

УДК 004.946

DOI: 10.46548/21vek-2021-1056-0010

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИМИТАТОРА ТЕПЛОВИЗИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ТРЕНАЖЁРА

© 2021

Роганов Владимир Робертович, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационные технологии и системы»

Есимова Нурзипа Сапаровна, аспирант кафедры «Информационные технологии и системы»
Пензенский государственный технологический университет
(440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11, e-mail: vladimir_roganov@mail.ru)

Пышкина Ирина Сергеевна, кандидат технических наук,
доцент кафедры «Информационно вычислительные системы»

Кувшинова Ольга Александровна, аспирант кафедры «Информационно вычислительные системы»
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28, e-mail: oly791702@mail.ru)

Аннотация. Последние достижения науки и техники привели к появлению новых навигационных приборов. Одним из таких приборов является тепловизор, устанавливаемый на летательные аппараты и беспилотные летательные аппараты. Соответственно, появилась задача обучать лётчиков при полётах на авиационных тренажёрах и операторов беспилотных летательных аппаратов. Для определения места нахождения летательного аппарата по визуально наблюдаемому изображению модели местности, такая задача решается как наблюдением местности через остекление кабины, так и за счёт наблюдения инфракрасного изображения местности на экране тепловизора. Для обучения лётчиков решению задач самолётовождения с наблюдением моделей реперных объектов через остекление кабины были разработаны имитаторы визуальной обстановки, синтезирующие в реальном масштабе времени визуально наблюдаемые 3D-модели с возможностью при этом профессионально тренировать их глазомер. Решению задач самолётовождения с наблюдением моделей реперных объектов, наблюдаемых в имитаторах тепловизора, в настоящее время не решена. Причиной является невозможность в режиме реального времени (с циклом смены информации 80 мсек.) синтезировать узнаваемую инфракрасную модель 3D-объекта, используя известные методики учёта теплового излучения с поверхности рассматриваемого 3D-объекта. Однако, если использовать метод моделирования инфракрасной модели 3D-объекта, считая, что будем синтезировать не 3D-объект, а его информационную модель, как это было сделано в середине XX века при моделировании 2D-проекций 3D-объектов в визуальном диапазоне световых волн, то задача синтеза моделирования 2D-проекций 3D-объектов в инфракрасном диапазоне может быть решена иначе.

Ключевые слова: машинный синтез информационной модели реперного объекта, тепловизор, авиационные тренажёр, тренажёр оператора беспилотного летательного аппарата

FEATURES OF SIMULATION OF THE SIMULATOR OF THE THERMAL IMAGE OF THE AVIATION SIMULATOR

© 2021

Roganov Vladimir Robertovich, ph.d., associate professor of the
department «Information Technologies and Systems»

Esimova Nurzipa Saparovna, graduate student department «Information Technologies and Systems»
Penza State Technological University
(440039, Penza, Baidukov's passage / str. Gagarin, 1A / 11, E-mail: vladimir_Roganov@mail.ru)

Pyshkina Irina Sergeevna, ph.d, associate professor of the department «Informational computing systems»

Kuvshinova Olga Aleksandrovna, graduate student of the department «Informational computing systems»
Penza State University of Architecture and Construction
(440028, Penza, str. German Titova, 28, E-mail: Oly791702@mail.ru)

Abstract. Recent advances in science and technology have led to the emergence of new navigation devices. One of these devices is a thermal imager installed on aircraft and unmanned aerial vehicles. Accordingly, the task arose to train pilots when flying on flight simulators and operators of unmanned aerial vehicles. To determine the location of the aircraft from the visually observed image of the terrain model, such a task is solved both by observing the terrain through the glazing of the cockpit and by observing the infrared image of the terrain on the thermal imager screen. To train pilots in solving aircraft flying problems with observing models of reference objects through the cockpit glazing, visual environment simulators were developed that synthesize visually observed 3D models in real time with the ability to professionally train their eyes. The solution of the problems of aircraft navigation with the observation of models of reference objects observed in imitators of a thermal imager has not been solved at present. The reason is the impossibility in real time (with a cycle of information change of 80 ms) to synthesize a recognizable infrared model of a 3D object using the well-known methods of accounting for thermal radiation from the surface of the 3D object in question. However, if we use the method of modeling the infrared model of a 3D object, assuming that we will synthesize not a

3D object, but its information model, as was done in the middle of the 20th century when modeling 2D projections of 3D objects in the visual range of light waves, then the problem of synthesis of modeling 2D projections of 3D objects in the infrared range can be solved differently.

Keywords: machine synthesis of the information model of the reference object, the thermal imager, aviation simulator, the simulator of the unmanned aircraft operator.

Введение. Одним из сравнительно новых приборов, используемых для решения задач самолётовождения [1] как у нас в стране, так и за рубежом является тепловизор [2, 3]. Он применяется на разных типах летательных аппаратов как один из модулей навигационной системы самолётов [4] и вертолёт [5, 6]. Задачи обучения лётчиков: обучить выделять из изображений, полученных с помощью тепловизора нужную информацию [7] и использовать её для решения навигационных задач. Значительная часть времени обучения лётчиков отводится на полёты на авиационных тренажёрах [8, 9]. В авиационных тренажерах могут быть несколько имитаторов, синтезирующих визуально наблюдаемые изображения модели местности [10]. Это имитатор визуальной обстановки, синтезирующий визуально наблюдаемую трёхмерную модель местности, видимую через остекление кабины; имитатор тепловизора синтезирующий на своём экране инфракрасное изображение части модели местности, попавшей в камеру наблюдения, и имитатор радиолокатора синтезирующий на своём экране часть модели местности, попавшей в соответствующую камеру наблюдения. В имитаторе визуальной обстановки и в имитаторе радиолокатора могут использоваться физические макеты местности вместе со специальными камерами наблюдения [1, 10]. Литературный обзор показал, что для разработки имитаторов тепловизоров необходимо решить две задачи:

1. Отобрать реперные объекты [1, 10], необходимые для визуальной корректировки места расположения модели летательного аппарата над моделью земной поверхности [11]. Или маскировка таких объектов с целью приближения условий решения навигационных задач при полётах на авиационных тренажерах к реальным [12].

2. Синтезировать в реальном масштабе времени узнаваемые ИК-модели реперных объектов [13].

Наиболее распространённые методы решения второй задачи основаны на учёте интенсивности инфракрасного излучения, испускаемого всеми гранями 3D-объектов с учётом технических характеристик используемых тепловизоров и возможностей их экранов [14–19]. Такой подход не позволяет синтезировать достаточное число реперных объектов для решения задач самолётовождения при полётах на авиационных тренажерах. Анализ литературных источников показывают возможность разработки имитатора тепловизора, используя методы и алгоритмы машинной графики, ранее применённые для разработки имитатора визуальной обстановки [20, 22].

Целью статьи является сравнение технологий синтеза изображений моделей местности наблюдаемых лётчиком через остекление кабины и технологий

изображений местности, наблюдаемых лётчиком на экране имитатора тепловизора при полётах на авиационном тренажёре. Возможность создания имитатора тепловизора, используя методы машинной графики, разработанные для синтеза узнаваемой модели выбранного участка местности видимого через остекление кабины авиационного тренажёра.

Материалы и результаты исследования. Имитатор тепловизора, при полёте на авиационном тренажёре, должен обеспечить лётчика возможностью решать задачи самолётовождения по визуально наблюдаемому инфракрасному изображению модели (ИК-модели) узнаваемой местности. Это предполагает синтез узнаваемого ИК-модели местности (размером 1500×1500 км) в реальном масштабе времени (с циклом не более 80 мсек) [12].

Если сравнивать внешний вид изображение местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн на рисунке 1 [23] и изображение местности, видимой в инфракрасном излучении на рисунке 2 [24], то наблюдатель во всех случаях может выделить из общего фона интересующие его объекты и по ним определить своё место положение в пространстве. Изображение 3D-объекта, видимое в световом диапазоне волн, как и изображение его синтезированной модели имеет чётко выраженный рисунок окраса всех его частей в широкой палитре цветов. ИК-изображение 3D-объекта имеет «размытый» окрас его частей и всегда монохромно.



Рисунок 1 – Вид на 3D-модель пространства, окружающего кабину авиационного тренажёра

Первоначально задачу синтеза визуально наблюдаемой на экране компьютера 3D-модели в зрительном диапазоне волн решали с помощью метода, получившего название «моделирование излучательной способности 3D-объекта». В его основе лежит моделирование движений всех световых лучей, отражённых от всех поверхностей 3D-объектов (с учётом особенности их форм и материалов из которого они сделаны), при заданном источнике (или нескольких источниках) освещения, включая отражение света от соседних

поверхностей. Это позволяло синтезировать на 2D-экране высококачественную 2D-проекцию 3D-объекта, близкую к отражению рассматриваемых объектов в зеркале. Методы «моделирования излучательной способности 3D-объекта» предполагают большое число вычислений, что не позволяет их использовать в реальном масштабе времени [20–22].



Рисунок 2 – Вид участка местности на экране тепловизионного летательного аппарата

Для решения задачи синтеза узнаваемой модели местности, видимой через остекление кабины авиационного тренажера, в середине XX века были разработаны требования к имитатору визуальной обстановки авиационного тренажера[25]:

- синтезировать на экране формирования промежуточного изображения в реальном масштабе времени видеоряды из 2D-проекций 3D-объектов с узнаваемой моделью выбранного участка местности, общим размером до 1500×1500 км (для этого разработаны специализированные программно-технические системы, названные «компьютерные генераторы изображений»);

- синтез в компьютерном генераторе изображения узнаваемой части модели местности, попавшей в камеру наблюдения, осуществляются за счёт обработки визуальных примитивов (полигоны и огни) и управляющих примитивов (два вида охватывающих сфер и разделяющие плоскости). Полностью описывающих все составные части моделей 3D-объектов (с учётом вариантов их окрашивания) и изменяемым порядком вызова из базы данных компьютерным генератором изображений с целью исключения на первом этапе синтеза моделей участков местности не попавших в камеру наблюдения и решения задачи исключения просвечивания дальней 3D-модели через ближнюю, при подвижном наблюдателе;

- доставлять в глаза человека высвеченные на экране формирования промежуточного изображения видеоряды из 2D-проекций 3D-объектов через специальные оптические системы активизирующих заданные составляющие зрительного аппарата человека, заставляя его поверить. На рисунке 3 показано, что он видит реальный 3D-объект и может при этом профессионально тренировать свой глазомер.

В отличие от методов «моделирования излучательной способности 3D-объекта», когда моделируется

прохождение максимального числа световых лучей, в компьютерном генераторе изображений обрабатываются визуальные примитивы в несколько этапов. На первом этапе, названном «сценарный процесс» из дальнейшей обработки убирают заключённые в специальные блоки, названные «охватывающими сферами» все примитивы, описывающие часть модели района полётов, не попавшую в камеру наблюдения. На втором этапе, названном «геометрический процесс» синтезируются математические модели 3D-объектов, попавшие в камеру наблюдения с учётом ракурса их проецирования на экране формирования промежуточного изображения. На третьем этапе, названном «клиппирующий процесс», отсекаются «лишние» части математических моделей 3D-объектов, если часть их видна, а часть не видна, так как не попала в камеру наблюдения. На последнем этапе, названном «видеопроцессом» математическая модель преобразуется в сигналы для высвечивания на экране формирования промежуточного изображения 2D-проекций всех моделей 3D-объектов;

- если используется безочковая одноканальная объемная система, то на экране формирования промежуточного изображения должны высвечиваться постоянно изменяемые изображения 2D-проекций моделей местности (в соответствии с движением модели летательного аппарата в модели пространства). Наблюдаемые в углах зрения соответствующие углы камеры наблюдения (это воздействует на конвергенцию зрительного аппарата человека) и настраивающая хрусталик глаза человека «на взор в бесконечность» (это воздействует на аккомодацию зрительного аппарата человека). Это позволяет человеку считать, что он видит реальный 3D-объект и при этом может профессионально тренировать свой глазомер;

- если используется двухканальная объемная система с диспаратными очками, то для каждого глаза человек синтезируется своё изображение в углах зрения соответствующих углам камер наблюдения.

Таким образом, современные имитаторы визуальной обстановки состоят из двух основных узлов – компьютерного генератора изображения с базой данных и ОС, но в технологический процесс синтеза 3D-модели, которую человек воспринимает как реальный 3D-объект включаются определённые составляющие его зрительного аппарата:

- при использовании одноканальной безочковой объемной системой – это аккомодация и конвергенция;

- при использовании двухканальной объемной системой с диспаратными очками – это диспаратность.

При использовании одноканального безочковой объемной системы на экране формирования промежуточного изображения должен высвечиваться видеоряд, полученный при подвижном наблюдателе, а при использовании объемной системы с диспаратными очками должны высвечиваться изображения отдельно для левого глаза и отдельно для правого глаза.

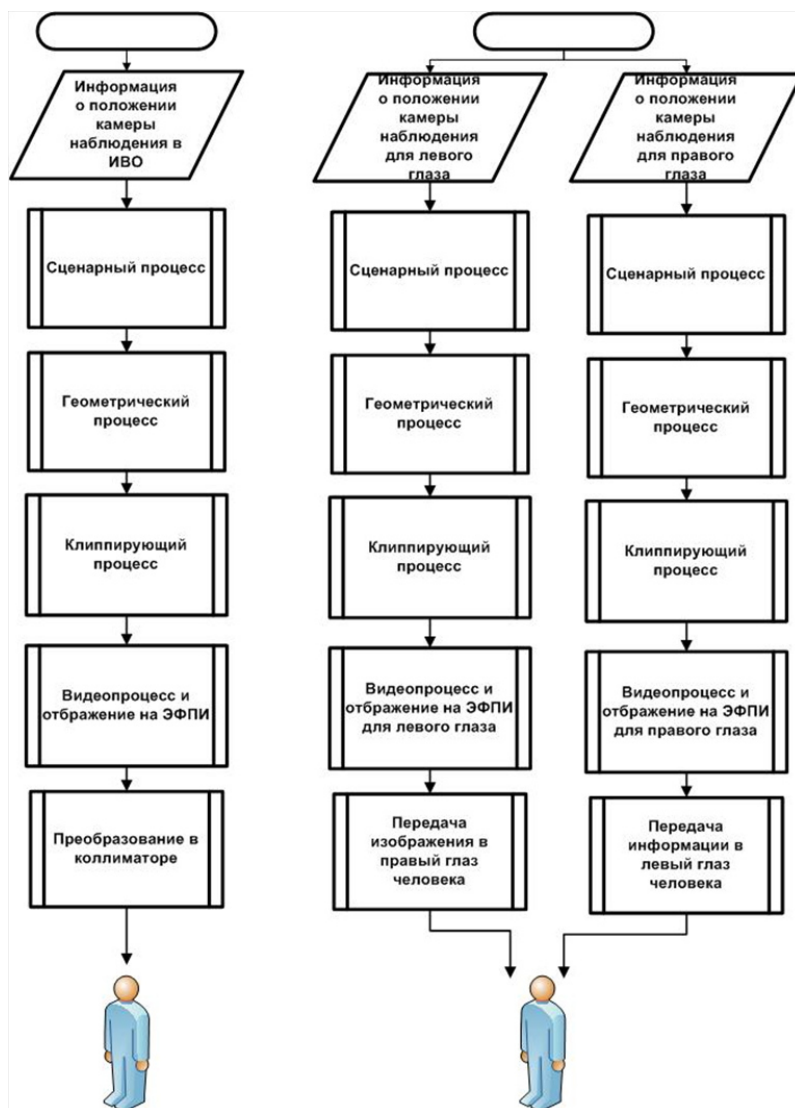


Рисунок 3 – Схема процессов обработки информации в двух типах эргатических опто-программно-технических систем «Имитатор визуальной обстановки», позволяющих человеку через остекление кабины авиационного тренажёра видеть 3D-изображение местности и тренировать свой глазомер

При использовании одноканальной безочковой объемной системы на экране формирования промежуточного изображения должен высвечиваться видеоряд, полученный при подвижном наблюдателе, а при использовании объемной системы с диспаратными очками должны высвечиваться изображения отдельно для левого глаза и отдельно для правого глаза.

Разработанные имитаторы визуальной обстановки позволили, при полётах на авиационном тренажере обучать лётчиков решению таких сложных задач, как визуальная посадка летательного аппарата на виртуальной посадочной полосе и обучение процессу дозаправки летательного аппарата в воздухе. Их успешные решения доказали эффективность замены методов синтеза визуально наблюдаемой модели 3D-объекта. Метод «моделирования излучательной способности 3D-объекта» был заменён на использование методов машинной графики реального времени, когда при синтезе визуально наблюдаемой модели 3D-объекта обрабатывают визуальные и управляющие примитивы. Особенность обработки визуальных примитивов

в учёте ракурса и дистанции их наблюдения, а также методов окрашивания их поверхностей. Это может быть монохромный окрас, не изменяемый на разных дистанциях наблюдения, или окрашивание полигонов с помощью текстуры. Опыты показали, что при использовании текстуры существует две пороговые дистанции. При приближении ближе первой пороговой дистанции изображение текстур расплывается на отдельные пиксели и цветовой рисунок пропадает. При удалении далее второй пороговой дистанции, отдельные цветные пиксели начинают конкурировать между собой, в результате цветовой рисунок теряется. Сложность расчёта дистанции качественного наблюдения моделей поверхностей, окрашенных текстурой привели к тому, что на практике её применяют для окрашивания полигонов на незначительном участке модели земной поверхности, как правило это модель взлетно-посадочной полосы с прилегающей местностью размером не более чем 15×15 км, полёт над которой возможен на высоте 400 м (выше имитируется полёт в «сплошной облачности»). При этом достаточно

чёткое изображение моделей 3D-объектов лётчик видит до высоты 50 м (высота, при достижении которой считается что выполнен взлёт летательного аппарата). Качество синтезированного изображения можно оценить по рисунку 4.



Рисунок 4 – Схема процессов обработки информации в программно-технической системе «Имитатор тепловизора», позволяющего лётчику при полётах на авиационном тренажёре наблюдать узнаваемую ИК-модель местности

В настоящее время, разработка имитатора тепловизора для авиационного тренажера является актуальной задачей, позволяющей обучать лётчика кроме пилотирования летательного аппарата ещё решению задач самолётовождения [1]. Есть попытки применить известные методы синтеза ИК-модели 3D-объекта, основанные на выполнении большого числа вычислений для расчёта яркости свечения каждой выбранной точки поверхности 3D-объекта путём моделирования движения инфракрасных лучей [14–18]. Анализ показал, что такой метод моделирования изображения ИК-модели 3D-объекта является близким аналогом получения изображения в зрительном диапазоне волн модели 3D-объекта методом «моделирования излучательной способности 3D-объекта», что как показала практика является неприемлемым для разработки имитаторов авиационного тренажера, так как требует большого числа вычислений.

При анализе как должна выглядеть ИК-модель местности по сравнению с 3D-моделью, видимой в зрительном диапазоне световых волн определено, что:

- тепловизор, предоставляет лётчику изменять параметры телесного угла камеры наблюдения (в то время как при синтезе 3D-модели видимой в зрительном диапазоне световых волн угловые размеры камеры наблюдения всегда являются константой);

- наблюдаемое в тепловизор изображение местности достаточно быстро меняется и зависит от времени суток, года и погодных условий (ранее при анализе требований к 3D-моделям местности видимой в зрительном диапазоне световых волн также было установлено, что вид местности постоянно меняется в зависимости от положения солнца и времени года,

в итоге было определено, что синтезируем две основных модели земной поверхности в заданное время года – полдень и полночь);

- ИК-модель 3D-объекта и его 3D-модель, видимая в зрительном диапазоне световых волн должны находиться в одной и той же точке модели окружающего пространства.

- моделировать ИК-изображение местности с учётом времени года и жёстко заданного времени суток (интервал моделирования не более часа);

- использовать для решения задачи удаления не видимых в данный момент моделей объектов сегменты, размер и форма которых ранее были разработаны для моделирования для визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн;

- моделировать видимые в ИК-диапазоне те же реперные объекты, которые ранее были отобраны для моделирования для визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн, но с конструкцией, позволяющей создавать узнаваемые 3D-модели, видимые в ИК-диапазоне с использованием уникального набора разработанных для этих целей текстур [26–28];

Тогда для решения разработки имитатора тепловизора целесообразно использовать компьютерные генераторы изображения 2D-проекции всех моделей 3D-объектов, назначение которого высветить на подключённому к экрану формированию промежуточного изображения видеоряда из 2D-проекции 3D-объектов, конструкция которых и их окрас [29] соответствует решению задачи – моделировать для человека узнаваемые им 3D-объекты, наблюдаемые при полёте на летательном аппарате на экране реального тепловизора.

Заключение. Для создания ИК-модели предлагается использовать программно-техническую систему в состав которой входит компьютерный генератор изображения (разработанный ранее для синтеза визуально наблюдаемой модели местности, видимой в зрительном диапазоне световых волн) и 2D-экран.

Методы подготовки исходной информации, включающие разработку конструкций моделей 3D-объектов, описанных с помощью визуальных и управляющих примитивов и уникального набора текстур, разработанных для окрашивания полигонов ИК-моделей с учётом их наблюдения в заданное время года и жёстко заданного времени суток (не более одного часа).

Модель района полётов для наблюдения через имитатор тепловизора должна включать те же модели реперных 3D-объектов, что и модель полётов этого же участка местности, разработанная для наблюдения в зрительном диапазоне световых волн (могут быть незначительные отклонения).

Модель района полётов для наблюдения через имитатор тепловизора делиться на сегменты аналогичные сегментам на которые делиться модели этого же участка местности, разработанная для наблюдения

в зрительном диапазоне световых волн, что решает задачу расположения моделей 3D-объектов в одной и той же точке модели пространства, наблюдаемого в зрительном диапазоне световых волн и в ИК-диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. В.Я. Мамаев, А.Н. Сияков, К.К. Петров, Д.А. Горбунов. Воздушная навигация и элементы самолётостроения: Учеб. пособие/В.Я. Мамаев, А.Н. Сияков, К.К. Петров, Д.А. Горбунов// СПбГУАП. СПб., 2002. – 256 с.
2. Агеев В.П., Балоев В.А., Иванов В.П., Насыров А.Р., Рагинов С.В. Тепловизионный прицел. Патент на промышленный образец RU 113567, 13.03.2019. Заявка № 2018502342 от 31.05.2018.
3. Nazmiev Munir M., Pavlycheva Nadezhda K. "New generation spectrographs" in Optical Engineering. 1994. Vol. 33.N 8.– pp. 2777-2782.
4. Андрианов С.Н., Зуйков В.А., Калачев А.А., Максимюк В.С., Мирумянц С.О., Самарцев В.В., Трофанчук Л.А., Шегеда А.М. Волоконно-оптические системы технического зрения для применения в науке, промышленности и делопроизводстве//Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2002. Т.66.№3. – С. 369-372.
5. Каракозов Ю.А., Селявский Т.В., Сухачев А.Б., Шапиро Б.Л. Вертолётный комплекс современного бортового вооружения. Патент на изобретение 2726301 C1, 13.07.2020. Заявка № 2019126083 от 16.08.2019.
6. Корриган Ф. Десять тепловизоров для дронов и как работает тепловизионная съёмка// Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020. № 1 (126). – С. 14-24.
7. Горный В.И., Латыпов И.Ш., Груздев В.Н., Кислицкий М.И. Возможность синтеза апертуры спутникового тепловизора//Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 7. – С. 25-36.
8. Agachev A.R., Larionov N.P., Lukin A.V., Mironova T.A., Nyushkin A.A., Protasevich D.V., Rafikov R.A. "Computer-generated holographic optics" in Journal of Optical Technology. 2002. Vol. 69. N 12. – pp. 871-878.
9. Роганов В.Р., Кувшинова О.А., Гринцов Д.М. К вопросу о семиотической составляющей видимой для лёгкого модели пространства за кабиной авиационного тренажёра/В сборнике: Пром-Инжиниринг. труды VI Всероссийской научно-технической конференции. Челябинск, 2020. – С. 63-67.
10. Роганов В.Р., Кувшинова О.А., Четвергова М.В. Программный модуль сортировки названий реперных объектов для формирования тезауруса реперных объектов трёх сцен имитаторов, синтезирующих изображение местности, видимое через остекление кабины авиационного тренажёра, на экране имитатора радиолокатора и на экране имитатора тепловизора/Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020616157, 11.06.2020. Заявка №2020615419 от 28.05.2020.
11. Roganov V., Mikheev M., Esimova N., Babich M., Butaev M., Kukuchkina O. "On the assessment of the image model of 3D models synthesized by optical-software-technical systems" in Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2020 - Proceedings. 2020. – pp. 9067481.
12. Роганов В.Р., Семочкина И.Ю., Жашкова Т.В. Системы моделирования трёхмерных визуально наблюдаемых моделей//Труды международного симпозиума "Надёжность и качество". 2015. Т. 1. – С. 192-196.
13. Зайцев А.В., Соловьев В.А., Кичулкин Д.А., Красавцев О.О. Сравнительная оценка способов обработки цифровых изображений, получаемых с помощью тепловизора при наблюдении беспилотных летательных аппаратов/Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. – С. 50-56.
14. Голобоков М.В., Данилевич С.Б. Оценка достоверности результатов проверки тепловизоров TESTO/В сборнике: Метрология, стандартизация и управление качеством. материалы II Всероссийской научно-технической конференции. 2017. – С. 11-12.
15. Кремис И.И., Толмачев Д.А. Коррекция остаточной неоднородности изображения в тепловизорах второго поколения на основе частотного разложения//Прикладная физика. 2016. № 6. С. 109-115.
16. Пантюшин А.Д., Трофимов К.Д., Немова Т.Н. Особенности эксплуатации и настройки тепловизора при ИК-обследовании/ В сборнике: Избранные доклады 62-й университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых. Томский государственный архитектурно-строительный университет. 2016. – С. 1293-1296.
17. Акименко Т.А., Филиппова Е.В. Тест-объект для контроля параметров тепловизоров/Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 12. – С. 308-311.
18. Тулаев В.В., Семке А.А., Маслова О.В. Тепловизор оптико-электронной станции "Вереск": оценка возможностей и перспектива применения/в сборнике: Проблемы повышения эффективности научной работы в оборонно-промышленном комплексе России. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. 2018. – С. 63-69.
19. Кияница А.О., Иванова В.В., Колобродов В.Г. Согласование параметров пирозлектрической матрицы и объектива тепловизора// Вестник Хмельницкого национального университета Технические науки. 2015.№1(221). – С. 107-111.
20. Вяткин С.И., Долговесов Б.С. Метод визуализации мультиобъёмных данных и функционально заданных поверхностей с применением графических процессоров//Автометрия. 2021. Т. 57.№2. – С. 32-40.
21. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Есин А.В., Жигач А.А., Чижик С.Е., Щербаков Р.А. Геометрическое моделирование и визуализация функционально заданных объектов//Автометрия. 1999.№6. – С. 84-92.
22. Долговесов Б.С., Городилов М.А., Шадрин М.Ю., Брагин В.И. Особенности реализации обработки, отображения и регистрации мультимедийных данных для тренажёрных комплексов ЦПК/Пилотируемые полеты в космос. 2018. № 4 (29). – С. 34-43.
23. https://yandex.ru/images/search?p=3&source=wiz&text=авиационный%20тренажер%20картинки&pos=129&rpt=simage&img_url=https%3A%2F%2Fbte.by%2Fupload%2Fiblock%2F8d%2F8dbacc7ca069fa4dbbb01ce23941bf.jpg&lr=49 (дата обращения 15.09.2021).
24. <https://www.youtube.com/watch?v=nCxImnT6H-4> (дата обращения 15.09.2021).
25. Предтеченский А.Н., Родченко В.В. Метод устранения статических и динамических ошибок воспроизведения движения в телевизионных имитаторах визуальной обстановки// Учёные записки ЦАГИ. Т.8. №2, 1977. – С.61-68.
26. Графикон' 92. Сборник трудов международной конференции. М.: АН СССР, 1992. – С. 143.
27. Вяткин С.И., Долговесов Б.С., Каипов Н.Р. Отображение текстуры на плоские и криволинейные поверхности, свободные формы и объёмы//Автометрия. 2002.№1. – С.17-24.
28. Mazurok B.S., Dolgovessov B.S., Artikov T.N., Artikov A.N., Korostelev E.I. "Integrated solution for interactive multimedia presentations" in 23rd International Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon 2013 - Conference Proceedings. 23. 2020. – pp. 152-155.
29. Elykov N.A., Belago I.V., Kuzikovskij S.A., Nekrasov Yu.Yu. On the approach to visual simulation of dynamic sea surface//Avtometriya. 2001.№2. – pp. 51-65.

Статья поступила в редакцию 23.09.2021

Статья принята к публикации 07.12.2021