

УДК: 551.510.535

DOI: 10.26907/rwp29.2025.213-216

## РУЧНАЯ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ИОНОЗОНДА «ЛАЭРТ»

К.Г. Цыбуля, Ю.В. Гришина

Институт прикладной геофизики имени Е. К. Федорова, 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9  
E-mail: kgc@ipg.geospace.ru

**Аннотация.** Описывается подход к обработке ионограмм спутникового зондирования, источником которых являются ионозонды «Лаэрт», работающие на двух космических аппаратах «Ионосфера-М». Поступающие ионограммы помещаются в интегрированную базу данных и автоматически обрабатываются для восстановления основных параметров ионосферного слоя F2. Интерактивная программа с графическим интерфейсом пользователя обеспечивает контроль за поступлением данных, сбор статистики и наблюдение за качеством обработки, а в случае необходимости – дополнительную обработку оператором. Полученные данные используются в ассимиляционной модели SIMP для мониторинга текущего глобального состояния ионосферы.

**Ключевые слова:** ионосфера; ионозонд; спутниковое зондирование; автоматическая обработка ионограмм.

## MANUAL AND AUTOMATIC PROCESSING OF THE SATELLITE IONOSONDE LAERT DATA

K.G. Tsybulya, Y.V. Grishina

**Abstract.** We describe approaches to processing of the top-sounding ionograms produced by the Laert ionosondes onboard the two Ionosphere-M satellites. The downlinked ionograms are placed into the integrated database and are scaled automatically to restore the main ionospheric parameters of the ionospheric F2 layer. An interactive software with graphic user interface is used to provide control over incoming data, collect statistics and assure quality of the automatic scaling. In case of necessity, the operator can override automatic software scaling results. The results are used in the assimilative ionospheric model SIMP to monitor the current global state of the ionosphere.

**Keywords:** ionosphere; ionosonde, top sounding; automatic scaling.

### Введение

Успешный запуск двух космических аппаратов «Ионосфера-М» 5 ноября 2024 г. стал прорывом в российских исследованиях ионосферы. Основным научным прибором на борту этих спутников является ионозонд «Лаэрт» [1], позволивший возобновить вертикальное зондирование ионосферы из космоса после долгого перерыва – подобные эксперименты проводились лишь в 1990-е годы на станции «Мир». После завершения летных испытаний начнется регулярная эксплуатация прибора, в ходе которой он должен стать важным источником ионосферной информации как для научных целей, так и для практических нужд. Непрерывный поток данных в режиме, близком к реальному времени, предъявляет высокие требования к наземному комплексу обработки и хранения данных.

### Краткое описание получаемых данных

Два спутника «Ионосфера-М» находятся в двух противоположных точках почти круговой орбиты с высотой 820 км. Орбита является близкой к полярной (наклонение  $98.8^\circ$ ), солнечно-синхронной (местное время 9–21 ч). Прибор имеет много режимов, но основными являются два. Первый из них – режим спектрометра, то есть измерителя интенсивности космических радиошумов на 720 частотных каналах в диапазоне 0.0293–20 МГц с шагом 0.0293 МГц. Измерения производятся каждую секунду и записываются в массив двухбайтных чисел.

Второй режим ионозонда «Лаэрт» – основной режим радиозондирования на 400 частотных каналах от 0.1 до 20 МГц с переменным шагом, составляющим 0.025 МГц в диапазоне 0.1–5.1 МГц, 0.05 МГц в 5.1–10.1 МГц и 0.1 МГц в 10.1–20 МГц. Длина зондирующего импульса передатчика равна 100 мкс. Отраженный от ионосферы сигнал записывается каждые 30 мкс в течение 15 мс после импульса передатчика, что достаточно для обеспечения действующей

глубины зондирования более 2000 км. Разрешение по высоте определяется частотой дискретизации АЦП и составляет 4.5 км для 480 дискретов. Разрешение по амплитуде номинально составляет 32 ступени, но фактически используются лишь 20–25. Приемная антенна в виде перпендикулярных диполей по сдвигу фаз позволяет определять тип поляризации принимаемого сигнала. Он кодируется трехбитовым кодом от 0 до 7: 0 соответствует линейной поляризации, 4 – линейной поляризации с разностью фаз  $180^\circ$ , коды 2 и 6 описывают круговую поляризацию в две противоположные стороны. Остальные коды соответствуют промежуточным эллиптическим состояниям. Следовательно, результат зондирования представляет две целочисленных матрицы – амплитуд и фаз – размером 480x400 элементов. Зондирование продолжается 8 с и происходит каждые 10 с. Для уменьшения объема передаваемой информации при передаче на Землю 5 бит амплитуды и 3 бита фазы объединяются в один байт. Кроме того, для каждого частотного канала производится измерение радиошума перед излучением зондирующего импульса и сразу после него. На основе этих измерений можно получить радиоспектры, хотя и худшего качества, чем в режиме радиоспектрометра.

Таким образом, объем информации одной ионограммы составляет 192000 байт, не считая 1600 байт спектральной информации. При непрерывной работе каждый ионозонд производит 8640 ионограмм в сутки. Наземный комплекс приема обработки и хранения должен принимать и перерабатывать более 3 гигабайт в сутки в настоящее время, а после запуска двух дополнительных спутников созвездия «Ионосфера-М» в ближайшее время это число увеличится до 6 гигабайт в сутки или 2 терабайт в год. Объем информации, скорость ее поступления и необходимость обрабатывать ее в реальном режиме времени предъявляют серьезные требования к аппаратному и программному обеспечению на Земле.

### Хранение данных

Для хранения поступающей с ионозонда информации используется реляционная СУБД MySQL под операционной системой Debian на основе ядра Linux. Разработанная на ее основе база данных является интегрированной, то есть в ней хранятся не только спутниковые данные, но и данные наземных ионосферных станций, а также индексы солнечной и геомагнитной активности. Такой подход облегчает использование хранящихся записей с результатами зондирования для модели ионосферного мониторинга и прогноза. Для хранения ионограмм используются две таблицы: в первой содержится время зондирования, географические координаты точки, высота спутника и практически важные параметры ионосферы, которые можно определить по спутниковым данным – критическая частота слоя F2 для обычной и необычной волн, высота его максимума, плазменная частота и магнитная гирочастота электронов в окрестности спутника, действующие глубины отражений обычной и необычной волны на разных частотах. Самы матрицы ионограмм хранятся в другой таблице, гораздо большей по объему информации. Кроме того, существуют отдельные таблицы для полученных спектров, орбит спутников и технических показателей «Лаэрта».

Файлы сбросов телеметрической информации приходят с пунктов приема каждый час и даже чаще, в зависимости от прохождения орбиты спутников над приемными станциями. В файлах содержится информация всех приборов, установленных на аппаратах. При загрузке производится выделение пакетов канала «Лаэрта», проверка их типа, контрольных сумм, сборка спектров или ионограмм, привязка их к гринвичскому времени и орбитальным координатам и загрузка в таблицы MySQL-сервера. Источником координат, как правило, является установленный на спутниках «Ионосфера-М» одночастотный приемник ГНСС, передающий на Землю пакеты с координатной информацией через бортовой центральный контроллер космического аппарата. Как дополнительный источник орбитальной информации, в таблицы базы ежедневно загружается прогноз траектории спутников, рассчитанный по орбитальным элементам, предоставляемым центром управления полетом. Этот прогноз используется для составления полетных заданий на работу прибора.

### Обработка данных оператором

Созданное программное обеспечение позволяет операторам просматривать содержимое базы данных для различных целей: определение времени поступления файлов сбросов в базу данных, выявление возможных задержек поступления информации, проверка целостности и выявление пропущенных блоков в целевой информации, отслеживание соответствия полученной информации отправленному полетному заданию, просмотр статистики и, наконец, просмотр и обработка спектрограмм и ионограмм.

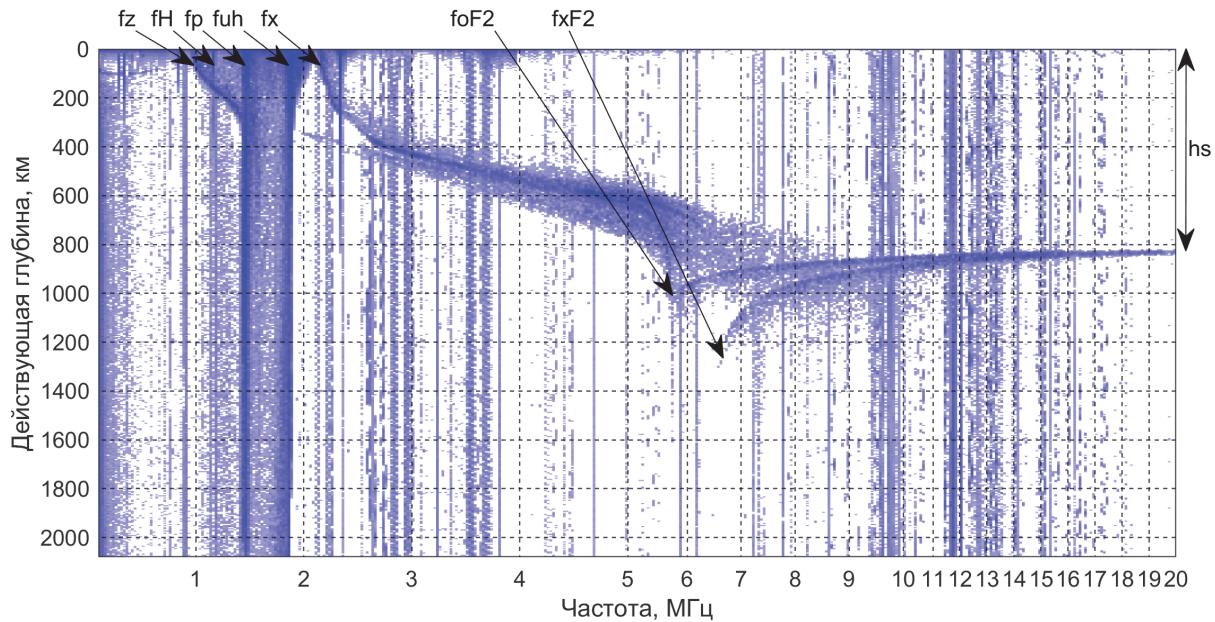


Рис. 1. Типичная ионограмма ионозонда «Лаэрт», снятая 28 января 2025 г. в 17:00:05 UT на 80.2° с. ш., 119.7° в. д. Объяснение обозначений в тексте.

Одна из первых ионограмм, полученных ионозондом «Лаэрт» изображена на Рис. 1. Отмечены числовые параметры, которые требуется снять при обработке для последующего использования в ионосферных моделях мониторинга и прогноза: электронная гирочастота  $f_H$ , частота плазменного резонанса на высоте спутника  $f_p$ , частота верхнего гибридного резонанса  $f_{uh}$ , частоты начала z- и x-следов  $f_z$  и  $f_x$ , критические частоты слоя F2 для о- и x-компонент  $f_oF2$  и  $f_xF2$ . Из этих параметров частота  $f_H$  может быть рассчитана заранее с достаточной точностью из имеющихся координат спутника по модели геомагнитного поля IGRF. Также заранее известна высота спутника  $h_s$ , к которой приближается отражение от Земли на высоких частотах. Остальные частотные параметры снимаются оператором с изображения ионограммы с помощью вертикальной линии курсора на экране компьютера. Параметры  $f_z$ ,  $f_p$ ,  $f_{uh}$ ,  $f_x$  связаны между собой и могут быть рассчитаны исходя из  $f_p$  и известной  $f_H$ . Оператор одновременно передвигает четыре курсорных линии, соответствующие этим параметрам, таким образом, если некоторые резонансы или следы видны нечетко, наиболее важная величина  $f_p$  все равно снимается и записывается в базу. Оператор может также обвести один из следов на экране компьютера и по последовательности действующих глубин может быть восстановлена зависимость электронной концентрации от истинной высоты (ионосферный профиль). Это позволяет также определить истинную высоту максимума слоя F2 ( $h_mF2$ ).

### Автоматическая обработка данных

Поскольку в среднем за большое время с двух космических аппаратов одна ионограмма приходит каждые 5 с, обеспечит полную обработку вручную невозможно. Поэтому на основе алгоритмов, созданных для наземных ионозондов [2] было разработано программное обеспечение для автоматического снятия параметров с ионограмм «Лаэрта».

Многие ионограммы сильно зашумлены помехами как естественного, так и искусственного происхождения. Поэтому перед началом обработки ионограмма подвергается

фильтрации. Первый фильтр основан на исключении шумов по фазе. Отражения от ионосферы поляризованы либо по кругу, либо, вблизи экватора, линейно. Каждый отсчет АЦП представляется в виде комплексного числа, где амплитуда является модулем, а фаза аргументом. После этого соседние отсчеты складываются как комплексные числа и затем амплитуда восстанавливается. Поскольку поляризация шумов является хаотической, помехи подавляются, а сигнал усиливается. Второй стадией фильтрации является вычитание медианы из каждого частотного канала. Поскольку многие помехи являются узкополосными (см. рис. 1), такой фильтр значительно улучшает выявление следов.

При работе алгоритма распознавания следов отражений предполагается, что концентрация ионосферы от высоты орбиты и вниз до основного максимума монотонно увеличивается, возможно, образуя уступы, но не образуя максимумов. Алгоритм начинает работу, взяв за основу средний ионосферный профиль, выдаваемый статистической ионосферной моделью, такой как NeQuick или SIMP. Профиль аппроксимируется по нескольким критическим точкам набором интерполяционных кубических многочленов типа PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial [3]). Эти многочлены достаточно просты, чтобы их можно было вычислять быстро и при этом обеспечивают монотонность, отсутствие изломов и осцилляций.

Имея зависимость электронной плотности от высоты и зная формулы, определяющие групповой показатель преломления по электронной концентрации и напряженности магнитного поля, можно решить прямую задачу распространения радиоимпульса, вычислить временную задержку от передачи до приема радиоимпульса и построить модельную ионограмму, соответствующую заданному профилю. Эта ионограмма с шириной следа, равной длительности импульса радара, используется в качестве шаблона, накладываемого на анализируемую ионограмму. В шаблон также включаются полосы резонансов на частотах  $f_p$  и  $f_{uh}$ . На следующем этапе можно оценить, насколько хорошо совпадают модельная и реальная ионограммы, то есть какая доля следа реальной ионограммы попадает в рассчитанный шаблон.

Изменяя значения исходных параметров, описывающих профиль, можно увеличить или уменьшить степень совпадения. Наконец, можно подобрать шаблон, максимально совпадающий с реальной ионограммой. Параметры ионосферы, которые были использованы для построения этого оптимального шаблона, считаются наилучшим описанием ионосферы под точкой зондирования. С математической точки зрения, это решение задачи оптимизации: найти глобальный максимум функции в многомерном пространстве. Число параметров, описывающих профиль ионосферы определяет размерность пространства. Значением функции в этом пространстве является степень совпадения реальной и модельной ионограммы.

Для решения задачи оптимизации был использован алгоритм Нелдера – Мида [4]. Основное преимущество этого метода заключается в том, что нет необходимости вычислять производные. Кроме того, этот алгоритм легко адаптируется для параллельных вычислений, поскольку одновременно можно вычислять несколько ионограмм, а также параллельно моделировать распространение импульсов по всем частотным каналам.

Как и весь наземный комплекс обработки и хранения, в настоящее время программы автоматической обработки ионограмм проходят стадию испытаний.

### Список литературы

1. Пулинец С. А. Перспективы спутникового зондирования ионосферы в рамках проекта «Ионозонд» // Гелиогеофизические исследования. – 2013. – №. 6. – С. 1–7.
2. Tsybulya K., Kotonaeva N., Polyakova A. An Automatic Ionogram Scaling Technique based on the Nelder-Mead method //2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC). – IEEE, 2019. – С. 1–4.
3. Kreyszig E. Advanced Engineering Mathematics Wiley, 2005. – 1248 с. Duda R.O., Hart P.E., Stork D. G. Pattern Classification. – John Wiley and Sons, 1999.
4. Nelder J. A., Mead R. A. Simplex method for function minimization // Computer Journal – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.