

УДК: 621.396 + 550.388

DOI: 10.26907/rwp29.2025.187-190

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПЕРЕДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ИОНОЗОНДА «ЦИКЛОН»

А.С. Сафиуллин, А.Д. Акчурин

Казанский федеральный университет, 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, 18

E-mail: Adel.Akchurin@kpfu.ru

Аннотация. В работе представлены первичные результаты первичных полевых испытаний модернизированной передающей части коротко-импульсного ионозонда КФУ «Циклон». В модернизированном передатчике реализована новая схема раскачки выходного лампового каскада, где в качестве ключевых элементов использованы карбидокремниевые транзисторы. Приведены результаты сопоставления отраженных сигналов, излучаемых новым и базовым (3-х ламповым) передатчиками. На основе полученных данных показано преимущество модернизированного варианта передатчика. Благодаря более гибким возможностям нового передатчика в длительности излучения дополнительно проведен эксперимент по изучению зависимости амплитуды отражённых сигналов от длительности излучённого радиоимпульса. Обнаружен непрерывный рост амплитуды отраженного сигнала в диапазоне от 33 до 72 мкс, не объяснимый полностью особенностями полосового кварцевого фильтра радиоприёмника «Катран».

Ключевые слова: слой F средномасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения (СМ ПИВ); вертикальное зондирование; ионозонд, карбидокремниевый транзистор.

MODERNIZATION OF THE TRANSMITTING UNIT OF THE "CYCLONE" IONOSONDE

A.S. Safiullin, A.D. Akchurin

Abstract. This paper presents preliminary results from initial field tests of the upgraded transmitter unit in the KFU "Cyclone" short-pulse ionosonde. The modernized transmitter implements a new driver circuit for the output tube stage, utilizing silicon carbide (SiC) transistors as switching elements. The study provides a comparative analysis of reflected signals emitted by the new transmitter and the legacy three-tube version. The experimental data demonstrate the superior performance of the upgraded transmitter. Owing to the enhanced flexibility in pulse duration control offered by the new transmitter, an additional experiment was conducted to investigate the relationship between the amplitude of reflected signals and the duration of emitted radio pulses. The results revealed a continuous increase in reflected signal amplitude within the 33–72 μ s pulse duration range, which cannot be fully explained by the characteristics of the "Katran" radio receiver's bandpass quartz filter.

Keywords: F layer; medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs); vertical sounding; ionosonde; silicon carbide field-effect transistor.

Введение

Одной из задач наблюдения F-слоя является исследование перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), и их среднеширотных и средномасштабных разновидностей (СМ ПИВ). Изучение данных ионосферных феноменов предполагает увеличение частоты (регулярности) зондирования, для чего подходит вертикальный коротко-импульсный метод, обеспечивающий достаточную информативность при сравнительно низкой мощности излучения. Этот метод без сложной обработки сигнала требует излучения импульсов порядка 40 мкс, что обеспечивает высотное разрешение приблизительно 6 км. Уровень излучаемой мощности лимитируется необходимостью применения дорогостоящих компонентов и усложнением схемы, что в свою очередь ухудшает эксплуатационные характеристики излучающего устройства. Однако для преодоления отражённым сигналом уровня шума на различных частотах необходима мощность излучения в диапазоне от 1 до 5 кВт. Ранее нами сообщалось о проведении работ по разработке новой схемы усилителя мощности для модернизации базового (3-лампового в двух последних каскадах) излучающего устройства ионозонда «Циклон» [1]. Разрабатываемая схема основана на карбидокремниевых транзисторах в предпоследнем выходном каскаде, и новой элементной базе [2]. На основе предыдущих разработок был создан опытный образец передатчика, готового к полевым испытаниям и интеграции с остальной частью ионозонда. В данной работе проведены сравнительные эксперименты с модернизированным и базовым (предыдущим)

передатчиками. Методика первого этапа испытаний состояла в чередующемся подключении нового и базового передатчиков к антенной системе на фиксированной длине импульса, равной максимальной длительности базового передатчика (33 мкс), и в сравнении амплитудно-частотных характеристик отраженных сигналов. На следующем этапе проверки работоспособности нового передатчика дополнительно исследована зависимость амплитуды отклика от длительности излучаемого импульса в диапазоне 33–72 мкс.

Сравнение излучающих устройств

Для оценки эффективности модернизированного передатчика проведено сопоставление ионограмм, полученных с использованием базового (предыдущего) и нового излучающих устройств. Ключевым параметром сравнения служила амплитуда следа F-слоя. Передатчики последовательно сменялись каждые 10–15 минут без изменения других компонентов системы (антенна, приёмник, ПО). Короткий временной промежуток позволяет ослабить влияние изменения ионосферы и интерференционные последствия наложения отражений магнито-ионных мод. Ионозонд работал в режиме вертикального зондирования со следующими параметрами: частотный диапазон — 1.5–9 МГц, интервал между зондированиями — 1 минута; измерения проводились 27 апреля 2025 г. в период с 18:00 до 20:11 по московскому времени (UTC+3). Проведено 4 серии поочередной замены устройств. Каждая серия включала ~10 измерений. После цифровой обработки каждой ионограммы определялись пиковые значения амплитуды в частотном диапазоне для F слоя. Результаты усреднялись по всем измерениям в рамках одной серии для устранения случайных флуктуаций. На рисунке 1 представлены усреднённые амплитудные характеристики для одной из серий. Анализ данных выявил устойчивое превышение амплитуды сигнала при работе с модернизированным излучателем (примерно в 1.5 раза по показаниям АЦП для всех 4-х серий). На рисунке 2 представлены необработанные ионограммы, полученные в ходе эксперимента, которые демонстрируют улучшение амплитуды отраженного сигнала при использовании модернизированного передатчика.

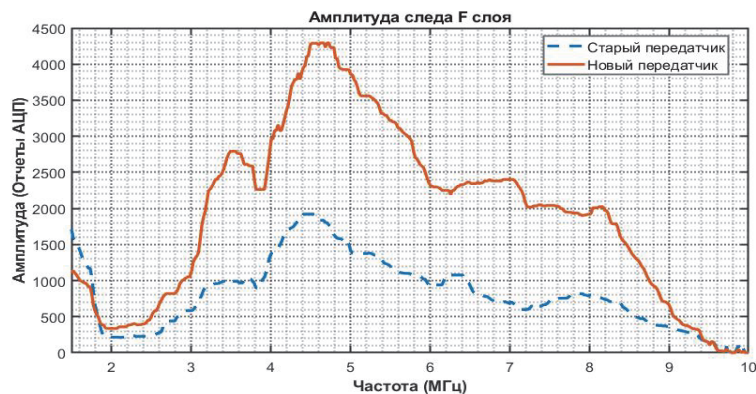


Рис. 1. Частотная зависимость отраженного ионосферой сигнала, излученного старым и новым передатчиками

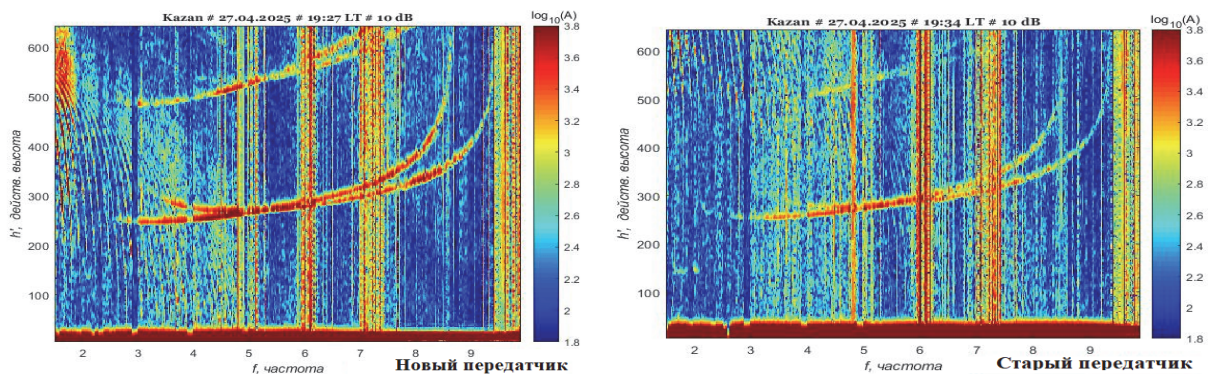


Рис. 2. Исходные ионограммы полученные при излучении модернизированным (слева), и старым (справа) передатчиками

Влияние длительности излученного импульса на амплитуду отраженного сигнала

Длительность излучаемого импульса регулируется управляющим устройством (компьютером) [3] и схемой стробирования усилительных каскадов передатчика. Схема стробирования обеспечивает синхронизацию работы усилительных каскадов, задавая задержку между сигналом управления и началом излучения. В устаревшей версии передатчика максимальная длительность излученного импульса составляла 33 мкс с учётом более позднего разрешения (~80 мкс) для включения последних ламповых каскадов по отношению к начальным транзисторным каскадам. Данное значение исторически определялось требованиями к высотному разрешению и импульсным характеристикам приемного фильтра. В старом передатчике схема стробирования реализована на микросхемах ТТЛ серии (K155, K555), что исключает возможность оперативной перенастройки параметров. На новом передающем устройстве схема стробирования реализована на микросхеме ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема), которая обеспечивает меньшую задержку импульса разрешения выходных каскадов, что позволило регулировать длительности импульса в диапазоне 33–72 мкс. В ходе подстройки длины импульса на новом передатчике ожидалось лишь подтверждение работы полосового фильтра радиоприемного устройства «Катран». Основная фильтрация сигнала реализована посредством полосового фильтра ФП2П1-457, работающего на первой промежуточной частоте (ПЧ) 34.785 МГц. Согласно технической документации, фильтр обеспечивает полосу пропускания 45 кГц. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) фильтра не указана в технической документации. По этой причине принято допущение о ее соответствии АЧХ полосового фильтра фильтру Баттерворта 2-го порядка. На основе выбранной модели выполнено построение огибающей импульса, прошедшего через фильтр. Полученная кривая (рис. 3) демонстрирует теоретическую зависимость амплитуды сигнала от длительности импульса. Согласно модели, при длительностях свыше 30 мкс амплитуда должна достигать насыщения («плато»), прекращая рост при дальнейшем увеличении длительности. Однако экспериментальные данные, продемонстрированные на рисунке 4, показывают непрерывный рост амплитуды отраженного сигнала. В эксперименте длина импульса изменялась с шагом в 10 мкс каждое измерение, в диапазоне 33-72 мкс.

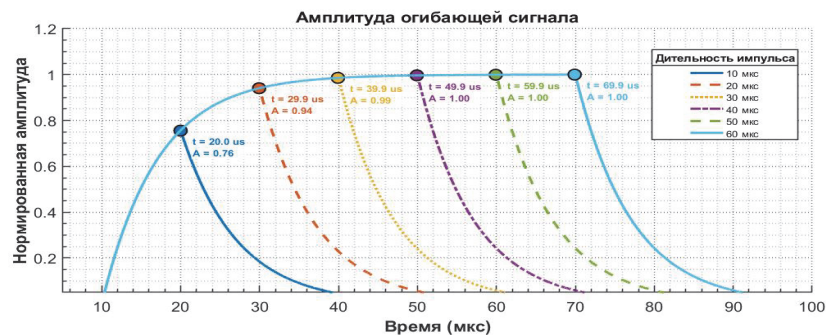


Рис. 3. Смоделированная огибающая сигнала прямоугольной формы, прошедшего через полосовой фильтр, разной длительности

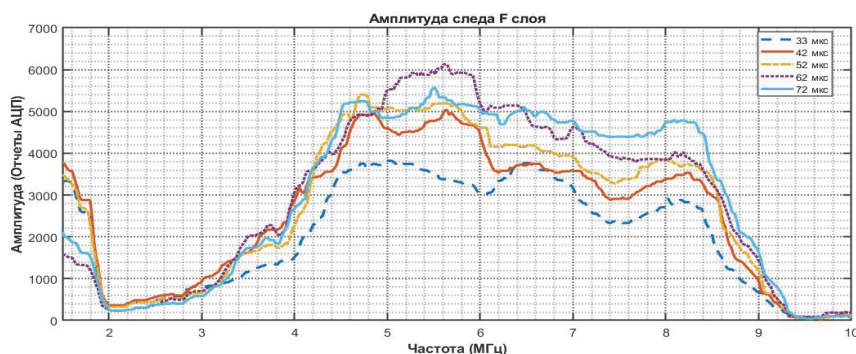


Рис. 4. Частотная зависимость отраженного ионосферой сигнала, излученного новым передатчиком на разных длительностях импульса

Ионозонд работал в режиме вертикального зондирования со следующими параметрами: частотный диапазон — 1.5–9 МГц, интервал между зондированиями — 1 минута; измерения проводились 27 апреля 2025 г. в период с 15:53 до 17:10 по московскому времени (UTC+3). После цифровой обработки каждой ионограммы определялись пиковые значения амплитуды в частотном диапазоне для F слоя. Результаты усреднялись по всем измерениям в рамках одной длительности излученного импульса для устранения случайных флуктуаций и влияния интерференционных биений отражений магнито-ионных мод при их наложении на частотах ~ 5.5 МГц и показаны на рис. 2. Из рисунка видно, что рост амплитуды не прекратился при излучении импульсов с длительностью более 40 мкс, что может объясняться нелинейными эффектами в дневной ионосфере. Данный эффект может быть полезен для зондирования в дневное время суток, когда уменьшающаяся амплитуда отраженного сигнала может быть увеличена путём удлинения излученного импульса с некоторой потерей в высотном разрешении. Правда нельзя исключать, что наблюдаемые противоречия обусловлены неточностью принятой модели АЧХ фильтра. Для чего необходимы новые проверки зависимости амплитуды отраженного импульса от длительности излученного импульса и в полевых условиях с излученным импульсом, и в лабораторных условиях с сигналами тестового генератора в более широком диапазоне длительностей.

Заключение

Проведены первичные полевые испытания модернизированной передающей части коротко-импульсного ионозонда КФУ «Циклон». Продемонстрировано, что новый передатчик работает на большем диапазоне импульсов (имеет более гибкую настройку длины излучаемого импульса) благодаря новой элементной базе. При одинаковой длине излученных импульсов новый передатчик обеспечивает большую амплитуду принятого сигнала (примерно в 1.5 раза) по сравнению со старым передатчиком. Дополнительно проведен эксперимент по изучению зависимости амплитуды отраженных сигналов от длительности излученного радиоимпульса. Обнаружен непрерывный рост амплитуды отраженного сигнала в диапазоне от 33 до 72 мкс, необъяснимый полностью особенностями полосового кварцевого фильтра радиоприёмника «Катран», что, возможно, объясняется нелинейными эффектами в дневной ионосфере, однако требуются дополнительные исследования для разных сезонов и времён суток.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Список литературы

1. Акчурин А.Д., Юсупов К.М., Шерстюков О.Н., Ильдиряков В.Р. Выделение быстротекущих и мелкомасштабных неоднородностей на одноминутных ионограммах ионозонда Циклон // Гелиогеофизические исследования. 2013. – Вып. 4. – С. 101–110.
2. Сафиуллин А., Акчурин А., Хасанов Д. Усилитель мощности для коротко-импульсного ионозонда // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP). – 2019. – С. 357–360. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810194.
3. Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Система управления ионозонда «ЦИКЛОН» // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2010. – № 108. – С. 49–56.