

УДК 551.510.536

**ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ЭКВАТОРИАЛЬНЫЙ ТРИГГЕР»**

**И.В. Безлер, В.Б. Иванов**

**PROCESSING AND INTERPRETING OF EXPERIMENTAL DATA ON MULTIFREQUENCY DOPPLER RADIO SOUNDING IN "EQUATORIAL TRIGGER" EXPERIMENT**

**I.V. Bezler, V.B. Ivanov**

В работе представлена методика и результаты обработки данных в эксперименте «Экваториальный триггер». Обсуждаются полученные временные зависимости доплеровского смещения частоты, спектральные и корреляционные характеристики. Делаются предварительные выводы о процессах, протекавших в ионосфере.

Methods and results of data processing in the experiment "Equatorial trigger" are presented in this paper. Obtained time dependencies of the Doppler frequency shift, spectral and correlation characteristics are discussed. Preliminary conclusions concerning processes in the ionosphere are made.

Эксперимент «Экваториальный триггер» проводился в 1991 г. в Карибском море. Целью эксперимента было комплексное исследование искусственных плазменных образований (ИПО) в ионосфере, инжектированных с борта ракет, запущенных с научно-исследовательского судна «Профессор Зубов» [1, 2]. Наряду с прочими средствами диагностики ИПО и ионосферы, в эксперименте были задействованы средства радиофизического мониторинга, включая многочастотное доплеровское зондирование на частотах декаметрового диапазона. Одновременно с исследованием собственно искусственных плазменных облаков проводилось зондирование и фоновой ионосферы, что и является объектом рассмотрения данной статьи. Несмотря на то, что эксперимент проводился достаточно давно, результаты обработки и интерпретации данных, полученных при его проведении, опубликованы весьма скупо, особенно в части, касающейся именно фоновой ионосферы.

Доплеровские измерения проводились в режиме вертикального (слабонаклонного) радиозондирования ионосферы при совмещении пункта излучения и приема на 8 частотах: 3.03, 3.73, 4.45, 6.35, 7.03, 8.07, 9.31, 10.93 МГц, – номера каналов с 9 по 16 соответственно. Данные, подлежащие обработке, представляют собой оцифрованные значения сигнала, полученного гетеродинированием отраженного ионосферой сигнала с опорной частотой, отличающейся на 4 Гц относительно излучаемой несущей. Оцифровка производилась с дискретностью 1/32 с. На рис. 1. представлен типичный фрагмент графика отраженного сигнала после понижения частоты. Этот фрагмент и остальные данные, использованные для обработки, получены в нескольких временных интервалах, относящихся к местному вечернему времени 8 сентября 1991 г.

Прежде всего, были получены спектры доплеровских частот отраженных сигналов. Типичный вид энергетических спектров на восьми каналах, нормированных по максимуму, представлен на рис. 2. Как

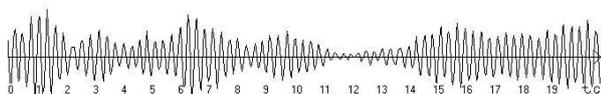


Рис. 1. Типичный вид отраженного сигнала.

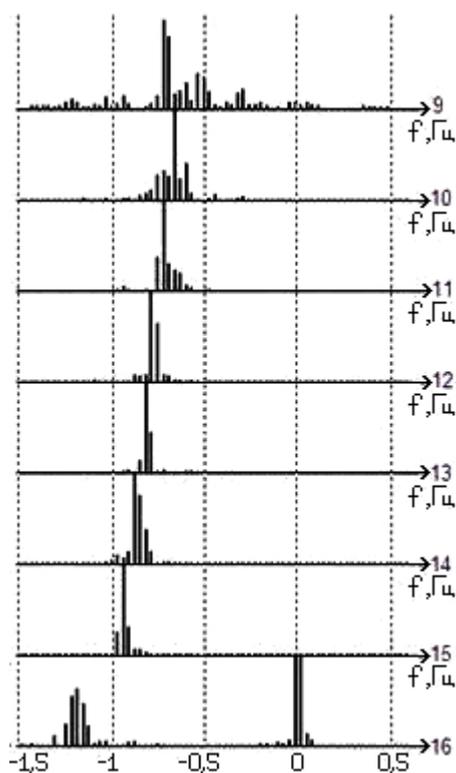


Рис. 2. Типичный вид спектров восьми каналов.

можно видеть из рисунка, основное тело спектра на всех каналах находится в области отрицательных значений доплеровских частот, что соответствует условиям эксперимента: низкоширотная ионосфера в вечернее время поднимается вверх при уменьшении концентрации плазмы. Спектры весьма разнообразны. В частности, могут наблюдаться два максимума, существенно разнесенные по частоте.

При построении доплеровских спектров было обнаружено, что положения максимумов различны в разных сеансах. Возникает необходимость получения значений доплеровского смещения частоты, для чего использовалась следующая методика: разность времен двух соседних пересечений графиком оси абсцисс (времени) (рис. 1) правомерно рассматривать как мгновенный полупериод колебания. Пройдя таким образом по всему сеансу измерений, можно получить

временной ход доплеровской частоты. Здесь мы, по крайней мере, избавляемся от влияния амплитудной модуляции, которое в доплеровском спектре проявляется весьма существенно.

Пример доплерограмм, полученных указанным способом, для всех каналов в сеансе длительностью около 600 с показан на рис. 3. Несмотря на то, что доплерограммы довольно «грязные», на рисунке хорошо видны интересные особенности временных ходов доплеровских частот. Хорошо просматривается уменьшение по модулю смещения частоты (но в области отрицательных значений на всех каналах, кроме девятого). Виден как регулярный тренд, так и более короткомасштабные временные вариации. Хорошо наблюдаются «вспышечные» всплески дисперсии смещения на 12–14 каналах. Интересным представляется временное поведение дисперсии доплеровской частоты в конце сеанса на каналах 10, 11 и 12. Сначала (примерно с 350-й секунды) наблюдается заметное увеличение дисперсии в канале 11. Спустя некоторое время уширение начинается в канале 10, а затем и в канале 12. Такое поведение разумно интерпретировать как появление области неоднородностей концентрации плазмы сначала на высотах отражения волн десятого канала с дальнейшим расширением этой области и на высоты отражения соседних частот. Отметим, что выбор условий проведения эксперимента «Экваториальный триггер» определялся наибольшим благоприятствованием для развития неустойчивостей, генерирующих ионосферные неоднородности, которые тем более должны были стимулироваться искусственными плазменными образованиями.

Дисперсия доплеровского смещения обусловлена как физическими условиями в среде распространения сигналов, так и аппаратными шумами и погрешностями первичной обработки. Очевидно, имеет смысл провести сглаживание данных. Такое сглаживание было сделано путем нахождения скользящего среднего в перемещающемся по сеансу временном окне. Результат, соответствующий рассмотренному выше сеансу, представлен на рис. 4. Здесь также отчетливо виден регулярный тренд и более короткопериодические вариации.

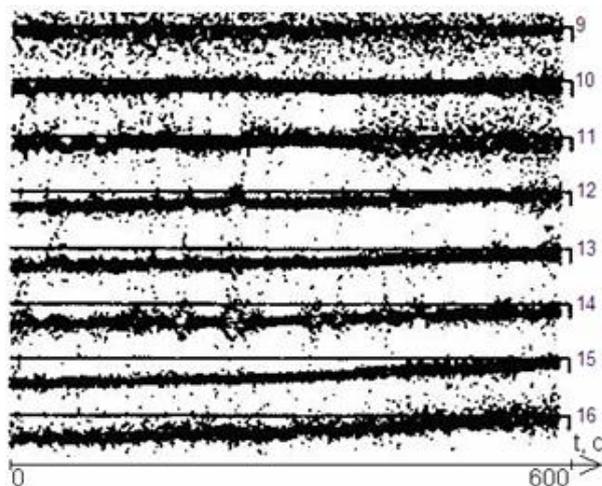


Рис. 3. Доплерограмма одного из сеансов.

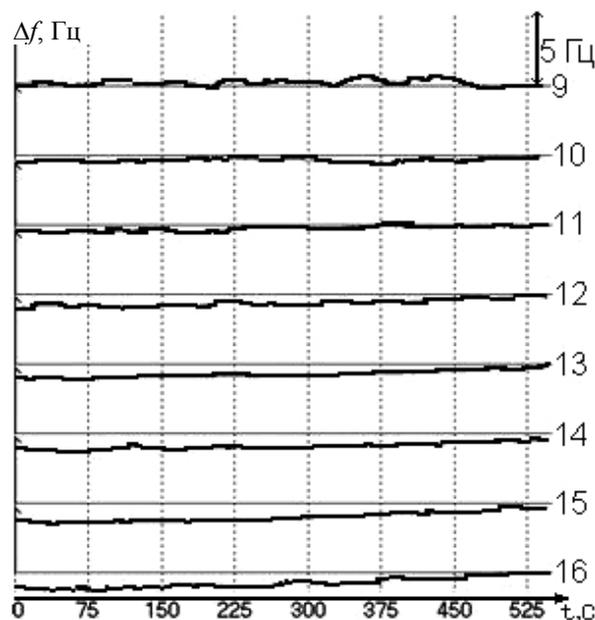


Рис. 4. Доплерограмма одного из сеансов после сглаживания.

На рис. 5 показана нормированная автокорреляционная функция (АКФ) вариаций доплеровской частоты в канале 16 (самом высокочастотном, с наибольшей высотой отражения). Можно видеть периодическую по времени смещения составляющую  $\Delta t$  в автокорреляции. Значение коэффициента автокорреляции невелико, но тенденция просматривается достаточно уверенно. Период составляет около 80 с. Такое поведение АКФ свидетельствует о протекании в области отражения данной частоты в ионосфере квазипериодических процессов, связанных с возмущениями концентрации плазмы. На более низкочастотных каналах квазипериодические вариации АКФ если и имеют место, то выражены значительно слабее.

Довольно неожиданным и весьма интересным оказалось то, что кросс-корреляция доплеровского смещения частоты между 16-м и другими каналами оказалась весьма заметной. На рис. 6 представлены соответствующие нормированные кросс-корреляционные функции (ККФ). Прежде всего видно, что для всех каналов имеет место смещение максимума ККФ примерно на четверть периода относительно канала 16. Это следует интерпретировать так, что высота отражения волн канала 16 и все высоты отражения остальных волн лежат в смежных четвертях периода крупномасштабной вертикальной стоячей или бегущей волны плотности плазмы. Это вполне возможно, поскольку высота отражения канала 16 и остальные высоты разнесены на величину порядка двухсот километров. Можно видеть также, что коррелированность уменьшается с

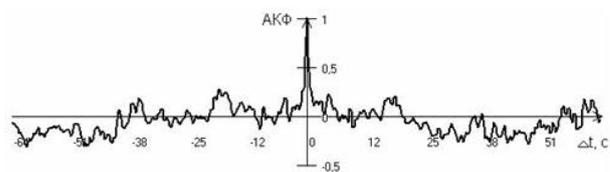


Рис. 5. Нормированная АКФ вариаций доплеровской частоты канала 16.

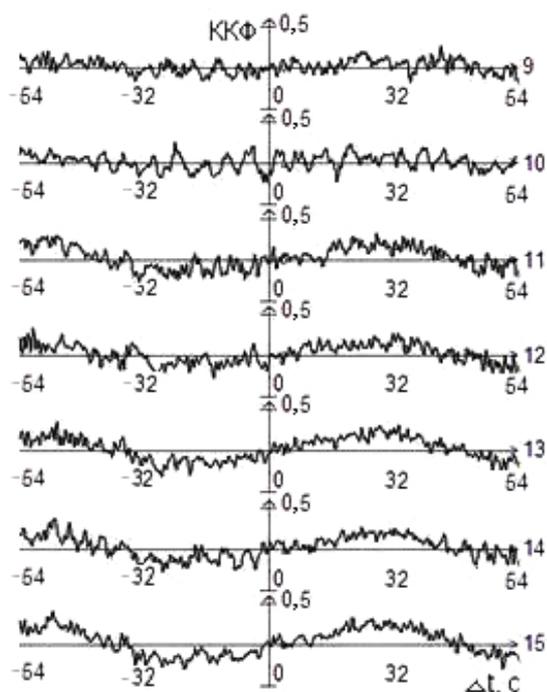


Рис. 6. Нормированная ККФ вариаций доплеровского смещения частоты с каналом 16.

увеличением разницы номеров каналов – разности высот отражения, что вполне естественно.

Было обнаружено, что коррелированность между другими каналами (не 16) очень слабая. Это свидетельствует о том, что здесь, в отличие от предыдущего феномена, основную роль играет именно последний, самый высокочастотный канал.

Необходимо подчеркнуть, что описанные явления не являются типичными. В большинстве сеансов наблюдений никаких существенных автокорреляций в каналах и межканальных кросс-корреляций не обнаруживается. Все АКФ и ККФ представляют собой типичный белый шум. Тем не менее, поскольку представленные феномены обнаружены в двух из 15 сеансов, они и не являются уникальными.

Представленные экспериментальные результаты могут быть полезны для теоретического осмысливания физических процессов, происходящих в низкоширотной ионосфере.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алебастров В.А. Исследования искусственных образований в ионосфере радиофизическими методами / В.А. Алебастров, Н.Ф. Благовещенская, В.Н. Зюзин // Космические исследования. 1993. Т. 31, № 2. С. 11–31.
2. Гайдуков В.Ю. Эксперимент «Экваториальный триггер»: стимулированное развитие плазменных неустойчивостей и неоднородностей в экваториальной ионосфере / В.Ю. Гайдуков, С.А. Намазов, М.А. Никитин, Ю.А. Романовский // Космические исследования. 1993. Т. 31, № 1. С. 63–70.

*Иркутский государственный университет, физический факультет, кафедра радиофизики, Иркутск*