

ISSN 1816-0301 (print)

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ, ИЗОБРАЖЕНИЙ И РЕЧИ*SIGNAL, IMAGE AND SPEECH PROCESSING*

УДК 004.9

Поступила в редакцию 06.04.2018

Received 06.04.2018

В. А. Ковалев, Д. А. Павленко, Э. В. Снежко, В. А. Левчук, А. А. Калиновский*Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ
ДЛЯ БОРТОВОГО МИКРОМОДУЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Аннотация. Приводятся результаты анализа базового аппаратного и программного обеспечения существующих недорогих и коммерчески доступных вычислительных микроплатформ с целью выбора подходящего решения при разработке бортового микро модуля предварительного распознавания и отбора изображений подстилающих поверхностей заданных типов. Предполагается, что соответствующие варианты микро модуля могут быть установлены на борту малых космических аппаратов либо легких беспилотных летательных аппаратов (дронов). Рассматривается вариант микро модуля для дронов. Основным ограничением при выборе микро платформы был ее небольшой вес (не более 300 г, включая камеру и интерфейсное оборудование) при относительно высокой производительности (время распознавания кадра цветного изображения размером 320×240 пикселей не более 300 мс). Другими важными ограничениями являлись невысокая цена и коммерческая доступность микро платформы на рынке Беларуси. Приведенные в работе сведения могут быть полезны инженерам и научным работникам, разрабатывающим компактные бюджетные мобильные системы обработки, анализа и распознавания изображений.

Ключевые слова: микрокомпьютер, мобильная система, распознавание изображений, дрон, сверточная нейронная сеть

Для цитирования. Сравнительный анализ вычислительных платформ для бортового микро модуля предварительного распознавания изображений / В. А. Ковалев [и др.] // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 7–21.

V. A. Kovalev, D. A. Paulenka, E. V. Snezhko, V. A. Liauchuk, A. A. Kalinovski*The United Institute of Informatics Problems of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***COMPARATIVE ANALYSIS OF COMPUTING PLATFORMS
FOR ONBOARD MICROMODULE OF PROVISIONAL IMAGE RECOGNITION**

Abstract. This paper is devoted to the analysis of basic hardware and software of recent cheap and commercially available computing microplatforms for selecting an appropriate solution for development of an onboard micromodule for preliminary recognition and selection of images of underlying surface of given types. It is assumed that the corresponding versions of the micromodule can be installed on board of small spacecraft or light unmanned aerial vehicles (drones). In this paper we consider a variant of a micromodule for drones. When choosing a microplatform, the main limitations were its low weight (no more than 300 g, including camera and interface equipment) and its relatively high performance (time for frame processing of a color image 320×240 pixels is no more than 300 ms). Another important limitation was the low price and commercial availability of microplatform on the Belarusian market. The information provided in this paper could be useful for engineers and researchers who are developing compact budget mobile systems for processing, analyzing and recognition of images.

Keywords: microcomputer, mobile system, image recognition, drone, convolutional neural network

For citation. Kovalev V. A., Paulenka D. A., Snezhko E. V., Liauchuk V. A., Kalinovski A. A. Comparative analysis of computing platforms for onboard micromodule of provisional image recognition. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 7–21 (in Russian).

Введение. В последние годы наблюдается значительный прогресс в области разработки и использования малых космических и беспилотных летательных аппаратов (дронов). Это создает предпосылки для разработки различных систем автоматического сбора видеоданных, в том числе мобильных систем поиска, распознавания и отбора необходимых видеоданных непосредственно на борту летательного аппарата. Такая возможность избавляет оператора от длительного и утомительного просмотра отснятых фото- и видеоматериалов с целью выбора участков (объектов) интереса, поскольку система сбора данных фиксирует только изображения тех типов (классов), образцы которых были включены в полетное задание перед вылетом. Кроме того, в ряде случаев появляется дополнительная возможность существенной экономии энергии на борту, так как энергоемкие компоненты наблюдения, съемки и передачи данных могут включаться только в случае необходимости.

Целью настоящей работы являются анализ базового аппаратного и программного обеспечения недорогих, коммерчески доступных вычислительных микроплатформ и проведение комплекса вычислительных экспериментов для выбора подходящего решения при разработке микро модуля предварительного распознавания и отбора изображений подстилающих поверхностей на борту легких дронов. Перечислим основные функции микро модуля и ключевые технические решения:

1. Предполагается, что микро модуль является автономной системой автоматического распознавания изображений подстилающих поверхностей различных типов. Примерами указанных типов поверхностей могут служить леса различных видов, промышленные сооружения, водоемы, дороги, поля, кустарники, дачная застройка, сельхозугодия с растительностью, находящейся на различных стадиях роста, и т. п.

2. Конкретные целевые классы задаются в полетном задании либо в виде образцов соответствующих изображений в случае использования традиционной схемы распознавания типа «изображение – признаки – классификатор», либо в виде предобученной сверточной нейронной сети в случае использования технологии глубокого обучения (Deep Learning).

3. Встроенная видеокамера микро модуля используется только для решения задачи распознавания типа поверхности. При необходимости кадры видеопоследовательности (изображения низкого разрешения целевых классов полетного задания) могут сохраняться на внешнем носителе микро модуля для вспомогательных целей.

4. Взаимодействие микро модуля с основным бортовым микро компьютером дрона должно быть минимальным. По сути, оно должно сводиться к передаче ему в реальном времени номера текущего класса подстилающей поверхности. При этом класс «0» означает, что текущее изображение не относится ни к одному из целевых классов, заданных в полетном задании. Дополнительным параметром является вероятность (степень уверенности) отнесения к тому или иному классу. Принимается окончательное решение о съемке и записи (передаче) на землю изображения, а сама высококачественная съемка производится за пределами микро модуля.

5. Предполагается, что выбираемый микро компьютер является законченной вычислительной системой, снабженной всем необходимым интерфейсным оборудованием, операционной системой (ОС), средствами разработки программ и др. Вариант реализации микро модуля из отдельных специализированных компонентов (например, микро контроллеров, цифровых сигнальных процессоров (Digital Signal Processor, DSP), чипсетов, систем на кристалле и др.) с помощью соответствующих схмотехнических решений не рассматривается.

Сравнительный анализ выполнен по методу стратегического планирования SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats) [1], который заключается в выявлении факторов внутренней и внешней среды устройства и разделении их на четыре категории: сильные стороны (Strengths), слабые стороны (Weaknesses), возможности (Opportunities) и угрозы (риски) (Threats) использования анализируемого устройства. Сильные (*S*) и слабые (*W*) стороны являются факторами внутренней среды объекта анализа, т. е. тем, на что сам объект способен повлиять; возможности (*O*) и угрозы (*T*) являются факторами внешней среды, т. е. тем, что может повлиять на объект извне и при этом не контролируется самим объектом. Например, микро компьютер Raspberry Pi Zero Wireless обладает одноядерным процессором с частотой 1 ГГц и оперативной памятью 512 МБ, это факторы внутренней среды устройства. Факторами внешней среды являются возможные физические воздействия внешней среды, а также выбор алгоритма, языка про-

граммирования, разработка архитектуры программного обеспечения (ПО) микро модуля, которые сильно влияют на время распознавания одного изображения и энергопотребление.

SWOT-анализ может использоваться в любой ситуации принятия решений, когда определено целевое конечное состояние (цель). Способами применения SWOT являются сопоставление и преобразование. Сопоставление используется, чтобы найти конкурентное преимущество, сравнивая сильные стороны с возможностями. Преобразование заключается в превращении слабых сторон и угроз в сильные стороны и возможности. Если слабые стороны и угрозы не могут быть преобразованы, то их следует попытаться свести к минимуму или избежать. В данном случае целью является объективная оценка соответствия устройства техническому заданию. Также авторы стремились выявить конкурентные преимущества одного устройства над другим, найти слабые стороны и угрозы и либо преобразовать их в сильные стороны и возможности, либо избежать.

Эволюция электронно-вычислительных систем привела к тому, что компьютеры стали не только значительно мощнее, дешевле и доступнее для потребителя, но и многократно уменьшились в размерах. Появился целый рынок одноплатных микрокомпьютеров, способных решать разнообразные задачи (URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_single-board_computers).

В настоящее время микрокомпьютером считается электронно-вычислительное устройство, сравнимое с кредитной картой по размерам и с персональными компьютерами предыдущих поколений по мощности. Например, общая реальная производительность для моделей Raspberry Pi Zero Wireless сравнима с Pentium 2 с частотой процессора 300 МГц, но при этом с гораздо лучшей графикой (URL: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#performance-Speed>). Микрокомпьютер, или одноплатный компьютер, – это самодостаточный компьютер, собранный на одной печатной плате, на которой установлены микропроцессор, оперативная память, системы ввода-вывода и другие необходимые модули. Одноплатные компьютеры отличаются малыми размерами и дешевизной. Самые дешевые из них можно приобрести по цене 5–10 долл. США (URL: <https://www.slant.co/topics/1629/~single-board-computers>).

Особого упоминания заслуживают факты использования смартфонов в качестве универсальных микрокомпьютеров. Показательным в этом отношении является проект NASA PhoneSat [2], выполненный в рамках программы Small Spacecraft Technology Program по созданию наноспутников с использованием немодифицированных коммерческих смартфонов и запуску таких спутников на низкую околоземную орбиту. Проект был начат в 2009 г. в NASA Ames Research Center (Moffett Field, Калифорния). Стоимость компонентов, использованных для создания одного наноспутника, составляла от 3500 долл. для версии 1.0 и менее 7000 долл. для версии 2.0. Наноспутник построен по стандарту CubeSat, имеет размер 1U (10×10×10 см) и вес приблизительно 1 кг. Для сравнения в 2004 г. до начала проекта PhoneSat стоимость компонентов для создания классического CubeSat оценивалась в сумму от 20 000 до 40 000 долл. Стоимость коммерческого запуска наноспутника 1U на низкую орбиту составила около 85 000 долл. Еще один проект под названием STRaND-1 (Surrey Training, Research and Nanosatellite Demonstrator 1) является наноспутником 3U CubeSat (вес 4,3 кг). Он был разработан в Англии специалистами Суррейского космического центра (Surrey Space Centre, SSC) и компании Surrey Satellite Technology Ltd (SSTL) и выведен на орбиту на борту PSLV C-20 Rocket из Индии 25 февраля 2013 г. STRaND-1 стал первым спутником, в управлении которого использован смартфон.

1. Основные требования, предъявляемые к разрабатываемому микро модулю. Техническим заданием определяются следующие требования и ограничения на рассматриваемую в статье разработку:

- 1) масса микро модуля (включая камеру и интерфейсное оборудование) не более 300 г;
- 2) габариты (длина, ширина, высота) не более 12×6×4 см;
- 3) энергопотребление в активном режиме не более 5 Вт;
- 4) время распознавания одного кадра RGB-изображения размером 320×240 пикселей не более 300 мс;
- 5) количество типов изображений подстилающей поверхности (классов), распознаваемых программным обеспечением, не менее 10, в том числе распознаваемых одновременно, – не менее 3;

б) качество распознавания заданного типа изображений подстилающей поверхности (в зависимости от типа) не менее 85–95 %;

7) цена одного микромодуля при единичном производстве не более 500 долл.

На первом этапе были рассмотрены следующие типы вычислительных микроплатформ: несколько одноплатных микрокомпьютеров различных производителей, неттопы, смартфоны, изделия с формфактором материнских плат Mobile-ITX для x86-совместимых процессоров, платы формата PC/104 (или PC104), комплект разработчика NVIDIA Jetson TX2 Developer Kit, SMARC-модули стандарта SMARC версии 2.0, высокопроизводительный встроенный компьютер Manifold DJI, разновидности так называемых компьютеров на модуле (computer-on-module, COM).

В результате предварительного анализа выяснилось, что большинство упомянутых выше моделей микрокомпьютеров превышают предельно допустимые массогабаритные параметры. Согласно опубликованным техническим спецификациям энергопотребление многих моделей также превышает ограничение в 5 Вт при активном режиме работы. Кроме того, цена некоторых микрокомпьютеров оказалась слишком высока и (или) их приобретение проблематично на рынке Беларуси. Так, например, SMARC-модули [3] не подходят как по цене, так и по размерам. Размер платы-носителя для SMARC-модуля (20×21 см) значительно превышает предельно допустимые габариты (12×6×4 см). Цена самых дешевых SMARC-модулей начинается от 100 долл. без учета стоимости необходимой платы-носителя.

2. Тестируемые микроплатформы и их технические характеристики. Из всего многообразия микроплатформ для проведения сравнительного анализа были отобраны и приобретены четыре современные, недорогие и коммерчески доступные микроплатформы, которые являются типичными представителями своих классов (рис. 1).

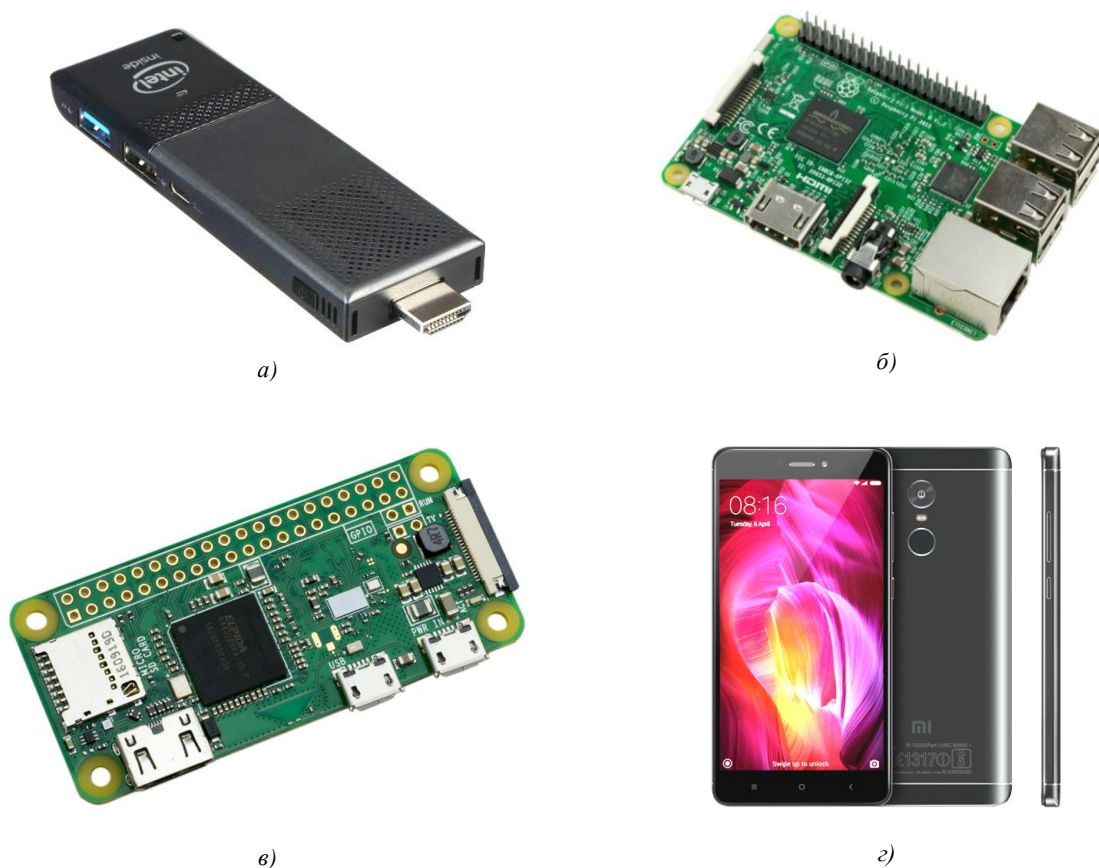


Рис. 1. Тестируемые образцы микроплатформ: а) Intel Compute Stick STK1AW32SC [4] с ОС Windows 10 Home Edition 32-bit; б) Raspberry Pi 3 Model B [5] с ОС Raspbian Stretch 4.9; в) Raspberry Pi Zero Wireless [6] с ОС Raspbian Stretch 4.9; г) Xiaomi Redmi Note 4 [7] с ОС MIUI 9.2 Global, основанной на Android 7.0 Nougat (современный бюджетный смартфон)

Цена устройств варьирует в пределах от 10 до 250 долл. и коррелирует с параметрами вычислительной мощности (количеством ядер процессора, тактовой частотой, объемом оперативной памяти, объемом энергонезависимой памяти), а также с наличием внешних интерфейсов и камеры (табл. 1). Все устройства удовлетворяют ограничению в 300 г, но Xiaomi Redmi Note 4 не проходит по габаритам (длина 15,1 см против предельно допустимых 12 см). Однако это превышение в определенном смысле компенсируется его небольшой толщиной в 0,9 см и, как следствие, небольшими габаритами. Диапазон рабочих температур для Raspberry Pi не указан, так как в официальных спецификациях таких данных нет. Модели Raspberry Pi собираются из коммерческих чипов разных производителей, каждый из которых имеет свой диапазон рабочих температур, микрочип LAN9514 для разъемов USB и Ethernet может работать в диапазоне температур от 0 до +70 °С, в то время как система на кристалле микрокомпьютера способна выдерживать температуры от –40 до +85 °С (URL: <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#performanceOperatingTemperature>).

Таблица 1

Основные технические характеристики тестируемых устройств

Характеристики	Intel Compute Stick	Raspberry Pi 3 Model B	Raspberry Pi Zero Wireless	Xiaomi Redmi Note 4
Дата выпуска, месяц/год	03/2016	02/2016	02/2017	01/2017
Рекомендованная розничная цена, долл.	129	35	10	250
Компания-производитель, страна	Intel Corporation, США	Raspberry Pi Foundation, Великобритания	Raspberry Pi Foundation, Великобритания	Xiaomi Inc., КНР
Длина, см	12,3	8,6	6,5	15,1
Ширина, см	3,8	5,7	3,0	7,6
Толщина, см	1,2	1,7	0,5	0,9
Масса, г	60	45	9	165 (с батареей)
Диапазон рабочих температур, °С	от 0 до +35	–	–	от 0 до +40
Модель центрального процессора (CPU)	Intel Atom x5-Z8300	ARM Cortex-A53	ARM1176JZF-S	Snapdragon 625 (MSM8953)
Частота процессора (CPU), ГГц	1,84	1,2	1	2,02
Количество ядер процессора, шт.	4	4	1	8
Модель графической карты (GPU)	Intel HD Graphics	Broadcom VideoCore IV 1080p60	Broadcom VideoCore IV 1080p30	Adreno 506 (650 МГц)
Размер оперативной памяти, ГБ	2	1	0,5	4
Размер встроенной памяти, ГБ	32	нет	нет	64
Разрешение специализированной (встроенной) камеры, Мп	нет	5 или 8	5 или 8	13, 5
Автофокусировка	нет	нет	нет	есть

Примечание: жирным шрифтом отмечены параметры, превышающие требования технического задания.

Известно, что для мобильных вычислительных устройств важной группой параметров, которые влияют на выбор платформы, являются параметры электропитания и потребляемой мощности. Соответствующие значения для рассматриваемых четырех вариантов представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Параметры электропитания и потребляемой мощности тестируемых устройств

Intel Compute Stick			Raspberry Pi 3 Model B			Raspberry Pi Zero Wireless			Xiaomi Redmi Note 4		
В	А	Вт	В	А	Вт	В	А	Вт	В	А	Вт
<i>Работа без нагрузки</i>											
5,0	0,80±0,10	4,00±0,50	5,0	0,35 ±0,01	1,75 ±0,05	5,0	0,12±0,01	0,60±0,05	4,2	0,12±0,02	0,51±0,08
<i>В нагруженном состоянии</i>											
5,0	1,70±0,30	8,50±1,50	5,0	1,34 ±0,10	6,70 ±0,50	5,0	0,35±0,05	1,75±0,25	4,2	0,7±0,05	2,94±0,21

Примечание: жирным шрифтом отмечены параметры, превышающие требования технического задания.

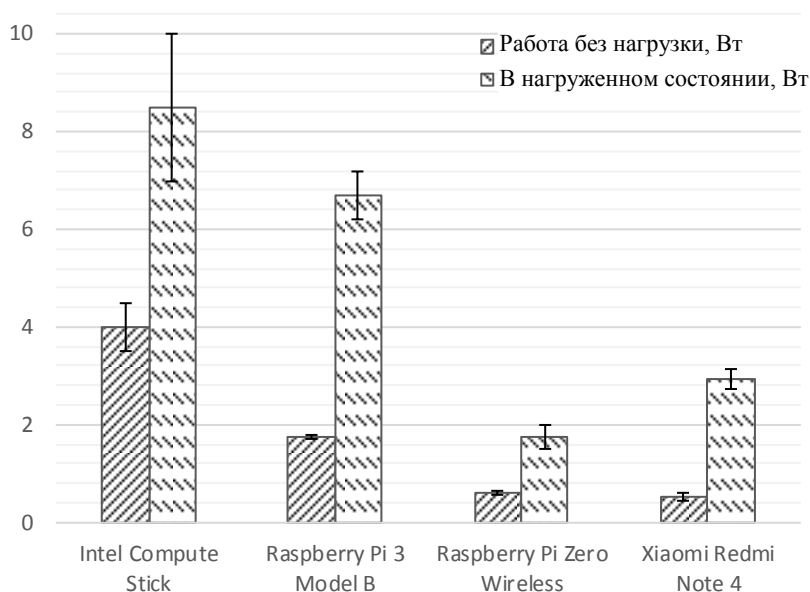


Рис. 2. Потребляемая мощность устройств

Несмотря на то что устройства используют напряжение питания 5 В (4,2 В для смартфона), различия в среднем значении потребляемого тока в нагруженном состоянии варьируют от 0,35 А у Raspberry Zero до 1,70 А у Intel Stick. Следовательно, средняя потребляемая мощность меняется от 1,75 до 8,50 Вт. Для всех устройств, кроме Xiaomi Redmi Note 4, следует учитывать, что при использовании внешней камеры типа Raspberry Pi дополнительно потребуется еще 0,25 А для обеспечения ее нормального функционирования. Поскольку в соответствии с входными требованиями (см. разд. 1) потребляемая мощность микромодуля в рассматриваемом случае не должна превышать 5 Вт, Intel Stick и Raspberry Pi 3 использоваться не должны. Кроме того, следует отметить, что из-за относительно большой потребляемой мощности и компактного формфактора микрокомпьютер Intel Stick в его оригинальном фирменном варианте снабжается охлаждающим вентилятором и имеет соответствующие отверстия в корпусе. При эксплуатации на открытом воздухе это может привести к попаданию влаги внутрь корпуса и поломке устройства.

3. Базовое программное обеспечение и его особенности. Многие современные микрокомпьютеры позволяют устанавливать на них те же самые ОС и ПО, что и на обычных персональных компьютерах. Это дает возможность вести разработку на рабочем компьютере, а затем с минимальными изменениями переносить результаты на микроплатформу, что упрощает и ускоряет работу над проектом.

Intel Compute Stick поставляется с предустановленной ОС Windows 10 Home Edition объемом 32 бита (платной). Специалисты утверждают [8], что на данное устройство можно также установить ОС Ubuntu 16.04, однако эта опция не тестировалась. Известно, что home-версия позиционируется как «домашняя» ОС, ориентированная на использование частными лицами вне офиса или предприятия. По этой причине у этой ОС отсутствуют многие сервисы. Например, невозможно отключить автоматические обновления системы, нет предустановленного Remote Desktop, групповых политик и т. д. ОС достаточно ресурсоемкая, потребляет сравнительно много оперативной памяти микрокомпьютера и занимает две трети объема встроенной энерго-независимой памяти.

Для устройств семейства Raspberry Pi (Raspberry 3 и Raspberry Zero) рекомендуемой ОС является Raspbian [9], основанная на Debian Linux. Последний релиз – это версия Raspbian Stretch 4.9, которая основана на ядре Linux и является бесплатной с лицензией GNU и открытым исходным кодом. Несмотря на то что на рассмотренных микрокомпьютерах установлены 32-битные версии Windows и Raspbian, установка 64-битных версий Windows и Linux также возможна, но в данном случае нецелесообразна, так как эти версии требуют больше оперативной и энергонезависимой памяти. В результате для установки и эффективного выполнения прикладного ПО распознавания изображений остается недостаточно ресурсов.

ОС MIUI 9.2 Global смартфона Xiaomi Redmi Note 4 основана на исходных кодах Android 7.0 Nougat. Пользовательский интерфейс отличается от интерфейса оригинального Android, но сама система MIUI совместима с приложениями, разработанными для ОС Android. Из приложения Android Market, которое доступно на ОС MIUI 9.2, можно загрузить и установить любое приложение для системы Android. Все три ОС поддерживают такие распространенные языки программирования и их среды, как Java, C/C++ и Python, но ОС Android достаточно слабо поддерживает Python. Сама ОС написана на языках программирования C/C++ и Java, которые являются оптимальными при разработке приложений для Android. Есть несколько проектов, которые разрабатывают интерпретаторы Python для Android (URL: <https://wiki.python.org/moin/Android>): BeeWare, Chaquopy, Kivy, pyqtdeploy, QPython, Termux и т. д. Однако при выборе таких интерпретаторов существует достаточно высокий риск, что в будущем некоторые из них перестанут поддерживаться разработчиками. Также есть все основания полагать, что поддержка языка программирования Python для Android со временем улучшится. Кроме того, существует так называемый Termux (URL: https://wiki.termux.com/wiki/Main_Page) – свободно доступный эмулятор Linux для ОС Android, который хорошо зарекомендовал себя при проведении вычислительных экспериментов, рассматриваемых ниже.

4. Результаты тестирования производительности микроплатформ. Вычислительная мощность микроплатформ играет весьма существенное значение при решении задачи предварительного распознавания изображений подстилающей поверхности в реальном времени. В рассматриваемом случае время распознавания одного кадра RGB-изображения размером 320×240 пикселей ограничивается величиной 300 мс, т. е. производительность микромодуля должна быть больше трех кадров в секунду. С учетом опыта решения различных задач распознавания цветных изображений в качестве базового алгоритма, используемого для тестирования, был принят алгоритм, основанный на представлении содержания изображений с помощью матриц совместной встречаемости цветов [10]. Цветовое пространство редуцировалось путем использования старших битов R-, G- и B-компонентов цвета по схеме 3-3-3 (512 цветов): из восьми битов каждого цвета отбрасывались менее значимые младшие пять битов и оставались более значимые три старших бита. Таким образом, на каждый цвет приходилось по три бита или девять битов на редуцированный RGB-цвет. Девять битов обеспечивают представление $2^9 = 512$ цветов. Значит, размерность результирующей матрицы совместной встречаемости 512×512 . После вычисления матрицы входного изображения все ее ненулевые элементы выписывались в вектор, называемый дескриптором изображения.

При любом варианте построения алгоритма распознавания базовой операцией является оценка близости текущего изображения к образцам классов, заданных в полетном задании. Указанная операция выполнялась путем сравнения дескрипторов изображений и вычисления меры близости $L1$ (расстояния городских кварталов) в пространстве признаков. Метрика $L1$

есть сумма длин проекций отрезка между двумя точками n -мерного вещественного векторного пространства на оси координат, которая вычисляется по формуле

$$L1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|, \quad (1)$$

где $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ и $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ – векторы n -мерного пространства, а также дескрипторы изображения, полученные из матрицы совместной встречаемости цветов.

Время выполнения перечисленных базовых операций для всех четырех платформ при условии реализации на Python версии 2.7.13 приведено в табл. 3. Следует отметить, что алгоритм, основанный на использовании матриц совместной встречаемости цветов, применялся здесь в качестве теста на быстродействие анализируемых микроплатформ. Однако это не означает, что только данный алгоритм можно применять в разрабатываемом микромодуле для решения задачи распознавания.

В табл. 3 и на рис. 3 показано, что время обработки данных сильно изменяется в зависимости от применяемых библиотек. Расширение для Python на языке программирования C ожидаемо сокращает время обработки на всех микроплатформах: примерно в два раза по сравнению со случаем использования библиотеки обработки изображений Scikit-image и в три-пять раз – библиотеки обработки массивов NumPy.

Таблица 3

Время вычисления матрицы совместной встречаемости и дескриптора изображения 320×240 пикселей для 512 цветов для четырех тестируемых устройств, мс

Программное обеспечение	Intel Compute Stick	Raspberry Pi 3	Raspberry Pi Zero	Xiaomi Redmi Note 4
Расширение языка C для Python	19 ± 2	44 ± 1	55 ± 3	15 ± 1
Библиотека обработки изображений Scikit-image	32 ± 1	87 ± 1	105 ± 4	39 ± 1
Библиотека обработки массивов NumPy	63 ± 2	182 ± 1	275 ± 10	51 ± 1
Двойной цикл (цикл в цикле)	1 888 ± 4	3 918 ± 6	14 131 ± 209	1 560 ± 11

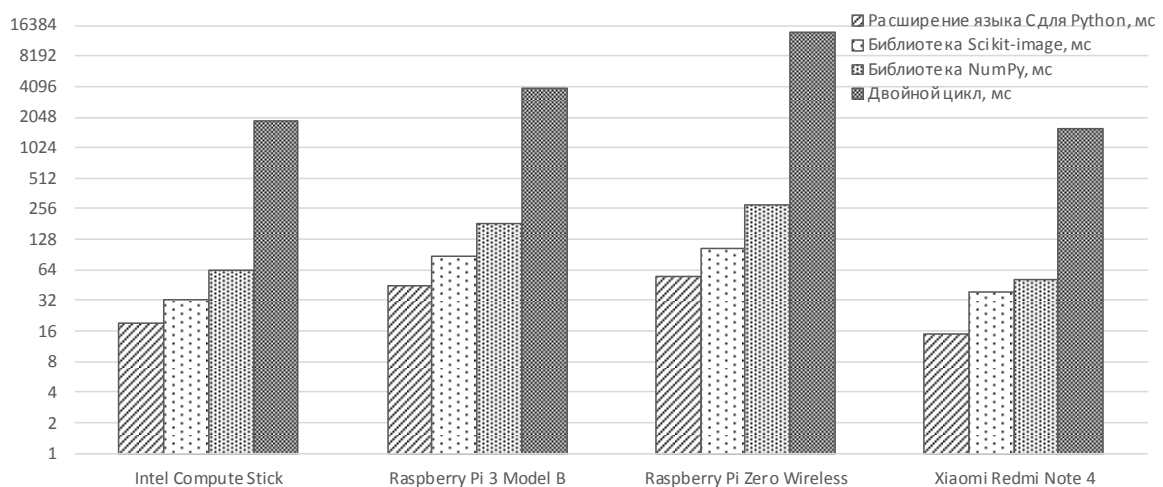
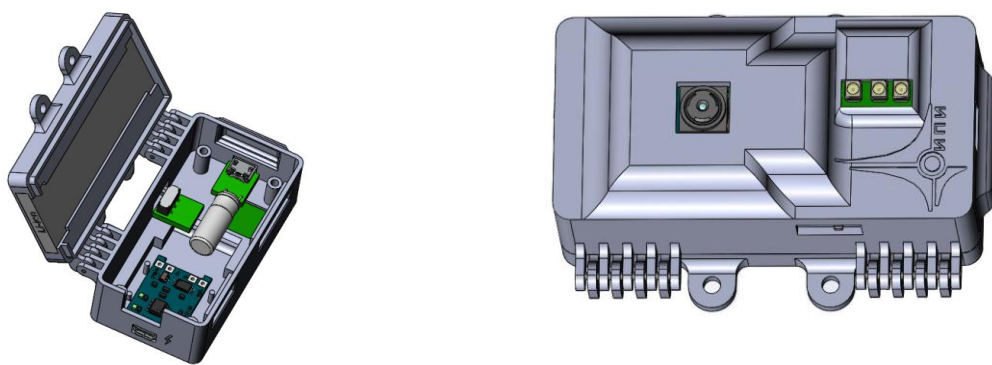


Рис. 3. Время вычисления матрицы совместной встречаемости и дескриптора изображения 320×240 пикселей для 512 цветов в логарифмическом масштабе

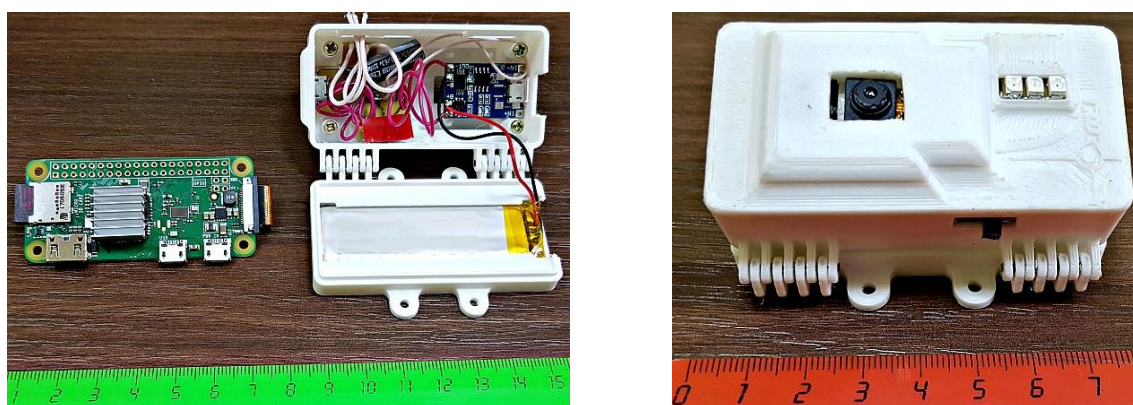
Следует отметить, что времена выполнения тестов на Intel Compute Stick и на смартфоне Xiaomi Redmi Note 4 отличаются лишь незначительно, хотя процессор смартфона по своим техническим спецификациям мощнее. Предположительно, это обусловлено тем, что на смартфоне интерпретатор Python работает через эмулятор и не поддерживается ОС Android напрямую. Измерения на смартфоне для ОС Android проводились с использованием Termux (эмулятора Linux для Android), часть из них была повторена на программе QPython для Android (URL: <http://www.qpython.com>). Как показали измерения, QPython работает медленнее, чем Termux.

5. Макет микро модуля. Полученные в результате сравнительного анализа четырех вычислительных микроплатформ данные позволили сделать вывод, что наилучшим микрокомпьютером для микро модуля оперативного распознавания изображений является модель Raspberry Pi Zero Wireless с ОС Raspbian. Она имеет минимальные энергопотребление, размеры, массу, стоимость и доступна для приобретения. Вычислительные эксперименты показали, что основной недостаток этой микроплатформы заключается в ее низкой вычислительной мощности и может быть преодолен за счет эффективной реализации алгоритмов распознавания на языке программирования C/C++.

В процессе реализации макета микро модуля был спроектирован и отпечатан на 3D-принтере корпус микро модуля, в котором размещаются микрокомпьютер Raspberry Pi Zero Wireless с камерой модели Raspberry Pi Zero V1.3 Mini Camera (суммарно 13 г), Li-Po-аккумулятор типа ROBITON емкостью 720 мАч (14 г), плата зарядки аккумуляторной батареи с конденсатором, сигнальные светодиоды и соединительные провода (рис. 4).



а)



б)

Рис. 4. 3D-модель (а) и макет (б) микро модуля

Макет микромодуля имеет размеры $7,3 \times 3,6 \times 2,5$ см и общую массу в собранном состоянии 57 г, что намного меньше ограничения в 300 г. Такие скромные массогабаритные характеристики позволят устанавливать микромодуль даже на легкие бюджетные дроны. Это создаст дополнительные конкурентные преимущества. Следует подчеркнуть, что в указанные 57 г входят суммарный вес автономного источника питания, обеспечивающего функционирование микромодуля на все время полета, и средства его зарядки, а также вес переключателя на внешний источник питания от сети в горячем режиме. При выполнении лабораторных испытаний с использованием дрона Parrot AR.Drone 2.0 текущий распознанный класс изображений в реальном времени выводится непосредственно на корпус макета микромодуля с помощью цветных светодиодных индикаторов, а копия текущего кадра изображения и результаты его распознавания передаются на ноутбук по Wi-Fi для упрощения процесса наблюдения и отладки ПО.

6. Состав и общие характеристики разрабатываемого программного обеспечения. Известно, что язык программирования Python обеспечивает быстрое прототипирование и реализацию ПО. Кроме того, он широко используется в качестве базового в большинстве программных фреймворков для сверточных нейронных сетей. Python не является идеальным инструментом разработки ПО встроенных систем, где обычно применяются C/C++ и Java. Поэтому прототипирование и разработка таких компонентов, как графические интерфейсы пользователя и другие вспомогательные функции, выполняются авторами на Python, а участки кода, критичные с точки зрения вычислительной эффективности, реализуются на C/C++ либо на расширениях C/C++ для Python.

ПО микромодуля состоит из наземной и полетной частей. Основной задачей наземной части является формирование полетного задания путем выбора образцов целевых классов изображений для традиционной схемы распознавания либо загрузка в микромодуль предобученной нейронной сети. Главная задача полетной части – оперативное распознавание изображений подстилающей поверхности, т. е. анализ текущего кадра видеопоследовательности и отнесение его к одному из классов, указанных в полетном задании. Данная задача решается двумя различными способами:

1. С помощью традиционной схемы распознавания. Традиционная схема включает выделение информативных признаков и применение одного из известных классификаторов типа kNN, SVM и др. В качестве признаков используются матрицы совместной встречаемости, подробно описанные в работе [10]. Высокая скорость распознавания обеспечивается за счет хранения только значимых (ненулевых) элементов матриц в виде списков типа «код элемента – значение», однопроходного алгоритма сравнения признаков и классификатора kNN с небольшими значениями k (от 1 до 10). В результате экспериментов было показано, что время распознавания одного кадра размером 320×240 пикселей составляет 14,5 мс в случае использования 256 цветов (схема 2-3-3 бит) и 55 мс в случае 512 цветов (разбитие цветового пространства по схеме 3-3-3).

2. Путем распознавания с использованием сверточной нейронной сети. Жесткие ограничения базового микрокомпьютера по скорости вычислений и размеру оперативной памяти не позволили применить ни одну из широко известных нейронных сетей – AlexNet или GoogLeNet. Поэтому было принято решение разработать и использовать собственную компактную архитектуру сверточной сети. Основные решения и особенности реализации ПО распознавания изображений на базе сверточных нейронных сетей кратко описаны ниже.

Процесс решения задачи распознавания состоит из двух этапов: тренировки (обучения) нейронной сети на выборке изображений целевых классов подстилающей поверхности и, собственно, оперативного распознавания изображений с камеры на борту дрона. Обучение сети относится к наземной части и осуществляется с помощью мощного графического процессора. Распознавание кадров изображений с камеры не требует мощного процессора, поскольку при этом выполняются в основном операции свертки изображения с фильтрами, полученными на этапе обучения сети.

С учетом рассматриваемой задачи распознавания ограниченного количества классов, а также малой вычислительной мощности микрокомпьютеров была реализована упрощенная архитектура сверточной нейронной сети.

Сеть состоит из двух блоков, расположенных последовательно и содержащих сверточные слои. В первом блоке сверточный слой содержит 12 ядер свертки размером 3×3 пиксела, во втором блоке – 24 ядра. После каждого сверточного слоя расположен слой с активационной функцией ReLU: $f(x) = \max(0, x)$. За активационными слоями следуют субдискретизирующие слои, выполняющие нелинейное уплотнение карты признаков.

После упомянутых выше блоков расположена полносвязная сеть, выходом которой является еще один активационный слой с функцией Softmax.

Выходом сверточной сети для входного изображения является вектор размером пять элементов, что соответствует количеству распознаваемых классов подстилающей поверхности. Каждый элемент вектора представляет собой вероятность принадлежности входного изображения к соответствующему классу. Изображение относится к некоторому классу, если указанная вероятность превышает порог 0,99.

Реализация алгоритмов свертки выполнена на языке программирования C/C++ с последующей «ручной» оптимизацией кода, в результате чего время распознавания одного кадра составило 80 мс, т. е. 12 кадров в секунду. Однако эксперименты показали, что из-за ограниченности архитектуры нейросети и влияния всевозможных шумовых факторов (вариабельности освещения, изменения высоты полета дрона, вибрации камеры, большой вариабельности изображений «нецелевых» классов поверхностей) точность распознавания варьировала в широких пределах (от 75 до 95 %), что не соответствовало требованиям.

Решение было найдено в использовании каскада из двух нейросетей. Обе сети имели одну и ту же архитектуру, описанную выше. При этом первая из них обучалась разделять входной поток на изображения, относящиеся к группе целевых классов (т. е. к любому из них – обучение на объединении классов изображений) и «фону», а вторая сеть разбивала первый, объединенный, класс на целевые классы. В результате удалось достигнуть качества распознавания 90 % и более, хотя время распознавания возросло вдвое, т. е. до 160 мс. Более детальное рассмотрение вопроса качества распознавания изображений является предметом отдельной публикации.

7. Краткий SWOT-анализ тестируемых микроплатформ

Intel Compute Stick STK1AW32SC

Сильные стороны:

- почти в три раза быстрее, чем Raspberry Pi 3;
- предустановленная ОС Windows 10 Home для ряда пользователей может оказаться более простой и привычной, чем Linux или Android.

Слабые стороны:

- большое энергопотребление и, как следствие, потребность в более емком и тяжелом аккумуляторе;
- наличие вентилятора охлаждения и отверстий в корпусе, что в случае беспилотных летательных аппаратов может привести к попаданию влаги внутрь устройства и выходу его из строя;

– ограничения в настройках ОС Windows 10 Home Edition;

– превышение требования технического задания 2 (см. разд. 1) по длине (см. табл. 1);

– превышение требования технического задания 3 по энергопотреблению (см. табл. 2).

Возможности:

– мощный процессор позволяет использовать более сложные алгоритмы обработки данных;

– есть графическая карта Intel HD Graphics, которую потенциально можно использовать для реализации алгоритмов на основе сверточных нейронных сетей.

Риски:

– малый объем встроенной энергонезависимой памяти (32 Гб) создает риск переполнения хранилища;

– сложно подобрать небольшой, легкий, но энергоемкий аккумулятор.

Raspberry Pi 3 Model B

Сильные стороны:

– самый быстродействующий микрокомпьютер среди моделей ряда Raspberry Pi;

– обладает большим количеством портов для подключения внешних устройств.

Слабые стороны:

– достаточно высокое энергопотребление требует питания от более емкой и тяжелой батареи, что добавляет массу разрабатываемому мобильному устройству.

Возможности:

– использование более сложных алгоритмов обработки данных по сравнению с Raspberry Pi Zero;

– использование сверточных нейронных сетей для распознавания изображений.

Риски:

– линейный размер по ширине 5,7 см (см. табл. 1) вплотную подходит к максимальному размеру в 6 см (см. разд. 1, требование технического задания 2);

– как показывает практика, при высоких нагрузках на процессор и (или) температурах окружающего воздуха есть риск перегрева процессора и отключения системы;

– существует риск превышения требования технического задания 3 по энергопотреблению (см. табл. 2).

Raspberry Pi Zero Wireless

Сильные стороны:

– низкая цена (10–15 долл.);

– чрезвычайно малые массогабаритные параметры (9 г, 6,5 см в максимальном измерении);

– низкое энергопотребление.

Слабые стороны:

– малое количество портов для подключения внешних устройств;

– относительно низкая производительность.

Возможности:

– разработан специально для встраиваемых мобильных приложений.

Риски:

– есть риск того, что будет слишком медленно обрабатывать данные, особенно если использовать ресурсоемкие алгоритмы и плохо проработанную архитектуру ПО.

Xiaomi Redmi Note 4

Сильные стороны:

– наличие в комплекте всех необходимых элементов оборудования для разработки систем предварительного распознавания и отбора изображений;

– самый мощный центральный процессор из четырех протестированных микрокомпьютеров;

– самое низкое энергопотребление в режиме ожидания;

– относительно малое энергопотребление при больших вычислительных нагрузках;

– наличие металлического корпуса, защищающего от механических и электромагнитных воздействий;

– достаточно малые размеры, особенно по толщине.

Слабые стороны:

– сложность или полная невозможность добавить либо удалить компоненты оборудования устройства;

– слабая поддержка языка программирования Python для ОС Android;

– относительно большой вес (от 100 г и выше);

– превышение требования технического задания 2 по длине (см. табл. 1).

Возможности:

– разработка ПО на различных языках программирования, включая C/C++, Java, Kotlin, .NET C# и др.;

– устройство снабжено большим набором встроенных датчиков, которые можно задействовать при разработке мобильного решения.

Риски:

– разработка ПО под MIUI, основанного на Android, возможно, будет как-то отличаться от «классической» разработки под Android;

– у исполнителей отсутствует опыт разработки ПО на ОС Android.

Заключение. Результаты сравнительного анализа четырех вычислительных микроплатформ позволили сделать вывод, что наилучшим микрокомпьютером для микромодуля оперативного распознавания является модель Raspberry Pi Zero Wireless с ОС Raspbian. Эта модель имеет минимальные энергопотребление, размеры и массу, но при этом обладает достаточной вычислительной мощностью для решения задачи распознавания и классификации подстилающих поверхностей.

Сравнение вычислительных микроплатформ осуществлялось с помощью SWOT-анализа, согласно которому фактически только Raspberry Pi Zero Wireless удовлетворяет всем требованиям технического задания на разработку микромодуля. Также SWOT-анализ выявил низкую производительность Pi Zero. В результате было принято решение обойти данную проблему путем разработки участков кода, критичных с точки зрения вычислительной эффективности, на языке программирования C/C++.

Полученный макет микромодуля соответствует требованиям технического задания:

1) масса макета (включая камеру и интерфейсное оборудование) равна 57 г против максимальных 300 г;

2) габариты макета (длина, ширина, высота) 7,3×3,6×2,5 см против максимальных 12×6×4 см;

3) энергопотребление макета в нагруженном состоянии 1,75 Вт против максимальных 5 Вт;

4) время распознавания одного кадра RGB-изображения размером 320×240 пикселей с помощью матриц совместной встречаемости равно 55 мс и с помощью сверточной нейронной сети – 160 мс против максимальных 300 мс;

5) ПО макета распознает более десяти типов изображений подстилающей поверхности, в том числе четыре типа одновременно;

6) качество распознавания заданных типов изображений подстилающей поверхности (в зависимости от типа) составляет более 90 % для сверточной нейронной сети против минимальных 85–95 %;

7) предполагается, что при единичном производстве себестоимость одного микромодуля не превышает 50 долл. против максимальных 500 долл.

Существуют микрокомпьютеры с более быстрыми центральными и графическими процессорами, большим объемом памяти и количеством стандартных интерфейсов, чем у Raspberry Pi Zero Wireless, но они не удовлетворяют имеющимся техническим требованиям к разработке микромодуля. Тем не менее следует отметить преимущества смартфонов, которые, по мнению авторов, являются лучшими микрокомпьютерами, воплощают в себе все самые последние достижения в области встраиваемых систем и при этом коммерчески доступны. В соответствии с результатами SWOT-анализа смартфоны обеспечивают наилучшее соотношение между внутренними и внешними факторами: шесть сильных сторон у смартфона против двух-трех сильных сторон у остальных платформ. Совокупность сильных сторон и возможностей создает большое конкурентное преимущество для смартфонов перед другими микроплатформами. Основным недостатком смартфонов в данном случае является большой вес, что не позволяет использовать их для бюджетных дронов с низкой грузоподъемностью.

Работа была выполнена при финансовой поддержке проекта № 3.2.4.1 программы Союзного государства «Технология-СГ».

Список использованных источников

1. Sammut-Bonnici, T. SWOT analysis / T. Sammut-Bonnici, D. Galea // Wiley Encyclopedia of Management. – Vol. 12 : Strategic Management. – Wiley Online Library, 2014. – P. 1–8.
2. PhoneSat in-flight experience results / A. G. Salas [et al.] // Proc. of the Small Satellites and Services Symp. – Porto Petro, Majorca, 2014 [Electronic resource]. – 2014. – 19 p. – Mode of access: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140008616.pdf>. – Date of access: 04.06.2018.
3. Дашевский, В. П. Обзор возможностей бортовых вычислителей на основе SMARC-модулей для робототехнических комплексов / В. П. Дашевский, М. М. Бизин // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2015. – С. 91–97.

4. Intel® Compute Stick STK1AW32SC STK1A32SC. Technical Product Specification [Electronic resource] : Intel Corporation. – 2015. – Mode of access: https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/boardsandkits/computestick/STK1AW32SC_STK1A32SC_TechProdSpec.pdf. – Date of access: 04.06.2018.
5. Raspberry Pi Comparison Chart [Electronic resource] : ModMyPi LTD. – 2017. – Mode of access: <https://www.modmypi.com/download/raspberry-pi-comparison-chart.pdf>. – Date of access: 04.06.2018.
6. Raspberry Pi Documentation [Electronic resource] : Raspberry Pi Foundation with community contributions. – 2012–2018. – Mode of access: <https://www.raspberrypi.org/documentation>. – Date of access: 04.06.2018.
7. Mi Phone User Guide [Electronic resource] : Xiaomi Communications Co., Ltd. – 2016. – 37 p. – Mode of access: http://files.xiaomi-mi.com/files/Mi_Phone_User_Guide/Mi_Phone_User_Guide_eng.pdf. – Date of access: 04.06.2018.
8. Linuxium. Ubuntu flavoured 16.04 ISOs for Atom based Intel Compute Sticks [Electronic resource] : Customizing Ubuntu ISOs: Documentation and examples of how to use 'isorespin.sh'. – 2016. – Mode of access: <https://linuxiumcomau.blogspot.com/2016/05/ubuntu-flavoured-1604-isos-for-atom.html>. – Date of access: 04.06.2018.
9. Harrington, W. Learning Raspbian / W. Harrington. – Packt Publishing Ltd., 2015. – 154 p.
10. Kovalev, V. Color co-occurrence descriptors for querying-by-example / V. Kovalev, S. Volmer // Intern. Conf. on Multimedia Modeling. – Lausanne, Switzerland, 1998. – P. 32–38.

References

1. Sammut-Bonnici T., Galea D. SWOT analysis. *Wiley Encyclopedia of Management*, vol. 12 : Strategic Management, Wiley Online Library, 2014, pp. 1–8. doi: 10.1002/9781118785317.weom120103
2. Salas A. G., Attai W., Oyadomari K. Y., Priscal C., Schimmin R. S., Gazulla O. T., Wolfe J. L. PhoneSat in-flight experience results. *Proceedings of the Small Satellites and Services Symposium*. Porto Petro, Majorca, 2014, 19 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20140008616.pdf> (accessed 04.06.2018).
3. Dashevskij V. P., Bizin M. M. Obzor vozmozhnostej bortovyh vychislitelej na osnove SMARC-modulej dlja robototekhnicheskikh kompleksov [Overview of the capabilities of on-board calculators based on SMARC-modules for robotic complexes]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics]*. Tomsk, 2015, pp. 91–97 (in Russian).
4. Intel® Compute Stick STK1AW32SC STK1A32SC. Technical Product Specification. Intel Corporation, 2015. Available at: https://www.intel.com/content/dam/support/us/en/documents/boardsandkits/computestick/STK1AW32SC_STK1A32SC_TechProdSpec.pdf (accessed 04.06.2018).
5. Raspberry Pi Comparison Chart. ModMyPi LTD, 2017. Available at: <https://www.modmypi.com/download/raspberry-pi-comparison-chart.pdf> (accessed 04.06.2018).
6. Raspberry Pi Documentation. Raspberry Pi Foundation with community contributions, 2012–2018. Available at: <https://www.raspberrypi.org/documentation> (accessed 04.06.2018).
7. Mi Phone User Guide. Xiaomi Communications Co., Ltd., 2016, 37 p. Available at: http://files.xiaomi-mi.com/files/Mi_Phone_User_Guide/Mi_Phone_User_Guide_eng.pdf (accessed 04.06.2018).
8. Linuxium. Ubuntu flavoured 16.04 ISOs for Atom based Intel Compute Sticks. Customizing Ubuntu ISOs: Documentation and examples of how to use 'isorespin.sh', 2016. Available at: <https://linuxiumcomau.blogspot.com/by/2016/05/ubuntu-flavoured-1604-isos-for-atom.html> (accessed 04.06.2018).
9. Harrington W. *Learning Raspbian*. Packt Publishing Ltd., 2015, 154 p.
10. Kovalev V., Volmer S. Color co-occurrence descriptors for querying-by-example. *International Conference on Multimedia Modeling*. Lausanne, Switzerland, 1998, pp. 32–38.

Информация об авторах

Ковалев Василий Алексеевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией анализа биомедицинских изображений, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vassili.kovalev@gmail.com

Павленко Дмитрий Анатольевич – инженер-программист, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Снежко Эдуард Витальевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: eduard.snezhko@gmail.com

Information about the authors

Vassili A. Kovalev – Ph. D. (Engineering), Head of the laboratory of Biomedical Images Analysis, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vassili.kovalev@gmail.com

Dzmitry A. Paulenka – Software Engineer, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dmitri.pavlenko@gmail.com

Eduard V. Snezhko – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: eduard.snezhko@gmail.com

Левчук Виталий Андреевич – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitali.liauchuk@gmail.com

Калиновский Александр Александрович – научный сотрудник, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gakarak@gmail.com

Vitali A. Liauchuk – Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vitali.liauchuk@gmail.com

Alexander A. Kalinovski – Researcher, The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganova Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gakarak@gmail.com