

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.027

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СДВ СИГНАЛОВ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАЗНЕСЁННОЙ СИСТЕМЫ ПРИЕМНЫХ ПУНКТОВ

Н.С. Ачкасов, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, Е.Н. Козакова, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

E-mails: nsachkasov@yandex.ru, boris.gavrilov34@gmail.com, ermakvladimir@mail.ru,

katyam98@yandex.ru, poklad@mail.ru, ryakhovskiy88@yandex.ru

Аннотация

В работе приведен анализ сигналов СДВ диапазона, принятых в ГФО «Михнево» ИДГ РАН во время вспышек на Солнце 10.05.2022. На основе этого анализа были определены минимальные требования к создаваемой аппаратуре приема сигналов СДВ диапазона для создания пространственно-распределенной сети регистрационных пунктов. Рассмотрены основные характеристики разрабатываемой аппаратуры, принципы ее построения, перспективы увеличения количества приемных пунктов.

Введение

СДВ радиоволны распространяясь в волноводе Земля-ионосфера несут информацию о состоянии верхней стенки волновода. В дневное время верхней стенкой волновода является D-слой ионосферы. В ночное время высота отражения радиоволн СДВ диапазона увеличивается и достигает E-слоя ионосферы. Возмущения верхней стенки волновода связанные с гелио-геофизическими событиями, такими как прохождение солнечного терминатора по трассе распространения сигнала, солнечными рентгеновскими вспышками, высыпаниями заряженных частиц и др. оказывают существенное влияние на параметры принимаемых СДВ сигналов. В ГФО «Михнево» ИДГ РАН с 2014 г. ведется мониторинг сигналов СДВ диапазона с использованием в качестве сенсоров магнитометров MFS-07 немецкой фирмы «Metronix». Для записи сигналов используется 24-битный логгер ADU-07e этой же фирмы. В [Гаврилов и др., 2019] была предложена методика восстановления параметров D-слоя ионосферы во время Солнечных рентгеновских вспышек в рамках двухпараметрической модели Фергюссона-Уайта [Wait, 1964; Ferguson, 1995] на двух близкорасположенных трассах. Переход от измерений в одной точке к пространственно-распределенной системе позволит получить качественно новые результаты, а именно – локализацию ионосферных возмущений.

Для создания такой системы регистрации сигналов в ОНЧ диапазоне необходимо иметь комплекты измерительного оборудования с одинаковыми характеристиками. Аппаратура используемая в ГФО «Михнево» является уникальной и достаточно дорогой, что не позволяет использовать ее в такой системе. В данной работе мы приводим пример создания такой аппаратуры на основе общедоступных компонентов.

Экспериментальные результаты и обработка данных

На рис. 1 приведен суточный ход амплитуды сигналов 5 европейских передатчиков и поток рентгеновского излучения по данным спутника GOES. На записях рентгеновского потока спутника GOES примерно в 14 часов UT мы наблюдаем Солнечную рентгеновскую вспышку класса X2. Вариации амплитуды сигналов СДВ передатчиков составляют единицы децибел относительно пикотеслы. Передатчик DHO с 7 до 8 часов UT был выключен и мы можем видеть уровень природных шумов на этой частоте. Он составляет примерно -23 дБ(пТ). При этом его амплитуда на утреннем и вечернем терминаторах (1 час и 20 часов UT) достигает почти 25 дБ(пТ). Таким образом, для уверенной регистрации как слабых передатчиков, сигнал которых на уровне шумов, так и сильных типа DHO нам надо иметь динамический диапазон приемного тракта не менее 60 дБ. Если учесть, что в ГФО «Михнево» мы имеем крайне низкий уровень промышленных шумов, а именно сигналов на частоте 50 Гц и ее гармоник, то динамический диапазон должен быть больше. Но в целом, 16-и битные АЦП должны удовлетворять условиям уверенной регистрации сигналов СДВ передатчиков.

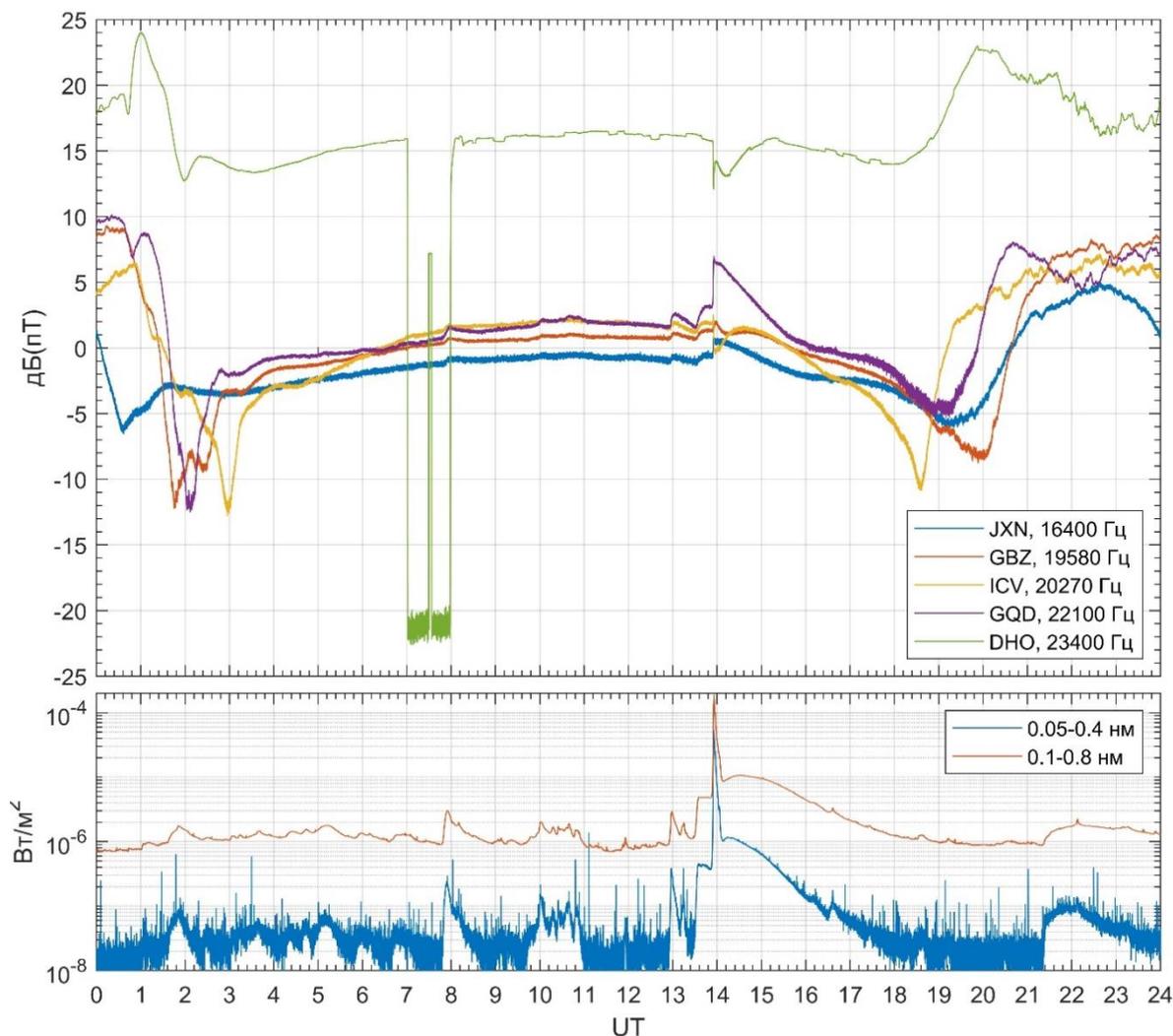


Рисунок 1. Амплитуда Европейских СДВ передатчиков, принятых в ГФО «Михнево» (верхняя панель) и поток рентгеновского излучения по данным спутника GOES в двух спектральных диапазонах.

На рис. 2 приведены суточные вариации фазы СДВ передатчиков. В 14 часов UT мы видим реакцию фазовых характеристик принимаемых сигналов на Солнечную рентгеновскую вспышку. Вариации фазы составляют 0.5-1 радиан. Суточные вариации фазы лежат в диапазоне порядка 3-х радиан. Для уверенной записи вариаций фазы можно оценить точность измерения фазы как 0.05 радиана. Это соответствует 0.008 периода. Для частоты 20 кГц это эквивалентно временной погрешности 0.4 мкс. Временная привязка с помощью глобальных навигационных систем имеют примерно на порядок лучшую точность.

Таким образом, опытный образец аппаратуры для регистрации СДВ сигналов можно строить на базе 16-и разрядных АЦП и обеспечивать временные привязки и стабилизацию частоты оцифровки сигналов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Фундаментальный принцип построения систем сбора данных – это модульность, обеспечивающая гибкость при построении систем. Это могут быть как отдельные модули, так и модули, объединённые в блок. В состав измерительного комплекса электромагнитных сигналов ОНЧ диапазона выходят следующие компоненты, представленные на рисунке 3:

1. аппаратно-программный блок (АПБ),
2. блок синхронизации опорной частоты (БСОЧ),
3. блок инициализации события старта (БИСС),
4. датчики магнитного поля.

Для оцифровки данных с датчиков используется 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) модели E-502 от отечественной фирмы L-card входящий в состав АПБ. Основные характеристики этого АЦП представлены в таблице 1. Выбор данного АЦП был обоснован двумя факторами:

1. Возможностью подключения внешнего источника опорной частоты, что позволяет обеспечить синхронность измерений и временную стабильность частоты измерений.

2. Способностью инициировать события старта по внешнему источнику, обеспечивая привязку времени начала события к мировому времени (UTC).

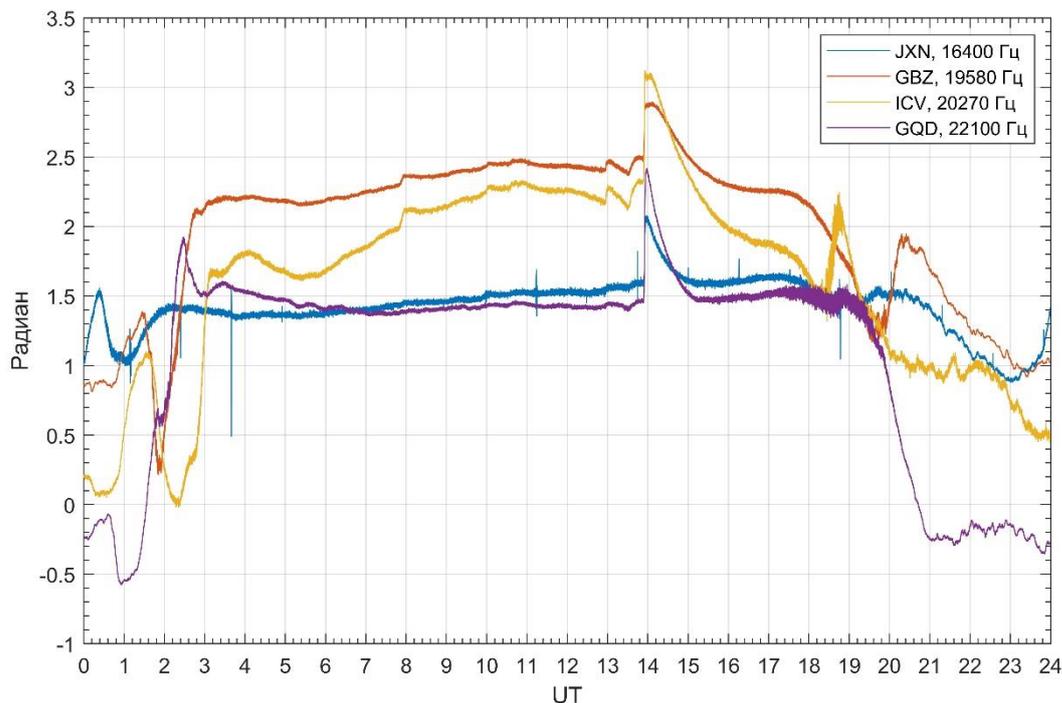


Рисунок 2. Суточные вариации фазы СДВ передатчиков, принятых в ГФО «Михнево».

Таблица 1. Характеристики АЦП L-Card E-502.

Входное напряжение питания:	8-30 В
Разрядность:	16 Бит
Частота дискретизации:	2 МГц
Интерфейс подключения:	USB / Ethernet RJ-45
Разъёмы:	Analog/Digital-DRB-37M/DRB-37F
Частота внешнего опорного источника	1,5 МГц

Было написано программное обеспечение (ПО) в программной среде LabView для ПЭВМ из состава АПБ. Оператором на ПЭВМ задаются следующие параметры: время события (T_{start} , T_{stop}), источник опорной частоты, источник события старта, количество опрашиваемых каналов, частота сбора на канал, номер опрашиваемого канала и диапазон. Управление АЦП можно осуществлять через кабель витую пару (не больше 100 метров), через USB кабель, либо же использовать волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС), дополнительно оснащённую медиа конверторами.

В состав БСОЧ входит дисциплинатор Mini Precision GPS Reference Clock Британской фирмы Leo Bodnar Electronics и GPS антенна с магнитным основанием. Устройство Mini Precision GPS Reference Clock выдает опорный тактовый сигнал с низким джиттером. Долговременная стабильность выходного сигнала определяется высокой точностью сигналов ГНСС (GPS, ГЛОНАС) и приближается к 1×10^{-12} . Цифровая фазовая автоподстройка частоты (PLL) позволяет получать выходной опорный сигнал в диапазоне от 400 Гц до 810 МГц. Амплитуда выходного сигнала равна 3,3 В при сопротивлении 50 Ом. Все настройки частоты и выхода полностью настраиваются пользователем через USB-соединение с ПК с Windows и сохраняются внутри устройства после отключения от ПК.

БИСС состоит из GPS-приемника Garmin 16x HVS и модуля разработанном в ИДГ РАН. Этот модуль получает данные по текстовому протоколу связи навигационного оборудования NMEA 0183 («National Marine Electronics Association»), для передачи данных используется шина UART. Помимо этого, от спутников ГНСС приходят секундные метки реального времени (PPS), данный модуль с помощью логических элементов и

микроконтроллера выводит каждую шестидесятую секундную метку реального времени являющейся минутной меткой реального времени (PPM).



Рисунок 3. Блок-схема макета аппаратуры для регистрации сигналов СДВ диапазона.

Заключение

На основе анализа сигналов СДВ диапазона, принятых в ГФО «Михнево», были определены требования к разрабатываемому макету аппаратуры. Представленный макет модульной системы измерения позволяет регистрировать электромагнитное поле в ОНЧ диапазоне естественного и антропогенного происхождения с точностью временных привязок ГНСС, которые на порядок лучших минимального требования. Разворачиваемая сеть приемных пунктов позволиткратно улучшить пространственное разрешение при восстановлении параметров ионосферы.

Работа выполнена по государственному заданию 122032900175-6.

Литература

- Гаврилов Б.Г., Ермак В.М., Поклад Ю.В, Ряховский И.А. Оценка параметров среднеширотной нижней ионосферы, вызванных солнечной вспышкой 10 сентября 2017 года // Геомагнетизм и аэронавигация. 2019. Т. 59. № 5. С. 628-634.
- Ferguson J.A. Ionospheric model validation at VLF and LF // Radio Sci. 1995. V. 30. N 3. P. 775–782.
- Wait J.R. and Spies K.P. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, NBS Tech. Note 300, 1964.