

УДК

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ ПО СИГНАЛАМ ГНСС GALILEO И BEIDOU

Ханцевич Р.Д., студент гр.241301, Астапович Г.Д., студент гр.241301

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Козлов С.В. – д-р техн. наук, профессор

Аннотация. Приведены состав, структура и задачи, решаемые аппаратно-программным модулем на базе отладочной платы NT1068.2 при измерении полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, описание специализированного программного обеспечения, разработанного для обработки принятых сигналов на двух и более частотах и оценивания ПЭС.

Ключевые слова. Глобальная навигационная спутниковая система, Galileo, Beidou, полное электронное содержание, ионосфера, отладочная плата NT1068.2, виды модуляций, согласованная фильтрация, радиотомография, навигационный космический аппарат.

Введение

Состояние ионосферы Земли является ключевым элементом, оказывающим влияние на работу системах спутниковой навигации, связи и радиолокации. Её переменное состояние приводит к задержкам распространения радиосигналов, что вносит существенные погрешности в навигационные определения. Одним из основных параметров, характеризующих состояние ионосферы, является полное электронное содержание (ПЭС, TEC) — интегральная концентрация свободных электронов вдоль трассы распространения сигнала.

Двухчастотные кодовые и фазовые запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS и, позже, ГЛОНАСС, традиционно используются для определения ПЭС на трассах распространения между навигационным космическими аппаратами (НКА) указанных ГНСС и наземными приемными пунктами (НПП) начиная с 90-х годов прошлого века. Результаты исследований обобщены, например, в работе Е.Д. Терещенко с соавторами «Определение полного электронного содержания по сигналам спутников глобальной навигационной системы ГЛОНАСС»..

Однако за последние 10-15 лет были развёрнуты и введены в эксплуатацию такие ГНСС как европейская Galileo (официальным началом работы является 2016 год) и китайская BeiDou (официальный ввод в эксплуатацию состоялся в 2020 году). Ряд их характеристик существенно превосходят GPS и ГЛОНАСС. ГНСС Galileo и Beidou используют три и более частоты при более широком спектре навигационных сигналов, что позволяет точнее оценивать ионосферную задержку. Обладание большим количеством спутниковых группировок на фоне GPS и ГЛОНАСС повышает качество принимаемых сигналов даже в плотной городской застройке. Современные сигналы Galileo и Beidou обеспечивают повышенную точность и помехоустойчивость при измерении ПЭС, и способствуют снижению ошибок многолучёвости.

Таким образом, использование полученных данных от ГНСС Galileo и Beidou для измерения ПЭС является актуальным и востребованным и требует дальнейшего изучения и применения на практике.

Особенности ГНСС Galileo и BeiDou с позиций измерения ПЭС

Система Galileo — европейская ГНСС, находящаяся под гражданским управлением. Полностью развёрнутая система состоит из 24 действующих спутников и 6 резервных, размещённых на круговые геоцентрические орбиты высотой 23222 километров. Один виток спутники проходят за 14 часов 4 минуты и 2 секунды, обращаясь в трёх плоскостях, наклонённых под углом 56° к экватору. Навигационные сигналы Galileo передаются в четырёх частотных диапазонах: E5a (1176,45 МГц), E5b (1207,14 МГц), E6 (1278,75 МГц) и E1 (1575,42 МГц). Диапазоны E5a, E5b и E1 включены в спектр для авиационных радионавигационных служб.

Особенностью сигнала E5 является модуляция AltBOC (Alternative Binary Offset Carrier), обеспечивающая более высокое отношение сигнал/шум по сравнению с традиционными BPSK-сигналами. Сигнал E5 генерируется с частотой боковых поднесущих 15,345 МГц и может быть представлен как сигнал 8-PSK с фазовыми состояниями, определяемыми комбинацией четырех компонентов: пилотных и информационных для поддиапазонов E5a и E5b.

Сигнал E1 использует модуляцию CBOC (Composite Binary Offset Carrier) с двумя поднесущими частотами 1,023 МГц и 6,138 МГц. Композитный сигнал E1-B/C формируется из информационной компоненты E1-B и пилотной компоненты E1-C с распределением мощности 50 процентов на каждую.

Система Beidou — глобальная спутниковая система навигации, принадлежащая Китайской Народной Республике и управляется Китайским управлением спутниковой навигации. Базовая

орбитальная группировка состоит из 30 спутников: 3 геостационарных, 3 на наклонных геосинхронных орбитах, 24 на средних околоземных орбитах. Геостационарные спутники и спутники, находящиеся на геосинхронных орбитах, обращаются на высоте 35786 километров. При этом геостационарные спутники находятся на таких долготах, как 80°; 110,5°; 140° восточной долготы. Спутники, находящиеся на геосинхронных орбитах имеют наклонение орбитальной плоскости 55° относительно экваториальной плоскости. Спутники, расположенные на околоземных орбитах работают на высоте 21528 километров, орбитальное наклонение идентично наклонным спутникам, находящимся на геосинхронных орбитах – 55°. Полный оборот вокруг Земли спутники на средней околоземной орбите совершают примерно за 12 часов.

В системе используется собственная система координат BeiDou Coordinate System, которая полностью соответствует определениям Международной службы вращения Земли и Китайской геодезической системы координат.

Сигнал В1С имеет несущую частоту 1575,42 МГц и занимает полосу 32,736 МГц. Он состоит из двух компонентов: компонента данных со скоростью 100 символов в секунду и пилотного компонента, не несущего данных. Компонент данных модулируется методом ВОС(1,1) (Binary Offset Carrier), а пилотный компонент — более сложной квадратурной модуляцией QMBOC(6,1,4/33), которая представляет собой комбинацию поднесущих ВОС(1,1) и ВОС(6,1) с соотношением мощностей 29:4. Общее соотношение мощности компонента данных к пилотному составляет 1:3. Сигнал В2а имеет частоту 1176,45 МГц и полосу 20,46 МГц. Оба его компонента используют простую фазовую манипуляцию ВРSК(10) со скоростью 200 символов в секунду для данных и отсутствием данных на пилотном канале, а соотношение их мощностей равно 1:1. Все сигналы имеют правую круговую поляризацию.

Дальномерные коды для обоих сигналов являются двухуровневыми (первичный и вторичный код). Для В1С первичный код имеет длину 10230 чипов со скоростью 1,023 Мчип/с и генерируется усечением кодов Вейля. Для В2а первичный код также имеет длину 10230 чипов, но скорость 10,23 Мчип/с, и он формируется на основе кодов Gold с использованием двух 13-ступенчатых регистров сдвига. Навигационные сообщения, передаваемые в этих сигналах, называются В-CNAV1 (для В1С) и В-CNAV2 (для В2а). В-CNAV1 имеет кадр длительностью 18 секунд и использует комбинированное кодирование: ВСН для коротких подкадров и мощные 64-ричные LDPC-коды (Low Density Parity Check) для основных блоков данных, включая эфемериды и параметры часов. В-CNAV2 имеет более короткий кадр — всего 3 секунды, что обеспечивает более быстрое обновление данных, и также использует 64-ричный LDPC(96,48). Оба сообщения защищены контрольной суммой CRC-24Q.

Классический алгоритм измерения ПЭС по результатам измерения неоднозначных дальностей P_1 и P_2 на двух частотах f_1 и f_2 с учетом дифференциальных кодовых задержек (ДКЗ) на этих частотах имеет вид :

$$TEC = \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) + DCB + \sigma P] \quad (1)$$

где f_1, f_2 – несущие частоты двух сигналов; P_1 – измеренная псевдодальность на частоте f_1 ; P_2 – измеренная псевдодальность на частоте f_2 ; DCB – дифференциальная кодовая задержка для соответствующих видов модуляции (сигналов), σP – флуктуационная ошибка псевдодальности.

Фазовые измерения обладают более высокой точностью, но требуют разрешения неоднозначности. Для устранения неоднозначности применяется совместная обработка фазовых и кодовых измерений.

Алгоритм включает в себя оценивание полного электронного содержания на каждом периоде повторения, а также усреднение полученных оценок за время 30...120 секунд, для усреднения флуктуационных ошибок измерений.

Состав и структура аппаратно-программного модуля

Аппаратно-программный модуль измерения полного электронного содержания в ионосфере состоит из аппаратной и программной части.

Аппаратная часть состоит из ГНСС-антенны со встроенным малошумящим усилителем (МШУ), сплиттера SPL15-465X5, отладочной платы NT1068.2, кабелей с SMA-разъемами и ноутбука с комплектом специального программного обеспечения. Структурная схема аппаратно-программного модуля представлена на рисунке 1.

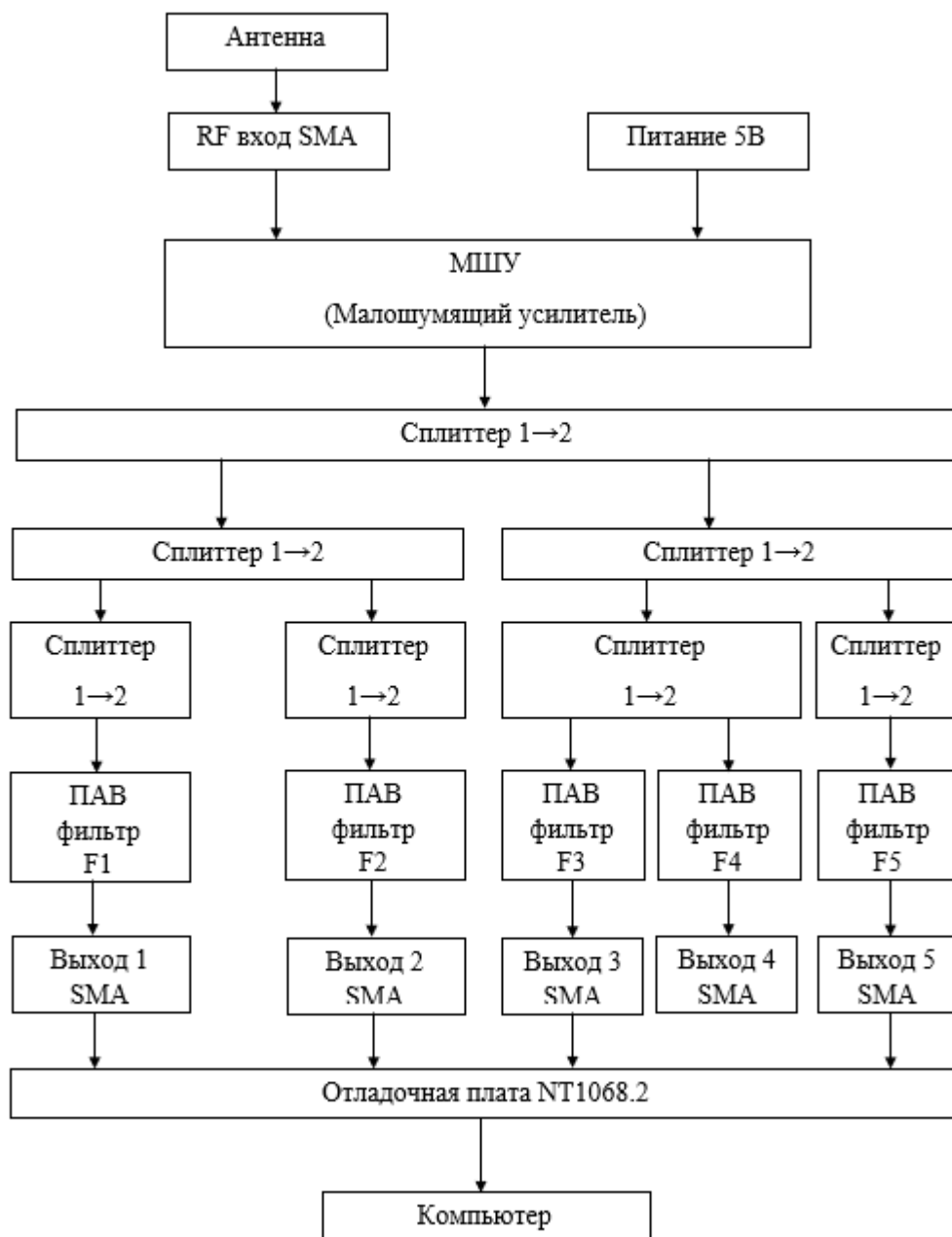


Рисунок 1 – Структурная схема аппаратной части модуля

ГНСС-антенна НХ-CSX608А представляет собой многочастотную внешнюю антенну, поддерживающую работу со всеми типами ГНСС. Антенна имеет волновое сопротивление 50 Ом, правую круговую поляризацию с коэффициентом эллиптичности не более 3 дБ, обеспечивает азимутальное покрытие 360°, КСВН на выходе не превышает 2. Встроенный малозумящий усилитель имеет усиление 40 ± 2 дБ, напряжение питания составляет от 3,3 до 12 В. Высокий коэффициент усиления и широкая диаграмма направленности позволяет принимать сигналы от НКА при малых углах места. Потребляемый ток не превышает 65 мА, а групповая задержка ≤ 5 нс. Рабочая температура антенны составляет от -40°C до $+85^\circ\text{C}$. ГНСС-антенна НХ-CSX608А представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Антенна со встроенным МШУ (вид сверху, сбоку)

Основой отладочной платы NT1068.2 является четырёхканальная микросхема NT1068.2, предназначенная для приёма сигналов ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, QZSS. Плата оснащена высокоскоростным преобразователем данных с интерфейсом USB 3.0, позволяющим обрабатывать захваченные навигационные сигналы на персональном компьютере. Максимальная скорость передачи данных конфигурируется и может достигать 200 Мбит/с на канал. Ключевые особенности платы включают в себя комбинированный RF-вход со встроенным сплиттером 1-to-4 с возможностью питания активной антенны, а также отдельные RF-входы для каждого из четырёх каналов с индивидуальной поддержкой питания активной антенны. Плата поддерживает подключение дополнительных модулей, таких как 4-канальный преселектор или 1-to-5 RF-сплиттер. Плата требует установки драйвера и может питаться как от внешнего источника 5 В, так и через порт USB 3.0. Настройка источника опорной частоты и режимов работы осуществляется с помощью переключателей и джамперов на плате. Программное обеспечение позволяет конфигурировать регистры NT1068.2, управлять режимом усиления RF и IF, настраивать синтезаторы частот, выбирать тип выходного интерфейса — аналоговый дифференциальный или 2-битный АЦП с CMOS/LVDS, а также отображать спектр сигнала в реальном времени. Отладочная плата NT1068.2 представлена на рисунке 3.

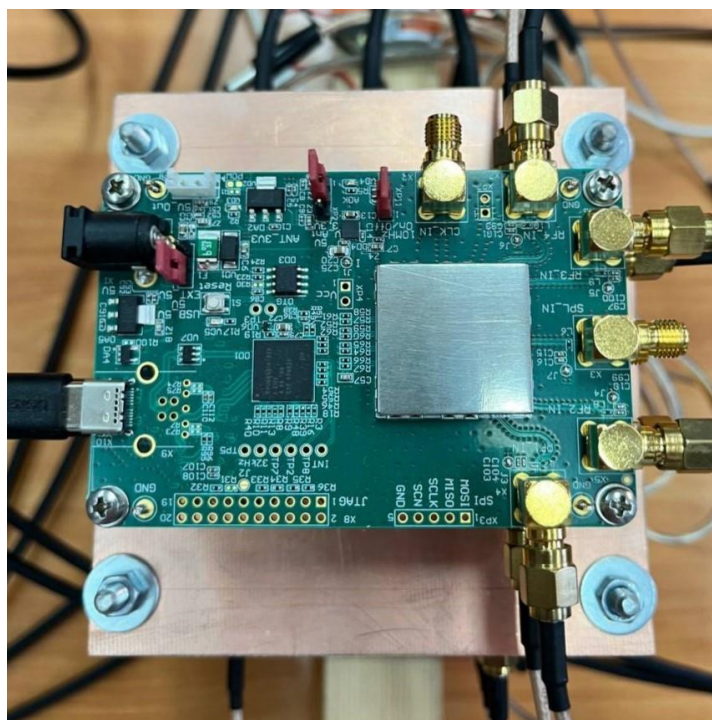


Рисунок 3 – Отладочная плата NT1068.2

В микросхеме реализованы два независимых синтезатора: «PLL А» и «PLL В». Основной их задачей является генерация несущей частоты для переноса сигнала из эфира вниз по спектру, а также формирование тактовой частоты для АЦП. Это позволяет настраивать частоту для приёма разных диапазонов.

Каждый канал содержит квадратурный смеситель с подавлением зеркального канала. Это позволяет переносить сигнал вниз по частоте, при этом эффективно фильтруя помехи без использования внешних фильтров. Для каждого канала можно выбирать режимы, такие как USB (Upper

Sideband) или LSB (Lower Sideband). Это позволяет универсально подстраиваться под частоты разных навигационных систем.

Усилитель промежуточной частоты состоит из каскада усиления и программируемого фильтра нижних частот с полосой от 11 до 33 МГц. Усилитель имеет два режима работы, а именно автоматический и ручной. Задачей автоматического режима является поддержка постоянного уровня сигнала на выходе. Тогда как ручной режим фиксирует усиление по принципу грубой или точной настройки, 10 бит. Управление ручным режимом осуществляется через регистры SPI для каждого из четырёх каналов.

Задачей аналогово-цифрового преобразователя является преобразование аналогового сигнала промежуточной частоты в цифровые данные для последующей передачи на ПК. Четыре АЦП обладают разрядностью 2 бита на канал при настраиваемой частоте дискретизации.

SPL15-465X5 — это активный сплиттер 1-to-5 от производителя «NTLab», оптимизированный для работы с отладочной платой NT1068.2. Сплиттер делит один входной сигнал от одной активной антенны на 5 выходов (4 из которых задействованы). Он предназначен для работы с такими ГНСС-приёмниками, как GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. Также сплиттер SPL15-465X5 имеет встроенное питание антенны 5 В и каждый выход имеет свой ПАВ-фильтр. Коэффициенты усиления для каждого канала имеют следующие характеристики: 1 канал – 8дБ, 2 канал – 6,5 дБ, 3 канал – 5 дБ, 4 канал – 6 дБ, 5 канал – 9 дБ. Коэффициент шума для каждого канала: 1 канал – 1,6 дБ, 2 канал – 2 дБ, 3 канал – 2 дБ, 4 канал – 1,4 дБ, 5 канал – 1,4 дБ. Сплиттер представлен на рисунке 4.

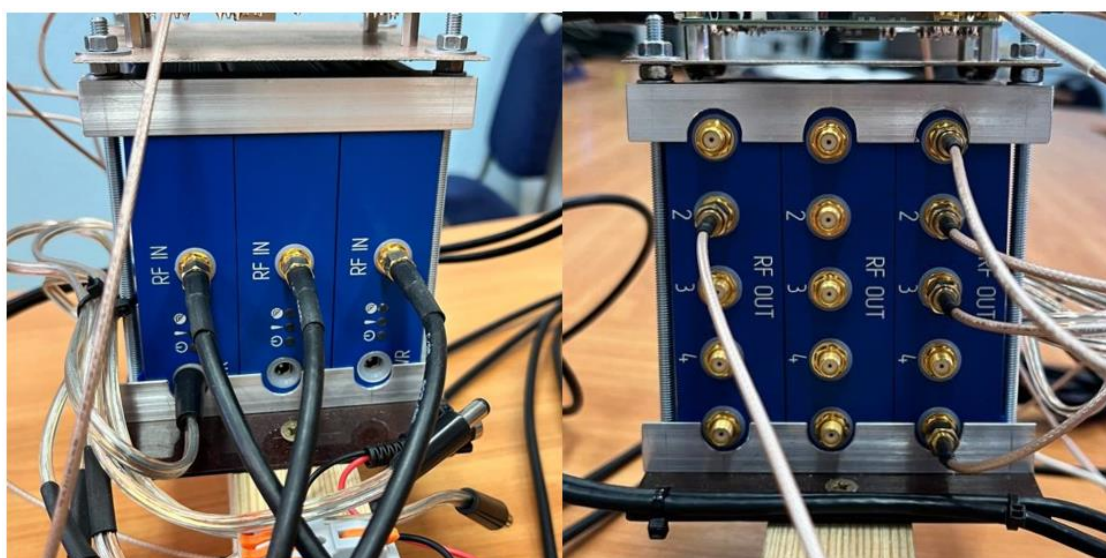


Рисунок 4 – Сплиттер SPL15-465X5 (вид спереди, сзади)

К отладочной плате по USB кабелю подключен ноутбук, на котором находится программная часть аппаратно-программного модуля по измерению полного электронного содержания в ионосфере.

Конструкция аппаратной части аппаратно-программного модуля измерения полного электронного содержания в ионосфере представлена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Конструкция аппаратной части аппаратно-программного модуля измерения полного электронного содержания в ионосфере

Элементы аппаратной части установлены и закреплены на деревянном бруске длиной 2,5 метра. На одном конце бруса закреплён фанерный лист, имеющий форму треугольника, на углах которого закреплены три ГНСС-антенны (используется одна). На противоположной стороне бруса установлены 3 сплиттера SPL15-465X5 (задействован один) и две отладочные платы NT1068.2, расположенные друг над другом на специальных ножках (используется одна отладочная плата). ГНСС-антенна HX-CSX608A подключена к сплиттеру SPL15 - 465X5 при помощи SMA-кабеля, проложенного вдоль бруса и закреплённого хомутами. Показанные на рисунках избыточные аппаратные части модуля (две ГНСС-антенны, сплиттеры) могут быть использованы для дальнейшего развития модуля путем организации многоканального приема сигналов.

Программная часть аппаратно-программного модуля измерения полного электронного содержания состоит из трёх компонентов: два программных компонента, предоставленных производителем отладочной платы (NT1068.22 CE 1.9.1 C, Sampler_NT1068.2) и специализированного программного компонента по обработке сигналов ГНСС и оценке ПЭС, написанного на языке программирования Python.

Программное обеспечение NT1068.22 CE 1.9.1 C выполняет задачи низкоуровневой конфигурации отладочной платы. Она позволяет считывать текущее состояние всех регистров чипа, записывать в них новые значения, загружать конфигурационные файлы, например, файл с рекомендованными значениями или примеры конфигураций, а также сохранять текущие настройки в файл. Через этот GUI предоставляется возможность управления режимами работы синтезаторов частоты («PLL A» и «PLL B»), выбирать частотные диапазоны для каждого канала, настраивать полосу пропускания фильтра ПЧ, переключать режимы усиления на ручной или автоматический AGC для RF и IF каскадов, задавать тип выходного интерфейса, такой как аналоговый дифференциальный или 2-битный АЦП с CMOS/LVDS. Программное обеспечение позволяет контролировать статус чипа: считывать ID отладочной платы, температуру, показатели блокировки PLL, уровень напряжения питания и индикаторы АОК. Важной особенностью является возможность программного сброса чипа. Интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 6.

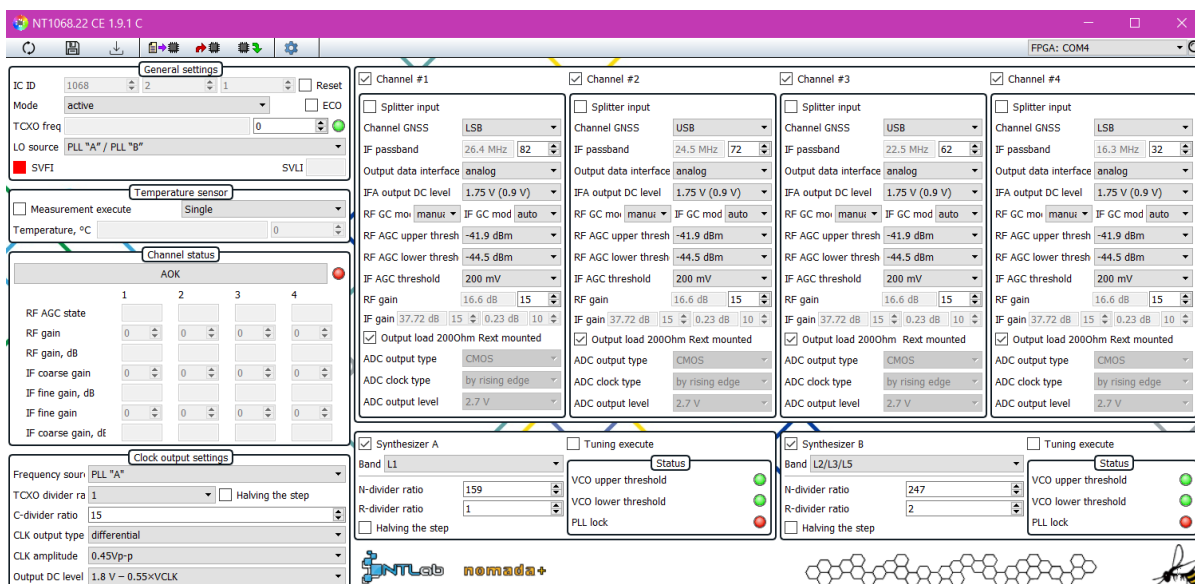


Рисунок 6 – Интерфейс программного обеспечения NT1068.22 CE 1.9.1 C

Программный компонент Sampler NT1068.2 используется приёма и первичной обработки цифрового потока, поступающего с платы через интерфейс USB 3.0. Основными задачами этого компонента являются установка соединения с платой, идентификация чипа, запуск и остановка потока данных, отображение скорости выборок. В реальном времени программа позволяет вычислять заполнение АЦП и строить спектр сигнала для каждого из четырёх каналов с возможностью настройки пропуска кадров и усреднения. Для расширенного использования программное обеспечение Sampler NT1068.2 поддерживает потоковую передачу данных по протоколу TCP. Внешний вид интерфейса данного компонента представлен на рисунке 7.

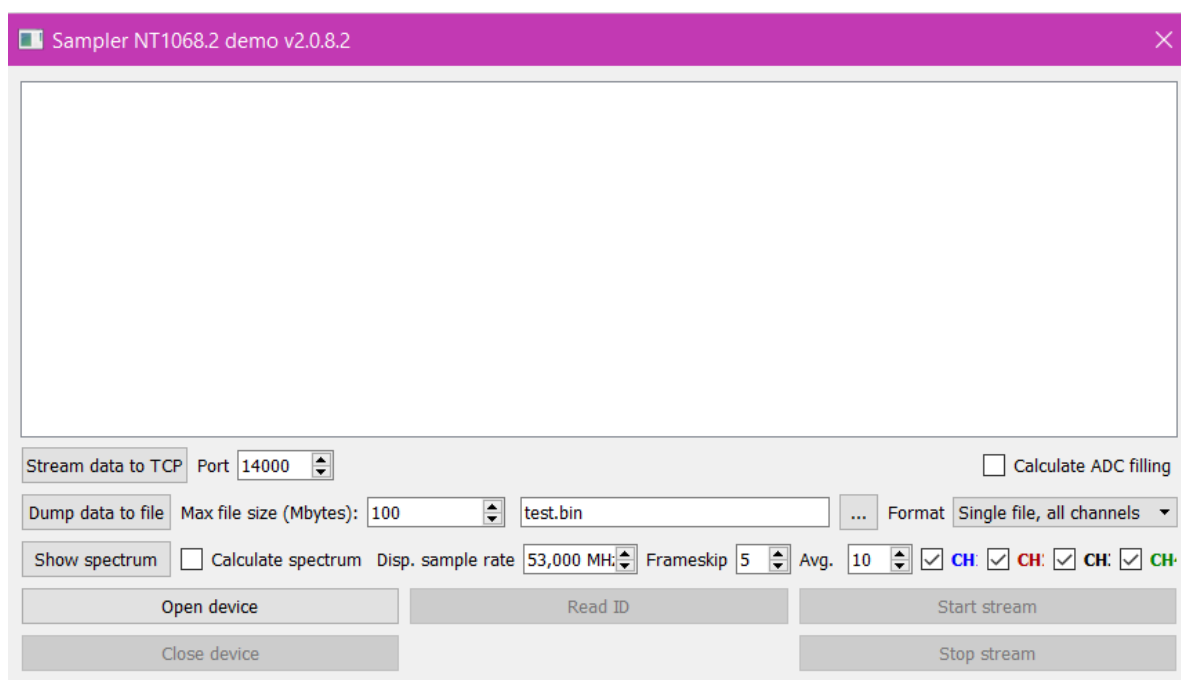


Рисунок 7 – Интерфейс ПО от производителя Sampler NT1068.2

Специализированный программный компонент по обработке сигналов ГНСС и оценке ПЭС на трассах распространения в ионосфере предназначен для:

- получения бортовых эфемерид НКА формата RINEX от прикладных потребительских центров ГНСС;
- получения глобальных ионосферных карт (*GIM*), содержащих данные о вертикальном ПЭС с шагом 2,5° по широте и 5° по долготе от исследовательских центров (*IGS*, *NASA*);
- получения дифференциальных кодовых задержек (*IGS*);
- вычисление координат НКА и отображения их на карте, вычисления дальности и радиальной скорости между НКА и точкой расположения модуля, определение факта видимости НКА и модуля;
- получения массивов отсчетов сигналов по 4-м приемным каналам от аппаратной части модуля;

внутрипериодную обработку (ВПО) принятых сигналов по видимым НКА и на всех видах модуляции методом быстрой свертки;
 обнаружения сигналов на выходе ВПО, оценку отношения сигнал/шум (SNR) и оценивание времен задержек сигналов в каждом периоде повторения;
 оценивание ПЭС с учетом дифференциальных кодовых задержек с устранением аномальных измерений по всем возможным парам сигналов на двух частотах.

На рисунке 9 представлен интерфейс специализированного программного обеспечения по обработке сигналов ГНСС и оценке полного электронного содержания в ионосфере.

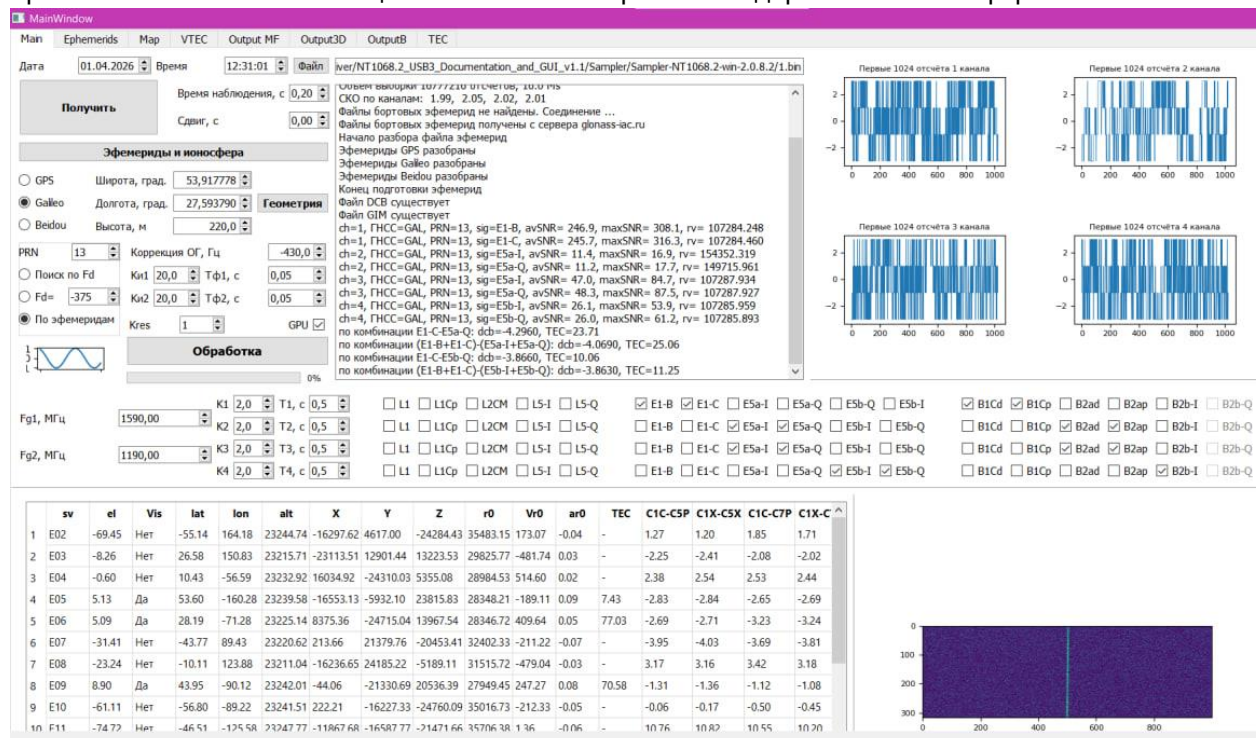


Рисунок 8 – интерфейс специализированного программного обеспечения по обработке сигналов ГНСС и оценке полного электронного содержания в ионосфере

Блок ввода настроек предназначен для ввода параметров, таких как загрузка дампованного файла с данными полученных сигналов и последующей настройкой времени наблюдения. Кнопка «эфемериды и ионосфера» служит для загрузки бортовых эфемерид, глобальной ионосферной карты и дифференциальных кодовых задержек из внешних ресурсов. После завершения загрузки бортовых эфемерид, глобальной ионосферной карты и дифференциальных кодовых задержек, данные отобразятся в табличном виде в нижней левой области интерфейса программы.

Список использованных источников:

1. Ерухимов, Л.М. Ионосфера Земли как космическая плазменная лаборатория / Л.М. Ерухимов // Соросовский Образовательный Журнал. – 1998. – №4. – С. 73–80.
2. Хуторова, О.Г. Зондирование атмосферы и ионосферы радиосигналами спутниковых навигационных систем : учебное пособие / О.Г. Хуторова ; Казанский федеральный университет. – Казань : КФУ, 2011. – 117 с.
3. Куницын, В.Е. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем / В.Е. Куницын, Е.С. Андреева, М.А. Жожарин, И.А. Нестеров // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. – 2005. – №1. – С. 74–79.
4. Куницын, В.Е. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы / В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180. – С. 1–6.
5. Терещенко, Е.Д. Определение полного электронного содержания по сигналам спутников Глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС / Е.Д. Терещенко, А.Н. Милчченко, М.В. Швеи, С.М. Черняков, И.В. Кораблева // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2015. – №1(20). – С. 35–43.
6. Когогин, Д.А. Приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем на базе модуля u-blox ZED-F9P для ионосферных исследований / Д.А. Когогин, А.В. Соколов, И.А. Насыров, В.О. Дементьев, Р.В. Загретдинов // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68, №6. – С. 587–598.
7. Смирнов, В.М. Работы ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН по радиопросвечиванию ионосферы Земли сигналами навигационных спутниковых систем / В.М. Смирнов, Е.В. Смирнова // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №1. – С. 7–15.
8. Гуртнер, В. RINEX: Аппаратнонезависимый формат обмена навигационными данными. Версия 2.11 / В. Гуртнер, Л. Исти ; пер. с англ. В.В. Чукин, Е.А. Кононова. – Санкт-Петербург : РГТМУ, 2008. – 42 с.
9. Алпатов, В.В. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы / В.В. Алпатов, В.Е. Куницын, В.Б. Лапшин, А.А. Романов, С.В. Тасенко // Гелиогеофизические исследования. – 2012. – Вып. 2. – С. 60–71.
10. Марчук, В.Н. Определение электронного содержания ионосферы Земли по данным дальномерных и фазовых измерений / В.Н. Марчук, В.М. Смирнов // Исследовано в России : электронный журнал. – 2001. – №127. – С. 1468–1478.

UDC

HARDWARE-SOFTWARE MODULE FOR MEASURING TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE IONOSPHERE USING GALILEO AND BEIDOU GNSS SIGNALS

Khantsevich R.D., Astapovich G.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Kozlov S.V. – Doctor of Technical Sciences

Annotation. This paper presents the composition and structure of the hardware and software module for measuring the total electron content in the ionosphere, as well as a description of the specialized software developed for processing received signals at two or more frequencies and calculating the total electron content. The results of experimental studies on estimating the total electron content over a single day are presented, along with a comparison of the resulting estimates with data from a global ionospheric map.

Keywords. Global navigation satellite system Galileo, Beidou, full electronic content, ionosphere, NT1068.2 debug board, modulation types, matched filtering, radio tomography, NCA.