

УДК 658.382.3

doi: 10.53816/23061456_2025_11–12_72

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ ОПОВЕЩЕНИЯ О ЛАЗЕРНОЙ ОПАСНОСТИ

OPTIMIZATION OF LASER HAZARD WARNING SYSTEMS

*Д-р техн. наук Ф.Г. Агаев, канд. техн. наук Ф.Ф. Гулиев,
канд. техн. наук И.Г. Абдурахманова*

D.Sc F.G. Agaev, Ph.D. F.F. Guliyev, Ph.D. I.G. Abdurrakhmanova

Национальное Аэрокосмическое Агентство (г. Баку)

Сформирована и решена задача оптимального выбора соотношений дистанций от лазера до цели и от цели до приемников в системах LWS с выносными фотодетекторами. Сформулированы две подзадачи: в первой — цель указанная лазером принадлежит противнику, а во второй противоположной стороне. Показано что при оптимизации систем лазерно-управляемых ракет и снарядов при учете внедренной противником LWS-системы можно воспользоваться теорией лазерных систем. Применение теории лазерных систем позволило оптимизировать функционирование атакующей стороны в плане оптимального выбора расстояния до противника, применяющего LWS-систему с выносными фотодатчиками.

Ключевые слова: лидар, фотодетектор, оптимизация, лазер, луч лазера.

The problem of optimally selecting the ratios of distances from the laser to the target and from the target to the receivers in LWS systems with remote photodetectors has been formed and solved. Two subtasks are formulated: in the first, the target indicated by the laser belongs to the enemy, and in the second, the opposite side. It is shown that when optimizing systems of laser-guided missiles and projectiles, taking into account the LWS-system introduced by the enemy, it is possible to use the theory of laser systems. The application of the theory of laser systems made it possible to optimize the functioning of the attacking side in terms of the optimal choice of the distance to the enemy using the LWS system with remote photo sensors.

Keywords: Lidar, photodetector, optimization, laser, laser beam.

Системы оповещения о лазерной опасности (LWS — Laser Warning Systems) предназначены для организации защиты живой силы и важных военных объектов от лазерно-управляемых ракет, снарядов или пуль снайперов противника. Базовый принцип действия систем оповещения о лазерной опасности (даже LWS-систем) подробно описан во многих работах [1, 2, 4, 8, 11] и далее подробно не излагается. Следует отметить, что развитие LWS-систем в настоящее время

идет в направлении улучшения обзора, дальности регистрации лазерного излучения, увеличения отношения сигнал/шум и увеличения шума защищенности системы.

Так, в работе [1] предложена новая конструкция LWS-систем, содержащая пространственно смодулированный интерферометр Михельсона и оптоволоконную оптическую антенну. Интерферометр различает лазерное излучение от фонового излучения. С использованием Фурье-пре-

образования получают информацию о спектре лазерного излучения. В работе [2] сообщается о создании датчика угла падения с использованием зеркал. Отмечается, что предлагаемая конструкция обеспечивает угол обзора до 120° .

В работе [3] сообщается о построении LWS с использованием линейки дискретных фотодиодов. Отмечается что предлагаемая конструкция обеспечивает высокую точность определения угла поступления луча. Возможности использования нейроморфической колеры для обеспечения полусферического угла обзора рассмотрены в работе [4]. Отмечается, что достигнута точность регистрации угла поступления на уровне $0,05$ градусов в видимой области спектра. В работе [5] сообщается о создании бортовой системы LWS, имеющей широкий диапазон длин волн со способностью детектирования кодовой посылки, содержащейся в импульсной последовательности лазерного излучения. Отмечается, что LWS-система должна учесть возможность изменения дистанции между излучателем и самой системой, и быть зачищенной от интерференций. Как отмечается в работе [6] используемые в LWS-системах фотодетекторы должны охватить широкий диапазон длин волн от 500 нм до 1700 нм, быть способны детектировать вражеский код. Согласно работе [7], создано LWS с оптической системой, обеспечивающей отношение сигнал/шум на уровне 160 дБ и способной зарегистрировать лазерные лучи с дистанции выше 15 км при низкой температуре. Как сообщается в работе [8], использование фотоприемников на базе наноструктур позволит намного улучшить

основные характеристики LWS-систем. В работе [9] отмечается необходимость учета ослабления лазерного луча в атмосфере при организации мер по противодействию цели указывающего луча. В работе [10] отмечается, что уменьшение диаметра луча с помощью вновь разработанной оптики до размеров 350 мкм позволило достичь отношения сигнал/шум на уровне 175 дБ, что в свою очередь позволило уменьшить количество «ложных тревог».

Вместе с тем следует указать на возможность повышения чувствительности таких систем, заключающуюся в том, что лазерный луч, проходя через километровые дистанции, увеличивается в диаметре до нескольких десятков сантиметров. Однако, оптический узел системы оповещения принимает лишь часть энергии луча. При этом остальная часть энергии лазерного луча пропадает. Если использовать выносные фотодетекторы с большой площадью чувствительной входной части и установить их на определенном расстоянии от объекта, для приема всей рассеянной и отраженной от объекта радиации, как это показано на рис. 1, б, то можно более эффективно регистрировать поступающие лазерные лучи.

Отметим также то, что фиксация лазерного луча на поверхности охраняемого объекта может быть осуществлена двумя способами.

1. Путем размещения на поверхности охраняемого объекта высокочувствительных фотодетекторов для фиксации попадания лазерного луча на поверхности объекта (рис. 1, а).

2. Путем размещения перед охраняемым объектом выносных фотодетекторов для регист-



Рис. 1. Структурная схема систем оповещения о лазерной опасности:

а — вариант системы, где фотодатчики установлены на поверхности объекта;

б — вариант системы с выносными фотодатчиками. Цифрами обозначены:

1 — лазерный луч; 2 — фотодатчики; 3 — охраняемый объект; 4 — отражение лазерных лучей

рации отраженных от поверхности охраняемого объекта лазерных лучей (рис. 1, б).

В настоящей статье рассматривается следующая дуальная задача.

Задача 1.1: найти оптимальное соотношение r_1 и r_2 (рис. 1, б) в случае, если объект принадлежит противнику, а лазер — силам, наступающим на противника.

Задача 1.2: найти оптимальное соотношение дистанций r_1 и r_2 (рис. 1, б) в случае, если лазер принадлежит противнику, а объект принадлежит стороне, обороняющейся от противника.

Следует отметить, что в отношении принципа работы части системы распространение лазерного луча и его отражения от объекта можно сказать, что принцип функционирования и анализ работы этой части LWS-системы полностью аналогичен принципу работы и методом анализа LADAR-а. Как известно [5, 12–13] LADAR является лазерным радаром, предназначенным для определения и изучения формы и конфигурации объектов на определенной дистанции. Для решения поставленных выше задач воспользуемся известными выражениями полученными при анализе LADAR-ов.

Как показано в работе [14] уравнение мощности отраженного лазерного луча в LADAR имеет вид

$$P_r = \frac{4KP_5 T_{A_1} \eta_t}{\pi \cdot \varphi^2 r_1^2} \cdot \Gamma \cdot \frac{T_{A_2}}{\pi \cdot r_2^2} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4}, \quad (1)$$

где P_r — мощность принимаемого отраженного сигнала;

P_5 — мощность используемого лазерного источника;

K — функция, характеризующая профиль луча лазера;

T_{A_1} — коэффициент пропускания атмосферы в направлении от источника к цели;

η_t — оптическая эффективность передатчика;

φ — толщина луча радианах;

r_1 — расстояние от передатчика до цели;

Γ — поперечное сечение лазерного луча на поверхности цели и в м²;

T_{A_2} — пропускание атмосферы от цели до приемника;

r_2 — расстояние от цели до приемника;

D — диаметр диафрагмы приемника;

η_r — оптическая эффективность приемника.

Таким образом выражение (1) позволяет вычислять мощность лазерного радара в виде произведения четырех множителей:

1. Распространение луча лазера до цели;
2. Отражение луча от цели;
3. Движение рассеянного (отраженного луча) к приемнику;
4. Сбор рассеянного света преобразование приемником.

Как видно из выражения (1), оно симметрично относительно r_1 и r_2 в целом. Полная структурная схема системы LWS может быть представлена подобно схеме, показанной на рис. 2.

Целью настоящей статьи является нахождение оптимального соотношения между r_1 и r_2 , при которой мощность отраженных сигналов может достигать экстремальных величин.

При этом если экстремум является минимумом, то это можно считать оптимальным вариантом для атакующей стороны.

В противном, случае, если экстремум является максимумом, то этот вариант является оптимальным для обороняющейся стороны.

Как видно из выражения (1), оно симметрично относительно r_1 и r_2 следовательно любое полученное оптимальное соотношение в виде

$$r_1 = f(r_2) \quad (2)$$

становится также оптимальным в виде

$$r_2 = f(r_1).$$

Рассмотрим порядок формирования и решения соответствующей оптимизационной задачи.

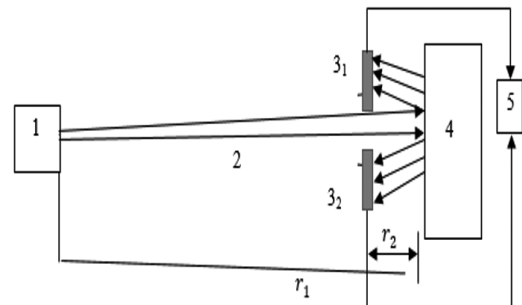


Рис. 2. Структурная схема системы LWS.

Цифрами обозначены: 1 — лазерный источник наведения атакующей стороны; 2 — лазерный луч; 3₁–3₂ — фотоприемники; 4 — охраняемый объект; 5 — устройство управления

Представим выражение (1) в следующем виде

$$P_r = \frac{C_1}{r_1^2 \cdot r_2^2}, \quad (3)$$

где

$$C_1 = \frac{4KP_5 T_{A_1} \eta_t}{\pi \cdot \phi^2} \cdot \Gamma \cdot \frac{T_{A_2}}{4\pi} \cdot \frac{\pi D^2 \eta_r}{4},$$

при $C_1 = \text{const}$.

Далее введем на рассмотрение функциональную связь

$$r_1 = f(r_2). \quad (4)$$

С учетом выражения (4) выражение (3) имеет вид

$$P_1 = \frac{C_1}{r_2^2 + f^2(r_2)}. \quad (5)$$

В принципе может существовать следующее упорядоченное множество

$$R_2 = \{r_{2i}\}; i = \overline{1, n},$$

где близлежащие элементы множества отличаются на величину $\Delta r_2 = \text{const}$, то есть на практике r_2 может принять большое множество дискретных величин.

Очевидно, что при $n \rightarrow \infty$ на базе выражения (5) можно построить следующий целевой функционал F :

$$F = \int_0^{r_{2\max}} \frac{C_1}{r_2^2 f^2(r_2)} dr_2. \quad (6)$$

Согласно методу безусловной вариационной оптимизации для вычисления оптимального вида функции $f(r_2)$ на эту функцию необходимо наложить некоторое ограничительное условие в виде

$$\int_0^{r_{2\max}} f(r_2) dr_2 = C_2; C_2 = \text{const}. \quad (7)$$

С учетом выражений (6) и (7) составим следующий целевой функционал F_1 оптимизации

$$F_1 = \int_0^{r_{2\max}} \frac{C_1}{r_2^2 \cdot f^2(r_2)} dr_2 + \lambda \left[\int_0^{r_{2\max}} f(r_2) dr_2 - C_2 \right], \quad (8)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (8) согласно методу Эйлера должно удовлетворять условию [15]

$$\frac{d \left\{ \frac{C_1}{r_2^2 \cdot f^2(r_2)} + \lambda f(r_2) \right\}}{df(r_2)} = 0. \quad (9)$$

Из выражения (9) находим

$$-\frac{2C_1}{r_2^2 \cdot f^3(r_2)} + \lambda_1 = 0. \quad (10)$$

Из выражения (10) имеем

$$f(r_2) = \sqrt[3]{\frac{2C_1}{\lambda_1 \cdot r_2^2}}. \quad (11)$$

Согласно признаку Лагранжа при решении (11) функционал (8) достигает минимума, так как вторая производная подынтегрального выражения в (8) по функции $f(r_2)$ всегда является положительной величиной. Для выражения λ можно воспользоваться выражениями (8) и (11).

Как было отмечено выше выражение (3) симметрично относительно r_1 и r_2 . Это означает, что если ввести на рассмотрение функцию

$$r_2 = \psi(r_1)$$

и ограничение

$$\int_0^{r_{2\max}} \psi(r_1) dr_2 = C_3; C_3 = \text{const}$$

и далее построить функционал F_2 , где

$$F_2 = \int_0^{r_{1\max}} \frac{C_1}{r_1^2 \cdot \psi^2(r_1)} dr_1 + \lambda_2 \left[\int_0^{r_{1\max}} \psi(r_1) dr_1 - C_3 \right], \quad (12)$$

и если повторить все вышеприведенные процедуры можно получить решение

$$r_2 = \Psi(r_1) = \sqrt[3]{\frac{2C_1}{\lambda_2 \cdot r_1^2}}.$$

При решении (12) функционал F_2 достигает минимума, что легко проверить по признаку Лагранжа.

Выводы

Таким образом, сформирована и решена задача оптимального выбора соотношения дистанций от лазера до цели и от цели до приемников в системах LWS с выносными фотодетекторами. Рассмотрены две подзадачи: в первой — целеуказывающий лазер принадлежит противнику, а во второй — противоположной стороне.

В контексте решения первой подзадачи получено условие, при выполнении которого сигнал, формируемый в выносных фотодетекторах, достигает минимума, что нежелательно для обороняющейся стороны.

В контексте решаемой второй подзадачи получено условие, при котором у обороняющегося противника на выносных фотодатчиках формируется минимальный сигнал, что можно считать оптимальным режимом для сил, наступающих на противника.

Показано, что при оптимизации систем лазерно-управляемых ракет и снарядов с учетом внедрения противником LWS-систем можно воспользоваться теорией ладарных систем. Применение теории ладарных систем позволило оптимизировать функционирование атакующей стороны в плане оптимального выбора расстояния до противника, применяющего LWS-систему с выносными фотодатчиками.

Список источников (References)

1. Xiao L., Jilong Z., Erming T. et al. A new design for laser warning system // Proc. Of the 7th WSEAS international conference on signal, speech and image processing. Beijing, China. 2007.
2. Wojtanowski J., Jakubaszek M., Zygmunt M. Freeform mirror design for novel laser warning receivers and laser angle of incidence sensors // Sensors 2020. No 2569.
3. Kumar S., Prakash S., Maini A.K. et al. Design of a laser-warning system using an array of

discrete photodiodes. Part II // Journal of battlefield technology. 2021. Vol. 14, No 2.

4. Orth A., Stewart T.C., Picard M., Drouin M.A. Towards a laser warning system in the visible spectrum using a neuromorphic camera // ICONS 22. <https://doi.org/10.1145/3546790.3546819>.

5. Barber Z. et al. Accuracy of active chirp linearization for broadband FMCW ladar // To be submitted to JOSA B. 2009.

6. Gogoi T., Kumar R. Design and development of a laser warning sensor prototype for airborne application // Defence science journal. 2023. Vol. 73, No 3. Pp. 332–340. No 3.

7. Mohammadnejad S., Arab H., Sheshkelani N.R. analysis of new laser warning technologies to propose a new optical subsystem // Iranian journal of electrical and electronic engineering. 2018. Vol. 14, No 3.

8. Mohammadnejad S., Aasi M. Analysis of structures and technologies of various types of photodetectors used in laser warning systems: a review // Optical engineering. 2023. Vol. 62, No 9.

9. Zygmunt M., Kopczynski K. Laser warning system as an element of optoelectronic battlefield surveillance // Radioelectronic systems conference. 2019. Vol. 11442.

10. Adel A., Ahmed M., Mabrouk M., Hamed H.F. Design and implementation of a promising optical subsystem with a sky camera for laser warning systems. 2021. 46288.1060.

11. Kumar S., Maini A.K., Patil V.B., Sharma R.B. Laser warning sensor assisted countermeasure system // Proceedings of the first international conference on electronic warfare. EWCI-2010. Pp. 315–318.

12. Stone W.C., Juberts M., Dagalakakis N., Stone J., Gorman J. Performance analysis of next-generation LADAR for manufacturing, construction, and mobility // National institute of standards and technology publication. NISTIR 7117. 2004.

13. Krause B., Gatt P., Embry C., Buck J. High-resolution 3D-coherent laser radar imaging // Laser radar technology and applications XI. Proc. Of SPIE. 2006. Vol. 6214.

14. Kamerman G.W. Chapter 1. Laser Radar. 1993. Vol. 6

15. Smith D.R. Variational methods in optimization. Dover Publications. Mineola. New York 1998.