

# Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.396

## Разработка и испытание алгоритмов приёмника системы АЗН-В

**Пантелеев Илья Владимирович**

Инженер-программист ОАО «Авангард»<sup>1</sup>

*E-mail:* ilya-panteleev@mail.ru.

**Чекушкин Всеволод Викторович**

доктор технических наук, профессор кафедры «САПР»

Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>2</sup>

*E-mail:* chekvv@gmail.com.

**Смирнов Михаил Станиславович**

старший преподаватель кафедры «Радиотехника»

Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»<sup>2</sup>

*E-mail:* smirnov.murom@gmail.com.

<sup>1</sup>Адрес: 195271, Санкт-Петербург, Кондратьевский пр., 72.

<sup>2</sup>Адрес: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87.

*Аннотация:* Системы АЗН-В повсеместно внедряются в авиацию. Данная система осуществляет передачу информации в широком вещательном диапазоне о координатах воздушных судов для предупреждения опасных ситуаций при воздушном маневрировании. В статье предлагаются разработанные авторами алгоритмы обработки цифрового сигнала сквиттера режима S системы АЗН-В для приёмников, работающих на частоте 10 МГц. Проводится исследование алгоритмов на стойкость по отношению к гауссовскому шуму, на стойкость к распознаванию при наложении двух сквиттеров друг на друга, а также на способность распознавать сквиттеры реальных целей. Предложенные авторами алгоритмы позволяют добиться 98% обнаружения и верного распознавания сквиттеров режим S системы АЗН-В при соотношении уровня сигнала к уровню шума 10 dBm.

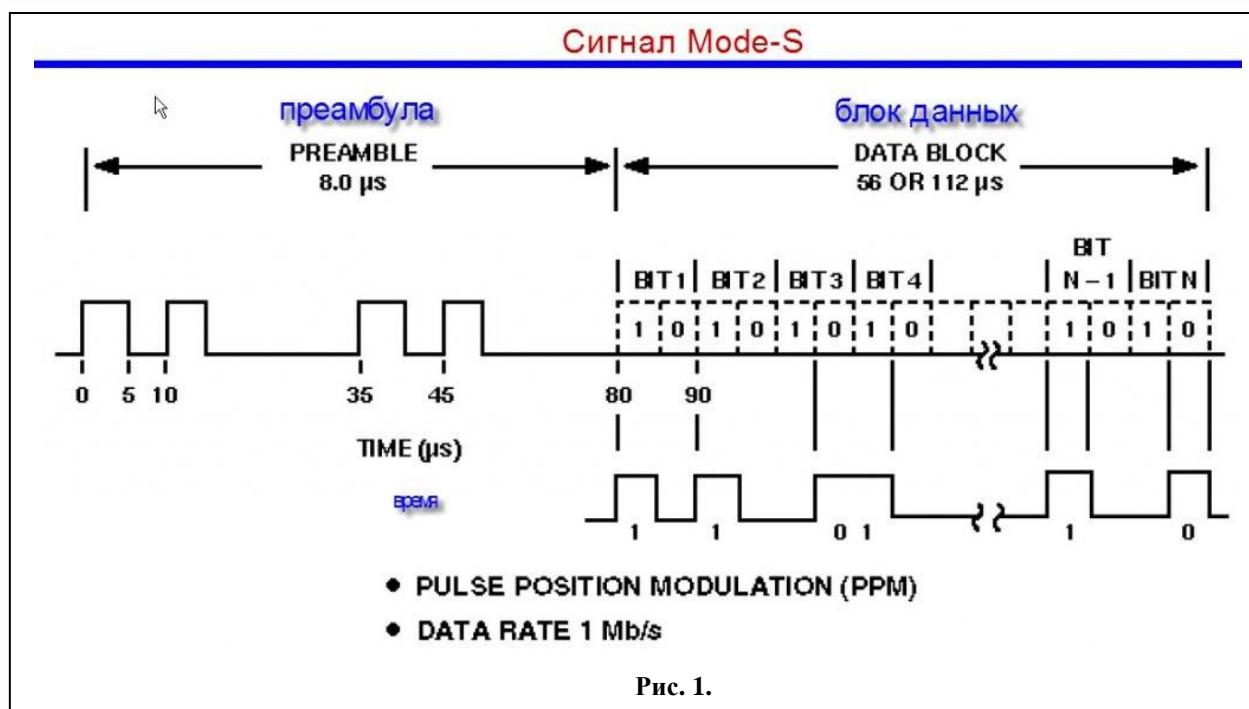
*Ключевые слова:* АЗН-В, сквиттер, преамбула, моделирование, LabView, PXIe-1085, PXI-5105, PXI-5610, ADL-5513.

### Введение

АЗН-В – автоматическое зависимое наблюдение-вещание (от англ. ADS-B – Automatic dependent surveillance-broadcast) – технология, позволяющая пилотам в кабине самолёта и диспетчерам на наземном пункте наблюдать с большой точностью трафик движения воздушных судов и получать аэронавигационную информацию в соответствии с 1090ES [1]. Воздушное судно, оборудованное системой АЗН-В, каждую секунду при помощи радиосигналов передаёт свои координаты, скорость, высоту, номер рейса и курс. Это позволяет в реальном

масштабе времени отслеживать его местоположение пилотам других самолётов, диспетчерам систем управления воздушным движением. Система АЗН-В может сделать полёт более безопасным и может позволить более эффективно использовать воздушное пространство [2].

Сквиттер режима S системы АЗН-В представляет из себя пакет данных длиной 64 или 120 мкс, передающийся на частоте 1090 МГц и состоящий из преамбулы и блока данных размером 56 или 118 бит соответственно, по 1 биту данных на 1 микросекунду (рис.1). Путём



размещения полумикросекундного импульса в первой или второй половине микросекунды происходит кодирование логических нулей и единиц. Поиск сквиттера осуществляется по детектированию постоянной характерной части сквиттера – преамбуле, представляющей из себя четыре полу-микросекундных импульса, отстоящих друг от друга на фиксированном расстоянии [3].

#### Общие положения

Обработка цифрового сигнала расширенного сквиттера режима S системы АЗН-В состоит из трёх этапов:

- 1) Поиск преамбулы сквиттера.
- 2) Распознавание бит данных.
- 3) Проверка контрольной суммы и исправление ошибок.

Все три этапа взаимосвязаны и вытекают один из другого. На первом этапе происходит поиск преамбулы и определяется точная позиция начала блока данных сквиттера и среднее значение амплитуды кодирующих импульсов, которые передаются на следующий этап. На втором этапе, с учётом информации полученной от первого этапа, происходит преобразование измеренных амплитуд в биты данных и

биты доверия, которые определяют степень верности распознавания и применяются для исправления ошибок при несовпадении контрольной суммы. На последнем этапе происходит проверка контрольной суммы и исправление ошибок распознавания, если таковые есть и их количество не превышает критического значения, при котором исправление ошибок становится либо невозможным, либо необоснованным по ресурсным затратам.

Основные параметры исследуемых алгоритмов при различных дестабилизирующих факторах:

- вероятность верного обнаружения преамбулы;
- вероятность ложной тревоги;
- вероятность верного распознавания блока данных.

#### Стендовое оборудование и методика испытаний алгоритмов

Для имитации излучения генератором сквиттера создавалась огибающая реального сквиттера. При этом имитировалось отдельно как излучение сквиттера (рис.2), так и наложение двух сквиттеров с разной степенью перекрытия и сдвига по частоте (рис.3).

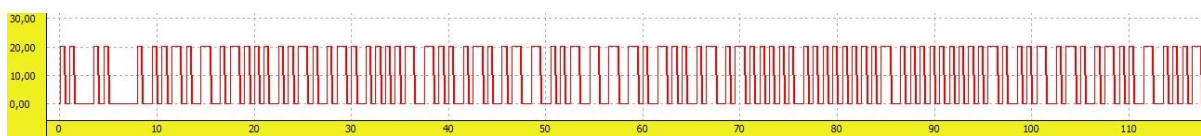


Рис. 2. Огибающая одного сквиттера



Рис. 3. Огибающая двух перекрывающихся друг друга сквиттеров со сдвигом по частоте

Исследования реализованы на стенде (рис.4) состоящем из: платформы NIPXIE-1085 со встроенными модулями NIPXI-5610 и NIPXI-5105 [4]; логарифмического детектора ADL5513 [5]; источника питания 12В (0,6мА); полосового генератора гауссовского шума; полосового фильтра 1090 МГц с полосой 16 МГц; смесителя; набора аттенуаторов. Управление оборудованием и алгоритмами реализованы в среде LabView, установленной на платформе NIPXIE-1085 (рис.5). Соотношение сигнал/шум устанавливается с помощью набора аттенуаторов и генератора PXI-5610. Контроль соотношения сигнал/шум осуществляется с помощью поверенного векторного анализатора цепей R&SZVL. На модуле осциллографа PXI-5105 выставляется частота дискретизации 10 МГц, разрядность АЦП составляет 12 бит.

Методика измерений состоит из шагов:

1) Излучение генератором сквиттера с синхронизирующим импульсом.

2) Запуск окна осциллографа по синхронизирующему импульсу.

3) Обработка измеренных осциллографом данных с помощью разработанных алгоритмов с ожиданием преамбулы в конкретной позиции.

Для одного соотношения уровней сигнала и шума производится 1000 измерений и производится расчёт вероятности верного обнаружения преамбулы сквиттера, ложной тревоги и вероятности верного распознавания блока данных.

#### Алгоритм поиска преамбулы

Вновь разработанный алгоритм поиска основан на единовременном анализе 80 значений амплитуд. Значения амплитуды представим в виде массива  $A[i]$ , где  $i \in [0;79]$ . Для детектирования преамбулы сквиттера применяются правила:

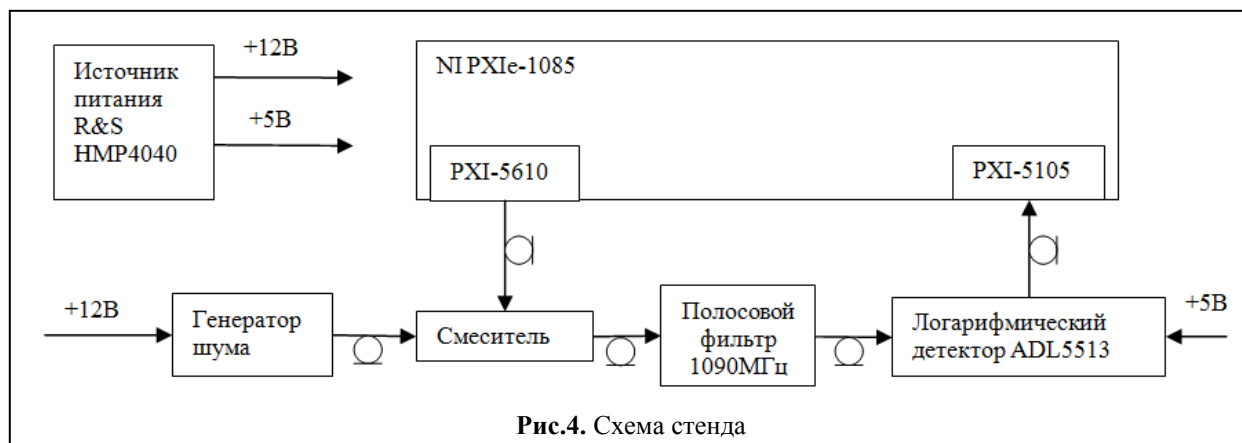


Рис.4. Схема стенда

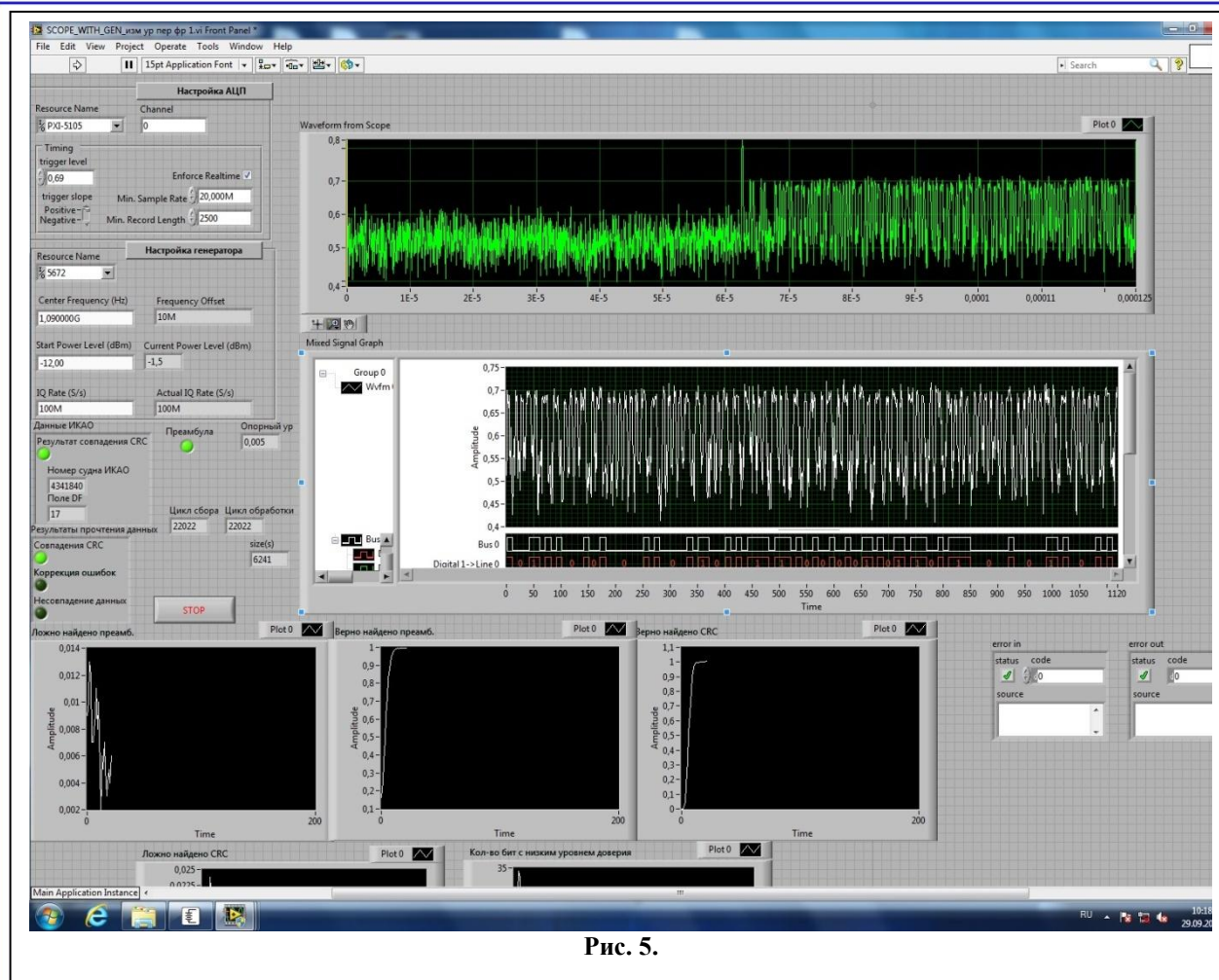


Рис. 5.

1) 80 отсчётов делятся на  $j \in [0;15]$  групп по 5 отсчётов амплитуд  $i$  каждая.

2) Для каждой группы рассчитывается среднее значение амплитуды  $G[j]$  исходя из правила, что значения амплитуд, попавшие внутрь полу-микросекундного интервала, имеют удвоенное доверие, что связано с повреждением фронтов импульсов реальных сигналов (1):

$$G[j] = A[5 \cdot j + 0] + 2(A[5 \cdot j + 1] + A[5 \cdot j + 2] + A[5 \cdot j + 3]) + A[5 \cdot j + 4], \quad (1)$$

где  $j \in [0;15]$

3) Рассчитывается среднее значение амплитуды в позициях с ожидаемыми импульсами преамбулы (2):

$$P = (G[0] + G[2] + G[7] + G[9])/4. \quad (2)$$

4) Рассчитывается допустимое отклонение амплитуды (3):

$$D = (G[0] + G[1] + G[2] + G[7])/4. \quad (3)$$

5) Проверяются условия: значения амплитуд в местах ожидания импульсов ( $j = \{0;2;7;9\}$ ) должны попадать в диапазон  $D$ , значения амплитуд в других группах  $j$  должны выходить за указанный диапазон  $D$ .

Если все условия 5-го пункта выполняются, то принимается решение о выдаче сигнала о детектировании преамбулы сквиттера и передаче на следующий этап среднего значения амплитуды кодирующих импульсов и индекса отсчёта, с которой начинается блок данных.

В исследовании также принимал участие алгоритм, описанный в [6], а также два алгоритма, разработанных на его основе (рис.6). Результаты измерений сведены в таблицу 1.

#### Алгоритм распознавания бит данных

Алгоритм распознавания основан на анализе 1120 значений амплитуд, следующих друг за

Таблица 1 – Результаты исследования алгоритмов поиска преамбулы

№	Наименование алгоритма	Вероятность обнаружения при соотношении сигнал/шум 10 dBm	Вероятность ложной тревоги
1	Алгоритм [1]	0,026	$6 \cdot 10^{-7}$
2	Алгоритм на основе [1], по 4-м точкам и среднему уровню	0,576	$2,5 \cdot 10^{-5}$
3	Алгоритм на основе [1], по среднему уровню	0,956	$9 \cdot 10^{-7}$
4	Вновь разработанный	0,994	$1,4 \cdot 10^{-6}$

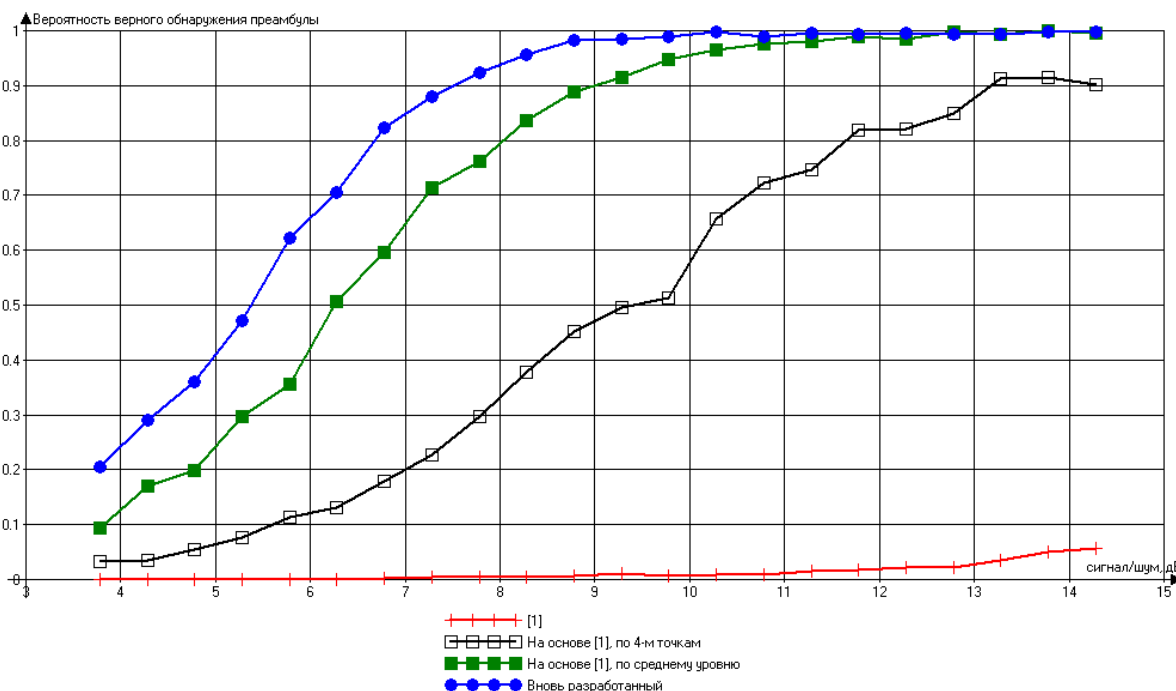


Рис. 6.

другом. Одновременно анализируется 10 значений амплитуд, следующих друг за другом, и принимается решение о наличии логического нуля или единицы.

Как и при поиске преамбулы рассчитывается среднее значение амплитуды 5-ти отсчетов по формуле (1). Сравнивая средние значения амплитуд в первой и второй половине микросекунды принимается решение о значении бита данных:

- если среднее значение амплитуды в первой половине микросекунды больше чем во второй половине или равно ему, то биту присваивается значение логической единицы;
- если среднее значение амплитуды в первой половине микросекунды меньше, чем во

второй половине, то биту присваивается значение логического нуля.

Также применялся алгоритм защиты от случайных импульсных помех [7] (рис.7).

Решение задачи распознавания бит данных также предполагает использование табличного метода. На основании рекомендаций [7] был разработан и опробован метод с таблицей из 1024 значений.

Разработанные алгоритмы, а также алгоритм [6] были испытаны на сопротивление шумовым помехам, а также возможному наложению сквиттеров друг на друга с разным уровнем перекрытия (рис.8). Результаты сведены в таблицу 2.

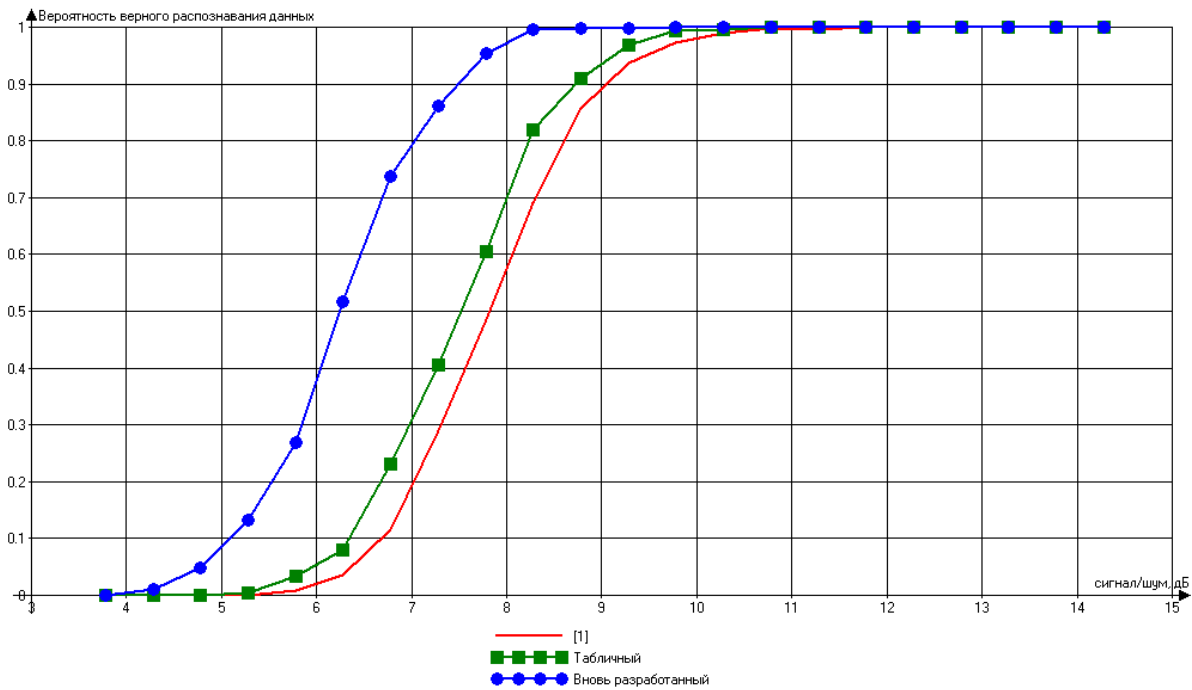


Таблица 2 – Результаты исследования алгоритмов распознавания данных.

№	Наименование алгоритма	При соотношении сигнал/шум 10dBm и одном сквиттере	Без шума. С перекрытием более сильным сквиттером, наложенным со смещением в 52 мкс.	Без шума. С перекрытием более сильным сквиттером, наложенным со смещением в 52,25 мкс.
1	Алгоритм [1]	0,89	0,65	0,35
2	Табличный	0,884	0	0,87
3	Вновь разработанный	0,994	0,93	0,15

### Проверка контрольной суммы и исправление ошибок

Алгоритмы исправления ошибок рекомендованные [1] в ходе исследования не применялись в виду требуемых для их реализации на ПЛИС больших ресурсных затрат как по объёму занимаемой памяти, так и по времени вычислений. Предполагается в случае необходимости передавать задачу коррекции ошибок на вышестоящие устройства с расширенными вычислительными возможностями.

### Поиск сквиттеров реальных целей

Реализован поиск сквиттеров режима S реальных целей (рис.9). Сигнал улавливался антенной (Харченко, 1090 МГц, КСВН=1,5, усиление 10 dBm), с неё передавался на МШУ (усиление 20 dBm) и через полосовой фильтр (1090 МГц, полоса 16 МГц) заводился на вход осциллографа PXI-5105 в составе стенда на платформе PXIe-1085. Осциллограф настраивался на запуск по превышению уровня, а полученные данные обрабатывались разработанными алгоритмами. Найденные и распознанные сквиттеры подтверждались путём сличения номера борта, найденного на стенде сквиттера, с номером борта реальных целей на

онлайн интернет ресурсе.

Стоит отметить, что отсутствие входного порога по обнаружению в самом алгоритме позволило находить довольно сложные с точки зрения распознавания сквиттеры, когда даже визуально сложно на фоне шума выделить полезный сигнал.

Так, на рис.10 представлено окно, в котором жёлтыми линиями выделены импульсы преамбулы сквиттера.

Только при более близком рассмотрении (рис.11) можно визуально выделить характерный рисунок короткого 64 мкс сквиттера.

### Наблюдения и соображения

Алгоритм поиска преамбулы может обнаружить преамбулу одного и того же сквиттера до 4-х раз подряд. При этом для каждой из 4-х найденных преамбул будет иметься своё расчётное значение амплитуды импульсов, а также свои расчётные значения амплитуд в блоке данных. В зависимости от разности расчётных значений также будут приниматься разные решения о значении и достоверности бит данных. При сильном шуме (а также наличии импульсных помех или наложении двух и более сквиттеров) невозможно предсказать, какая из

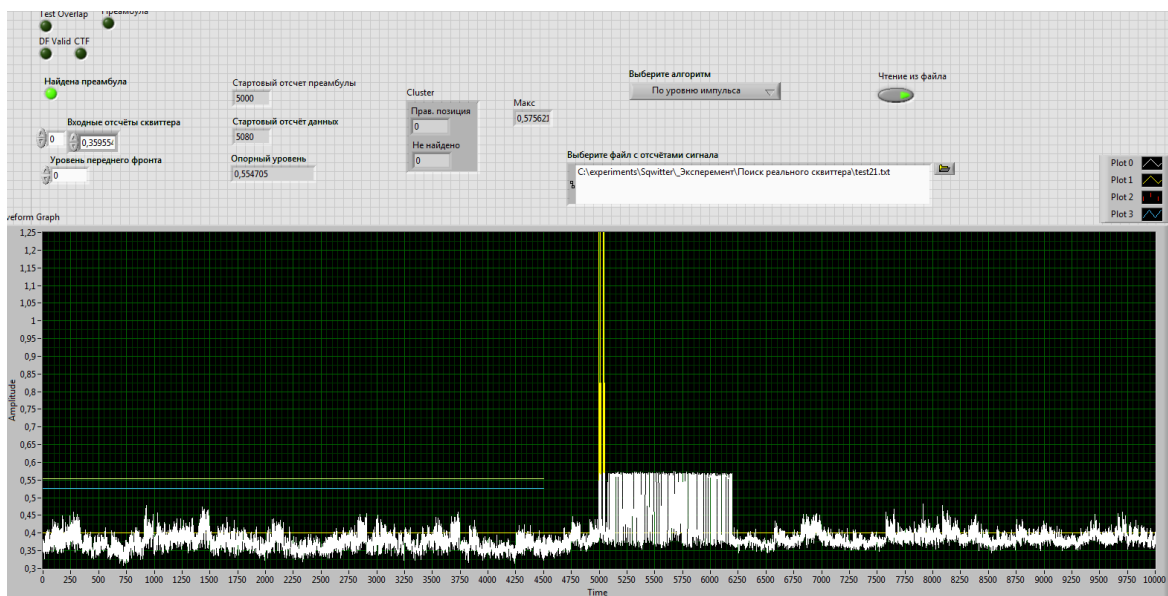


Рис. 9. Сквиттер реального сигнала

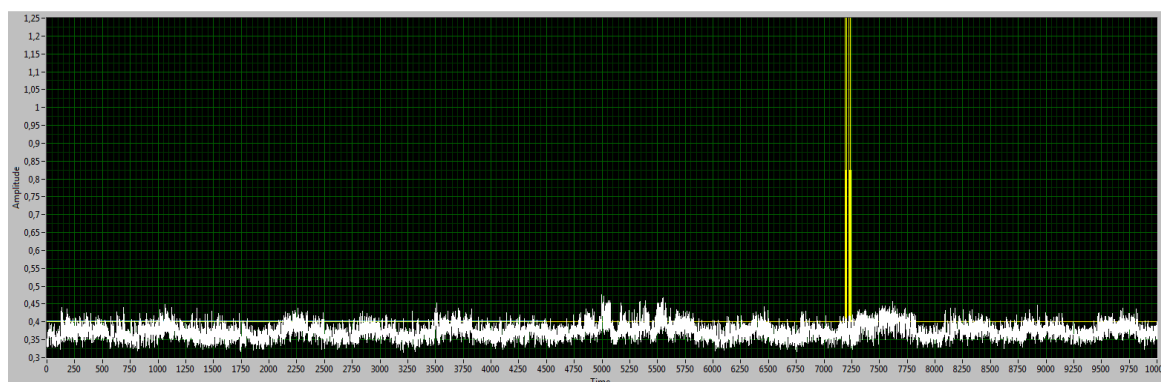


Рис. 10.

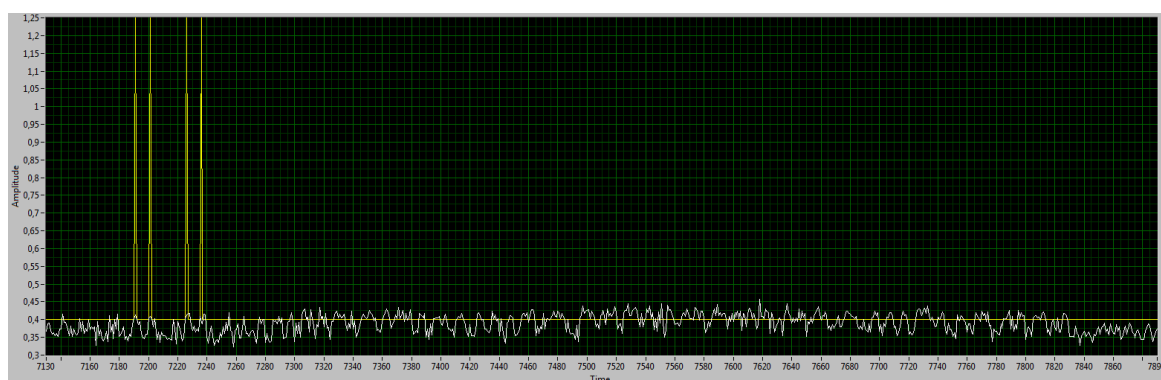


Рис. 11.

4-х найденных преамбул в итоге приведёт к верному распознаванию блока данных.

В связи с этим напрашивается реализация поиска и распознавания сквиттера на ПЛИС с одним блоком поиска сквиттера и несколькими блоками распознавания данных. При этом допускается параллельный запуск блоков распознавания бит данных, применяющих разные алгоритмы, для одной найденной преамбулы. Так, из таблицы 1 следует, что алгоритм 1 хорошо сопротивляется белому шуму, а алгоритм 2 хорошо сопротивляется наложению двух сквиттеров друг на друга. Совместное параллельное применение этих алгоритмов приведёт к повышению вероятности распознавания данных и уменьшению количества потерянных сквиттеров.

#### Заключение

В статье получены алгоритмы поиска и распознавания сквиттера, обеспечивающие 98% вероятность верного поиска и распознавания при соотношении сигнал/шум 10 dBm

с вероятностью ложной тревоги  $1,4 \cdot 10^{-6}$ . Исследованы их вероятностные характеристики при наложении двух сквиттеров при разном уровне перекрытия. Реализован поиск сквиттеров реальных целей.

#### Литература

1. RTCA DO-260B (EUROCAE ED-102A), Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance — Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services — Broadcast (TIS-B), Corrigendum 1: March 2012.
2. Ивушкин М.Ю., Храмов К.К. Построение и оценка параметров АЗН-В приёмника радиолокационного комплекса // Вестник воздушно-космической обороны. 2014. №3. — С.30-35.
3. PXI-FSLASH-CompactPCI [Электронный ресурс]. — URL: <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/global/lang/ru/pg/1/sn/n24>.
4. Храмов К.К., Литвин С.П., Ивушкин М.Ю. Исследование характеристик логарифмического усилителя-детектора при его использовании в приёмных трактах системы АЗН-В // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. №3. — С.111-121.



5. Смирнов М.С. Моделирование алгоритмов АЗН-В приемника в системе LabView // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2016. №18. – С.48-53

6. Технология АЗН-В(TIS-B, FIS-B) [Электронный ресурс]. – URL: [http://adsbradar.ru/ads-b\\_fis-b\\_tis-b\\_technology](http://adsbradar.ru/ads-b_fis-b_tis-b_technology)

7. Ивушкин М.Ю., Храмов К.К., Жиганов С.Н. Исследование алгоритмов обработки сигналов системы ADS-B // I Всероссийская научно-техническая

конференция «Расплетинские чтения»: сб. тез. докл. Москва, 29-31 января, 2014 г. – М.: ГСКБ «Алмаз-Антей», 2013. – С.55-56.

8. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

9. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов. – М.: Радиотехника, 2004. – 320 с.

Поступила 25 января 2018 г.

English

## ADS-B system receiver algorithms development and testing

Ilya Vladimirovich Panteleev – Engineer, JSC "Avangard"<sup>1</sup>.

E-mail: [ilya-panteleev@mail.ru](mailto:ilya-panteleev@mail.ru).

Vsevolod Viktorovich Chekushkin – Doctor of Engineering, Professor, CAD Department, Murom Institute (branch) federal state budgetary educational institution of higher professional education "Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletov"<sup>2</sup>.

E-mail: [chekvv@gmail.com](mailto:chekvv@gmail.com).

Mikhail Stanislavovich Smirnov – Senior Lecturer, Radio Engineering Department, Murom Institute (branch) federal state budgetary educational institution of higher professional education "Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletov"<sup>2</sup>.

E-mail: [smirnov.murom@gmail.com](mailto:smirnov.murom@gmail.com).

<sup>1</sup>Address: 195271, Saint-Petersburg, Kondratievsky av., 72, Russia.

<sup>2</sup>Address: 602264, Murom, Orlovskaya, 23, Vladimirskaya Oblast, Russia.

**Abstract:** This paper presents the squitter search and recognition algorithms performing three steps: search of the squitter preamble; data bits recognition; the checksum test and error correction. A real squitter software envelope was developed to simulate oscillations of the squitter oscillator. In such a case one of the squitters' oscillation and two squitters' overlapping that have different overlapping factor and frequency shift were simulated. The hardware and algorithms control are implemented in NI PXIe-based LabView. The newly developed algorithm for the preamble search is based on the one-time analysis of the amplitude values set. The recognition algorithm is based on the analysis of the consecutive amplitude values. 10 consecutive amplitude values are analyzed at a single point of time and the decision is made whether there is a logical zero or unit. The developed algorithms have been tested in regard to noise interference resistance, as well as the possible squitters' mutual superposition with different overlapping level. The squitter search S-mode of real targets is implemented. The spotted and identified squitters were confirmed by comparing the aircraft number found in the simulator with the aircraft number of real targets in the online Internet resource. The developed algorithms provide 98% reliable search and recognition with 10 dBm signal/noise ratio and  $1.4 \cdot 10^{-6}$  false alarm probability. In future FPGA-based squitter search and recognition with one search module and several data recognition modules are planned to implement. That said the parallel start of data bit recognition modules is not excluded and various algorithms are used for the obtained preamble. The software of two classes was developed according to the architectural concepts above as a result of engineering loop simulators. The call-response interval of models with the host computer was less than 20 milliseconds during the experimental specified data transfer.

**Keywords:** AZN-V, squitter, preamble, simulation, LabView, PXIe-1085, PXI-5105, PXI-5610, ADL-5513.

## References

1. RTCA DO-260B (EUROCAE ED — 102A), Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TIS-B), December 2, 2009.

2. Ivushkin M. Yu., Khramov K.K. Construction and parameters evaluation of ADS-B receiver of radar facility//Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony. 2014, No. 3 (3). P. 30-34.

3. PXI-FSLASH-CompactPCI [electronic record] <http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/global/lang/EN/pg/1/sn/n24>.
4. *Khramov K. K., Litvin, S. P., Ivushkin M. Yu.* Analysis of logarithmic amplifier-detector properties in its use in receiving paths of ADS-B system // Radio and telecommunication systems. 2015. No. 3. Pp. 111-121.
5. *Smirnov M. S.* Modeling of ADS-B transponder algorithms in LabVIEW / Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii. 2016. No. 18. Pp. 48-53.
6. ADS-B technology (TIS-B, FIS-B) [ electronic resource]. URL: [http://adsbradar.ru/ads-b\\_fis-b\\_tis-b\\_technology](http://adsbradar.ru/ads-b_fis-b_tis-b_technology)
7. *Ivushkin M. J., Khramov K. K., Zhiganov S. N.* Investigation of signal processing algorithms of ADS-B system // I All-Russian scientific and technical conference «Raspletinskiye chteniya»: book of abstr. Moscow, January 29-31, 2014 - M.: GSKB "Almaz-Antey", 2013. - P. 55-56.
8. *Gonorovsky I.S.* Radio technical circuits and signals: Textbook for higher educational institutions. – 5<sup>th</sup> Ed., Rev. and extend. – M.: Drofa, 2006. - 719 p.
9. *Bakulev P. A.* Radar system. Textbook for higher educational institutions. - Moscow: Radiotekhnika, 2004. - 320 p.