

УДК 621.371.25

## К ВОПРОСУ О РАЗДЕЛЕНИИ МОДОВ МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

*В. И. Бочаров, А. А. Деордиев, Н. И. Карякин, В. Н. Мальшаков,  
Л. Н. Рубцов*

Обсуждаются возможности метода разделения модов распространения по их доплеровским спектрам. Приводятся результаты эксперимента по одновременному измерению разделения модов методами временной селекции и доплеровской фильтрации. Показано, что метод доплеровской фильтрации не обеспечивает однозначности решения задачи.

Как известно [1, 2], при распространении радиоволн декаметрового диапазона наблюдается многомодовая структура сигнала, связанная со множеством возможных траекторий распространения, что приводит к интерференции, искажению формы сигнала и другим эффектам, мешающим эффективному использованию радиоканала [3].

Свободным от этих недостатков является система, использующая одномодовый канал, что может быть обеспечено за счет разделения модов. При разделении модов путем временной селекции используются широкополосные системы, поскольку повышение разрешения по времени ( $\Delta T$ ) в соответствии с соотношением  $\Delta T \cdot \Delta F = \text{const}$  [4] неизбежно связано с расширением полосы частот ( $\Delta F$ ).

Очень привлекательной идеей является разделение модов методом доплеровской фильтрации. Поскольку имеющиеся в литературе сведения о величине и разнице доплеровского смещения частоты для разных модов дают значения не более 1 Гц [5], то принципиально можно разделить моды, используя узкополосный сигнал.

Если исходить из того, что разные моды имеют разное доплеровское смещение несущей частоты, и в точке приема сравнивать частоту сигнала для каждого мода с высокостабильной опорной частотой, то можно выделить присущее ему доплеровское смещение частоты, т. е. в спектре можно наблюдать несколько четко разделенных спектральных компонент.

На этом основана методика доплеровского разделения модов, изложенная, например, в работе [5].

Однако простые соображения показывают, что этот метод разделения модов не может давать однозначный результат, поскольку вполне возможны ситуации, при которых разные моды могут иметь одинаковые доплеровские смещения. То же относится и к знаку доплеровского смещения частоты.

Поскольку этот метод разделения модов используется в практике научных исследований, то возникает необходимость в проверке его правомерности и возможных ограничений применения.

Естественным представляется провести одновременное разделение модов методом доплеровской фильтрации и одним из традиционных методов, например, методом временной селекции.

Для трассы Душанбе—Николаев был произведен расчет вероятного числа и типа модов в соответствии с прогнозируемым состоянием ионосферы на февраль 1978 г. Расчет производился по программе, учитывающей горизонтальные градиенты на ЭВМ БЭСМ-4М [1].

В 8 и 16 часов МДВ расчет дает одномодовый скачковый способ распространения с отражением от слоя  $F_2$  в средней точке трассы.

В интервале 10—14 часов МДВ расчет дает одно- и двухскачковые способы распространения за счет отражения от  $F_2$  ионосферы.

Поскольку расчетная протяженность радиопередачи получается с отклонениями в пределах  $\pm 200$  км от истинного значения, то расчетное время распространения мода получается также с некоторыми вариациями. Для I мода оно составило 9,8—10,4 мс, для мода II—10,7—11,7. Для случая наилучшей сходимости расчетной и истинной дальности оно составляет соответственно 10,1 и 10,9 мс. Запаздывание II мода (двухскачкового) по отношению к I моду (односкачковому) составляет 0,8 мс. Минимально возможная расчетная величина запаздывания составляет 0,3 мс, максимально возможная — 1,9 мс.

Следовательно, как показывает расчет, можно ожидать существенного разделения модов за счет временной селекции.

Если учесть, что прогнозируемые параметры ионосферы отражают ситуацию, наблюдаемую в 50% времени, а в значительном проценте времени возможно увеличение этих параметров, то в отдельные дни возможна трехмодовая структура сигнала.

Таким образом, расчет показывает, что в интервале 10—14 часов МДВ можно ожидать двухмодовую структуру сигнала с четким разделением модов по времени.

6 и 8 февраля 1978 г. были проведены эксперименты по одновременному разделению модов методами временной селекции и доплеровской фильтрации.

Передачи осуществлялись из Душанбе на частоте 20 МГц в импульсном режиме. Длительность импульса составляла 0,5 мс, мощность 100 кВт, частота повторения 50 Гц.

Прием, регистрация сигнала и обработка экспериментальных результатов осуществлялась в городе Николаеве. Протяженность трассы составляет 3000 км.

Блок-схема приемно-регистрирующей установки представлена на рис. 1.

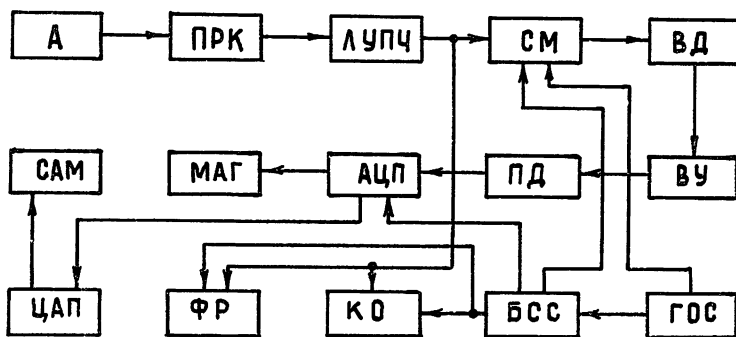


Рис. 1.

Сигнал из антенны поступает на вход приемного устройства ПРК типа Р-155 Д. С выхода усилителя промежуточной частоты приемника сигнал подается на дополнительный УПЧ с логарифмической амплитудой характеристикой ЛУПЧ, динамический диапазон которого составляет 60 дБ. Смеситель представляет собой стробируемый каскад УПЧ, на который кроме основного сигнала подается сигнал от генератора опорного сигнала (ГОС). Частота ГОС имеет стабильность порядка

$10^{-9}$  и может сдвигаться относительно основной на несколько герц с дискретами 0,5 Гц.

Смещенная квадратурная компонента, получаемая на выходе смесителя, подается на вход видеодетектора (ВД). Видеоусилитель (ВУ) работает в нелинейном режиме. Амплитуда видеоимпульса запоминается пиковым детектором (ПД) на период повторения запускающих импульсов (20 мс).

В конце периода осуществляется сброс ПД на нуль импульсом сброса, поступающим из блока синхронизации и стробирования (БСС). Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) преобразует выходное напряжение ПД в число импульсов и формирует пачки для осуществления записи в последовательном коде на однокорректный магнитофон (МАГ). С помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) доплеровская частота преобразуется в пропорциональное аналоговое напряжение и записывается на диаграммной ленте самописца (САМ). Визуальная индикация принимаемого сигнала осуществляется с помощью контрольного осциллографа (КО).

Информация, записанная на магнитную ленту, обрабатывается на электронной вычислительной машине типа БЭСМ-4М. Она вводится в ЭВМ через идентичный магнитофон и специальное устройство ввода, преобразующее этот код, в параллельный двоичный код, с которым работает ЭВМ.

Система математического обеспечения (СМО), предназначенная для ввода, обработки и отображения данных, выполнена на языке «Фортран-IV» в виде набора операторов. Вводом и отображением информации управляют операторы перемещения массивов информации в запоминающих устройствах ЭВМ, автоматического управления магнитофоном и вывода на АЦПУ в числовом и графическом виде. Операторы стандартной статистической обработки информации, фильтры высоких частот, нормировка процесса, трансформация спектра, преобразование Фурье обеспечивают получение доплеровских спектров сигнала.

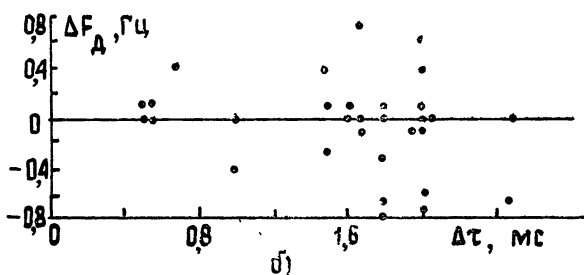
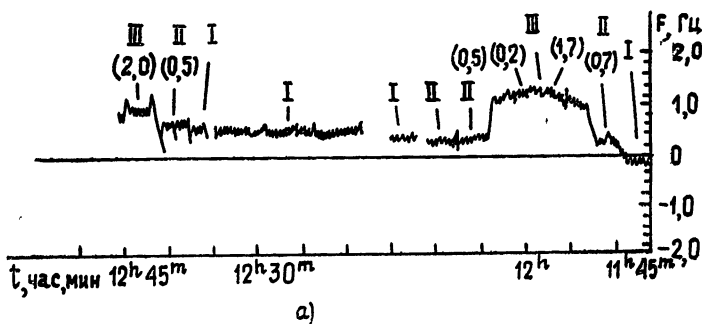


Рис. 2.

Регистрация сигналов осуществлялась следующим образом. Полоса пропускания приемника, устанавливалась 1,2 кГц, что вполне достаточно для неискаженной передачи импульсного сигнала длительностью 0,5 мс. Строб-импульсы на экране КО путем изменения задержки в БСС совмещался с анализируемым модом. Производилась регистрация смещенной квадратурной компоненты на магнитной ленте и средней частоты доплеровского спектра на диаграммной ленте самописца. Продолжительность записи составляла соответственно 2 и 5 минут. Пример записи на диаграммную ленту в период 11-40—12-40 МДВ 6 февраля 1978 года приведен на рис. 2а.

В этот период 6 февраля наблюдалась трехмодовая, а 8 февраля—только двухмодовая структура сигнала. Над соответствующими участками записи указаны номера модов и задержка их относительно первого мода, измеренная как временной интервал между передними их фронтами. Из рисунка видно, что доплеровское смещение второго и третьего модов относительно первого меняется со временем как по величине, так и по знаку. Более точную количественную оценку разницы доплеровского смещения между вторым и первым модами можно получить из анализа доплеровских спектров, определенных при обработке записей на магнитофонной ленте с помощью ЭВМ. При обработке использовались реализации длительностью 20 с, что дает разрешение по частоте 0,05 Гц.

На рис. 3 приведены доплеровские спектры для случая трехмодовой структуры, наблюдаемой 6 февраля. На графиках по оси абсцисс отложено доплеровское смещение частоты в герцах, по оси ординат — относительное значение спектральной плотности.

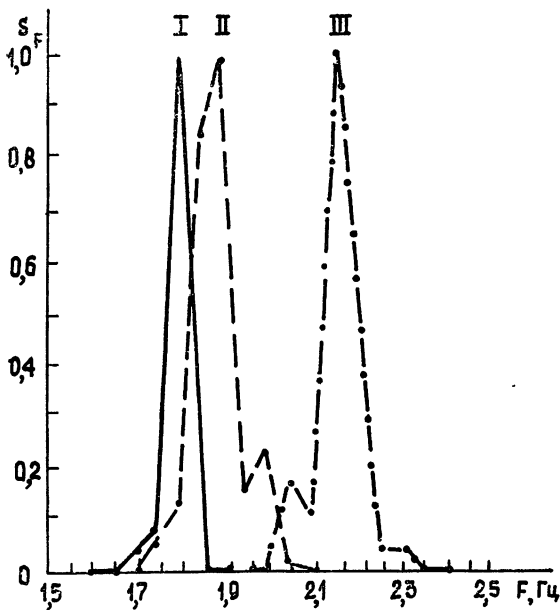


Рис. 3.

График рис. 2б представляет зависимость между относительным запаздыванием ( $\Delta t$ ) модов и разностью доплеровского смещения частоты ( $\Delta f_D$ ) для всех наблюдаемых случаев. Как видно из рисунка, разделение модов за счет временной селекции ( $\Delta t > 0,5$  мс) не всегда сопровождается разделением по доплеровской частоте, поскольку при

всех наблюдаемых  $\Delta t$  имеются случаи, когда  $\Delta f_d = 0$ . Кроме того, обращает на себя внимание, что разности  $\Delta f_d$  примерно равновероятно попадают в положительную и отрицательную области.

Анализ результатов эксперимента показывает, что разделение мод по их доплеровским частотам возможно не всегда, даже тогда, когда наблюдается их разделение по времени распространения. Это приводит к неоднозначности решения задачи. Эта неоднозначность сохраняется и в случае разделения, так как нет уверенности, например, в том, что два раздельных доплеровских спектра дают двухмодовую структуру. Можно ожидать, что существует по крайней мере третий мод, доплеровская частота которого совпадает с доплеровской частотой одного из двух других.

С другой стороны, совпадение доплеровских частот для разных мод может быть индикатором пространственной однородности ионосферы в области, ответственной за формирование модов.

Для правильной интерпретации результатов, наблюдаемых при обработке узкополосного сигнала методом доплеровской фильтрации, крайне желательно иметь возможность в сомнительных случаях использовать систему, позволяющую осуществлять временную селекцию модов.

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность Э. А. Ягжовой за расчет вероятных модов распространения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бочаров В. И., Ковалевская Е. М., Ягжова Э. А. — В сб.: Вопросы распространения радиоволн в высоких и средних широтах. — М.: ИЗМИРАН, 1979, с. 67.
2. Барабашов Б. Г. — Геомагнетизм и аэрономия, 1970, 10, № 3, с. 555.
3. Долуханов М. П. Флуктуационные процессы при распространении радиоволн. — М.: Связь, 1971.
4. Харкевич А. А. Теоретические основы радиосвязи. — М.: Гостехиздат, 1957.
5. Афраймович Э. Л., Брынько И. Г., Вугмейстер Б. О., Грозов В. П., Захаров В. Н., Королев В. А., Мамченко М. С., Носов В. Е., Панюта И. Н., Суслов Л. П., Хачатуров А. И., Препринт СибИЗМИР, № 15-78. — Иркутск, 1978.

Институт земного магнетизма, ионосферы  
и распространения радиоволн АН СССР

Поступила в редакцию  
25 декабря 1979 г.

#### TO THE PROBLEM OF MODE SEPARATION BY THE METHOD OF DOPPLER FILTRATION

*V. I. Bocharov, A. A. Deordiev, N. I. Karyakin, V. N. Mal'shakov,  
L. N. Rubtsov*

Possibilities of a method of propagation mode separation according to their Doppler spectra are discussed. Experimental results are presented on simultaneous measurements of mode separation by methods of time selection and Doppler filtration. It is shown that the method of Doppler filtration does not provide the unambiguity of the problem solution.