



Федеральное космическое агентство

Федеральное государственное унитарное предприятие

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР  
им. М.В. ХРУНИЧЕВА**

**НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ  
им. А.А. МАКСИМОВА  
(НИИ КС)**

# **Ракетно-космическая техника. Информационные системы и технологии**

**Научные труды**

В двух томах

Под общей редакцией  
доктора технических наук,  
профессора М.И. Макарова

Том II

Главы VI, VII

Москва  
НИИ КС им. А.А. Максимова  
2012

- 6.31. Особенности использования геоинформационных технологий в навигационно-информационных системах мониторинга подвижных объектов.  
*Королев А.Н., Хуцешвили А.В.* ..... 322
- 6.32. К вопросу создания единого паспорта транспортного средства.  
*Беляев С.А., Афанасьев Д.Ю., Тепикина Л.Н.* ..... 332
- 6.33. Программные средства имитационного моделирования работы оптико-электронной системы навигации.  
*Ганченко В.В., Дудкин А.А., Инютин А.В., Поденок Л.П.* ..... 344
- 6.34. Технические средства автоматизации ввода крупноформатных графических изображений (документов).  
*Алексеев Г.И., Алексеев С.Г., Люлис А.И., Мильман В.А., Коновалов Е.И., Решетник С.В.* ..... 359
- 6.35. Современные методы мониторинга окружающей среды и технологии дистанционного зондирования Земли.  
*Иванов В.Л., Макаров М.И., Радьков А.В., Евстратов А.А.* ..... 375
- 6.36. Мобильная система химического мониторинга атмосферы.  
*Прямухин С.Б., Черный А.Н., Доморацкий А.В., Новиков Е.В.* ..... 387
- 6.37. Проблема космического мусора и основные направления ее решения.  
*Иванов В.Л., Медведев А.А., Голованев И.Н.* ..... 397
- 6.38. Сопряжение существующих и создаваемых информационных и технических систем мониторинга безопасности: постановка задачи.  
*Пичурин Ю.Г., Черный А.Н.* ..... 417

### 6.33. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

© Ганченко В.В., Дудкин А.А., Инютин А.В., Поденок Л.П.

В статье рассматривается проблема моделирования работы оптико-электронной системы БПЛА для задачи отладки алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров. Предлагается использовать виртуальный полигон, формируемый на основе данных, взятых из открытых источников (Google Earth, SRTM) для моделирования видеопотока данных, получаемых с камеры БПЛА. Приведены примеры работы программных средств моделирования различных оптических искажений и движения БПЛА в условиях внешнего воздействия на планер.

Ключевые слова: БПЛА, видеопоток, виртуальный полигон, моделирование, оптико-электронная система.

#### Введение

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) позволяет быстро получать данные необходимые для принятия оперативных решений. Однако отладка системы управления аппаратом может быть затруднена или невозможна по ряду причин. Для отладки системы управления БПЛА можно использовать виртуальный полигон (ВП). Компонентами ВП (рис. 1) являются программные средства (ПС) моделирования цифровой модели местности (ЦММ), моделирования метеоусловий и условий освещения, моделирования работы оптической системы БПЛА (камеры и объектива). ВП позволяет протестировать работу алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров для решения задачи уточнения положения БПЛА на местности. Широкое распространение в мире подоб-

ных систем говорит о высокой актуальности разработок в этой проблемной области, например, TerrainView – программное обеспечение визуализации трехмерных ландшафтов на основе виртуальной реальности [1].

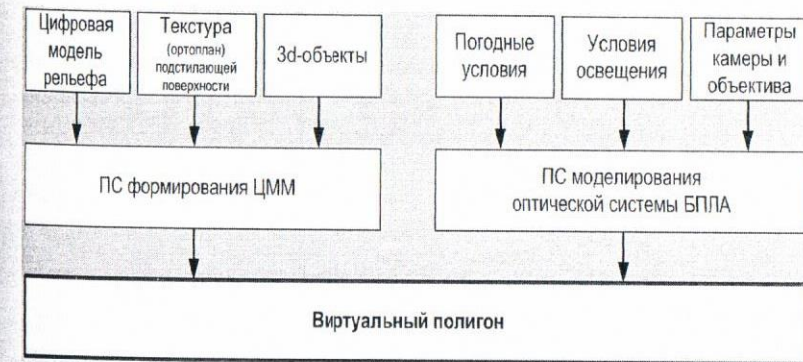


Рис. 1. Формирование виртуального полигона

В настоящей работе рассматривается исключительно маршевый участок полета, который характеризуется автономным режимом работы навигационного оборудования, функционирующего, как правило, в пассивном режиме дистанционного зондирования. При этом использование бортовых инерциальных навигационных средств дает погрешность в виде бокового смещения, которое может достигать нескольких метров на километр трассы [2, 3]. Неоднородность метеообстановки на трассе полета влияет на точность определения высоты и может вносить погрешность, достигающую нескольких метров [4].

В связи с этим на маршруте выделяются участки, где выполняется коррекция движения – зоны коррекции. В зонах коррекции навигационное оборудование БПЛА на основе бортовых навигационных измерений выполняет две основные задачи: определение местоположения и курса следования. На основании полученных данных вносятся поправки в параметры маршрута движения, обеспечивающие выход в следующую зону коррекции.

Основными задачами ВП являются (рис. 2) [9, 10]:

- 1) выбор и оценка наблюдаемости навигационных ориентиров (НО) вдоль маршрутного коридора;
- 2) моделирование потока кадров с бортовых видеокамер (видеопотока) на основе изображений, полученных средствами аэрокосмической съемки, а также данных о рельефе и объектах местности с учетом положения, направления, скорости движения ВПДА и положения камеры;
- 3) оценка алгоритмов поиска, идентификации (НО), сопровождения НО в видеопотоке.

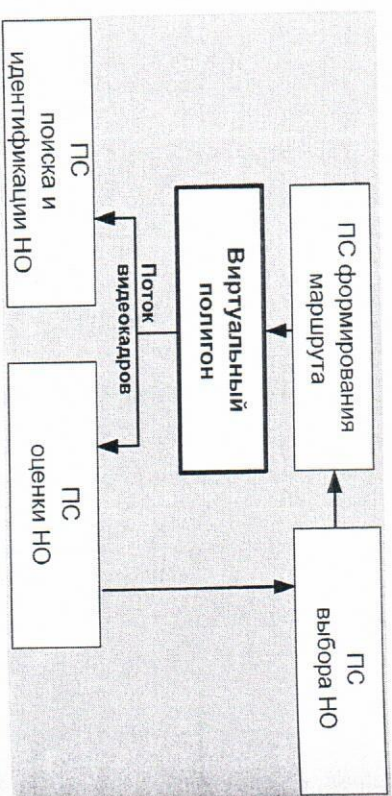


Рис. 2. Задачи, решаемые с помощью ВП

Оператор, формирующий маршрутный коридор, использует ВП совместно с имеющимися топографическими материалами для прокладки маршрута и оценки наблюдаемости окружающей местности, в том числе и НО, с учетом возможных отклонений, как по курсу, так и по высоте.

### 1. Требования к данным о местности

Актуальную и достоверную информацию о местности можно получить с помощью средств аэрокосмического наблюдения. Это, в частности:

- космические панхроматические и мультиспектральные снимки высокого пространственного разрешения;
- данные радиолокационного зондирования, в том числе данные радаров с синтезированной апертурой;
- аэрофотоснимки.

Космические снимки на данную территорию могут быть получены в разное время года, что позволяет в процессе выполнения навигационных измерений учесть сезонные изменения в зонах коррекции.

Одним из требований к требуемому разрешению аэрокосмических снимков, подходящих для формирования ВП. Будем считать, что ВПДА имеет две камеры с углом зрения  $60^\circ$ , наклонные под углом в  $30^\circ$  к вертикали. Таким образом, ширина изображения, полученная с двух камер, будет составлять при этом  $\sim 2 * 1,73H$ , где  $H$  – высота полета (например, для  $H=100$  м ширина изображения составит около 350 м).

Камера с разрешением  $1024 \times 1024$  пикселей и объективом с углом  $60^\circ$  имеет разрешение  $\sim 0,001$  рад/пел. При наклоне оси видирования в  $30^\circ$  изображение плоской поверхности будет иметь разрешение от 0,1 м/пел (надир) до 0,2 м/пел (край обзора).

Для того, чтобы обеспечить вышеуказанное разрешение при моделировании видеопотока от бортовой камеры с приведенными выше параметрами, необходимо иметь космические снимки с разрешением не менее, чем в два раза лучше, т.е. 0,05 м/пел.

С учетом того, что маршрут ВПДА в силу различных причин может пролетать в стороне от запланированного, основным источником информации, используя которую выполняется ориентирование и коррекция траектории, является периферийная область обзора камеры. Это позволяет снизить требования к разрешению приблизительно в два раза. С учетом того, что ориентирование и коррекция траектории должны выполняться и с учетом возможных атмосферных искажений, обусловленных осадками и туманом, требования к разрешению снимков для формирования ВП могут быть снижены на порядок в зависимости от климатических условий. Таким образом, разрешение космоснимков в 0,5–1 м/пел можно считать достаточным для моде-

лирования изображений, с которыми имеет дело система коррекции полетной траектории.

Снимки, выполненные в надир и с наклоном менее  $30^\circ$  от вертикали для целей тестирования алгоритмов и проведения испытаний ВП могут быть получены из Google. Пример данных с разрешением порядка  $0,25$  м располагается в точке с координатами  $lat = 36.95774366$  и  $lon = -76.3296604$ ; пример с разрешением порядка  $1$  м располагается в точке с координатами  $lat = 32.8098748$  и  $lon = 35.0425887$ .

ВП для отладки алгоритмов коррекции полетной траектории должен формироваться на территорию размером не менее  $10$  км диаметром, которую БПЛА пересечет за время около  $50$  с при скорости около  $200$  м/с. Общий размер изображений с разрешением не хуже  $0.5$  м на такой полигон будет составлять  $300-400$  Мпкс.

Для создания ВП из снимков разрешением  $0.25$  м потребуются  $1.6$  Тпкс или около  $5$  Тбайт (панхроматические снимки). Если навигация осуществляется по НО, расположенным вне транспортного коридора, размеры ВП должны быть соответственно увеличены. В этой связи следует отметить, что разрешение «внешней» части ВП может быть существенно снижено.

Для построения ВП ограничимся данными, находящимися в открытом доступе, такими как данные миссии SRTM. Эти данные представляют собой набор высот в узлах прямоугольной сетки географических координат. В зависимости от конкретной территории доступны данные с пространственным разрешением от  $30$  до  $90$  м. Дискретизация по высоте составляет  $1$  м. Реальная погрешность по высоте не известна, поскольку полученные данные скорректированы исходя из характера местности. В частности, для водоемов, имеющих размеры порядка нескольких сот метров и более, высоты уравнины. Поскольку данные SRTM достаточно грубы для реальной работы с полигоном, требуется их аппроксимация.

## 2. Технические характеристики ВП

### 2.1. Хранение данных о местности

Для организации хранения и доступа к данным ВП разрабрана база данных, в которой хранятся:

– значения рельефа с требуемой точностью на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) по данным SRTM ( $30$  м);

– данные об объектах, представляющих интерес с точки зрения НО.

Фактически, эта база представляет ЦММ, которая, в первом приближении, состоит из ЦМР (цифровой карты высот, DEM), текстуры покрытия и объектов.

ЦМР представляет собой поверхность в виде набора высот на регулярной сетке (матрица высот), набора высот на нерегулярной сетке (высоты в узлах триангуляции), кривых равных высот (горизонтали). ЦМР может задаваться на сетке географических координат (широта, долгота) или в проекции. В частности, данные SRTM заданы на сетке географических координат. Матрица высот и набор и высоты в узлах триангуляции практически не требуют обработки перед применением их для моделирования местности. ЦМР на основе горизонталей требует конвертации в матрицу или триангуляцию.

Текстура покрытия строится на основании мозаики снимков, выполненных в надир или ортотрансформированных. Базовое изображение текстуры покрытия (базовое покрытие) представляет собой нормальную проекцию реального покрытия на эллипсоид. Базовое покрытие формируется из мозаики. На основе ЦМР и наложенного базового покрытия строится визуализация модели местности уровня  $2d5$  – покрытие «плоский» рельеф, на котором нет объектов, имеющих высоту.

### 2.2. Совмещение рельефа и снимков

Для этой цели можно использовать практически любую ГИС, умеющую работать с DEM и расстровыми объектами. К таким ГИС можно отнести ГИС GRASS, которая обеспечивает импорт расстровых данных и данных SRTM, а также их проектирование.

Исходные SRTM данные находятся в системе географических координат (широта, долгота). Для аппроксимации исходных SRTM данных могут быть использованы любые методы, например, бикубические сплайны, поскольку исходная сетка регулярна. Однако после трансформации SRTM в проекцию покрытия сетка теряет регулярность и для практической аппроксимации требуется использовать, например, RVF-базис.

При размере полигона в 10x10 км сетка будет иметь порядка 105 узлов, что затрудняет прямое использование RVF методов. Проблема решается построением адаптивной к локальной кривизне триангуляции и использованием финитного базиса.

### 2.3. Рендеринг сцены

Визуализация окружающей ВПДА сцены, как ее «видит» аппаратура ОЭСН, выполняется с помощью библиотеки OpenGL [5].

В связи с тем, что 2d5 объекты на местности могут быть искажены до неузнаваемости, база данных ВП помимо текстового покрытия поддерживает модели фиксированных объектов, имеющие высоту и вертикальную структуру, таких как строения, мосты. Они формируют объектный слой визуализации (модель уровня 3d). Их рендеринг выполняется с помощью OpenGL.

Программа визуализации сцены со стороны бортовых камер обеспечивает:

- манипулирование системами координат, связанными со сценой (модельная СК, ВПДА и камерой (камера может быть закреплена на турели);
- прямое управление координатами положения камеры и ее ориентацией в системе координат сцены;
- построение (заданые параметров) некоторой кривой, которая может представлять собой траекторию движения или другим образом связывать степени свободы перемещения объекта;
- выбор осей системы координат, связанной с некоторой траекторией;
- перемещение камеры вдоль траектории;
- перемещение камеры в нормальной к траектории плоскости;

- связывание вращательных степеней свободы объекта;
- связывания вращательных степеней свободы камеры;
- управление апертурными характеристиками камеры;
- управление искажениями оптики камеры;
- протоколирование (log) манипуляций с объектами;
- запуск внешних программ с передачей им координатных данных и результатов рендеринга.

Поддерживаются режимы визуализации 2d5 и ортоплан с возможностью визуализации без текстурного покрытия (только рельеф) и с покрытием.

### 2.4. Учет метеоусловий, времени суток и времени года

Большая часть моделирования влияния метеоусловий и освещения выполняется с помощью библиотеки OpenGL.

В процессе работы ВП могут быть внесены различного рода искажения в полученные изображения, включая геометрические, поканальные яркостные, изменена контрастность.

Геометрические искажения полностью определяются характеристиками съемочной аппаратуры (в большей степени объективом) и носят осесимметричный характер. Объектив может также искажения, обусловленные неидеальностью оптической системы, что проявляется в неоднородном размытии изображения по полю зрения.

Искажения, вызванные условиями наблюдения в общем случае не однородны по полю зрения.

Искажения перспектив, которые могут быть вызваны применением широко- и сверхширокоугольной оптики в камере моделируются с помощью кривых Безье. Кадр из видеопоследовательности подается на вход функции, моделирующей искривление поверхности по эллипсу.

Импульсные и точечные помехи также моделируются на кадрах из видеоряда прохождения ВП привнесением на них случайных помех в виде черных дефектов по равномерному или неравномерному закону распределения вероятности случайной величины.

### 3. Состав и функции программных средств

Для адекватного функционирования ПС имитационного моделирования работы оптико-электронной системы навигации (ОЭСН) при движении ВПЛА по маршруту, с одной стороны, необходимы входные данные, с определенной степенью реалистичности отражающие окружающую обстановку, наблюдаемую с борта, а с другой – физически непротиворечивые данные о характере движения ВПЛА на маршруте участка траектории. Таким образом, совместно с ПС имитационного моделирования работы ОЭСН были разработаны ПС моделирования окружающей обстановки (сцены) и динамики движения изделия. Эти ПС в контексте поставленной задачи имитационного моделирования работы ОЭСН образуют комплекс ПС ВП, в который входят:

- 1) подсистема моделирования окружающей обстановки (АРЕНА);
- 2) подсистема моделирования работы ОЭСН (ВИЗУАЛИЗАТОР).

#### 3.1. Подсистема моделирования окружающей обстановки

Подсистема моделирования окружающей обстановки состоит из:

- ПС базы данных (БД АРЕНА);
- ПС редактора сцены;
- ПС подготовки геодезных (ГИС АРЕНА);
- ПС подготовки 3d-элементов сцены (КОНСТРУКТОР).

Назначение и функции БД АРЕНА:

- хранение и обеспечение доступа к информации о районах пролетания возможных маршрутов (РПВМ) доставки изделия в контексте задач ВП;

– хранение и обеспечение доступа к данным о рельефе местности на территорию РПВМ;

– хранение и обеспечение доступа к данным аэрокосмической съемки на территорию РПВМ;

– хранение и обеспечение доступа к данным моделей 3d-элементов сцены РПВМ;

Назначение и функции ПС редактора сцены:

– сборка сцены из компонент, хранящихся в БД АРЕНА, для отображения ПС ВИЗУАЛИЗАТОР;

– представление собранной сцены в формате ВИЗУАЛИЗАТОРА.

Назначение и функции ГИС АРЕНА:

– стандартные для ГИС функции импорта геодезных, их обработки и визуализации, формирование карт и схем.

Назначение и функции ПС КОНСТРУКТОР:

– формирование иерархии параметризованных 3d-моделей объектов ВП, имеющих высоту, вертикальную структуру и боковую текстуру покрытия;

– манипулирование 3d-объектами (сборка/разборка, масштабирование расстровой компонент, присвоение атрибутов в контексте функций отображения подсистемой ВИЗУАЛИЗАТОР).

#### 3.2. Подсистема моделирования работы ОЭСН

Подсистема моделирования работы ОЭСН состоит из:

- ПС управления условиями наблюдения;
- ПС управления ориентацией камеры;
- ПС управления свойствами камеры;
- ПС рендеринга кадра камеры из описания сцены;
- ПС формирования видеопотока.

Функции ПС управления условиями наблюдения:

– установка освещения (расположение источника и его свойства);

– установка параметров видимости (оптические свойства среды, характер распространения света).

Функции ПС управления ориентацией камеры:

– установка углов визирования.

Функции ПС управления свойствами камеры:

– установка апертуры, фокусного расстояния;

– установка искажений для объектива;

– установка спектральных характеристик.

Функции ПС рендеринга кадра камеры из описания сцены:  
 – рендеринг кадра камеры из описания сцены.  
 Функции ПС формирования видеопотока:  
 – формирование видеопотока из кадров (обработка и упаковка результатов рендеринга согласно выбранному стандарту).

На рис. 3 приведен пример видеокadra, который формируется ВП на основе данных, взятых из открытых источников: ортоплан подстилающей поверхности взят из Google Earth для участка местности, расположенного между 32° и 33° северной широты и 114° и 115° западной долготы (Северная Америка). Данные о рельефе получены из архива SRTM с разрешением 30 м, дискретизация по высоте составляет 1 м [8].

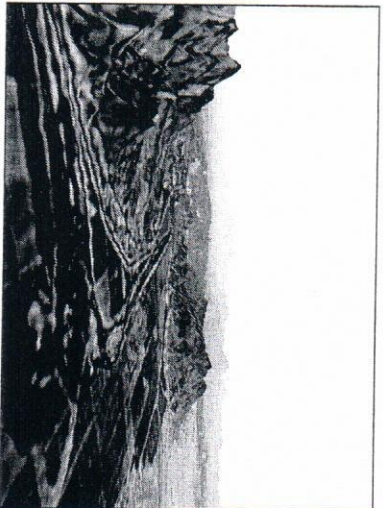


Рис. 3. Пример работы ВП

Использованы следующие параметры для моделирования: ВПЛА находится на высоте 400 м, камера имеет апертурный угол 45° и наклонена на 5° вниз относительно линии горизонта, погодные условия – ясно, легкая дымка.

Все ПС, кроме ПС управления ориентацией камеры и управления свойствами камеры, реализованы с использованием библиотеки OpenGL. Для учета ориентации ВПЛА в условиях внешнего воздействия и влияния оптических свойств камеры разработаны ПС, которые представляют собой внешний фильтр для обработки видеоданных программой менсодер. Структура

взаимодействия модулей при вызове внешних обработчиков видеоданных приведена на рис. 4.

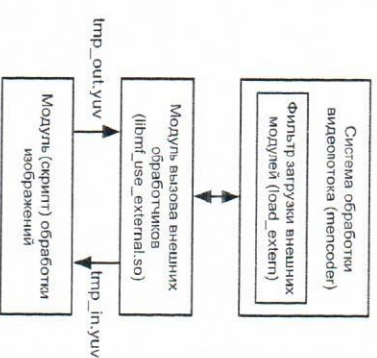


Рис. 4. Структура взаимодействия модулей при вызове внешних обработчиков

Эти ПС работают по следующему алгоритму:

- 1) Получение кадра и его параметров от вызывающего фильтра.
- 2) Сохранение полученных данных в формате UUV в файл `mp_in.uuv`.
- 3) Запуск указанного в параметрах внешнего модуля (скрипта) обработки изображения (если им внешнего модуля не указано, то используется имя по умолчанию).
- 4) Загрузка данных из файла `mp_out.uuv` (в формате UUV).
- 5) Удаление временных файлов.
- 6) Выгрузка полученных после обработки данных в результирующий кадр.

ПС моделирования движения ВПЛА в условиях ветрового воздействия на планер используются для вычисления углов рыскания, тангажа и крена ВПЛА при наличии случайных внешних воздействий;

Пример моделирования внешнего воздействия на движение ВПЛА приведен на рис. 5: смещение ВПЛА в пространстве по осям X, Y, Z (рис. 5а), изменение углов рыскания, тангажа и крена (рис. 5б).



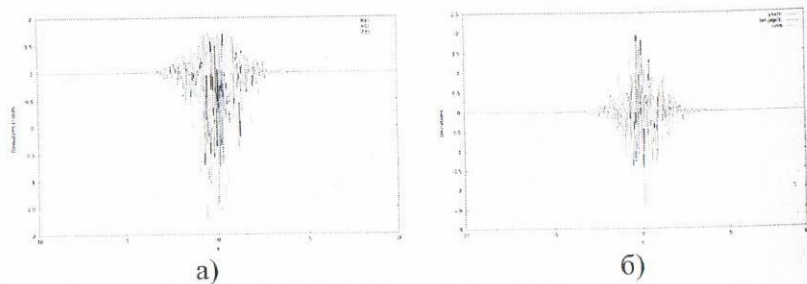


Рис. 5. Пример моделирования внешнего воздействия на движение БПЛА: а) *смещения БПЛА в пространстве*; б) *изменение углов рыскания, тангажа и крена*

Пример кадра видеопотока с учетом внешнего воздействия на движение БПЛА приведен на рис. 6. Параметры дрожания сгенерированы согласно данным, приведенным на рис. 5. Эти параметры могут быть получены и от внешнего источника.

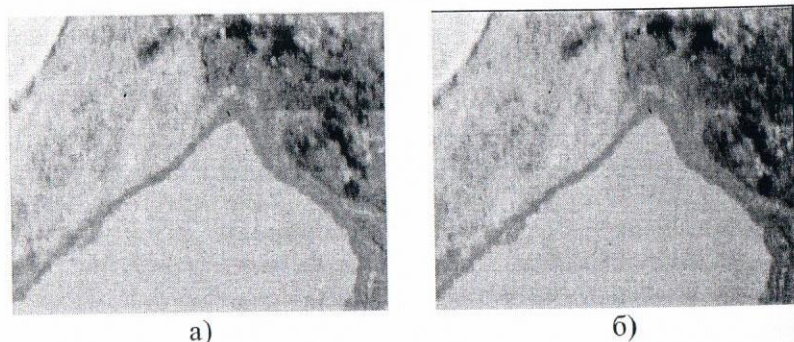


Рис. 6. Исходный кадр (а) и результат сдвига в процессе внесения искажения «дрожание» (б)

Для учета влияния оптических свойств камеры используется модуль внесения дисторсии, что позволит моделировать различные оптические искажения. Примеры кадров видеопотока, с привнесенными искажениями, приведены на рис. 7.



Рис. 7. Пример обработанного кадра видео потока: а) *исходный кадр*; б) *«подушка»*; в) *«бочка»*; г) *последовательно «подушка» и «бочка»*

### Выводы

В ходе работ по разработке ВП были созданы ПС моделирования работы оптико-электронной системы БПЛА, позволяющих протестировать работу алгоритмов поиска и идентификации навигационных ориентиров для решения задачи уточнения положения БПЛА на местности. Использование библиотеки OpenGL значительно упростило решение задач визуализации сцен, а также процесс моделирования погодных условий и условий освещения. Также показаны примеры работы ПС моделирования различных оптических искажений и движения БПЛА в условиях внешнего воздействия на планер.

## Л и т е р а т у р а

1. TerrainView-Globe [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: [http://www.viewtec.net/uploads/docs/terrainview\\_e.pdf](http://www.viewtec.net/uploads/docs/terrainview_e.pdf). – 14.05.2010 г.
2. Menon P.K., Ohlmeyer E J. Integrated design of agile missile guidance and autopilot systems // Control Engineering Practice Volume 9, Issue 10, October 2001, Pages 1095-1106.
3. Avionics Navigation Systems. M. Kayton and W.R. Fried, 2d Edition, John Wiley & Sons, Inc. 1997. ISBN 0-471-54795-6, - 769 с.
4. Матвеев Л.Т., Смирнов П.И. Основы авиационной метеорологии. – М.: Воениздат, 1955. – 332 с.
5. OpenGL. Программирование трехмерной графики. Серия: Мастер программ. – Изд.: БХВ-Петербург, 2002. – 304 с.
6. Зуев В.Е., Креков Г.М. Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 2. Оптические модели атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 256 с.
7. Медвед Д.Б. Влияние погодных условий на беспроводную оптическую связь [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.mgvc.ru/pdf/weather.pdf>. – 14.05.2010 г.
8. The Shuttle Radar Topography Mission [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>. – 14.05.2010 г.
9. Ганченко В.В. и др. Программная реализация виртуального полигона для моделирования оптико-электронной системы БПЛА // Искусственный интеллект. – Украина: Институт проблем искусственного интеллекта. – 2010. – № 3. – С. 453–461.
10. Ганченко В.В. и др. Виртуальный полигон для моделирования оптико-электронной системы БПЛА // Материалы VII научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли» (Системы ДЗЗ-2010), г. Адлер, 13–17 сентября 2010 г. – М.: 2010. – С. 336–341.

Поступила в редакцию 6.03.2012 г.