

УДК 621.391

Adaptive Management of the Moment of Radiation of Laser Energy at Suppression Optical-Electrical Means

Alexandr N. Glushkov,

Juriy L. Koziratsky and Ruslan E. Merkulov*

Military Education and Research Centre of Military-Air Forces

«Military-Air Academy

Named After Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»

54a Starykh Bolshevikov Str., Voronezh, 394064, Russia

Received 03.08.2016, received in revised form 10.02.2017, accepted 01.02.2018

The algorithm of management is developed by the moment of radiation of laser hindrances at suppression optical-electrical means of looking type. Decision-making on "shot" is made with use of criterion of Neumann-Pirson's on the basis of the forecast of size of capacity of a laser hindrance for entrance pupil optical-electrical means and probability of excess by it of a threshold of suppression optical-electrical means for the period of not less set.

Keywords: laser hindrances, functional defeat, probability of acceptance of the correct decision on a shot, probability of acceptance of the erroneous decision on a shot.

Citation: Glushkov A.N., Koziratsky Ju.L., Merkulov R.E. Adaptive management of the moment of radiation of laser energy at suppression optical-electrical means, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2019, 12(1), 81-87. DOI: 10.17516/1999-494X-0031.

© Siberian Federal University. All rights reserved

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

* Corresponding author E-mail address: rus_212@mail.ru, urleo@bk.ru

Адаптивное управление моментом излучения лазерной энергии при подавлении оптико-электронных средств

А.Н. Глушков, Ю.Л. Козирацкий, Р.Е. Меркулов
*Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
Россия, 394064, Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а*

Разработан алгоритм управления моментом излучения лазерных помех при подавлении оптико-электронных средств смотрящего типа. Принятие решения на «выстрел» производится с использованием критерия Неймана-Пирсона на основе прогноза величины мощности лазерной помехи на входном зрачке ОЭС и вероятности превышения ею порога подавления оптико-электронных средств на время не менее заданного.

Ключевые слова: лазерные помехи, функциональное поражение, вероятность принятия правильного решения на выстрел, вероятность принятия ошибочного решения на выстрел.

Введение

При подавлении оптико-электронных средств (ОЭС) энергией лазерных помех остро стоит вопрос управления моментом их излучения. Это связано с необходимостью рационального расходования энергетического ресурса (боезапаса) лазерного комплекса. В настоящее время разработано достаточно большое количество способов управления моментом излучения лазерной энергии исходя из ослабления ее в атмосфере [1]. Данные способы позволяют прогнозировать статистические характеристики лазерного пучка в картинной плоскости цели. Вместе с тем они не позволяют прогнозировать вероятность подавления ОЭС в момент воздействия, что определяет высокую вероятность принятия ошибочных решений.

Цель работы состоит в разработке адаптивного алгоритма управления моментом излучения энергии лазерных помех при подавлении ОЭС исходя из обеспечения допустимого уровня ошибочных решений при производстве «выстрела».

Постановка задачи

Для формализации решаемой задачи и последующего получения решающего правила будем считать, что лазерный комплекс функционального подавления ОЭС включает в себя локационный канал (ЛК), помеховый канал (ПК) и подсистему управления (ПСУ). ЛК предназначен для поиска и обнаружения ОЭС, а также формирования целеуказания для наведения помехового излучения. В ПК формируется помеховое излучение с требуемыми характеристиками. В ПСУ реализуются алгоритмы управления работой комплекса. Далее представим условие подавления лазерной энергией ОЭС [2] в виде

$$E_{\text{пор}}^{-1} \int_{S_{\text{ок}}} d^2 \rho \int_{T_a} I(\vec{\rho}, t) dt \approx \eta_{\text{пор}} T_D^{-1} \tau_+ \geq 1, \quad (1)$$

где $S_{\text{оэс}}$ – площадь приемной апертуры ОЭС; T_D – требуемая длительность воздействия на ОЭС

лазерной энергией $E \geq E_{\text{пор}}$; $\eta_{\text{пор}} = \frac{P_{\text{оэс}}}{P_{\text{пор}}}$; $P_{\text{пор}} = \frac{E_{\text{пор}}}{T_D}$; $P_{\text{оэс}}, I(\vec{\rho}, t)$ мощность лазерных помех и рас-

пределение их интенсивности на входном зрачке ОЭС в момент воздействия; τ_+ – длительность превышения мощности $P_{\text{оэс}}$ величины $P_{\text{пор}}$; $E, E_{\text{оэс}}$ – энергия лазерной помехи, принятая ОЭС, и значение лазерной энергии, при котором произойдет поражение (подавление) ОЭС. Из (1) видно, что для принятия решения об излучении лазерных помех на ОЭС необходима информация о значениях $P_{\text{оэс}}$ и τ_+ . Данная информация может быть получена по результатам зондирования ОЭС локационным каналом комплекса.

Решение

В соответствии с [3] среднее значение принимаемого ЛК светового потока P_{n0} с точностью до постоянного множителя совпадает со средним потоком зондирующего излучения ЛК, принятым ОЭС $\bar{P}_{\text{лоэс}}$:

$$\bar{P}_{n0} = \bar{P}_{\text{лоэс}} T_a \vartheta_0 \cdot \frac{S_n}{L^2}, \quad (2)$$

где T_a, ϑ_0 – коэффициенты, характеризующие прозрачность атмосферы и световозвращение ОЭС соответственно; S_n – площадь приемной апертуры ЛК; L – дальность до ОЭС. Выражение (2) позволяет по измеренным значениям мощности отраженного от ОЭС сигнала ЛК прогнозировать мощность излучения лазерных помех на входном зрачке ОЭС.

$$\bar{P}_{\text{оэс}} = \frac{\bar{P}_{n0} L^2}{S_n T_a \vartheta_0} \cdot \frac{I_n Y_n^2}{I_l Y_l^2}, \quad (3)$$

где I, Y – плотность мощности на оси пучка и расходимость излучения лазера (индекс l – соответствует локационному, а индекс n – помеховому каналам). В соответствии с (1) решение на излучение лазерных помех должно быть принято на основе анализа величины отражённого ОЭС потока зондирующего пучка локационного канала при выполнении условия

$$\eta_{\text{пор}} \tau_+ \geq T_D = \frac{2L}{c} + \tau_0 + \tau_B, \quad (4)$$

где c – скорость света; τ_0, τ_B – время обработки принимаемого локационного сигнала и длительность воздействия на ОЭС излучением помех соответственно. В силу случайного характера принимаемого ЛК отраженного сигнала упомянутое решение может быть принято при двух взаимно исключающих условиях:

условие A_1 – энергия излучения помех на ОЭС будет не ниже порогового уровня;

условие A_0 – энергия излучения помех на ОЭС будет ниже порогового уровня.

Данным условиям могут соответствовать два вида решений:

решение A_1^* – «выстрел» (излучение энергии помех);

решение A_0^* – «не выстрел».

Третьего решения («не знаю») быть не должно. Качественными показателями данных решений являются следующие условные вероятности: $P_{нв} = P(A_1^* | A_1)$ – вероятность правильного «выстрела»; $P_{лв} = P(A_1^* | A_0)$ – вероятность ложного «выстрела»; $P_{нр} = P(A_0^* | A_1)$ – вероятность пропуска ОЭС; $P_{лр} = P(A_0^* | A_0)$ – вероятность правильного не выстрела, $P_{нв} + P_{нр} = 1$; $P_{лв} + P_{лр} = 1$. Вероятности $P_{лв}$ и $P_{нр}$ характеризуют возможность принятия ПСУ комплекса ошибочных решений, которые наказываются платой $r_{лв}$ и $r_{нр}$ соответственно. В пределах зоны функционального поражения комплекса (область пространства, в пределах которой обеспечивается выполнение условия $P_{оэс} \geq P_{нор}$) должны обеспечиваться требования: $P_{лв} \leq P_{лв}^{дон}$ и $P_{нр} \leq P_{нр}^{дон}$ ($P_{лв}^{дон}$, $P_{нр}^{дон}$ – допустимые значения вероятностей принятия ошибочных решений). По аналогии с [4] при принятии решения на излучение помех необходимо минимизировать плату за ошибки, которая может быть охарактеризована средним риском, вычисляемым по формуле [4] $\bar{r} = r_{лв} P_{лв} P(A_0) + r_{нр} P_{нр} P(A_1)$. При равенстве $r_{лв} = r_{нр}$ она принимает вид $\bar{r} = r_{нр} P(A_1) [P_{нр} + l_0 P_{лв}]$. Учитывая, что величина $r_{нр} P(A_1) \geq 0$, решающее правило по определению момента излучения лазерной энергии должно обеспечить минимизацию множителя $[P_{нр} + l_0 P_{лв}] = \min$, в котором $l_0 = P(A_0) / P(A_1)$. Такой подход соответствует критерию «идеального наблюдателя» [4], который целесообразно использовать при сравнении лазерных комплексов, а также при их оптимизации. В процессе боевого функционирования лазерных средств для принятия решения на выстрел более удобным является критерий Неймана – Пирсона [4], который позволяет обеспечить допустимые вероятности ложного «выстрела» и пропуска ОЭС $P_{нв} \geq P_{нв}^{мп}$ и $P_{лв} < P_{лв}^{дон}$. В качестве оценок вероятностей правильных и ошибочных решений на излучение лазерных помех примем следующие вероятности:

$$\begin{aligned} \hat{P}_{нв} &= P(P_{оэс} \geq P_{нор}) P(\tau_+ \geq T_D); \\ \hat{P}_{лв} &= P(P_{оэс} \geq P_{нор}) P(\tau_+ < T_D); \\ \hat{P}_{нр} &= (1 - P(P_{оэс} \geq P_{нор})) P(\tau_+ \geq T_D); \\ \hat{P}_{лр} &= (1 - P(P_{оэс} \geq P_{нор})) P(\tau_+ < T_D), \end{aligned} \quad (5)$$

где $P(\dots)$ – вероятность выполнения соответствующего условия. Из (5) следует, что для определения момента излучения лазерных помех необходимо получение числовых значений вероятностей $P(P_{оэс} \geq P_{нор})$, $P(\tau_+ \geq T_D)$ и $P(\tau_+ < T_D)$. Решение на «выстрел» может быть принято на основе оценок значений $\hat{P}_{нв}$ и $\hat{P}_{лв}$ при выполнении условий:

$$\hat{P}_{нв} \geq P_{нв}^{мп} \text{ и } \hat{P}_{лв} < P_{лв}^{дон}. \quad (6)$$

В выражении (6) $P_{нв}^{мп}$ и $P_{лв}^{дон}$ – заданная вероятность правильного выстрела и допустимая вероятность ложного выстрела соответственно. Для нахождения оценок $\hat{P}_{нв}$ и $\hat{P}_{лв}$ будем исходить из следующего. Принимаемый ОЭС поток лазерного излучения определяется суммой квадратов напряженностей поля помех в области пространства, которое опирается на плоскость ограниченную апертурой ОЭС. При нормальном законе распределения флуктуаций напряженности поля закон распределения флуктуаций светового потока определяется χ^2 распределением с n степенями свободы [5] (в рассматриваемом случае n количество аддитивных компонент квадратов напряженности поля, определяющих величину светового потока). При $n \rightarrow \infty$ данное распределение аппроксимируется законом Гаусса и мы можем записать сле-

дующее выражение для оценки вероятности выполнения условия превышения мощности $P_{осц}$ величины $P_{нор}$:

$$\hat{P}(P_{осц} \geq P_{нор}) = \Phi(\eta_{нор}) = \frac{\sigma_p^{-1}}{\sqrt{2\pi}} \int_{\eta_{нор}}^{\infty} e^{-\frac{\bar{P}_{осц}^2(1-\eta)^2}{2\sigma_p^2}} d\eta. \quad (7)$$

В нем $\bar{P}_{осц} = \langle P_{но} \rangle \frac{L^2}{S_n T_a g_0} \cdot \frac{I_n}{I_l} \cdot \frac{Y_n^2}{Y_l^2}$; σ_p^2 – оценка дисперсии флуктуаций мощности излу-

чения лазерных помех на входном зрачке ОЭС.

$$\sigma_p^2 \approx \sigma_l^2 - \sigma_{ло}^2 + \sigma_{ро}^2, \quad (8)$$

где σ_l^2 ; $\sigma_{ло}^2$ – дисперсия флуктуаций мощности отраженного и зондирующего сигнала; $\sigma_{ро}^2$ – дисперсия флуктуаций мощности излучения помехового лазера.

Для оценки значений $P(\tau_+ \geq T_D)$ и $P(\tau_+ < T_D)$ воспользуемся результатами исследований законов распределения интервалов пересечений параметром Штреля порогового уровня [6]. Опираясь на данные исследования, выделим три случая: 1) $\bar{P}_{осц} \gg P_{нор}$; 2) $\bar{P}_{осц} \sim P_{нор}$; 3) $\bar{P}_{осц} \ll P_{нор}$. При существенном превышении $\bar{P}_{осц}$ порога подавления $P_{нор}$ вероятность принятия правильного решения на «выстрел», а также вероятность «ложного выстрела» могут быть оценены по следующим формулам:

$$\hat{P}_{не} = P(P_{осц} \geq P_{нор}) \exp(-T_D / \bar{\tau}_+), \quad (9)$$

$$\hat{P}_{ле} = P(P_{осц} \geq P_{нор}) (1 - \exp(-T_D / \bar{\tau}_+)), \quad (10)$$

которые показывают, что оценивание $\hat{P}_{не}$ и $\hat{P}_{ле}$ требует сведений о значении $\bar{\tau}_+$. Эти сведения могут быть получены исходя из теории выбросов случайных процессов [4]. По аналогии с [6, 7] выражения для $P(P_{осц} \geq P_{нор})$ и величины $\bar{\tau}_+$ имеют следующий вид:

$$\bar{\tau}_+ = \frac{2\pi}{\sqrt{-R_0''}} \Phi(\eta_{нор}) e^{\gamma^2/2}; \quad \gamma = \frac{\bar{P}_{осц}(1-\eta_{нор})}{\sigma_p}; \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P}{\bar{P}_{осц}}; \quad R_0'' = \frac{d^2 R(\tau)}{d\tau^2} \Big|_{\tau=0}; \quad R(\tau) = R(t_1, t_2).$$

Во втором ($\bar{P}_{осц} \sim P_{нор}$) и третьем ($\bar{P}_{осц} \ll P_{нор}$) случаях законы распределения интервалов превышений световым потоком порогового уровня подчиняются логарифмически нормальному закону распределения и обобщенному закону Релея [6], которые при $\sigma_p / \bar{P}_{осц} \ll 1$ аппроксимируются нормальным распределением. На основании этого вероятность $P(\tau_+ \geq T_D)$ определяется выражением

$$P(\tau_+ \geq T_D) = 1 - F\left(\frac{T_D - \bar{\tau}_+}{\sigma_+}\right), \quad F(T_D) = \frac{1}{\sigma_+ \sqrt{2\pi}} \int_0^{T_D} e^{-t^2/2} dt; \quad t = \frac{T_D - \bar{\tau}_+}{\sigma_+}, \quad (12)$$

где σ_+^2 – дисперсия интервалов превышения мощности $P_{осц}$ величины $P_{нор}$. При получении оце-

нок по формуле (12) принимается, что при $\sigma_p / \bar{P}_{осц} \ll 1$ отношение $\frac{\sigma_+}{\bar{\tau}_+} \approx \frac{\sigma_p}{\bar{P}_{осц}}$.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволяют сформулировать такой алгоритм определения момента излучения энергии лазерных помех. ОЭС облучается зондирующим сигналом ЛК лазерного комплекса. По отраженному сигналу делается прогноз параметров помехового излучения в плоскости ОЭС: $\bar{P}_{оэс}$, σ_p^2 , $P(P_{оэс} \geq P_{пор})$ и $\bar{\tau}_+$. Сравниваются значения $\bar{P}_{оэс}$ и $P_{пор}$. Оценивается вероятность превышения принимаемой ОЭС мощности помех порогового значения по формуле $P(\tau_+ \geq T_D) = \exp(-T_D / \bar{\tau}_+)$ при $P_{оэс} \gg P_{пор}$ или по формуле (12) в противном случае. По формулам (9) и (10) оцениваются вероятности принятия правильного и ошибочного решений на выстрел, который производится при выполнении условий (6).

Использование данного алгоритма позволит излучать лазерные помехи только при гарантии подавления ОЭС с заданной вероятностью и, как следствие, рационально расходовать энергетический ресурс лазерного комплекса.

Список литературы

- [1] Лукин В.П. *Атмосферная адаптивная оптика*. Новосибирск, 1986. 172 с.[Lukin V.P. *Atmospheric adaptive optics*. Novosibirsk, 1986. 172 с.].
- [2] Глушков А.Н., Козирацкий Ю.Л. Синтез лазерных помех координатно-метрическим оптико-электронным системам. *Радиотехника*, 2011, 8, 34-38.[Glushkov A.N., Koziratsky JU.L. Synthes of laser hindrances to koordinato-metric optiko-electronic systems, *Radio engineering*, 2011, 8, 34-38].
- [3] Глушков А.Н., Кравцов Р.Н., Митрофанов А.Л. Модель локационного наблюдения ОЭС. *Информационно-измерительные и управляющие системы*, 2006, 7, [Glushkov A.N., Kravtsov R. N, Mitrofanov A.L. Model lokacionnogo supervision OEC. *Information-measuring and operating systems*, 2006, 7].
- [4] Ширман Я.Д., Голиков В.И. *Основы теории обнаружения радиолокационных сигналов и измерения их параметров*. М.: Сов. радио, 1963, 278 с.[Shirman J.D., Golikov V.I. *Bases of the theory of detection of radar-tracking signals and measurement of their parametres*. М.: Owls. Radio, 1963, 278 с.].
- [5] Тихонов В.И. *Нелинейные преобразования случайных процессов*. М.: Радио и связь, 1986. 18.[Tikhonov V. I. *Nonlinear transformations of casual processes*. М.: Radio and communication, 1986. 185.].
- [6] Глушков А.Н., Стрельцова Л.В. Статистические характеристики флуктуаций параметра Штреля относительно порогового уровня. *Оптика атмосферы и океана*. 1992, 2. [Glushkov A.N., Streltsova L.V. Statistical characteristics of fluctuations of parametre of Shtrelja concerning threshold level. *Atmosphere and ocean Optics*. 1992, 2].
- [7] Глушков А.Н., Стрельцова Л.В. Начальные моменты выбросов параметра Штреля при адаптивной коррекции светового пучка. *Оптический журнал*, 1992, 3, 10-13 [Glushkov A.N., Streltsova L.V. Initial the moments of emissions of parametre of Shtrelja at adaptive correction of a light bunch. *Optical magazine*, 1992, 3, 10-13].
- [8] Козирацкий Ю.Л. и др. *Модели информационного конфликта средств поиска и обнаружения*. М.: Радиотехника, 2013, 232. [Koziratsky J.L, etc. *Models of the information conflict of means of search and detection*. М.: Radio engineering, 2013. 232 с.].

[9] Козирацкий Ю.Л. и др. Модели пространственного и частотного поиска. М.: Радиотехника, 2014, 342 .[Koziratsky J.L, etc. Models of spatial and frequency search. M: Radio engineering, 2014, 342 .].

[10]Козирацкий Ю.Л. Оптимизация угла расходимости излучения лазерной локационной системы в условиях помехи. *Радиотехника*, 1994, 3, 13-19