

Измерение лазерно-локационных характеристик воздушных объектов

Хмаров И.М.^{1*}, Егужоков Р.А.^{1}, Маркушин Г.Н.^{2***}, Кошелев А.В.^{2****},
Канивец В.Ю.^{3*****}, Кондрашов Н.Г.^{3*****}**

¹Научно-исследовательский центр (г. Тверь) Центрального научно-исследовательского института Воздушно-космических сил Минобороны России, наб. Афанасия Никитина, 32, Тверь, 170026, Россия

²Производственное объединение «Уральский оптико-механический завод» имени Э.С. Яламова», ул. Восточная, 33б, Екатеринбург, 620100, Россия

³Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», ул. Старых Большевиков, 54а, Воронеж, 394064, Россия

**e-mail: khmarov314@mail.ru*

***e-mail: vse_ki@mail.ru*

****e-mail: markushin@el.ru*

*****e-mail: bete_noire@olympus.ru*

******e-mail: martanvik@mail.ru*

******e-mail: nik-avia@mail.ru*

Статья поступила 30.01.2020

Аннотация

Рассмотрены вопросы проведения натурных измерений эффективной площади рассеяния воздушных объектов в ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Разработана и апробирована методика, реализующая процессы измерений и калибровки сигналов с большим динамическим диапазоном на открытых трассах. Представлены результаты измерений эффективной площади рассеяния четырех типов воздушных целей, полученные с помощью многоканального оптического

измерительного комплекса. Проведена оценка динамического диапазона и погрешности измерения ЭПР.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, воздушный объект, натурные измерения, лазерный измерительный канал, многоканальный оптический измерительный комплекс.

Введение

Экспериментально-теоретические и экспериментальные исследования лазерно-локационных характеристик (ЛЛХ) воздушных объектов являются актуальными научно-практическими задачами при создании перспективных и модернизации существующих активных оптико-электронных информационных средств, а также при решении задачи снижения оптической заметности объектов.

При этом прямые измерения ЛЛХ объектов имеют важное значение для верификации экспериментально-теоретических методов и математических моделей [1–7], а также для оценки информационных возможностей лазерных средств [8–11]. Особенно актуально проведение исследований отражательных характеристик объектов в следующих случаях:

– при наличии различных факторов, связанных с условиями применения объектов (сопутствующие полету физические явления, неблагоприятные воздействия среды, физические поля и т.д.);

– при наличии в структуре объектов бортовых оптико-электронных средств (ОЭС) и полупрозрачных объемно-рассеивающих фрагментов (не поддающихся строгому математическому моделированию).

Однако при проведении полунатурных и натурных измерений на открытых трассах существуют сложности, связанные:

с калибровкой (эталонированием) локационных сигналов, отраженных от удаленных целей [4–9, 12];

с технической сложностью создания лазерных измерительных каналов (ЛИК) с большим линейным динамическим диапазоном [8, 14];

с оценкой погрешностей измерений [5, 8, 14].

Ниже рассматриваются методический аппарат и аппаратура, решающие указанные проблемы. Они обеспечивают проведение натурных измерений ЛЛХ воздушных объектов в полете с помощью лазерного измерительного комплекса (ЛИК) ближнего инфракрасного (ИК) диапазона в составе многоканального оптического измерительного комплекса (МОИК). Данный МОИК является отечественным аналогом многоканальных оптико-электронных измерительных систем и комплексов [14], которые выпускаются ведущими зарубежными фирмами для решения исследовательских задач при испытаниях ОЭС различного назначения (рисунок 1).

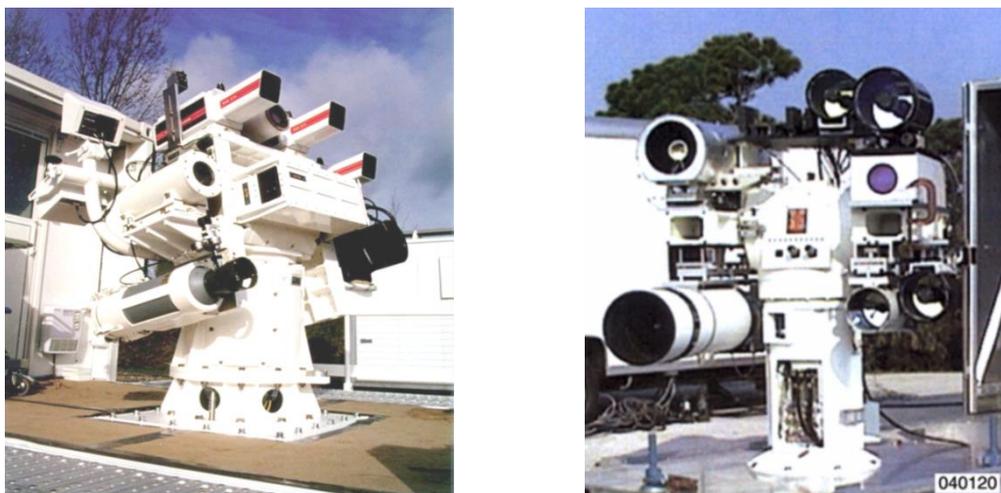


Рисунок 1 – МОИК MATrIS (Mobile Aerial Tracking and Imaging System)

Методика и аппаратура для измерения эффективной площади рассеяния

Основные соотношения

Принимаемая лазерным измерительным каналом МОИК мощность оптического сигнала P_r определяется соотношением

$$P_r = NV \cdot \frac{\sigma \cdot \tau^2 \cdot P_t}{R^4}, \quad (1)$$

где NV – коэффициент, включающий постоянный множитель и неварьируемые параметры ЛИК; σ – эффективная площадь рассеяния (ЭПР) цели; τ – пропускание атмосферы вдоль локационной трассы в одном направлении; R – дальность до цели; P_t – мощность передатчика.

Аналогично (1):

$$E_r = NV \cdot \frac{\sigma \cdot \tau^2 \cdot E_t}{R^4}, \quad (2)$$

где E_r – энергия принятого сигнала, E_t – энергия передатчика в импульсе.

Обработка входного сигнала в измерительном канале МОИК происходит в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.

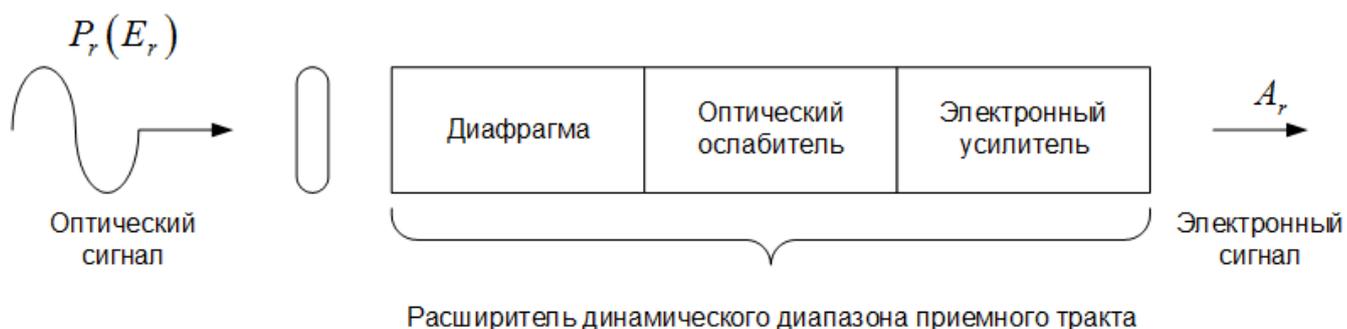


Рисунок 2 – Физическая схема прохождения и обработки сигналов

При этом последовательная связка «диафрагма» – «оптический ослабитель» – «электронный усилитель» выполняет роль расширителя динамического диапазона приемного тракта.

В измерительном канале действует соотношение:

$$P_r(E_r) = A_r \cdot S, \quad (3)$$

где S – значение множителя, определяющего текущий коэффициент усиления (чувствительность) всего приемного тракта, A_r – амплитуда сигнала на выходе электронного усилителя.

Аналогично для канала контроля выходной мощности (энергии) передатчика можно записать

$$P_t(E_t) = A_t \cdot q, \quad (4)$$

где q – значение множителя, определяющего текущий коэффициент усиления (чувствительность) канала контроля выходной мощности (энергии), A_t – амплитуда соответствующего электронного сигнала.

При обработке получаемых сигналов вводится относительный параметр T

$$T = \frac{A_r}{A_t}. \quad (5)$$

Тогда из (1) – (5) получаем выражение для ЭПР:

$$\sigma = \frac{T \cdot S \cdot R^4}{NV \cdot q \cdot \tau^2}. \quad (6)$$

Условия и порядок проведения измерений

Оценка ЭПР воздушных объектов в ближнем ИК диапазоне проводится на открытой трассе относительным методом проведения измерений.

При оценке ЭПР воздушных объектов используются измеренные сигналы от самого воздушного объекта и от эталона, а также параметры локационных трасс для объекта и эталона [15, 16].

Рассмотрим схему проведения измерений (рисунок 3).

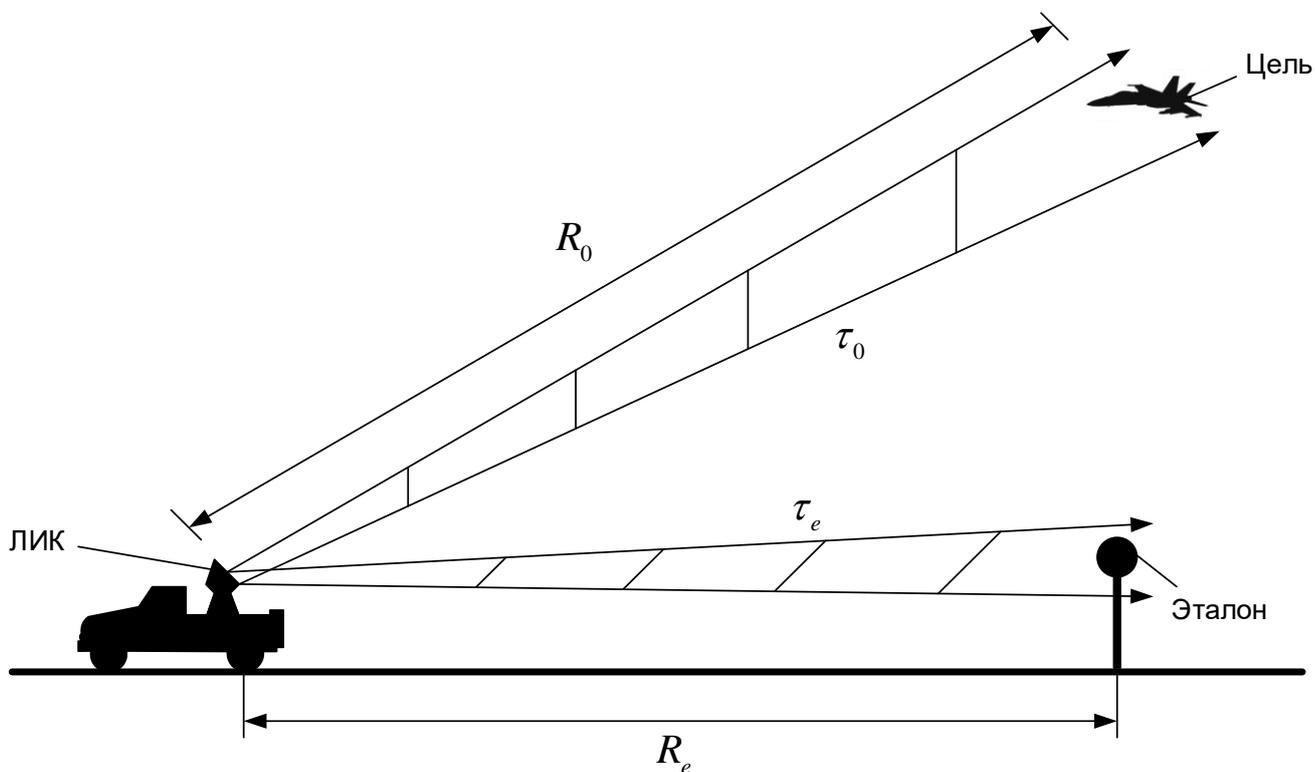


Рисунок 3 – Схема проведения измерений

В процессе измерений оптическая ось ЛИК последовательно наводится на эталон из состава устройств калибровки оптических измерительных каналов (УКОИК) на открытой трассе и исследуемый воздушный объект (цель). Наведение реализуется с помощью одного из 5 пассивных оптических каналов МОИК (ультрафиолетового, видимого диапазонов, а также ближнего, среднего и дальнего ИК диапазонов). При этом выбирается наиболее информативный для данной фоноцелевой обстановки оптический канал. Сопровождение цели осуществляется как в ручном, так и в автоматическом режимах. При этом в процессе сопровождения цели применяется ручная или автофокусировка [13]. В качестве целей могут быть: аэроэталон, вертолеты, самолеты, беспилотные летательные аппараты и т.д. [5, 14].

С помощью аппаратуры отображения информации и аппаратуры регистрации информации последовательно (при наведении на эталон и цель) считываются и фиксируются следующие параметры:

дальности вдоль локационных трасс (R) при наведении на эталон и цель соответственно (регистрируются лазерным дальномером, входящим в состав МОИК);

значения текущего множителя (S) при измерении сигнала от эталона и цели;

отношения амплитуд сигналов (T) от эталона и цели соответственно к сигналам от передатчика;

углы места (ε) при наведении на эталон и цель соответственно (регистрируются с помощью датчиков положения и отгоризонтированного опорно-поворотного устройства).

Далее с помощью аппаратуры метеопоста МОИК (или внешней метеослужбы) оператором фиксируются текущие параметры метеобстановки: атмосферное

давление; влажность; температура; метеорологическая дальность видимости (МДВ).

Исходя из пропорциональной зависимости измеренных сигналов и ЭПР, обеспечивается так называемое косвенное измерение эффективной площади рассеяния исследуемого воздушного объекта (цели). При этом на основании (6) ЭПР цели σ_o вычисляется согласно выражению

$$\sigma_o = \frac{T_o \cdot S_o \cdot R_o^4 \cdot \tau_e^2}{T_e \cdot S_e \cdot R_e^4 \cdot \tau_o^2} \cdot \sigma_e, \quad (7)$$

где σ_e , – ЭПР эталона, S_o – значение текущего множителя при измерении сигнала от цели, S_e – значение текущего множителя при измерении сигнала от эталона, R_e, R_o – дальности вдоль локационных трасс при наведении на эталон и цель соответственно, τ_e, τ_o – коэффициенты пропускания атмосферы вдоль локационных трасс (в одном направлении) при измерениях сигналов от эталона и цели соответственно, T_e, T_o – отношения амплитуд сигналов от эталона и цели соответственно к сигналам от передатчика («опорному сигналу»).

Коэффициенты пропускания τ_e, τ_o рассчитываются с помощью программы «К6» - модуля специального программного обеспечения (СПО) для послесеансной обработки зарегистрированной информации (ПОЗИ). Данная программа рассчитывает текущие значения коэффициентов пропускания атмосферы с учетом наклонной дальности до цели и эталона, параметров метеоусловий, углов места цели и эталона [5].

Влияние разности уширений лазерных пучков при наведении на цель и эталон, как правило, не существенно. Но в отдельных случаях может быть учтено расчетным способом [5, 17, 18].

Если цель находится рядом с эталоном, то используется более простое соотношение

$$\sigma_o = \frac{T_o \cdot S_o}{T_e \cdot S_e} \cdot \sigma_e. \quad (8)$$

Расчет ЭПР по соотношениям (7), (8) обеспечивается «Программой калибровки лазерного измерительного дальномерного канала и расчета эффективной площади рассеяния объектов» (программа «КЗ» из комплекса программ для ПОЗИ МОИК).

Материально-техническое обеспечение измерений

В процессе измерений используются (привлекаются):

1. Многоканальный оптический измерительный комплекс, включающий ЛИК.
2. Комплект эталонных отражателей.
3. Метеопост.
4. Цель в виде: стационарной мишени и (или) воздушных объектов.
5. Специализированное программное обеспечение для послесезонной обработки зарегистрированной информации.

Методика оценки погрешности измерения ЭПР

Суммарная погрешность измерения ЭПР с помощью ЛИК определяется совокупностью систематической ошибки и средней квадратической погрешности (СКП).

Средняя квадратическая погрешность S_o измерений ЭПР объекта определяется случайными составляющими погрешности измерений.

Косвенные измерения ЭПР на открытой трассе имеют сложную параметрическую структуру. Так систематическая ошибка δ измерения ЭПР определяется техническими параметрами ЛИК, эталонов, аппаратуры МОИК, расчетным программным модулем «К6» и т.д.

Поэтому под систематической ошибкой δ измерения ЭПР будем понимать погрешность, состоящую из суммы систематических погрешностей, где систематические погрешности в результате рандомизации процесса измерений принимаются за случайные [19].

Для оценки СКП измерения ЭПР используется выборка из N последовательных измерений ЭПР объекта (эталона) при одинаковых положениях самого объекта (эталона) и положения оптической оси ЛИК.

Оценка математического ожидания ЭПР проводится (при N реализациях) по формуле:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i. \quad (9)$$

Здесь и далее величина X означает измеренное значение ЭПР. Оценка СКП измерения ЭПР проводится по формуле:

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}. \quad (10)$$

Если относительная систематическая ошибка при измерениях ЭПР составляет $\delta^\circ = \frac{\delta}{\bar{X}}$, то суммарная относительная ошибка измерений ЭПР Δ° рассчитывается (с доверительной вероятностью $> 0,9$) в соответствии с выражением

$$\Delta^\circ = \frac{\sqrt{S_\sigma^2 + \delta^2}}{\bar{X}} = \sqrt{\left(\frac{S_\sigma}{\bar{X}}\right)^2 + (\delta^\circ)^2}. \quad (11)$$

Основными факторами, из которых складывается систематическая (относительная систематическая) ошибка (погрешность) измерений являются:

- ошибка определения ЭПР эталона σ_e ;
- ошибка в оценке коэффициентов пропускания атмосферы τ_e, τ_0 ;
- ошибка измерения дальностей R_e, R_0 ;
- ошибка при измерении относительных амплитуд отраженных сигналов As_o, As_e (где $As_o = T_o \cdot S_o$, $As_e = T_e \cdot S_e$).

Ошибки, связанные с влиянием спекл-структуры падающего и отраженного излучения и неравномерности интенсивности лазерного излучения можно рандомизировать в результате серии измерений.

Соотношение (7) можно представить в параметрическом виде:

$$\sigma_o = F(As_o; R_o; \tau_o; As_e; R_e; \tau_e; \sigma_e). \quad (12)$$

Далее используем понятие полного дифференциала для функции F от нескольких переменных.

Исходя из соотношений (7) и (12) суммарная относительная систематическая ошибка при определении ЭПР, полученная в результате рандомизации парциальных компонент, равна [19]

$$\delta^0 = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln F}{\partial A_{s_0}} \cdot \Delta A_{s_0}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial R_0} \cdot \Delta R_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial \tau_0} \cdot \Delta \tau_0\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial A_{s_e}} \cdot \Delta A_{s_e}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial R_e} \cdot \Delta R_e\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial \tau_e} \cdot \Delta \tau_e\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln F}{\partial \sigma_e} \cdot \Delta \sigma_e\right)^2}. \quad (13)$$

где $\Delta A_{s_0}, \Delta R_0, \Delta \tau_0, \Delta A_{s_e}, \Delta R_e, \Delta \tau_e, \Delta \sigma_e$ - систематические ошибки при определении величин $A_{s_0}, R_0, \tau_0, A_{s_e}, R_e, \tau_e, \sigma_e$ соответственно.

Результаты измерений

В результате цикла измерений с помощью МОИК были получены сигналы от 2 стационарных эталонов и 4 воздушных объектов (эталон 1, 2; вертолёт; квадрокоптер; самолёт; самолёт «Боинг») на различных дальностях в диапазоне от 0,2 до 21 км.

Результаты измерений (численные значения сигналов от эталонов) представлены в таблице 1. При этом значения ЭПР эталонов (диффузных дисков из состава УКОИК) получены на аттестованной установке [20].

Таблица 1. Результаты измерений сигналов от эталонов

| № эталона | R_e , м | T_e , отн. ед. | S_e , отн. ед. | τ_e , отн. ед. | σ_e , М ² |
|-----------|-----------|------------------|------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 203 | 0.5406 | 100 | 0.96 | 0.053 |
| 2 | 568 | 0.5781 | 10 | 0.92 | 0.38 |

На рисунках 4–6 приведены изображения с мониторов АРМ МОИК во время проведения измерений.

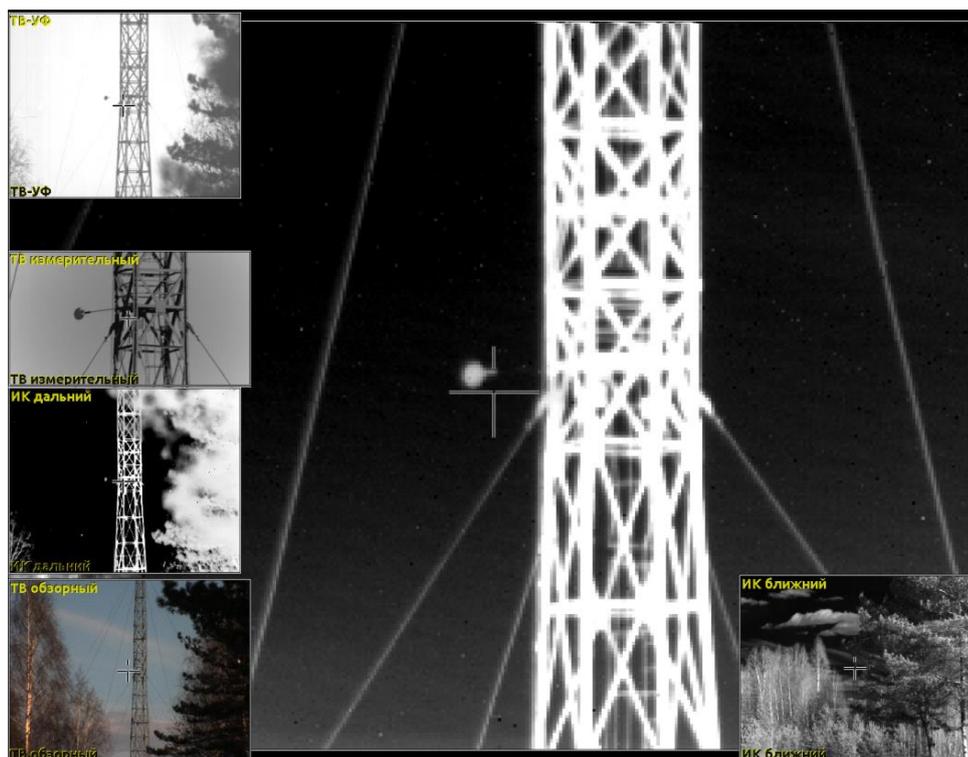


Рисунок 4 – Многоканальное изображение эталона № 2 (слева от вышки) во время проведения измерений



Рисунок 5 – Многоканальное изображение вертолета во время проведения измерений

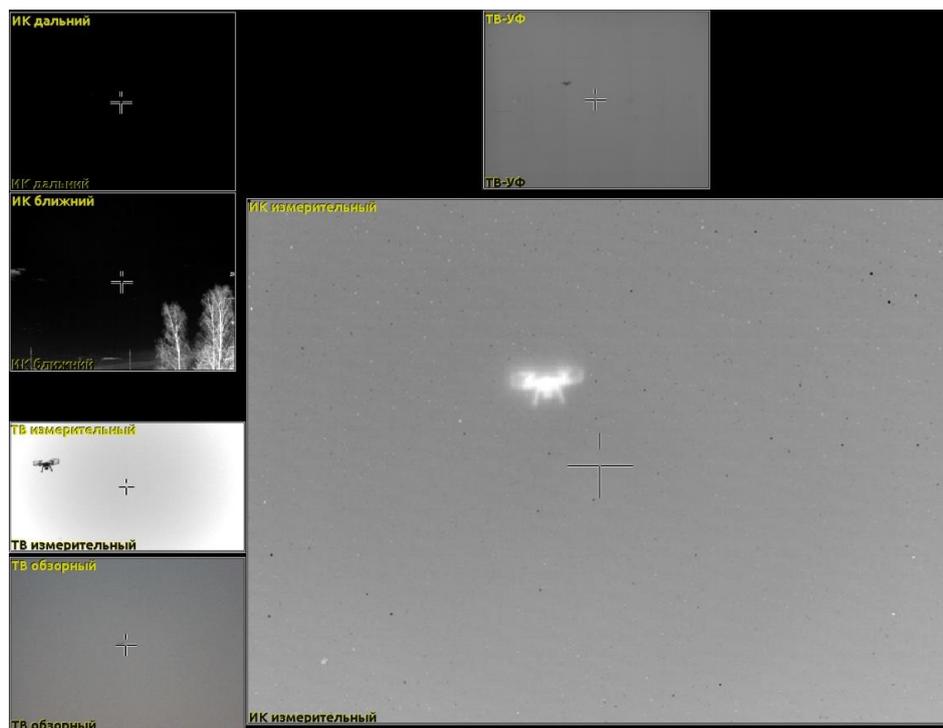


Рисунок 6 – Многоканальное изображение квадрокоптера во время проведения измерений

В ходе исследований сигналы от 2 эталонов и 4 воздушных объектов (полученные на расстояниях в диапазоне от 0,2 до 21 км) были обработаны с помощью СПО ПОЗИ. В результате получены значения ЭПР вертолёта, квадрокоптера, самолёта, самолёта «Боинг». Результаты представлены в сводной таблице 2.

Таблица 2 – Сводная таблица результатов измерения ЭПР

| Объект | Дальность до объекта R , км | Сигнал T , отн. ед. | Множитель сигнала S , отн. ед. | Коэффициент пропускания атмосферы τ , отн. ед. | МДВ, км | ЭПР объекта σ , м ² |
|--------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---|---------|---------------------------------------|
| Эталон 1 | 0.203 | 0.5406 | 100 | 0.96 | 10 | 0.053 |
| Эталон 2 | 0.568 | 0.5781 | 10 | 0.92 | 10 | 0.38 |
| Вертолет | 2.34 | 0.7078 | 0.1 | 0.68 | 10 | 2.4 |
| Квадрокоптер | 0.352 | 0.0625 | 10 | 0.94 | 10 | 0.0058 |
| Самолет | 5.531 | 0.2816 | 0.1 | 0.714 | 20 | 27.5 |

| | | | | | | |
|--------------------|-------|--------|------|-------|----|-----|
| Самолет «Боинг» | 20.26 | 0.1376 | 0.01 | 0.816 | 20 | 165 |
|--------------------|-------|--------|------|-------|----|-----|

Исходя из полученных реализаций, был установлен (подтвержден) динамический диапазон (ДД) регистрируемых сигналов. Для величины $T \times S$ он составил: ДД = [99...0.001].

На основании этих результатов с помощью СПО ПОЗИ (программ «К3», «К6») рассчитаны реальные сигналы, которые обеспечивают измерения (при МДВ = 20 км) в заданных диапазонах значений ЭПР и дальностей. Таким образом подтверждена работа ЛИК МОИК:

для объектов с ЭПР $0,01 \dots 0,1 \text{ м}^2$ – в диапазоне дальностей $0,2 \dots 5 \text{ км}$;

для объектов с ЭПР $0,1 \dots 1 \text{ м}^2$ – в диапазоне дальностей $0,2 \dots 10 \text{ км}$;

для объектов с ЭПР $1 \dots 10 \text{ м}^2$ – в диапазоне дальностей $0,2 \dots 15 \text{ км}$;

для объектов с ЭПР $10 \dots 30 \text{ м}^2$ – в диапазоне дальностей $0,2 \dots 20 \text{ км}$.

В процессе исследований проводились оценки погрешностей результатов измерений. Рассмотрим применение методики оценки погрешности при измерениях ЭПР на примере исследований отражательных характеристик квадрокоптера.

Для оценки СКП измерения ЭПР использовалась выборка из 30 последовательных измерений ЭПР эталонного объекта при одинаковых положениях самого эталона и положения оптической оси ЛИК.

Оценка СКП (СКО) измерения ЭПР проводилась по формуле (10). Полученная оценка составила $S_{\sigma} = 0.04$.

Относительная систематическая ошибка при измерениях ЭПР квадрокоптера составила при благоприятных метеоусловиях $\delta^0 \leq 0,1$.

Тогда (при благоприятных метеоусловиях) относительная погрешность измерений ЭПР квадрокоптера составила

$$\Delta^0 = \frac{\sqrt{S_{\sigma}^2 + \delta^2}}{X} \leq 0,15.$$

Для других типов целей (самолет, вертолет), полностью попадающих в лазерный луч подсветки, относительная погрешность измерений ЭПР при благоприятных метеоусловиях составила 30%.

Выводы

1. Разработаны и апробированы методики измерения с помощью ЛИК МОИК лазерно-локационных характеристик воздушных объектов на открытых трассах.
2. С помощью ЛИК МОИК проведены измерения ЭПР 4 воздушных целей в полете.
3. Динамический диапазон измерения ЭПР составляет не менее 0.01... 30 м².
4. ЛИК МОИК способен проводить измерения лазерно-локационных характеристик целей при МДВ = 20 км на дальностях 0,2...20 км.
5. При благоприятных метеоусловиях относительная погрешность измерений ЭПР воздушных объектов составила 15...30% в зависимости от типа цели.
6. Полученные с помощью ЛИК МОИК результаты измерений соответствуют требованиям, предъявляемым к данному классу измерительных систем.

Библиографический список

1. Хмаров И.М. Метод определения эффективной площади рассеяния летательных аппаратов с учетом реальных условий // Радиотехника. 2010. №11. С. 79 – 84.
2. Owens M., Wellfare M., Forster J. & etc. Irma 5.0 Multi-Sensor Signature Prediction Model // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, January 2000, vol. 3699. pp. 249 – 267. DOI: [10.1117/12.352953](https://doi.org/10.1117/12.352953)
- 3 Geraldine Ch., William St., Alan L. Standards requirements for LADARs? // Proceedings of SPIE - Laser Radar Technology and Applications X, May 2005, vol. 5791. DOI: [10.1117/12.609689](https://doi.org/10.1117/12.609689)
4. Непогодин И.А. Отражательные характеристики и информативность признаков (сигнатур) объектов и фонов в лазерной локации. Часть II. - Казань: Изд-во «Дом печати», 1997. С. 428 – 457.
5. Хмаров И.М., Канивец В.Ю. Комплексное моделирование оптико-локационных характеристик летательных аппаратов: монография. - Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2014. – 109 с.
6. Горбулин В.И., Ходор М.А. Методика распределения полей зрения средств наблюдения в зоне ответственности // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93426>
7. Суровцев П.Ю., Суслин А.С. Корреляционно-разностный алгоритм обнаружения воздушных объектов, наблюдаемых на фоне неоднородного неба // Труды МАИ. 2018. № 103. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=100750>
8. Cheek G.S., Stone W.C., Lytle A. Standarts Requirements for LADARs // Proceedings of SPIE, 2005, vol. 5791, pp. 250 - 261. URL: <https://doi.org/10.1117/12.609689>

9. Al-Temeemy A., Spencer J. Chromatic methodology for laser detection and ranging (ladar) image description // *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 126 (23), pp. 3894 - 3900. DOI: [10.1016/j.ijleo.2015.07.182](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.07.182)
10. Борейшо В.А. и др. Военные применения лазеров: учебное пособие. – СПб.: Балтийский государственный технический университет, 2015. – 103 с.
11. Малышев В.А., Хмаров И.М., Малышев О.В., Канивец В.Ю. и др. Распознавание наземных объектов и летательных аппаратов 2-D и 3-D оптико-электронными системами. - М.: НТЦ «Информтехника», 2013. - 158 с.
12. Старченко А.Н. Методическое и аппаратное обеспечение измерений рассеянного лазерного излучения // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 12. С. 23 – 31.
13. Старовойтов В.В., Голуб Ю.И. Получение и обработка изображений на ЭВМ: учебно-методическое пособие. – Минск: БНТУ, 2018. – 204 с.
14. Хмаров И.М. и др. Калибровка, тестирование и испытания оптико-электронных систем на открытых трассах: монография. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. – 133 с.
15. Богданов И.В., Величко А.Н. Формирование фоно-целевой обстановки для оптико-электронных систем ракетно-космического назначения // *Труды МАИ*. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80349>.
16. Картуков А.В., Меркишин Г.В., Назаров А.Н., Егоров В.В. Использование изображений объектов для анализа параметров воздушной среды в окрестности движущихся объектов // *Труды МАИ*. 2020. № 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116371>. DOI: [10.34759/TRD-2020-112-12](https://doi.org/10.34759/TRD-2020-112-12)

17. Youmans D.G. Laser radar vacuum plus atmospheric scintillation: a simple irradiance model // Proceedings of SPIE, 2000, vol. 4035, pp. 287 – 298. URL: <https://doi.org/10.1117/12.397802>
18. Al-Habash, Andrews M. New mathematical model for the intensity PDF of a laser beam propagating through turbulent media // Proceedings of SPIE, 1999, vol. 3706. URL: <https://doi.org/10.1117/12.356978>
19. Аксенова Е.Н., Калашников Н.П. Методы оценки погрешностей при измерениях физических величин. – СПб.: Изд.-во «Лань», 2019. – 40 с.
20. Титов А.Л., Степанов А.В. Методы и средства исследования отражательных характеристик объектов в лазерно-локационном диапазоне. - М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. - 22 с.

Measuring laser-location characteristics of aerial object

Hmarov I.M.^{1*}, Egozhukov R.A.^{1}, Markushin G.N.^{2***}, Koshelev A.V.^{2****},
Kanivec V.U.^{3*****}, Kondrashov N.G.^{3*****}**

¹*Research center (Tver) of Central Research Airforce Institute of the Russian Defense
Ministry, 32, Afanasy Nikitin emb., Tver, 170026, Russia*

²*Stock company "Production association "Ural opto-mechanical plant» named after E.S.
Yalamova", 33b, Vostochnaya str., Yekaterinburg, 620100, Russia*

³*Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Yu.A. Gagarin, 54a,
Starykh bol'shevikov str., Voronezh, 394064, Russia*

*e-mail: khmarov314@mail.ru

**e-mail: vse_ki@mail.ru

***e-mail: markushin@el.ru

****e-mail: bete_noire@olympus.ru

*****e-mail: martanvik@mail.ru

*****e-mail: nik-avia@mail.ru

Abstract

Experimental-theoretical and experimental studies of the laser-location characteristics (LLC) of aerial objects are up-to-date scientific and practical tasks while creating promising and modernizing conventional active optoelectronic information devices, as well as in solving the problem of optical visibility reducing of objects.

Direct measurements of the objects LLC herewith are important for of experimental and theoretical methods, as well as mathematical models verification, and for information capabilities of laser devices evaluation. Of special importance is the study of objects' reflection characteristics in the presence of various factors in the structure, associated with the objects application conditions (physical phenomena concomitant with the flight, the adverse effects of environment, physical fields and etc.) in the presence of the objects

onboard optical-electronic devices (OED) and a translucent space-scattering of fragments (not amenable to the rigorous mathematical modeling).

However, when performing semi-natural and full-scale measurements on open routes there are difficulties associated with calibration (standardization) of locational signals reflected from remote targets, with the technical difficulty of creating laser measurement channels (LMC) with rather large linear dynamic range, and with measurement estimating inaccuracy.

The authors consider the methodological apparatus and devices solving these problems. They provide full-scale measurements of the air objects LLC in flight employing a near-infrared (IR) laser measuring complex (LMC) as a part of a multi-channel optical measuring system (MCOMS).

As the result, the authors developed and tested a method that implements of measuring and signals calibrating processes with a large dynamic range on open routes. Techniques for aerial objects' laser-location characteristics measuring on open routes using LMC as part of the MCOMS have been developed and tested. Measurements of the effective scattering area (ESA) of four targets were performed with the LMC as part of the MCOMS. Dynamic measuring range of the EAD data is no less than 0.01–30 m². The LMC as part of the MCOMS is capable of measuring the targets laser-location characteristics with meteorological visibility range of 20 km at the distances of 0.2–20 km. Under favorable weather conditions, the relative inaccuracy of the ESR of aerial objects measurements was 15–30%, depending on the target type. The results of measurements obtained using the LMC as part of the MCOMS meet the requirements to this class of measurement systems.

Keywords: effective scattering area, aerial object, full-scale measurements, laser measuring channel, multi-channel optical measuring system.

References

1. Khmarov I.M. *Radiotekhnika*, 2010, no. 1, pp. 79 – 84.
2. Owens M., Wellfare M., Forster J. & etc. Irma 5.0 Multi-Sensor Signature Prediction Model, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, January 2000, vol. 3699. pp. 249 – 267. DOI: [10.1117/12.352953](https://doi.org/10.1117/12.352953)
3. Geraldine Ch., William St., Alan L. Standards requirements for LADARs? *Proceedings of SPIE - Laser Radar Technology and Applications X*, May 2005, vol. 5791. DOI: [10.1117/12.609689](https://doi.org/10.1117/12.609689)
4. Nepogodin I.A. *Otrazhatel'nye kharakteristiki i informativnost' priznakov (signatur) ob'ektov i fonov v lazernoi lokatsii* (Reflective characteristics and information content of features (signatures) of objects and backgrounds in laser location). Part II., Kazan', Izd-vo «Dom pechati», 1997, pp. 428 – 457.
5. Khmarov I.M., Kanivets V.Yu. *Kompleksnoe modelirovanie optiko-lokatsionnykh kharakteristik letatel'nykh apparatov* (Complex modeling of aircraft optical-radar characteristics), Voronezh, VUNTs VVS “VVA”, 2014, 109 p.
6. Gorbulin V.I., Khodor M.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93426>
7. Surovtsev P.Yu., Suslin A.S. *Trudy MAI*, 2018, no. 103. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=100750>

8. Cheok G.S., Stone W.C., Lytle A. Standarts Requirements for LADARs, *Proceedings of SPIE*, 2005, vol. 5791, pp. 250 - 261. URL: <https://doi.org/10.1117/12.609689>
9. Al-Temeemy A., Spencer J. Chromatic methodology for laser detection and ranging (ladar) image description, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 126 (23), pp. 3894 - 3900. DOI: [10.1016/j.ijleo.2015.07.182](https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.07.182)
10. Boreisho V.A. et al. *Voennye primeneniya lazerov* (Military Applications of Lasers), Saint Petersburg, Baltiiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2015, 103 p.
11. Malyshev V.A., Khmarov I.M., Malyshev O.V., Kanivets V.Yu. et al. *Raspoznavanie nazemnykh ob"ektov i letatel'nykh apparatov 2-D i 3-D optiko-elektronnyimi sistemami* (Ground objects and aircraft recognition by 2-D and 3-D optoelectronic systems), Moscow, NTTs "Informtekhnika", 2013, 158 p.
12. Starchenko A.N. *Opticheskii zhurnal*, 2008, vol. 75, no. 12, pp. 23 – 31.
13. Starovoitov V.V., Golub Yu.I. *Poluchenie i obrabotka izobrazhenii na EVM* (Images obtaining and processing by computer), Minsk, BNTU, 2018, 204 p.
14. Khmarov I.M. et al. *Kalibrovka, testirovanie i ispytaniya optiko-elektronnykh sistem na otkrytykh trassakh* (Optoelectronic systems calibration, testing and examining on open routes), Voronezh, VUNTs VVS «VVA», 2016, 133 p.
15. Bogdanov I.V., Velichko A.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 93. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=80349>
16. Kartukov A.V., Merkishin G.V., Nazarov A.N., Egorov V.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 112. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=116371>. DOI: [10.34759/TRD-2020-112-12](https://doi.org/10.34759/TRD-2020-112-12)

17. Youmans D.G. Laser radar vacuum plus atmospheric scintillation: a simple irradiance model, *Proceedings of SPIE*, 2000, vol. 4035, pp. 287 – 298. URL: <https://doi.org/10.1117/12.397802>
18. Al-Habash, Andrews M. New mathematical model for the intensity PDF of a laser beam propagating through turbulent media, *Proceedings of SPIE*, 1999, vol. 3706. URL: <https://doi.org/10.1117/12.356978>
19. Aksenova E.N., Kalashnikov N.P. *Metody otsenki pogreshnostei pri izmereniyakh fizicheskikh velichin* (Errors estimating methods at physical quantities measuring), Saint Petersburg, Izd.-vo “Lan”, 2019, 40 p.
20. Titov A.L., Stepanov A.V. *Metody i sredstva issledovaniya otrazhatel'nykh kharakteristik ob"ektov v lazerno-lokatsionnom diapazone* (Methods and tools for reflective characteristics studying of objects in the laser-radar range), Moscow, Izd.-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2015, 22 p.