

УДК: 681.518.3

Разработка модели системы синтетического видения для перспективных гражданских самолётов

Дяченко С.А.

ОАК-Центр комплексирования,

Авиационный переулок, 5, Москва, 125167 Россия

e-mail: dyachenkosergey33@yandex.ru

Аннотация

В статье исследуется модель авиационной системы синтетического видения, формирующей на пилотажных индикаторах трёхмерное изображение закабинной обстановки на основе бортовых баз данных. В частности, разработаны архитектура (в соответствии с концепцией интегрированной модульной авионики) и программно-алгоритмическое обеспечение системы, позволяющее в режиме реального времени синтезировать трёхмерный план топографических участков земной поверхности с высокой степенью информативности. Приводятся результаты моделирования разработанного программно-алгоритмического обеспечения на примере реальных географических объектов (вулкан Ключевская сопка, остров Кунашир).

Ключевые слова: система синтетического видения, летательный аппарат, 3D-моделирование, ситуационная осведомлённость экипажа, человеко-машинный интерфейс.

Введение

Перспективным направлением развития комплексов бортового оборудования является применение концепции интегрированной модульной авионики (ИМА), позволяющей существенно снизить весовые и стоимостные характеристики бортового оборудования воздушных судов (ВС), упростить процесс сертификации и верификации самолётных систем и оборудования [1, 2].

В условиях роста требований к повышению безопасности полётов современных ВС и расширения функционала комплекса бортового оборудования (КБО) актуальной задачей является создание и внедрение в состав авионики гражданских самолётов ряда вспомогательных систем, обеспечивающих ситуационную осведомлённость экипажа относительно закабинной обстановки и снижающих до минимума вероятность человеческой ошибки в случае критической ситуации [3, 4].

Результаты психофизических исследований показали, что при приближении к земле определение пилотами пространственного положения летательного аппарата (ЛА) осуществляется по линии горизонта и объектам, находящимся в зоне посадки. Однако в условиях пониженной видимости возможно возникновение зрительных иллюзий, формирующих ложное представление о положении самолёта [5, 6].

Для устранения вышеуказанного фактора, способного негативно повлиять на управление ВС, предназначены системы технического видения (СТВ), предоставляющие экипажу необходимую информацию об ориентации борта и окружающем пространстве в удобной для человека визуализированной форме.

Различают следующие типы СТВ [7, 8, 9, 10]:

- системы улучшенного видения (СУВ), формирующие изображение местности, наблюдаемой из кабины экипажа, по данным от бортовых инфракрасных камер;
- системы синтетического видения (ССВ), позволяющие восстанавливать трёхмерную (3D) модель подстилающей поверхности с учётом препятствий и объектов аэродромной инфраструктуры;
- системы комбинированного видения, представляющие синтез двух вышеуказанных типов СТВ и реализующие совмещение сенсорного и синтезированного изображений закабинной обстановки;
- системы увеличения дальности видения, как и СУВ базирующиеся на информации от инфракрасных камер, а также осуществляющие искусственную подсветку возможных препятствий и ключевых ориентиров в процессе полёта.

Среди приведённых СТВ наиболее предпочтительны ССВ, не требующие установки дополнительного оборудования на самолёт и позволяющие получать 3D-изображение подстилающей поверхности с высокой степенью информативности.

ССВ представляет собой программно-аппаратное средство, формирующее в бортовых вычислителях и отображающее на пилотажных индикаторах изображение топографического участка местности, наблюдаемого из кабины экипажа.

К числу компаний, ведущих разработки в области ССВ, относятся: Honeywell, Rockwell Collins, Universal Avionics, Chelton Flight Systems, Garmin, L-3 Avionics Systems, NexAir Avionics, Avidyne Corporation (США); Thales (Франция); Elbit Systems (Израиль); ФГУП «ГосНИИАС» (Россия) [7, 11, 12].

Примеры 3D-изображений, синтезированных ССВ компаний Thales, Universal Avionics, представлены на рис. 1, 2 соответственно.

Целью настоящей работы является разработка модели ССВ с применением концепции ИМА для перспективных гражданских самолётов транспортной категории.



Рисунок 1 – Пример 3D-изображения, сформированного ССВ компании Thales



Рисунок 2 – Пример 3D-изображения, сформированного ССВ компании Universal Avionics

Назначение и архитектура системы синтетического видения

Для обеспечения основной функции ССВ – восстановления и вывода на пилотажные индикаторы 3D-изображения топографического участка местности, наблюдаемого из кабины ЛА – в режиме реального времени (РВ) необходимо решать следующие задачи:

- 1) получения данных от бортовых систем о текущих географических координатах, высоте и пространственной ориентации ЛА;
- 2) извлечения фрагмента базы данных (БД) подстилающей поверхности, соответствующего навигационному положению ВС;
- 3) получения из бортовых БД информации о препятствиях, представляющих потенциальную опасность для самолёта на текущей фазе полёта, и объектах аэродромной инфраструктуры;
- 4) синтезирования 3D-изображения участка местности, наблюдаемого из кабины экипажа на основе перечисленных в предыдущих пунктах данных;
- 5) формирования мнемонических предупреждений об опасных ситуациях (столкновение с землёй, препятствиями и т. д.);
- 6) индикации полученного кадра на пилотажных дисплеях.

Решение вышеперечисленных задач определяет назначение ССВ:

- повышение ситуационной осведомлённости экипажа относительно окружающего пространства в условиях ограниченной видимости (например, ночное время, туман) и при полном её отсутствии;

- снижение нагрузки на экипаж за счёт возможности быстрого оценивания и прогнозирования пространственного положения и ориентации ВС.

Основное отличие при формировании 3D-моделей различных элементов кадра (земного ландшафта, препятствий, объектов аэродромной инфраструктуры) состоит лишь в содержимом БД. Таким образом, результаты, представленные в работе, получены путём решения ключевых среди перечисленных ранее задач 2, 4:

- загрузки фрагмента БД подстилающей поверхности, соответствующего текущему пространственному положению самолёта;

- восстановления трёхмерного плана рельефа местности на основе загруженного участка БД.

Информация об ориентации ВС в пространстве в любой момент времени принята известной.

Основными элементами ССВ являются вычислитель и индикаторы, непосредственно реализующие основную функцию ССВ. Однако обеспечить синтезирование и индикацию трёхмерного кадра невозможно при отсутствии входных данных, среди которых выделяются:

- БД подстилающей поверхности, препятствий, объектов аэродромной инфраструктуры, загружаемые в бортовой сервер данных перед вылетом согласно плану полёта;

- текущее пространственное положение ВС в виде информации о широте, долготе и абсолютной высоте полёта, поступающей от GPS / ГЛОНАСС, и значений

углов тангажа, рыскания и крена, источником которых является инерциальная навигационная система (ИНС);

– аэропорты вылета и посадки, запасной аэропорт, сведения о которых поступают от вычислительной системы самолётовождения (ВСС);

– визуальная информация о непреднамеренном сближении летательного аппарата с подстилающей поверхностью, выдаваемая системой раннего предупреждения приближения к земле (СРППЗ).

Разработанная структурная схема ССВ представлена на рис. 3.

Предложенная структура соответствует концепции ИМА, основу которой составляет открытая сетевая архитектура и единая вычислительная платформа [13]. Функция системы синтетического видения реализуется в виде распределённого программного обеспечения на платформе ИМА, что является отличительной особенностью разработанной модели относительно аналогов.

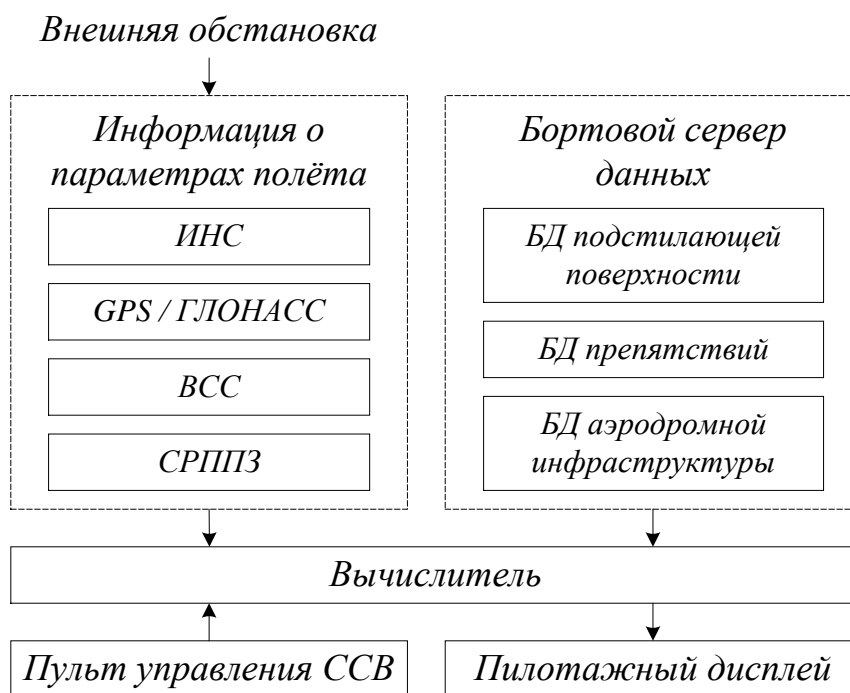


Рисунок 3 – Структурная схема разрабатываемой ССВ

Навигационные данные, формируемые ИНС, GPS / ГЛОНАСС, ВСС, СРППЗ, совместно с текущими фрагментами БД подстилающей поверхности, препятствий и объектов аэродромной инфраструктуры из бортового сервера данных передаются в вычислитель, синтезирующий 3D-изображение закабинной обстановки, которое далее индицируется на пилотажном дисплее. Пульт управления ССВ обеспечивает возможность экипажа включать и отключать вывод сгенерированного трёхмерного кадра на индикатор.

Выбор базы данных подстилающей поверхности

Среди элементов информационного обеспечения ключевыми для функционирования ССВ являются БД подстилающей поверхности, препятствий, объектов аэродромной инфраструктуры и текущий вектор состояния ЛА [14].

Поскольку линейные и угловые координаты самолёта в любой момент времени приняты известными, требуется проанализировать требования, предъявляемые к бортовым БД подстилающей поверхности и произвести выбор конкретной БД для дальнейшей разработки ССВ.

Согласно приложению 15 к конвенции о международной гражданской авиации ИКАО [15] массивы электронных данных о местности формируются в виде БД со следующим разделением на районы:

- район 1 полностью охватывает территорию государства;
- район 2 указан в сборнике аэронавигационной информации (AIP) государства или ограничен радиусом 45 км от контрольной точки аэродрома;

- район 3 составляет зона, примыкающая к рабочей площади аэродрома и занимающая в горизонтальном направлении от боковой кромки взлётно-посадочной полосы (ВПП) 90 м, а также 50 м от боковых кромок других частей рабочей площади;
- район 4, предусмотренный для ВПП с возможностью точных заходов на посадку, образует область, простирающаяся на расстояние 900 м от порога ВПП и 60 м с каждой стороны продлённой осевой линии ВПП.

Требования к точности БД подстилающей поверхности приведены в табл. 1 [15].

Таблица 1 – Количественные требования к данным о подстилающей поверхности

Критерий	Район 1	Район 2	Район 3	Район 4
Точность в вертикал. плоскости, м	30	3	0,5	1
Разрешающая способность в вертикал. плоскости, м	1	0,1	0,01	0,1
Точность в горизонтал. плоскости, м	50	5	0,5	2,5
Доверительный уровень, %	90	90	90	90

Следовательно, для дальнейшей разработки следует выбирать БД рельефа Земли, максимально приближенную к указанным в табл. 1 показателям точности.

Также ряд прочих требований, предъявляемых к бортовым БД, представлен в документах Р-315, КТ-200А [16, 17] и др.

В качестве БД подстилающей поверхности для разработки прототипа ССВ удобно использовать одну из распространённых цифровых моделей рельефа (ЦМР) Земли, общие характеристики которых приведены в табл. 2 [18, 19].

Таблица 2 – Характеристики распространённых цифровых моделей рельефа Земли

Название	Год создания	Исходные данные	Разработчик (страна)	Режим распространения	Площадь покрытия	Абсолют. ошибка по высоте, м
SRTM	2003	Интерферометрические пары радиолокационных снимков, полученные с космического корабля "Shuttle"	NASA, NGA (США)	Свободный	60 с. ш. - 56 ю. ш.	5,6-9
GMTED2010	2010	Различные ЦМР (преимущественно SRTM)	USGS, NGA (США)	Свободный	84 с. ш. - 56 ю. ш.	50-82
ASTER GDEM2	2011	Стереопары оптических снимков Terra Aster*	METI, NASA (Япония, США)	Свободный с ограничениями на использование	83 с. ш. - 83 ю. ш.	12-30
NEXTMap World 30	2012	Различные ЦМР (SRTM, ASTER GDEM2 и др.)	Intermap (США)	На коммерческой основе	100 % поверхности Земли	≤ 10
AW3D	2015	Снимки, полученные со спутника ALOS	NTT DATA, RESTEC (Япония)	На коммерческой основе	100 % поверхности Земли	7-3

* Для замены неполных или некорректных фрагментов рельефа использованы данные других ЦМР (в основном SRTM).

Из табл. 2 следует, что ЦМР NEXТMap World 30 и AW3D, обладающие наилучшими показателями (в частности, наибольшей площадью покрытия Земли и низкой абсолютной ошибкой по высоте), являются коммерческими продуктами, открытый доступ к которым отсутствует. БД GMTED2010 и ASTER GDEM2 находятся в свободном доступе, однако они существенно уступают ЦМР SRTM в плане точности геоданных.

На основе проведённого анализа в рамках работы в качестве необходимой БД подстилающей поверхности принята общедоступная ЦМР Земли SRTM.

SRTM – радарная топографическая съёмка большей части территории земной поверхности (около 80 %) в диапазоне от 60° северной широты до 56° южной широты за исключением океанов. БД содержит 12 Тб данных, доступ к которым предоставляется геологической службой США.

Фрагмент БД SRTM – квадрат размерности 90 м × 90 м (3° × 3°), представленный в виде матрицы размером 1201 × 1201 пикселей. Значение пикселя определяет высоту над уровнем моря в соответствующей точке ЦМР. В случае отсутствия данных пиксель кодируется значением -32768.

БД SRTM удобна для разработки и отладки программно-алгоритмического обеспечения прототипа ССВ, поскольку является общедоступной.

На борту ВС требуется использование более точных и полных массивов, удовлетворяющих рассмотренным ранее требованиям. Однако, алгоритмическое наполнение системы не зависит от точности БД, что обуславливает их взаимозаменяемость.

Программно-алгоритмическое обеспечение системы синтетического видения

Перед началом работы модели ССВ требуется загрузить фрагменты БД SRTM из сети Интернет, соответствующие полётному маршруту. Далее, если ССВ включена, осуществляется синтезирование трёхмерного участка местности на основе загруженных двумерных данных. Полученное в географической системе координат (ГСК) изображение при необходимости возможно преобразовать к системе координат UTM.

Итоговый 3D-кадр закабинной обстановки поступает на индикацию на пилотажный дисплей. При изменении положения самолёта в пространстве обеспечивается коррекция трёхмерного плана в соответствии с обновлёнными навигационными данными.

Обобщённый алгоритм работы модели ССВ приведён на рис. 4.

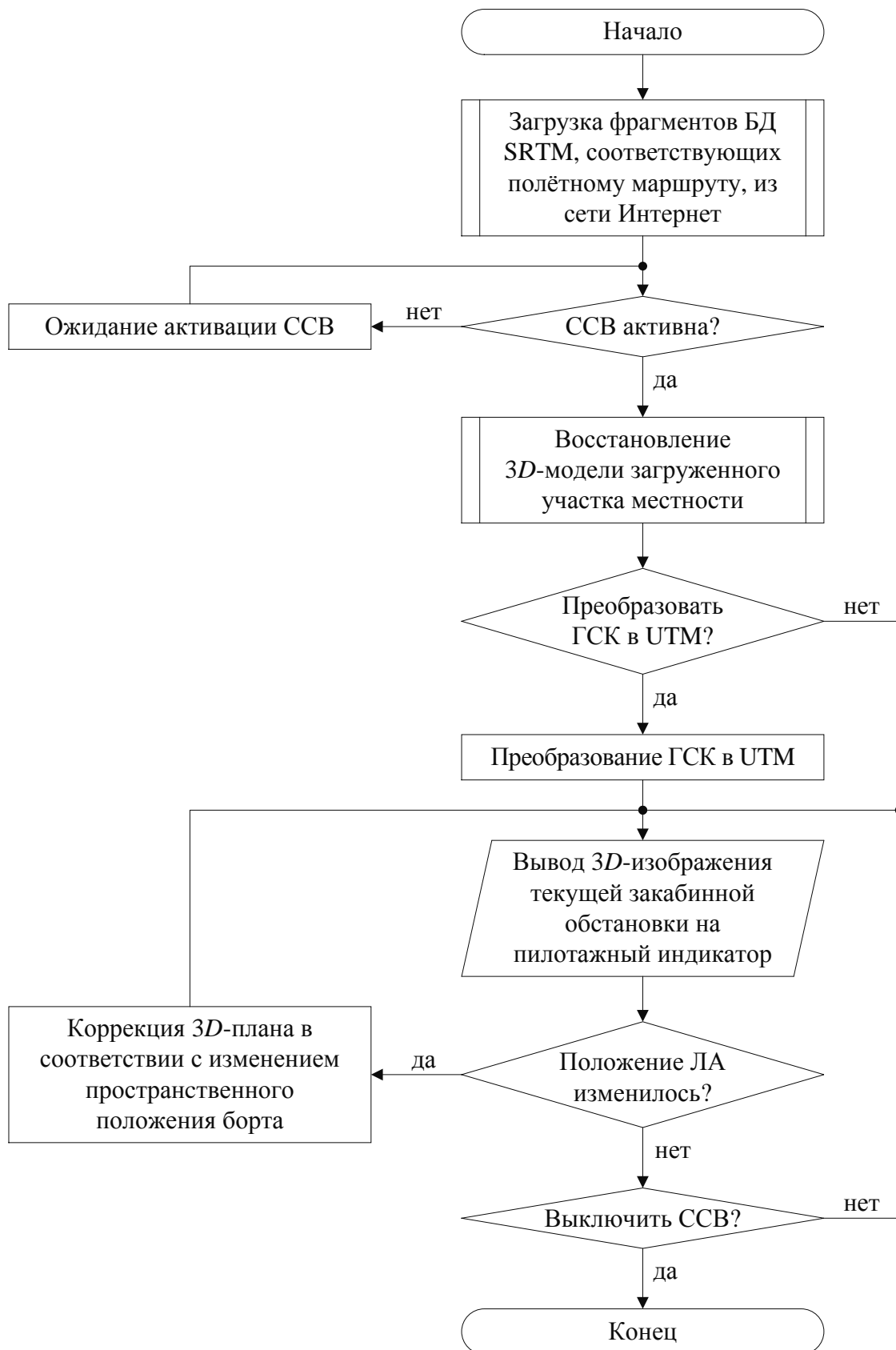


Рисунок 4 – Обобщённый алгоритм работы модели ССВ

На рис. 5 изображена сетка разбиения двумерной (2D) карты подстилающей поверхности, на основе которой реализовано восстановление 3D-плана рассматриваемого топографического участка местности.

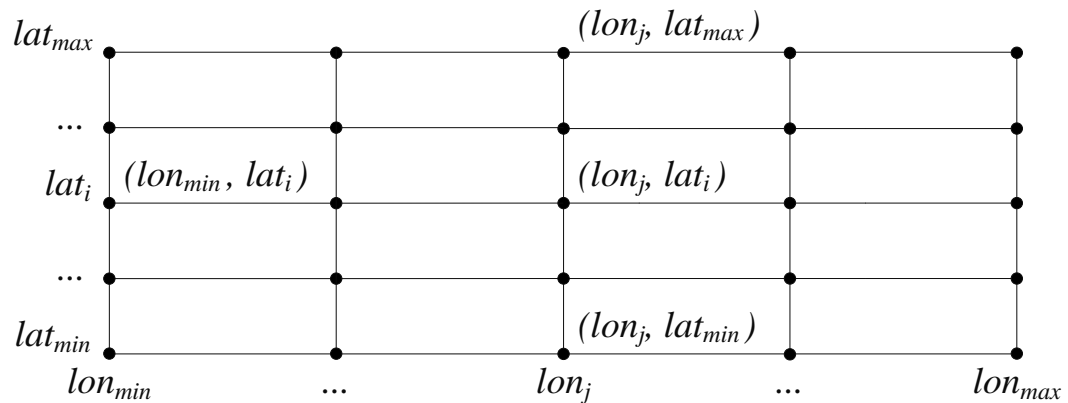


Рисунок 5 – Сетка разбиения 2D-карты подстилающей поверхности

Рис. 5 поясняет обозначения разработанной блок-схемы функции загрузки соответствующего полётному маршруту фрагмента БД SRTM из сети Интернет, представленной на рис. 6.

Для получения 2D-модели топографического участка рельефа, соответствующего плану полёта, из БД SRTM следует задать координаты необходимой прямоугольной области земной поверхности (в ГСК). Далее осуществляется проверка на принадлежность введённых значений допустимому диапазону SRTM. Если указанные координаты соответствуют диапазону, выполняется вход на сайт геологической службы США для последующей загрузки данных.

После в БД SRTM производится поиск фрагмента, характеризуемого координатами (lat_{min}, lon_{min}) , где: lat_{min} , lon_{min} – наименьшие значения широты и долготы в пределах участка местности, модель которого требуется загрузить.

Найденный фрагмент загружается, и далее осуществляется перебор значений широты и долготы в рамках заданной прямоугольной области с загрузкой соответствующих фрагментов на каждой итерации цикла. Если текущий фрагмент неполон, обеспечивается линейная интерполяция отсутствующих данных.

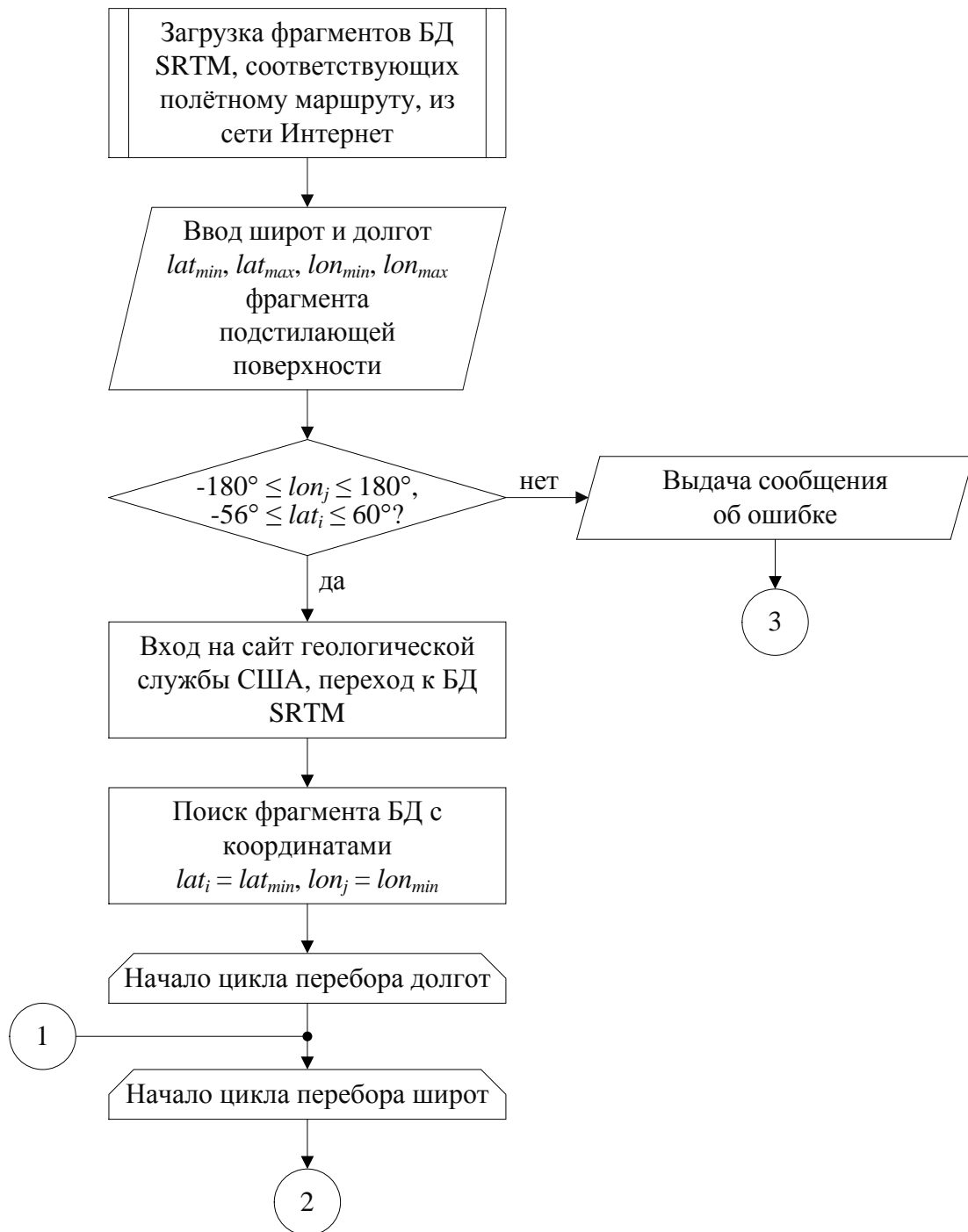


Рисунок 6 – Блок-схема загрузки фрагмента БД SRTM, соответствующего полётному маршруту, из сети Интернет

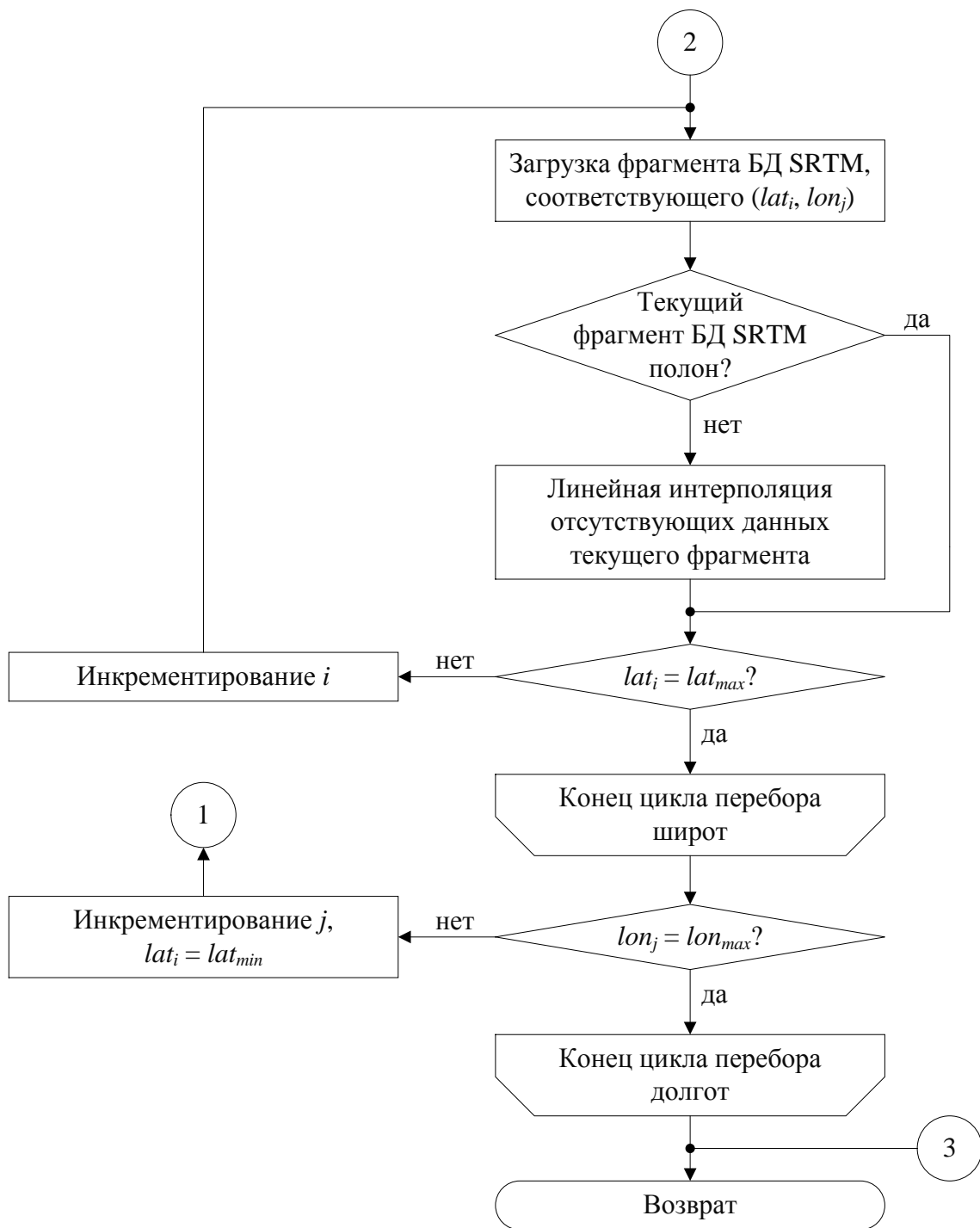


Рисунок 6 (продолжение) – Блок-схема загрузки фрагмента БД SRTM, соответствующего полётному маршруту, из сети Интернет

Алгоритм получения трёхмерного изображения подстилающей поверхности на базе SRTM-фрагментов основан на полигональном моделировании. Восстановление 3D-плана местности осуществляется путём построения

параметризованной поверхности, заданной матрицами $X(m, n)$, $Y(m, n)$, $Z(m, n)$, где: m, n – переменные параметризации ($m, n \in \mathbb{N}$); $X(m, n)$, $Y(m, n)$, $Z(m, n)$ – матрицы координат точек трёхмерного пространства, описывающих поверхность. Каждый узел сетчатой поверхности имеет, в общем случае, четыре ближайшие соседние точки, что обеспечивает разбиение её большей части на ячейки с четырьмя рёбрами.

Высокая информативность формируемых изображений (при малых шагах сетки) и простота реализации обусловили применение описанного метода при разработке алгоритмического обеспечения прототипа ССВ.

Для окраски полученной модели рельефа выбран гипсометрический метод, согласно которому каждому промежутку (гипсометрической ступени) между горизонталями (линиями, соединяющими точки одинаковой высоты) соответствует определённый оттенок принятой цветовой шкалы, обычно имеющей 58 градаций.

3D-изображения подстилающей поверхности с гипсометрической окраской высотного распределения наглядны и при удачном подборе шкалы весьма реалистичны.

Для удаления нелицевых областей трёхмерных моделей с учётом особенностей архитектуры индикаторных вычислителей ЛА выбран простой в реализации и экономный в плане затрачиваемого машинного времени алгоритм z-буфера [9, 20].

В качестве среды разработки программного обеспечения (ПО) выбрана система аналитических вычислений MATLAB R2013a.

Разработанное ПО состоит из одного txt- и двух m-файлов:

– "import_SRTM_database_index.txt" является сопровождающим текстовым документом, указывающим директории расположения каждого фрагмента БД ЦМР SRTM на сайте геологической службы США;

– "main_script.m" (главный скрипт) осуществляет генерирование векторного трёхмерного изображения топографического участка, наблюдаемого из кабины экипажа;

– "import_SRTM_database.m" требует подключение к сети Интернет для соединения с сайтом геологической службы США и загрузки необходимых частей БД SRTM в формате ".hgt".

Кроме восстановления трёхмерных изображений земной поверхности разработанное ПО обеспечивает выдачу сообщений о возникающих ошибках.

Моделирование работы системы синтетического видения

Для подтверждения работоспособности созданного прототипа ССВ требуется получить 3D-изображения реальных географических объектов, в качестве которых выбраны вулкан Ключевская сопка (Камчатка, Российская Федерация) и остров Кунашир (Курильские острова, Российская Федерация).

Трёхмерное изображение Ключевской сопки, взятое с сайта Google Maps [21], представлено на рис. 7.



Рисунок 7 – 3D-изображение Ключевской сопки, взятое с сайта Google Maps

Полученное в результате работы программно-алгоритмического обеспечения модели ССВ трёхмерное изображение данного вулкана представлено на рис. 8.

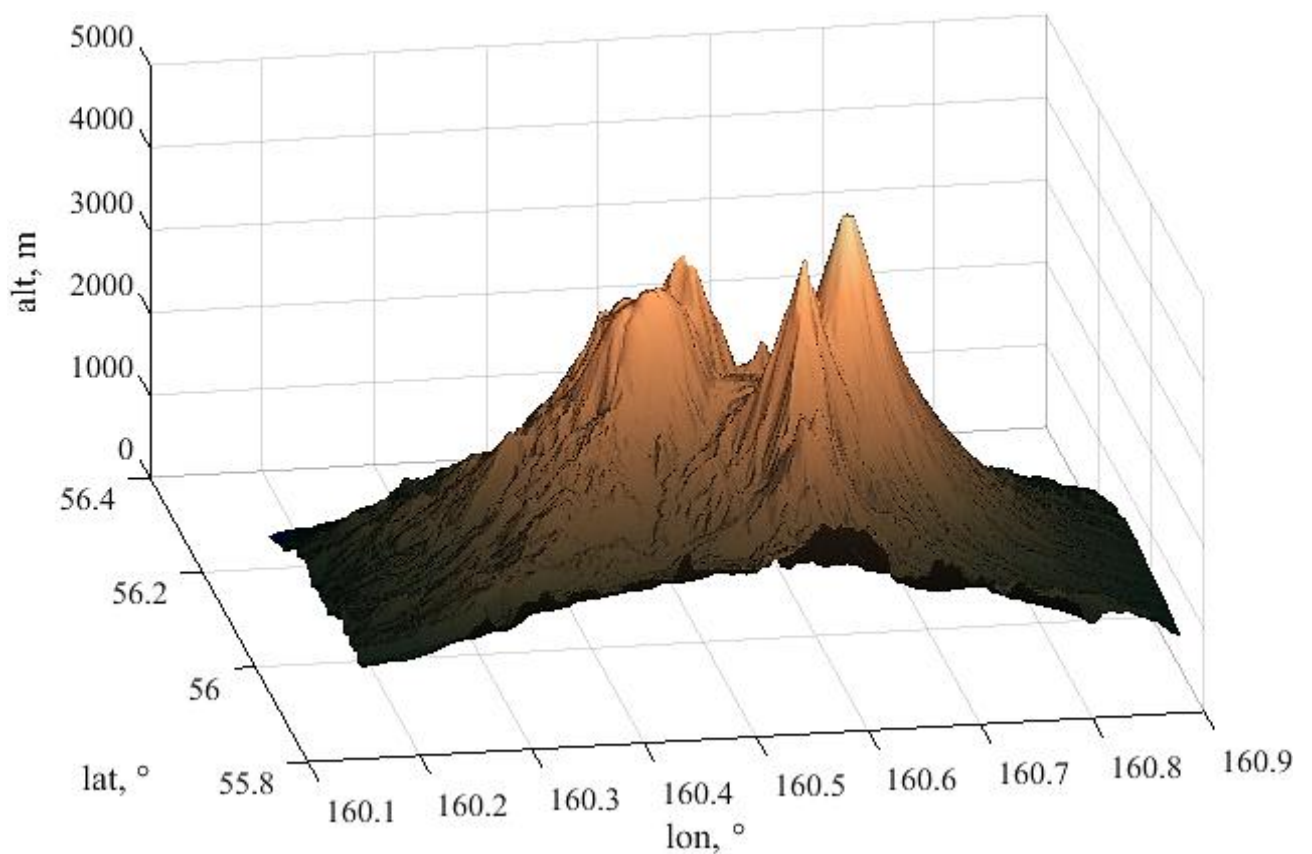


Рисунок 8 – Восстановленное 3D-изображение Ключевской сопки

Аналогично для острова Кунашир: трёхмерное изображение, взятое с сайта Google Maps [21], и 3D-модель объекта изображены на рис. 9, 10 соответственно.

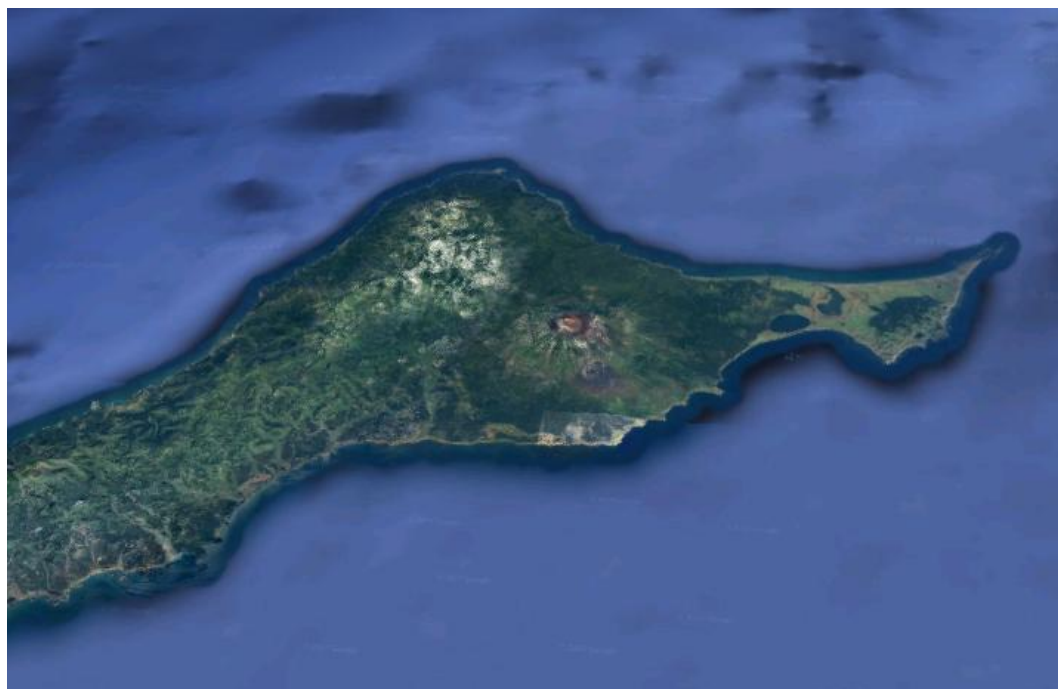


Рисунок 9 – 3D-изображение острова Кунашир, взятое с сайта Google Maps

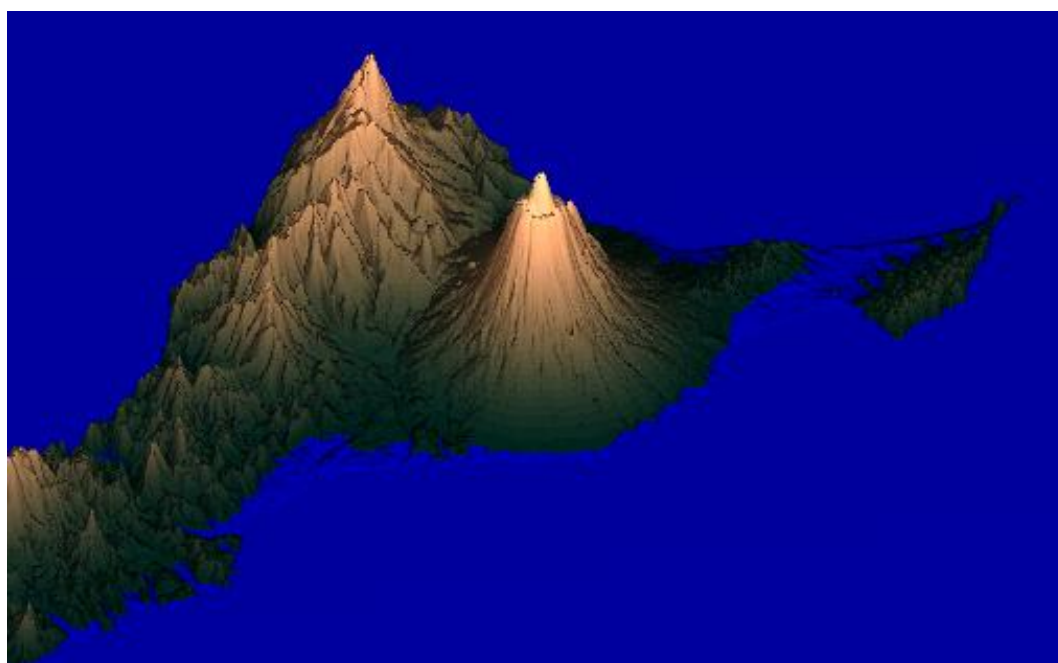


Рисунок 10 – Восстановленное 3D-изображение острова Кунашир

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение прототипа ССВ позволяет получить трёхмерные изображения топографических участков местности с высокой степенью информативности (см. рис. 7-10).

Генерируемые 3D-модели рельефа отвечают требованиям документа Р-315 [16]. В частности, для подтверждения выполнения требования к частоте обновления кадра (15 Гц для квадратного территориального участка со стороной 74,08 км) проведены контрольные серии экспериментов (50 групп по 100 объектов в каждой). Установлено, что в среднем восстановление трёхмерного изображения одного фрагмента занимает 0,031 с (с среднеквадратичным отклонением 0,00907 с), что соответствует частоте около 32 Гц.

Заключение

В работе приведены результаты разработки и моделирования предложенного прототипа ССВ для перспективных гражданских самолётов транспортной категории с применением концепции ИМА, предназначенного для получения трёхмерного плана подстилающей поверхности, наблюдаемого из кабины экипажа.

Предложенная структура ССВ соответствует требованиям концепции ИМА, реализуется на имеющемся наборе бортового оборудования и не требует в отличие от существующих аналогов отдельного вычислительного модуля.

Созданная модель ССВ соответствует основным руководящим документам по разработке современных гражданских самолётов в целом и СТВ (в частности: Р-315 [16], КТ-200А [17] и др.).

Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение ССВ генерирует 3D-изображения топографических участков земной поверхности высокой степени информативности.

Оценка быстродействия разработанных и использованных алгоритмов, проведённая по результатам серий из 5000 экспериментов по синтезированию изображений для различных территориальных участков земной поверхности размером 74,08 км (40 морских миль), подтвердила выполнение требования руководства Р-315 к частоте обновления кадра ССВ.

Библиографический список

1. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66 - 71.
2. Авакян А.А. Унифицированная интерфейсно-вычислительная платформа для систем интегральной модульной авионики // Труды МАИ. 2013. № 65. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=35845>
3. Mayer U., Kaiser J., Gross M. Award's synthetic vision flight guidance display as basic display for a free flight environment // IFAC Proceedings Volumes, Austria, 1999, vol. 32, issue 2, pp. 6558 - 6563.
4. Kramer L.J., Bailey R.E., Ellis K.K. Using Vision System Technologies for Offset Approaches in Low Visibility Operations // Procedia Manufacturing, The Netherlands, 2015, vol. 3, pp. 2373 - 2380.

5. Береговой Г.Т., Завалова Н.Д., Ломов Б.Ф. и др. Экспериментально-психологические исследования в авиации и космонавтике. – М.: Наука, 1978. – 301 с.
6. Доброленский Ю.П., Завалова Н.Д., Пономаренко В.А. и др. Методы инженерно-психологических исследований в авиации. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
7. Визильтер Ю.В. Enhanced and synthetic vision system implementation based on IMA platform // Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития интегрированной модульной авионики», Москва, 29-30 октября 2012, 51 с.
8. Дятлова О.С. К вопросу информационного обеспечения экипажа воздушного судна // Информационно-управляющие системы. 2011. № 4. С. 24 - 29.
9. Неретин Е.С., Дяченко С.А., Дудкин С.О. и др. Применение систем технического видения при заходе на посадку в сложных метеоусловиях // XXV Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Сборник трудов. (Алушта, 14-20 сентября 2016). – М.: Технология, 2016. – С. 119.
10. Гуров В.С., Колодыко Г.Н., Костяшкин Л.Н. и др. Обработка изображений в авиационных системах технического зрения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. – 240 с.
11. Шелагурова М. С. Система информационного обеспечения синтезированного видения для бортовых комплексов летательных аппаратов: Дисс. канд. техн. наук. – М.: 2015. – 223 с.

12. Vygolov, O.V. Enhanced and synthetic vision systems development based on integrated modular avionics for civil aviation // 32nd IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, USA, East Syracuse, 2013, 14 p.
13. Зайцев Д.Ю., Неретин Е.С., Рамзаев А.М. Разработка архитектуры универсального модульного контроллера авионики // Труды МАИ. 2016. № 85. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66460>
14. Wiesemann T., Schiefele J., Kubbat W. Multi-resolution terrain depiction on an embedded 2D/3D synthetic vision system // Journal of Aerospace Science and Technology, 2005, vol. 9, Issue 6, pp. 517 - 524.
15. ICAO. Annex 15 to the Convention on International Civil Aviation: Aeronautical Information Services. 13th Edition. International Civil Aviation Organization, Canada, Montreal, 2010, 144 p.
16. Руководство по минимальным стандартам характеристик авиационных систем улучшенного видения, искусственного видения, комбинированных систем искусственного видения и бортовых систем увеличения дальности видения. Р-315. – М.: АР МАК, 2011. – 86 с.
17. Квалификационные требования КТ-200А. Обработка аэронавигационных данных. – М.: АР МАК, 2004. – 55 с.
18. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E. et al. The Shuttle Radar Topography Mission // Reviews of Geophysics, 2007, no. 45 (2), pp. 1 – 33, doi:10.1029/2005RG000183.
19. Бусурин В.И., Желтов С.Ю., Кудрявцев П.С. Аэрокосмические визуальные пространственно-временные системы. – М.: МАИ, 2015. – 200 с.

20. Лунёв Е.М., Неретин Е.С., Дяченко С.А. и др. Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники // Труды МАИ. 2016. № 86. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=66366>
21. Google Карты. URL: <https://maps.google.ru/>