

Научная статья
УДК 621.396.946
DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В СИСТЕМАХ МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Андрей Вячеславович Богословский¹, Сергей Николаевич Разиньков²,
Элеонора Викторовна Сёмка^{3✉}, Алексей Борисович Буслаев⁴

^{1, 2, 3, 4} Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина» Минобороны России, Воронеж, Россия

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

⁴ bus-alex@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1777-4921>

Аннотация. Проведен анализ систем многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации для беспилотных летательных аппаратов. Показано, что для повышения помехоустойчивости навигационного оборудования на основе адаптивного изменения параметров настроек целесообразно применять программируемые логические интегральные схемы для реализации вариативных алгоритмов обработки сигналов без реконфигурации структуры оборудования при изменениях радиоэлектронной обстановки.

Выполнена разработка помехоустойчивого навигационного комплекса для беспилотного летательного аппарата на базе программируемой логической интегральной схемы с функциями одновременного приема сигналов спутниковых систем навигации ГЛОНАСС, GPS, QZSS, BeiDou, Galileo, NavIC по четырем независимо настраиваемым каналам и их цифровой обработки с использованием алгоритмов адаптивной фильтрации. С использованием программ электродинамического моделирования адаптивных антенных решеток SolidWorks, Altium Designer, Quartus исследованы закономерности пространственной избирательности приема сигналов и возможности адаптации навигационного оборудования в условиях помех.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система спутниковой навигации, помехоустойчивость навигационного оборудования, программируемая логическая интегральная схема, адаптивная антенная решетка

Для цитирования: Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В., Буслаев А. Б. Применение программируемых логических интегральных схем в системах многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 13–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20.

Original article

APPLYING FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS IN SYSTEMS OF MULTICHANNEL DIGITAL PROCESSING OF SATELLITE NAVIGATION SIGNALS

Andrey V. Bogoslovsky¹, Sergey N. Razinkov², Eleonora V. Syomka^{3✉}, Aleksey B. Buslaev⁴

^{1, 2, 3, 4} Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia

¹ bogosandrej@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6469-3366>

² razinkovsergey@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3987-0607>

³ semka_elya@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-0194-6979>

Abstract. The study analyzes multichannel digital satellite navigation signal processing systems for unmanned aerial vehicles. To advance interference insusceptibility of navigation equipment on the basis of

adaptive change in settings, it is advisable to apply a field programmable gate arrays in order to implement variations of algorithms of signal processing without reconfiguring the equipment's structure in changes in radioelectronic settings.

A navigation complex with the function of interference insusceptibility is developed based on the field programmable gate arrays. It may simultaneously receive signals from such satellite navigation systems as GLONASS, GPS, QZSS, BeiDou, Galileo, and NavIC via four independently tuned channels and their digital processing using adaptive filtering algorithms. Patterns in spatial selectivity of signals are studied, as are the possibilities for navigation equipment adaptability in interference settings using programs for electrodynamic modeling of adaptive antenna arrays – SolidWorks, Altium Designer, and Quartus.

Keywords: unmanned aerial vehicle, satellite navigation system, interference insusceptibility of a navigation equipment, field programmable gate array, adaptive antenna array

For citation: Bogoslovsky A. V., Tazinkov S. N., Syomka E. V., Buslaev A. B. Applying field programmable gate arrays in systems of multichannel digital processing of satellite navigation signals. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(2):13–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20.

ВВЕДЕНИЕ

Усложнение условий применения, комплексирование функций и расширение перечня задач, решаемых радиотехническими комплексами с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) [1, 2], определяют необходимость повышения помехоустойчивости их навигационного оборудования [3, 4].

Одним из эффективных технических способов защиты систем спутниковой навигации от преднамеренных и случайных помех является пространственная селекция в адаптивных антенных решетках [5, 6]. Главное преимущество пространственной селекции излучений по сравнению с временной селекцией заключается в возможности реализации при отсутствии априорных сведений о частотно-временных параметрах обрабатываемых процессов [5, 7], что позволяет выполнять режекцию помех различного происхождения при изменениях степени проявления демаскирующих признаков в складывающейся радиоэлектронной обстановке [6].

Пространственная селекция помех в адаптивных антенных решетках осуществляется за счет корректировки комплексных амплитуд или фаз сигналов на антенных элементах [8] для достижения максимального отношения сигнал/(помеха + шум) на входе приемника системы спутниковой навигации [1, 5]. Диаграммы направленности антенных решеток формируются таким образом, чтобы источники помех располагались в секторах наименьшего усиления их излучений при наиболее высоких уровнях полезных сигналов навигационного оборудования.

Для достижения помехоустойчивости навигационного оборудования БЛА, позволяющей снизить риски подмены сигналов глобальных спутниковых навигационных систем при спуфинг-атаках, целесообразно организовать получение навигационной информации одновременно в различных диапазонах частот. По результатам оценивания отношения сигнал/(помеха + шум) в независимо настраиваемых приемных каналах выполняется автоматическое подключение оборудования к тому из них, где указанный показатель имеет наибольшее значение [3, 7].

Техническая реализация мер помехозащитности при рациональном расходовании информационного ресурса навигационной системы базируется на построении алгоритмов цифровой обработки принимаемых радиоизлучений микроконтроллерами с установленной при проектировании схмотехнической структурой и фиксированной топологией связей [9].

Такие специализированные устройства [9, 10], ориентированные на выполнение задач навигации в детерминированных условиях, обладают высокими показателями быстродействия, определяемыми производительностью логических элементов, и характеризуются отсутствием аппаратной избыточности при регламентированной загрузке каждого компонента схемы [10].

Вместе с тем недостатком цифровых систем с жесткой логикой функционирования является отсутствие возможности настройки целевых функций при адаптации к условиям выполнения целевых задач, поскольку для из-

менения алгоритмов защиты от помех требуются трансформация структуры и изменение логических правил взаимодействия ее компонентов. По результатам летных экспериментов [11] установлено, что при потере сигналов глобальных спутниковых систем навигации автономный полет БЛА реализовать достаточно трудно, а при воздействии преднамеренных помех регистрируются отказы не только основных, но и резервных систем навигации [1, 2].

Поэтому при создании помехоустойчивой аппаратуры спутниковой навигации для БЛА предлагается применять лишенные указанного недостатка универсальные программируемые адаптивные системы с вариативными алгоритмами обработки сигналов [2, 3, 7]. Робастные свойства алгоритмов навигационного обеспечения объектов сохраняются при изменении параметров радиоэлектронной обстановки без коррекции структуры и состава оборудования путем настройки ее параметров по управляющим командам [3, 4].

Перспективные направления развития спутниковой навигации связаны с построением аппаратуры на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), в которых логика обработки данных (сигна-

лов), в отличие от микросхем, не устанавливается на этапе изготовления, а программируется [3, 7, 12].

Цель работы – разработка помехоустойчивого навигационного комплекса для БЛА на компонентной базе ПЛИС.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Анализ современных разработок помехоустойчивых навигационных систем для беспилотных летательных аппаратов.

Натурные и стендовые эксперименты показывают, что наиболее высокие показатели устойчивости работы навигационной аппаратуры из состава бортового оборудования БЛА «Орлан-10» и «Грант-М» в условиях помех достигаются за счет применения адаптивной антенной решетки «Комета-М» (разработчик – ОАО «ВНИИР-Прогресс», г. Чебоксары).

На рис. 1 представлены общий вид четырехэлементной антенной решетки с диапазоном рабочих частот 1 575–1 610 МГц и вид антенного элемента в форме патч-антенны Ceramic Patch Antenna Taoglas CGGP.18.4.C.02. Тактико-технические характеристики решетки обеспечивают прием сигналов глобальных навигационных систем GPS, GLONASS, Galileo.

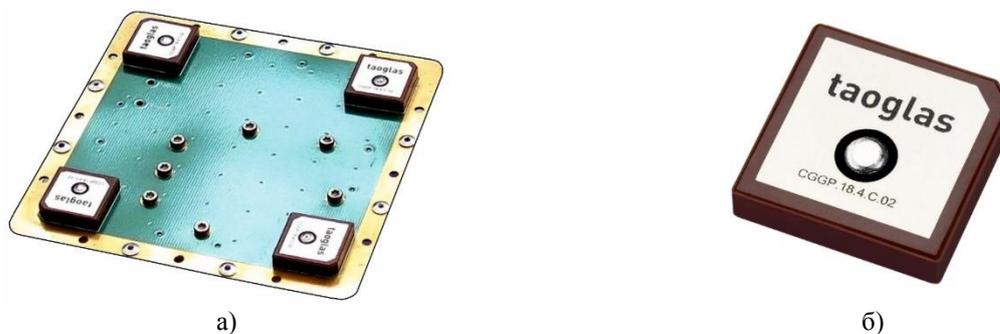


Рис. 1. Адаптивная антенная решетка «Комета-М»:

а) общий вид антенной решетки, б) вид антенного элемента

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

В [4] на основании модельных экспериментов по защите навигационной аппаратуры от преднамеренных помех путем формирования диаграмм направленности адаптивной антенной решетки «Комета-М» установлено, что при исключении приема в трех направлениях, равномерно распределенных по азимуту, утрачивается способность пространственной

режекции мешающих излучений. Адаптивная антенная решетка переходит в состояние перегрузки, характеризуемое нейтрализацией функционала полной помехозащищенности [4, 13].

Таким образом, вопросы разработки помехоустойчивых устройств для комплексной обработки навигационной информации от группы спутников остаются открытыми.

2. Разработка помехоустойчивого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе программируемых логических интегральных схем.

Структурная схема разрабатываемого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе ПЛИС представлена



Рис. 2. Структурная схема комплекса

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Платформа на основе микросхемы NT1065 с аналогово-цифровым преобразователем (АЦП) LTC2174CUKG-12-PBF с режимами последовательного и параллельного программирования, выполненная по технологии программно-определяемого радио SDR (Software Defined Radio) [14], позволяет производить четырехканальный прием сигналов в диапазонах частот системы дифференциального сервиса OmniSTAR (1 539,9 МГц и 1 558,7 МГц) и глобальных спутниковых навигационных систем:

- ГЛОНАСС L1, L2, L3, L5;
- GPS L1, L2, L5;
- QZSS L1, LEX, L2, L5;
- BeiDou B1-C, B1-A, B3, B2b, B2a, B1, B3-A;
- Galileo E1, E6, E5b, E5a;
- NavIC L5.

Центральным элементом помехоустойчивого комплекса является ПЛИС производства Altera на основе микросхемы FPGA серии Cyclone, имеющей необходимое количество выводов LDVS, обеспечивающих низковольтную дифференциальную передачу сигналов на высоких частотах. Для создания и отладки проектов применялась система автоматизированного проектирования цифровых устройств Quartus [15].

Управление микросхемой NT1065 с установлением режимов ее работы, а также

на рис. 2. Пунктиром обозначен созданный проект платы, связывающий его элементы в единое целое. Основное аппаратное обеспечение включает модуль PCB NT1065 FMC V3, ПЛИС ALTERA FPGA CYCLONE II, плату сопряжения с USB 3.0.

настройка АЦП происходит согласно протоколу SPI по линиям CSN, SCLK, MOSI, MISO в соответствии с картой управляющих кодов [16], корректировка настройки может осуществляться контрольными сигналами ПЛИС по интерфейсу UART.

Для визуализации в среде MATLAB, контроля, настройки параметров и обеспечения функционирования навигационного комплекса по заданному алгоритму разработан проект платы сопряжения (переходной платы). Плата содержит ПЛИС, микроконтроллер AT89C5130A-PUTUM, микросхему энергонезависимой памяти W9812G6KH и контроллер USB 3.0 FT600Q для организации управления с персональной ЭВМ.

Проектирование переходной платы осуществлялось с применением программного комплекса Altium Designer, содержащего средства интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников с учетом требований, предъявляемых современными технологиями разработок. Работа над проектом проводилась в единой управляющей оболочке Design Explorer, что позволило контролировать его целостность на всех этапах синтеза.

На рис. 3 представлены электронный проект разработанной платы (а) и ее изготовленный образец со стороны пайки (б).

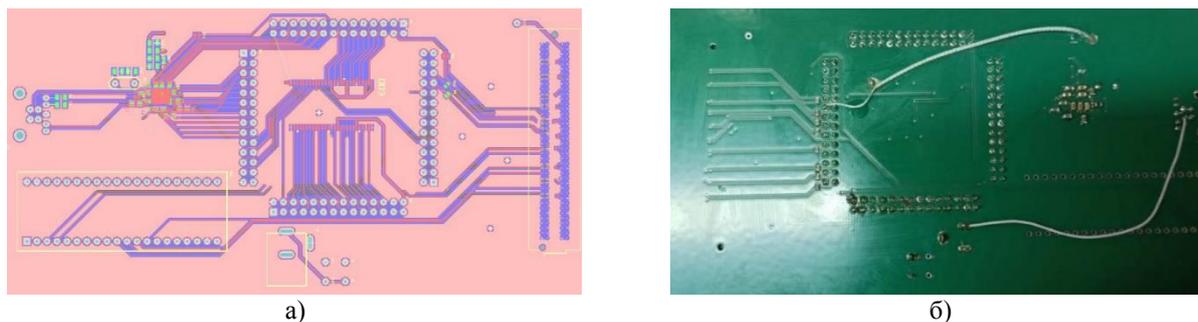


Рис. 3. Плата сопряжения:

а) электронный проект, б) действующий образец

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Особое внимание при создании платы уделялось качеству трассировки, поскольку оно может существенно ухудшить характеристики проекта по сравнению с показателями, доступными в ПЛИС – объем логических ресурсов, емкость внутренней памяти, общее число пользовательских блоков ввода/вывода, системная производительность [12].

Монтаж печатной платы и проверка ее работоспособности выявили трудности с запуском внутреннего генератора контроллера USB 3.0 FT600Q при подключении к нему кварцевого резонатора на частоте 30 МГц, обеспечивающего его устойчивое функционирование. Применение резонаторов разных производителей не помогло преодолеть указанные сложности.

В ходе серии экспериментов для запуска генератора контроллера FT600Q был при-

менен внешний источник тактового сигнала, формируемого с помощью модуля PLL на базе ПЛИС ALTERA FPGA CYCLONE II, который преобразовывал сигнал с частотой 50 МГц в 30 МГц. Проведена доработка схемы, прошивки ПЛИС и самой платы по месту. На рис. 3б изображены соединительные провода, обеспечивающие передачу тактового сигнала 30 МГц с ПЛИС на вход контроллера FT600Q.

Дополнительно к имеющимся возможностям NT1065 разработанная плата позволяет осуществлять цифровую обработку сигналов с выхода АЦП по алгоритмам адаптивной нелинейной фильтрации и трансляцию результатов на персональную ЭВМ.

На рис. 4 представлена блок-схема передачи данных с ПЛИС на ЭВМ по интерфейсу USB 3.0 в рабочем окне программы Quartus.

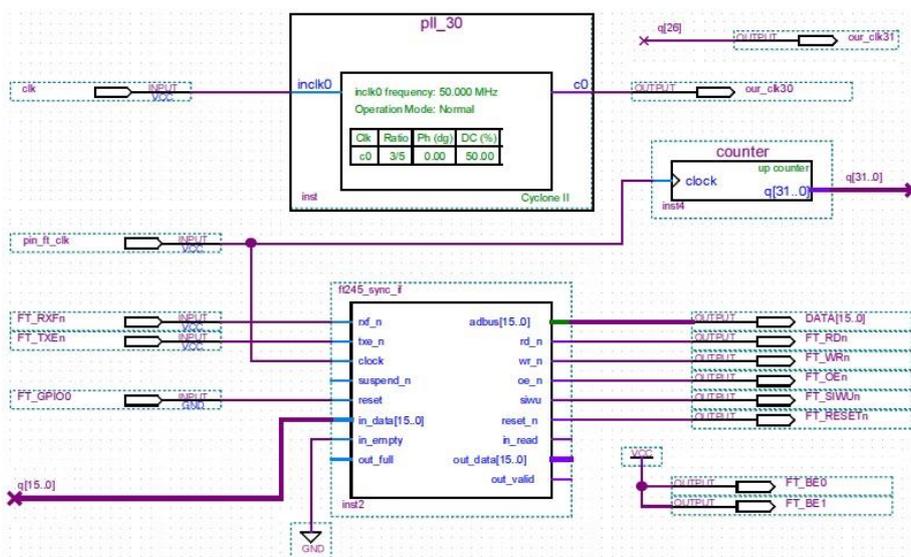


Рис. 4. Блок-схема передачи данных с ПЛИС на ЭВМ по интерфейсу USB 3.0

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Используемые основные порты микросхемы имеют следующее назначение [17]:

- CLK выполняет параллельный вывод тактового сигнала шины FIFO на главную шину FIFO;
- RXF_N обеспечивает синхронный режим с приемом данных от внешних устройств;
- TXE_N предназначен для определения состояния сигнала тайминга;
- GPIO0...1 осуществляет конфигурацию микросхемы в соответствии с таблицей истинности;
- DATA_0...15 представляют собой биты ввода-вывода данных по параллельной шине;
- RD_N используется для включения считывания входного сигнала;
- WR_N отвечает за разрешение записи входного сигнала, запрос на транзакцию данных;

- OE_N предназначен для включения (отключения) вывода данных на внешние устройства;

- SIWU_N применяется для внешней синхронизации;
- BE_0..1 представляет собой бит ввода-вывода 0...1;
- RESET_N реализует функции сброса микросхемы в начальное состояние.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 представлен внешний вид изготовленного помехоустойчивого комплекса цифровой обработки сигналов спутниковой навигации на базе ПЛИС со стороны компонентов (а) и со стороны, где подводится общее питание к изделию (б).

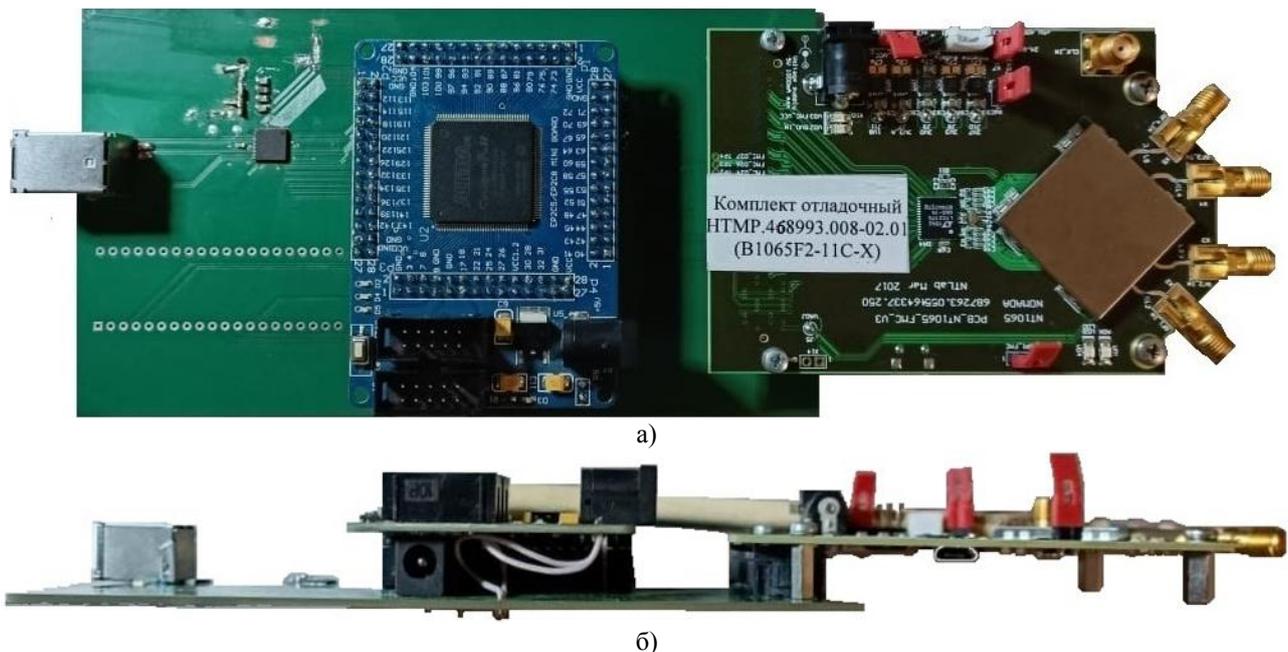


Рис. 5. Внешний вид комплекса:

а) со стороны компонентов, б) со стороны разъема питания

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На высокоуровневом языке программирования общего назначения C++ разработаны драйверы для операционной системы Windows, позволяющие осуществлять взаимодействие персональной ЭВМ с аппаратной частью комплекса.

Реализовано определение микросхемы FT600Q, подключенной по шине USB 3.0, чтение и запись конфигурации.

На рис. 6 приведены результаты выполнения программы в одноканальном (а) и четырехканальном (б) режимах работы.

```
List of Connected Devices!  
Device[0]  
  Flags: 0x4 [USB 3] | Type: 600 | ID: 0x0403601E | ftHandle=00000000  
  SerialNumber=000000000001  
  Description=FTDI SuperSpeed-FIFO Bridge  
  VendorID: 0x0403  
  ProductID: 0x601E  
  StringDescriptors:  
  bInterval: 0x00  
  PowerAttributes: 0xE0  
  PowerConsumption: 0x0060  
  FIFOLock: CONFIGURATION_FIFO_CLK_100 (0x00)  
  FIFOMode: CONFIGURATION_FIFO_MODE_245 (0x00)  
  ChannelConfig: CONFIGURATION_CHANNEL_CONFIG_1 (0x02)  
  OptionalFeatureSupport: CONFIGURATION_OPTIONAL_FEATURE_DISABLEALL (0x0000)  
  BatteryChargingGPIOConfig: 0xE4  
  FlashEEPROMDetection: 0x10  
  MSIO_Control: 0x00010800  
  GPIO_Control: 0x00000000  
  read: 0  
Process returned 0 (0x0)  execution time : 6.591 s  
Press any key to continue.
```

а)

```
List of Connected Devices!  
Device[0]  
  Flags: 0x4 [USB 3] | Type: 600 | ID: 0x0403601E | ftHandle=00000000  
  SerialNumber=000000000001  
  Description=FTDI SuperSpeed-FIFO Bridge  
  VendorID: 0x0403  
  ProductID: 0x601E  
  StringDescriptors:  
  bInterval: 0x00  
  PowerAttributes: 0xE0  
  PowerConsumption: 0x0060  
  FIFOLock: CONFIGURATION_FIFO_CLK_100 (0x00)  
  FIFOMode: CONFIGURATION_FIFO_MODE_600 (0x01)  
  ChannelConfig: CONFIGURATION_CHANNEL_CONFIG_4 (0x00)  
  OptionalFeatureSupport: CONFIGURATION_OPTIONAL_FEATURE_DISABLEALL (0x0000)  
  BatteryChargingGPIOConfig: 0xE4  
  FlashEEPROMDetection: 0x10  
  MSIO_Control: 0x00010800  
  GPIO_Control: 0x00000000  
  read: 0  
Process returned 0 (0x0)  execution time : 5.905 s  
Press any key to continue.
```

б)

Рис. 6. Программная установка режимов работы:

а) одноканального, б) четырехканального

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Как следует из рис. 6, операционная система определяет устройство FT600Q, настроенное в одноканальный режим работы (FT245) по шине USB 3.0, а также установку микросхемы в четырехканальный режим работы (FT600).

Для создания пользовательского интерфейса, вывода графических результатов цифровой обработки, принятых по четырем каналам сигналов глобальных спутниковых навигационных систем, использовался пакет программирования и вычислений MATLAB.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе обоснована актуальность проектирования помехоустойчивого

комплекса, разработана структурная схема, проведена компоновка печатной платы со спецификацией, изготовлен образец (прототип), выполнены тестирование, отладка прошивки и настройка драйверов.

Разработанный комплекс, в отличие от навигационной аппаратуры, применяемой в настоящее время на БЛА, обеспечивает многоканальный прием сигналов глобальных спутниковых навигационных систем в 23 поддиапазонах частот 1 145–1 609 МГц, их последующую цифровую обработку и взаимодействие через USB 3.0 с персональной ЭВМ для обработки и отображения навигационной информации.

Список источников

1. Красильщиков М. Н., Себряков Г. Г. Управление и наведение беспилотных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. 279 с.
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Ч. 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109–146. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10105.
3. Сакулин Е. А., Березовский С. Е., Латанова О. И. Способы повышения помехоустойчивости и имитостойкости навигационной аппаратуры потребителей глобальных навигационных спутниковых систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 8. С. 160–164.
4. Камнев Е. А., Юдин В. Н. Помехоустойчивость НАП спутниковых радионавигационных систем с четырехэлементной антенной решеткой // Электросвязь. 2018. № 6. С. 37–44.

References

1. Krasilshchikov M. N., Sebryakov G. G. Upravlenie i navedenie bespilotnykh letatelnykh apparatov na osnove sovremennykh informatsionnykh tekhnologii. Moscow: FIZMALIT; 2003. 279 p. (In Russian).
2. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Counter unmanned aerial vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*. 2020;(1):109–146. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10105. (In Russian).
3. Sakulin E. A., Berezovsky S. E., Latanova O. I. Techniques of improving noise immunity and imitability of consumer navigation equipment of global navigation satellite systems. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2022;(8):160–164. (In Russian).
4. Kamnev E. A., Yudin V. N. Interference immunity of user navigation equipment of satellite radio navigation systems with four-element antenna array. *Elektrosviaz*. 2018;(6):37–44. (In Russian).
5. Monzingo R. A., Miller T. W. Introduction to adaptive arrays. Chelpanov V. G., Leksachenko V. A.,

5. Монзинго Р. А., Миллер Т. У. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / пер. с англ. В. Г. Челпанова, В. А. Лексаченко ; под общ. ред. В. А. Лексаченко. М. : Радио и связь, 1986. 448 с.
6. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / пер. с англ. Ю. К. Сальникова ; под. общ. ред. В. В. Шахгильдянова. М. : Радио и связь, 1989. 439 с.
7. Нечаев Е. Е. К вопросу построения интегрированных навигационных систем на базе ПЛИС // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2008. № 136. С. 85–94.
8. Кашин В. А. Методы фазового синтеза антенных решеток // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. № 1. С. 47–60.
9. Магда Ю. С. Современные микроконтроллеры. Архитектура, программирование, разработка устройств. М. : ДМК, 2017. 224 с.
10. Новиков Ю. В., Скоробогатов П. К. Основы микропроцессорной техники. М. : Интернет-ун-т информ. технологий ; БИНОМ, 2012. 357 с.
11. Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В. Обоснование электронной компонентной базы для автогенераторов при навигационном обеспечении беспилотных летательных аппаратов // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 1. С. 6–15.
12. Вальпа О. Полезные схемы с применением микроконтроллеров и ПЛИС. М. : Додэка-XXI, 2016. 416 с.
13. Разиньков С. Н., Богословский А. В. Синтез нулей диаграмм направленности антенных решеток для излучения узкополосных и импульсных сигналов с высокими коэффициентами направленного действия // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8, № 2. С. 32–37.
14. Львов А. В., Мителкова А. Д., Кабаев Д. В. и др. Разработка и прототипирование радиоэлектронных устройств по технологии SDR с использованием системы GNU RADIO // Радиолокация, навигация, связь : сб. тр. XXIV Междунар. науч.-технич. конф., 17–19 апреля 2018 г., г. Воронеж. Т. 2. Воронеж : Вэлборн, 2018. С. 228–234.
15. Комолов Д. А., Мьялк Р. А., Зобенко А. А. и др. Системы автоматизированного проектирования фирмы Alters MAX+plus II и Quartus II. Краткое описание и самоучитель. М. : ИП РадиоСофт, 2002. 352 с.
16. Техническое описание микросхемы NT1065. URL: https://ntlab.lt/wp-content/uploads/2020/02/NT1065_LE_DS_v2.18.pdf (дата обращения: 04.05.2023).
17. Техническое описание микросхемы FTDI FT600Q. URL: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS_FT600Q-FT601Q-IC-Datasheet.pdf (дата обращения: 04.05.2023).
- translators; Leksachenko V. A., editor. Moscow; Radio i sviaz; 1986. 448 p. (In Russian).
6. Widrow B., Stearns S. D. Adaptive signal processing. Salmikov Yu. K., translator; Shakhgildyan V. V., editor. Moscow: Radio i sviaz; 1989. 439 p. (In Russian).
7. Nechaev E. E. On problem of integrated navigation systems on the basis of FPGA. *Civil Aviation High Technologies*. 2008;(136):85–94. (In Russian).
8. Kashin V. A. Metody fazovogo sinteza antennoykh reshetok. *Zarubezhnaia radioelektronika. Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 1997;(1):47–60. (In Russian).
9. Magda Yu. S. Sovremennyye mikrokontrollery. Arkhitektura, programmirovaniye, razrabotka ustroystv. Moscow: DMK; 2017. 224 p. (In Russian).
10. Novikov Yu. V., Skorobogatov P. K. Osnovy mikroprotssessornoi tekhniki. Moscow: Internet-un-t inform. tekhnologii; BINOM; 2012. 357 p. (In Russian).
11. Bogoslovsky A. V., Razinkov S. N., Syomka E. V. Validation of the electronic component base for self-excited oscillators in navigating unmanned aerial vehicles. *Proceedings in Cybernetics*. 2023;22(1):6–15. (In Russian).
12. Valpa O. Poleznye skhemy s primeneniem mikrokontrollerov i PLIS. Moscow: Dodeka-XXI; 2016. 416 p. (In Russian).
13. Razinkov S. N., Bogoslovsky A. V. The synthesis of antenna array pattern zeros for radiating narrowband and pulsed high directive gain signals. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2012;8(2):32–37. (In Russian).
14. Lvov A. V., Mitelkova A. D., Kabaev D. V. et al. Development and prototyping of SDR radio systems using the GNU radio toolkit. In: *Proceedings of the XXIV International Scientific and Engineering Conference "Radiolokatsiia, navigatsiia, sviaz"*, April 17–19, 2018, Voronezh. Vol. 2. Voronezh: Velborn; 2018. p. 228–234. (In Russian).
15. Komolov D. A., Myalk R. A., Zobenko A. A. et al. Sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniia firmy Alters MAX+plus II i Quartus II. Kratkoe opisaniye i samouchitel. Moscow: IP RadioSoft; 2002. 352 p. (In Russian).
16. Tekhnicheskoye opisaniye mikroskhemy NT1065. URL: https://ntlab.lt/wp-content/uploads/2020/02/NT1065_LE_DS_v2.18.pdf (accessed: 04.05.2023). (In Russian).
17. Tekhnicheskoye opisaniye mikroskhemy FTDI FT600Q. URL: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/07/DS_FT600Q-FT601Q-IC-Datasheet.pdf (accessed: 04.05.2023). (In Russian).

Информация об авторах

А. В. Богословский – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры радиоэлектроники.
С. Н. Разиньков – доктор физико-математических наук, доцент, профессор.
Э. В. Сёмка – кандидат физико-математических наук, доцент.
А. Б. Буслаев – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors

A. V. Bogoslovsky – Candidate of Sciences (Engineering), Docent, Deputy Head of the Radioelectronics Department.
S. N. Razinkov – Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Docent, Professor.
E. V. Syomka – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent.
A. B. Buslaev – Candidate of Sciences (Engineering), Docent.