УДК 50.388.2

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ В АРКТИКЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИОНОЗОНДОВ

Н.П. Данилкин, Г.А. Жбанков, С.В. Журавлев, Н.Г. Котонаева, В.Б. Лапшин, И.В. Романов

Поступила в редакцию 29.12.2015 г.

Предложен мониторинг арктической ионосферы на основе системного радиозондирования с космическими аппаратами на высокоэллиптической орбите с апогеем над Северным полюсом. Для реализации внешнего зондирования используется корреляционный радиоприём с возможностью накопления эхо-сигналов. Проведено моделирование ионограмм внешнего зондирования. Показано, что такой мониторинг позволяет наблюдать всю динамики возникновения, развития и исчезновения ионосферных неоднородностей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, АРКТИКА, ИСКУССТВЕННЫЙ СПУТНИК, ИОНОЗОНД, КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ РАДИОПРИЕМ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОГРАММ, ФРЕНЕЛЕВСКИЙ ОБЪЕМ, ГЕОМЕТРООПТИЧЕСКОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ, ДИСПЕРСИЯ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Использование ионосферы в Арктике, включающее процессы наблюдения, оценки и прогноза её состояния, значительно осложнены особенностями авроральной ионизации и структуры магнитного поля в этой области. Наличие, а также быстрое перемещение разнообразных неоднородных структур в ионосфере арктической зоны является типичным состоянием этой среды. Для ионосферного прогноза, нацеленного на работу КВ-радиолиний, здесь совершенно необходимо непрерывное получение оперативной информации. Предварительные расчеты показали, что наиболее полно мониторинг ионосферы для всего арктического региона целесообразно проводить на основе системного радиозондирования ионосферы с использованием ионозондов космического базирования. Проведенная экспедиция [1], работавшая для приема ионограмм внешнего радиозондирования, на всех широтах арктического региона подтвердила это положение и обеспечила банк неоднородностей и электромагнитных шумов, характерных (к сожалению, только) для лета в Арктике. Эти данные легли в основу тех размеров и контрастности неоднородностей, которые используются при введении неоднородностей в моделях ионосферы, использованных в данной работе.

Материалы экспедиции также показали, что техника проведения внешнего радиозондирования с круговых или близких к ним ИСЗ позволяет увидеть и рассмотреть в деталях те или иные ионосферные неоднородности, но не позволяет видеть динамику их развития. Поэтому для дальнейшего продвижения целесообразно рассмотреть высокоорбитальный носитель для космического ионозонда. В этом случае будет устранено главное несовершенство спутниковых методов радиозондирования ионосферы — слишком быстрое перемещение ионозонда над поверхностью Земли и слишком малое пространство ионосферы исследуемого региона.

Однако для эллиптических высокоорбитальных орбит выбор времени нахождения одного ионозонда над особо исследуемым районом — в нашем случае над Арктикой — не является простым. Дело в том, что при круговых орбитах горизонтальная скорость спутника ориентировочно в 7 км/с приводит (при классической схеме ионозонда) к получению последовательности ионограмм примерно с 10-секундными интервалами или с обзором ионосферы через 70 км. При этом если обнаружена неоднородность, то увидеть динамику её изменения практически невозможно, так как ионозонд быстро уходит из области её обнаружения. С другой стороны, при высокоэллиптических орбитах длительное

Лапшин Владимир Борисович, д.ф.-м.н., ФГБУ "ИПГ", т. +74991878186, e-mail: director@ipg.geospace.ru Данилкин Николай Петрович, д.ф.-м.н., ФГБУ «ИПГ», т.+74991813622, e-mail: nickdanilkin8@yandex.ru Жбанков Геннадий Анатольевич, ЮФУ, г.Ростов-на-Дону, ст. научный сотрудник, т.+78632419056, e-mail: zhbankov@ip.rsu.ru Журавлёв Сергей Владимирович, к.ф.-м.н., ФГБУ «ИПГ», заведующий отделом, +74991810441, e-mail: szhuravlev-iag@ya.ru Котонаева Надежда Геннадьевна д.ф.-м.н., ФГБУ «ИПГ»,зам. зав. отд, т.+74991813622, e-mail: kongt@yandex.ru Романов Илья Владимирович, ФГБУ «ИПГ», инженер-электроник время наблюдения проводятся с очень большой высоты и, соответственно, отражённый от ионосферы эхо-сигнал ослабляется, что ведёт, к усложнению схемы его регистрации.

Практика оперативной работы наземных служб с аппаратурой на ИСЗ показала, что для более успешной работы целесообразно, чтобы спутники появлялись в рабочее время операторов, т.е. разумно использование так называемых солнечно-синхронных орбит. При таких орбитах спутник появляется над наземной станцией в хорошо известное и всегда постоянное местное время. Учет всех этих особенностей приводит к тому, что вырисовываются несколько высоко апогейных орбит, на первый взгляд пригодных для проведения внешнего зондирования в таком сложном регионе, как Арктика.

2. ОРБИТЫ СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ СПУТНИКОВ ДЛЯ АРКТИКИ

Первая возможная полярная орбита имеет параметры: апогей — 40000 км от поверхности Земли, перигей — 500 км, и период одного оборота — 12 часов (рис.1). Апогей находится над Северным полюсом нашей планеты, а перигей — над Южным. Эксцентриситет орбиты — 0,74, долгота апогея выбирается также удобной для наблюдателя, скажем долгота Москвы. Цифрами на рис.1 обозначены расстояния в километрах между спутником и поверхностью Земли и часовые интервалы вдоль орбиты. Хорошо видно, что подавляющее время одного витка спутник находится над Арктикой. Однако, это максимально удаленная в апогее от поверхности Земли орбита, и здесь будет наблюдаться максимальное ослабление сигнала передатчика ионозонда. С другой стороны, при этом будет наблюдаться максимальное время непрерывного радиозондирования над Арктикой и, тем самым, будет обеспечена максимальная возможность наблюдения динамики развития ионосферных неоднородностей ионосферы.



Рис. 1. Солнечно-синхронная 12-часовая наиболее высокоапогейная орбита для проведения внешнего радиозондирования над Арктикой.

Вторая полярная орбита может быть выбрана с периодом в два раза меньшим, чтобы облегчить условия приема сигналов ионозонда вблизи апогея: здесь апогей находится на высоте 20343 км, перигей, соответственно, 485 км и период 6 часов. Эксцентриситет — 0,591. При этом спутник почти 4 часа будет находиться над северными регионами планеты. Этого времени вполне хватит для регистрации относительно коротко живущих и средне живущих неоднородностей. Можно ожидать, что более долго живущие неоднородности будут фиксироваться в течение двух или нескольких оборотов спутника. В качестве третьей орбиты можно рассмотреть эллиптическую орбиту с апогеем на высоте 11829 км, перигеем 500 км и эксцентриситетом — 0,468. В этом случае высота апогея будет всего лишь в три раза превышать высоту ионозонда на ИСЗ ISIS 2.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Современное состояние техники радиозондирования и новые — апробированные в трех космических экспериментах (Интеркосмос-19, Космос-1809 и космическая станция МИР [2, 3, 4]) — методы диагностики состояния ионосферы позволяют на современном этапе предложить схемы построения комплекса ионозондов системного радиозондирования, удовлетворяющих условиям вышеприведенных орбит высокоапогейных ИСЗ. Указанный комплекс содержит от 7 до 11 станций, расположенных на островах и северных землях РФ, и использует методы наземного и спутникового радиозондирования с дополнениями в виде прямого ТИЗ [6] и обратного ОТИЗ трансионосферного радиозондирования.

Для того, чтобы выбрать орбиту, надо провести экспериментальное моделирование данной задачи на наземном ионозонде с модуляцией и кодированием радиосигналов, которые предполагаются к использованию на рабочем ИСЗ. И по результатам моделирования выбрать одну из трех предложенных орбит.

Именно, в случае, если выбрана та или иная орбита, следует:

1. Оборудовать комплекс станций ионозондами системного радиозондирования с использованием всех 4-х его типов — наземного вертикального, внешнего, прямого и обратного трансионосферного радиозондирования.

2. Вывести высокоэллиптический КА с ионозондом, работающим в диапазоне 1–20 МГц, на выбранную орбиту ИСЗ.

3. Проводить оперативную автоматическую обработку всех получаемых ионограмм и по результатам строить непрерывно изменяемую модель всей арктической ионосферы.

Искомый результат. Мониторинг ионосферы в оперативном режиме над всем арктическим регионом РФ с выделением зон ионосферных неоднородностей, которые создают главные проблемы при организации радиосвязи в высоких широтах. Соответственно, оперативный расчет всех параметров КВ-радиосвязи на всех радиотрассах в Арктике на базе осуществления радиозондирования ионосферы в диапазоне плазменных частот основных ионосферных слоев.

4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

На выбор орбиты в основном оказывают влияние значительные потери энергии зондирующего сигнала на распространение в свободном пространстве. Например, разность потерь мощности сигнала при отражении от Земли между высокоорбитальным и низкоорбитальным ионозондом может быть около 100 дБ. Специфика использования бортового ионозонда заключается в том, что мощность передатчика ограничена, а габариты спутника не позволяют развернуть узконаправленную антенну. Поэтому для реализации внешнего зондирования с высокоапогейного ИСЗ необходимо усложнение формы зондирующего импульса совместно с работой в режиме накопления измерений.

Проведём расчёт схемы проведения сеанса внешнего зондирования ионосферы с фазовокодовой модуляцией для самой удаленной точки (точка 6, дальность 40000 км) высоко апогейного ИСЗ. При фазовой манипуляции по коду Баркера [5] 4-го порядка излучаемый радиоимпульс может быть разбит на четыре периода с длительностью каждого в 20 мкс, в которых фаза модулируемого сигнала будет меняться следующим образом (0°, 180°, 0°, 0°). Длительность радиоимпульса увеличивается ещё на 10 мкс, необходимые для реализации плавного нарастания (5 мкс) и спада (5 мкс). В этом случае полная длительность излучаемого высокочастотного импульса будет $t_{imp} = 90$ мкс. Такая амплитудно-фазовая модуляция более устойчива к гармонической помехе по сравнению с обычной амплитудной модуляцией. Выбор 4-го порядка кода Баркера не является принципиальным и может быть изменён в зависимости от внешних условий. В таблице 1 представлены временные задержки радиоимпульса от поверхности Земли T_0 и от верхней границы исследуемой ионосферы (T_{1000}), которая принята здесь в 1000 км.

	Номер сеанса								
	12	1, 11	2, 10	3, 9	4, 8	5,7	6		
<i>Т</i> ₀ , мс	3	84	159	209	246	260	267		
<i>T</i> ₁₀₀₀ , мс	-	76	152	202	238	252	260		

Таблица 1. Время запаздывания сигнала

Зондирующий радиоимпульс преодолевает расстояние с орбиты до Земли и обратно ($r=2\cdotR=2\cdot40000$ км = 80000 км). Тогда, принимая скорость распространения радиоимпульса в околоземном пространстве равной скорости света в вакууме, получаем, что время распространения сигнала с ИСЗ до верхнего слоя ионосферы (на высоте 1000 км) и обратно составляет $T_{1000}=260$ мс, до Земли $T_0=267$ мс. Длительность излучения на одной частоте $t_{imp} = 90$ мкс. На всех частотах ($N_f=380$ частот, шаг по частоте $\Delta f = 50$ кГц) пакет волн имеет длительность $T_k \cdot m = 90x380 = 34\ 200\$ мкс = 34,2 мс. Это означает, что за время распространения пакета от момента его излучения до приема можно излучить ещё 6 аналогичных пакетов радиоволн. При этом останется еще 20,6 мс до приема первого пакета. Таким образом, весь сеанс будет закончен через (260 + 246,7) мс ≈ 507 мс. В конце второго сеанса на каждой частоте произошло накопление 14 импульсов каждой из 380 частот. После третьего сеанса их будет 21 и т.д. Когда накопленный сигнал выйдет из-под уровня шума на величину достаточную для работы канала оцифровки сигнала, происходит оцифровка и строится ионограмма. Эта схема организации внешнего зондирования для точки 6 и дальности 40000 км показана на рис. 2.

Ионограмма формируется многократным повторением сеансов, и это повторение заканчивается после выхода сигнала из-под уровня шума. Каждый сеанс состоит из времени излучения и приема одного пакета. Каждый пакет состоит из нескольких (от одного до семи) кадров. Каждый кадр содержит 380 радиоимпульсов.

Введём следующие обозначения. Количество частот в кадре

$$N_f = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f}$$

 f_{max} — максимальная частота зондирования, f_{min} — минимальная частота зондирования, Δf — шаг изменения частоты. Длительность кадра

$$T_k = N_f \cdot t_{imp},$$

где *t_{imp}* – длительность радиоимпульса. Число кадров в пакете

$$m = \frac{T_{1000}}{T_k}$$

Длительность сеанса

$$T_S = T_{1000} + T_0 - (T_{1000} - m \cdot T_k) = T_0 + m \cdot T_k$$

Существенным моментом выбора параметров внешнего зондирования для высокоэллиптического ионозонда является мощность передатчика ионозонда. Практика работы на отечественных ИСЗ, уверенно показала, что ионозонд не оказывает подавляющего влияния на всю остальную измерительную и штатную электронную аппаратуру спутника. Все уверенно работало при средней мощности в 300 – 400 Ватт. Поэтому можно ожидать, что мощность в 600 Ватт также не будет подавлять остальные эксперименты на спутнике, но одновременно этой мощности (как будет показано дальше) окажется достаточно для уверенного приема на высоко апогейном спутнике отраженных от ионосферы Земли сигналов.



Рис. 2. Диаграмма сигналов сеанса зондирования ионосферы бортовым ионозондом



Рис. 3. Схема прохождения сигналов по передающему и приёмному трактам и в свободном пространстве.

На рисунке 3 представлена схема прохождения сигналов в ионозонде и свободном пространстве.

Введём следующие обозначения: $P_{\text{вых}}$ — мощность сигнала на выходе устройства обработки сигналов (УОС), и входе усилителя мощности (дБм); $P_{\text{вх}}$ — мощность сигнала на входе УОС (дБм); $P_{\text{ум}}$ — мощность на выходе усилителя мощности (дБм); $P_{\text{эхо}}$ — мощность эхо-сигнала на входе приёмника (дБм); $P_{\phi o \mu}$ — мощность электромагнитного фона, $P_{\text{ш}}$ — мощность шумов приёмного; D — потери энергии электромагнитной волны на распространения в свободном пространстве; G_1 , дБ — коэффициент усиления передающей антенны; G_2 , — коэффициент усиления приёмной антенны; G_3 , дБ — потери мощности электромагнитной волны при отражении от ионосферы. Значение мощности сигнала P = 0 дБм, соответствует мощности P = 1 мВт.

Вход и выход УОС приведены к уровню 0 дБм (1 мВт). Этот выбор удобен для упрощения расчётов прохождения сигналов по усилительному тракту и в свободном пространстве, т.к. в этом случае общее усиление приемного и передающего тракта должно равняться общим потерям сигнала. Величина сигнала на выходе усилителя мощности и сигнала на выходе УОС связаны следующим выражением

$$P_{\rm YM} = P_{\rm вых} + K_1$$
, дБм,

где *К*₁, дБ – коэффициент усиления усилителя мощности.

Величина $P_{\text{вх}}$, мВт, равняется сумме ($P_{\phi o \mu} + P_{\mu} + P_{\mu xo}$), мВт, умноженной на коэффициент усиления приёмника K_2 , тогда в дБ:

$$P_{\rm BX} = 10 \cdot \lg(P_{\rm фон} + P_{\rm III} + P_{\rm 9X0}) + K_2, \, {\rm дБм}.$$

Величины мощностей Р_{вых}=0 дБм и Р_{вх}=0 дБм, тогда

$$P_{\rm YM} = K_1, \, {\rm дБM}$$
 $K_2 = -10 \cdot \lg(P_{\rm dot} + P_{\rm III} + P_{\rm 3xo}), \, {\rm дБ}.$ (1)

Таким образом, чтобы определить величину коэффициента усиления приёмного тракта необходимо знать уровень шумов приёмника, уровень электромагнитного фона и уровень эхо-сигнала.

Фоновые шумы. Будем считать то основным источником фоновых шумов $P_{\phi o H}$ в диапазоне частот 1,0–20,0 МГц является излучение мощных радиостанций на поверхности Земли. Оценим величину сигнала радиостанции дошедшего до текущей орбиты бортового ионозонда. Для радиостанции мощностью 6 кВт (68 дБм) и коэффициентом направленности антенны 6 дБ в условиях ионосферы без поглощения величина $P_{\phi o H}$ на орбите в наиболее удаленной точке приведена в таблице 2.

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

	Р _{фон} , дБм								
<i>f</i> , МГц <i>r</i> , км	1	2	5	10	15	20			
500	-12,4	-18,4	-26,4	-32,4	-35,9	-38,4			
12500	-40,4	-46,4	-54,4	-60,4	-63,9	-66,4			
23800	-46,0	-52,0	-60,0	-66,0	-69,5	-72,0			
31300	-48,6	-54,8	-62,3	-68,4	-71,9	-74,4			
36800	-49,8	-55,8	-63,7	-69,8	-73,3	-75,8			
38900	-50,2	-56,2	-64,2	-70,2	-73,8	-76,3			
40000	-50,5	-56,5	-64,5	-70,5	-74	-76,5			

	Таблица 2.
Значение Р _{фон} при излучении си	игнала мощностью 74 дБм

Мощность фоновой помехи на заданных высотах зондирования ионосферы превышает мощность шумов приёмника $P_{\phi o \mu} > P_{\mu}$. Поэтому P_{μ} в дальнейших расчётах можно пренебречь P_{μ} .

Величину эхо-сигнала можно вычислить по формуле

$$P_{3xo} = P_{\rm YM} - D + G_1 + G_2 - G_3 \,. \tag{2}$$

Затухание сигнала в свободном пространстве с высокоапогейного ИСЗ рассматриваем как распространение в свободном пространстве от практически изотропного источника с орбиты спутника с апогеем r = 40 тыс. км до поверхности Земли [8,9]:

$$D = 10 \cdot \lg\left(\frac{(4\pi \cdot 2r)^2}{\lambda^2}\right) = 20 \cdot \lg\left(\frac{8\pi rf}{c}\right).$$
(3)

Тогда, получим следующую зависимость от частоты волны.

Таблица 3. Потери мощности радиосигнала на распространение в свободном пространстве

<i>f</i> , МГц	1	2	5	10	15	20
<i>D</i> , дБ	130,5	136,5	144,5	150,5	154,0	156,5

При излучаемой мощности $P_{YM} = 58$ дБм (600 Вт, 50 Ом) и условии $G_1 = G_2 = G_3 = 0$ дБ, величина эхо-сигнала P_{3x0} на частоте 500 кГц равна минус 72,5 дБм, на частоте 20 МГц величина $P_{3x0} = -98,5$ дБм. Для того чтобы оцифровать сигнал и не потерять полезный сигнал необходимо использовать современные аналого-цифровые преобразователи с динамическим диапазоном не меньше 80 дБ и разрешением по напряжению 15 мкВ (соответствует мощности сигнала минус 65 дБм на нагрузке 50 Ом), а сигнал принимаемый на приёмную антенну необходимо предварительно усилить. Разность между уровнем сигнала на частоте 1 мГц и 20 МГц составляет приблизительно 26 дБ. Коэффициент усиления приёмного тракта K_2 = зависит от уровня фона (1) и может варьироваться в диапазоне 0–80 дБ. В зависимости от удалённости бортового ионозонд от поверхности Земли. С учётом того что уровень эхо-сигнала P_{3x0} находится ниже уровня электромагнитного фона $P_{\phi0H}$ регистрацию сигналов необходимо проводить с помощью корреляционного приёма с возможностью накопления результатов измерения. Исследуем, как изменяется корреляционная функция сигнала на выходе ионозонда $x_i(t)$ и сигнала на входе ионозонда $y_i(t-\tau)$. Здесь i — номер повтора зондирующего радиоимпульса. Амплитуду принимаемого сигнала можно представить как сумму эхо-сигнала и некоторой шумовой помехи:

$$y_i(t) = x'_i(t) + \xi(t) = a_i \cdot x_i(t) + \xi(t)$$
(4)

где, $x'_i(t) = a \cdot x_i(t)$ — эхо-сигнал на входе ионозонда; a_i — масштабный коэффициент, характеризующий потери сигнала; $\xi(t)$ — электромагнитный фон (случайный сигнал). Корреляционную функцию $R(\tau)$ для N повторов радиоимпульса можно записать [9,10]

$$\begin{split} R(\tau) &= \sum_{i=1}^{N} \overline{x_i(t) \cdot y_i(t-\tau)} = \sum_{i=1}^{N} \overline{x_i(t) \cdot \left(x_i'(t-\tau) + \xi(t-\tau)\right)} = \\ &= \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot \overline{x_i(t) \cdot x_i(t-\tau)} + \sum_{i=1}^{N} \overline{x_i(t) \cdot \xi(t-\tau)} = \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot R_{xx,i}(\tau) + \sum_{i=1}^{N} R_{x\xi,i}(\tau), \end{split}$$
(5)

с учётом статистической независимости $x_i(t)$ и $\xi(t)$

$$\sum_{i=1}^N R_{x\xi,i}(\tau) \to 0\,,$$

из упрощения $a_i = a$, и $R_{xx,i}(\tau) = R_{xx}(\tau)$

$$R(\tau) = a \cdot \sum_{i=1}^{N} R_{xx,i}(\tau) = a \cdot N \cdot R_{xx}(\tau) .$$
(6)

В (5) корреляционная функция $R(\tau)$ пропорциональна усреднению квадрата амплитуды x_i^2 т.е. мощности. При этом $R(\tau)$ прямо пропорционально количеству повторений радиоимпульса *N*. Например, чтобы увеличить отношение сигнал/шум эхо-сигнала на 10 дБ необходимо использовать 10 повторов радиоимпульса.

В (6) произведение $a \cdot N = \text{const.}$ Принять условие обеспечения выполнения равенства $R(\tau) = R_{xx}(\tau)$ тогда $a \cdot N = 1$, а значит

$$N = \left\lceil \frac{1}{a} \right\rceil. \tag{7}$$

Используя выражения (1), (2) и (4) можно показать, что

$$a = \frac{x'}{x} = 10^{\frac{1}{20}(G_1 + G_2 - G_3 - D + K_1 + K_2)}.$$
(8)

В таблице 4 представлены расчёта количества повторений радиоимпульсов для сеансов зондирования ионосферы на различных высотах орбиты и наличия мощной помехи с эффективной мощностью 25 и 400 кВт на частоте зондирования с поверхности Земли. В этом режиме для каждой частоты (группы частот) подбирается, используя условие (1), такой коэффициент усиления K_2 , тем самым обеспечивается максимальное отношение сигнал/шум на входе УОС.

Таблица 4.

Число радиоимпульсов одной частоты в предположении наличия мощной электромагнитной помехи на поверхности Земли на частоте зондирования

Дальность текущей точки орбиты <i>r</i> , км	12500	23800	31300	36800	38900	40000	
	N+1, шт						
Мощность 25 КВт	14	14	14	14	14	14	
Мощность 400 КВт	51	51	51	51	51	51	

В таблице 5 приведены результаты расчёта количества радиоимпульсов в условиях, когда ионосфера Земли полностью экранирует электромагнитное излучение в диапазоне исследования. В этом случае $P_{\phi o H} = P_{m}$. Однако несмотря на величину $P_{m} = -96,6$ дБм, в расчётах $P_{\phi o H}$ принималось равным минус 80 дБм.

Таблица 5.

Число радиоимп	ульсов одной частоты в предположении экран	ирования
	электромагнитных помех в ионосфере (Рфон	= -80дБ)

<i>N</i> +1, шт		<i>f</i> , МГц									
<i>г</i> , км	1	2	5	10	15	20					
500	1	1	1	1	1	1					
12 500	1	1	2	2	3	4					
23 800	1	2	2	4	5	6					
31 300	1	2	3	4	6	8					
36 800	1	2	3	5	7	9					
38 900	1	2	3	5	7	9					
40 000	1	2	3	5	7	9					

В таблице 6 представлены результаты расчёта длительности времени зондирования T_{30HZ} для различных точек текущих высот, различных уровнях фоновых помех $P_{\phi 0H}$, различных уровней потерь мощности эхо-сигнала в ионосфере G_3 .

					G3=0	дБ	<i>G</i> ₃ =10 дБ	
	N_s	<i>г</i> , км	<i>Т_k</i> , мс	<i>Тs</i> , мс	Кол-во сеансов	<i>Т_{зонд}</i> , с	Кол-во сеансов	<i>Т_{зонд}</i> , с
5 E	1, 11	12 500	76	151,7	2	0,303	20	3,1
0H0	2, 10	23 800	152	295,5	2	0,591	20	5,9
Цфи	3, 9	31 300	202	379,7	2	0,760	20	7,6
	4, 8	36 800	238	450,5	2	0,901	20	9,0
ані 30й	5,7	38 900	252	498,7	2	0,998	20	10,0
джб	6	40 000	260	506,1	2	1,012	20	10,2
	1, 11	12 500	76	151,7	2	0,303	20	3,1
	2, 10	23 800	152	295,5	2	0,591	20	5,9
CTH CTH	3, 9	31 300	202	379,7	2	0,760	20	7,6
лно КЕ	4, 8	36 800	238	450,5	2	0,901	20	9,0
101 25	5,7	38 900	252	498,7	2	0,998	20	10,0
2	6	40 000	260	506,1	2	1,012	20	10,2
	1, 11	12 500	76	151,7	8	1,214	80	12,2
.0	2, 10	23 800	152	295,5	8	2,364	80	23,7
BT	3, 9	31 300	202	379,7	8	3,037	80	30,4
Мощно 400 КЛ	4,8	36 800	238	450,5	8	3,604	80	36,1
	5,7	38 900	252	498,7	8	3,990	80	39,9
	6	40 000	260	506,1	8	4,050	80	40,5

Таблица 6. Расчёт длительности сеанса зондирования T_{30hd} при арифметической прогрессии изменения частоты

Можно отметить, что в условиях, когда шумы ограничены уровнем шумов приёмника бортового ионозонда время зондирования на высоте 40 000 км в условиях, когда от ионосферы отражается десятая часть дошедшей мощности сигнала зондирования, время зондирования $T_{30HZ} = 10,2$ с. Если на поверхности Земли на частоте зондирования работает радиостанция эффективной мощностью 400 кВт, и при условии наличия прозрачной для её излучения ионосферы, время зондирования увеличивается до 40 с.

5. МОДЕЛЬНЫЕ ИОНОГРАММЫ ДЛЯ ВЫСОКОАПОГЕЙНОГО ИОНОЗОНДА

Для представления о возможностях, предоставляемых вышеприведенным вариантом мониторинга ионосферы, было проведено моделирование ионограмм внешнего зондирования вдоль трассы движения такого спутника.

Для описания распределения электронной концентрации в ионосфере была выбрана модель SIMP-1 (как наиболее точно описывающая ее состояние в околополярных областях), а магнитное поле задавалось по модели IGRF.

Поскольку ионосфера представляет собой неоднородную среду, нахождение траектории в ней аналитическими способами невозможно. Для проведения расчетов использовались схемы расчетов методом геометрической оптики с решением соответствующей граничной задачи. Наиболее последовательно и эффективно в рамках геометрооптического приближения задача нахождения траекторных и энергетических характеристик радиоволн КВ диапазона реализуется на основе метода характеристик [11,12].

5.1 Двумерное решение граничной задачи

Задача построения модельной ионограммы сводится к решению граничной задачи по поиску всех лучей, вышедших из точки излучения и пришедших обратно в эту же точку для каждой частоты зондирования. В общем случае уравнение граничной задачи можно записать в виде

$$D(f, \Delta_0, \alpha_0) = 0, \qquad (9)$$

где $D(f, \Delta_0, \alpha_0)$ – длина дуги, соединяющей положение спутника и точку траектории на этой же высоте, как функция угла места волнового вектора Δ_0 в момент излучения, его азимутального угла α_0 и рабочей частоты f, т.е. расстояние на сфере $z = z_{sat}$ от спутника до точки пересечения траектории с ней. Однако не существует методов поиска всех корней уравнения с несколькими переменными, особенно в случае близко расположенных решений. Поэтому при моделировании было использовано приближение плоской задачи, когда ионосфера считается горизонтально-неоднородной только в плоскости магнитного меридиана. В таком случае все искомые лучи находятся в этой плоскости. Поэтому можно перейти к двумерному варианту задачи, положив значение азимутального угла α_0 равным азимуту нашей выбранной плоскости.

Расчет основан на численном решении локального дисперсионного уравнения

$$F(t,\mathbf{r},\mathbf{k},\omega) = \kappa^2 - \kappa_0^2 \cdot n^2(t,\omega,\mathbf{r},\mathbf{k},\mathbf{H})$$
(10)

путем приведения его к системе дифференциальных характеристических уравнений относительно пространственных и лучевых координат. Система характеристических уравнений для нахождения траекторий в канонической форме может быть записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{r}}{d\tau} = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{p}} = \mathbf{p} - \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{p}} , \\ \frac{d\mathbf{p}}{d\tau} = -\frac{\partial F}{\partial \mathbf{r}} = \frac{1}{2} \frac{\partial n^2}{\partial \mathbf{r}} \end{cases}$$
(11)

где $n(t, \omega, \mathbf{r}, \mathbf{k}, \mathbf{H}) = \mu + i\chi$ — комплексный показатель преломления Эпплтона, \mathbf{H} — вектор внешнего геомагнитного поля, $\mathbf{r} = \{r, \theta, \varphi\}$ — радиус-вектор в сферической системе координат, $\mathbf{p} = \frac{\mathbf{k}}{|\mathbf{k}_0|} = \{p_i\}$ — нормированный волновой вектор, $\omega = 2\pi f$, τ — независимая вспомогательная пе-

ременная. Поскольку учет столкновения в ионосферной плазме слабо влияет на траекторию луча, можно заменить n его действительной частью μ .

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

Решения уравнения (9) для заданной частоты находим в два этапа. Сначала определяются интервалы угла места Δ_0 , на которых функция меняет знак, что означает наличие решения в его пределах. На втором этапе для каждого такого интервала методом дихотомии находится точное решение.

5.2. Модельные расчеты неоднородностей

Исходя из того, что френелевский объем определяет область пространства, которая формирует поле в заданной точке, сформулированы следующие два критерия применимости метода геометрической оптики [12].

I. Параметры среды, а также параметры волны (амплитуда и градиент фазы) не должны заметно изменяться в поперечном сечении френелевского объема.

II. Френелевские объемы лучей, приходящих в одну и ту же точку, не должны существенно пересекаться друг с другом.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование данного метода позволяет регистрировать неоднородные структуры с геометрическими размерами, превышающими сечение френелевского объема. А также считать независимыми лучи с одинаковым временем распространения, которые отражаются в точках, разнесенных на указанное расстояние.

Используя известные выражения для радиуса первой зоны Френеля, как для плоских (a_f =

 $\sqrt{\lambda_0 z/n}$), так и для сферических ($a_f = \sqrt{\frac{\lambda_0 R_1 R_2}{(R_1 + R_2)n}}$) волн, можно показать, что при максимальном

удалении спутника (40000км) в рабочем диапазоне частот ее размеры не превышают 100 км.

Исходя из этого, можно сказать, что на полученных в самой удаленной точке траектории ионограммах различные неоднородности с характерными размерами до 100 км будут неразличимы и трактоваться как эффект рассеяния. Однако, на меньших высотах геометрические размеры френелевского объема существенно меньше, и неоднородности с характерными размерами менее 100 км будут различимы. Крайне любопытно будет наблюдать, как по мере увеличения высоты ионозонда, будет происходить переход от зеркального отражения радиоволн к их диффузному рассеянию.

6. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 4 представлены результаты моделирования для точки 1 и точки 5 из рис.1. Мы видим, что, так же как и в случае низколетящих спутников, они могут достаточно хорошо описывать характеристики как слабо неоднородной (рис.4а), так и возмущенной ионосферы (рис.4б). Цифрами обозначены характерные лучи и соответствующие им следы на ионограммах.

Однако, как было сказано выше, в отличие от низколетящих аппаратов, в зону ответственности за сигнал, принимаемый таким ионозондом, будет попадать область под ионозондом на расстоянии до 2000 км от вертикали. Следовательно, можно детектировать неоднородные структуры во всей этой области.

Для подтверждения этого в модельную ионосферу была добавлена неоднородная структура эллипсоидной формы и рассчитаны ионограммы в точках 4, 5, 6 из рис.1 для такой модели. Результаты показаны на рис. 5–7. Для удобства сравнения здесь приведены только О-следы. Цифрой 1 здесь выделены лучи, отраженные непосредственно от неоднородности, и соответствующие им участки ионограммы.



Рис.4. Результат моделирования ионограммы внешнего зондирования а) для т.1, f = 10,9 МГц, б) для т.5, f = 7,5 МГц. Слева направо — электронная концентрация в плоскости магнитного меридиана и траектории лучей на указанной частоте, вертикальный профиль плазменной частоты под точкой нахождения спутника, модельная ионограмма (О- и Х-волны).



Рис.5. Моделирование ионограмм внешнего зондирования для точки 4 (траектории лучей на частоте f = 6,0 МГц).

Графики слева рассчитаны в отсутствие дополнительной неоднородности, справа — с ее присутствием.



Рис.6. Моделирование ионограмм внешнего зондирования для точки 5 (траектории лучей на частоте *f* = 5,5 МГц). Графики слева рассчитаны в отсутствие дополнительной неоднородности, справа – с ее присутствием.



Рис.7. Моделирование ионограмм внешнего зондирования для точки 6 (траектории лучей на частоте $f = 6 \text{ M}\Gamma$ ц).

Графики слева рассчитаны в отсутствие дополнительной неоднородности, справа – с ее присутствием.

Из рисунков 5–7 можно сделать вывод о том, что наличие достаточно крупной неоднородной структуры, будет детектироваться на ионограммах, снятых на больших пространственных расстояниях между ними.

Это можно использовать как для определения как месторасположения, так и «времен жизни» таких структур.

выводы

- Современные радиофизические методы и аппаратура позволяют проводить мониторинг ионосферы на основе системного радиозондирования с участием космических аппаратов на высокоэллиптических орбитах. При этом в условиях большой удалённости бортового ионозонда от Земли, ограниченной мощности передатчика и сложности создания узконаправленных антенн необходимым способом является использование фазово-манипулированных сигналов и работа в режиме накопления сигналов, прошедших ионосферу.
- 2. Для проведения оперативного мониторинга в Арктике целесообразно выбирать солнечносинхронные орбиты с апогеем над северным географическим полюсом. Таких орбит три: апогей (ориентировочно, здесь и далее) 40000 км перигей 500 км; апогей 20000 км перигей 500 км; апогей 10000 км перигей 500 км. Преимущество одной из орбит определяется на основе комплексного учёта с одной стороны базовых параметров зондирования (мощности передатчика и чувствительности приёмника, качеств антенной системы, уровня электромагнитных помех на частоте зондирования) и, с другой стороны, длительностью сеанса зондирования, которая — в свою очередь — определяется числом накопленных сигналов радиоэха, необходимых для получения качественной ионограммы.
- 3. Такая схема построения мониторинга позволяет проводить сеансы радиозондирования с длительностью необходимой для регистрации всей динамики возникновения, развития и исчезновения ионосферных плазменных структур.
- 4. В отличие от низколетящих аппаратов, в зону ответственности за сигнал, принимаемый ионозондом, будет попадать область под ионозондом на расстоянии до 2000 км от вертикали. Следовательно, можно будет детектировать неоднородные структуры во всей арктической зоне РФ.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Данилкин Н.П., Журавлев С. В., Анишин М. М., Кураев М. А., Котонаева Н.Г. «Моделирование эксперимента по радиозондированию ионосферы с ИСЗ Космос 1809 при наличии вертикальных неоднородностей ионизации в арктическом регионе». Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52. № 2. С. 245–250.
- 2. Карпачев А.Т., Жбанков Г.А., Телегин В.А. Неоднородная структура ионосферы по данным «Интеркосмос-19» Известия высших учебных заведений. Физика. Т.58. № 8/2. 2015 С. 317–320.
- 3. Данилкин Н.П., Журавлев С. В., Л.П. Морозова, В.И. Погорелов, К.Л. Тольский. Тонкие стенки неоднородностей ионизации в полярной ионосфере, обнаруживаемые методом спутникового радиозондирования. Геомагнетизм и аэрономия 1991, Т.31 № 1. С. 137–142.
- 4. Данилкин Н. П., Котонаева Н. Г. Расчет высотных профилей электронной концентрации в ионосфере по ионограммам космической станции "Мир". Радиофизика. Известия вузов. –2002. Т. XLV. № 5. С. 367–374.
- 5. Barker R. H. Group synchronizing of binary digital sequences. Communication Theory, London, Butterworth, 1953, pp. 273–287.
- 6. Danilkin N.P. Transionospheric radiosounding. JATP. 1994. V.56. N.11. P.142–322.
- 7. Романов И.В., Колесник С.А., Митаев А.А., Хаитов Р.К., Кантышев А.В. Характеристики приёмной антенны комплекса зондирования ионосферы // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 10/3. С. 58–61.
- 8. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1983. 536 с.
- 9. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника» // Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.; Под ред. Ю. М. Казаринова. М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
- 10. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа, М.: Наука, 2004 (7-е изд.).

[©] Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

- 11. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. // В кн. «Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн». М.: Наука, 1971. С. 265–279.
- 12. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980.

ARCTIC MONITORING OF THE IONOSPHERE BASED ON SATELLITE IONOSONDES

V.B. Lapshin, N.P. Danilkin, G.A. Zhbankov, S.V. Zhuravlyov, N.G. Kotonayeva, I.V. Romanov

Monitoring of the Arctic ionosphere based radiosounding system with spacecraft on a highly elliptical orbit with an apogee over the North Pole proposed. Correlation radio reception with the possibility of accumulation of echoes is used for the implementation of the topside sounding. Ionogram simulations carried out. It is shown that such monitoring allows you to monitor the entire dynamics of the emergence, development and disappearance of the ionospheric irregularities .

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADIO SOUNDING, ARCTIC, ARTIFICIAL SATELLITE, IONOSONDE, CORRELATION RECEPTION, IONOGRAM MODELING, FRESNEL VOLUME, GEOMETRICAL OPTICS APPROXIMATION, DISPERSION.