

MANAGEMENT OF MULTISTAGE MANUFACTURING BASED ON EVIDENCE THEORY AND METHODS OF INTERVAL ANALYSIS

B.V. PALYUKH, Dr. Sc., A.N. VETROV, Cand. Sc.

Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: pboris@mail.ru

The article is devoted to the analysis of the main scientific directions related to the activities of the full member of the USSR Academy of Sciences E.V. Zolotov during his work at the Kalinin Polytechnic Institute. The issues of guaranteed accounting of errors and noise distortions, measured and calculated technological variables are considered by applying the approach developed by E.V. Zolotov, based on the concept of variable zones proposed by him. This approach is currently implemented in the theory of artificial intelligence based on the mathematical apparatus of soft measurements and calculations. The principles of evolutionary management of multistage continuous production are substantiated on the basis of the Dempster – Schafer evidence theory and interval analysis methods. The combination of these approaches makes it possible to create a more efficient system of evolutionary control of multistage continuous production compared to traditional methods and reduce sensitivity to noise interference and delays in dynamic channels between the input and output of a continuous technological process. The proposed approaches are illustrated by setting specific tasks with solutions of control examples.

Keywords: evolution management, interval analysis, Dempster – Schaefer evidence theory.

Поступила в редакцию/received: 07.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.942

ОЦЕНКА ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ЛАЗЕРНЫХ ДАЛЬНОМЕРОВ В СОСТАВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ЛОКАЦИИ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Р.А. ЕГУЖОКОВ¹, И.М. ХМАРОВ¹, канд. техн. наук,
Л.Ф. ШЕВЧЕНКО¹, канд. техн. наук, В.В. МЕШКОВ², д-р техн. наук,
Г.Н. МАРКУШИН³

¹ЦНИИ ВКС Минобороны России,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32, e-mail: vse_ki@mail.ru

²Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: common@tstu.tver.ru

³АО «Производственное объединение “Уральский оптико-механический завод”
им. Э.С. Яламова», 620100, Екатеринбург, ул. Восточная, 33Б, e-mail: geo@uomz.com

© Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф.,
Мешков В.В., Маркушин Г.Н., 2022

Рассмотрены вопросы проведения испытаний лазерных дальномеров на открытых трассах при локации воздушных объектов в ближнем и коротковолновом инфракрасных диапазонах длин волн. Разработан и апробирован метод, при помощи

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 4 (16), 2022*

которого реализуются процессы измерений и калибровки сигналов с использованием аэроэталонов. Данный метод базируется на определении эффективной площади рассеяния воздушных объектов, расчете коэффициентов пропускания локационных оптических трасс, экспериментальных измерениях максимальных дальностей сопровождения аэроэталонов лазерными дальномерами, установлении ракурсов объектов по их двумерным изображениям, расчете дальностей действия дальномеров при локации типовых воздушных объектов. Представлены результаты испытаний двух оптико-электронных систем с лазерными дальномерами. Проведена оценка дальностей действия лазерных дальномеров в соответствии с заданными требованиями.

Ключевые слова: лазерный дальномер, эффективная площадь рассеяния, воздушный объект, натурные измерения, испытания, дальность действия, аэроэталон, многоканальная оптико-электронная система.

DOI: 10.46573/2658-5030-2022-4-107-117

ВВЕДЕНИЕ

Оценка дальности действия (ДД) лазерных дальномеров (ЛД) (при их испытаниях на открытых трассах) до эталонных, типовых и зачетных воздушных объектов имеет большое значение для расчета показателей качества и эффективности как ЛД, так и оптико-электронных систем (ОЭС) в целом [1–5]. При этом подобные испытания являются основой для верификации имитационных математических моделей (ИММ), функционирования многоканальных ОЭС [3, 4, 6–8]. Однако при проведении натурных исследований на открытых трассах всегда существуют сложности, связанные с калибровкой (эталонированием) отраженных сигналов, а также снижением систематических и случайных погрешностей оценки характеристик прозрачности атмосферы [3, 6, 9, 10]. Таким образом, задачи, связанные с повышением достоверности получаемых показателей качества ЛД, являются актуальными [1–3, 6].

Цели данной статьи: разработка методического обеспечения и проведение испытаний двух типов ЛД в составе двух вариантов ОЭС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являются ЛД в составе наземных ОЭС, предназначенных для локации воздушных объектов (ВО) [1, 3, 6, 11].

Оценка ДД (дальности обнаружения, захвата на сопровождение) ВО с помощью ЛД базируется на методе проведения натурных экспериментов по полученной информации от эталонов.

Данный метод включает этапы:

1. Определение эффективной площади рассеяния (ЭПР) аэроэталонов (АЭ) и типовых ВО.
2. Проведение натурных измерений (с заданными параметрами обнаружения) максимальных ДД ЛД до АЭ.
3. Определение (коррекция, если возникает необходимость) высотной зависимости коэффициента ослабления лазерного излучения α (Z) при существующих во время испытаний ЛД фоновых и метеоусловиях (ФМУ).
4. Оценка ДД (максимальных ДД) ЛД до типовых ВО при существующих и заданных ФМУ.

Перейдем к описанию этапов метода.

Определение ЭПР АЭ и типовых ВО

При определении ЭПР ВО могут использоваться:

экспериментально-теоретический метод определения (синтеза) лазерно-локационных характеристик летательных аппаратов (ЛА) в реальных условиях их применения [6, 7, 12, 13];

полунатурные измерения лазерно-локационных характеристик объектов (их физических моделей) в безэховом павильоне [6, 10, 12];

полунатурные и натурные измерения лазерно-локационных характеристик ЛА (их мишеней-аналогов) на открытых трассах [6, 10, 12, 14].

Измерение максимальных ДД ЛД до АЭ

Одной из важнейших задач организации тестирования и натурных испытаний ЛД на открытой приземной трассе является устранение систематических погрешностей, связанных с затуханием лазерного излучения вдоль наклонных атмосферных локационных трасс.

Принципиальная возможность существенной компенсации таких погрешностей и получения требуемой точности измерения характеристик отражения объектов в натуральных условиях достигается при дополнительной калибровке по аэроэталонным отражателям [3, 7, 8].

В данном случае АЭ – это сфера с монотонным диффузным покрытием, ЭПР которой с любого ракурса можно выразить формулой

$$\sigma_A = \rho_{\text{э}} \cdot \frac{8}{3} \cdot \pi R^2, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{э}}$ – коэффициент отражения покрытия; R – радиус сферы (шара).

Сам АЭ может быть выполнен в двух вариантах:

- 1) в виде объекта, способного подниматься вверх в воздушной среде под действием силы Архимеда;
- 2) в виде объекта, доставляемого на заданную высоту (миниэропланом, авиационным средством, выстрелом и т.д.), после чего совершающего свободное падение.

Ключевыми действиями разработанного метода являются (рис. 1) запуск АЭ с известными значениями ЭПР; сопровождение АЭ пассивными каналами ОЭС (в автоматическом или ручном режимах); измерение максимальной дальности обнаружения L_A^{max} АЭ ЛД при реализации заданных вероятностей правильного обнаружения P_D и ложной тревоги P_F [3, 8].

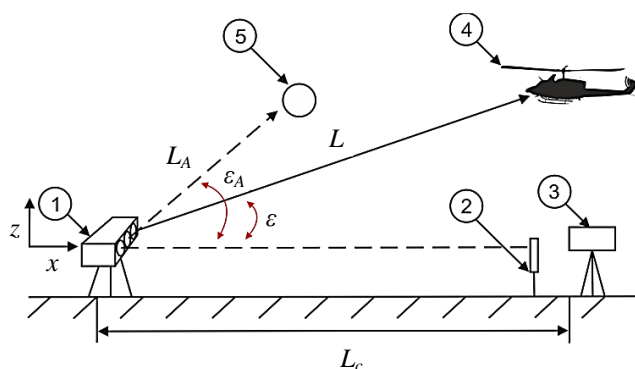


Рис. 1. Схема измерения: 1 – ОЭС; 2 – эталонный отражатель; 3 – эталонный излучатель; 4 – ВО; 5 – АЭ (сфера)

Для фиксации вероятности ложной тревоги P_F необходимо выставить в приемном канале ЛД пороговый уровень, соответствующий одному ложному срабатыванию (при открытой апертуре ЛД) на каждые $1/P_F$ импульсов лазерного передатчика [7].

На практике уровень вероятности правильного обнаружения P_D реализуется, когда цель обнаруживается $(N - 1)$ импульсами и не обнаруживается одним из каждых N импульсов ЛД, где $N = 1/1 - P_D$ (так, например, уровень $P_D = 0,95$ реализуется, когда цель обнаруживается девятнадцатью и не обнаруживается одним из каждых двадцати импульсов ЛД, и т.д.).

Одновременно на приземной трассе с помощью эталонных излучателей и отражателей могут калиброваться пассивные каналы ОЭС (см. рис. 1). Таким образом, при работе, например, с двумя АЭ (но с разными ЭПР) определяются значения их максимальных дальностей обнаружения L_{A1}^{\max} и L_{A2}^{\max} . При этом вычисляются соответствующие координаты АЭ: высоты Z_{A1}^{\max} , Z_{A2}^{\max} и углы места ε_{A1} , ε_{A2} .

Определение высотной зависимости коэффициента ослабления лазерного излучения

Коэффициент пропускания узкополосного лазерного излучения атмосферой вдоль наклонной трассы можно рассчитать по формуле [3]

$$T = \exp \left[- \int_0^H \frac{\alpha_\lambda(z) dz}{\cos(\frac{\pi}{2} - \varepsilon)} \right], \quad (2)$$

где $\alpha_\lambda(Z)$ – высотный ход коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения с длиной волны λ ; d – диаметр приемной апертуры; ε – угол места летящего на высоте Z лоцируемого объекта в системе координат, связанной с наземным ЛД (в сумме с зенитным углом он составляет $\pi/2$). Здесь используется базисная прямоугольная пространственная система координат.

Одним из ключевых параметров, определяющих пропускание приземного атмосферного слоя, является метеорологическая дальность видимости (МДВ) [3, 4, 6]. Она измеряется аппаратурой, которой снабжается ОЭС при испытаниях и калибровке.

Еще одним существенным фактором, влияющим на работу ЛД (особенно в дневных условиях), выступают фоновые помехи. Уровень фоновой помехи от небосвода (или подстилающей поверхности) рассчитывается из соотношения

$$P_B = \frac{B \cdot \Delta\lambda \cdot \tau_F \cdot \pi^2 \cdot \theta_r^2 \cdot d^2}{16}, \quad (3)$$

где B – спектральная яркость фона [3, 4]; $\Delta\lambda$ – ширина полосы пропускания узкополосного фильтра в районе λ_1 ; τ_F – коэффициент пропускания узкополосного фильтра на входе ФПУ; θ_r – поле зрения приемного канала; d – диаметр приемной апертуры.

Высотный ход коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения $\alpha_\lambda(Z)$ с длиной волны λ во время испытаний ЛД на открытой трассе может быть рассчитан с помощью известных моделей атмосферы MODTRAN, HITRAN и др. [3, 4, 6, 7]. При этом используются текущие данные от аппаратуры метеопоста: температура окружающего воздуха, давление, относительная влажность воздуха и МДВ.

Используем для дальнейшего анализа понятие потенциала ЛД, который определяется по соотношению

$$\Pi = \frac{P_t \cdot T_{opt} \cdot d^2}{4\pi\theta_t^2}, \quad (4)$$

где P_t – выходная мощность излучения ЛД; T_{opt} – коэффициент пропускания приемно-перетекающего тракта; d – диаметр приемной апертуры; θ_t – расходимость лазерного излучения.

Тогда мощность принимаемого полезного сигнала, отраженного от объекта, летящего на высоте Z , можно вычислить по формуле [3, 11]

$$P = \frac{\sigma \cdot T^2 \cdot \sin^4(\varepsilon)}{Z^4} \Pi. \quad (5)$$

Если P_B – фоновая помеха, то можно записать

$$P = P_r - P_B,$$

где P_r – суммарная принимаемая мощность оптического излучения.

Далее заметим, что если для двух АЭ отношения сигнал/шум равны и уровни ложных тревог P_F при их локации идентичны, то, опираясь на инвариантность ЭПР АЭ относительно их ракурса, а также на формулы (4) и (5), можно записать

$$\frac{T_{A1}}{T_{A2}} = \sqrt{\frac{\sigma_{A2}}{\sigma_{A1}}} \cdot \left[\frac{Z_{A1}^{\max} \cdot \sin(\varepsilon_{A2})}{Z_{A2}^{\max} \cdot \sin(\varepsilon_{A1})} \right]^2, \quad (6)$$

где T_{A1} , T_{A2} – коэффициенты пропускания локационных трасс при обнаружении АЭ; σ_{A1} , σ_{A2} – ЭПР АЭ (индексы 1 и 2 относятся к первому и второму АЭ соответственно); Z_{A1}^{\max} , Z_{A2}^{\max} – высоты лоцируемых объектов; ε_{A1} , ε_{A2} – углы места лоцируемых объектов.

Таким образом, применение группы АЭ дает возможность оперативной (в случае необходимости) *коррекции* расчетных значений высотного хода коэффициента ослабления атмосферой лазерного излучения $\alpha_\lambda(Z)$ на трассе, где проводятся испытания ЛД.

Оценка ДД ЛД до типовых ВО при существующих и заданных ФМУ

При априорном знании характеристик ЭПР типовых ВО в полете необходимо вычислить текущую угловую ориентацию ЛА. В статье [15] представлены численные методы определения пространственного положения ЛА по его плоскому оптическому изображению (метод опорных точек и метод внешних контуров). В задачу определения пространственного положения ЛА по его 2D-изображению входит получение трех линейных (X , Y , Z) координат геометрического центра и трех угловых (ψ , ϑ , γ) координат ориентации в заданной системе отсчета. При этом сравниваются реальное и моделируемое оптические изображения ЛА [15]. На рис. 2 и 3 с помощью специального программного обеспечения для обработки файла с измерительной информацией из каналов сопровождения ЛА показано определение угловой ориентации самолета и вертолета.

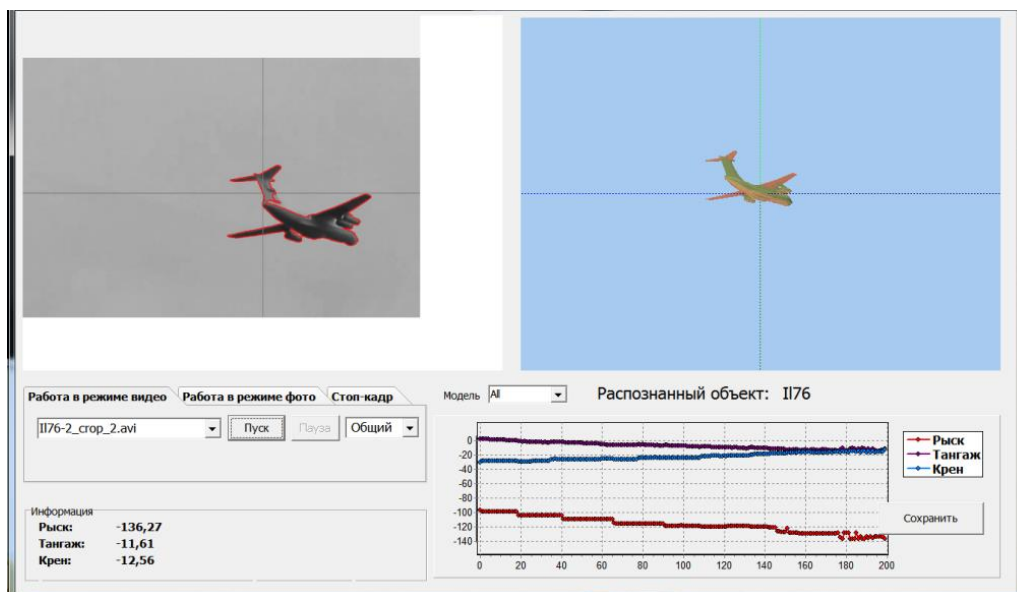


Рис. 2. Самолет (мгновенные значения углов ориентации: курс (рыскание) $-136,27^\circ$; тангаж $-11,61^\circ$; крен $-12,56^\circ$)

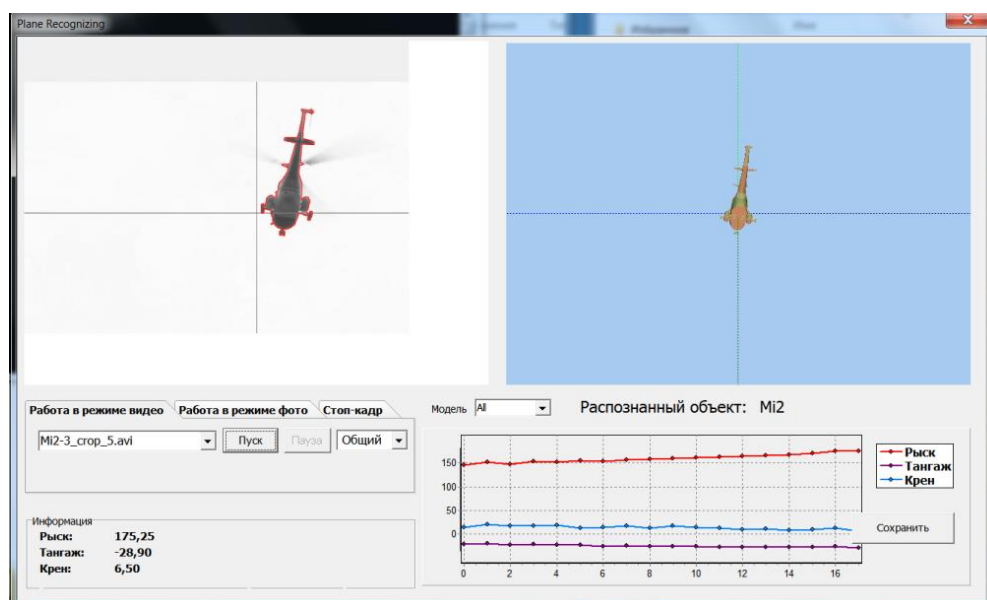


Рис. 3. Вертолет (мгновенные значения углов ориентации: курс (рыскание) $175,25^\circ$; тангаж $-28,90^\circ$; крен $6,50^\circ$)

Таким образом, на основании данных об угловых зависимостях ЭПР типовых ВО и определении углов их ориентации вычисляется текущее значение ЭПР ВО (σ). При этом максимальная дальность обнаружения L типового ВО удовлетворяет соотношению [3, 11]

$$L = L_A \left(\frac{\sigma}{\sigma_A} \right)^{1/4} \cdot \left(\frac{T}{T_A} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где σ – ЭПР ВО; L_A – дальность обнаружения АЭ с заданными вероятностями правильного обнаружения P_d и ложной тревоги P_F ; T_A – коэффициент пропуска локаторной трассы при сопровождении АЭ.

Соотношение (7) используется при равенстве отношений сигнал/шум и уровней ложных тревог P_F , полученных для ВО и АЭ при их обнаружении с помощью ЛД.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о том, что при получении с помощью наземной ОЭС с ЛД текущей координатной и сигнальной информации о цели и АЭ $[x(t), y(t), z(t), x_A(t), y_A(t), z_A(t)]$ выражение (7) обеспечивает расчет максимальной дальности обнаружения типовой воздушной цели.

Более *точно и корректно* оценивание максимальных ДД ЛД до типовых объектов при существующих и заданных ФМУ проводится с помощью аналитических моделей лазерных полей и верифицированных ИММ функционирования ОЭС [3, 6, 7].

Таким образом, в данном разделе статьи были описаны обеспечение и метод оценивания информационных показателей качества ЛД в составе ОЭС при их наземных испытаниях и калибровке.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим проведение натуральных экспериментов и результаты испытаний двух типов ЛД (ЛД1, ЛД2) в составе двух вариантов ОЭС (ОЭС1, ОЭС2).

1. *Объект испытаний – ЛД (ЛД1) ближнего инфракрасного (ИК) диапазона в составе многоканальной ОЭС, включающей ультрафиолетовый, телевизионный (ТВ), а также коротковолновый, средневолновый и длинноволновый ИК-каналы обнаружения и сопровождения ВО.*

Проверка выполнения требований к ЛД1 включает:

- оценку ДД ЛД1 (при МДВ = 20 км) по диффузному объекту с ЭПР = 5 м²;
- оценку ДД ЛД1 (при МДВ = 20 км) по уголкового отражателю с ЭПР = 750 м²;
- контрольное измерение дальности (при МДВ = 10...20 км) до ВО с ЭПР > 5 м².

Проверка выполнения требований к ДД ЛД1 производилась по методу, представленному выше.

Результаты натурального эксперимента.

Метеоусловия: температура $t = 6^\circ\text{C}$; относительная влажность $H = 70\%$; давление $P = 745$ мм рт. ст.; МДВ = 5 км. Сопровождение АЭ осуществлялось до 4,2 км. Угол места был равен 8° . Диаметр АЭ = 0,45 м. Коэффициент отражения оболочки $\rho = 0,6$.

Результаты расчетов

Расчетное значение ЭПР АЭ (1) составляет 0,25 м². Расчетное значение прозрачности атмосферной трассы до АЭ (при проведении измерений) $T_A = 0,44$. Расчетная наклонная дальность L обнаружения типового ВО с ЭПР = 5 м² на высоте $Z = 10$ км с учетом вышеприведенных данных составляет $R = 20,4$ км.

Таким образом, установлен диапазон измеряемых дальностей:

- по диффузному объекту (с ЭПР = 5 м², при МДВ = 20 км) – 0,2...20,4 км;
- уголкового отражателю (с ЭПР = 750 м²) – 0,2...60 км.

В ходе испытаний были получены изображения ВО с ЭПР > 5 м² и с помощью ЛД1 и ОЭС1 измерены координаты (азимут, угол места, дальность) типовых ВО. Один из полученных результатов представлен на рис. 4.



Рис. 4. Сопровождение самолета Boeing 747
(азимут – $016^{\circ}29'29''$; угол места – $027^{\circ}31'55''$; наклонная дальность – 21 810 м)

2. *Объект испытаний* – ЛД (ЛД2) коротковолнового ИК-диапазона в составе многоканальной ОЭС2, включающей ТВ и средневолновый каналы обнаружения и сопровождения ВО.

Цель – оценка ДД ЛД по зачетным ВО различных классов.

Зачетные ВО: самолет гражданской авиации, вертолет.

Условия и порядок проведения испытаний

Проверка проводилась в европейской части России.

Типовые параметры атмосферы: влажность 45 %; давление 55 мм рт. ст.; температура $+10^{\circ}\text{C}$; МДВ = 15...20 км, безоблачно; скорость ветра до 3...4 м/с.

Запуск миниэростатов осуществлялся с расстояния 200 м по направлению ветра.

Было проведено измерение дальности до миниэростатов шарообразной формы (рис. 5) с известными значениями ЭПР в коротковолновом ИК-диапазоне. Захват миниэростата произошел на дальности 220 м. Миниэростат сопровождался в ручном режиме с измерением дальности по ЛД в технологическом режиме. Максимальная ДД ЛД по парящему миниэростату шарообразной формы на основной длине волны составила 4 585 м. При этом угол места данного ВО составил $8,6^{\circ}$.

Натурные измерения дальности сопровождения самолета гражданской авиации и вертолета проводились с использованием ЛД, ИК- и ТВ-каналов ОЭС2.



Рис. 5. Аэросталон (миниэростат шарообразной формы)

Результаты расчетов и экспериментов

В таблице приведены расчетные ДД ЛД2 (на основании результатов обработки измерений по АЭ) и дальности работы ЛД2, полученные экспериментально в результате сопровождения ВО. На рис. 6 показан полученный с помощью ОЭС2 кадр сопровождения самолета гражданской авиации.

Расчетные и экспериментальные ДД ЛД2

Воздушный объект	Расчетная максимальная ДД ЛД2, м	Экспериментально полученный диапазон дальностей ЛД2 при сопровождении ВО, м
АЭ	–	220–4 585
Вертолет	18 200	12 924–18 465
Самолет гражданской авиации	25 800	17 246–26 261

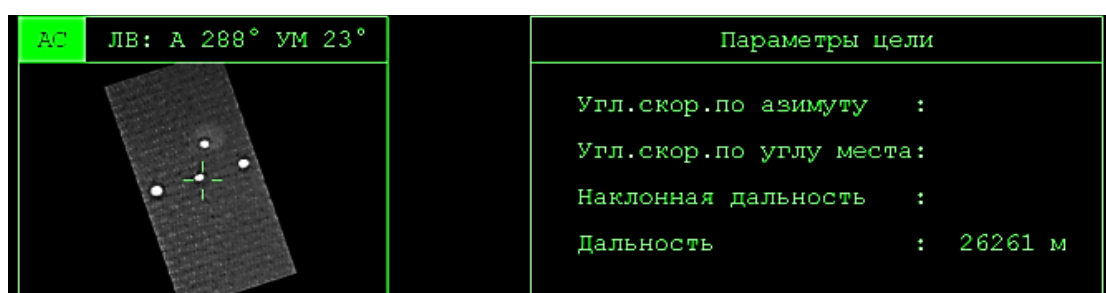


Рис. 6. Кадр сопровождения самолета ОЭС2 (текущая дальность – 26 261 м)

Таким образом, в результате испытаний ЛД1 и ЛД2 было установлено, что полученные результаты соответствуют требованиям к аппаратуре по определению дальности до зачетных ВО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования был разработан метод для испытаний ЛД в составе многоканальных ОЭС. Он основан на определении ЭПР ВО, расчете коэффициентов пропускания локационных оптических трасс, экспериментальных измерениях максимальных дальностей сопровождения АЭ ЛД, определении ракурсов объектов по их двумерным изображениям и расчете ДД дальномеров при локации типовых ВО.

Полученная в результате испытаний информация может быть использована при расчетах на математических моделях ДД ЛД по ВО различных классов, а также по отдельному ВО для различных вариантов его применения и метеоусловий.

Таким образом, технология использования АЭ при испытаниях ОЭС с ЛД оправдала себя. Она полностью обеспечила натурные испытания ЛД на открытых трассах и показала себя при комплексных испытаниях двух различных многоканальных ОЭС.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность нашим коллегам по цеху А.Н. Атапину, О.А. Ивлеву, А.С. Вишнякову, С.А. Искачеву, М.П. Ковальчуку, О.В. Малышеву, Н.А. Марову, А.С. Мирзояну, В.В. Полунадеждину, А.И. Смирнову и Р.А. Хааку за совместный труд и высокий профессиональный уровень работы на холодных, ветреных открытых трассах и в теплых помещениях за компьютерами. Отдельную

благодарность выражаем летчикам аэропорта «Змеево», находящегося в Тверской области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cheok G.S., Stone W.C., Lytle A. Standarts requirements for LADARs // *Laser Radar Technology and Applications X – SPIE*. 2005. V. 5791. P. 250–261.
2. Al-Temeemy A.A., Spencer J.W. Chromatic methodology for laser detection and ranging (ladar) image description // *Optik*. 2015. V. 126. № 23. P. 3894–3900.
3. Калибровка, тестирование и испытания оптико-электронных систем на открытых трассах / И.М. Хмаров [и др.]. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2016. 133 с.
4. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос. 2004. 443 с.
5. Minor J. “Electro-Optics” Electro-Optics Course Textbook. USAF Test Pilot School. Edwards AFB. CA. 2002.
6. Хмаров И.М., Канивец В.Ю. Комплексное моделирование оптико-локационных характеристик летательных аппаратов. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА». 2014. 109 с.
7. Irma 5.0 multi-sensor signature prediction model / M. Owens [et al.] // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2000. V. 3699. P. 249–267.
8. Измерение лазерно-локационных характеристик воздушных объектов / И.М. Хмаров [и др.] // *Труды МАИ*. 2020. № 115. С. 1–18.
9. Youmans D.G. Laser radar vacuum speckle plus atmospheric scintillation: a simple irradiance model // *Laser Radar Technology and Applications V – SPIE*. 2000. V. 4035. P. 287–298.
10. Титов А.Л., Степанов А.В. Методы и средства исследования отражательных характеристик объектов в лазерно-локационном диапазоне. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. 22 с.
11. Kim B.H., Khan D., Choi W., Kim M.Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar // *Laser Radar Technology and Applications XXIV – SPIE*. 2019. V. 11005. P. 80–86.
12. Непогодин И.А. Отражательные характеристики и информативность признаков (сигнатур) объектов и фонов в лазерной локации. Казань: Дом печати. 1997. Ч. II. С. 428–457.
13. Jafolla J.C., Reynolds W.R. Bidirectional reflectance measurements for high-resolution signature modeling // *Targets and Backgrounds X: Characterization and Representation*. 2004. V. 5431. P. 184–197.
14. Старченко А.Н. Методическое и аппаратное обеспечение измерений рассеянного лазерного излучения // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 12. С. 23–31.
15. Мирзоян А.С., Малышев О.В., Хмаров И.М., Мешков В.В., Шахов С.В. Численные методы определения пространственного положения летательного аппарата на основе 2D-оптических изображений // *Программные продукты и системы*. 2015. № 3 (111). С. 33–41.

Для цитирования: Егужоков Р.А., Хмаров И.М., Шевченко Л.Ф., Мешков В.В., Маркушин Г.Н. Оценка дальности действия лазерных дальномеров в составе оптико-электронных систем при локации воздушных объектов // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2022. № 4 (16). С. 107–117.

EVALUATION OF THE RANGE OF LASER RANGE FINDERS AS A PART OF OPTO-ELECTRONIC SYSTEMS IN LOCATION OF AERIAL OBJECTS

R.A. EGUZHOKOV¹, I.M. KHMAROV¹, Cand. Sc., L.F. SHEVCHENKO¹, Cand. Sc.,
V.V. MESHKOV², Dr. Sc., G.N. MARKUSHIN³

¹Central Research Institute of Aerospace Forces of the Ministry of Defense
of Russian Federation, 32, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: vse_ki@mail.ru

²Tver State Technical University, 22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver,
Russian Federation, e-mail: common@tstu.tver.ru

³JSC Production Association Ural Optical and Mechanical Plant
named after E.S. Yalamova, 33B, Vostochnaya st., 620100, Yekaterinburg,
Russian Federation, e-mail: geo@uomz.com

The issues of testing laser rangefinders on open routes when locating air objects in the near and short-wave infrared wavelength ranges are considered. A method has been developed and tested that implements the processes of measuring and calibrating signals using aerostandards. The method is based on determining the effective scattering area of airborne objects, calculating the transmission coefficients of radar optical paths, experimental measurements of the maximum tracking distances of aerostandards by laser rangefinders, determining the angles of objects from their two-dimensional images, and calculating the ranges of rangefinders when locating typical airborne objects. The results of tests of two optical-electronic systems with laser rangefinders are presented. The ranges of action of laser rangefinders were evaluated in accordance with the specified requirements.

Keywords: laser range finder, effective scattering area, air object, field measurements, tests, range, aerostandard, multichannel optoelectronic system.

Поступила в редакцию/received: 10.07.2022; после рецензирования/revised: 30.08.2022;
принята/accepted: 12.09.2022

УДК 004.94

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОСКОЛКОВ НА СИСТЕМУ РАЗНЕСЕННЫХ ПРЕГРАД

О.Ю. ФЕДОСОВ¹, канд. техн. наук., Ю.А. ФЕДОСОВ², канд. техн. наук

¹Управление перспективных межвидовых исследований
и специальных проектов Министерства обороны РФ,
119160, Москва, Комсомольский пр., 18, e-mail: olefed78@mail.ru

²Центральный научно-исследовательский институт
Воздушно-космических сил Министерства обороны РФ,
170026, Тверь, наб. Афанасия Никитина, 32, e-mail: nicrvotver@mail.ru

© Федосов О.Ю., Федосов Ю.А., 2022

Представлена «Модель 1В» – экспериментально-теоретическая модель, предназначенная для расчета основных параметров, характеризующих процессы пробития и разрушения разнесенных преград из различных конструкционных