

Результаты работ по расширению функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» ионосферной сети ФГБУ «ИПГ»

С.В. Литвинов¹, Е.А. Паньшин¹

¹ФГБУ «ИПГ», г. Москва

Приводится краткое описание ионозонда «Парус-А», применяемого на ионосферной сети ФГБУ «ИПГ». Демонстрируется схема размещения их на территории России. Показывается способность этого вертикального ионозонда проводить также наклонное радиозондирование ионосферы. Демонстрируются результаты экспериментального наклонного зондирования по различным трассам. Анализируются полученные данные применительно к использованию в системе загоризонтного обнаружения.

A brief description of the ionosonde "Parus-A" used in the IAG ionosphere control system is given. The scheme of placing them on the territory of Russia is shown. The ability of this vertical ionosonde to also perform inclined radio sounding of the ionosphere is shown. The results of experimental inclined sounding on various routes are demonstrated. The obtained data are analyzed for use in the system of over-the-horizon detection.

Введение

Исследованиям ионосферы всегда уделялось, и особенно на современном этапе, уделяется много внимания. Развитие таких радиотехнических систем как системы радионавигации, радиосвязи и загоризонтной радиолокации способствует повышению интереса к таким исследованиям, по той простой причине, что все они используют ионосферу в качестве радиоканала, в котором происходит распространение радиоволн. Более того, можно сказать, что от характеристик радиотехнической аппаратуры и ее функциональных возможностей по определению параметров ионосферы, зависит эффективность работы таких систем.

Так, например, радиолокационные станции загоризонтного обнаружения, использующие в своей работе пространственное распространение радиоволн, зависимы от состояния ионосферы, поскольку в таких РЛС используется эффект отражения дециметровых радиоволн от ионосферы. Для выбора оптимальной частоты излучения необходимо иметь актуальную информацию о параметрах ионосферы. При этом следует учитывать, что она непрерывно изменяется как в течение года, так и в течение суток.

Для эффективной работы ЗГ РЛС важно иметь полученные в реальном масштабе времени характеристики трассы распространения, а также данные о занятости частотного диапазона. Важно также, чтобы параметры внешней среды оптимальным образом согласовались с параметрами РЛС. Для определения текущего состояния параметров ионосферы, таких как высотно-частотная характеристика и профиль электронной концентрации, применяются ионосферные станции вертикального зондирования – ионозонды. В России созданы такие ионозонды, которые возможно успешно применять для выполнения этих задач. [1]

Авторам была предоставлена возможность провести эксперимент по наклонному зондированию ионосферы на аппаратуре ионосферной сети ФГБУ «ИПГ», изначально не предназначенной для проведения наклонного зондирования. Следует также заметить, что используемые антенны имеют диаграмму направленности «вверх», что также не улучшает общую картину.

Технические характеристики ионозонда «Парус-А»

В ионосферной сети государственной наблюдательной сети ФГБУ «ИПГ» применяется ионозонд «Парус-А». [2] Общий вид ионозонда «Парус-А» и типичная ионограмма, полученная им и суточный ход частот показаны на рисунке 1.

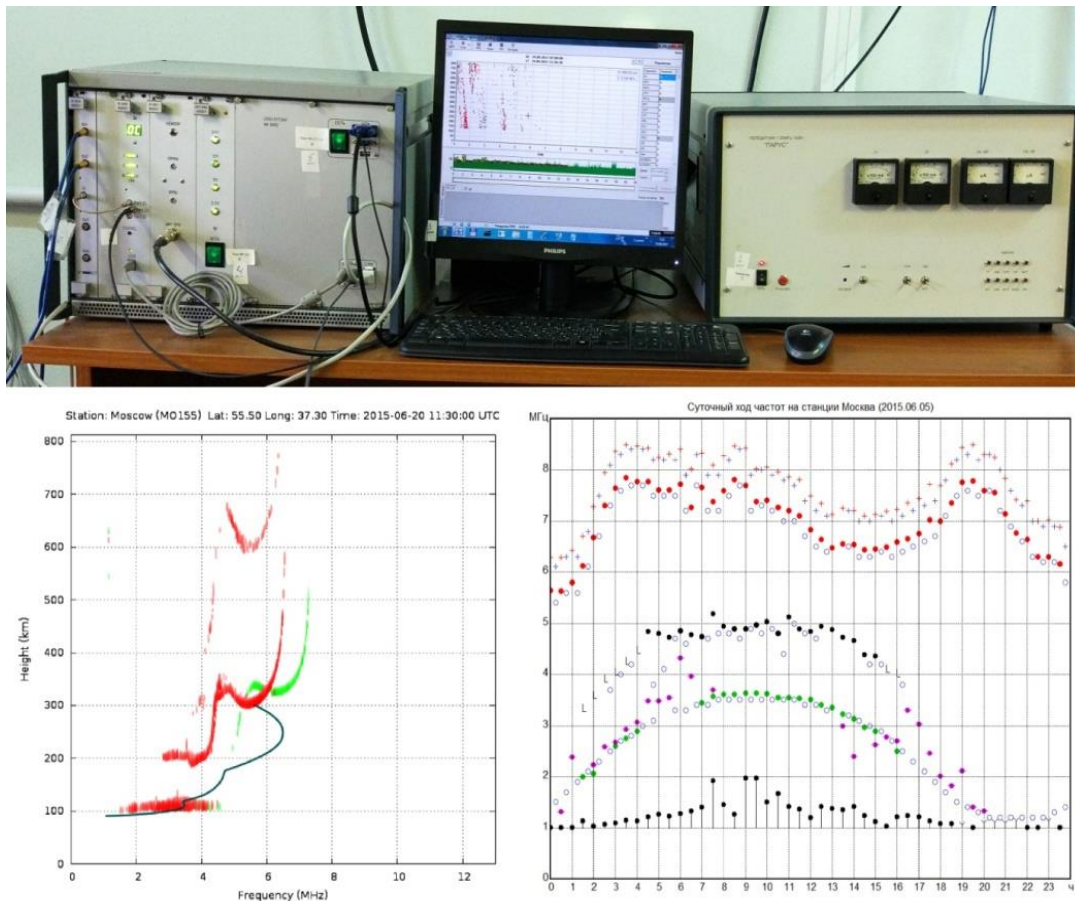


Рис. 1. Общий вид ионозонда «Парус-А», типичная ионограмма и суточный ход частот. Ионозонд «Парус-А» внесен в Госреестр СИ (№ 51425-12) [3].

Основные метрологические характеристики, полученные в результате испытаний и внесенные в описание типа ионозондов «Парус-А», представлены в таблице 1.

Таблица 1. Метрологические характеристики ионозондов «Парус-А»

Метрологические характеристики	Диапазон
Диапазон измерений времени задержки радиоимпульса с частотой заполнения от 1 до 20 МГц, мс	0,5 - 10
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений времени задержки радиоимпульса с частотой заполнения от 1 до 20 МГц, мкс	± 12
Диапазон воспроизводимых частот заполнения радиоимпульса, МГц	1 - 20
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений частоты заполнения радиоимпульса, кГц	± 5
Порог чувствительности РПУ ионозонда, мкВ, не более	0,35
Пределы допускаемой погрешности установки секундных импульсов относительно шкалы времени аппаратуры GPS, мкс	± 1

С данными характеристиками ионозонды утвержденного типа выпускались в течении 5 лет, в соответствии со свидетельством на утвержденный тип, выданный Росстандартом (номер в Госреестре СИ 51425-12).

Ионозонд «Парус-А» изначально не был предназначен для проведения наклонного зондирования, однако заложенный на этапе разработки потенциал позволил его реализовать. Следует также отметить, что используемые антенны имеют диаграмму направленности «вверх», что также не улучшает общую картину. При наклонном зондировании сигнал приходит под углами близкими к нулю, а, следовательно, заметно ослабленными.

Комплексное зондирование ионосферы

Высокоточная привязка шкалы времени ионозонда к шкале СЕВ позволяет нескольким ионозондам, находящимся на дальности до 2000 км осуществлять наклонное зондирование ионосферы. При этом, поскольку собственный передатчик не отключается, следы наклонного зондирования накладываются на следы вертикального отражения (т.н. комплексное зондирование). Пример комплексного зондирования представлен на рисунке 2.

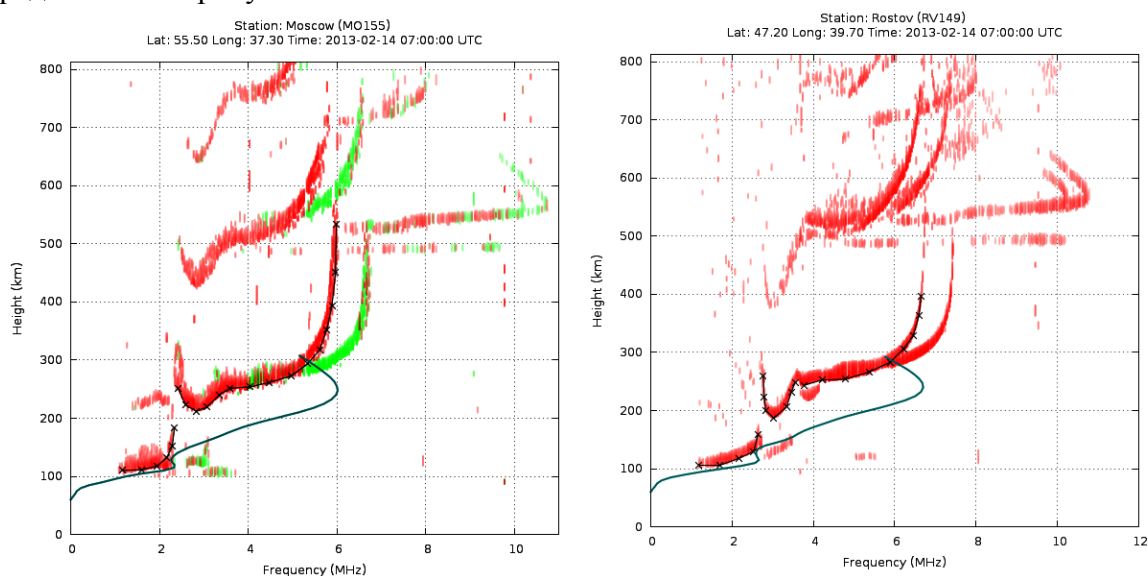


Рис. 2. Данные комплексного (вертикального и наклонного) радиозондирования ионосферы, полученные ионозондами на ст. ИЗМИРАН (слева, поляризационный прием) и Ростов-на-Дону (справа, совмещенная линейная антенна) 14 февраля 2013 г 07:00 UT.

На рисунке кроме ионограммы вертикального зондирования, присутствуют также т.н. «кратники». Такие отражения получаются, когда импульсы проходят от 2 до 3 раз (а иногда и больше) между станцией и ионосферой. Также ионозонд регистрирует кроме обыкновенной составляющей (красная – слева) также и необыкновенную (поляризованную) составляющую (зеленая). Необыкновенная компонента повторяет очертаниями зависимость обыкновенной, сдвиг по частоте обусловлен влиянием геомагнитного поля. [4]

Наиболее интересными на рисунке являются следы начинающиеся на частоте ~6 МГц и находящиеся на высоте 500 км. Это результаты приема сигнала другого ионозонда, а именно: приёмник ионозонда «Парус-А», расположенного в Москве, регистрирует следы передатчика «Парус-А», расположенного в Ростове-на-Дону, и наоборот. Расстояние между ионозондами – 930 км.

Высоты 500 км обуславливается тем, что ионозонд измеряет не высоту напрямую, а задержку сигнала. С учетом угла отражения сигнала от ионосферы (от 140° до 160°) получается реальное расстояние между ионозондами. [5]

Имеющееся количество и географическое расположение ионозондов позволило провести различные эксперименты по наклонному зондированию ионосферы. Размещенные в разных частях России, они отличным образом выделяются в отдельные сектора: в европейской части, в Сибири и на Дальнем Востоке (рисунок 3).

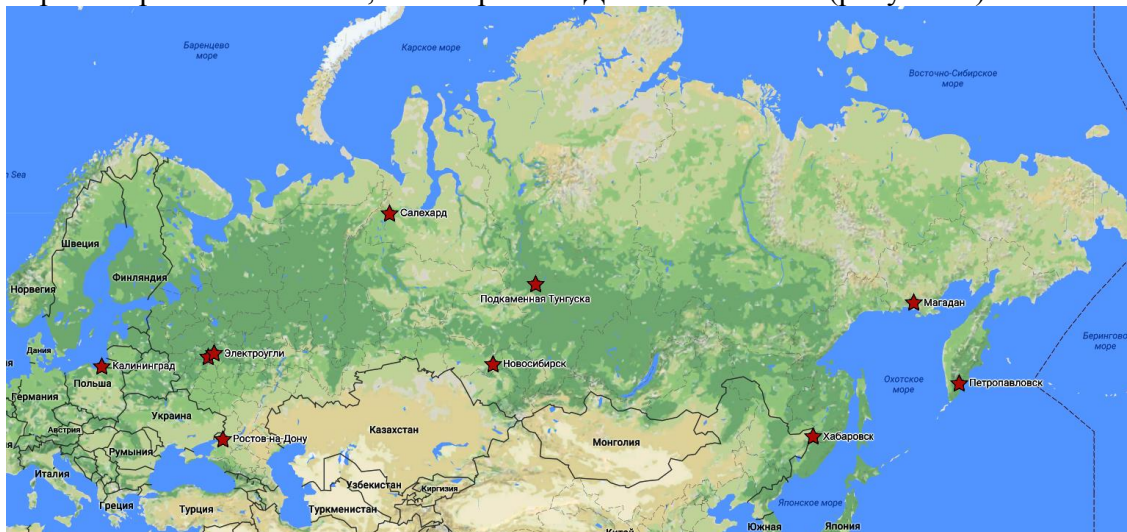


Рис. 3. Расположение ионозондов «Парус-А».

Пример комплексного зондирования по трассе Москва – Калининград приведен на рисунке 5. Расстояние между ионозондами - 952 км. На такой дальности наблюдается устойчивый и ярко выраженный прием сигнала. Кроме того следы на высоте ~ 700 км говорят о том, что сигнал пришел также с переотражением от земли. Как видно на рисунке 4, при одновременном зондировании следы, регистрируемые приемниками крайне схожи. Это объясняется тем, что трассы прохождения сигналов одинаковы.

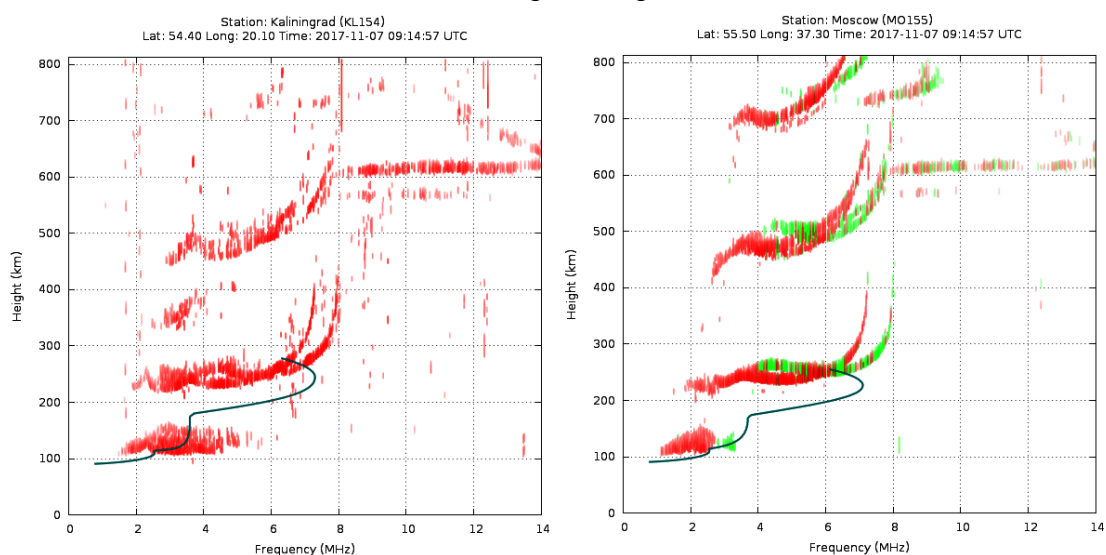


Рис. 4. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Калининград – Москва 17.11.2017 в 14.57 UT.

Успешно проведено наклонное зондирование в Сибири. Однако тут выявились свои особенности. Из-за северного расположения города Салехард, станция, размещенная в этом городе, оказалась чувствительна к нестабильной ионосфере. Кроме того, расстояние до ближайших ионозондов сети приличное для используемого типа антенн. [6]

В результате сложилась следующая ситуация. При наклонном зондировании сигнал на станции в Новосибирске уверенно принимается, в то время как обратного прохождения не наблюдается (рисунок 5). И наоборот, ионозонд в Салехарде отлично принимает сигнал станции из Подкаменной Тунгуски, при этом следы прохождения в обратную сторону не регистрируются (рисунок 6). Расстояние между Салехардом и Новосибирском – 1578 км, между Салехардом и Подкаменной Тунгуской – 1258 км.

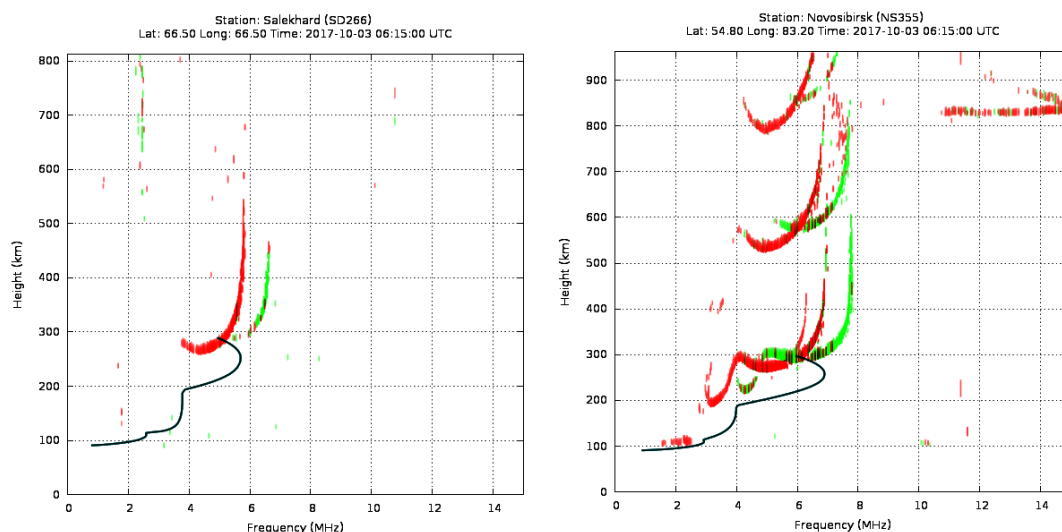


Рис. 5. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Салехард – Новосибирск 03.10.2017 в 06.15 UT.

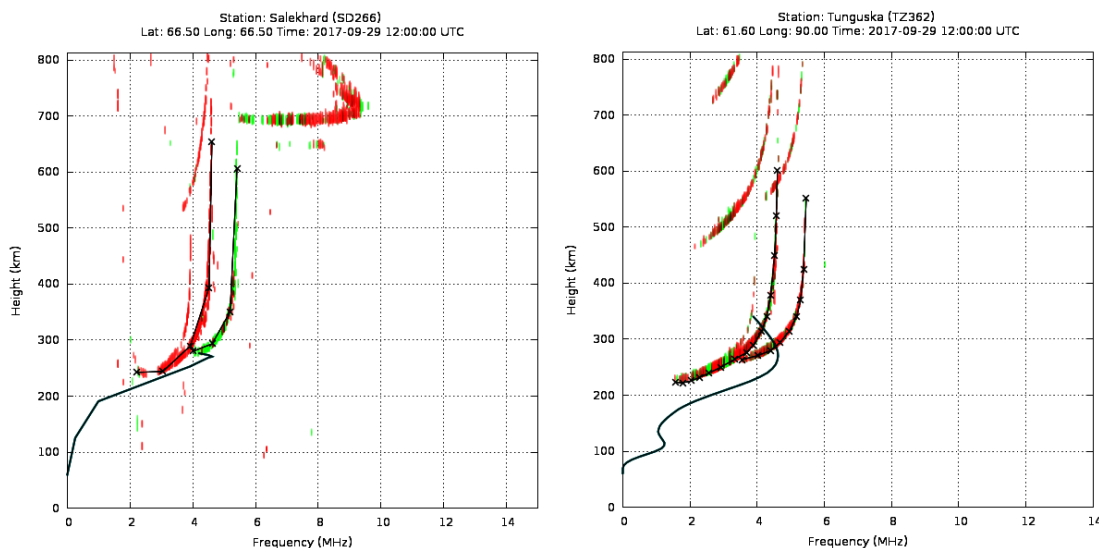


Рис. 6. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Салехард - Подкаменная Тунгуска 29.09.2017 в 12.00 UT.

На ионозонде Подкаменная Тунгуска, размещенном в п. Бор Красноярского края, используются антенны иного типа. Стандартными антеннами для ионозонда «Парус-А» являются «большой и малый ромб» на излучение и «диполь» на прием. В то время как в Подкаменной Тунгуске применяются поляризационные «дельта-антенны» и на излучение и на прием. Диаграмма направленности такой антенны более вертикальна, из-за чего прием сигнала наклонного зондирования получается крайне ослабленный. Это видно на примере наклонного зондирования по трассе Новосибирск – Подкаменная Тунгуска (расстояние – 854 км), приведенного на рисунке 7. По всей видимости, по этой же причине не удалось принять сигнал НЗ из Салехарда, к тому же их разделяет большее расстояние – 1258 км.

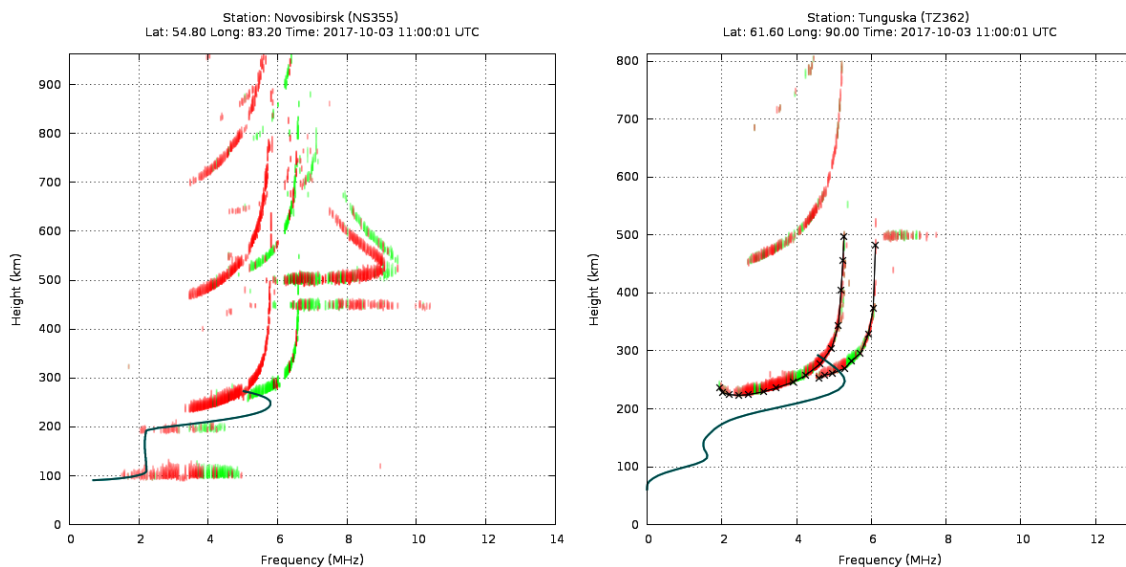


Рис. 7. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Новосибирск – Подкаменная Тунгуска 03.10.2017 в 11.00 UT.

На Дальнем Востоке успешно проведено НЗ между ионозондами в Магадане и Петропавловске-Камчатском, которые разделяет 910 км. Результат работы этих станций по НЗ показан на рисунке 8.

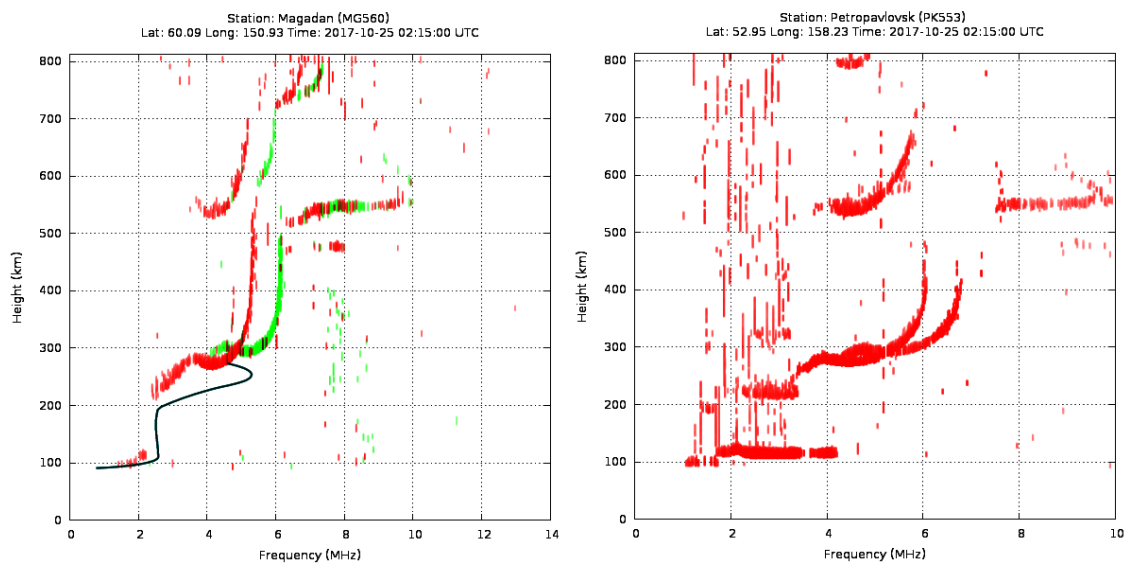


Рис. 8. Данные комплексного зондирования ионосферы по трассе Магадан – Петропавловск-Камчатский 25.10.2017 в 02.15 UT.

Отдельно стоит выделить трассу Москва – Салехард. Практически на предельной дальности (2000 км) и в условиях нестабильной высокоширотной ионосферы над Салехардом удается устойчиво принимать сигналы. Результат такой работы приведен на рисунке 9. Следы на частотах от 10 МГц и на высотах ~1100 км – это следы наклонного зондирования. Из-за сжатия по высоте, ионограмма наклонного зондирования также сжата, однако при увеличении она отлично просматривается.

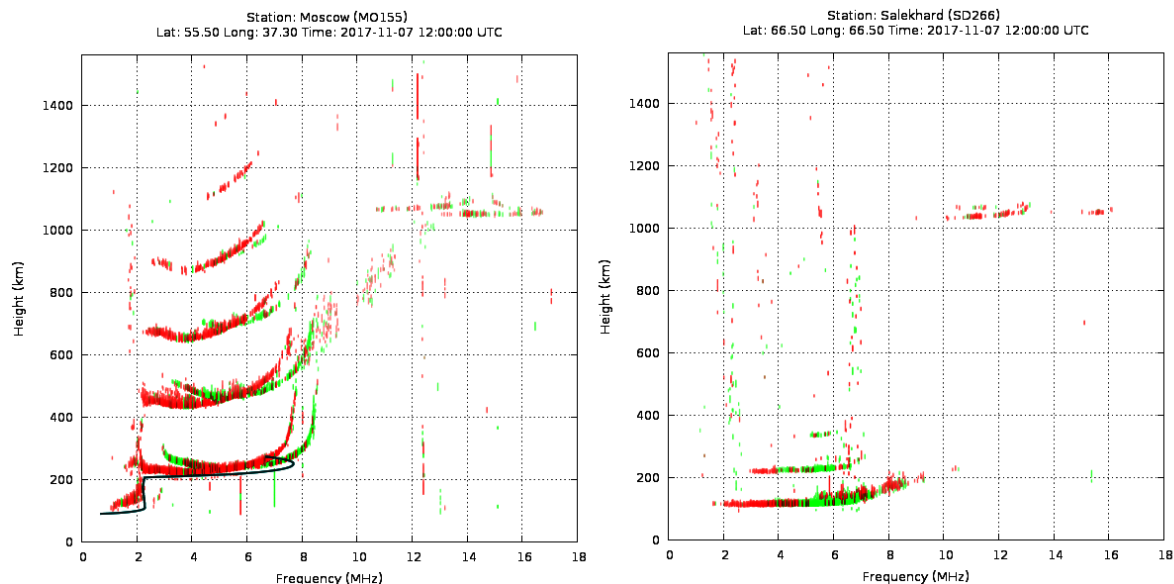


Рис. 9. Наклонное зондирование по трассе Москва – Салехард.

Вывод

Эксперимент показал возможность наклонного зондирования ионосферы на трассах до 2000 км одновременно с вертикальным зондированием на ионозонде «Парус-А».

Применение данных, получаемых от ионозондов, в системе загоризонтной радиолокации позволит улучшить параметры точности определения координат целей.

Литература

1. В.А. Атряхин, С.В. Литвинов, Д.С. Мудрик, А.В. Ребриков «Применение ионозондов как средство улучшения точностных характеристик ЗГ РЛС», «Радиолокация и связь – перспективные технологии» тезисы докладов XV молодежной научно-технической конференции, 2017.
2. Г.В. Гивишвили, И.В. Крашенинников, Л.Н. Лещенко, Ю.М. Власов, А.В. Кузьмин «Ионозонд «ПАРУС-А»: функциональные возможности и перспективы» Гелиофизические Исследования выпуск 4, 68–74, 2013.
3. Минлигареев, В.Т., Паньшин, Е.А., Чурилов, С.Н. Проведение испытаний в целях утверждения типа ионозондов «Парус-А» [Электронный ресурс]/В.Т. Минлигареев, Е.А. Паньшин, С.Н. Чурилов // Гелиогеофизические исследования: научный электронный журн. - 2012. - №2. - С. 40-46. URL: <http://vestnik.geospace.ru>.
4. Руководство по ионосферным, магнитным и гелиогеофизическим наблюдениям, Москва ФГБУ «ИПГ» 2012, 270 с.
5. Н.П. Анохина, В.А. Атряхин, С.В. Литвинов, А.В. Ребриков «Метод уменьшения ошибок определения координат воздушной цели в загоризонтном радиолокаторе», Вестник Ярославского высшего военного училища противовоздушной обороны, 2018

6. Ю.М. Власов, И.А. Глинкин, С.В. Литвинов «Реализация наклонного зондирования ионосферы и применение результатов в ЗГ РЛС», Сборник научных трудов конференции «Проблемы создания и испытаний вооружения Ракетно-космической обороны», 2018