкретно для F_1 имеет вид

$$\frac{d \left\{ \frac{4n \cdot l^2}{L_m \varphi(L)^2 L^2} + \lambda_1 \varphi(L) \right\}}{d\varphi(L)} = 0. \quad (16)$$

Для F_2 аналогичное выражение имеет вид

$$\frac{d \left\{ \frac{4n \cdot l^2}{l_m \psi(l)^2 l^2} + \lambda_2 \psi(l) \right\}}{d\psi(l)} = 0. \quad (17)$$

Из выражения (16) получаем

$$-\frac{8n \cdot l^2}{L_m L^2 \cdot \varphi(L)^3} + \lambda_1 = 0. \quad (18)$$

Из выражения (18) находим

$$\varphi(L) = \sqrt[3]{\frac{8n \cdot l^2}{\lambda_1 \cdot L_m \cdot L^2}}. \quad (19)$$

Аналогичным образом, из условия (17) получим

$$-\frac{4n \cdot l^2}{l_m \cdot \psi^3(l) \cdot l^2} + \lambda_2 = 0. \quad (20)$$

Из условия (20) находим

$$\psi(l) = \sqrt[3]{\frac{4n \cdot l^2}{l_m \cdot L^2 \cdot \lambda_2}}. \quad (21)$$

Оба решения, то есть выражения (19) и (21) обеспечивают минимум целевых функционалов F_1 и F_2 , то есть могут привести к обнаружению более мелких объектов. Вместе с тем существует принципиальная разница между решениями выражений (19) и (21), заключающаяся в том, что в первом случае фокусное расстояние должно пропорционально расти с увеличением l , а во втором случае требуется обратная зависимость f от L .

При этом вычисление множителей Лагранжа может быть осуществлено по стандартной схеме, используя пары выражений (12) и (19) для вычисления λ_1 , а также выражения (13) и (21) для вычисления λ_2 .

Обсуждение

Таким образом, сформированы и решены задачи оптимизации предлагаемого адаптивного узла инфракрасного наведения вращающегося снаряда на цель.

С учетом метода Джонсона обнаружения и идентификации целей, в таком устройстве сформулированы две оптимизационные задачи реализации адаптивного управления фокусным расстоянием оптики снаряда:

– определение вида оптимальной функции зависимости фокусного расстояния от расстояния до объекта, при котором возможно обнаружение объектов наименьшей площади;

– определение вида оптимальной функции зависимости фокусного расстояния от ширины детектора, при котором возможно обнаружение объектов наименьшей площади.

Определено, что в первом случае требуется реализация прямой зависимости между функцией и аргументом адаптивного уравнения, а во втором случае — обратной зависимости.

Заключение

Для достижения возможности обнаружения и идентификации мелких объектов в ИК-управляемых вращающихся снарядах предложены адаптивные управления:

а) управление фокусным расстоянием, в зависимости от дистанции до объекта;

б) управление фокусным расстоянием, в зависимости от ширины детектора на дальнем секторе диска обнаружения ухода от траектории.

Определено, что обнаружение наименьших объектов в первом случае может быть реализовано при наличии прямой связи между функцией аргументов вводимого адаптивного управления, а во втором случае — обратной связи.

Список источников

1. R.M. Botez, V. Chelaru, P. Parvu and C. Gheorghe. Calculus Model for a Rolling Guided Missile // Journal of Vibration and Control 2001; 7(6); 863-889. URL: <http://jvc.sagepub.com/cgi/content/abstract/7/6/863> (дата обращения: 15.02.2025).

2. SR Mohan R.M. Calculus Model for a Rolling Guided Missile DRDO: monographs/Special publications series / Fundamentals of guided missiles. Defence research and Development Organisation Ministry of Defence, New Delhi – 110 011. 2016. 25 p.

3. R. Hudson and J. Hudson. Infrared Detectors. Dowden, Hutchinson & Ross, distributed by Halsted Press (1975). 392 p.

4. The infrared and electro-optical systems handbook. Infrared Information Analysis Center, SPIE Optical Engineering Press (1993). 74 p.

5. Piotrowski J., Szabra D. IR detectors of homing head for rotating missiles of smart munition.

6. Piotrowski J., Szabra D. Conception of advanced IR detector for homing head of rotating missiles. PTU, 84, pp. 31–36 (2002).

7. Holst G.C. Electro-Optical Imaging System Performance. 2003. URL: https://archive.org/details/electroopticalim0000hols_3ed (дата обращения: 15.02.2025).

8. Piotrowski J., Swiderski W., Szabra D. Infrared homing for rotating missiles. URL: https://www.researchgate.net/publication/305183605_Infrared_homing_head_for_rotating_missiles (дата обращения: 15.02.2025).

9. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. М.: Наука, 1974. 432 с.

10. Задорожний В.Г. Методы вариационного анализа. М.: Высшая школа, 2006. 342 с.

References

1. R.M. Botez, V. Chelaru, P. Parvu, and C. Gheorghe. Calculus Model for a Rolling Guided Missile // Journal of Vibration and Control 2001; 7(6); 863-889. URL: <http://jvc.sagepub.com/cgi/content/abstract/7/6/863> (accessed on 15.02.2025).

2. SR Mohan R.M. Calculus Model for a Rolling Guided Missile DRDO: monographs/Special publications series/ Fundamentals of guided missiles. Defence research and Development Organisation Ministry of Defence, New Delhi – 110 011. 2016. 25 p.

3. R. Hudson and J. Hudson. Infrared Detectors. Dowden, Hutchinson & Ross, distributed by Halsted Press (1975). 392 p.

4. The infrared and electro-optical systems handbook. Infrared Information Analysis Center, SPIE Optical Engineering Press (1993). 74 p.

5. Piotrowski J., Szabra D. IR detectors of homing head for rotating missiles of smart munition.

6. Piotrowski J., Szabra D. Conception of advanced IR detector for homing head of rotating missiles. PTU, 84, pp. 31–36 (2002).

7. Holst G.C. Electro-Optical Imaging System Performance. 2003. URL: https://archive.org/details/electroopticalim0000hols_3ed (accessed on 15.02.2025).

8. Piotrowski J., Swiderski W., Szabra D. Infrared homing for rotating missiles. URL: https://www.researchgate.net/publication/305183605_Infrared_homing_head_for_rotating_missiles (accessed on 15.02.2025).

9. Elsholts L.E. Differential equations and calculus of variations. Moscow: Nauka, 1974. 432 p.

10. Zadorozhny V.G. Methods of variational analysis. Moscow: Higher School, 2006. 342 p.