

**АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
БОРТОВОЙ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ УЛУЧШЕННОГО И
СИНТЕЗИРОВАННОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

Бондаренко А. В., Бондаренко М. А., Докучаев И. В.

**THE ENHANCED AND SYNTHESIZED VISION
ONBOARD AUTONOMOUS SYSTEM HARDWARE REALIZATION
OF MOBILE EQUIPMENT**

Bondarenko A. V., Bondarenko M. A., Dokuchaev I. V.

Аннотация

Статья посвящена аппаратному решению задачи навигации мобильной техники посредством сбора, синтеза, обработки, микширования и вывода видеоинформации в реальном времени, полученной от источников гетерогенного мультиспектрального диапазона, таких как радиолокаторы, лазерные датчики, ИК и ТВ камеры. Подобные системы используются для обеспечения информированности в сложных внешних условиях, как при автоматическом управлении, так и в случае пилотирования. Предложена аппаратная архитектура и алгоритмы решения задачи улучшения видения, повышения наглядности и сопоставления видеоинформации с телеметрией и базой навигационных данных. Навигационными данными могут быть трёхмерные модели объектов, географические карты, изображения со спутников, координаты объектов. Уделено внимание аппаратному решению проблемы надёжности системы.

Annotation

The article presents the mobile equipment navigation task hardware decision by gathering, synthesis, processing, multiplexing and real time video data output. This data is got from sources of heterogeneous multispectral diapason, such as radio

locators, LASER LIDARs, IR and TV cameras. The similar systems are used for information supporting in difficult environment conditions both at automatic control and in case of pilotage. The hardware architecture and the enhanced vision, alignment video and navigation data algorithms are proposed. The navigation data can content 3D models of the environment objects, geographic maps, images from the artificial satellites, objects' coordinates. Hardware reliability problem decision is considered.

Ключевые слова: системы технического зрения, обработка и синтез изображений, цифровые камеры, системы навигации, системы улучшенного видения.

Keywords: technical vision system, image processing and synthesis, digital cameras, navigation and enhanced vision systems.

Введение

Под мобильной техникой понимают устройства, способные перемещаться в некоторой среде. Такие устройства могут быть автономными (роботами), пилотируемыми и автоматическими (управляться оператором на расстоянии). Наиболее важная задача управления – задача навигации мобильной техники в реальном времени в условиях недостаточного объёма информации при работе в сложной внешней обстановке, такой как ограниченная видимость из-за тумана, дыма и прочих неблагоприятных метеоусловий. Неверное решение из-за недостаточной и/или ложной информированности является основной причиной аварий и невыполнения миссий при управлении мобильной техникой. В настоящее время на рынке имеется множество устройств, работающих в тех диапазонах спектра электромагнитных волн, где влияние факторов внешней среды сказывается в меньшей степени. Обычно используется пара камер видимого (ТВ) и ИК диапазона, выводящая изображения оператору техники (пилоту) на разные дисплеи. При этом лишь в ряде систем к выводимым на дисплей изображениям применяются функции обработки (улучшения), в основном – простейшие процедуры контрастирования. Согласно анализу

данных из открытых источников о системах навигации, большинство сертифицированных коммерческих систем, предлагаемых ведущими мировыми производителями, представляют собой неинтеллектуальные системы «датчик-дисплей», обеспечивающие передачу изображений и навигационных данных на различные индикаторы оператору мобильной техники и/или системе управления без какого-либо их анализа и сопоставления. [1]

Сейчас широко распространена аппаратная реализация многофункциональных бортовых систем модульной архитектуры: каждая функция, выполняемая системой, реализована в виде некоторого автономно работающего устройства со своей собственной памятью и блоком обработки (процессором). Такая архитектура называется модульным крейтом. К настоящему моменту утверждён стандарт для таких архитектур. [2] Несомненно, крейт даёт удобство сборки из стандартных модулей, тестирования, отладки, сертификации и комплектации без модификаций многофункциональной системы, однако требует существенную нагрузку по обмену данными между автономными устройствами и существенно большее количество интерфейсов. А всё это в совокупности сильно усложняет структуру и логику работы, повышает массу и габариты, увеличивает уровень потребляемой энергии, понижает общую производительность и надёжность системы. К тому же эта архитектура изначально не предназначалась для решения задач технического зрения. В силу сказанного, предлагается объединить архитектурно все вычислительные функции универсальной системы навигации в едином автономном вычислительном устройстве.

Постановка задачи

Несмотря на общность задачи навигации мобильной техники, можно достаточно определённо назвать требования, предъявляемые к подобным системам, а именно:

- Надёжность.
- Устойчивость: слабое изменение входных данных влечёт за собой слабое

изменение выходных.

- Интеллектуальность: авто настройка и принятие решений, удобство и качество выдаваемых данных.
- Актуальность выходной информации, определяет работу системы навигации как работу в реальном времени.

Следуя требованиям, можно выделить основные подзадачи, решаемые системой навигации мобильной техники:

1. Предобработка изображений, полученных из источников разнородного спектрального диапазона.
2. Комплексирование данных изображений в одну картину более информативную, чем каждое из его составляющих по отдельности.
3. Распознавание объектов на синтезированном изображении.
4. Сопоставление информации об объектах с базой навигационных данных.
5. Совмещение сопоставленной информации из базы данных с объектами на изображении.
6. Вывод результата на индикаторное устройство.

Исходя из опыта разработки систем технического зрения, задачу обеспечения надёжности системы предлагается решить с помощью:

- применения современной элементной базы и отработанных оригинальных схемотехнических решений,
- обеспечения автономной работы системы: даже в случае отказа управляющей бортовой ЭВМ, система продолжит работу,
- дублирования критических узлов и компонентов системы, посредством реализации соответствующей схемы 100% резервирования,
- протоколирования всей выходной информации и телеметрии на твердотельный носитель (“чёрный ящик”),
- испытания готовой системы в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации

Архитектура универсальной системы навигации

На рис. 1 представлена функциональная схема предлагаемой системы:

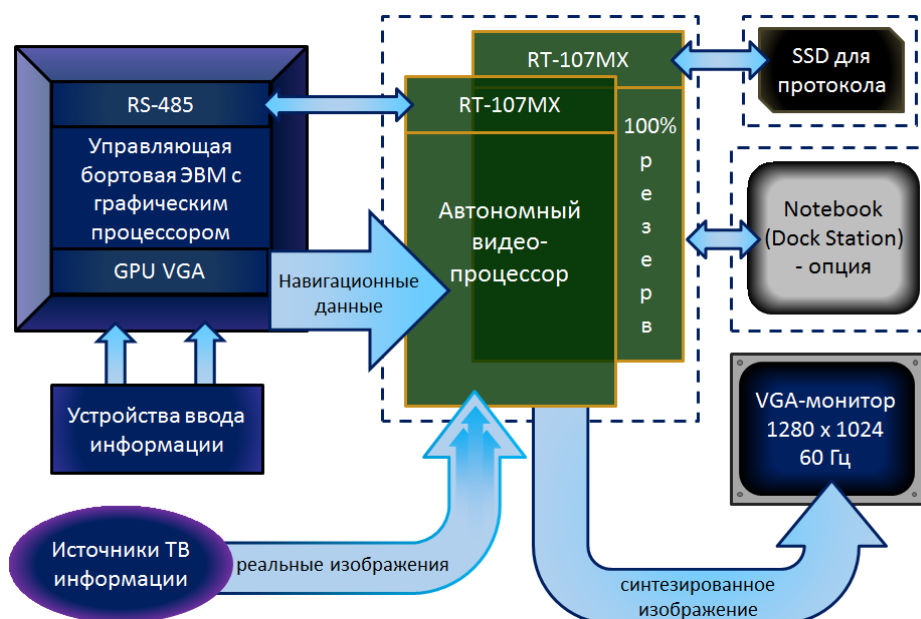


Рис. 1. Основные компоненты бортовой автономной системы улучшенного и синтезированного зрения для мобильной техники

На рис. 2 представлена структурная схема автономного видео- процессора, разработанная на базе системы [6]:

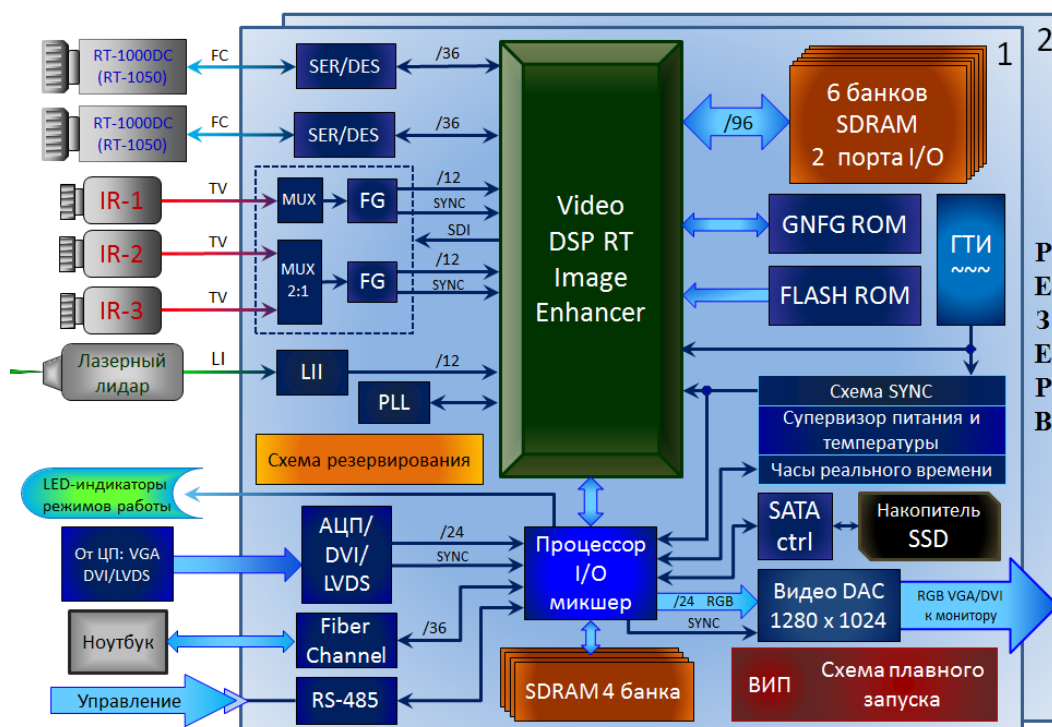


Рис. 2. Схема автономного видеопроцессора

В рассматриваемой комплектации, в систему предлагается включить: 2 ЦК видимого диапазона высокой чёткости (на схеме помечены как RT-10xxDC), 3 ИК-камеры ближнего, среднего и дальнего ИК-диапазона (IR-1, IR-2, IR-3), лазерный лидар видимого или ближнего ИК-диапазона.

Обозначения на рис. 2:

ВИП – вторичный источник питания;

ГТИ – кварцевый генератор тактовых импульсов;

MUX – мультиплексор;

DSP (Digital Signal Processor), процессор по обработке цифровых сигналов;

АЦП аналого-цифровой преобразователь;

VGA (Variable Gain Amplifier), нормирующий видео усилитель;

SSD (Solid State Drive) – твердотельная память долговременного хранения;

DAC (Digital Analog Converter), 10-ти разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);

FLASH ROM – флеш-память;

SATA (Serial ATA) – последовательный интерфейс обмена данными с накопителями информации;

PLL - Фазовая автоподстройка частоты;

FG (Frame Grabber), - оцифровка аналогового сигнала;

DVI (Digital Visual Interface), цифровой видеоинтерфейс;

SER/DES (Serialization/Deserialization Interface), интерфейс приёма-передачи видеоданных;

LII (LIDAR Information Interface) – интерфейс обмена данными, поступающими с лазерного лидара.

На рис. 3 представлена функциональная схема ЦК RT-1000DC [3]:

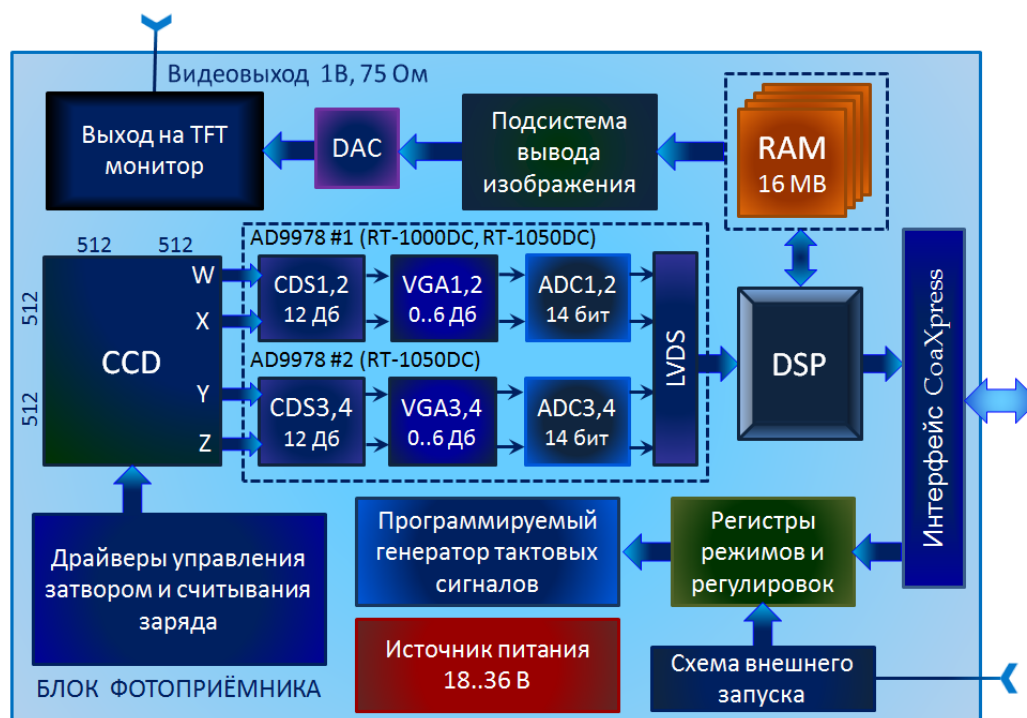


Рис.3. Функциональная схема ЦК RT-1000DC (RT-1050DC)

Обозначения на рис. 3:

CCD – ПЗС-матрица, преобразующая энергию света в энергию электрического заряда (прибор с зарядовой связью);

DSP (Digital Signal Processor), процессор по обработке цифровых сигналов;

ADC (Analog Digital Converter), АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

VGA (Variable Gain Amplifier), нормирующий видео усилитель;

CDS (Correlated Double Sampling), двойная коррелированная выборка (ДКВ), способ оцифровки выходного аналогового сигнала матрицы, позволяющий снизить уровень шумов при аналого-цифровом преобразовании;

DAC (Digital Analog Converter), 10-ти разрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП);

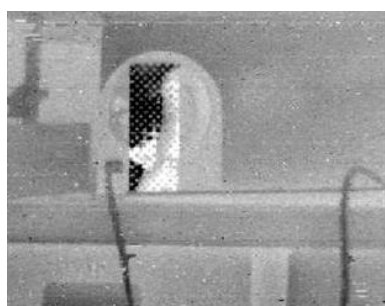
RAM (Random Access Memory), 32-х разрядный внутренний буфер памяти (8 МБ). Функционально разделен на 4 банка по 2 МБ. Используется контроллером DMA (Direct Memory Access), контроллером прямого доступа к памяти для бесперебойной скоростной пересылки видеоданных из блока фотоприёмника в память ПЭВМ;

LVDS (Low-Voltage Differential Signaling), низковольтная дифференциальная передача сигналов. Это способ передачи электрических сигналов, позволяющий передавать информацию на высоких частотах при помощи дешёвых соединений на основе медной витой пары.

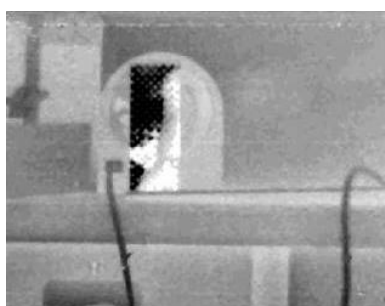
Обзор используемых алгоритмов

Всю обработку изображений предлагается реализовать аппаратно: реализация алгоритмов на специализированной ПЛИС (программируемой логической интегральной схеме) позволит существенно ускорить работу применяемых алгоритмов.

Исходя из минимизации потерь полезного сигнала, было решено отказаться от применения частотных фильтров, так как они сужают динамический диапазон изображения. На рис. 4 представлен пример потерь информации при подобном шумоподавлении тепловизионных изображений:



Исходное ИК изображение



Медианный фильтр 3x3



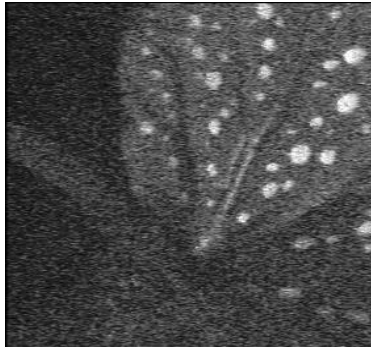
Низкочастотный фильтр

Рис. 4. Потери деталей при шумоподавлении частотными фильтрами

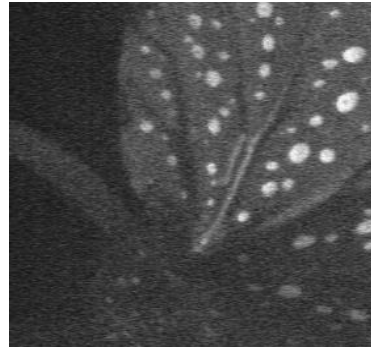
Поэтому шумоподавление будет производиться с использованием следующих методов:

1. Усиление полезного сигнала – настройка камеры на динамический диапазон. При этом настройка будет производиться до оцифровки изображения в автоматическом режиме в зависимости от насыщения пикселей матрицы ЦК: работа с аналоговым сигналом снизит потери полезной информации при его обработке.

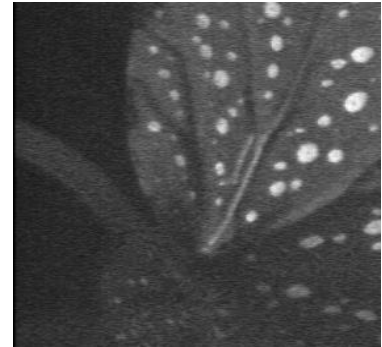
2. Обработка серии оцифрованных кадров за счёт применения скоростных камер. Примеры аппаратной обработки серии кадров видеопроцессором RT-827VP [4] представлены на рис. 5:



Исходное зашумлённое изображение
(часть листа бегонии)



Усреднение по четырём кадрам



Обработка одномерным рекурсивным фильтром с коэффициентом $7/32$

Рис. 5. Пример применения аппаратной рекурсивной фильтрации в реальном времени

Коэффициент рекурсии k определяет соотношение между уровнем шумов слабоконтрастного изображения и динамикой его обновления. Результирующее изображение Y в n -ом кадре вычисляется по формуле:

$$Y_n(i, j) = k \cdot X_n(i, j) + (1 - k) \cdot Y_{n-1}(i, j),$$

X_n – оцифрованное изображение в n -ом кадре, Y_{n-1} – результирующее изображение в $n-1$ -ом кадре, $k = 7/32$ соответствует обработке в реальном

времени при частоте кадров в 120 Гц. Использование более скоростных ЦК не даст ощутимого повышения качества сигнала в силу уменьшения времени экспозиции одиночного кадра.

Любой способ комбинирования монохромных изображений в монохромное – потеря значащей информации каждого из каналов. Поэтому предлагается объединять разно спектральные изображения в цветные, где каждому цветовому каналу соответствует своё изображение, что обеспечит наиболее информативный результат комплексирования. То есть на выходе получаем цветное (R,G,B) изображение, где R и B компонентам цвета, например, соответствуют ИК монохромные каналы, а компоненте G –

монохромные каналы видимого диапазона. Выбор условных цветов зависит от особенностей задачи.

Задача распознавания объектов на изображении ставится в самом общем случае. На содержание анализируемого синтезированного изображения не накладывается каких-либо ограничений в силу универсальности предлагаемой системы навигации. Условимся считать объектом на изображении область, ограниченную замкнутым контуром, который был получен как результат работы фильтра определения границ. Задача сопоставления с последующим распознаванием объекта для его дальнейшего совмещения с пространственными навигационными данными поставлена некорректно так как:

1. Имеет неединственное решение: по одной проекции невозможно понять форму объекта, даже если этот объект выпуклый.
2. Даже если решение найдено, то оно не будет устойчивым, ибо любое слабое изменение монохромной текстуры объекта способно повлечь кардинальное изменение нашего представления о форме, а значит, и о типе объекта.

Конечно, можно попробовать получить карту нормалей видимого объёма, исходя из значений пикселей, но это будет корректно работать лишь для объектов с постоянным альбедо их поверхностей. В работе [7] показано, что нельзя получить строгой зависимости значений векторов нормалей объекта в случае переменного альбедо.

Навигация по локальным 3D моделям

Лазерный лидар будет использоваться как раз для получения карты нормалей, неискажённой текстурой наблюдаемого объекта. При этом точное совмещение данных, полученных с лазерного лидара, и синтезированного изображения достигается с помощью юстировки системы на наборе тестовых изображений. На рис. 6 представлена схема совмещения синтезированного изображения и 3D-моделей:



Рис. 6. Схема совмещения синтезированного изображения и 3D-моделей

Основной недостаток предложенного метода – ограничение на дальность действия лазерного лидара: на расстояниях, больших определённого значения, лидар не будет успевать сканировать объекты в реальном времени. Импульсы лидара падают и отражаются обратно, проходя расстояние $2 \cdot R$, где R – среднее расстояние до сканируемой поверхности. Тогда оценочное время сканирования t области интереса считается по формуле:

$$t = M \cdot N \cdot (2 \cdot R) / (v \cdot c),$$

где M, N – число импульсов по горизонтали и вертикали,

$c \approx 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света,

v – максимальная частота импульсов выбранного лидара.

Пусть $v = 40$ Гц [5], $R = 500$ м, $M = N = 1024$, тогда время сканирования при указанных значениях будет примерно 0,0874 секунды. Очевидно, что для достижения реального времени работы системы, время сканирования необходимо сократить до $1/25 = 0,04$ секунды. Проблему ускорения сканирования лидаром можно решить установкой нескольких таких устройств, параллельно сканирующих заданную область или повышением частоты

импульсов лидара (в рассмотренном случае минимум в 2 раза) с соответствующим повышением мощности импульсов.

Навигация по глобальной 3D модели

Если в рассмотренном выше примере задача навигации мобильной техники решается с использованием локальных 3D моделей, то следующая схема предполагает использование глобальной 3D модели местности.

Положение наблюдателя (камеры) в пространстве однозначно описывается вектором: $v = (x, y, z, \varphi, \psi, \theta)$, где (x, y, z) – координаты камеры, а (φ, ψ, θ) – направление взгляда. Пусть $v_r = (x_r, y_r, z_r, \varphi_r, \psi_r, \theta_r)$ – точное, но неизвестное положение камеры, $v_e = (x_e, y_e, z_e, \varphi_e, \psi_e, \theta_e)$ – положение камеры, измеренное по приборам с погрешностями:

$$\delta_x = |x_r - x_e| \leq M_x, \delta_y = |y_r - y_e| \leq M_y, \delta_z = |z_r - z_e| \leq M_z,$$

$$\delta_\varphi = |\varphi_r - \varphi_e| \leq M_\varphi, \delta_\psi = |\psi_r - \psi_e| \leq M_\psi, \delta_\theta = |\theta_r - \theta_e| \leq M_\theta.$$

$M_i, i \in \{x, y, z, \varphi, \psi, \theta\}$ – известные технические характеристики приборов.

Пусть $I_r = I(v_r)$ – изображение, видимое реальной камерой, установленной на борту самолёта, $I_e = I(v_e)$ – изображение, сгенерированное бортовой ЭВМ на основании показаний приборов и имеющейся 3D модели реальной сцены.

Пусть $\mathcal{M}(I)$ – модель изображения I , задающая M – множество объектов на некотором изображении $I(v)$. Требуется найти v_r , минимизировав функционал:

$$\mathcal{M}_\delta = \rho(\mathcal{M}_r, \mathcal{M}_e) = \rho(\mathcal{M}(I_r), \mathcal{M}(I_e)),$$

где $\rho(\mathcal{M}_r, \mathcal{M}_e)$ – функция, задающая расстояние между моделями $\mathcal{M}_r$ и $\mathcal{M}_e$ в метрическом пространстве M .

Выбор $\mathcal{M}$ и способ анализа соответствующих объектов $\in M_e$ и M_r определяет существование и скорость сходимости $v_e \rightarrow v_r$. Модель $\mathcal{M}$ выбирается, исходя из условия устойчивости:

$$\forall I_1, I_2, \delta \in \mathbb{R}^{w \times h}, w, h \in \mathbb{N}, \forall x = \overline{0, w-1}, \forall y = \overline{0, h-1}:$$

$$|I_1(x, y) - I_2(x, y)| < \delta \rightarrow |\mathcal{M}(I_1) - \mathcal{M}(I_2)| < \mathcal{M}(\delta),$$

что означает устойчивость по исходным данным к шуму, изменению яркости и прочим искажениям.

Найти положение в пространстве по виду проекции в общем случае не представляется возможным в силу возможности вырожденности матрицы оператора проектирования. Поэтому уточнение истинного положения реальной камеры будет определяться путём анализа формы и расположения объектов интереса на синтезированной и реальной сценах и поиска приближённого проективного преобразования.

В статье [8] представлен метод грубого совмещения изображений, снятых с разных ракурсов. Достоинство метода [8] – его высокая устойчивость, так как совмещение происходит по характеристическим линиям на изображении, которые были найдены с помощью преобразования Хафа. Однако метод [8] применяется при известных положениях обеих камер, когда в нашем случае известно лишь точное положение виртуальной камеры, которая выдаёт кадр синтезированной сцены. То есть необходимо решить обратную задачу: найти положение реальной камеры, если дано положение виртуальной камеры и два изображения, соответствующие каждой из камер. Единственное, что может несколько упростить задачу уточнения – необязательность работы алгоритма при больших сдвигах и поворотах. Совмещение 2D кадров виртуальной и реальной камер при малых сдвигах и поворотах будет заключаться в выделении характеристических линий и анализе их расположения.

Схема уточнения положения мобильного устройства с использованием 3D-модели окружающей местности представлена на рис. 7:

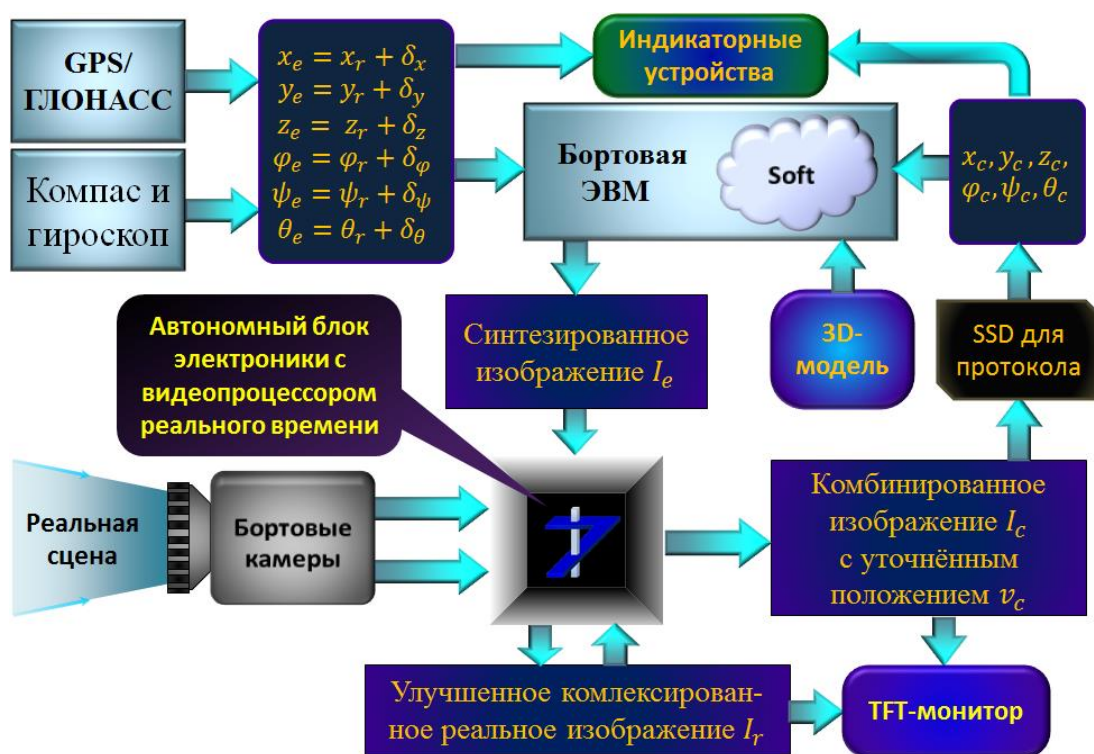


Рис. 7. Схема бортовой автономной системы навигации по глобальной 3D модели

Как видно из рис. 7, уточнение положения мобильной техники может происходить итерационно, что при условии малой скорости мобильного устройства (по сравнению со скоростью обновления кадров с бортовых камер) позволит уточнять его положение с точностью до глобальной 3D модели и её координатной привязки.

Заключение

На основании более чем 20-летнего опыта разработки видеопроцессоров реального времени, предложена универсальная архитектура мультиспектральной системы технического зрения, соответствующая космическим стандартам надёжности. Предложены простые для аппаратной реализации и эффективные методы и модели обработки изображений в рамках задачи навигации мобильной техники на примере объединения синтезированного изображения и пространственных навигационных данных.

Литература

1. *Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю.* Проблемы технического зрения в современных авиационных системах. Труды научно-технической конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2010». Выпуск 4. Под ред. Р.Р. Назирова. – М.: УНИВЕРСИТЕТ КНИЖНЫЙ ДОМ. 2011. - с. 11.
2. Система сбора данных — Стандарт VXI:
http://www.vxibus.org/files/VXI_Specs/VXI-1_4-0%2020100527.pdf
3. Техническое описание камеры RT-1000DC
http://www.rastr.net/images/digital_cam/doc/RT-1000DC.pdf
4. Техническое описание видеопроцессора RT-827VP
http://www.rastr.net/images/video_proc/doc/rt827.pdf
5. Техническое описание лазерного лидара ПАЛ-2
http://www.laser-design.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=10:-2&catid=5:2011-01-05-05-14-36&Itemid=5
6. *Бондаренко А. В., Докучаев И. В., Рода А. В., Хаджиева Я. Я.* Обзорно-панорамная оптико-электронная система наблюдения и обнаружения для мобильной наземной техники. Труды научно-технической конференции-семинара «Техническое зрение в системах управления мобильными объектами – 2011». Выпуск 5. Под ред. Р. Р. Назирова. –М.: МЕХАНИКА, УПРАВЛЕНИЕ И ИНФОРМАТИКА, 2012.
7. *Hon-Keat Pong, Tat-Jen Cham* «Alignment of 3D Models to Images Using Region-Based Mutual Information and Neighborhood Extended Gaussian Images». In Proc. Asian Conference on Computer Vision (ACCV). Hyderabad, India. 2006. p.p 60-69.
8. *Волегов Д. Б., Юрин Д. В.* Грубое совмещение изображений по найденным на них прямым линиям. Труды международной конференции Graphicon. 2006.

Авторы

Бондаренко Андрей Викторович.

ООО «Растр Технолоджи», www.rastr.net

Генеральный директор.

E-mail: rastermsk@gmail.com

Бондаренко Максим Андреевич.

МГУ им. М.В. Ломоносова,

факультет Вычислительной Математики и Кибернетики.

Аспирант.

E-mail: max.bond@bk.ru

Skype name: maxxbond001

Докучаев Игорь Вадимович.

ООО «РАСТР ТЕХНОЛОДЖИ», www.rastr.net

Главный специалист.

E-mail: olga_igor@mail.ru

Контактный телефон: 8(495)789-93-67

The authors

Bondarenko Andrey Victorovich.

Raster Technology Co. Ltd, www.rastr.net

General director.

E-mail: rastermsk@gmail.com

Bondarenko Maxim Andreevich.

The Lomonosov Moscow State University,

faculty of Computational Mathematic and Cybernetic.

Post-graduate student.

E-mail: max.bond@bk.ru

Skype name: maxxbond001

Dokuchaev Igor' Vadimovich.

Raster Technology Co. Ltd, www.rastr.net

Chief specialist.

E-mail: olga_igor@mail.ru

Tel.: +7(495)789-93-67