



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала:

<http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijcse/>



УДК 681.7.068: 535.8:53.082.5:004.8:004.93

## ЭВОЛЮЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА КОНЕЧНОМ УЧАСТКЕ ТРАЕКТОРИИ: ОТ РЕГИСТРАЦИИ КООРДИНАТ К ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМУ АНАЛИЗУ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Кайралапов А.М.**

*ВОЙСКОВАЯ ЧАСТЬ 25522, Ключи-1, Россия (684401, Камчатский край, Усть-Камчатский район, пос. Ключи-1), e-mail: alexandr\_trir@mail.ru*

В статье проводится детальный анализ трансформации функционального назначения и архитектуры оптических траекторно-измерительных комплексов (ОТИК) в ответ на появление новых классов гиперзвуковых и высокоманевренных целей. Рассматривается исторический контекст развития оптических методов контроля и обозначается фундаментальный разрыв между возможностями традиционных систем и требованиями современных испытаний. Основной акцент сделан на комплексном, двухуровневом подходе к модернизации, включающем революционные изменения в аппаратной части (переход к спектрально-селективным и активным оптико-локационным методам) и создание принципиально новых алгоритмических систем на основе искусственного интеллекта для обработки данных. Впервые в рамках данной тематики детально обсуждаются перспективы создания распределённых сетей интеллектуальных оптических датчиков (свармов) и концепция «цифрового двойника» цели в реальном времени. Делается вывод о необходимости перехода от роли пассивного регистратора к статусу активного аналитического центра, обеспечивающего не траекторные, а физико-технические характеристики испытываемых объектов.

Ключевые слова: Оптический траекторно-измерительный комплекс (ОТИК), конечный участок траектории, гиперзвуковые летательные аппараты (ГЗЛА), измерения в условиях плазменного образования, спектральная селекция, активная лазерная подсветка, компьютерное зрение, глубокое обучение, распределённая сеть датчиков, цифровой двойник, обработка данных в реальном времени, испытания перспективных вооружений.

## EVOLUTION OF OPTICAL MEASUREMENTS ON THE FINAL TRAJECTORY SEGMENT: FROM REGISTRATION TO INTELLIGENT ANALYSIS

**Kayralapov A.M.**

*MILITARY UNIT 25522, Klyuchi-1, Russia (684401, Kamchatka Territory, Ust-Kamchatsky District, pos. Klyuchi-1), e-mail: alexandr\_trir@mail.ru*

The article provides a detailed analysis of the transformation in the functional purpose and architecture of Optical Trajectory Measurement Complexes (OTMC) in response to the emergence of new classes of hypersonic and high-maneuverability targets. The historical context of the development of optical monitoring methods is considered, and a fundamental gap between the capabilities of traditional systems and the requirements of modern testing is identified. The main emphasis is placed on a comprehensive, two-level approach to modernization. This approach includes revolutionary changes in hardware (the transition to spectrally-selective and active optico-location methods) and the creation of fundamentally new algorithmic systems based on artificial intelligence for data processing. For the first time within this subject area, the prospects for creating distributed networks of intelligent optical sensors (swarms) and the concept of a real-time target "digital twin" are discussed in detail. A conclusion is drawn on the necessity of transitioning from the role of a passive recorder to the status of an active analytical center, providing not just trajectory, but physical and technical characteristics of the objects under test.

Keywords: Optical Trajectory Measurement System (OTMS), final trajectory segment, terminal phase, hypersonic vehicles, measurements in plasma environment, spectral selection, multispectral imaging, active laser illumination, LIDAR, computer vision, deep learning, distributed sensor network, sensor swarm, digital twin, real-time data processing, advanced weapons testing.

## **Введение**

Конечный участок полёта боевых блоков баллистических и планирующих крылатых ракет представляет собой уникальный и критически важный полигон для верификации их боевой эффективности, живучести и соответствия расчётным характеристикам. Именно в этой финальной фазе, на этапе гиперзвукового планирования или баллистического снижения в плотных слоях атмосферы, абстрактные математические модели и результаты стендовых испытаний сталкиваются с комплексной и нелинейной реальностью. Здесь доминируют экстремальные физические явления, такие как интенсивный аэродинамический нагрев, приводящий к абляции материалов теплозащиты [1], а также формирование неравновесной плазменной оболочки, радикально меняющей условия радиолокационного и оптического наблюдения [2]. Традиционная роль оптических траекторно-измерительных комплексов, десятилетиями развёрнутых на полигонах, сводилась к высокоточной регистрации пространственных координат и параметров движения с помощью кинотеодолитов и фотограмметрии [3]. Однако появление и активные испытания новейших гиперзвуковых комплексов обозначили качественный скачок в требованиях [4]. Современный ОТИК уже не может ограничиваться функцией «фотографа», фиксирующего положение точки в пространстве. От него требуется стать «диагностом» и «физиком-экспериментатором», способным в режиме, близком к реальному времени, не просто наблюдать, но и интерпретировать сложнейшие физические процессы, происходящие с объектом, оценивать целостность его конструкции и идентифицировать его состояние среди множества ложных целей.

## **Вызовы современности и системные ограничения классических ОТИК**

Классические оптические системы, основанные на принципах плёночной или ранней цифровой кинотеодолитной съёмки, сталкиваются с рядом фундаментальных ограничений при работе с новейшими целями [5]. Эти ограничения носят системный характер и затрагивают все этапы получения информации. Прежде всего, гиперзвуковые скорости порождают колоссальные угловые скорости при наблюдении с наземных пунктов. Механические системы азимутально-угломестного сопровождения с сервоприводами имеют конечное быстродействие и инерционность, что приводит к отставанию оси визирования от цели и потере её из поля зрения [6]. Даже использование современных матричных приёмников не решает проблему полностью, так как сверхзвуковое движение всё ещё может вызывать смазывание изображения, делая невозможным анализ мелких деталей конструкции [7].

Другой фундаментальной проблемой являются опто-физические помехи. Интенсивное свечение плазменной оболочки создаёт не помеху в классическом радиоэлектронном понимании, а мощный мешающий фон. Этот фон не только снижает общий контраст изображения, но и действует как динамическая маска [2]. Плазма, обладающая сложной пространственно-временной структурой, визуально искажает и скрывает истинные геометрические контуры боевого блока, делая традиционные методы фотограмметрии и

визуальной оценки состояния малоэффективными или вовсе неприменимыми [8]. Кроме того, на конечном участке испытаний полигонный измерительный комплекс имеет дело не с изолированной точечной целью. Это сложная динамическая сцена, включающая основной боевой блок, элементы последней ступени ракеты-носителя, ложные тепловые цели, дипольные отражатели и прочие средства преодоления ПРО [9]. В таких условиях ручной или полуавтоматический захват оператором ключевого объекта становится задачей, требующей недопустимо больших временных затрат и чреватой критическими ошибками, а традиционные алгоритмы сопровождения по контрасту или яркости теряют эффективность [10].

### **Комплексный подход к модернизации: революция в аппаратной части**

Ответом на указанные вызовы не может быть эволюционное улучшение существующих компонентов — требуется пересмотр физических принципов получения оптической информации. Модернизация должна носить комплексный характер, затрагивая всю измерительную цепь от приёмника излучения до метода освещения цели. Одним из ключевых направлений является переход к матрицам с глобальным затвором и внедрение спектральной селекции. Замена устаревших приёмников на современные КМОП-матрицы устраняет геометрические искажения быстро движущихся объектов. Однако подлинный качественный скачок связан с интеграцией спектрального анализа непосредственно в процесс формирования изображения [11]. Реализуется это путём оснащения оптических каналов ОТИК быстросменными или перестраиваемыми узкополосными интерференционными фильтрами, настроенными на строго определённые длины волн, соответствующие линиям излучения ключевых химических элементов в плазме или в продуктах абляции [12]. Таким образом, система переходит от получения интегрального «яркостного портрета» к созданию набора спектральных каналов, каждый из которых несёт информацию о конкретных физических процессах: температуре плазмы в определённой зоне, интенсивности абляции, химическом составе продуктов разрушения. Это позволяет «вычлесть» мешающее свечение плазмы и получить контрастное изображение самой конструкции [13].

Параллельно для кардинального снижения зависимости от естественной освещённости и повышения информативности данных необходимо развитие активных оптико-локационных гибридных систем [14]. Речь идёт о создании мощных лазерных систем, работающих в глазобезопасных для наземной аппаратуры диапазонах. Лазерный луч, направленный на цель, создаёт на её поверхности яркое освещённое пятно, а приёмный телескоп регистрирует отражённый сигнал. Ключевые преимущества такого подхода заключаются в следующем: система получает высококонтрастное изображение цели на тёмном фоне независимо от времени суток; по времени задержки отражённого импульса можно с высочайшей точностью определять дальность, что критически важно для прецизионной триангуляции [15]; анализируя доплеровское смещение и спектр отражённого сигнала, можно оценивать не только радиальную скорость, но и вибрационные характеристики объекта [16]. Гибридизация пассивных и активных методов формирует основу для всепогодного и всесуточного высокоточного измерительного комплекса нового поколения, что подтверждается и патентными разработками в данной области [17].

### **Перспективы: интеллектуализация как ключевой драйвер развития**

Усовершенствование аппаратной части создаёт поток данных беспрецедентного объёма и сложности. Их эффективная обработка и интерпретация возможны только за счёт принципиальной интеллектуализации всего измерительного процесса. На первый план здесь выходит внедрение алгоритмов компьютерного зрения и глубокого обучения. Современные нейросетевые архитектуры способны решать задачи, выходящие за рамки человеческих возможностей [18]. На этапе обучения такие алгоритмы «пропускают» через себя десятки тысяч синтезированных и реальных исторических кадров, учась выделять целевые признаки в условиях сильных помех. В реальном времени обученная нейросеть может автоматически обнаруживать и классифицировать все объекты в кадре, с высокой достоверностью идентифицируя боевой блок среди ложных целей, осуществлять устойчивое автоматическое сопровождение выбранной цели, компенсируя смазывание и засветы, а также мгновенно детектировать и сигнализировать о нештатных событиях, таких как начало нерасчётного вращения или отделение фрагментов [19]. Это превращает ОТИК из инструмента пост-обработки в систему оперативного ситуационного реагирования.

Логическим развитием идеи интеллектуализации является отказ от концепции нескольких крупных, дорогих и уязвимых стационарных пунктов. Ей на смену может прийти распределённая сеть из множества компактных, мобильных и максимально автоматизированных оптических постов, формирующих так называемый оптический сварм [20]. Каждый такой пост представляет собой автономный модуль с собственной вычислительной мощностью и каналом защищённой связи. Посты, развёрнутые на местности с оптимальным перекрытием полей зрения, обмениваются данными между собой, формируя единое адаптивное информационное поле. Такая архитектура обеспечивает высочайшую отказоустойчивость, возможность применения методов многобазовой стереоскопии для восстановления полной пространственной ориентации и деформаций конструкции цели с субсантиметровой точностью, а также гибкость и быстроту развёртывания под конкретную трассу испытаний [21].

На основе потока данных от модернизированной аппаратной части и их обработки алгоритмами ИИ становится возможной реализация концепции «цифрового двойника» цели в реальном времени [22]. Эта виртуальная модель будет интегрировать в себе не только кинематические параметры, но и оценённые физические состояния: температурное поле поверхности, интенсивность абляции, динамику изменения геометрии, параметры плазменного образования. Такой комплексный цифровой слепок, сравнимый с расчётными моделями, предоставляет инженерам-разработчикам беспрецедентно глубокое понимание реального поведения изделия в экстремальных условиях, открывая путь к итеративному совершенствованию конструкций [23].

Кроме того, эволюционировавший ОТИК не должен оставаться изолированной системой. Его необходимо интегрировать в единый информационно-измерительный контур полигона совместно с радиолокационными станциями, радиотелеметрическими системами и акустическими датчиками [24]. Алгоритмы объединения данных датчиков смогут коррелировать оптические данные о визуальных проявлениях нештатной ситуации с телеметрическими сигналами о внутренних параметрах систем блока и радиолокационной картиной [25]. Это позволит устанавливать причинно-следственные связи между внешними воздействиями, отказами внутренней аппаратуры и наблюдаемыми эффектами, значительно

повышая достоверность и аналитическую ценность результатов всего цикла испытаний, что отражено в актуальных концептуальных документах [26].

### **Заключение**

Таким образом, обеспечение технологического лидерства в области испытаний перспективных гиперзвуковых и высокоманевренных комплексов требует не модернизации, а концептуальной перезагрузки подхода к оптическим траекторным измерениям на конечном участке. Стратегическое развитие отечественных ОТИК должно идти по пути глубокой синергии двух направлений: революционного обновления аппаратного парка на основе спектрально-селективных и активных гибридных методов и тотальной интеллектуализации процессов сбора и анализа данных с использованием передовых алгоритмов ИИ. Реализация рассмотренных направлений, включая создание распределённых сетей интеллектуальных датчиков и интеграцию в единый измерительный контур, позволит трансформировать ОТИК из пассивного инструмента регистрации координат в активный, интеллектуальный аналитический центр. Такой центр будет в режиме, близком к реальному времени, предоставлять не просто траекторную информацию, а комплексную физико-техническую картину состояния и поведения испытываемого объекта. Это является безальтернативным условием для ускорения цикла разработки, повышения надёжности новейших систем вооружения и гарантированного обеспечения национальной безопасности в условиях жёсткой технологической конкуренции, что соответствует долгосрочным стратегическим установкам [27].

### **Список литературы**

1. Теплов Ф.И., Леонтьев А.К. Термомеханика абляционных композитов в гиперзвуковом потоке. М.: Физматлит, 2019. 288 с.
2. Захаров Ю.В., Петров А.А. Радиофизические характеристики плазменного чехла гиперзвукового объекта // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65, № 3. С. 234-245.
3. Смирнов Г.И. Оптические траекторные измерения в ракетно-космической технике. М.: Машиностроение, 2005. 408 с.
4. Воскресенский Д.Н. Современные тенденции развития гиперзвуковых технологий и их влияние на полигонный измерительный комплекс // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 6. С. 45-57.
5. Кузнецов В.П. Методы и средства оптико-электронных измерений в испытаниях авиационно-космической техники. СПб.: Политехника, 2017. 512 с.
6. Белов А.М., Гришин В.Н. Динамика систем точного сопровождения быстро движущихся объектов // Оптический журнал. 2019. Т. 86, № 2. С. 12-19.
7. Гордеев А.С. Особенности регистрации изображений быстроизменяющихся процессов цифровыми камерами // Автометрия. 2018. Т. 54, № 4. С. 112-120.
8. Мельников В.М. Фотограмметрия в экстремальных условиях: проблемы и решения. Новосибирск: Наука, 2016. 275 с.
9. Андреев С.К. Средства преодоления противоракетной обороны: физические принципы и моделирование. М.: Физматлит, 2018. 332 с.

10. Коробейников А.В. Алгоритмы сопровождения точечных и протяжённых объектов в сложной помеховой обстановке // Информационные процессы. 2020. Т. 20, № 3. С. 301-315.
11. Прохоров М.Е., Семёнова Л.В. Мультиспектральные и гиперспектральные методы в технической диагностике. М.: Техносфера, 2016. 198 с.
12. Соколов Д.Л., Орлов А.В. Спектральный анализ излучения плазмы гиперзвукового потока // Письма в ЖТФ. 2022. Т. 48, вып. 4. С. 18-22.
13. Лисицын В.Н., Коробейников В.П. Спектральные методы выделения слабого сигнала на фоне интенсивных помех. М.: Радио и связь, 2001. 189 с.
14. Капустин В.В. Лазерные локационные системы для контроля быстродвижущихся объектов. Томск: Томский госуниверситет, 2013. 210 с.
15. Дмитриев А.С., Попов Г.М. Лазерная дальнометрия с миллиметровой точностью в задачах траекторных измерений // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 8. С. 765-770.
16. Селиванов В.В., Тарасов С.П. Лазерная доплеровская виброметрия в задачах диагностики механических конструкций. М.: Физматлит, 2009. 304 с.
17. Патент RU 2689876 С1. Способ оптико-локационного контроля гиперзвукового объекта и система для его осуществления. Оpubл. 27.05.2019.
18. Куржанский А.Б., Максимов Е.А. Глубокое обучение и нейросетевые модели в задачах обработки изображений // Труды СПИИРАН. 2020. Вып. 62. С. 150-179.
19. Чугунов А.С., Борисов Р.А. Метод детектирования нештатных ситуаций при визуальном сопровождении летательных аппаратов на основе сверточных нейронных сетей // Искусственный интеллект и принятие решений. 2020. № 4. С. 76-85.
20. Ренев О.Ю., Степанов К.А. Архитектура распределённой сети оптико-электронных сенсоров для аэрокосмического полигона // Датчики и системы. 2021. № 5. С. 34-41.
21. Злобин В.К., Матвеев А.А. Теория и алгоритмы многовидовой фотограмметрии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 376 с.
22. Семёнов И.В., Фролов К.В. Цифровые двойники в жизненном цикле высокотехнологичных изделий // Информационные технологии. 2021. Т. 27, № 11. С. 678-689.
23. Гаврилов А.Н., Тихонов Д.В. Применение цифровых двойников для анализа результатов натурных испытаний сложных технических систем // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. № 3. С. 12-20.
24. Николаев Е.П., Шестаков А.Л. Интегрированные информационно-измерительные системы полигонного комплекса. М.: Горячая линия – Телеком, 2012. 496 с.
25. Архипов В.И., Беляев М.Г. Алгоритмы комплексной обработки разнородной информации в системах мониторинга // Системный анализ, управление и обработка информации. 2019. № 1. С. 89-100.
26. Доклад «Концепция развития единого информационного пространства полигонного измерительного комплекса на период до 2030 года». ЦНИИ «Центр», 2022. 120 с.
27. Стратегия развития средств измерений, испытаний и контроля в оборонно-промышленном комплексе Российской Федерации на 2024-2035 гг. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 15.12.2023 № 1245-р.

## References

1. Teplov F.I., Leontiev A.K. Thermomechanics of Ablative Composites in Hypersonic Flow. M.: Fizmatlit, 2019. p. 288
2. Zakharov Y.V., Petrov A.A. Radiophysical Characteristics of the Plasma Sheath of a Hypersonic Vehicle // Radiotekhnika i Elektronika. 2020. Vol. 65, No. 3. pp. 234-245.
3. Smirnov G.I. Optical Trajectory Measurements in Rocket and Space Technology. M.: Mashinostroenie, 2005. p.408
4. Voskresensky D.N. Modern Trends in the Development of Hypersonic Technologies and Their Impact on the Test Range Measurement Complex // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2021. Vol. 64, No. 6. pp. 45-57.
5. Kuznetsov V.P. Methods and Means of Optoelectronic Measurements in Testing Aerospace Equipment. SPb.: Politehnika, 2017. p.512
6. Belov A.M., Grishin V.N. Dynamics of Precision Tracking Systems for Fast-Moving Objects // Opticheskii Zhurnal. 2019. Vol. 86, No. 2. pp. 12-19.
7. Gordeev A.S. Features of Imaging Registration for Fast-Transient Processes by Digital Cameras // Avtometriya. 2018. Vol. 54, No. 4. pp. 112-120.
8. Melnikov V.M. Photogrammetry in Extreme Conditions: Problems and Solutions. Novosibirsk: Nauka, 2016. p.275
9. Andreev S.K. Means of Overcoming Missile Defense: Physical Principles and Modeling. M.: Fizmatlit, 2018. p.332
10. Korobeinikov A.V. Algorithms for Tracking Point and Extended Objects in Complex Jamming Environments // Informatsionnye Protsessy. 2020. Vol. 20, No. 3. pp. 301-315.
11. Prokhorov M.E., Semenova L.V. Multispectral and Hyperspectral Methods in Technical Diagnostics. M.: Tekhnosfera, 2016. p.198
12. Sokolov D.L., Orlov A.V. Spectral Analysis of Hypersonic Flow Plasma Radiation // Pis'ma v Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2022. Vol. 48, Issue 4. pp. 18-22.
13. Lisitsyn V.N., Korobeinikov V.P. Spectral Methods for Weak Signal Extraction Against Intense Noise. M.: Radio i Svyaz', 2001. p.189.
14. Kapustin V.V. Laser Ranging Systems for Monitoring Fast-Moving Objects. Tomsk: Tomsk State University, 2013. p.210
15. Dmitriev A.S., Popov G.M. Laser Ranging with Millimeter Accuracy for Trajectory Measurement Problems // Kvantovaya Elektronika. 2017. Vol. 47, No. 8. pp. 765-770.
16. Selivanov V.V., Tarasov S.P. Laser Doppler Vibrometry for Problems of Mechanical Structures Diagnostics. M.: Fizmatlit, 2009. p.304
17. Patent RU 2689876 C1. Method of Optico-Locational Monitoring of a Hypersonic Object and System for Its Implementation. Publ. 27.05.2019.
18. Kurzhanski A.B., Maksimov E.A. Deep Learning and Neural Network Models in Image Processing Tasks // Trudy SPIIRAN. 2020. Issue 62. pp. 150-179.
19. Chugunov A.S., Borisov R.A. A Method for Detecting Anomalous Situations During Visual Tracking of Aircraft Based on Convolutional Neural Networks // Iskusstvennyi Intellekt i Prinyatie Reshenii. 2020. No. 4. pp. 76-85.
20. Renev O.Y., Stepanov K.A. Architecture of a Distributed Network of Optoelectronic Sensors for an Aerospace Test Range // Datchiki i Sistemy. 2021. No. 5. pp. 34-41.

21. Zlobin V.K., Matveev A.A. Theory and Algorithms of Multi-View Photogrammetry. M.: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2014. p. 376
  22. Semenov I.V., Frolov K.V. Digital Twins in the Lifecycle of High-Tech Products // Informatsionnye Tekhnologii. 2021. Vol. 27, No. 11. pp. 678-689.
  23. Gavrilov A.N., Tikhonov D.V. Application of Digital Twins for Analysis of Field Test Results of Complex Technical Systems // Vestnik Komp'yuternykh i Informatsionnykh Tekhnologii. 2022. No. 3. pp. 12-20.
  24. Nikolaev E.P., Shestakov A.L. Integrated Information-Measurement Systems of the Test Range Complex. M.: Goryachaya Liniya – Telekom, 2012. p. 496
  25. Arkhipov V.I., Belyaev M.G. Algorithms for Integrated Processing of Heterogeneous Information in Monitoring Systems // Sistemnyi Analiz, Upravlenie i Obrabotka Informatsii. 2019. No. 1. pp. 89-100.
  26. Report "Concept for the Development of a Unified Information Space for the Test Range Measurement Complex for the Period Until 2030". TsNII "Tsentr", 2022. p.120
  27. Strategy for the Development of Measurement, Testing and Control Means in the Defense-Industrial Complex of the Russian Federation for 2024-2035. Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation dated 15.12.2023 No. 1245-r.
-