

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ, КОНСТРУКЦИЯ И ПРОИЗВОДСТВО ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

## DESIGN, CONSTRUCTION AND PRODUCTION OF AIRCRAFT

УДК 629.7.058

doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

### ЧАСТОТНЫЙ ДИСКРИМИНАТОР ДЛЯ САМОЛЕТНОЙ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ ДОПЛЕРОВСКОЙ СИСТЕМЫ НА МИКРОКОНТРОЛЛЕРЕ

И. В. Аксенов<sup>1</sup>, В. М. Чайковский<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Объектом исследования является самолетная радионавигационная система, обеспечивающая его безопасность в ходе полета. Предметом предлагаемого исследования является методика построения самолетной радионавигационной системы, основанной на использовании эффекта Доплера. Непосредственной целью работы является разработка цифрового частотного дискриминатора, являющегося основным, наиболее ответственным узлом в описываемой методике применения эффекта Доплера при построении подобных измерителей путевой скорости и угла сноса самолета. *Материалы и методы.* Описание процесса определения путевой скорости самолета и его угла сноса базируется на методике, в основе реализации которой лежит использование эффекта Доплера. Введено понятие цифрового частотного дискриминатора и сформулированы основные требования, предъявляемые к его работе. *Результаты.* На основе предложенного подхода показан процесс разработки цифрового частотного дискриминатора на микроконтроллере (МК) для широко используемых на практике четырех-лучевых двухчастотных доплеровских навигационных самолетных систем (ДНСС) с двойным преобразованием частоты. *Выводы.* Практическая реализация предложенного дискриминатора особенно актуальна при построении беспилотных летательных аппаратов, поскольку наряду с высокой точностью измерения значений их основных навигационных параметров, таких как: путевая скорость и угол сноса, обладает еще низким энергопотреблением и высокой отказоустойчивостью, достигаемой за счет использования цифровой микро схемотехники.

**Ключевые слова:** МК, эффект Доплера, самолет, частотный дискриминатор, навигационная система

**Для цитирования:** Аксенов И. В., Чайковский В. М. Частотный дискриминатор для самолетной радионавигационной доплеровской системы на микроконтроллере // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 3. С. 103–109. doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

### FREQUENCY DISCRIMINATOR FOR AIRCRAFT RADIONAVIGATION DOPPLER SYSTEM BASED ON MICROCONTROLLER

I.V. Aksenov<sup>1</sup>, V.M. Chaikovsky<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Penza State University, Penza, Russia

<sup>1,2</sup> rtech@pnzgu.ru

**Abstract.** *Background.* The object of the study is an aircraft radio navigation system. The subject of this research is the methodology for constructing an airborne radio navigation system based on the Doppler effect. The aim of the work

is to develop a digital frequency discriminator, which is the main unit in the method of applying the Doppler effect in the construction of a speed and drift meter. *Materials and methods.* A technique based on the Doppler effect was used to describe the process of determining the speed of an aircraft and its drift angle. The concepts of digital frequency discriminator are introduced. *Results.* The proposed approach shows the development process of a four-beam dual-frequency DSS with double frequency conversion, including a digital frequency discriminator based on the MC. *Conclusion.* This implementation is especially relevant for unmanned aerial vehicles, since it has a high measurement and calculation accuracy, low power consumption, and fault tolerance.

**Key words:** microcontroller, Doppler effect, plane, frequency discriminator, navigation system

**For citation:** Aksenov I.V., Chaykovskiy V.M. Frequency discriminator for aircraft radionavigation Doppler system based on microcontroller. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(3): 103–109. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-3-12

Передатчик навигационной системы самолета – летательного аппарата (ЛА) облучает земную поверхность высокочастотными электромагнитными колебаниями под углом визирования  $\beta_0$  (рис. 1), между значением частоты излучаемых колебаний и частотой принимаемых самолетным приемником отраженных от земной поверхности колебаний возникает сдвиг, обусловленный проявлением эффекта Доплера и называемый доплеровским приращением частоты.

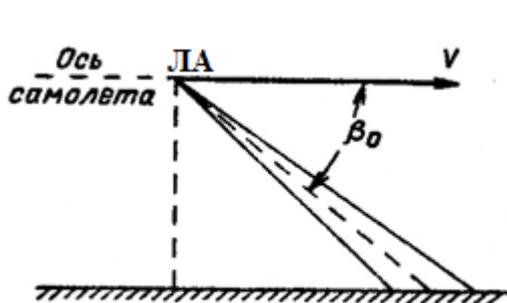


Рис. 1. Облучение земной поверхности

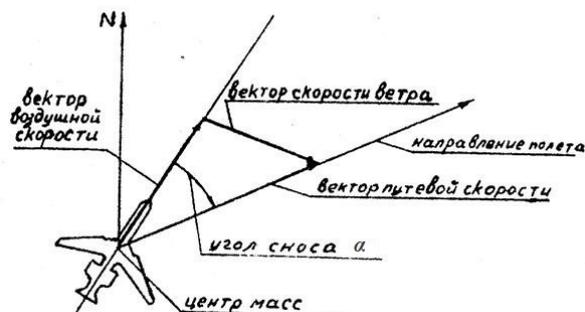


Рис. 2. Угол сноса

Для измерения путевой скорости ЛА передатчик через антенну облучает земную поверхность под углом  $\beta_0$  высокочастотными гармоническими колебаниями с фиксированным значением частоты, которые в результате отражения изменяют значение своей частоты на уровень доплеровского приращения, пропорционального значению путевой скорости ЛА. При этом, если ось диаграммы направленности антенны совпадает с направлением вектора путевой скорости, т.е. при отсутствии угла сноса  $\alpha$ , данное приращение частоты принимаемого сигнала, по отношению к частоте излученного будет иметь максимальное значение, которое фиксируется с помощью специального устройства, выдающего это значение на цифровой прибор [1]. Оценка значения угла сноса  $\alpha$ , образуемого между направлением вектора путевой скорости и продольной (строительной) осью ЛА, происходит путем поворота на тот или иной угол ось диаграммы направленности антенны до момента достижения максимального значения уровня доплеровского приращения частоты, при этом произведенный угол поворота антенны будет равняться углу сноса ЛА (рис. 2).

Цифровой частотный дискриминатор (ЦЧД) можно реализовать путем подачи оцифрованных значений напряжения с выхода частотного дискриминатора, предложенного в работе [2]. Альтернативным и в то же время более грамотным подходом является построение данной схемы, которая обеспечивает оценку значений путевой скорости и угла сноса ЛА с большей точностью.

Доплеровские навигационные самолетные системы (ДНСС) прошли свое развитие от однолучевых до многолучевых систем, идя по пути снижения степени влияния на оценку значений угла сноса и путевой скорости ЛА, которое непременно возникает в ходе совершения им полета с наличием у него тангажа или крена (рис. 3).



Рис. 3. Тангаж и крен ЛА

В настоящее время широкое практическое использование получили четырехлучевые с Х-образным пересечением строго под углом  $90^\circ$  двух пар лучей (А1–А3) и (А2–А4) двухчастотные ДНСС с двойным преобразованием частоты (ДЧ ДНСС с ДПЧ), специфику построения которых поясняет рис. 4. Тогда при условии нахождения лучей А1 и А3 в одной вертикальной плоскости и согласно проявлению эффекта Доплера [3], значение доплеровской частоты выходного сигнала первого канала будет равно  $F_{v1} = \frac{2V}{\lambda} \cos\beta_0 \cos(\theta - \alpha)$ , а третьего канала, соответственно,  $F_{v3} = \frac{2V}{\lambda} \cos\beta_0 \cos(\theta + \alpha)$ . При этом значение разностного сигнала между ними  $F_{v1,3} = F_{v1} - F_{v3}$  будет оставаться неизменным при наличии как крена, так и тангажа у ЛА, возникновение которых равносильно изменению начального значения угла  $\beta_0$ , что приводит к возникновению значительного искажения результата оценки значений навигационных параметров ЛА. Однако в данном случае происходит следующее, на сколько возрастет/уменьшится значение величины  $F_{v1}$ , на столько произойдет уменьшение/возрастание значения величины  $F_{v3}$ , т.е. тогда значение разностного сигнала не изменится. Аналогичное будет происходить и с сигналами  $F_{v2}$ ,  $F_{v4}$ , которые формируют сигнал второй разностной частоты  $F_{v2,4}$ . Значение путевой скорости будет пропорционально абсолютному значению любой из полученных разностных частот  $F_{v1,3}$ ,  $F_{v2,4}$ , причем для получения более точной оценки значения путевой скорости последнюю можно оценить путем нахождения среднего арифметического значения данных разностных частот.

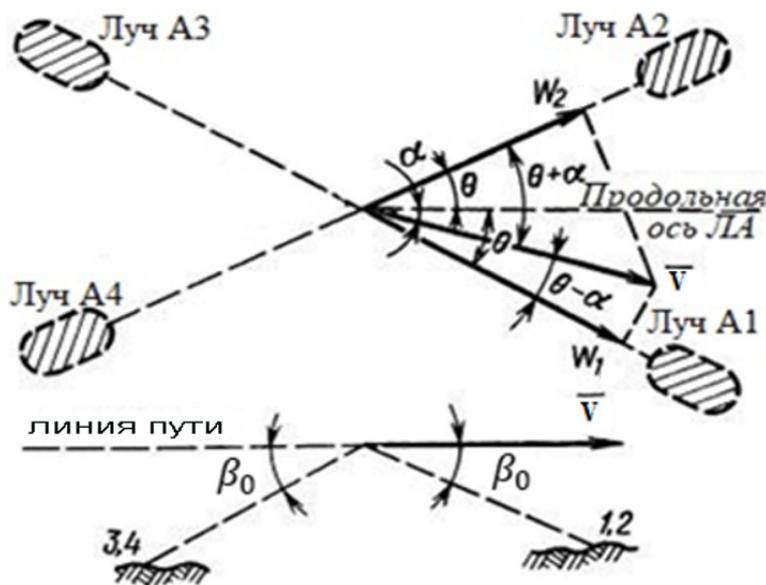


Рис. 4. Вид проекций на земную поверхность диаграмм направленностей 4-лучевой навигационной системы

Значение угла сноса  $\alpha$  будет пропорционально разности значений разностных частот, а знак угла лево/право будет определяться знаком данной разности. Следует заметить, что отсчет значения путевой скорости необходимо отсчитывать только после установки нулевого значения угла  $\alpha$ , путем совмещения оси диаграммы направленности антенны с направлением вектора скорости  $V$  ЛА.

Выделение сигналов частот  $F_{\nu 1} \dots F_{\nu 4}$  осуществляется с помощью балансного смесителя (БС), на один из входов которого поступает «слабый» излучаемый сигнал, являющийся «просочившимся» сигналом, обусловленным наличием как монтажной емкости, так и наличием боковых лепестков у приемопередающих антенн. В обобщенном виде структурная схема четырехлучевой двухчастотной ДНСС с ДПЧ представлена на рис. 5.

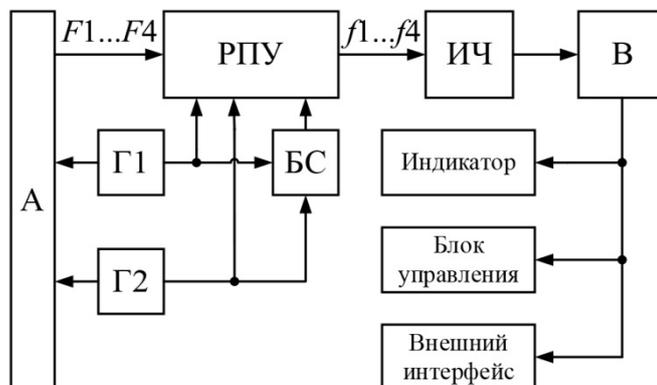


Рис. 5. Структурная схема ДНСС:

А – приемопередающая антенна; РПУ – радиоприемное устройство;  
ИЧ – измеритель частоты; В – вычислитель

Структурная схема РПУ показана на рис. 6, где генераторы сверхвысоких частот ГСВЧ1 и ГСВЧ2, реализованные по структуре: задающий кварцевый генератор – умножитель частоты, генерируют колебания с частотами  $f_{01}$  и  $f_{02}$ , разность значений которых будет равняться  $f_{пр}$  значению промежуточной частоты, на которую настраиваются полосы пропускания всех УПЧ (1...4). При Х-образном расположении лучей антенны сигнал с частотой  $f_{01}$  излучается антеннами, формирующими передние лучи, а с частотой  $f_{02}$  – задние. При первом преобразовании частоты в качестве опорных сигналов используются: в каналах передних лучей – «ослабленный» сигнал ГСВЧ2, а в каналах задних лучей – «ослабленный» сигнал ГСВЧ1. Понятие «ослабленный» сигнал означает то, что поступление данного сигнала на соответствующий вход смесителя специально не организовывается, а осуществляется за счет наличия незначительной монтажной емкости, в различных устройствах фактически являющейся «паразитной», т.е. не желательной, но в данном случае с учетом мощности и значений частот выходных сигналов обеих ГСВЧ значения данной оказывается достаточно для обеспечения нормального функционирования соответствующих смесителей СМ1 ... СМ4. Однако следует заметить, что использование данного приема с целью исключения влияния выходного сигнала каждого ГСВЧ сразу на все смесители накладывает дополнительные конструктивные требования в виде организации специальных экранов из немагнитного материала типа пермаллоя при практической реализации всей навигационной системы. В результате преобразования частот спектры принятых сигналов переносятся в высокочастотную область промежуточной частоты, имеющей значение (10–30 МГц). Поскольку каналы в РПУ идентичны, их работа поясняется на примере первого. После усиления в УПЧ сигнал поступает на когерентный детектор (КД<sub>1</sub>), на который в качестве опорного подается сигнал, имеющий значение частоты  $f_{пр}$ , полученной в результате вычитания частот выходных сигналов ГСВЧ1 и ГСВЧ2. С помощью КД осуществляется второе преобразование частоты – в область доплеровских частот. Полученные сигналы доплеровского приращения частоты  $f_{д1} \dots f_{д4}$ , соответственно, проходят фильтрацию в ФНЧ и усиление в усилителе сигнала доплеровской частоты УДЧ.

Поскольку весь процесс измерения в современных многолучевых доплеровских навигационных системах предполагает устранение влияния крена и тангажа, в первую очередь формируются сигналы разностных величин  $\Delta f_1 = f_{д1} - f_{д3}$  и  $\Delta f_2 = f_{д2} - f_{д4}$ . Значение их разности  $\Delta f = \Delta f_1 - \Delta f_2$  будет пропорционально значению угла сноса  $\alpha$ , а направление его отклонения относительно оси ЛА (лево/право) будет определяться знаком величины  $\Delta f$  [5]. Из сказанного следует, что ключевым узлом, отвечающим за достоверность результата работы всей навигационной системы ЛА, будет являться ЦЧД, выполняющий целый ряд сравнений значений частот тех или иных сигналов. Структурная схема разработанного цифрового частотного дискриминатора показана на рис. 7. Здесь облучение земной поверхности происходит сигналами

с разными значениями частот, поэтому для корректного вычисления в ВУ предварительно вводятся соответствующие коэффициенты масштабирования, учитывающие отличие между собой значений частот зондирующих сигналов.

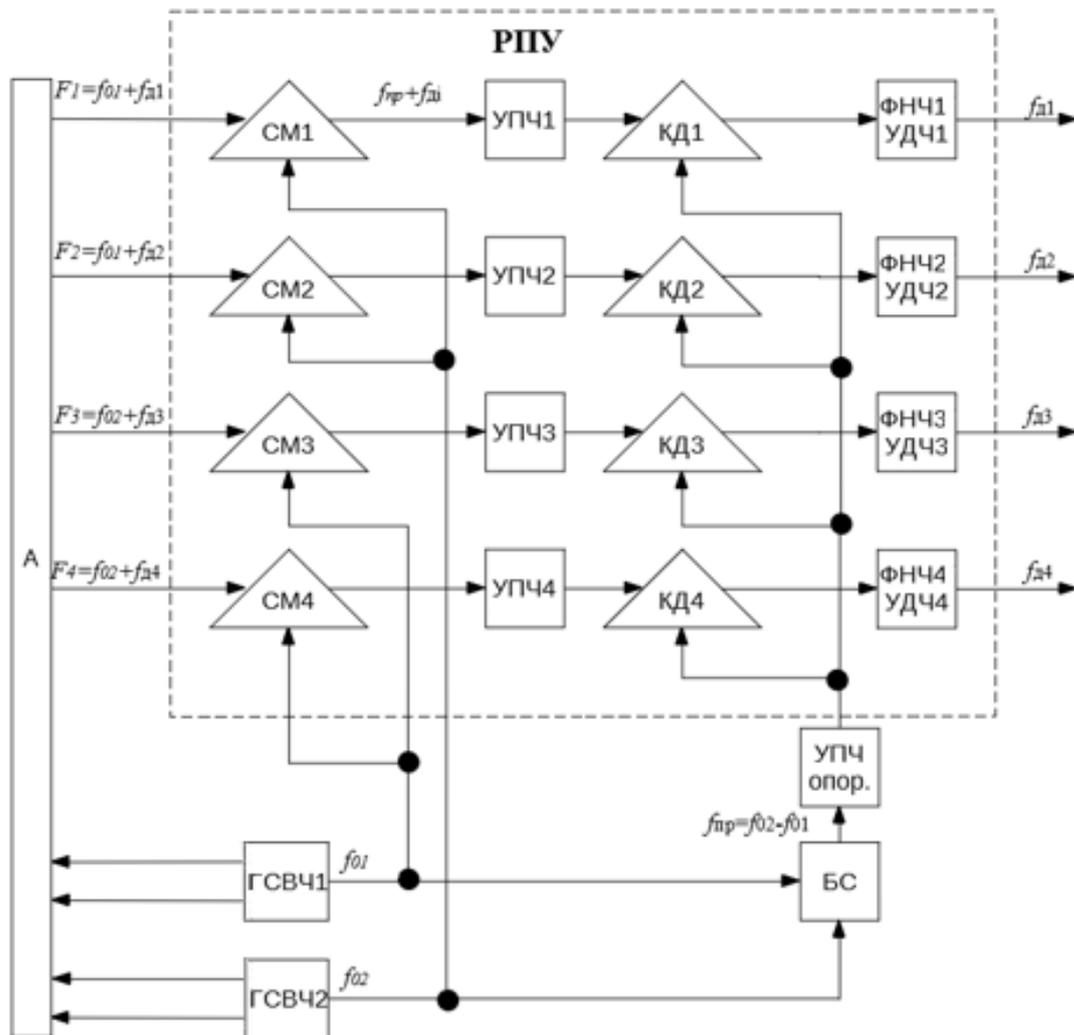


Рис. 6. Структурная схема РПУ

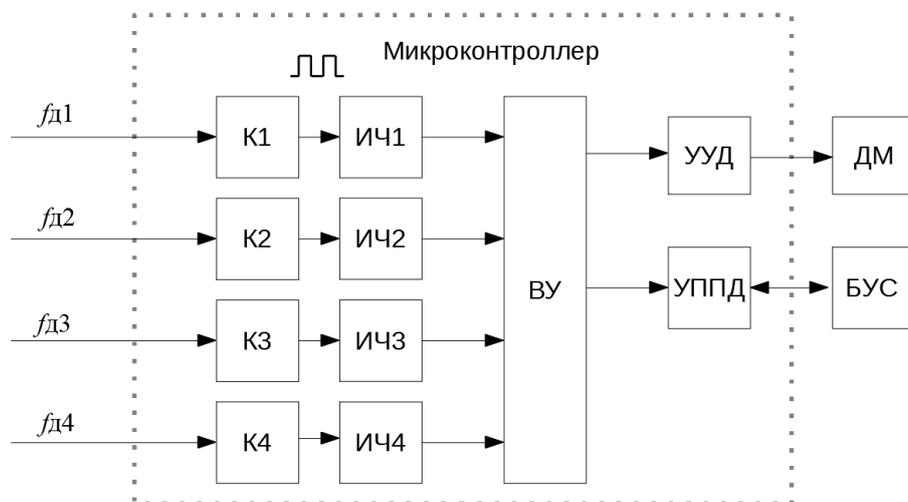


Рис. 7. Структурная схема ЦЧД:

УУД – устройство управления дисплеем; ДМ – дисплейный модуль;  
УППД – устройство приема-передачи данных; БУС – блок управления самолетом

Компаратор  $K_1$  формирует сигнал в виде импульсной последовательности с частотой повторения  $f_k$ , в результате срабатывает каждый раз при переходе сигнала с частотой доплеровского приращения  $f_{d1}$  через ноль. Измеритель частоты (ИЧ<sub>1</sub>) выделяет интервал времени равный периоду повторения сигнала  $f_{d1}$  и заполняет его импульсами образцовой, опорной частоты с последующим подсчетом их количества, что позволяет определить значение частоты  $f_{d1}$ , оценка значений частот  $f_{d2} \dots f_{d4}$  происходит аналогичным образом [6]. Затем вычислительное устройство (ВУ) осуществляет операцию вычисления.

Структурно-функциональная схема ЦЧД (рис. 8) разработана так, чтобы максимальное количество элементов входило в периферию микроконтроллера. Поскольку большинство микроконтроллеров не позволяют мультиплексировать аналоговые компараторы, используется 10-битный встроенный АЦП с мультиплексором (MUX).

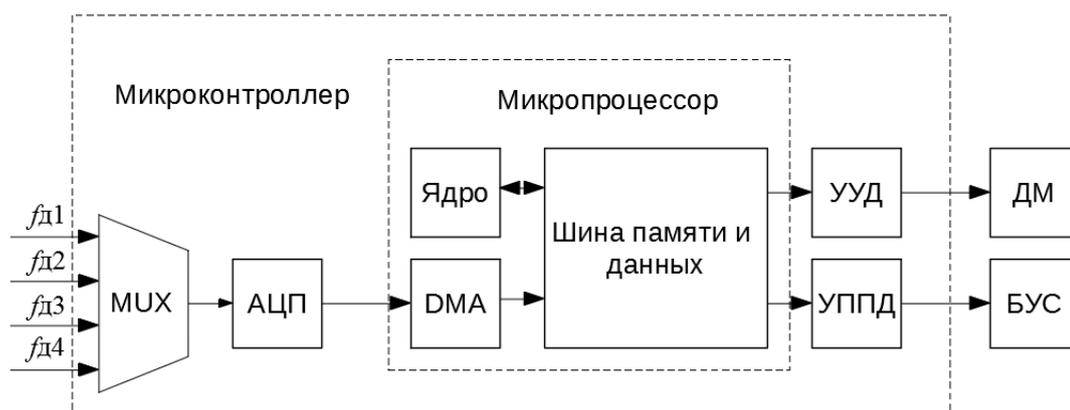


Рис. 8. Структурно-функциональная схема ЦЧД

При выборе микроконтроллера основной упор делался на наличие в его составе мультиплексора и АЦП с высокой разрешающей способностью. При этом учитывалось наличие у него встроенной памяти EEPROM, необходимой как для сохранения различных настроек, включая значения различных калибровочных и масштабирующих коэффициентов. Поэтому в качестве такого микроконтроллера используется STM8AL3L46T серии STM8AL от компании «ST». Данный контроллер является малопотребляющим 8-битным КМОП микроконтроллером для систем автоматизации, выполненным на основе CISC архитектуры [7]. Микроконтроллер построен по гарвардской архитектуре, что позволяет большинство инструкций выполнять за один такт. Производительность достигает 16MIPS. Данному МК, кроме обеспечения им высокой отказоустойчивости и обладания 12-битными АЦП и ЦАП, присущи все интерфейсы, необходимые для взаимодействия – все перечисленное позволяет ему производить измерение с повышенной точностью. Микроконтроллер STM8L31 является улучшенной версией STM8AL3L, поскольку обладает интерфейсом для взаимодействия с LCD дисплеем. Функционал контроллера был опробован и показал хорошие, стабильные результаты.

В данной работе рассматривается четырехлучевая двухчастотная ДНСС с двойным преобразованием частоты, включающая цифровой частотный дискриминатор на МК. Данная реализация особенно актуальна для беспилотных летательных аппаратов, поскольку помимо высокой точности измерения значений основных навигационных параметров, таких как путевая скорость и угол сноса ЛА, она обладает низким энергопотреблением и высокой отказоустойчивостью из-за использования элементов цифровой микросхемотехники. Применение высокостабильных малогабаритных СВЧ-генераторов позволяет значительно снизить требования к частотным свойствам антенн и резко упростить их конструкцию, исключив практику применения так называемых частотно-зависимых антенн, у которых нестабильность значения частоты зондирующего сигнала вызывает изменения значения угла визирования, что приводило к нарушению калибровки всей системы измерения, проводимой на заводе-изготовителе, что в конечном счете вызывало возникновение погрешности измерений.

**Список литературы**

1. Флеров А. Г., Тимофеев В. Г. Доплеровские устройства и системы навигации. М. : Транспорт, 1987. 191 с.
2. Аксенов И. В., Чайковский В. М. Частотный дискриминатор для автономной самолетной навигационной системы // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 170–172.
3. Казаринов Ю. М., Коломенский Ю. А., Кутузов В. М. [и др.]. Радиотехнические системы : учебник для студ. высш. учеб. завед. / под ред. Ю. М. Казаринова. М. : Академия, 2008.
4. Аксенов И. В. Частотный дискриминатор для радионавигационной доплеровской системы на микроконтроллере // Молодежь и будущее авиации и космонавтики – 2020 : сб. аннотаций конкурсных работ 12-го Всерос. конкурса (23–27 ноября 2020). М. : МАИ, 2020. 228 с.
5. Автономные доплеровские устройства и системы навигации летательных аппаратов / под ред. В. Е. Колчинского. М. : Сов. радио, 1975. 432 с.
6. Чайковский В. М. [и др.]. Метеорологический радиолокатор // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2012. Т. 2. С. 3–5.
7. Матюшов Н. В. Начало работы с микроконтроллерами STM8. М. : СОЛОН-Пресс, 2016. 320 с.

**References**

1. Flerov A.G., Timofeev V.G. *Dopplerovskie ustroystva i sistemy navigatsii = Doppler devices and navigation systems*. Moscow: Transport, 1987:191. (In Russ.)
2. Aksenov I.V., Chaykovskiy V.M. Frequency discriminator for autonomous aircraft navigation system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:170–172. (In Russ.)
3. Kazarinov Yu.M., Kolomenskiy Yu.A., Kutuzov V.M. [et al.]. *Radiotekhnicheskie sistemy: uchebnik dlya stud. vyssh. ucheb. zaved. = Radio engineering systems : textbook for students. higher. studies. institution..* Moscow: Akademiya, 2008. (In Russ.)
4. Aksenov I.V. Frequency discriminator for radio navigation Doppler system on microcontroller. *Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki – 2020: sb. annotatsiy konkursnykh rabot 12-go Vseros. konkursa (23–27 noyabrya 2020) = Youth and the future of aviation and cosmonautics – 2020 : collection of abstracts of competitive works of the 12th All-Russian. competition (November 23–27, 2020)*. Moscow: MAI, 2020:228. (In Russ.)
5. Kolchinskiy V. E. [ed.]. *Avtonomnye dopplerovskie ustroystva i sistemy navigatsii letatel'nykh apparatov = Autonomous Doppler devices and aircraft navigation systems*. Moscow: Sov. radio, 1975:432. (In Russ.)
6. Chaykovskiy V.M. [et al.]. Meteorological radar. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2012;2:3–5. (In Russ.)
7. Matyushov N.V. *Nachalo raboty s mikrokontrollerami STM8 = Getting Started with STM8 Microcontrollers*. Moscow: SOLON-Press, 2016:320. (In Russ.)

**Информация об авторах / Information about the authors****Илья Владимирович Аксенов**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Илья V. Aksenov**

Student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Виктор Михайлович Чайковский**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры радиотехники  
и радиоэлектронных систем,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: rtech@pnzgu.ru

**Victor M. Chaykovskiy**

Candidate of technical sciences, associate professor,  
associate professor of sub-department  
of radio engineering and radio electronic systems,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 16.03.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 23.03.2021**

**Принята к публикации/Accepted 24.03.2021**