

**УДК 621.396.74**

**ББК 0571.5**

**Л40**

**Б. В. Лежанкин**

**Иркутск, Россия**

**М. А. Межетов**

**Иркутск, Россия**

**С. В. Туринцев**

**Иркутск, Россия**

## **ДЕМОДУЛЯЦИЯ СИГНАЛОВ КАНАЛА ВТОРИЧНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ В СИСТЕМЕ ADS-B**

Безопасность полётов воздушных судов во многом зависит от качества функционирования систем различного назначения. Одной из таких систем является система ADS-B, предназначенная для организации воздушного движения, путем построения траекторий перемещения ВС с учетом эффективного использования воздушного пространства. Поэтому анализ применения основных методов построения аппаратуры данного назначения, процессов демодуляции и декодирования сигналов в каналах передачи данных является актуальной задачей, решение которой позволит повысить эффективность воздушных перевозок с заданным уровнем безопасности полетов.

**Ключевые слова:** ADS-B, системы символьной синхронизации, квадратурный демодулятор, квадратурные составляющие сигнала, программно-аппаратный приёмник, детектор преамбулы.

**UDC 621.396.74**

**BBK 0571.5**

**B. V. Lezhankin**

**Irkutsk, Russia**

**M. A. Mezhetov**

**Irkutsk, Russia**

**S. V. Turincev**

**Irkutsk, Russia**

## **SIGNAL DEMODULATION FOR THE SECONDARY RADAR CHANNEL OF ADS-B SYSTEM**

Aircraft flight safety is largely dependent on the performance of systems having various purposes. One of the systems is ADS-B intended for air traffic management by constructing trajectories of aircraft motion with efficient use of airspace. The analysis of main methods of designing the equipment, demodulating and decoding the signals in data links is therefore a relevant objective which can increase the efficiency of air transportation at the required level of flight safety.

**Key words:** ADS-B, systems of symbol synchronization, quadrature demodulator, quadrature signal, hardware-software receiver, preamble detector.

Отрасль воздушного транспорта играет ведущую роль в мировой экономической деятельности и по-прежнему является одним из наиболее быстро развивающихся секторов мировой экономики. В каждом районе мира государства рассматривают авиационную отрасль, как средство поддержания или стимулирования темпов экономического роста и оказания помощи в предоставлении основных видов обслуживания населению на местах. В этой связи гражданскую авиацию можно считать одним из важных элементов повышения благосостояния и экономической активности, как в отдельных государствах, так и в мире в целом. В связи с постоянным ростом объемов деятельности гражданской авиации во многих районах спрос на воздушные перевозки нередко превышает существующую пропускную способность аэронавигационной системы, что приводит к серьезным негативным последствиям не только для авиационной отрасли, но и для общего состояния экономики. Одним из ключевых элементов поддержания жизнеспособности гражданской авиации является обеспечение наличия безопасной,

охраняемой, эффективной и рациональной в экологическом отношении аэронавигационной системы на глобальном, региональном и национальном уровнях. Для этого необходимо создать систему организации воздушного движения, которая в максимальной степени использовала бы возможности, предоставляемые техническим прогрессом [Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД. URL: [http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854\\_cons\\_ru.pdf](http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854_cons_ru.pdf)].

Согласно федеральной целевой программе «Модернизация единой системы организации воздушного движения (2009–2020 гг.)» основными мероприятиями являются:

- модернизация сети авиационной электросвязи и передачи данных;
- оснащение радиолокационных позиций средствами вторичной радиолокации;
- переход к современным технологиям организации воздушного движения, основанным на внедрении средств и систем CNS/ATM и др.

Содержание концепции CNS/ATM (Communications, Navigation, Surveillance/Air Traffic Management) – связь, навигация, наблюдение/организация воздушного движения, сводится к переходу от жесткого управления воздушным движением к более гибкой организации за счет расширения функций систем связи, навигации и наблюдения. Коллективное принятие решений и распространение информации в рамках всей системы ОрВД позволят пользователям воздушного пространства участвовать в сбалансированном учете потребностей в ресурсах системы ОрВД, что обеспечивает гибкость и предсказуемость, а также приносит выгоды [Казаков, 2008]. В конкретном плане ожидаемые выгоды включают следующее – все воздушное пространство будет рассматриваться как готовый к использованию ресурс, что улучшит доступ к нему; расширится возможность использования траекторий полета, предпочитаемых пользователями; за счет сотрудничества между членами сообщества увеличится пропускная способность *рис. 1*.

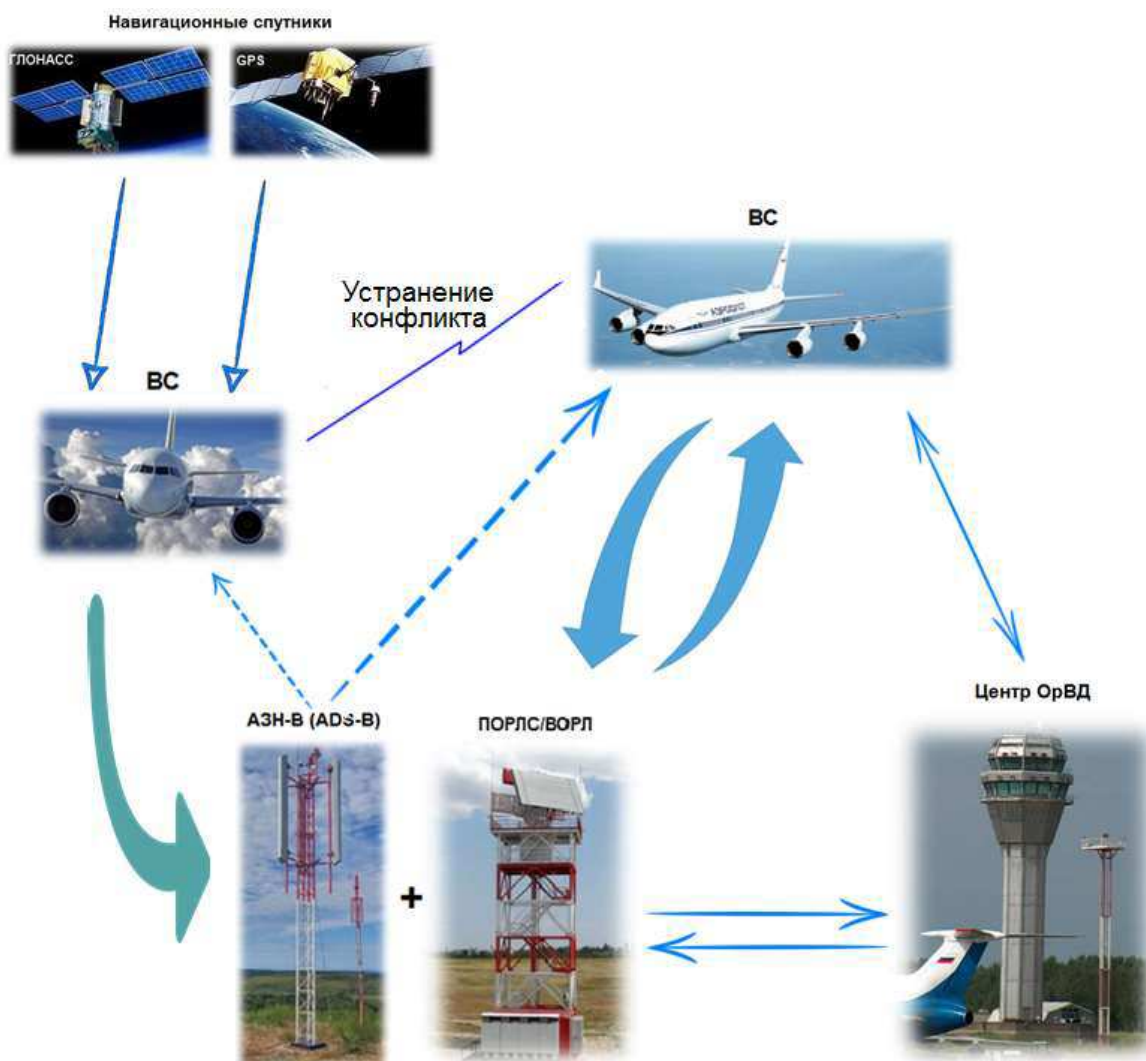


Рис. 1. Структура системы CNS/АТМ

Составными элементами концепции CNS/АТМ являются [Бочкарев, 2003]:

Связь. Данная составляющая концепции авиационная подвижная связь будет широко использовать методы цифровой модуляции в целях осуществления высокоэффективного потока информации, оптимального использования автоматизации, как на воздушном судне, так и на земле, и экономичного использования спектра частот. Дискретно-адресный режим вторичной обзорной радиолокации (режим S ВОРЛ) будет предоставлять линии передачи данных «воздух – земля», которые будут использоваться для целей ОрВД в воздушном пространстве с высокой плотностью движения. Концепция сети авиационной электросвязи (АТН) с помощью использования структуры согласованных протоколов связи будет

обеспечивать взаимообмен пакетами цифровой передачи данных между конечными пользователями и различными подсистемами связи «воздух – земля» и «земля – земля».

Навигация. Данная составляющая концепции позволяет воздушному судну (ВС) выполнять полет по выбираемой экипажем оптимальной для данных условий воздушной обстановки траектории при взаимодействии с другими ВС и объектами системы ОрВД. При этом появляется возможность более эффективного использования структуры воздушного пространства, повышения экономичности и надежности функционирования. Высокую точность определения навигационно-временных параметров (НВП) ВС при зональной навигации предполагается обеспечить путем использования спутниковых систем навигации (ССН). Существующие ССН второго поколения (ГЛОНАСС, GPS) создают достаточно точное глобальное навигационно-временное поле, что позволяет решать основные задачи самолетовождения на воздушных трассах и в зоне аэродромов с требуемым уровнем безопасности полетов [Ерохин, 2015].

Наблюдение. Вторичные обзорные радиолокаторы по-прежнему будут широко применяться во многих частях мира. Добавление к ВОРЛ режима S, селективного адреса и возможности использовать линию передачи данных еще более усилят важную роль ВОРЛ для целей наблюдения. Автоматическое зависимое наблюдение (ADS) будет применяться в основном в районах, где отсутствует радиолокационный охват. ADS – это функция, при которой воздушное судно автоматически с помощью линии передачи данных передает данные, полученные от бортовых навигационных систем. Как минимум, эти данные включают опознавательный знак воздушного судна и его трехмерное местоположение. При необходимости могут предоставляться дополнительные данные. Введение линий передачи данных «воздух – земля» вместе с достаточно точными и надежными навигационными системами воздушного судна представляют возможность обеспечивать наблюдение в районах, в которых отсутствует такое обслуживание в современной инфраструктуре, особенно в океанических районах и других районах, где применяемые в настоящее время системы создают трудности, являются

неэкономичными или даже невозможными к внедрению. В дополнение к районам, которые в настоящее время лишены информации о состоянии воздушного движения, за исключением сообщений пилотов о местоположении, ADS найдет положительное применение в других районах, включая районы с высокой плотностью движения, где оно может служить в качестве дополнения или резерва для вторичного обзорного радиолокатора, и тем самым уменьшится потребность в первичном радиолокаторе.

В связи с актуальностью развития и применения концепции CNS/ATM, а именно внедрение системы ADS-B становится актуальным построение аппаратной части, реализующей функции приема, обработки сигналов, принимаемых с борта воздушного судна для выполнения процедуры выделения информационной части. Решение данной задачи производилось путем приема сигналов от ВС, в районе аэропорта Иркутск, с использованием следующих программно-аппаратных средств: платформы PXI 1062, с модулем понижения частоты NIPXI5600 и АЦП NIPXI 5142 и SDR приёмника с преобразователем частоты R820T с АЦП RTL2832.

Для передачи данных в системе ADS-B применяется PPM (pulse position modulation). Передача информации в таких системах осуществляется изменением позиции информационного символа 0 или 1 в пределах передачи одного бита информации. То есть передача 0 и 1 осуществляется импульсом, положение которого характеризует передаваемый символ. На *рис. 2, 3* показаны графики, на которых изображены импульсы и соответственно радиоимпульсы символов 1 и 0. При этом, если передается один бит информации, в позиции будет присутствовать один импульс, соответствующий 0 или 1.

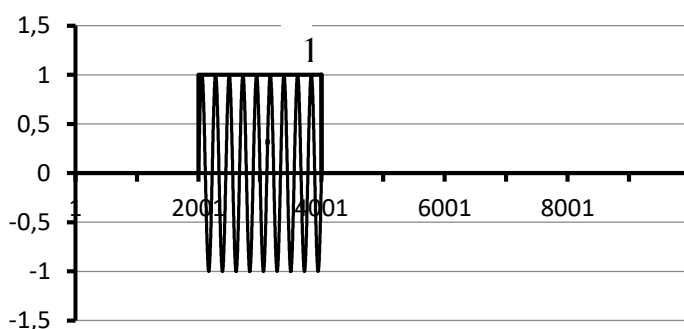


Рис. 2. Передача символа 1

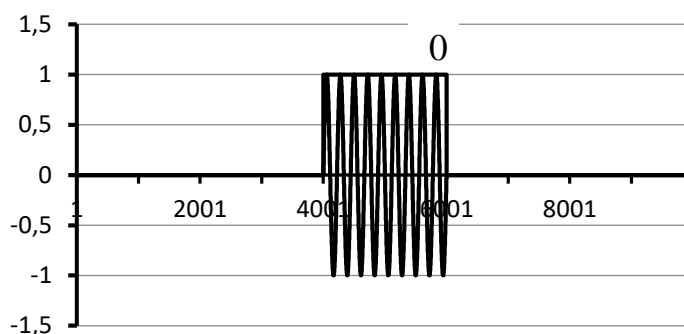


Рис. 3. Передача символа 0

Формат информационного пакета системы ADS-B (рис. 4) состоит из преамбулы и информационных символов.

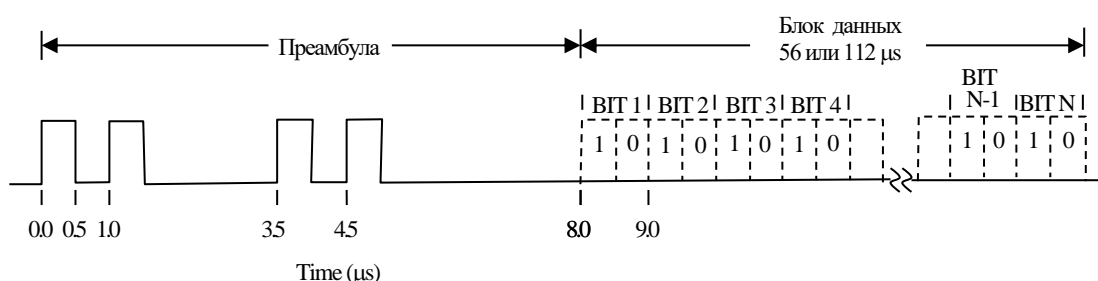


Рис. 4. Формат информационного пакета системы ADS-B

Преамбула необходима для идентификации пакета и нахождения его начала. Информационная последовательность бит несет информацию о идентификационном номере ВС, а также значения параметров движения ВС (высота, координаты и т. д.).

Регистрация и запись сигнала производилась двумя программно-аппаратными средствами (SDR). Первый – на базе платформы PXI 1062, с модулем понижения частоты NIPXI5600и АЦП NIPXI 5142; второй – на базе SDR приёмника с преобразователем частоты R820Tс АЦП RTL2832. Выходные сигналы этих приёмников представляют собой отсчеты синфазной и квадратурной составляющих, спектр частот которых сдвинут в область нулевой промежуточной частоты. Записанный таким образом сигнал демодулировался в программной среде Lab-View 2010. Структурная схема демодулятора приведена на рис. 5.

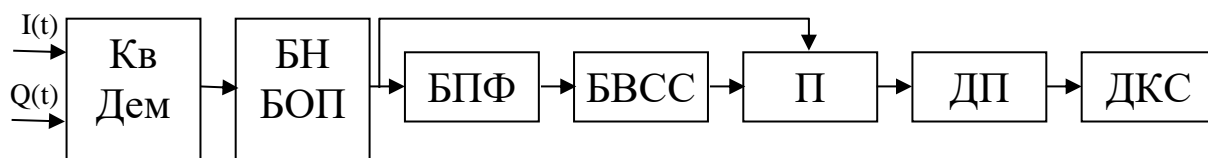


Рис. 5. Структурная схема демодулятора ADS-B

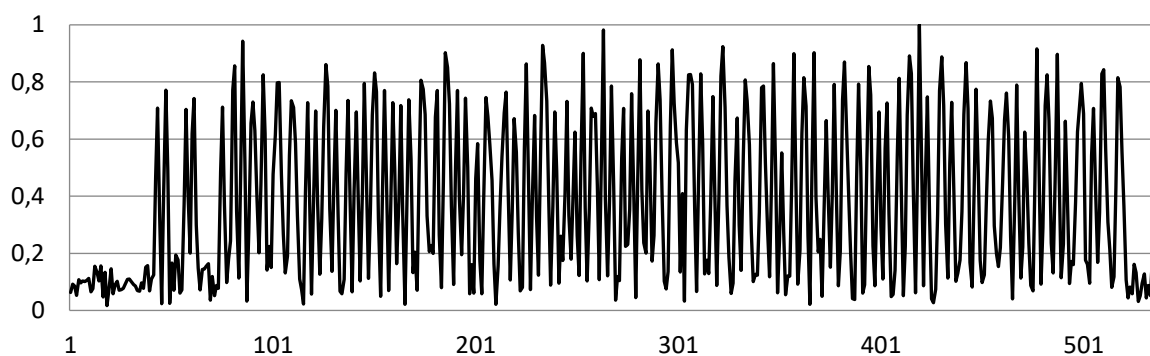
В ее состав входит:

Кв. Дем. – квадратурный демодулятор; БНБОП – блок нормировки с блоком определения порога; БПФ – блок быстрого преобразования Фурье; БВСС – блок выделения символьной синхронизации; П – перемножитель; ДП – детектор преамбулы; ДКС – декодер кодовых символов.

Квадратурные отсчеты комплексного сигнала поступают на квадратурный демодулятор, где выделяется огибающая входного сигнала. В блоке нормировки производится нормирование демодулированного сигнала в пределах от 0 до 1 и вычисление порога. В блоке БПФ временные отсчеты преобразуются в спектральные, которые подаются в БВСС, где производится выделение синусоидальной составляющей, привязанной по фазе к символьной скорости, а также формирование стробирующих импульсов для управления перемножителем П. На второй вход перемножителя П поступает нормированный, с учетом порога, сигнал с БНБОП. Выходной сигнал перемножителя представляет собой последовательность импульсов, положение которых показывает какой символ 0 или 1 демодулируется в данный момент времени. ДП представляет собой обнаружитель, задачей которого является определение преамбульной части принимаемого информационного пакета. Сигнал с ДП подаётся на ДКС, который из принятого сигнала формирует кодовую последовательность 0 и 1, соответствующую передаваемой информации.

На графике *рис. 6* показан демодулированный сигнал с выхода Кв. Дем. одного из пакетов системы ADS-B, из которого видно, что в результате помех амплитуда сигнала подвержена случайным флуктуациям [Феер, 2000].





*Рис. 6.* Сигнал с выхода квадратурного демодулятора

Поэтому, для правильной демодуляции такого сигнала, его необходимо подвергнуть предварительной обработке в БНБОП, которая позволит правильно выделить сигналы символьной синхронизации из принятого сообщения. На *рис. 7* изображен график нормированного сигнала относительно нуля с учетом порога. Такая нормировка позволяет в дальнейшем получить составляющую на символьной скорости после преобразования Фурье в БПФ, по фазе привязанную к входному сигналу [Иващенко, 2012].



*Рис. 7.* Нормированный сигнал относительно нуля с учетом порога

График, показывающий эту составляющую, представлен на *рис. 8*, а её отфильтрованная составляющая на *рис. 9*.

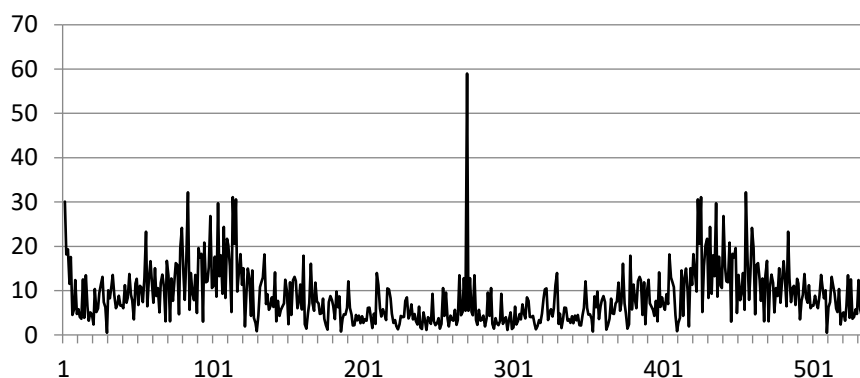


Рис. 8. Результат работы в блоке преобразования Фурье

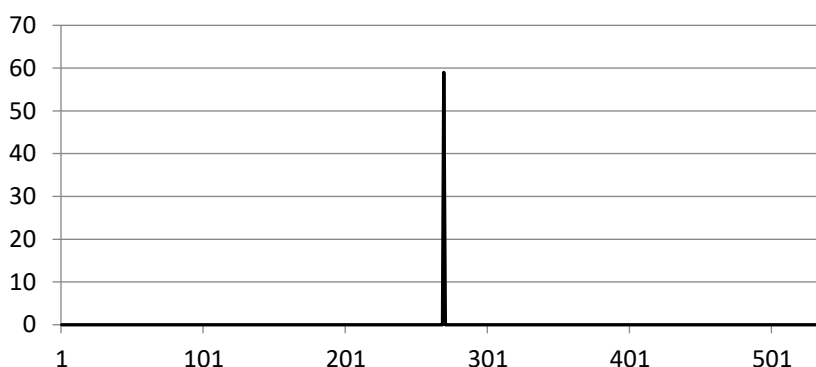


Рис. 9. Составляющая на символьной скорости

На рис. 10 изображен график входного сигнала с сигналом символьной синхронизации (ССС). ССС имеют меньшую амплитуду, а демодулированный сигнал – большую. Из графика видно, что истинные значения в принятом сигнале соответствуют отрицательным полуволнам ССС. Первые четыре импульса соответствуют преамбуле сигнала. Три из них четко попадают на отрицательную полуволну ССС, а четвертый захватывает и отрицательную и положительную полуволны. Истинное положение четвертого импульса будет соответствовать отрицательной полуволне ССС. При отсутствии ССС возникла бы проблема выбора отсчета в четвертом импульсе преамбулы.

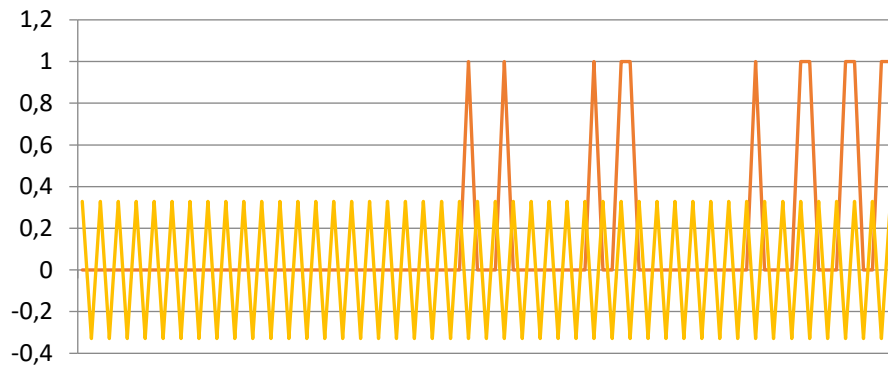


Рис. 10. Совместное отображения ССС и демодулированного сигнала

На рис. 11 показан график сформированных импульсов ССС, которые формируются на БВСС и поступают на перемножитель П.

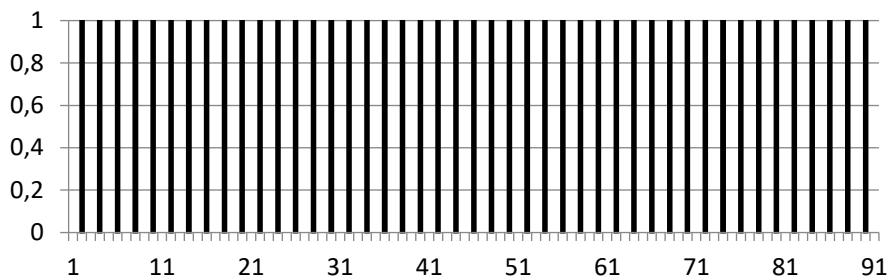


Рис. 11. Сигналы символьной синхронизации

С выхода перемножителя П снимается демодулированный сигнал ADS-B (рис. 12).

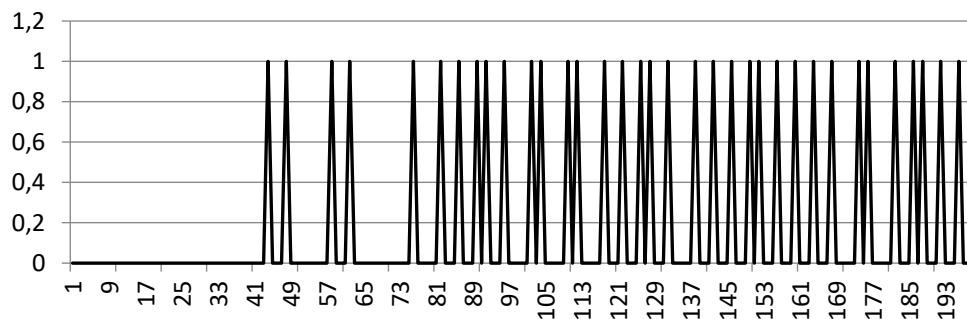


Рис. 12. Демодулированный сигнал ADS-B

Для обнаружения преамбулы в работе формировалась копия преамбулы рис. 13, которая циклически сдвигается относительно демодулированного сигнала, и

при совпадении копии с преамбулой входного сигнала в ДП формируется напряжение высокого уровня, которое соответствует началу принимаемого пакета системы ADS-B.

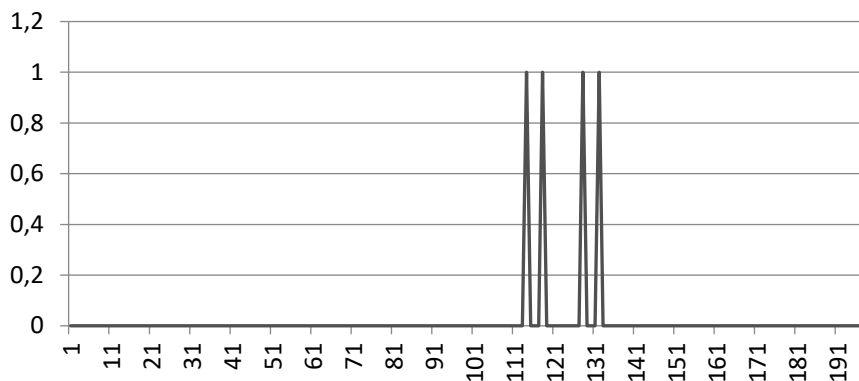


Рис. 13. Сигнал копии преамбулы

В ДКС производится преобразование демодулированного сигнала в соответствующий двоичный код, из которого в декодере выделяется информация, заложенная в информационном пакете системы ADS-B.

В статье разработана программа демодуляции информационного пакета системы ADS-B в программной среде LabView 2010, которая в качестве исходных данных использовала отсчеты квадратурных составляющих сигнала, полученных двумя SDR приёмниками: SDR на базе платформы PXI 1062, и SDR на базе приёмника с преобразователем частоты R820Tc АЦП RTL2832. Полученные результаты могут применяться для повышения эффективности обучения студентов в вузах гражданской авиации, а также войти, как составная часть, в систему мониторинга авиационных линий связи.

### Библиографический список

1. Бочкарев В. В. Концепция и системы CNS/АТМ в гражданской авиации / В. Ф. Кравцов, Г. А. Крыжановский и др.; под ред. Г. А. Крыжановского. М.: Академкнига, 2003. 415 с.
2. Глобальная эксплуатационная концепция OpВД.// Doc. 9854-AN/458, 1-е изд. 2005г. 93 с. // [Электронный ресурс]. — 2005. URL: [http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854\\_cons\\_ru.pdf](http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854_cons_ru.pdf) (дата обращения: 31.01.2018).

3. *Ерохин В. В.* Управление траекториями воздушных судов в условиях оптимизации навигационного сеанса при автоматическом зависимом наблюдении // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 221(11). С. 18–26.

4. *Иващенко П. В.* Радиоавтоматика: учеб. пособ. к изучению дисциплины «Радиоавтоматика» / П. В. Иващенко, В. А. Голощапов. Одесса: ОНАС им. А. С. Попова, 2012. 72 с.

5. Системы CNS/ATM: учеб. пособие / Сост. В. А. Казаков. 2-е изд., перераб. и доп. Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. 103 с.

6. *Феер К.* Беспроводная цифровая связь. М.: Радио и связь, 2000. 514 с.

## Reference

1. *Bochkarev V. V.* Concept and CNS/ATM systems in civil aviation / V. F. Kravcov, G. A. Kryzhanovskij et al.; ed. by G. A. Kryzhanovskij. M.: Akademkniga, 2003. 415 p.

2. Global ATM Operational Concept.// Doc. 9854-AN/458, 1<sup>st</sup> edition. 2005. 93 p. // [Electronic source]. – 2005. URL: [http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854\\_cons\\_ru.pdf](http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9854_cons_ru.pdf) (accessed date: 31.01.2018).

3. *Erohin V. V.* Aircraft trajectory control while optimizing a navigation session through automatic dependent surveillance // Scientific Bulletin of MSTU CA. 2015. № 221(11). P. 18–26.

4. *Ivashhenko P. V.* Radio automatics: textbook for the course «Radio automatics» / P. V. Ivashhenko, V. A. Goloshhapov. Odessa: ONAT n.a. A.S. Popov, 2012. 72 p.

5. CNS/ATM systems: textbook / V. A. Kazakov. 2<sup>nd</sup> ed., arranged and add. Ulyanovsk: Ulyanovsk Civil Aviation Institute, 2008. 103 p.

6. *Feer K.* Wireless digital communication. M.: Radio i svjaz', 2000. 514 p.