



УДК 551.501.8 + 550.837.7

РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ. ОТ ПЕРВЫХ ИОНОЗОНДОВ К СОВРЕМЕННОМУ СОСТОЯНИЮ

Н.П. Данилкин¹, Г.А. Жбанков²¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия²Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

Диагностика ионосферы является важнейшей задачей на пути совершенствования современной радиоаппаратуры. В статье рассматриваются методы радиозондирования ионосферы и возможности современных цифровых ионозондов. Большое внимание уделено новой методике на основе использования спиральных или вихревых радиоволн при диагностике ионосферы. Обосновываются возможность и преимущества предлагаемого метода.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, РАДИОВОЛНЫ, КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА, ИОНОЗОНДЫ, N(H)-ПРОФИЛЬ, УГЛЫ ПРИХОДА, ПОЛЯРИЗАЦИЯ, ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

DOI: 10.54252/2304-7380_2021_30_30

1. ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что физическое явление – ионосфера Земли – было воспринято ведущими физиками конца XIX и начала XX веков лет через двадцать после того, как человек впервые получил сигналы, отраженные от ионосферы и правильно понял их происхождение. До этого считалось, что экспериментальные радиопередачи на большие расстояния, объясняются дифракцией радиоволн на земном шаре. И только первые эксперименты с первоначальными образцами ионозондов убедили всех в реальности отражающих радиоволны слоев ионизации верхней атмосферы нашей планеты.

За прошедшее столетие метод вертикального радиозондирования ионосферы ионозондами стал общепринятым, и каждое государство планеты имеет собственные ионозонды или системы ионозондов для выполнения государственных задач разнообразного профиля. Поэтому контроль правильности измерения ионосферных параметров является важной государственной задачей.

Диагностика ионосферы состоит из восстановления профилей электронной концентрации и эффективной частоты соударений и измерения скорости дрейфа ионосферной плазмы. Восстановление профиля электронной концентрации осуществляется на основе обработки ионограм. Обработка состоит из 2-х частей: выделения треков и построение высотно-частотной характеристики, соответствующих E, F1 и F2-слоям ионосферы и восстановления профиля электронной концентрации.

Важнейшим элементом подтверждения правильности определения высотного хода электронной плотности в ионосфере ионозондом вертикального радиозондирования, явились специально проведенные дорогостоящие эксперименты на больших геофизических ракетах

высокоточным методом дисперсионного интерферометра [1, 2]. С тех пор такие измерения более не проводились. Проведенные эксперименты также как и менее точные, но многочисленные зондовые эксперименты с малыми ракетами, подтвердили правильность используемых при радиозондировании ионосферы методов определения полного или «сомкнутого» $N(h)$ -профиля [3].

Измерение скорости дрейфа ионосферной плазмы основано на измерении характеристик сигналов, отраженных от ионосферных неоднородностей [4]. Предполагается, что неоднородности движутся как единое целое, т. е. с одинаковой скоростью и в одинаковом направлении. Регистрация доплеровских спектров позволяет: разделять сигналы, отраженные от различных неоднородностей, измерять доплеровские сдвиги частоты сигналов, определяющие лучевую скорость движения неоднородности, и измерять разность фаз между сигналами, принятыми на различные антенны. А также вычислять вертикальный θ и азимутальный ψ углы прихода, которые отождествляются с направлением на неоднородность.

2. СОВРЕМЕННЫЕ ИОНОЗОНДЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аппаратура для реализации метода вертикального зондирования постоянно развивается. В настоящее время завершился переход от классических аналоговых схем [6] радиозондирования к цифровым ионозондам [7, 8]. Их основное отличие от аналоговых заключается в том, что управление характеристиками ионозонда и анализ получаемой информации осуществляется компьютером, входящим в состав аппаратуры. Для цифровых ионозондов характерно наличие цифрового синтезатора частоты. Анализ цифровых ионограмм естественным образом позволяет расширить число измеряемых ионосферных «радиофизических» параметров. Развитие самого метода радиозондирования ионосферы происходит в двух направлениях: увеличение точности определения основного параметра метода – действующей высоты или действующей дальности нахождения отражающего радиоволны слоя околоземной плазмы – и увеличение количества дополнительных параметров, определяющих состояние ионосферы – регистрируется не только действующая высота или глубина отражения, но и частотные зависимости амплитуды сигнала, фазы, доплеровского сдвига, поляризации, а также вертикального и азимутального углов прихода. Эта дополнительно получаемая информация увеличивает полезность проводимых измерений, так как потенциально каждый из указанных радиофизических параметров определяет тот или иной геофизический параметр [3].

Следующим шагом в развитии метода наземного радиозондирования явилось создание дигизонда [10] и широкое распространение его по всему земному шару. Типичным представителем является DPS-4. Отличительной особенностью ионозонда DPS-4 является его малая мощность, в ионозонде используются два передатчика мощностью по 150 Вт каждый. Тем не менее, за счет специальных методов обработки сигнала удается достичь достаточно высокого отношения сигнал/шум (с/ш).

Принципиально по-иному устроен метод вертикального радиозондирования в следующем шаге развития метода. Наиболее яркий современный представитель – Диназонд-21, цифра подчеркивает, что это ионозонд нового века. Предназначение – реализация всех возможностей полного внутреннего отражения ВЧ радиосигналов для диагностики динамических процессов и структурных особенностей ионосферной плазмы. Главные особенности идеологии диназонда реализованы в присущих ему методах обработки данных. Научными продуктами Диназонда являются [3, 4, 10] надежное автоматическое определение стандартных ионосферных параметров; трехмерная инверсия электронной концентрации методом NeXtYZ, диагностика спектра мелкомасштабных неоднородностей методом структурной функции фазы, и векторные скорости движения ионосферных слоев, все получаемые в стандартном режиме работы, непосредственно из данных ионограммы. Система обеспечивает число параллельных приемников равное числу приемных антенн (по 8). Это означает, что физические параметры радиоэхо, те, которые зависят от частоты и времени (дальность, доплеровский сдвиг), и те, которые зависят от пространственного расположения антенн (углы прихода, поляризация), могут вычисляться полностью независимо друг от друга.

Основное отличие диназонда от дигизонда состоит в том, что диназонд не преобразовывает временные вариации фазы в частотный спектр, вместо этого каждый отраженный от ионосферы сигнал рассматривается как индивидуальный объект («радиоэхо»), который характеризуется рядом физических свойств. Естественный физический объект – радиоэхо – полностью заменяет в идеологии

диназонда более грубое понятие «ячейки в пространстве дальность-частота», берущее начало в «по-пиксельном» подходе к обработке старых аналоговых ионограмм. Режим зондирования Диназонда и форма излучаемого импульса специально подобраны так, чтобы минимизировать помехи другим пользователям радио спектра.

3. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Использование для вертикального радиозондирования современных методов изменения волнового фронта исследующей ионосферу радиоволны, т.е. использование спиральных или вихревых радиоволн [9-11], является следующим шагом в развитии этого основного метода диагностики ионосферы. Способ предполагает излучение зондирующих радиоволн в диапазоне плазменных частот ионосферы 1-20 МГц с другими свойствами – а именно, излучение серии электромагнитных волн, обладающих ненулевым моментом импульса, с заданным порядком L винтовой дислокации (ВД) волнового фронта ($L=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n$).

Образование вихрей обусловлено появлением на волновом фронте системы особых точек, которые имеют сходство с известными в физике твердого тела двумерными дефектами кристаллической решетки - винтовыми дислокациями и имеют то же название. В самой особой точке амплитуда колебаний обращается в нуль, а значение фазы не определено, поскольку скорость азимутального изменения фазы обращается в бесконечность. При математическом описании такой особенности принято говорить о наличии сингулярности, что и стало, например, в оптике причиной появления термина "сингулярная оптика". Основное свойство винтовой дислокации состоит в том, что при обходе вокруг нее фаза изменяется на число, кратное 2π . Этот коэффициент кратности и называют порядком дислокации L . На поверхности волнового фронта может возникать как единичная ВД, так и система дислокаций. В зависимости от направления закрутки волнового фронта все ВД подразделяются на левые и правые.

У закрученного электромагнитного поля волновой фронт геликоидальный (то есть винтовой, спиралеобразный); он словно наматывается винтом на направление распространения волны. Поскольку поток энергии волны направлен перпендикулярно волновому фронту, то получается, что в закрученном свете энергия и импульс волны не просто летят вперед, а как бы крутятся при этом вокруг оси движения, что обуславливает ненулевой момент импульса, который, исходя из законов сохранения, должен сохраняться.

Появление ВД кардинальным образом меняет топологию волнового фронта. Эквифазная поверхность перестает быть многолистной и осуществляется переход к единой поверхности со специфической винтовой структурой. Направление распространения энергии задается вектором Умова-Пойнтинга, перпендикулярным, как известно, поверхности волнового фронта в каждой точке. Следовательно, в окрестности ВД будет происходить "завихрение" (вращение вокруг направления распространения) энергетического потока.

За счет изменения величины и направления скорости распространения волнового фронта при взаимодействии с ионосферными неоднородностями происходит интерференция различных участков волнового фронта.

Так как сигналы излучены в диапазоне плазменных частот ионосферы, то они от нее отражаются на различных высотах ионосферы, соответствующих плазменной частоте. На отраженном от ионосферы волновом фронте возникает амплитудно-фазовая модуляция исходного сигнала, приводящая к изменению нормали волнового фронта.

Отраженные сигналы принимаются на Земле в виде интерферограмм для каждого порядка дислокации. Интерферограмма получается путём сравнения электромагнитного поля отражённой волны с исходной волной и позволяет получать интерференционные портреты, диагностирующие неоднородности ионосферной плазмы в области, соответствующей горизонтальному размеру зоны, формирующей отражённую волну, на высотах, где частоты несущей волны совпадают с плазменными частотами ионосферы.

Использование вихревого электромагнитного поля при диагностике ионосферы методом радиозондирования позволит более тщательно рассмотреть вопрос об определении размеров и концентраций ионосферных неоднородностей – наиболее трудного вопроса современной диагностики ионосферы. Использование спиральных радиоволн потребует изменение аппаратного и антенно-фидерного устройства современной ионосферной станции. Анализ всех интерферограмм покажет спектр неоднородностей, укажет их размеры, концентрации и степень возмущенности состояния ионосферы, в том числе, возможно физическую сущность различных типов спорадического слоя E, которых существует не один десяток разновидностей.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод вертикального радиозондирования ионосферы ионозондами является общепризнанным способом получения максимально возможной информации о текущем состоянии ионосферы. За прошедшие сто лет техника ионозондов прошла развитие от простых аналоговых приборов с фиксированием результатов на фотопластинки до цифровых с автоматическим определением стандартных ионосферных параметров.

Следующим шагом в развитии этого основного метода диагностики ионосферы может стать использование с этой целью вихревого электромагнитного поля. Предполагается, что построенные на этих принципах ионозонды будут способны определять размеры и концентрацию ионосферных неоднородностей – наиболее трудный вопрос современной диагностики ионосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков А.В. и др. Концентрация и частота соударений электронов в ионосфере по измерениям при запусках ракет типа «Вертикаль» в 1975г. // Космические исследования. 1978. Т.16, №2. С. 315-317.
2. Бирюков А.В., Данилкин Н.П., Денисенко П.Ф. Измерения концентрации и частоты соударений электронов во время полета геофизической ракеты «Вертикаль 4» // Космические исследования. 1978. т 16. Вып. 5. С. 715–719.
3. Данилкин Н.П. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами. Труды Института Прикладной Геофизики № 87, Москва, 2008. С. 20-25.
4. Kozlov A.V., Pasnukhov V.V. Digisonde Drift Analysis Software. Radio Sounding and Plasma Physics, American Institute of Physics // AIP Conference Proceedings, 974, NY, 2008, P.167-175.
5. Руководство УРСИ по интерпретации и обработке ионограмм – М: Наука, 1977.
6. Reinisch B.W., et al. Advancing Digisonde Technology: The DPS-4D Radio Sounding and Plasma Physics, American Institute of Physics // AIP Conference Proceedings, 974, NY, 2008.
7. <http://www.ulcar.uml.edu>
8. Bibl K., Reinisch B.W. The Universal Digital Ionosonde // Radio Sci., 1978, 13, 519-530.
9. Allen L., Beijersbergen M. W., Spreeuw R. J. C. and Woerdman J. P. Orbital angular-momentum of light and the transformation of Laguerre–Gaussian laser modes // Physical Review Letters, 1992, A45, P.8185–8189.
10. Thid'e B., et al. Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain // Physical Review Letters, 2007, 99, 087701.
11. Leyser T. B., Norin L., McCarrick M., Pedersen T. R. and Gustavsson B. Radio Pumping of Ionospheric Plasma with Orbital Angular Momentum // Physical Review Letters, 2009, 102, 065004.

RADIO SENSING OF THE IONOSPHERE. FROM THE FIRST IONOSONES TO THE MODERN STATE

Danilkin N.P., Zhbankov G.A.

Diagnostics of the ionosphere is the most important task on the way of improving modern radio equipment. The article discusses methods of ionosphere radio sounding and the capabilities of modern digital ionosondes. Much attention is paid to a new technique based on the use of spiral or vortex radio waves in the diagnostics of the ionosphere. The possibility and advantages of the proposed method are substantiated.

KEYWORDS: IONOSPHERE, RADIO WAVES, CRITICAL FREQUENCY, IONOSONDES, N (H) -PROFILE, ARRIVAL ANGLES, POLARIZATION, VORTEX ELECTROMAGNETIC FIELD