

УДК 551.510.536

МНОГОЧАСТОТНОЕ ДОПЛЕРОВСКОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ И ИСКУССТВЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

И.В. Безлер, В.Б. Иванов

MULTIFREQUENCY DOPPLER RADIOSOUNDING OF IONOSPHERE AND OF ARTIFICIAL PLASMA CLOUDS

I.V. Bezler, V.B. Ivanov

Представлены результаты компьютерного моделирования возможности исследования динамики ионосферы и искусственных плазменных образований при помощи многочастотного доплеровского радиозондирования. Полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

Results of computer simulation of possibility of investigation of ionosphere and artificial plasma cloud dynamics by multi-frequency Doppler sounding are presented. The obtained results are compared with experimental data.

Результаты эксперимента «Экваториальный триггер» [Алебастров, 1993; Гайдуков, 1993], которому посвящены предыдущие публикации авторов [Безлер, 2009; 2010], дают достаточно материала для исследования процессов в ионосфере, протекавших во время проведения эксперимента. Ранее уже была восстановлена динамика ионосферы на протяжении нескольких сеансов, в том числе и динамика искусственного плазменного облака. Имеет смысл также провести исследование динамики случайных неоднородностей, наложенных на фоновую составляющую ионосферы.

В качестве исходного материала были выбраны зависимости хода доплеровского сдвига частоты (сеанс 20:31 LT) естественной ионосферы. Доплеровский сдвиг на частотах 3.03, 3.73, 4.45, 6.35, 7.03, 8.07, 9.31, 10.93 МГц представлен на рис. 1. Отчетливо виден регулярный тренд и более короткопериодические вариации. Именно эти вариации представляют наибольший интерес. Для их анализа из данных был исключен регулярный тренд, полученный многократным сглаживанием исходных временных рядов. Рассмотрение остаточных флуктуаций выявило в ряде сеансов весьма интересные эффекты.

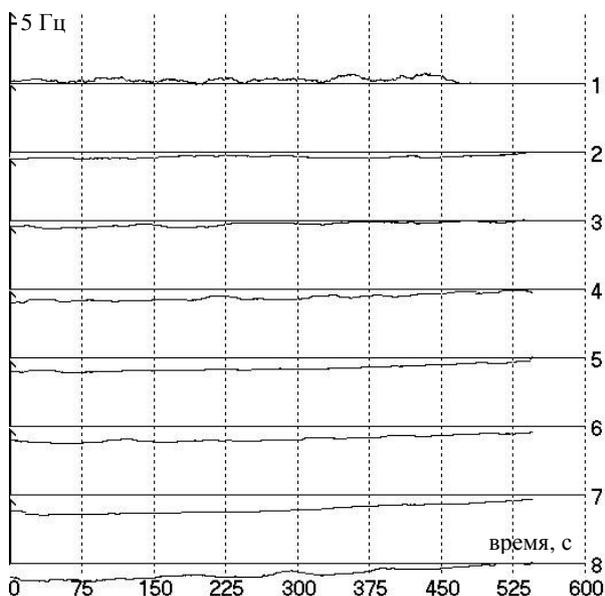


Рис. 1. Временной ход доплеровского сдвига частоты сеанса 20:31 LT.

На рис. 2 показана временная динамика флуктуаций доплеровского сдвига частоты во всех каналах сеанса 20:31 LT, представленная в условных единицах. Анализируя рисунок, можно сделать вывод о том, что вариации в каналах в той или иной степени коррелированы между собой. В частности, можно видеть, что для каналов 1 и 2 имеет место антикорреляция.

Такая картина может быть интерпретирована как влияние вертикально бегущей или стоячей волн концентрации плазмы в ионосфере. Высоты отражения радиоволн различных каналов могут находиться в смежных полупериодах такой волны, что и дает антикорреляцию.

Для количественного описания статистических связей неоднородностей на разных высотах были рассчитаны коэффициенты корреляции флуктуаций доплеровского сдвига частоты во всех каналах относительно таких флуктуаций на первом канале. На рис. 3 представлен результат расчетов. Кружками изображены значения нормированного коэффициента корреляции как функции разности высот отражения соответствующих высот и высоты отражения волн в первом канале. Высоты отражения оценивались по полученному из ионограммы вертикального зондирования профилю $N(h)$.

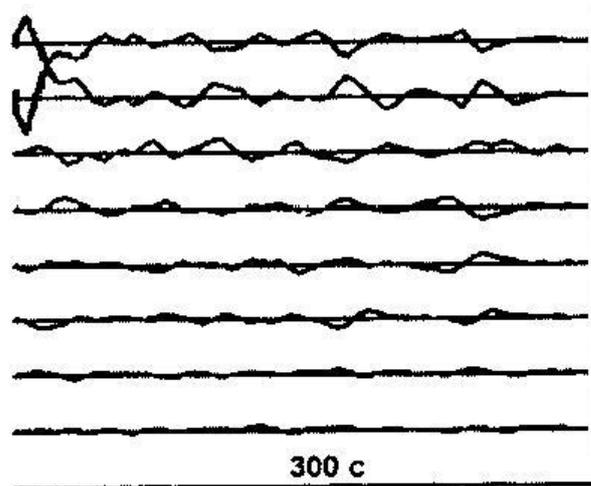


Рис. 2. Флуктуации доплеровского сдвига на всех частотах сеанса 20:31 LT.

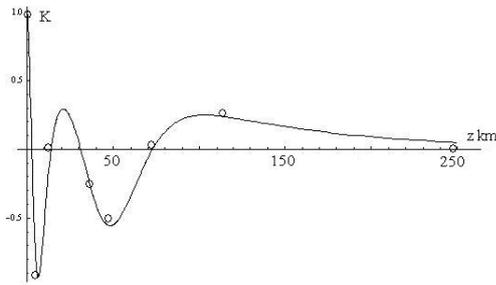


Рис. 3. Корреляция между флуктуациями на 1 канале и флуктуациями на всех других каналах.

Можно дать некоторое модельное описание полученной зависимости коэффициента корреляции от разности высот отражения. Исходя из того, что рассматриваемые неоднородности формируются в виде волны плотности плазмы с переменными по высоте амплитудой и длиной волны, разумно в таком же виде искать и функцию, аппроксимирующую высотный ход коэффициента корреляции. Приняв за точку отсчета по высоте z уровень отражения первого канала, эту аппроксимирующую зависимость можно представить в виде

$$K(z) = \exp(-z/H) \cos[\exp(-z/L)z2\pi/l].$$

Предполагается, что длина волны экспоненциально увеличивается с высотой по шкале роста L , амплитуда уменьшается по шкале H , а начальная длина волны при $z=0$ равна l . Эти параметры могут быть определены с использованием нелинейной регрессии наилучшим «вписыванием» модельной кривой в найденные значения коэффициентов корреляции. В результате получена функциональная зависимость, показанная на рис. 3 кривой линией. Параметры моделируемой функции при этом составляют следующие величины: $L=21.4$ км, $H=83.3$ км, $l=9.7$ км. Представленное описание вертикальной структуры неоднородностей, конечно, не является единственным, но, по крайней мере, оно не противоречит представлениям о характере волновых возмущений плазменной и нейтральной составляющих верхней сильно неоднородной атмосферы.

Для проверки полученных результатов можно провести компьютерное моделирование. Фоновая ионосфера задается параболическим слоем, неоднородности представлены вышеприведенной зависимостью. На рис. 4 представлены полученные результаты для каналов 1 и 2. Хорошо видна антикорреляция, аналогичная антикорреляции на рис. 2.

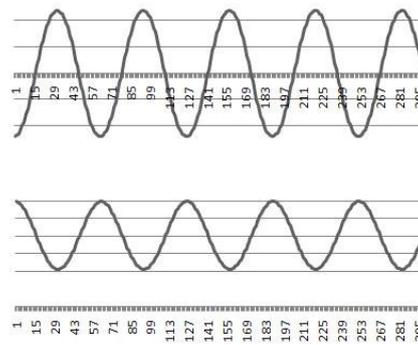


Рис. 4. Флуктуации доплеровского сдвига на каналах 1 и 2 в модели.

Также наблюдается характерное падение амплитуды флуктуаций с увеличением номера канала. Полученная гладкость флуктуаций объясняется выбором гладких фоновой и возмущенной составляющих ионосферы, а также пренебрежением их динамикой. Тем не менее, результаты моделирования подтверждают правильность выбранной модели возмущения, а также демонстрируют возможность исследования не только фоновой, но и неоднородной динамики ионосферы при помощи многочастотного доплеровского зондирования.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.740.11.0078 федеральной целевой Программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алебастров В.А., Благовещенская Н.Ф., Иванов В.П. и др. Исследования искусственных образований в ионосфере радиофизическими методами // Космические исследования. 1993. Т. 31, № 2. С 11.
- Безлер И.В., Иванов В.Б. Обработка и интерпретация экспериментальных данных многочастотного доплеровского радиозондирования ионосферы в эксперименте «Экваториальный триггер» // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды XI конференции молодых ученых «Гелио-и геофизические исследования». Иркутск. 2009. С. 62.
- Безлер И.В., Иванов В.Б. Многочастотное доплеровское радиозондирование ионосферы // 23-я Всероссийская конференция по распространению радиоволн. 2010. Сборник трудов. С. 38.
- Гайдуков В.Ю., Намазов С.А., Никитин М.А., Романовский Ю.А. Эксперимент «Экваториальный триггер»: Стимулированное развитие плазменных неустойчивостей и неоднородностей в экваториальной ионосфере // Космические исследования. 1993. Т. 31, № 1. С. 63.

Иркутский государственный университет, Иркутск