

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ СКОРОСТНОГО КАНАЛА КОМБИНИРОВАННОГО РАДИОТЕХНИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИГНАЛА, ЗАПИСАННОГО ПРИ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ<sup>1</sup>

Н. Н. Каалмыков, С. А. Мельников, Д. П. Седов, А. В. Васильева

КРИ обеспечивает измерение геометрической высоты ( $H$ ), вертикальной скорости ( $V_y$ ) и продольной и боковой составляющих вектора путевой скорости полета объекта ( $V_x, V_z$ , соответственно).

В основу работы высотомерного канала КРИ положен импульсный радиолокационный метод измерения высоты со статистической обработкой отраженных сигналов посредством микропроцессорного блока обработки сигналов.

Канал корреляционного измерителя составляющих вектора путевой скорости встроен в канал импульсного радиовысотомера. По максимуму взаимно-корреляционных функций (ВКФ) сигналов, принятых на разнесенные по корпусу антенны, определяется временной сдвиг и, учитывая геометрию антенной системы, вычисляются составляющие вектора путевой скорости [1].

Какими бы совершенными не были средства разработки, вопрос об отладке и испытаниях аппаратуры в условиях наиболее приближенных к реальным эксплуатационным остается актуальным.

Целью работы является проработка методов использования реального сигнала, полученного в ходе летных испытаний, для анализа скоростного канала КРИ.

Для записи отраженного от подстилающей поверхности сигнала в условиях автономных летных испытаний КРИ используется специализированное устройство записи сигнала – блок сохранения информации (БСИ).

БСИ встраивается в КРИ, имеет объем памяти порядка 8 Гб, что позволяет производить запись данных, необходимых для анализа работы его скоростного канала. Функциональная схема БСИ приведена на рис. 1.

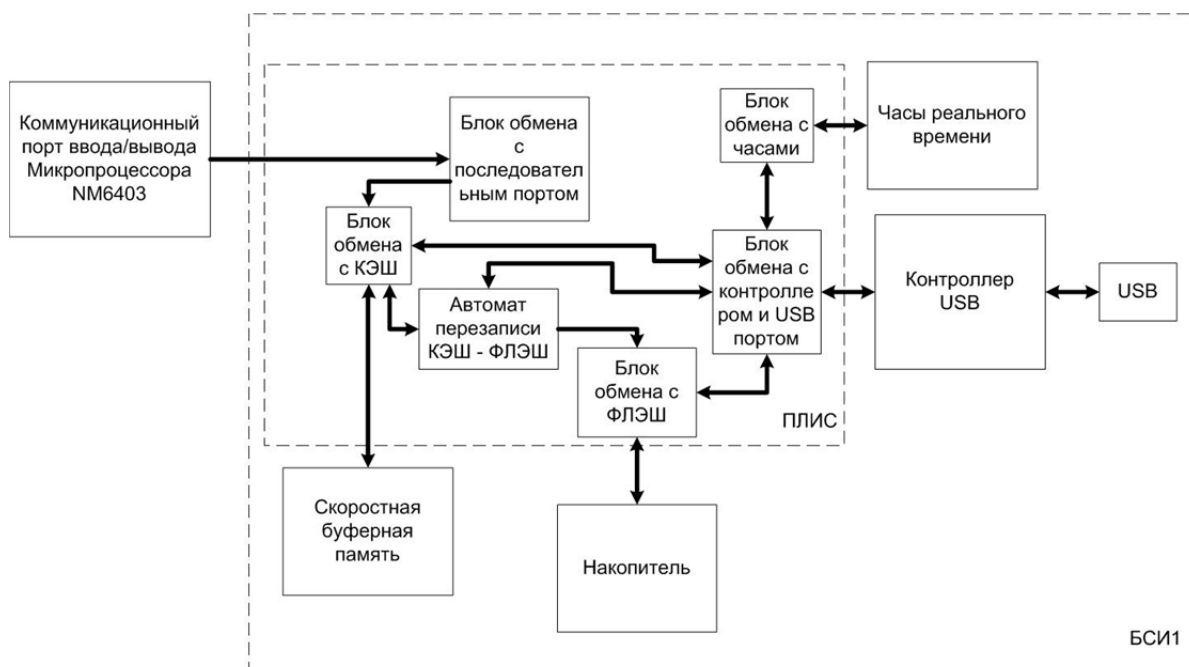


Рис. 1. Функциональная схема БСИ

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.2538.2017/4.6).

В состав БСИ входят следующие блоки:

- ПЛИС;
- контроллер USB;
- часы реального времени;
- накопитель;
- скоростная буферная память.

Накопитель представляет собой энергонезависимую память. Он предназначен для хранения данных, получаемых от КРИ. Накопитель состоит из четырех банков, каждый из которых состоит из четырех микросхем объемом 512 Мб. Такая организация накопителя позволяет осуществлять параллельную запись в четыре банка, что значительно ускоряет процесс записи.

Для управления системой и обеспечения связи с ПК был использован микроконтроллер со встроенным USB-интерфейсом. Микроконтроллер является центральным управляющим звеном ячейки. Он работает по заданной программе, следовательно, алгоритм работы контроллера определяет алгоритм работы всей ячейки. Это дает возможность изменять логику работы ячейки без вмешательства в ее аппаратную реализацию. Использование USB-интерфейса позволяет получить высокую скорость обмена данными между устройством и ПК.

В БСИ предусмотрены часы реального времени, которые позволяют на этапе обработки полученной информации осуществить синхронизацию данных с данными, полученными от других приборов регистрации.

Основным требованием, которое должно соблюдаться при осуществлении сопряжения БСИ с КРИ, является обеспечение штатного функционирования изделия без существенного ухудшения его динамических характеристик.

Массив данных, передаваемый в БСИ за один сеанс, должен представлять собой непрерывную область памяти объемом 8 Кб, содержимое которой не изменяется до окончания процесса передачи. Вместе с тем данные, предназначенные для передачи, становятся доступными на различных по времени этапах обработки сигнала, и некоторые из них не сохраняют своих значений к моменту окончания обработки. В связи с этим память, выделенная под массив, разбита на две страницы – одна из них в данный момент времени формируется, другая передается, затем производится переключение страниц.

Для осуществления обмена данными между ПК и БСИ было разработано программное обеспечение (ПО), интерфейс которого представлен на рис. 2. Данное ПО позволяет:

- производить считывание таблицы файлов, хранящихся в накопителе;
- установить системное время;
- произвести очистку накопителя;
- произвести считывание выбранного файла.

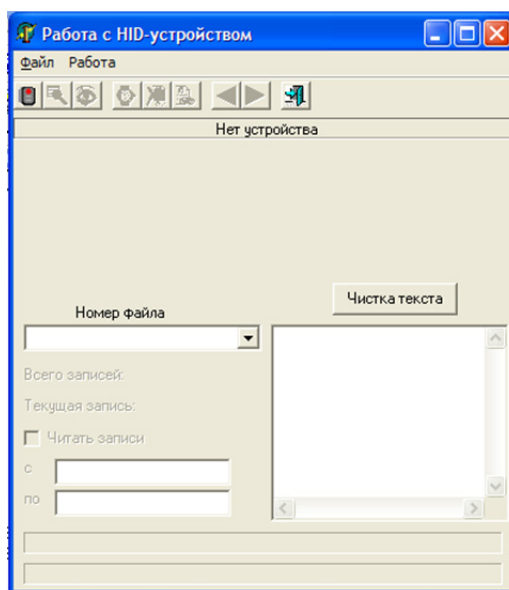


Рис. 2. Интерфейс ПО для работы с БСИ

Для просмотра данных, записанных ячейкой БСИ в ходе летных испытаний, разработано программное обеспечение, отображающее параметры функционирования КРИ и сигналы, отраженные от подстилающей поверхности, как в текстовом, так и в графическом представлении (рис. 3).

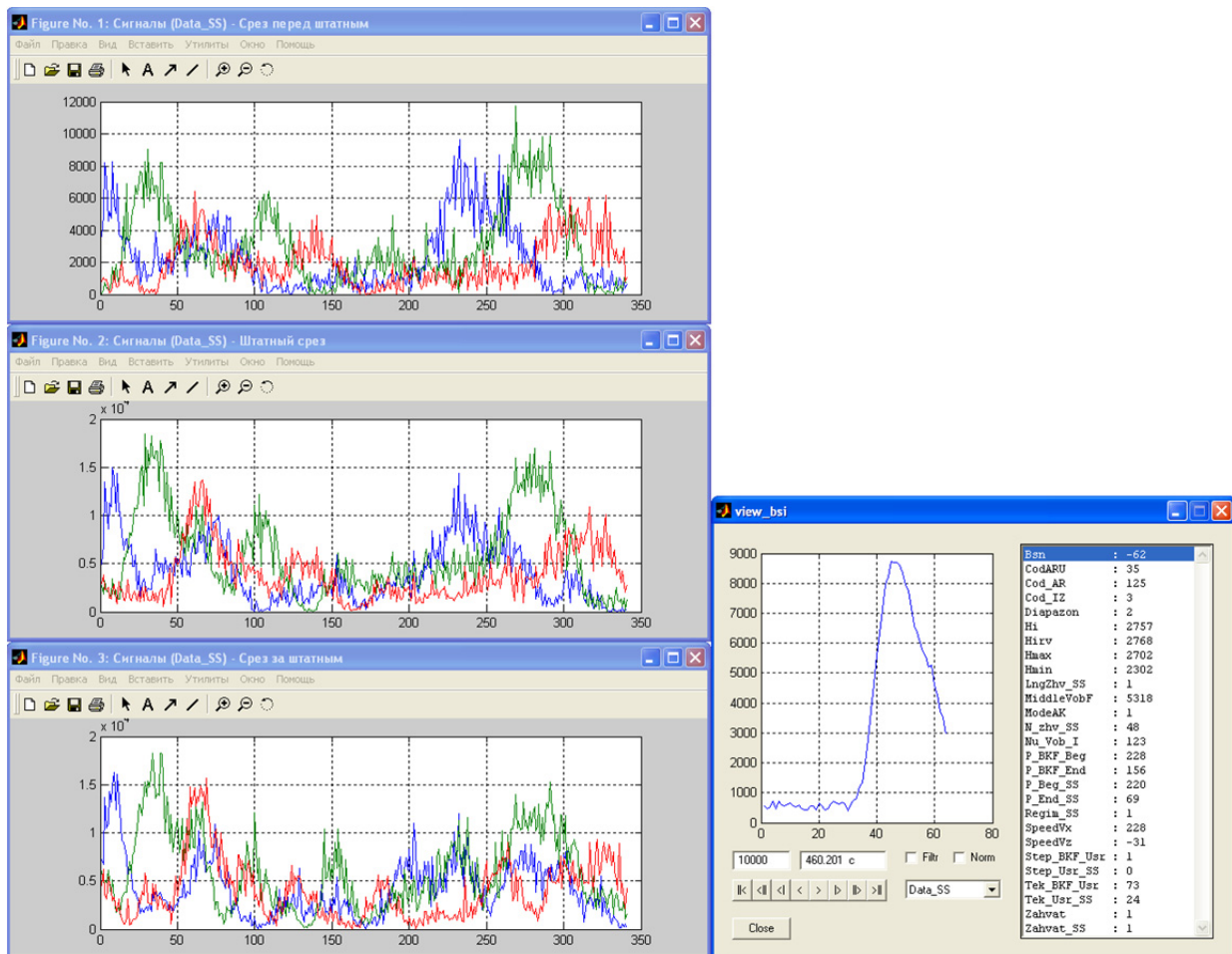


Рис. 3. Интерфейс программы визуализации

В основном окне (справа) отображается результат усреднения отраженного сигнала вертикального канала, номер массива, системное время и значения параметров функционирования изделия (программных переменных). Имеются кнопки, с помощью которых можно осуществлять навигацию, просматривая по выбору каждый массив или с шагом 20 или 400 массивов. Кроме того, имеется возможность перейти к первому или последнему массиву записанных данных.

Помимо основного окна, имеются три дополнительных графических окна (слева), в которых могут отображаться по выбору сигналы скоростного канала или их квадратуры (с фазами 0 и  $\pi/2$ ), мгновенные взаимно-корреляционные функции (ВКФ), построенные по данным сигналам, усредненные ВКФ, записанные в процессе летных испытаний, и т.п.

Для определения транспортных задержек  $\tau_1$  и  $\tau_2$  вычисляются взаимные корреляционные функции  $F_{12}$  между сигналами, принятыми 1-й и 2-й антеннами, и  $F_{23}$  между сигналами, принятыми 2-й и 3-й антеннами:

$$F_{12\ k} = \frac{1}{256} \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{1\ 8+i} \cdot u_{2\ k+i} - \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{1\ 8+i} \right) \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ k+i} \right) \right),$$

$$F_{23\ k} = \frac{1}{256} \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ 8+i} \cdot u_{3\ k+i} - \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{2\ 8+i} \right) \left( \frac{1}{256} \sum_{i=0}^{255} u_{3\ k+i} \right) \right),$$

где  $k = 0 \dots 63$ .

Измерение составляющих вектора скорости с погрешностью, заданной в ТЗ, требует точно определения положения максимумов ВКФ. Для этой цели производится аппроксимация ВКФ параболой методом наименьших квадратов с использованием треугольной весовой функции.

Геометрия антенной системы, а именно: взаимное расположение излучающей и приемных антенн, дает формулы для вычисления составляющих вектора скорости и угла сноса

$$V_x = \frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0} \cdot \frac{2}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0}\right)^2}, \quad (1)$$

$$V_z = \frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0} \cdot \frac{2}{\left(\frac{\tau_1 + \tau_2}{X_0}\right)^2 + \left(\frac{\tau_2 - \tau_1}{Y_0}\right)^2}, \quad (2)$$

$$\beta_{\text{сн}} = \text{arctg} \left( \frac{X_0}{Y_0} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_1 + \tau_2} \right), \quad (3)$$

где  $X_0, Y_0$  – параметры антенной системы.

БСИ на этапе автономных летных испытаний позволяет сократить количество полетов самолета, требуемых для отработки скоростного канала КРИ, так как полученные данные можно использовать для отработки математической модели и программного обеспечения КРИ в лабораторных условиях [2–4].

С помощью математической модели для обработки реальных сигналов, записанных в ходе летных испытаний на самолете ЯК-52, был получен ответ на ряд вопросов, возникших в процессе разработки КРИ:

- положение «сигнального» строга при полете над сушей не оказывает существенного влияния на точность измерения составляющих вектора скорости;
- усреднение ВКФ и последующая аппроксимация усредненных ВКФ квадратичной функцией для определения транспортных задержек между сигналами дает меньшие погрешности, чем способ обработки, подразумевающий получение по мгновенным ВКФ оценок транспортных задержек с последующим их усреднением;
- мгновенные ВКФ имеют разброс по ширине, уровню и положению максимума, а форма их существенно искажена. Усредненные ВКФ, построенные на их основе, имеет приемлемую для аппроксимации форму и стабильны от пакета к пакету зондирующих импульсов;
- метод усреднения ВКФ, подразумевающий адаптацию количества усреднений к мощности флюктуаций отраженного от подстилающей поверхности сигнала, обеспечивает стабильное сопровождение сигнала скоростного канала без снятия исправности.

Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод о том, что использование реального сигнала, записанного в ходе натурных испытаний, позволяет исследовать возможности КРИ, определить источники погрешностей и выработать решения, позволяющие повысить точность измерения параметров.

### **Библиографический список**

1. Боркус, М. К. Корреляционные измерители путевой скорости и угла сноса летательных аппаратов / М. К. Боркус, А. Е. Черный. – М. : Сов. радио, 1973. – 169 с.
2. Полунатурное моделирование бортовых радиолокационных систем, работающих по земной поверхности : учеб. пособие / В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. С. Боков, А. К. Сорокин, Ю. В. Марков, Л. Л. Лесная ; под общ. ред. В. Г. Важенина. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 208 с.
3. Полунатурное моделирование радиолокационного канала с переменными параметрами / А. С. Боков, В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, В. В. Мухин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 125–129.
4. Имитация коррелированных сигналов, рассеянных протяженной поверхностью / В. Г. Важенин, Н. А. Дядьков, А. А. Иофин, Н. Н. Калмыков, А. В. Васильева, С. А. Мельников, Ю. С. Тимошенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 129–132.

**Калмыков Николай Николаевич**

заместитель главного конструктора по направлению,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(623409, Россия, Свердловская область,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: solovjev@nexcom.ru

**Мельников Сергей Андреевич**

ведущий конструктор,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(623409, Россия, Свердловская область,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: solovjev@nexcom.ru

**Седов Дмитрий Петрович**

ведущий инженер,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(623409, Россия, Свердловская область,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: solovjev@nexcom.ru

**Васильева Анна Валерьевна**

инженер-конструктор,  
АО «Уральское проектно-конструкторское  
бюро «Деталь»  
(623409, Россия, Свердловская область,  
г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)  
E-mail: solovjev@nexcom.ru

**Аннотация.** Показана возможность создания системы записи радиолокационного сигнала в процессе летных испытаний. Приведена функциональная схема записывающей аппаратуры, показан принцип ее действия и программное обеспечение для обработки данных. Указаны основные выражения для вычисления параметров движения. Сохраненный в процессе испытаний сигнал в дальнейшем используется для отработки алгоритмов функционирования прибора. Это позволило выявить источники дополнительных погрешностей КРИ и выработать пути их устранения.

**Ключевые слова:** радиовысотомер, испытания, программное обеспечение.

**Kalmykov Nikolai Nikolaevich**

deputy chief designer in the direction,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(623409, 8 Pionerskaya street,  
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

**Melnikov Sergey Andreevich**

leading designer,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(623409, 8 Pionerskaya street,  
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

**Sedov Dmitriy Petrovich**

leading engineer,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(623409, 8 Pionerskaya street,  
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

**Vasilyeva Anna Valeryevna**

engineer-designer,  
JSC «Ural Design Bureau «Detal»  
(623409, 8 Pionerskaya street,  
Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk Region, Russia)

**Abstract.** The article shows the possibility of creating a system for recording a radar signal in the flight tests. The functional scheme of the recording equipment is given, the principle of its operation and the software for data processing are shown. The main expressions for calculating motion parameters are indicated. The signal stored in the process of experiment is subsequently used for testing the algorithms for the functioning of the device. This allowed us to identify sources of additional errors in the device and work out ways of eliminating them.

**Key words:** radio altimeter, experiment, software.

УДК 629.7.058.42

**Калмыков, Н. Н.**

**Исследование причин возникновения погрешностей скоростного канала комбинированного радиотехнического измерителя с использованием сигнала, записанного при натурных испытаниях / Н. Н. Калмыков, С. А. Мельников, Д. П. Седов, А. В. Васильева // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 68–72. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-10.**