

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.12>

УДК: 621.3.09

МЕТОДИКА ОДНОВРЕМЕННОГО ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ МНОГОЛУЧЕВОЙ КОРОТКОВОЛНОВОЙ РАДИОЛИНИИ

А.Е. Недопекин ¹, А.О. Щирый ²

¹ Марийский государственный университет, 424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 1

² Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН
им. Н.В. Пушкова, 108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4

Статья поступила в редакцию 17 ноября 2024 г.

Аннотация. В работе показана возможность повышения информативности измерения амплитудно-частотной характеристики коротковолновой радиолинии за счет измерения доплеровского смещения частоты каждой моды. Предложена методика такого измерения на основе модифицированного метода наклонного зондирования ионосферы линейно-частотно модулированным сигналом. Методика заключается в следующем: проводится первый (предварительный) сеанс наклонного зондирования с высокой скоростью перестройки частоты (1000-5000 кГц/с) с целью получения информации о задержках и амплитудах в широком частотном диапазоне; далее полученная ионограмма в пункте приема автоматически обрабатывается с целью определения зон интереса, определяются параметры зондирования для последующих ионограмм со скоростью перестройки частоты 100-500 кГц/с – величина шага между начальными частотами линейно-частотно модулированных импульсов; выставляются параметры сеанса приема; далее схема зондирования для последующих ионограмм передается с приемного

пункта на передающий пункт при помощи сети Интернет или по радиоканалу; проводятся последующие сеансы зондирования большой длительности; вычисляются доплеровское смещение на частотах по схеме по последующим ионограммам, и амплитудно-частотная характеристика радиолинии по ионограммам из всех сеансов зондирования.

Ключевые слова: ионосфера, многолучевое распространение коротких радиоволн, доплеровское смещение частоты, амплитудно-частотная характеристика радиолинии.

Автор для переписки: Щирый Андрей Олегович, andreyschiriy@gmail.com

Введение

Надежность и качество голосовых и дискретных систем КВ радиосвязи в первую очередь зависит от условий распространения сигналов в ионосферной радиолинии и помеховой обстановки. К наиболее важным особенностям ионосферной радиолинии, которые накладывают ограничения на использование высокоскоростных и широкополосных систем КВ радиосвязи, относятся следующие ее основные свойства: многолучевость, обусловленная слоистой структурой ионосферы и магнитоионным расщеплением распространяющихся волн; частотные и временные вариации, обусловленные зависимостью показателя преломления ионосферы от частоты и времени. Влияние этих основных свойств ионосферной радиолинии на сигналы систем КВ радиосвязи зависит от длины и географического расположения радиотрассы, диаграммы направленности передающей и приемной антенн, отношения центральной частоты излучаемого сигнала к максимально применимой частоте, которая, в свою очередь, зависит от времени суток, времени года, солнечной активности и протяженности радиотрассы. Параметры каждого проходящего луча испытывают быстрые флуктуации из-за движения неоднородностей, а также медленные флуктуации из-за изменения освещенности ионосферы. Наряду с этим вследствие движения слоев

наблюдается доплеровский сдвиг частоты и вследствие движения неоднородностей – доплеровское уширение спектра сигнала. Дифференциальный доплеровский сдвиг между лучами на данной рабочей частоте приводит к интенсивным замираниям и значительным частотно-селективным помехам, особенно в высокоскоростных (широкополосных) системах связи. Даже относительно малые величины частотно-селективных и быстрых временных замираний распространения, приводят к неустраняемым (даже за счет повышения мощности сигнала) ошибкам.

Измерения вариаций частоты пробного сигнала составляют основу доплеровского метода радиозондирования. Этот метод широко используется для исследования ионосферных динамических процессов как естественного (фоновые перемещающиеся ионосферные возмущения, последствия землетрясений, солнечных затмений и др.), так и искусственного (взрывы, нагрев ионосферы мощным радиоизлучением и др.) происхождения. Однако доплеровские измерения не содержат информацию о модовой структуре ионосферного канала распространения, что затрудняет интерпретацию полученных данных. Поэтому важной является задача разработки метода одновременного определения доплеровского смещения частоты и времени группового запаздывания отдельных мод коротковолнового сигнала.

Многолучевость оказывает негативное влияние на работу систем КВ радиосвязи: принятый сигнал испытывает замирания амплитуды (в частотной и временной областях), вследствие чего ограничивается полоса неискаженной передачи и скорость передачи информации. Для систем загоризонтной радиолокации, работающих в КВ диапазоне, многолучевость распространения КВ радиосигнала, отраженного от цели, ведет к появлению ложных целей; доплеровское смещение КВ радиосигнала, отраженного от цели, ведет к ошибкам в определении радиальной скорости цели.

Нужно отметить, что в литературе (например, [1-4]) основное внимание уделялось замираниям КВ радиосигнала во временной области. Это обусловлено, в первую очередь, техническими трудностями получения

панорамных характеристик радиосигнала в широком диапазоне рабочих частот (единицы-десятки МГц).

Для возникновения заметных изменений в принятом сигнале вследствие флуктуации амплитуды необходимы значительные динамические изменения в среде. С другой стороны, фаза каждой из векторных составляющих поворачивается на 2π всякий раз, когда запаздывание τ соответствующего луча изменяется на величину $1/f_p$ (f_p – частота сигнала), т. е. когда путь, по которому проходит этот луч, изменяется всего лишь на одну длину волны несущего колебания [3]. Это происходит при относительно небольших перемещениях неоднородностей среды. Далее, вследствие случайного характера движения отдельных неоднородностей в типичном радиоканале можно ожидать, что запаздывания отдельных лучей будут меняться с различной скоростью. Из этих соображений можно полагать, что быстрые флуктуации сигнала, вызываемые динамическим характером среды, обусловлены, в первую очередь, случайными изменениями относительных запаздываний лучей или фаз векторов в сумме.

Использование узкополосных каналов (3 кГц) не позволяет разделять по задержке принимаемые парциальные моды, соответствующие разным лучам, и они интерферируют между собой. Интерференция приводит к тому, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии связи становится изрезанной. Ей присущи подъемы, соответствующие полосам конструктивной интерференции, и провалы, обусловленные деструктивной интерференцией. Очевидно, что для устойчивой работы РТС, ее радиоканал должен быть вложен в полосу конструктивной интерференции. Таким образом, возникает проблема определения АЧХ линии связи с высоким частотным разрешением.

Использование широкополосных сигналов (в широкополосных каналах) позволяет разделить принимаемые моды и, кроме того, предполагает оптимальную обработку сигнала в приемнике. При этом оптимизация осуществляется по отношению к излучаемому сигналу. Однако при распространении в ионосферном радиоканале, амплитуды и фазы спектральных составляющих парциальных мод сигнала искажаются, в результате чего

оптимальность приема утрачивается. Для компенсации искажений широкополосных радиосигналов также должна быть решена задача определения АЧХ радиолинии.

Для повышения информативности ионосферных исследований в части фазовой составляющей АЧХ необходимо дополнить измерение амплитудно-частотной характеристики ионосферного канала информацией о доплеровском смещении частоты. Доплеровское смещение частоты и динамика его изменения во времени – это важный интегральный показатель динамических процессов, связанных с перемещениями ионосферной плазмы. Возможность измерения доплеровского смещения частоты каждой моды при помощи ЛЧМ сигнала описаны в работах [5] – для случая периодического ЛЧМ сигнала и [6] – для случая фазовых измерений с использованием помимо ЛЧМ дополнительной балансной амплитудной модуляции. Последний из них очень требователен к отношению сигнал-шум и требует значительной мощности даже для случая ЛЧМ-зондирования.

Цель работы – разработка методики построения АЧХ ионосферного радиоканала с возможностью измерения доплеровского смещения частоты каждой моды распространения КВ радиосигнала.

1. Методика измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии по ионограмме наклонного зондирования

На основе математических моделей распространения КВ в приближении геометрической оптики получена модель АЧХ многолучевой КВ-радиолинии [7-9]. Передаточная функция многолучевой КВ радиолинии равна сумме m передаточных функций отдельных мод, при этом параметрами модели для каждой моды являются зависимости времени группового запаздывания $\tau_j(f)$ и амплитуды $|H_j(f)|$ для каждой j -ой моды, а также начальные фазы мод $\varphi_{0j}(f, t)$; указанные параметры заданы для канала с величиной частотной полосы Δf . В результате аналитическое выражение для оценки АЧХ КВ радиолинии имеет следующий вид:

$$|H(f_p, t)| = \left| \sum_{j=1}^m |H_j(f_p)| \exp \left[-i \left(\phi_{0j}(f_p, t_0) + 2\pi \cdot \int_{f_p}^{f_p + \Delta f} \tau_j(f) df + 2\pi \cdot F_{Ди} \cdot \Delta t \right) \right] \right|. \quad (1)$$

Также в выражении фазы учитывается вклад доплеровского смещения частоты $F_{Ди}$. Оно влияет не на форму АЧХ, а на ее дрейф по оси частот во времени t .

Вычислительный эксперимент по моделированию АЧХ многолучевой КВ радиолинии показал, что для двухлучевых радиоканалов ширина полос конструктивной интерференции обратно пропорциональна разности времени группового запаздывания двух лучей; найдены соотношения для полос конструктивной и деструктивной интерференции, а также их зависимости от межмодовых задержек и соотношений амплитуд [9].

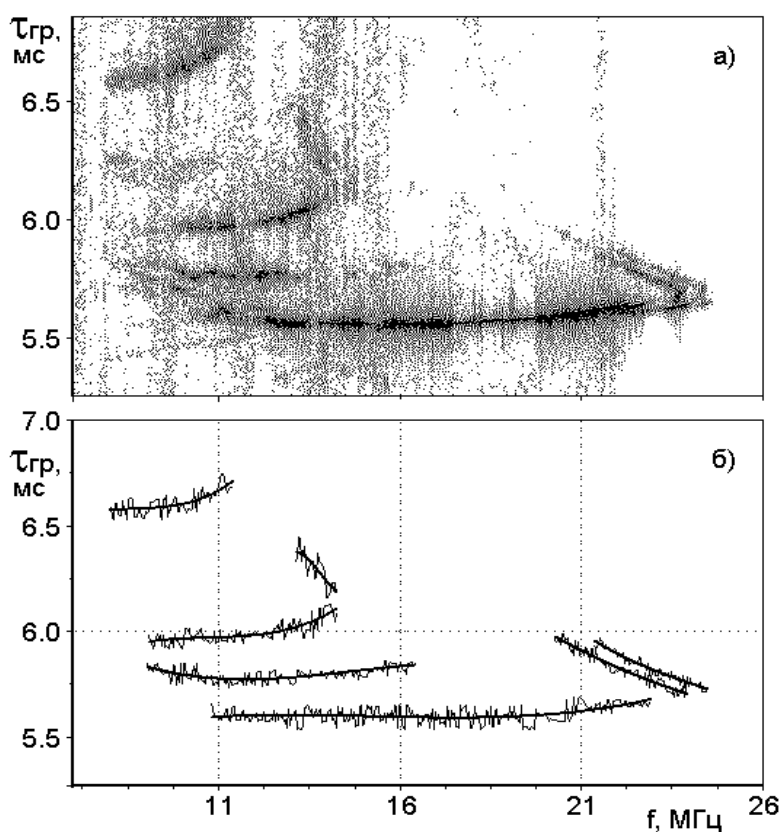


Рис. 1. Ионограмма (а) и выделенные на ней треки мод (б).

Предложена методика вычисления по ионограмме параметров модели АЧХ КВ радиолинии. На ионограмме наклонного ЛЧМ-зондирования радиолинии выделяются области, ограничивающие моды сигнала. Затем в выделенных областях в каждом спектре находятся точки максимума

амплитуды. Далее производится их аппроксимация полиномом n -ой степени. Таким образом находится время группового запаздывания как функция частоты (рис. 1, рис. 2а). Амплитуда моды находится по ионограмме (функция частоты и времени группового запаздывания), затем для удаления одиночных выбросов (вызванных, скорее всего, ошибкой выделения моды) подвергается медианной фильтрации (рис. 2б, жирн. линия – после медианной фильтрации).

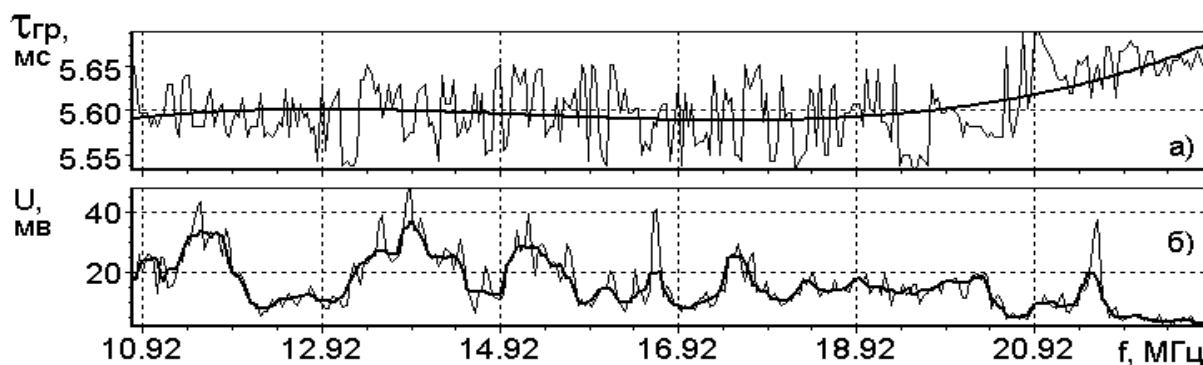


Рис. 2. Время группового запаздывания (а) и амплитуда (б) одной моды.

На рис. 3,4 показаны фрагменты АЧХ радиолинии, причем рис. 3 соответствует двухмодовому участку ионограммы, а рис. 4 – четырехмодовому. Такой характер поведения АЧХ соответствует современным теоретическим представлениям [10].

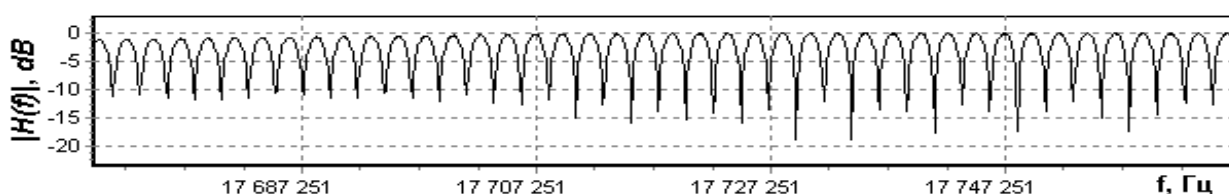


Рис. 3. Фрагмент АЧХ радиолинии с разрешением 100 Гц, двухмодовый участок.

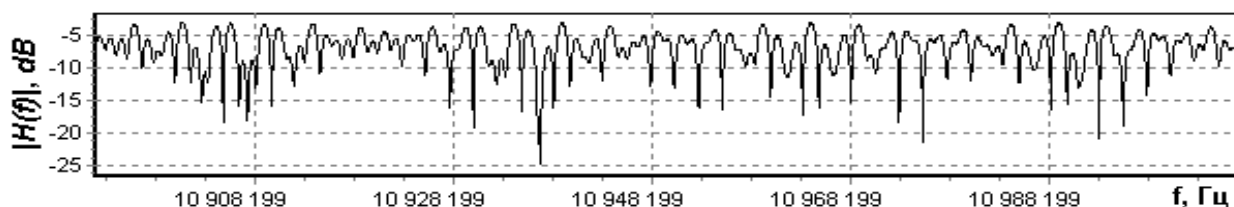


Рис. 4. Фрагмент АЧХ радиолинии с разрешением 50 Гц, четырехмодовый участок.

2. Методика измерения доплеровского смещения частоты в многолучевой КВ радиолнии

В качестве базовой методики для измерения доплеровского смещения частоты выбрана методика, описанная в [5]. Передатчик излучает сигнал вида

$$a_k = a_0 \exp\left(2\pi j\left((f_p - \Delta f_{\text{э}}/2) \cdot t + \dot{f} \cdot t^2/2\right)\right), \quad k=1\dots N, \quad t \in [(k-1)T_{\text{э}}, kT_{\text{э}}], \quad (2)$$

где N – число элементов сигнала с рабочей частотой f_p , \dot{f} – скорость перестройки частоты в элементе, $T_{\text{э}}$ – длительность одного элемента, $\Delta f_{\text{э}}$ – полоса частот элемента сигнала. Сигнал после прохождения ионосферы подвергается сжатию в частотной области за счет умножения на когерентный излученному сигналу сигнал гетеродина и фильтрации фильтром нижних частот. Вся дальнейшая обработка осуществляется с разностным сигналом.

Разрешающая способность по доплеровскому смещению частоты F_D будет составлять $\delta F_D = 1/(NT_{\text{э}})$. Передаточная функция канала имеет вид

$$H(f, t) = \sum_{i=1}^n |H_i(f, t)| \exp(j\phi_i(f, t)), \quad (3)$$

где n – число мод распространения, $|H_i(f, t)|$ – амплитуда i -ой моды, $\phi_i(f, t)$ – фаза передаточной функции, допускающая разложение в ряд Фурье для небольших масштабов времени $T_{\text{э}}$, гарантирующих $\Delta f_{\text{э}}$ меньшую, чем полоса когерентности канала (набег нелинейной составляющей фазы в силу частотной дисперсии в диапазоне равен 1 радиан). Первые производные по частоте и времени для $\phi_i(f, t)$ каждой моды – это соответственно время группового запаздывания τ и доплеровское смещение частоты F_D , взятое с обратным знаком. Таким образом, измеряя τ и F_D каждой моды по данным зондирования, можно восстанавливать в линейном приближении фазу передаточной функции канала.

В принципе, методика с использованием периодического ЛЧМ сигнала позволяет одновременно с доплеровским смещением измерять и время

группового запаздывания τ с разрешающей способностью $\delta\tau_i = 1/(\dot{f}T_0)$.

Но существует сложность, связанная с длительностью зондирования на одной частоте для измерения доплеровского смещения. Для обеспечения разрешающей способности в 0,1 Гц, оно должно составлять 10 с. При буквальном использовании методики для охвата диапазона в 10 МГц с шагом 100 кГц понадобится 1000 с, в этом случае будет невозможно обеспечить оперативность измерений. Поэтому предлагается вся процедура разбить на два сеанса зондирования.

Время группового запаздывания необходимо измерять по первому, обычному сеансу зондирования длительностью в пределах 30 секунд с непрерывным сигналом на большой скорости \dot{f} , по полученной ионограмме автоматически определять зоны интереса для доплеровским измерений в зависимости от выбранного вида зоны интереса. Для этого можно использовать автоматическое выделение сигнала по методикам из [11,12].

Расчет количества частот для измерения доплеровского смещения предполагается осуществлять исходя из необходимости уложиться в предельную длительность T_{IP} , которая должна быть как можно меньше. После определения зоны интереса и определения необходимого числа частот и их значений для доплеровского зондирования все необходимые данные отправляются из приемного пункта к пункту передачи и осуществляется второй сеанс. Время интервала между сеансами T_{II} . На основе анализа изменения времени группового запаздывания типичных среднеширотных ионограмм мы предполагаем, что T_{IP} и T_{II} должны составлять в сумме не более 1,5 мин, что должно гарантировать отличие времени группового запаздывания между двумя сеансами в пределах 0,1 мс.

Рассмотрим обработку сигнала доплеровского зондирования. Периодичность излучения в течении времени $T = NT_0$ означает, что сигнал будет иметь линейчатый спектр мощности, в котором отсчеты, соответствующие полезному сигналу, должны находится на частотах, кратных

$\Delta f_{\text{Э}}$ при отсутствии доплеровского смещения. Весь частотный спектр можно разбить на ячейки разрешения, ширина первой составит $1/(2T_{\text{Э}})$, остальных $1/T_{\text{Э}}$. Для измерения доплеровского смещения предлагается использовать следующую методику. Для данной частоты зондирования f_p получить усредненный спектр мощности по N элементам анализа, который не будет линейчатым. В нем определить номер ячейки разрешения m_i для каждой моды. В «длинном» спектре, полученном за все время $NT_{\text{Э}}$, определить частоту максимального отсчета Fm_i в ячейке m_i и определить доплеровское смещение $F_{\text{Ди}}$ по формуле:

$$F_{\text{Ди}} = m_i/T_{\text{Э}} - Fm_i. \quad (4)$$

В качестве дополнительной возможности методики можно сравнивать время группового запаздывания, полученное по первому сеансу и время группового запаздывания из «длинного» спектра второго сеанса на частотах, соответствующих f_p . Это позволит следить за задержкой как функции от времени на масштабах 1-1,5 мин, оценивая не только скорости движения плазмы, но и, возможно, ее направление по вертикали. Так же это позволит проводить коррекцию τ каждой моды на момент второго сеанса.

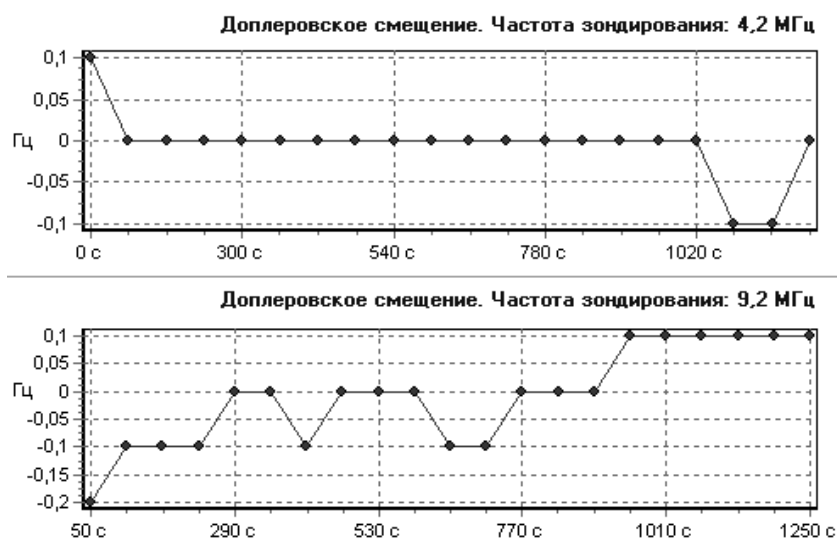


Рис. 5. Доплеровское смещение на различных частотах зондирования.

На рис. 5 показаны примеры построения зависимости доплеровского смещения от времени, прошедшего с начала сеанса зондирования.

3. Алгоритм совместного измерения доплеровского смещения частоты и АЧХ многолучевой КВ радиолинии

Сущность предлагаемого решения заключается в комплексном использовании двух ранее известных методов (описанных в 1 и 2 параграфах данной работы), а также добавлении к ним предварительного высокоскоростного сеанса зондирования с целью определения зон интересов по заданным критериям, проведении последующих сеансов зондирования в полученных зонах интересов с меньшей скоростью, что даст большую разрешающую способность, чем в предварительном сеансе, и определении доплеровских смещений и АЧХ радиолинии по двум ранее известным способам. При этом новизна алгоритма складывается из комплексности использования двух ранее известных, а также их особенностей реализации для функционирования в комплексе. Эти особенности заключаются в следующем.

В предлагаемом алгоритме предлагается ввести предварительный сеанс зондирования, а сами доплеровские измерения проводить по второму и последующим сеансам.

Время группового запаздывания необходимо измерять по первому, предварительному сеансу зондирования длительностью не более 30 секунд непрерывным сигналом на большой (1000-5000 кГц/с) скорости \dot{f} , по полученной ионограмме автоматически определять зоны интереса для доплеровским измерений в зависимости от выбранного вида зоны интереса. Видами зон интереса могут быть, например: 0.8-0.95 максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ), участки одномодового распространения, участки с максимальным числом мод, и др. Для этого предполагается использовать автоматическое выделение сигнала. Выбор вида зоны интереса производится в зависимости от решаемых задач.

В итоге, сформулируем алгоритм совместного измерения доплеровского смещения частоты и АЧХ многолучевой КВ радиолинии, он состоит из следующей последовательности действий:

- 1) Проведение первого (предварительного) сеанса зондирования с целью получения информации о задержках и амплитудах (высокая скорость 1000-5000 кГц/с для обеспечения длительности сеанса 6-27 с).
- 2) Автоматическая обработка полученной ионограммы в пункте приема – определение по предварительной ионограмме зон интереса: 0.8-0.95 МНЧ, участки одномодового распространения, участки с максимальным числом мод, и др.
- 3) Определение схемы (параметров) зондирования в пункте приема для второй и последующих доплеровских ионограмм: определение шага между начальными частотами ЛЧМ импульсов для обеспечения длительности всего второго сеанса зондирования – не более $T_{пр}$ секунд.
- 4) Выставление параметров сеанса приема (время между окончанием первого сеанса и началом второго 10-15 с).
- 5) Передача схемы зондирования для второй ионограммы (и последующих) с приемного пункта на передающий пункт при помощи сети Интернет или по радиоканалу.
- 6) Проведение второго сеанса зондирования длительностью $T_{пр}$ и получение «доплеровской ионограммы» (и последующих «доплеровских ионограмм»).
- 7) Определение доплеровского смещения (методом описанным в параграфе 2 настоящей работы) на частотах по схеме по второй (и последующих) ионограммам из п.б.
- 8) Построение АЧХ радиолинии (методом описанным в параграфе 1 настоящей работы) по ионограммам из всех сеансов зондирования (включая предварительный).

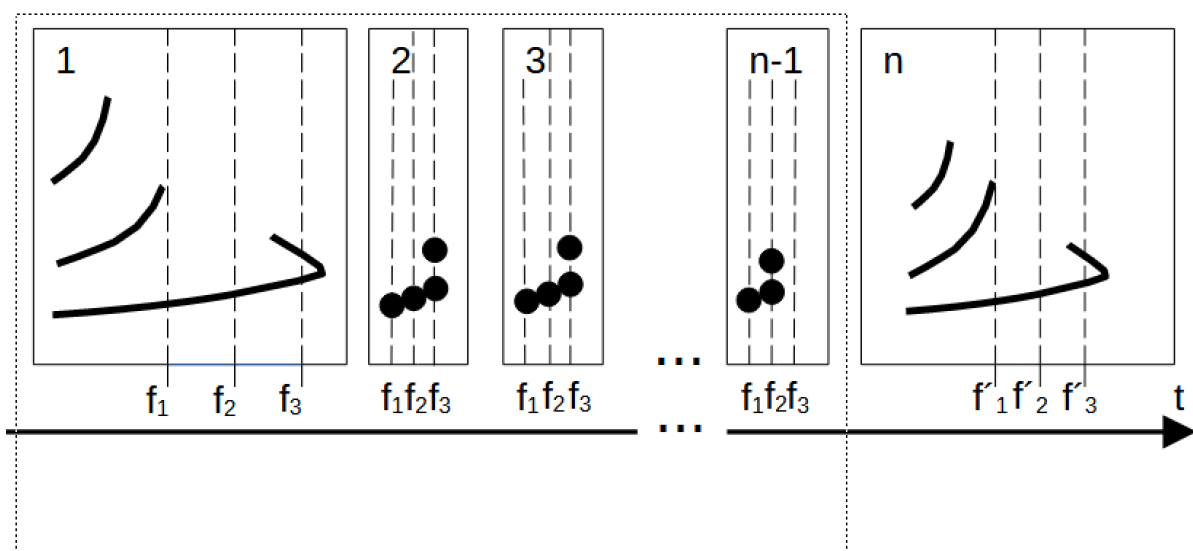


Рис. 6. Схема возможного следования ионограмм во времени.

Ионограмма, обозначенная на рисунке 6 номером 1, является «предварительной» или «пристрелочной» для доплеровских измерений. По ней определяются частоты доплеровских зондирований, в данном случае это f_1, f_2, f_3 . Следующие, «доплеровские», ионограммы с номерами 2, 3, $n-1$ получают измерения на этих частотах – на рисунке измерения обозначены кружками. Количество «доплеровских» зондирований до следующей «пристрелочной» ионограммы задается или ее необходимость автоматически определяется в пункте приема в связи со значительным изменением количества измерений в ионограммах. По новой «пристрелочной» ионограмме с номером n определяет новые частоты f'_1, f'_2, f'_3 , которые могут отличаться от прежних f_1, f_2, f_3 . После чего снова повторяется серия «доплеровских зондирований». Таким образом можно накапливать статистику доплеровских сдвигов, соответствующих разным частотам, но одним и тем же зонам интереса, то есть гомологичным участкам разных «пристрелочных» ионограмм, наблюдая динамику ионосферных процессов.

Возможна серия из сеансов «быстрых» зондирований на скорости 1000-5000 кГц/с, чередуемых с зондированиями «доплеровскими» с целью попытки сопоставления изменения задержек лучей распространения на интересующих частотах и доплеровского смещения на этих частотах для оценки направления

движения ионосферных неоднородностей (вверх-вниз, к наблюдателю – от наблюдателя в плоскости) и их скорости.

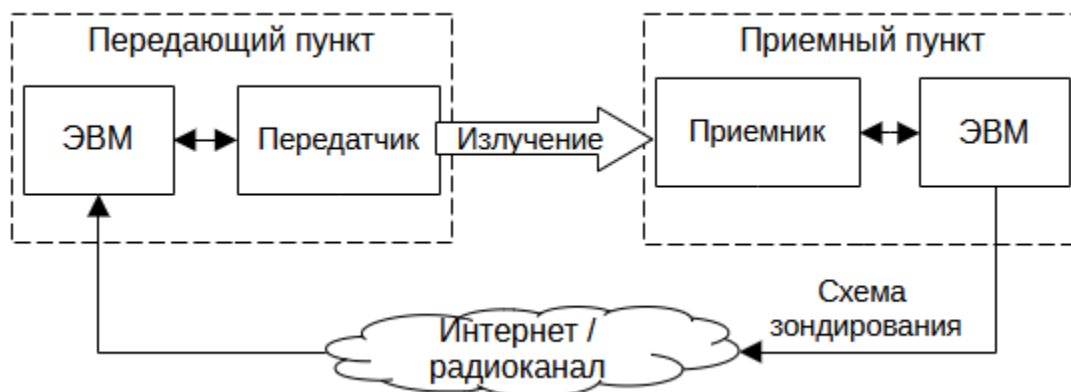


Рис. 7. Обобщенная структура измерительного комплекса.

На рис. 7 показана обобщенная структура измерительного комплекса и информационные потоки между его составными частями.

Заключение

В работе показана возможность повышения информативности измерения АЧХ коротковолновой радиолинии за счет измерения доплеровского смещения частоты каждой моды, представлен детальный алгоритм такого измерения. Для осуществления алгоритма требуется обеспечить оперативную связь между пунктами приема и передачи и разработать программное обеспечение для работы на приемопередающих пунктах. Использование предложенной методики обеспечит более полное восстановление передаточной функции коротковолнового радиоканала, а регулярное использование будет способствовать накоплению статистики данных наклонного ЛЧМ-зондирования с доплеровскими смещениями в интересах радиофизических исследований и обеспечения коротковолновой связи (определение АЧХ с доплеровским смещением на одномодовых участках).

Литература

1. Кеннеди Р. Каналы связи с замираниями и рассеянием. М.: Советское радио, 1973. 304 с.
2. Поляков П.Ф. Прием сигналов в многолучевых каналах. М.: Радио и связь, 1986. 248 с.
3. Стейн С., Джонс Дж. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений. М.: Связь, 1971. 376 с.
4. Giuseppe Fabrizio. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications. McGraw-Hill Education, 2013.
5. Батухтин В.И., Иванов В.А., Колчев А.А., Розанов С.В. Измерение доплеровского смещения частоты отдельных лучей с помощью ЛЧМ-ионозонда // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2000. Т. 43. № 12. С. 1044-1054.
6. Колчев А.А., Недопекин А.Е., Шумаев В.В. Погрешности измерения доплеровского смещения частоты с помощью амплитудно-модулированного ЛЧМ сигнала // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2010. № 4 (103). С. 42-47.
7. A.O. Shiriy. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of the 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2002. 5. 2002. pp.365-369.
8. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Автореферат дис. ... канд. техн. наук; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. 19 с.
9. Щирый А.О. Две методики измерения амплитудно-частотных характеристик многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний по данным наклонного радиозондирования ионосферы // Журнал радиоэлектроники. – 2024. №.4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.1>

10. Терехов Л.С., Шапцев В.А. Повышение точности радиозондирования ионосферы. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1997. 131с.
11. Недопекин А.Е. Определение диапазонов одномодового распространения КВ // Сборник трудов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». 2014. С.337-342
12. Колчев А.А., Недопекин А.Е. Использование модели смеси вероятностных распределений при обнаружении сигналов радиофизического зондирования // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2016. Т.59. №8 (650). С. 44-51.

Для цитирования:

Недопекин А.Е., Щирый А.О. Методика одновременного измерения амплитудно-частотной характеристики и доплеровского смещения частоты многолучевой коротковолновой радиолинии // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.12>