

УДК 550.388.2

СОГЛАСОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ БОРТОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИОНОЗОНДОВ ПРИ СИСТЕМНОМ МОНИТОРИНГЕ ИОНОСФЕРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИОНОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ И ЗАДАЧ ЭКСПЕРИМЕНТА

И.И. Иванов, А.В. Тертышников

В связи с формированием системы синхронного мониторинга ионосферы «Геофизика» рассматриваются вопросы повышения эффективности работы ионозондов, установленных на борту ИСЗ, как за счет адаптации режимов зондирования к ионосферной обстановке, так и за счет адаптации алгоритмов обработки ионосферной информации к задачам эксперимента и аппаратным ресурсам на борту. Обсуждаются режимы работы спутниковых бортовых ионозондов, которые должны обеспечивать необходимый набор ионосферных параметров как для потребностей ионосферной службы, так и для полноты реализации научных задач с учетом пространственно — временного разрешения при спутниковом вертикальном зондировании (СВЗ) и трансionoсферном зондировании (ТИЗ).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СИСТЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ, ИОНОЗОНД, РЕЖИМЫ ЗОНДИРОВАНИЯ.

ВВЕДЕНИЕ

Задача повышения надежности радиосистем, использующих ионосферные каналы распространения радиоволн, решается при оперативной коррекции ионосферных моделей на основе экспериментальных данных, и в первую очередь, критической частоты ионосферы — f_oF . Ограниченное число наземных станций ВЗ и НЗ ионосферы понуждает использовать спутниковые методы глобального контроля ионосферы [1], среди которых спутниковое вертикальное зондирование (СВЗ), подобно наземному ВЗ, дает наибольшую точность определения f_oF [2].

В России на основе отечественных и зарубежных разработок спутниковых ионозондов создается орбитальная ионосферная группировка «Геофизика» из четырех солнечно-синхронных ИСЗ «Ионосфера», оборудованная бортовыми ионозондами «ЛАЭРТ» и предназначенная для обеспечения контроля ионосферы в составе системы синхронного зондирования [3, 4]. Для оптимизации потоков ионосферных данных на наземные пункты и сохранения ресурса ионосферных ИСЗ управление бортовыми ионозондами предусматривается не только с Земли, но запланировано и автономное управление режимами зондирования программно-аппаратными средствами ионозонда в зависимости от ионосферных условий и актуальных программ работы системы мониторинга ионосферы — то есть предусмотрены гибкие адаптивные режимы зондирования [3].

СРЕДСТВА И РЕЖИМЫ ИМПУЛЬСНОГО СПУТНИКОВОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ (СВЗ)

При размещении ионозонда на борту ИСЗ излученные сигналы отражаются от нижележащей области ионосферы и регистрируются в виде ионограммы внешнего зондирования. В силу того, что антенны ионозонда окружены плазмой, на ионограмме СВЗ наблюдаются резонансы при взаимодействиях волна-частица. Помимо наблюдаемых при ВЗ следов обыкновенной О и необыкновенной Х компонент регистрируется Z компонента. На частотах выше критической частоты области F наблюдаются следы отражений от земной поверхности.

С точки зрения контроля и коррекции глобальных моделей ионосферы существенно получение значений критической частоты слоя F и его высоты в масштабах планеты. Уже первые исследования ионосферы с ИСЗ методом СВЗ дали огромный объем материала для изучения верхней ионосферы [5]. Использование отражений от земли и трансionoграмм позволяют в модельном приближении получить и сведения о нижней ионосфере (полутолщина слоя) в районах, не обслуживаемых

станциями ВЗ. Трансионограммы получают при просвечивании ионосферы насквозь (ГИЗ). Если излучение направлено с Земли, то способ ее получения назван обратным трансионосферным зондированием (ОТИЗ). По ионограммам СВЗ и ГИЗ (ОТИЗ) восстанавливается полный профиль ионосферы (нижняя ионосфера в параболическом приближении), что позволяет определить МПЧ радиосвязи. Расхождение в определении МПЧ по трансионограммам, относительно вычисленных по ВЗ и кривым МПЧ, не превышает (5-10)%.

Синхронизация бортовых и наземных ионозондов [3] позволяет получить при их совместной работе серии разрезов ионосферы по данным ВЗ, одновременном НЗ, ВНЗ, СВЗ и ГИЗ, ОТИЗ на больших пространствах, так как радиус зоны радиовидимости ИСЗ с наземного пункта при высоте орбиты до 1000 км превышает 3000 км. Ионосферное зондирование сверху и с поверхности Земли существенно дополняют (а по параметру foF2 — и контролируют) друг друга.

Использование и развитие спутниковых импульсных ионозондов от «Alouette» до «ЛАЭРТ» [3, 5, 6] показало, что для более надежного контроля ионосферной обстановки необходим переход от простого режима последовательного съема ионограмм к выборочным измерениям с изменением диапазона зондирования, измерениям на фиксированных частотах, вариациям темпа и пространственной плотности зондирования в зависимости от ионосферной обстановки и требуемого разрешения по пространству или во времени.

Так первые ионозонды «Alouette», «ISIS», «Космос-381» работали практически в одном режиме — последовательном зондировании в заранее выбранном диапазоне частот, с фиксированным импульсом, частотой повторения и скважностью по пространству.

Уже для бортовой ионосферной станции «ИС-338» с ионозондом «ИОН-1» (ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809») [6] и его аналогом «АИ-804» (КС «МИР») были определены ряд режимов с запуском зондирования через интервалы кратные 8 с. при частотном диапазоне зондирования от 0,3 до 15,95 МГц на 338 дискретных частотах с одним импульсом на каждой частоте, кусочно-линейным законом перестройки и тактовой частотой около 60 Гц. Первый режим обеспечивал плотность ионограмм по траектории (для высоты ИСЗ от 500 до 1000 км) равной примерно 48 км. Второй режим — одна ионограмма через 16 с. соответствовал участку траектории около 100 км, а третий — через 64 с. — более 500 км соответственно. Был предусмотрен режим выключения передатчика ионозонда для анализа внешних радиоизлучений и исключения влияния зондирующего передатчика на иные приборы ИСЗ. Дополнительными режимами, которые не были использованы в экспериментах, были — режим на выбранной фиксированной частоте зондирования и уменьшенная тактовая частота до примерно 30 Гц, что позволило бы проводить зондирование с высот больших 1000 км.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ИОНОЗОНДА БОРТОВОГО В СИСТЕМЕ «ГЕОФИЗИКА»

Для ионозонда «ЛАЭРТ» были определены следующие задачи и режимы работы [3]: ионозонд должен обеспечивать решение следующих задач:

- оперативное определение критической частоты ионосферы вдоль трассы полета спутника,
- получение вертикальных профилей электронной концентрации ионосферы,
- определение плазменных резонансов на высоте орбиты спутника,
- измерение спектра ВЧ излучений в диапазоне частот ионозонда.

«ЛАЭРТ» должен обеспечивать работу в следующих режимах:

- 1) непрерывного мониторинга в полном диапазоне (основной режим);
- 2) мониторинга в режиме IRI;(режим работы с моделью);
- 3) мониторинга в адаптивном режиме (автоматическое определение foF2);
- 4) режим прямого трансионосферного зондирования;
- 5) режим обратного трансионосферного зондирования;
- 6) режим с выключенным передатчиком;
- 7) режим работы на фиксированных частотах с передатчиком;
- 8) режим работы на фиксированных частотах без передатчика.

В системе «Геофизика» ионозонд «ЛАЭРТ» устанавливается на 4-х однотипных КА «Ионосфера», объединенных в орбитальную группировку с параметрами орбит — высота на экваторе около 820 км, период обращения — 101,3 мин, наклонение — $98,7^{\circ}$ эксцентриситет — 0,00124. Сдвиг орбит по долготе примерно 90° , сдвиг ИСЗ по каждой из орбит около 180° . Положение плоскости орбиты

первой пары КА относительно прямого восхождения Солнца 135° , местное время восходящего узла орбиты 21.00, Для второй пары — 46° и 15.00 час соответственно.

Для ионозонда «ЛАЭРТ» основным режимом является режим непрерывного мониторинга в полном диапазоне частот от 0,1 до 20,0 МГц., максимальное количество частот в кадре — 400 и может определяться режимом работы. Частота повторения импульсов в кадре — 50 Гц. Длительность ионограммы — не более 10 с., информативность за час — 64 Мбайт, стабильность задающего генератора (ОГ) — $2 \cdot 10^{-8}$. Привязка бортовой шкалы времени (БШВ) к наземной шкале времени (НШВ) и GPS — 1 мкс, динамический диапазон приемника (РПрУ) не менее 120 дБ, полоса РПрУ — 15 кГц (по 3 дБ), длительность зондирующего импульса около 100 мкс, мощность зондирующего передатчика (РПдУ) в импульсе на эквиваленте до 300 Вт.

Для оперативного определения критической частоты ионосферы f_0F вдоль трассы полета спутника в качестве основного принят режим №1 — непрерывного мониторинга в полном диапазоне частот. При этом режиме сеансы зондирования с получением ионограмм (кадров) последовательно повторяются через 10 с. В качестве обзорных установлены режимы повторения кадров через 30 и 60 с. Эти три режима дают 80, 240 и 480 км плотности по траектории на один кадр зондирования.

Возможные адаптивные режимы в зависимости от решаемых задач при зондировании с ИСЗ:

1. Режим № 2, когда частота зондирования ограничивается сверху и определяется «защитой» в программное обеспечение (ПО) ионозонда моделью IRI;

2. Режим № 3 при определении верхней частоты зондирования по радиопомехам с Земли.

В этом случае, как и в предыдущем, преимуществом является сокращение объемов хранимой и передаваемой информации и некоторая экономия энергоресурсов за счет сокращения времени работы зондирующего передатчика. Следует отметить, что в этих двух вариантах режимов не гарантируется совпадение модельных и реальных значений f_0F .

В качестве примера на рис. 1а приведено сопоставление результатов СВЗ при зондировании с ИСЗ «Интеркосмос-19» (виток 10086, 24.01.86 г., при прохождении спутника от 82° N, 4° E до 43° N, 71° E) с данными для этого же периода, полученным по модели IRI. Помещенная на рисунке 2б карта f_0F2 демонстрирует сильную изменчивость критических частот при пролете ИСЗ (5–7 МГц). Эта величина значительно больше представленных на рис. 1а значений (2 МГц), поэтому необходимо дополнительно расширять частотный диапазон вверх примерно на 1–3 МГц относительно значений, предсказываемых по модели, либо определяемых по радиощумам с Земли с помощью определителя критических частот (ОКЧ) [6].

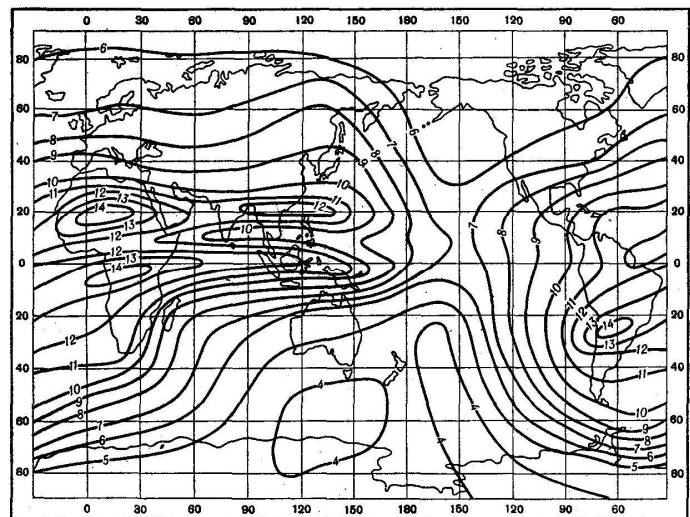
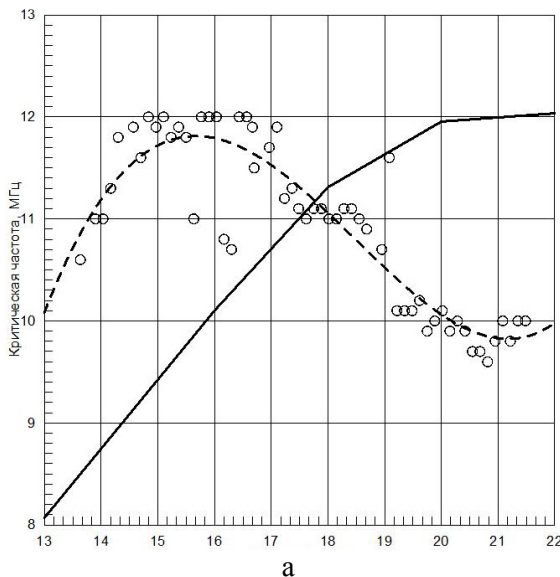


Рис. 1 (а)-виток 10086 (по оси абсцисс — время сеанса в мин. для 14 час., сплошная линия — модель IRI, точки — экспериментальные значения f_0F2 , пунктир — аппроксимация ортогональным полиномом пятой степени по методу наименьших квадратов; (б) — типичная мировая карта f_0F2 на 15^h UT.

При детальном анализе изменчивости критических частот ионосферы вдоль орбиты ИСЗ, например определения тонкой структуры квазиволновых возмущений верхней ионосферы, требуется значительное повышение пространственного разрешения [10]. В табл. 1 приведены возможные варианты изменения тактовых частот F_{rep} шага перестройки D_f количества частот и диапазона зондирования $f_{\text{max}}-f_{\text{min}}$ от высоты орбиты H_{sat} для повышения пространственного разрешения.

Табл. 1. Возможные варианты изменения тактовых частот F_{rep} шага перестройки D_f количества частот и диапазона зондирования $f_{\text{max}}-f_{\text{min}}$ от высоты орбиты H_{sat} для повышения пространственного разрешения.

вариант	H_{sat} , km	F_{rep} , Hz	T_{line} , ms	$f_{\text{max}}-f_{\text{min}}$, MHz	D_f , kHz	Кол-во частот	T_{frame} , ms	Way, km
1	1000	60	17	0.3–16	25,50	338	6	48
2	1000	60	13	1–16	50	300	4.1	33
3	800	50	20	0,1–20	25,50	400	8	64
4	800	100	10	0,1–20	25,50	400	4	32
5	800	100	10	5–15	50	300	3	24
6	500	120	8	1–20	50	380	3.3	26
7	500	120	8	5–15	50	200	1.8	14
8	500	120	8	5–15	100	100	1.0	8

Разрешение в 10–20 км уже позволит детектировать короткопериодические волновые возмущения в ионосфере при естественных или антропогенных воздействиях на околоземную плазму.

3. Задача экспериментального определения углов прихода КВ сигналов с ИСЗ не решена до настоящего времени; при режиме зондирования бортовым ионозондом на фиксированных частотах и приеме трансionoсферных сигналов на наземных антенных решетках (типа УТР2 или аналогичных) можно определять не только углы прихода спутниковых сигналов для набора частот, но и калибровать, в дальнейшем, ФАР РЛС по сигналам бортовых космических ионозондов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор режимов зондирования бортовых ионозондов, в первую очередь, определяется задачей эксперимента, поскольку при зондировании с ИСЗ пространственное и частотное разрешение конкурируют между собой.

- Приоритетным является внешнее управление ионозондом с Земли, согласованное с режимами зондирования других бортовых и наземных ионозондов для обеспечения максимальной информативности и минимизации ложных сигналов в системе синхронного зондирования.

- В качестве адаптивного режима, учитывая результаты анализа материалов зондирования с ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809», целесообразны вариации режимов по частоте зондирования, определяемым по шумам наземных радиозумов (подобно ОКЧ [6]), либо по значениям foF2 на предыдущих витках с увеличением верхних частот относительно ОКЧ на 1–3 МГц.

- Для повышения пространственного разрешения целесообразно обеспечить возможность изменения темпа перестройки частоты по диапазону зондирования.

- Для ТИЗ и ОТИЗ в программное обеспечение бортового ионозонда необходимо включить режим, согласованный с режимом наземных ионозондов по синхронизации, необходим единый для системы мониторинга протокол, регламентирующий диапазоны зондирования, структуру используемых сигналов, временные режимы, введение в ТМ сигнал специальной квитанции о номере ИСЗ, режимах зондирования и варианте временной привязки для оперативной подстройки наземной аппаратуры под режим каждого спутника, а наземные ионозонды должны иметь синхронизатор, позволяющий по внешним маркерам или сигналам точного времени, в том числе сигналам GPS или ГЛОНАСС, включать программу совместной синхронной работы и для обеспечения ЭМС (в том числе исключения наложения ионограмм и трансionoграмм в кадрах) режимы работы ионозондов и время их зондирования в сети следует сдвигать во времени по определенной утвержденной сетке, связанной с UTS. Необходимо учесть, что зондирование одновременно бортовыми и несколькими наземными ионозондами создает дополнительные значительные трудности в обработке данных в

реальном времени (даже при автоматизации обработки стандартных ионограмм) за счет значительного увеличения потока информации [7-10].

- При зондировании возмущенной ионосферы для регистрации динамики ионосферы вблизи максимума слоя F целесообразно заменить 8 секундную тактовую частоту бортового хронизатора ИСЗ на двух-секундную, подобно частотам хронизаторов ионосферных спутников предыдущего поколения. При зондировании в ограниченном частотном диапазоне вблизи критической частоты слоя F этот режим позволит получить более детальную картину распределения f_0F2 при естественных или антропогенных катаклизмах, индикатором которых является ионосфера.

HARMONIZATION OF THE ON-BOARD AND GROUND-BASED IONOSONDES IN SYSTEMIC IONOSPHERE MONITORING DEPENDING ON THE IONOSPHERIC CONDITIONS AND THE OBJECTIVE OF THE EXPERIMENT

I.I. Ivanov, A.V. Tertyshnikov

The issues of improving the efficiency of ionosondes are discussed. These ionosondes are mounted on the satellite board. Feature of these ionosondes are of synchronous monitoring the ionosphere by adaptation of sounding mode to ionosphere environment. Additional adaptation of algorithm of ionospheric information processing to experiments is introduced. Modes of satellite onboard ionosonde considered in terms of sufficiency for the service needs of the ionospheric and scientific problems. These modes allow to increase the spatial - temporal resolution for the satellite vertical sounding and transionospheric sensing.

KEYWORDS: SYSTEM MONITORING THE IONOSPHERE, IONOSONDE, SOUNDING MODES.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авдюшин С.И., Данилкин Н.П., Денисова В.И., Журавлев С.В. Мониторинг ионосферы на сети отечественных наземных и спутниковых ионозондов в XXI веке. / XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» Т.1., Ростов-на-Дону, 2009. С. 17–21.
2. Лапшин В.Б., Пулинец С.А., Денисова В.И., Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П. Перспективы развития российской ионосферной службы на основе сети станций наземного радиозондирования и специализированных спутников с ионозондами./ XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Т. 1., Йошкар-Ола, 2011. С. 71–75.
3. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы «Создание бортового ионозонда в диапазоне 0,1-20 МГц с передатчиком 137 МГц для КА «Ионосфера». - М., 2011.
4. Тertyshnikov A.V., Bolshakov V.O. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос, 2010, № 1. С.100-105.
5. Colin A. Franklin, Michael A. Maclean The Design of Swept-Frequency Topside-Sounders. // Proceedings of the IEEE, June 1969. V. 6. P. 46–82.
6. Васильев Г.В., Гончаров Л.П., Кушнеревский Ю.В., Мигулин В.В., Флигель М.Д. Спутниковая система импульсного зондирования ионосферы ИС-338. / Аппаратура для исследования внешней ионосферы. Сборник ИЗМИРАН, М., 1980. С. 13–29.
7. Иванов И.И. Синхронизация бортовых и наземных ионозондов при системном зондировании ионосферы. // Физические основы приборостроения. Т.1, № 1. 2012. С. 101–111.
8. Иванов И.И., Журавлев С.В. Пространственное разрешение при спутниковом ионосферном зондировании // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. Т. 14, № 5. С. 21–24.
9. Иванов И.И., Денисенко П.Ф., Тertyshnikov A.V., и др. Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений и комплекс для его реализации. Заявка на изобретение. М.: ФИПС, 2014, рег. № 2014125712 от 11.07.2014 г.
10. Тertyshnikov A.V., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, заявка №2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013, № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013.