

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИНХРОННОЙ РАБОТЫ СПУТНИКОВЫХ И НАЗЕМНЫХ ИОНОЗОНДОВ В СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ

В.П. Дьяков, С.В. Журавлев, И.И. Иванов

Обсуждаются достоинства и ограничения методов и устройств синхронизации спутниковых и наземных ионозондов при системном зондировании ионосферы. Представлены результаты синхронного зондирования с ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809», КА «Мир» и предлагаются варианты синхронизации наземных ионозондов в сети Росгидромета и бортовой аппаратуры космического комплекса «Ионозонд» с перспективными бортовыми ионозондами, устанавливаемыми на 4-х ИСЗ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: СИСТЕМНЫЙ МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ, ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, СИНХРОНИЗАЦИЯ ИОНОЗОНДОВ

ВВЕДЕНИЕ

Прогноз характеристик каналов дециметровых волн (ДКМВ) для радиосвязи, загоризонтной радиолокации и пеленгации в настоящее время основывается на коррекции ионосферных моделей по данным вертикального (ВЗ) и наклонного (НЗ) зондирования. Сеть импульсных ионозондов ВЗ в РФ малочисленна, для НЗ применяются в основном ЛЧМ ионозонды [1], а спутниковые исследования ограничиваются радиотомографией ионосферы с навигационных ИСЗ [2, 3] и измерением полного содержания электронов в ионосферном столбе [4]. Возобновление работ по созданию отечественной системы наземно-космического непрерывного и глобального мониторинга ионосферы [5] ставит задачу обеспечения совместной работы большого количества ионозондов в сети наземного зондирования и их синхронной работы со спутниковыми ионозондами. К настоящему времени в отечественной ионосферной службе, ионосферных обсерваториях и исследовательских организациях различных ведомств применяются как отечественные аналоговые ионозонды (АИС, «Вертикаль»), цифровые («Базис», «Сойка», «Парус», «Авгур», «Циклон», «Бизон»), так и современные зарубежные (DPS-4, CADI, «Dynasonde 21»). Эти ионозонды используют способ радиоимпульсного зондирования на переменных частотах в ДКМВ диапазоне при ВЗ и НЗ. Спутниковые ионозонды

применяются и для внешнего вертикального зондирования (ВнЗ). При совместной работе спутниковых и наземных ионозондов используют синхронное просвечивание ионосферы с ИСЗ на Землю – трансионосферное зондирование (ТИЗ) и с Земли на ИСЗ – обратное трансионосферное зондирование (ОТИЗ) на частотах выше критической частоты ионосферы f_oF_2 [6].

Применение в создаваемой системе ионосферного мониторинга несовместимых технических средств синхронизации при одновременно работающих наземных и спутниковых ионозондах приведет к потере информации или перекрестным помехам. Ситуация может усугубляться при системном зондировании с повышенным пространственным разрешением [7].

В работе анализируются схемы синхронизации наземных и бортовых передатчиков ионозондов и предлагаются решения для реализации их совместной синхронной работы в разрабатываемой отечественной наземно-спутниковой системе мониторинга ионосферы.

ВАРИАНТЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Обобщенная структурная схема аппаратно-программного комплекса, представленная на рис. 1 и предназначенная для обеспечения синхронной работы (обычно требуется точность не хуже 1 мкс) бортовых и наземных ионозондов, содержит бортовую, расположенную выше главного максимума

ионосферы, (1-13) и наземную части (14-29).

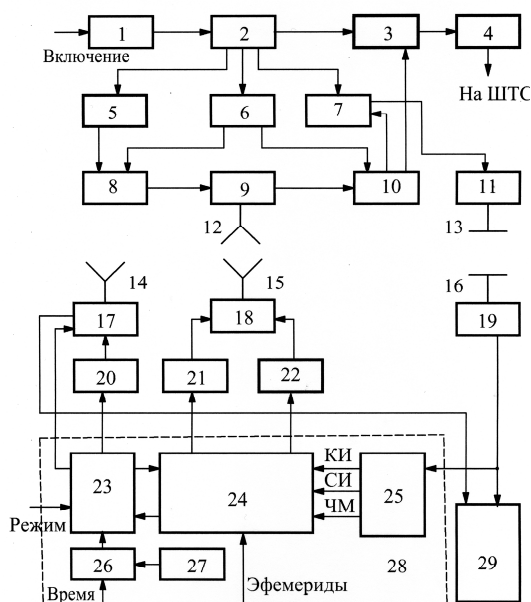


Рис. 1. Схема синхронизации спутниковых и наземных ионозондов

В бортовой части комплекса цифрой 1 обозначен блок автоматики включения ионозонда, 2 – хронизатор, вырабатывающий опорную сетку частот, на который поступают сигналы точного времени, 3 – формирователь цифровых ионограмм для штатной телеметрии (ШТС), по которой передается на пункты управления вся служебная и ионосферная информация за несколько витков, 4 – блок обработки и хранения информации для ШТС, 5 – импульсный модулятор зондирующего передатчика, 6 – синтезатор частот, служащий как возбудителем зондирующего передатчика, так и гетеродином приемника, 7 – формирователь сигнала канала научной телеметрии (кадра), 8 – импульсный зондирующий передатчик, 9 – антенный коммутатор, 10 – приемник сигналов диапазона зондирования, 11 – передатчик канала научной телеметрии (НТМ, 136-137 МГц), 12 и 13 – антенны. В наземной части схемы цифрами 14 и 15 обозначены антенны приемника и передатчика канала зондирования, а 16 – антенна приемника канала НТМ, 17 и 18 – приемник и передатчик зондирующего канала, 19 – приемник сигналов НТМ, 20 и 21 – синтезаторы частот приемника и передатчика зондирования, а 22 – модулятор импульсного передатчика. В состав блока 28, управляющего наземным ионозондом входят: 23 – формирователь сигналов перестройки по

частоте наземного приемника, входными сигналами которого являются времязадающие импульсы от хронизатора 26, на который поступают сигналы точного времени и импульсы с частотой опорного генератора 27. Работа формирователя 23 определяется программой (режимом) работы бортового ионозонда. Селектор синхроимпульсов бортового ионозонда 25 передает выделенные кадровые, строчные и иные синхросигналы в логический блок 24, управляющий работой наземного передатчика с учетом режимов бортового ионозонда, а также в зависимости от расчетных эфемерид ИСЗ и расстояния от ИСЗ до наземного пункта. 29 – измеритель групповых задержек и регистратор трансionoграмм

Возможны три основных варианта синхронной работы системы.

Опорным для первого варианта синхронизации является передаваемый на Землю по каналу НТМ (11, 13, 16, 19) информационный сигнал. В первом варианте с выхода приемника бортового ионозонда (10) (рис. 1) через формирователь кадра (7) на телеметрический передатчик (11) можно подавать и аналоговый сигнал, подобный сигналу ионозонда ИОН-1 или АИ-804 (рис. 2). Схема одновременной передачи, помимо аналоговой ионограммы с синхрометками, и дополнительной штатной информации по каналу научной телеметрии на поднесущих частотах успешно применялась при синхронной работе наземных и спутниковых ионозондов в эксперименте с ИСЗ «Космос-1809». Объем аналоговой информации, регистрировавшийся тогда на Земле и оцифровывавшейся при последующей обработке, составлял около 400 кБ. Подобный цифровой кадр после сжатия можно передавать и в интервале между кадрами. В таком случае сохраняется возможность проведения синхронных ТИЗ и ОТИЗ. Преимущество аналогового сигнала в канале научной телеметрии, помимо возможности проведения ОТИЗ с обратной связью, – более надежный прием сигнала научной телеметрии на типовых наземных ионосферных пунктах Росгидромета. Потери элементов кадра при невысоком соотношении сигнал/шум не приводят к катастрофическим сбоям синхронизации и потере ионосферной информации, в то же время для сохранения цифрового ионосферного кадра необходимы меры помехоустойчивого кодирования [16].

Второй вариант синхронизации возможен,

когда ионосферная информация обрабатывается на борту в темпе зондирования и передается на Землю по каналу научной телеметрии. Синхрометки могут передаваться отдельно на поднесущей. В этом случае возможно ТИЗ, но ОТИЗ проблематичен из-за отсутствия обратной связи.

Вариант третий стал возможен в последние годы и связан с жесткой привязкой часов бортового и наземных ионозондов к мировому времени через системы GPS или ГЛОНАСС. При этом на борту для однозначной и синхронной перестройки наземных ионозондов должен формироваться помимо цифрового кадра пакет служебной информации, в который надо включить следующую информацию: номер ионосферного ИСЗ, режим работы ионозонда (количество частот в кадре, закон, шаг и частота частотной перестройки по диапазону зондирования), метку начала кадра (зондирования).

На рис. 1 представлены элементы, реализующие все эти варианты. Реально элементов меньше, т. к. используется только один из вариантов.

РЕАЛИЗОВАННЫЕ СХЕМЫ СИНХРОНИЗАЦИИ

Первая попытка синхронизации наземной аппаратуры при приеме сигналов спутникового ионозонда была предпринята в 1972 г. в Японии с ИСЗ «ISIS-B» на непрерывно изменяющейся частоте в диапазоне от f_oF_2 до 20 МГц. Основные трудности были связаны с разработкой системы синхронной перестройки наземного сигнала. Были опробованы несколько способов синхронизации наземного и бортовых устройств, в том числе схемы с контуром фазовой синхронизации и использованием прошедших через ионосферу зондирующих сигналов, а также система с оценкой скорости непрерывной перестройки частоты бортового ионозонда. Была реализована схема последовательной оценки на основе применения фильтра Калмана, заключающаяся в определении скорости и закона перестройки частоты бортового ионозонда и поиска трансionoсферного сигнала с помощью ЭВМ при подстройке частоты гетеродина приемника по частотным меткам, транслируемым в составе сложного зондирующего сигнала. Несмотря на прогрессивную для того времени наземную систему с мощной ЭВМ, не удалось

обеспечить синхронизацию даже для небольшой части диапазона зондирования.

При переходе от аналоговых к цифровым ионозондам более перспективной оказалась схема дискретной перестройки частоты, которую впервые стали использовать как для наземных, так и для бортовых отечественных ионозондов, а информацию – ионограммы – стали компоновать по принципам малокадрового телевидения. При разработке схем синхронизации наземных ионозондов в отечественных экспериментах с ИСЗ «Интеркосмос-19», «Космос-1809», КС «Мир» были применены алгоритмы и устройства на основе дискретной перестройки частоты в диапазоне зондирования [8]. Для приема на Земле зондирующих сигналов бортовых ионозондов в схеме синхронизации в различных сочетаниях использованы служебные метки, включенные в состав информационных сигналов бортового ионозонда (кадровые, строчные и метки индикации частоты зондирования).

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ СИНХРОИМПУЛЬСОВ

Рассмотрим особенности первого варианта обеспечения синхронной работы наземно-спутниковой системы на примерах реализации схем синхронизации для ранее запущенных отечественных ионозондов. На рис. 2 изображены элементы структуры выходных сигналов бортовых ионозондов.

Информация о зондировании ионосферы формируется в кадре, состоящем из строк, каждая строка состоит из служебной информации и информационного сигнала с выхода приемника на частоте зондирования. Цифрой 1 обозначен кадровый импульс – «начало кадра» (133 мс, 15 кГц), 2 – сигнал калибровки нуля амплитуды (1,6 мс), 3 – строчный синхроимпульс (0,5 мс для МИС-4; 533 мкс для ИОН-1, 1867 мкс для АИ-804), 4 – сигнал, пропорциональный уровню помех – АРУ (0,1 — 1,0 мс для ИОН-1; 0,1 — 2,1 мс для АИ-804), 5 – частотная метка (0,5 мс для МИС-4; 533 мкс для ИОН-1 и АИ-804), 6 – импульс запуска АЦП (13 мкс), 7 – импульс зондирующего передатчика (100 — 150 мкс), 8 – информационный ионосферный сигнал и помехи, 9 – кадровый импульс – «конец кадра» (133 мс, 10 кГц). Для «Лазерта» кадр представляет из себя просто последовательность из 400 радиоимпульсов колоколообразной формы с частотой повторения 50 Гц.



Рис. 2. Выходные сигналы спутниковых ионозондов

В связи с быстрым перемещением ИСЗ при зондировании стремятся вместить в кадре наибольшую информацию как по пространству (примерно 50 км за 6–7 с), так и по диапазону частот зондирования (для «Лазэрта» диапазон частот 0,1–20 МГц при излучении одного импульса на каждой из 400 выбранных частот). Скорость перестройки по диапазону зондирования (частота строчной синхронизации) определяется глубиной зондирования, т. е. высотой орбиты ИСЗ, и для высоты спутника 500–1000 км обычно выбирается равной 50–60 Гц. Приведенные выше элементы структуры выходного сигнала бортового ионозонда транслируются по каналу НТМ и могут служить для синхронизации наземной аппаратуры в режиме непосредственной передачи информации по телеметрическому каналу (НПТС) в зоне радиовидимости ИСЗ с наземных пунктов.

В одном из первых устройств, разработанном для бортового ионозонда МИС-4 [10], для синхронизации использовались строчные импульсы и метки частоты, включенные в состав выходного сигнала ионозонда (рис. 2), связанные во времени с излучаемыми зондирующими импульсами на 80 дискретных частотах в диапазоне от 1,1 до 16,1 МГц. Полезная информация и служебные метки передавались по дополнительному каналу связи через передатчик (11) с антенной (13) на антенну и приемник (16, 19) в режиме НПТС в диапазоне частот 136 — 138 МГц. Эти частоты, на порядок большие верхней частоты зондирования, выбраны для уменьшения относительных задержек сигнала ионосферой.

Импульсы перестройки наземной аппаратуры формировались по выделенным строчным синхросигналам бортового ионозонда (3) (рис. 2), а начало кадра определялось по совпадению первой комбинации частотных (5) и строчных (3) меток. В схему наземного ионозонда включен селектор (25) импульсов строчной синхронизации, селектор частотных меток, повторяющихся через 1 и 5 МГц. Тактовый генератор с инерционным управлением подстраивается по строчным синхроимпульсам бортового ионозонда частотой 50 Гц и запускает формирователь сигналов управления перестройкой по частоте наземного ионозонда, установленный в «старт-стопный» режим. При включении наземный приемник автоматически переходил в режим приема на первой частоте диапазона. После приема сигнала бортового ионозонда первые выделенные частотные метки инициируют команду перестройки наземного приемника с помощью инерционного тактового генератора, управляемого выделенными синхроимпульсами. Если перестройка идет с рассогласованием, то устройство сброса, сравнивая по частотным меткам шкалы наземного и бортового ионозондов, переводит устройство приема в начальное состояние. Основные недостатки этой схемы синхронизации с ионозондом МИС-4, приводящие к потерям кадров при высоком уровне помех в канале НТМ, — отсутствие в сложном видеосигнале меток начала кадра и невысокая стабильность (10^{-3} - 10^{-4}) задающего бортового генератора.

Вторая схема синхронизации разработана

для бортового ионозонда ИОН-1 [11], устанавливавшегося на ИСЗ «Интеркосмос-19» и «Космос-1809». В состав выходного сигнала этого ионозонда были включены метки начала (1) и конца (9) кадра (рис. 2). Частота опорного генератора этого ионозонда была стабилизирована кварцем. Эти изменения значительно повысили надежность синхронизации даже при низком соотношении сигнал/шум, характерном для канала НТМ в режиме НПТС. Устройство работает следующим образом: по команде с Земли или автономно по заданной программе блок управления включает передатчики (8, 11) и хронизатор (2), управляющий модуляторами передатчиков и диапазонным синтезатором частот (6). Таким образом, передатчик (8) излучает радиоимпульсы в диапазоне зондирования в определенной, задаваемой блоком управления, последовательности, передатчик (11) синхронно с ним излучает метки в составе сигнала НПТС. Принятый на Земле антенной и приемником (19) сигнал, запаздыванием которого в ионосфере пренебрегается, обрабатывается селекторами тактовой частоты и сигналов начала отсчета (25), которые включают приемник сигналов зондирования (17), подключенный к антенне канала зондирования (14). Принятые сигналы, прошедшие сквозь ионосферу, поступают на измеритель разности групповых задержек, на регистратор ионограмм ВнЗ и транзионограмм (29). Диапазонные синтезаторы частот (20 и 21) включаются сигналами начала отсчета и перестраиваются тактовыми сигналами синхронно с включением и перестройкой бортового зондирующего передатчика (8), чем обеспечивается однозначность приема каждого прошедшего сквозь ионосферу сигнала в диапазоне частот зондирования.

Для повышения энергетического потенциала канала зондирования излучение более мощного наземного передатчика было направлено с Земли на борт (ОТИЗ, [12]). Устройство для ОТИЗ также содержит в бортовой части передатчик (11) сигналов НТМ, модулятор (5) зондирующего передатчика, диапазонный синтезатор (6) частот, зондирующий передатчик (8), приемник (10) зондирующих сигналов и хронизатор (2), содержащий генератор опорных импульсов, схему сигнала начала отсчета и генератор тактовой частоты. Наземная часть состоит из приемника сигналов канала НТМ (19), модулятора (22), регистратора ионограмм (29), селектора опорных импульсов (25), состоящего из

селектора импульсов начала отсчета и селектора тактовой частоты, зондирующего передатчика (18) и диапазонного синтезатора частот (21). По команде бортового программатора генератор хронизатора (2) вырабатывает сигнал, которым синхронно модулируются зондирующий передатчик и передатчик сигналов НТМ (11), а зондирующий передатчик (8) через антенный коммутатор (9) и антенну (12) излучает радиосигналы в диапазоне зондирования 0,3 — 15,95 МГц на переменных дискретных частотах, определяемых диапазонным синтезатором (6), перестройкой которого по диапазону управляет хронизатор (2). Отраженные от ионосферы эхо-сигналы и сигналы ОТИЗ принимаются приемником (10), перестраиваемым диапазонным синхронизатором (6), с выхода приемника (10) эхо-сигналы поступают через формирователь аналогового сигнала НТМ в передатчик (11) и транслируются на Землю. Принятые на Земле приемником (19) сигналы поступают на селектор (25) и логический блок (24), которые управляют диапазонным синтезатором (21) и модулятором (22) таким образом, чтобы наземный передатчик (18) излучил синхронно с бортовым передатчиком (8) радиоимпульсы на тех же частотах. Радиосигналы наземного зондирующего передатчика (19), прошедшие ионосферу насквозь, принимаются бортовым приемником (10) и с помощью передатчика (11) транслируются на Землю, где, принятые приемником (19) наряду с опорными импульсами и эхо-сигналами, подаются на измеритель групповых задержек и регистратор транзионограмм (29).

На рис. 3 приведены ионограммы ВнЗ и ОТИЗ, полученные при работе этой схемы синхронизации. По горизонтали отображается частотная сетка зондирования, а по вертикали — строки, соответствующие глубине зондирования P' с максимумом, равным 2000 км.

Видно, что при перемещении ИСЗ по орбите сигнал наземного передатчика сдвигается по строке и может выйти из временного окна работы приемника бортового ионозонда на частоте излучения наземного передатчика. Чтобы этого избежать, схема ОТИЗ была модернизирована [12]. Ее отличительной особенностью является сдвиг во времени импульсного радиосигнала зондирующей частоты наземного передатчика в зависимости от положения ИСЗ для попадания излученного с Земли импульса во временное окно приемника бортового

ионозонда.

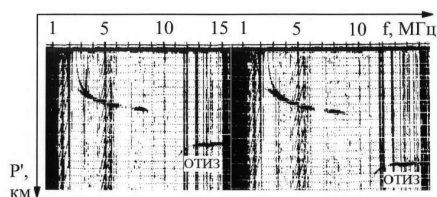


Рис. 3. Сдвиг во времени следа наземного зондирующего передатчика при ОТИЗ для последовательных положений ИСЗ в эксперименте с ИСЗ «Космос-1809»

В случае круговой орбиты спутника высотой 800 км спутник становится видимым над линией горизонта, когда расстояние до него меньше 3300 км. Время распространения импульса трансionoсферного зондирования от спутника до наземного приемника не будет превышать 11 мс (без учета задержки в ионосфере). Однако при работе вблизи критической частоты максимума ионосферного слоя может появиться значительная задержка. Т. к. частота повторения зондирующих импульсов обычно жестко задана, то необходимо сдвигать момент излучения наземного ионозонда относительно бортового, чтобы приемник наземного ионозонда мог принимать импульсы, излученные бортовым на частотах, близких к критической частоте и, следовательно, задерживаемых в ионосфере в наибольшей степени, так, чтобы они приходили к наземному ионозону в течение интервала 17 мс, т. е. при открытом входе приемника.

Успешное проведение ТИЗ или ОТИЗ достигается введением схемы опережения, когда в наземной аппаратуре предусмотрена система дискретной временной компенсации, определяемой расчетом, изменения наклонной дальности от ИСЗ до наземного пункта и контролем времени прихода на борт зондирующего сигнала наземного ионозонда по кадру бортовой ионограммы ВнЗ. При этом требования, предъявляемые ТИЗ и ОТИЗ, противоположны. Поэтому при действующих дальностях до спутника, превышающих 5000 км, возникают проблемы обработки сигналов при одновременном использовании ТИЗ и ОТИЗ.

Синхронизация нескольких наземных импульсных ионозондов и спутникового ионозонда ИОН-1 была реализована в ряде экспериментов с ИСЗ. Так, при работе с ИСЗ «Космос-1809» наземные ионозонды

располагались в пунктах Ростов, Москва и Горьковская (СПб) практически в плоскости магнитного меридиана. Расстояния между пунктами составляли примерно 1000 км (Ростов – Москва) и 1500 км (Ростов – Горьковская (СПб)). Бортовой ионозонд работал в диапазоне частот 0,3–15,995 МГц, с дискретной перестройкой по частоте и кусочно-линейным законом перестройки. Эти параметры были воспроизведены на наземных ионозондах с тем отличием, что частотный диапазон начинался с минимальных частот наземных ионозондов (обычно 1 МГц). Синхросигналы для совместной синхронной перестройки выделялись из канала научной телеметрии ИСЗ в режиме непосредственного сброса информации НПТС. Для этих экспериментов был характерен большой уровень помех в канале НТМ, что объясняется не только высоким уровнем промышленных помех и радиопомех, но и работой близких наземных передатчиков и помехами от метеоспутника «Метеор», располагавшегося на орбитах, подобных орбитам ионосферного ИСЗ и излучавшего на тех же частотах НТМ. Для обеспечения надежной синхронизации дополнительно были применены помехоустойчивые устройства выделения кадровых импульсов. В наземной аппаратуре сформирован кадр, аналогичный бортовому кадру ионозонда, корректируемый по сигналам с ИСЗ. Использована и описанная выше схема дискретной временной компенсации временных сдвигов. На наземных пунктах кроме сигналов ТИЗ были зарегистрированы и трансionoграммы ОТИЗ, принятые на борту во временных окнах в зоне радиовидимости ИСЗ с наземных пунктов. В пункте Горьковская (СПб) на наземном ионозонде наблюдались и синхронные ионограммы НЗ при излучении наземного передатчика из пункта Ростов [13].

В другом эксперименте с бортовым ионозондом АИ-804, установленном на КС «Мир», были получены худшие результаты из-за ненадежной работы схемы синхронизации. В первую очередь это было связано с нестабильностью работы канала научной телеметрии, антенны которого затенялись конструктивными элементами КС «Мир» в зависимости от ракурса КС. Уровень сигнала в канале на протяжении сеанса связи периодически падал ниже шумов. Для обеспечения ОТИЗ и синхронной работы наземных и бортового ионозонда при ненадежном канале передачи синхросигналов была использована схема временной частоты

тактирующего генератора к наземному аналогу хронизатора бортового ионозонда [14]. Существенным недостатком этого варианта ОТИЗ была работа без отсутствия надежной обратной связи, когда сигнал наземного передатчика не визуализируется оператором в кадре бортового ионозонда, и поэтому адаптация эксперимента к изменяющимся ионосферным условиям и техническим параметрам системы затруднена.

СИНХРОНИЗАЦИЯ ЗА СЧЕТ ПРИВЯЗКИ К МИРОВОМУ ВРЕМЕНИ

В ближайшее время для спутникового зондирования планируется сформировать космический сегмент «Ионозонд», включающий четыре ионосферных спутника с новыми бортовыми ионозондами «Лаэрт» [9]. Эти ионозонды, предназначенные для глобального регулярного и оперативного мониторинга ионосферы Земли, предполагается размещать попарно на двух орбитах высотой около 800 км и 600-650 км с наклоном около 98° и 97° , сдвинутых по долготе на 90° . Определен диапазон зондирования 0,1-20 МГц на 400 дискретных частотах в стандартном режиме. Частота повторения зондирующих импульсов выбрана равной 50 Гц, поэтому длительность кадра в стандартном режиме составляет примерно 8 с. Кадры следуют через 10, 30 или 60 с, т. е. ионограммы ВнЗ регистрируются через 80, 240 или 480 км. В техническом описании проекта ионозонда «Лаэрт» зафиксировано, что синхронизация наземно-спутниковой системы мониторинга будет осуществляться по сигналам времени, полученным по GPS.

Разработка современных методик и аппаратуры для синхронной работы бортовых и наземных ионозондов становится актуальной в связи с запуском в эксплуатацию новых наземных и бортовых ионозондов. Четыре бортовых ионозонда должны формировать пространственно-временную картину состояния ионосферы в глобальном масштабе методом ВнЗ с темпом 6, 2 или 1 кадр в минуту. Региональная наземная сеть должна состоять из не менее чем 15 ионозондов, проводящих зондирование автономно, по своей программе, но не реже, чем 1 раз в час. Должны регистрироваться параметры нижней ионосферы при ВЗ и НЗ. В таком случае потребитель получает суммарную информацию об ионосфере, но теряются оперативность мониторинга и возможность реализации пространственно-временной

томографической картины всей толщи ионосферы, получаемой только при совместном зондировании методами ВЗ, НЗ, ВнЗ, ТИЗ и ОТИЗ. Потенциальная точность такой системной томографии превышает в 5-8 раз точность реконструкции ионосферных разрезов, получаемых при томографии с помощью навигационных ИСЗ.

В настоящее время наличие систем GPS и ГЛОНАСС позволяет определять мировое время, как на наземной станции ионосферного зондирования, так и на борту КА, с точностью ± 1 мкс. Это, в принципе, позволяет отказаться от передачи импульсов синхронизации между бортовой и наземной аппаратурой. Время распространения данных импульсов зависит от положения КА относительно наземной станции и состояния ионосферы, в связи с чем его учет является достаточно сложным делом и не может быть произведен без внесения существенных погрешностей в результаты трансionoсферного зондирования.

Детектируя зондирующий импульс в месте его излучения и определяя сдвиг момента его излучения относительно меток мирового времени, можно провести коррекцию как моментов излучения зондирующих импульсов, так и результатов эксперимента.

Коррекция моментов излучения предполагает, что на каждой частоте зондирования будет измерен временной сдвиг хронизатора ионозонда относительно расчетного временного положения данного импульса (мировое время), все измеренные сдвиги будут запомнены и использованы в последующих кадрах («регулировка назад»). При этом можно устранить систематические ошибки в моменте излучения зондирующих импульсов, а также медленные (> 1 с) составляющие случайных ошибок.

Коррекция результатов эксперимента (в ходе самих измерений или при последующей обработке результатов, «регулировка вперед»), в принципе, позволяет полностью устранить погрешности, связанные с неточностью привязки зондирующих импульсов к мировому времени.

При этом в идеальном случае остается только взаимная невязка времени в бортовой и наземной аппаратуре, равная $\sqrt{1+1} \approx 1,5$ (мкс), что соответствует точности около 0,5 км и достаточно для пространственных измерений при требуемой точности расчета ионограмм 5-10 км [19]. Т. к. обычно требуется точность порядка 10 км, возможно, ее удастся достигнуть без использования указанных выше мер, а просто

используя аппаратуру «Парус» и «Лаэрт» в их штатном режиме.

По предварительным результатам метрологической аттестации ионозонда «Парус», запаздывание зондирующих импульсов относительно их запрограммированного положения во времени, задаваемого секундными метками системы GPS, составляет примерно $(7,5 \pm 0,5)$ мкс. При этом систематическая составляющая запаздывания может быть исключена либо регулировкой аппаратуры, либо программно. Поскольку «Лаэрт» разрабатывается на основе «Паруса», можно предположить, что случайная составляющая задержки у него будет того же порядка (что, несомненно, должно быть подтверждено документально). В этом случае точность временной привязки даже без использования методов коррекции, изложенных выше, достаточна для определения пространственных координат с точностью ± 600 м, что в настоящее время достаточно.

Обычно в качестве приемника трансионосферного зондирующего импульса служит приемник другого ионозонда, осуществляющего собственное ВЗ (или ВнЗ). Эти два вида зондирования не мешают друг другу, если совпадают как частоты наземного и бортового ионозондов, так и моменты излучения зондирующих импульсов. Т. е. реализуется не только синхронность, но и однозначность перестройки. Действительно, если значение f_oF_2 в месте расположения наземного ионозонда не превышает его значение на трассе между бортовым и наземным ионозондами, на частотах ниже критической зондирующие импульсы отражаются от ионосферы, бортовой и наземный ионозонды «не видят» друг друга, ТИЗ и ОТИЗ не осуществляются. ТИЗ и ОТИЗ в этом случае возможны только на частотах, превышающих критическую в месте расположения наземного ионозонда, причем превышение должно быть тем больше, чем сильнее прямая, проходящая через оба ионозонда, отклоняется от вертикали. На этих частотах, в свою очередь, прекращаются ВЗ и ВнЗ. На практике это не всегда выполняется – могут быть «перехлесты», если f_oF_2 на трассе между бортовым и наземным ионозондами достаточно низка. При этом также, как и в указанном выше случае большого расстояния до ИСЗ, необходимо сдвигать между собой моменты излучения бортового и наземного ионозондов.

Одновременное проведение ТИЗ и ОТИЗ при квазисинхронном излучении зондирующих импульсов бортовым и наземным ионозондами может дать преимущества в точности пространственных измерений. Как известно [20], коэффициент преломления N определяется из соотношения

$$N^2 = \frac{2\varepsilon\eta + (\varepsilon^2 - g^2 - \varepsilon\eta)\sin^2\theta \pm \sqrt{4\eta^2 g^2 \cos^2\theta + (\varepsilon^2 - g^2 - \varepsilon\eta)^2 \sin^4\theta}}{2\varepsilon\sin^2\theta + 2\eta^2 \cos^2\theta}$$

где θ – угол между направлением распространения электромагнитной волны и магнитным полем, остальные переменные здесь не расшифровываем, поскольку это не существенно для дальнейшего. Из соотношения следует, что изменение θ на 180° не меняет коэффициент преломления. Следовательно, если не учитывать смещение спутника за время прохождения импульса ТИЗ и ОТИЗ (< 130 м), а также различие в частотах импульсов ТИЗ и ОТИЗ, можно считать времена распространения импульсов ТИЗ и ОТИЗ равными. Импульс ТИЗ излучается в соответствии с часами GPS, находящимися на наземном ионозонде, а время его прихода регистрируется по часам GPS, находящимся на бортовом ионозонде. Если часы на Земле опережают бортовые на ΔT , то время распространения импульса ТИЗ будет занижено на ΔT . При этом время распространения импульса ОТИЗ будет завышено на ΔT . Следовательно, их средняя величина не будет зависеть от точности часов, а разность времен можно использовать для определения точности привязки времени излучения зондирующих импульсов к мировому времени.

На выходе ионозонда «Лаэрт» формируется сжатая цифровая ионограмма ВнЗ, которая передается на штатную аппаратуру хранения бортовой информации 3 и 4 (рис. 1). Накопленные за несколько витков ионограммы сбрасываются на Землю по штатной телеметрии, а ионограммы, получаемые в темпе зондирования, предаются на входящий в структуру ионозонда передатчик научной телеметрии (11) «137 МГц» для оперативного сброса на каждый из 15 наземных ионосферных пунктов Росгидромета. Именно в этом режиме непосредственного сброса информации можно осуществить синхронные ТИЗ и ОТИЗ.

Следует отметить, что синхронизация часов по сигналам навигационных ИСЗ (в том числе GPS) может нарушаться при сильных

вспышках на Солнце, вплоть до потери всего сеанса связи на освещенной стороне Земли [17]. Именно в это время оперативная ионосферная информация и необходима потребителям. Для исключения подобных случаев на борту должен быть надежный автономный хранитель точного времени, который может дополнительно сверяться с часами геостационарных ИСЗ, передача информации с которых идет на больших, менее подверженных сбоям частотах. Проблема может быть также решена за счет сохранения системы синхронизации с помощью синхроимпульсов.

Подобная схема синхронизации со сверяемыми по GPS или ГЛОНАСС часами возможна и для ТИЗ с геостационара [18]. Моментом, облегчающим работу схемы синхронизации в этой системе, является практически неизменное расстояние от бортового ионозонда до наземных пунктов с ионозондами, поэтому может использоваться низкоскоростное зондирование со сложными сигналами, что дополнительно улучшает энергетику канала зондирования. Аппаратура синхронизации в такой задаче может быть подобна используемой для наземного НЗ.

Космический сегмент «Ионозонд» с четырьмя ионозондами и сетью наземных ионозондов из (15 и более) при совместной работе создает сложное поле импульсного излучения в пространстве и во времени. Из практики ионосферного зондирования известно, что даже два наземных ионозонда, работающих по близким программам, в зоне радиосвязи друг с другом создают взаимные помехи, затрудняющие интерпретацию данных. При осуществлении синхронного системного зондирования для каждого из бортовых ионозондов следует предусмотреть разные частоты передатчиков научной телеметрии и сдвиг во времени начала кадров зондирования. Для наземных ионозондов при синхронной работе с бортовыми ионозондами необходим переход от стандартной временной сетки ежечасных ионосферных наблюдений на режимы зондирования, определяемые режимами бортовых ионозондов. Кроме того, при системном зондировании может наступить перенасыщение ионосферной информацией, поэтому следует предусмотреть возможность работы системы с определением приоритетов во времени и по регионам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для совместной синхронной работы

наземных и спутниковых ионозондов необходим единый для системы мониторинга протокол, регламентирующий диапазоны зондирования, структуру используемых сигналов, временные режимы и т. п. Целесообразно введение в НТМ сигнал специальной квитанции о номере ИСЗ, режимах зондирования и варианте временной привязки для оперативной подстройки наземной аппаратуры под режим каждого спутника.

При развертывании космического сегмента «Ионозонд», для бортовых ионозондов которого НТМ передатчик канала научной телеметрии предполагается включать в состав ионозонда, для первого ИСЗ, возможно, необходимо сохранить аналоговый сброс информации с синхрометками.

Наземные ионозонды должны иметь синхронизатор, позволяющий по сигналам точного времени, в том числе сигналам GPS или ГЛОНАСС или внешним маркерам, включать программу совместной синхронной работы.

Для обеспечения ЭМС (в том числе исключения наложения ионограмм и трансионограмм в кадрах) режимы работы ионозондов и время их зондирования в сети следует сдвигать во времени по определенной утвержденной сетке, связанной с мировым временем. 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.

Учитывая практику НЗ зондирования ЛЧМ-зондами, аппаратно-программные решения и режимы проектируемых сетевых ионозондов ионосферной службы целесообразно разрабатывать с целью получения и ионограмм НЗ ЛЧМ зондирования в интервалах времени, свободных от импульсного ВЗ и НЗ, и спутникового зондирования.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Н.П. Данилкину и за интерес к работе, а также д.т.н. А.В. Тертышникову и к.ф.-м.н. А.А.Важенину за переработку статьи из-за выявленных критичных ошибок, практически полезные советы, корректуру, подготовку, правку и опубликование статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е. и др. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях (обзор) // Радиофизика. 2003. Т. 34, № 11. С. 919-952.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю., Назаренко М.О., Вапиров Ю.М., Иванов И.И. Трансконтинентальная радиотомографическая система. Результаты первых ионосферных измерений // Вестник МГУ. Сер. Физика. 2009. № 6. С. 180–184.
3. Афраймович Э.А. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли / Э.Л. Афраймович, Н.П. Перевалова. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
4. McNamara L.F., Decker D.T., Welsh J.A., Cole D.C., Validation of the Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) model predictions of the maximum usable frequency for a 3000 km circuit. Radio Science. 2007. Vol. 42.
5. Лапшин В.Б., Пулинец С.А., Денисова В.И., Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П. Перспективы развития российской ионосферной службы на основе сети ионосферных станций наземного радиозондирования и специализированных спутников и ионозондами // Труды XXIII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-23. 2011. Т. 1. С. 71-75.
6. Иванов И.И., Журавлев С.В. Синхронная работа перспективных бортовых и наземных ионозондов при системном зондировании ионосферы // Труды XXIII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-23. 2011. Т. 1. С. 359-362.
7. Иванов И.И., Журавлев С.В. Пространственное разрешение при спутниковом ионосферном зондировании // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14, № 5. С. 25-28.
8. Данилкин Н.П., Иванов И.И., Киселев Г.Н., Ковалёв С.В. Проблема синхронизации при трансionoсферном зондировании с ИСЗ «Интеркосмос-19» // Аппаратура для исследования внешней ионосферы. М.: Наука, 1980. С.287-289.
9. Тertyshnikov A.B., Bolshakov V.O. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (Galileo) // Информация и космос, 2010, № 1. С.100-105.
10. Васильев Г.В., Гончаров Л.П., Данилкин Н.П., Иванов И.И., Кушнеревский Ю.В., Фаер Ю.Н. Устройство для исследования ионосферы. Авт. свид. СССР № 620 131. 1975.
11. Васильев Г.В., Данилкин Н.П., Иванов И.И., Киселев Г.Н., Кушнеревский Ю.В. Устройство для исследования ионосферы. Авт. свид. СССР № 778 529. 1979.
12. Васильев Г.В., Иванов И.И., Ковалев. Устройство для исследования ионосферы. Авт. свид. СССР № 1 340 383. 1986.
13. Васильев О.В., Данилкин Н.П., Журавлев Н.П., Иванов И.И., Киселев Г.Н., Рябов В.В., Шумилов И.А. Синхронизация сети ионосферных станций по сигналам ИСЗ при системном зондировании // Тезисы докладов конференции «Радиофизическая информатика». Москва, ноябрь 1990 г. 95 с.
14. Букин Г.В., Г.В. Васильев, Гончаров Л.П., Иванов И.И., Киселев Г.Н., Коробков Ю.С. Способ исследования магнитосферы и устройство для его осуществления. Авт. свид. СССР № 882 330, 1980.
15. Парфенов Г.А. Сличение и синхронизация частоты задающих генераторов в сетях многоканальной связи по эталонным сигналам частоты и времени. Метрология и измерительная техника в связи. 1999. № 6.
16. Ми-Хва Ох. Способ тактовой синхронизации и устройство синхронизации для осуществления способа в синхронной распределенной сетевой системе. Патент РФ. № 2 146 419. 2000.
17. Афраймович Э.Л., Демьянов В.В., Ишин В.В., Смольков Г.Я. Сбои функционирования спутниковой навигационной системы GPS, обусловленные мощным радиоизлучением Солнца во время солнечных вспышек 6 и 13 декабря 2006 г. //Труды XXII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-22. С. 72-75.
18. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Крашенинников И.В. Об особенностях трансionoсферного зондирования с борта геостационарного ИСЗ // Труды XXIII Всеросс. научн. конф. «Распространение радиоволн» РРВ-23. 2011. Т. 1. С. 307-310.
19. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Перевод с английского второго издания "URSI HANDBOOK OF IONOGRAM INTERPRETATION AND REDUCTION". М.: Наука. 1978. -342с.
20. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. – М., 1988.