

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.4.1>

УДК: 621.3.09

ДВЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЛУЧЕВЫХ ИОНОСФЕРНЫХ КОРОТКОВОЛНОВЫХ РАДИОЛИНИЙ ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.О. Щирый

**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
имени Н.В. Пушкова РАН,
108840, Москва, Троицк, Калужское шоссе, д. 4**

Статья поступила в редакцию 14 февраля 2024 г.

Аннотация. Представлены две методики измерения амплитудно-частотных характеристик многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний с высоким разрешением по частоте (десятки – сотни герц). Поскольку традиционные узкополосные каналы не позволяют разделить интерферирующие между собой различные моды ионосферного распространения коротких волн, то в данной работе предложено использовать широкополосные сигналы, что позволяет разделить принимаемые моды ионосферного распространения радиосигнала, а также отличить сигнал от помех. Преимущество первой методики в том, что вместе с амплитудно-частотной характеристикой радиолинии в результате становится известна и модовая картина многолучевого распространения коротких волн, что позволяет делать качественные выводы о распространении радиоволн, а также применять классификации по эмпирическим моделям многолучевости. Недостатки первой методики: ручной этап выделения треков мод на ионограммах наклонного зондирования, а также потеря части информации об энергии треков мод вследствие

диффузности (размытости) следов треков мод на ионограмме. Вторая методика, наоборот, даёт только оценку амплитудно-частотных характеристик многолучевой коротковолновой радиолинии без раскрытия модовой картины многолучёвости, но делает это автоматически и без потери информации об энергетике размытых треков. Представление обеих методик в одной статье позволяет указать достоинства и недостатки каждой из них, и соответственно, предпочтительные области применения. Поскольку при комплексном системном подходе к исследованию и измерению характеристик ионосферы и ионосферных радиолиний важно иметь набор инструментов (методик).

Ключевые слова: амплитудно-частотные характеристики многолучевых радиолиний, ионосфера, наклонное радиозондирование ионосферы, ионограммы, обработка ионограмм, многолучевое распространение коротких радиоволн, автоматизация измерений.

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

Введение

К наиболее важным особенностям [1, 2] ионосферной радиолинии, существенным образом влияющих на работу радиотехнических систем (РТС) декаметрового (ДКМ) диапазона, относятся: многолучевость, обусловленная слоистой структурой ионосферы и магнитоионным расщеплением распространяющихся волн; частотные и временные вариации, обусловленные зависимостью показателя преломления ионосферы от частоты и времени. 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 (во временной области) и значительным частотно-селективным помехам (замираниям в частотной области), особенно в широкополосных РТС. Влияние всех этих свойств ионосферной радиолинии на сигналы РТС ДКМ диапазона зависит от длины и географического расположения радиотрассы, диаграммы

направленности передающей и приемной антенн, от времени суток, времени года, солнечной активности и протяженности радиотрассы.

Использование узкополосных каналов (порядка 3 кГц), характерных для традиционных систем связи, не позволяет разделять по задержке принимаемые парциальные моды распространения радиосигнала, которые интерферируют между собой. Интерференция приводит к тому, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) линии связи становится изрезанной. Ей присущи подьёмы и провалы, обусловленные соответственно конструктивной и деструктивной интерференцией. Для устойчивой работы радиотехнической системы радиоканал должен быть помещён в полосу конструктивной интерференции. Таким образом, возникает задача измерения 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 приёмнике. 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 приёма утрачивается. Для компенсации искажений широкополосных радиосигналов также должна быть решена задача измерения АЧХ радиолинии.

Подходы к измерению АЧХ радиолинии, а также характеристик АЧХ радиолинии, можно разделить на две группы: непосредственное измерение; использование радиофизических моделей. Так форму АЧХ различных радиолиний традиционно определяют непосредственно измерением коэффициентов передачи в требуемом диапазоне частот [3]. Такой же подход используют и для других линий передачи, в частности, при измерении АЧХ световодов. Существуют способы определения АЧХ, подобные непосредственному измерению коэффициентов передачи, например, на основе Фурье-преобразования импульсного отклика.

Важные для практики радиосвязи характеристики АЧХ можно измерять непосредственно. Так способ контроля канала связи [4] представляет собой фактически способ измерения ширины полос конструктивной интерференции.

Известны результаты определения статистических характеристик АЧХ с помощью гармонического сигнала, когда экспериментальные законы распределения аппроксимировали известными функциями – законы нормальный, райсовский, релеевский, Накагами [5].

Для непосредственного измерения коэффициента передачи обычно в качестве зондирующего используется гармонический сигнал. В качестве примера устройств этого класса можно привести «Невод-200» [6]. При таком измерении коэффициентов передачи радиолинии первая проблема заключается в помехах: в декаметровом диапазоне станционными помехами (которые невозможно отличить от гармонического пробного сигнала) может быть занят практически весь частотный диапазон прохождения радиоволн. Для исключения влияния постоянно работающих мощных радиостанций предлагаемое в [6] усреднение по времени не поможет, а значит в каналах, занятых мощными радиостанциями, коэффициент передачи измерить нельзя. Таким образом, этот подход можно использовать только для диагностики радиолинии на выделенных фиксированных частотах, при условии, что эти частоты с высокой вероятностью свободны от станционных помех. Однако существуют непреднамеренные помехи. Поэтому (и это вторая проблема), невозможно получить панораму АЧХ радиолинии.

Подходы второй группы основаны на радиофизических моделях. Чаще всего целью таких исследований ставится получение АЧХ с низким разрешением – порядка 1 МГц [7,8]. К этой же группе можно отнести и методы моделирования напряжённости поля в точке приёма.

В [9] на основе метода нормальных волн построена модель передаточной функции в виде ряда нормальных волн изотропного ионосферного коротковолнового радиоканала. Часто ионосферный радиоканал

рассматривается как линейная система с одним входом и несколькими выходами, соответствующими различным модам распространения сигнала.

Часто исследование свойств АЧХ многолучевой коротковолновой радиолинии на моделях проводилось только для случая двух лучей с равными амплитудами. В этом случае глубина замираний максимальна, поэтому он представляет интерес как предельный.

В отечественной литературе задача оценки тонкой структуры АЧХ многолучевой коротковолнового радиолинии поставлена в [10], там же предложены некоторые подходы к решению. Однако эти рекомендации построены на основе предположений и допущений, недостаточно подкреплённых экспериментальными данными. О неверности этих допущений можно судить, сравнивая полученные авторами работ результаты с данными наклонного зондирования ионосферы.

Таким образом, даже в тех случаях, когда ставили задачу исследования тонкой структуры АЧХ многолучевой коротковолновой радиолинии, то эту задачу решали на основе упрощённых и даже неверных положений. Поэтому АЧХ многолучевой коротковолновой радиолинии необходимо вычислять по таким характеристикам радиолинии, которые можно непосредственно оперативно измерить.

В работах [11, 12] решена задача определения комплексных передаточных функций парциальных мод распространения коротковолнового радиосигнала на основе данных наклонного зондирования коротковолновых радиолиний линейно-частотно модулированным (ЛЧМ) сигналом. При этом определение фазовой части передаточной функции для каждой моды этим способом осуществляется с точностью до линейного слагаемого, что не даёт возможность определить полный коэффициент передачи многолучевого канала.

Вследствие изменчивости ионосферы возникает необходимость оперативного измерения АЧХ коротковолновой радиолинии, причём делать это целесообразнее всего на основе данных наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) сигналами с ЛЧМ [13]. Выбранный в качестве зондирующего

ЛЧМ-сигнал, благодаря своим свойствам [13], и в отличие от гармонического сигнала, может быть выделен из сосредоточенных помех. Задача выделения полезного сигнала из сосредоточенных помех также была решена нами в [14].

В работах [15-20] нами рассматриваются модели и методики измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии, а также проводится исследование эффектов многолучевого распространения КВ с классификацией результатов по эмпирическим моделям многолучевости (ЭММЛ). В данной работе будут приведены основные методические результаты без промежуточных рассуждений и вывода формул.

Отдельно нужно рассмотреть вопрос выделения полезного сигнала на ионограмме НЗИ, являющегося первым и необходимым этапом обработки данных радиозондирования ионосферы (и НЗИ, и ВЗИ). Невысокое качество существующих алгоритмов автоматического выделения сигнала [21-35] даже для более простых ионограмм вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ) отмечается многими авторами, например, [21]: "Существующие на данный момент алгоритмы имеют значительно меньшую эффективность, например, точность автоматической обработки, применяемой дигизондом Рейниша (DPS-4) в летний период не превышает 70%, а в зимний 50%".

Ввиду недостатков автоматических способов выделения треков (особенно для ионограмм НЗИ), приходилось применять полуавтоматический способ выделения сигнала на ионограмме [15], заключающийся в том, что на ионограмме вручную оператор выделялись прямоугольные области, содержащие следы треков мод полезного сигнала, далее в выбранных областях спектральные отсчеты, превышающие заданный порог, относились к сигналу, далее находились аппроксимирующие полиномы 2-3 порядка для получения следов треков мод.

Дадим краткий обзор некоторых из упомянутых алгоритмов выделения.

Известен способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам [22] и алгоритм обработки и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования [23], основанные

на использовании трафаретных масок, когда для выделения сигнальных компонент на ионограммах применяются маски, полученные путем синтеза искусственных ионограмм на основе математических моделей распространения декаметровых радиоволн в ионосферной плазме, и подгоняемые под исследуемую экспериментальную ионограмму какими-либо методами. К недостаткам алгоритма относится то, что применяемые математические модели зачастую не обеспечивают приемлемую точность, особенно в условиях геомагнитных и солнечных возмущений, особенно в верхних широтах. Кроме того, при таких подходах невозможно выделение сигнальных компонент аномальных мод распространения.

Известен гистограммный метод выделения треков мод на ионограммах ВЗИ [24], ограничением которого является то, что принятые в нем гипотезы и допущения применимы только к ионограммам ВЗИ, и даже для таких ионограмм обоснованность гипотез в случае аномальных условий распространения требует экспериментальной проверки.

Делаются попытки применения нейронных сетей для выделения сигнала на ионограммах, но как правило только для ионограмм ВЗИ, более простых для обработки и интерпретации; примерами таких работ являются [30-35].

1. Наклонное зондирование ионосферы: методика и аппаратура

При НЗИ передатчик излучает непрерывный ЛЧМ сигнал (как следствие частота линейно зависит от времени) в КВ диапазоне (обычно от 2 до 30 МГц). Излучаемый сигнал $a(t)$ можно представить в виде:

$$a(t) = a_0 \exp[j(2\pi \cdot f_0 \cdot t + \pi \cdot \dot{f} \cdot (t)^2)] \quad t \in [-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}], \quad (1)$$

где f_0 – начальная частота излучения, $\dot{f} = \frac{df}{dt}$ скорость изменения частоты, a_0 – амплитуда сигнала, T – длительность излучения. Мгновенная круговая частота этого сигнала ω изменяется со временем линейно $\omega = 2\pi \cdot f_0 + 2\pi \cdot \dot{f} \cdot t$.

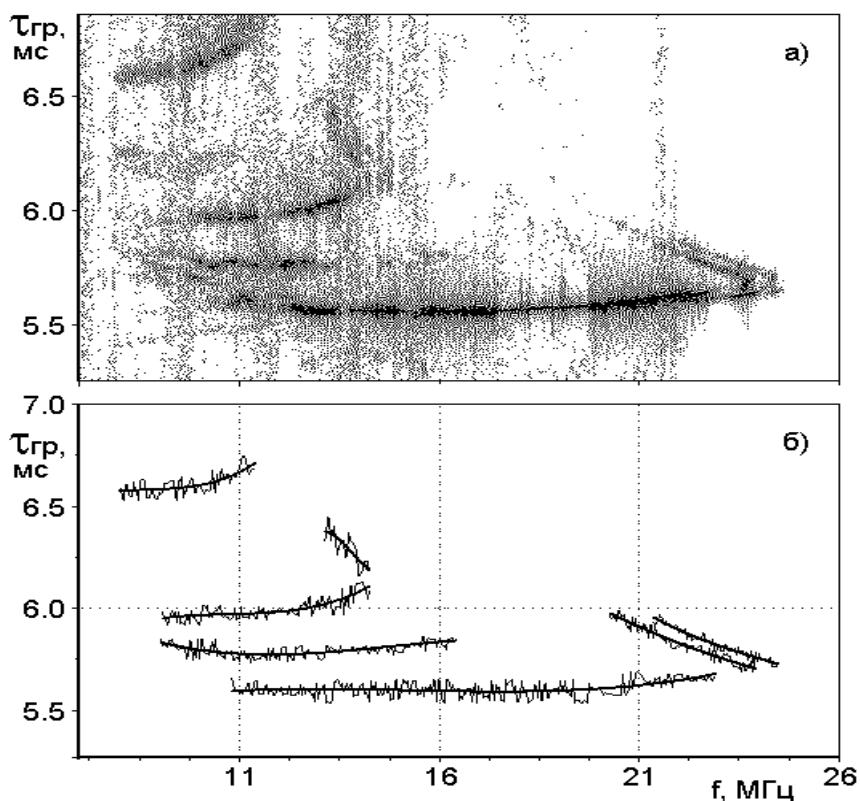


Рис. 1. Ионограмма наклонного зондирования и выделенные треки.

Сигнал распространяется в ионосфере и поступает на вход приёмника. При наклонном зондировании ионосферы (НЗИ) расстояние между приёмником и передатчиком обычно составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч километров, поэтому время распространения изменяется от единиц до десятков миллисекунд. Корреляционная обработка принятого сигнала методом сжатия в частотной области состоит в умножении его на сигнал гетеродина приёмника, комплексно-сопряжённый излучаемому сигналу. После чего происходит прохождение сигнала через фильтр нижних частот, оцифровка так называемого разностного сигнала (после фильтра нижних частот остается только разностный сигнал) и спектральный анализ (формулы преобразований сигнала здесь не приведены, см. [13, 15]). Из-за частотной дисперсии среды волны разной частоты после прохождения через ионосферу имеют разные коэффициенты отражения и время фазового запаздывания. Результатом работы наклонного ионозонда является ионограмма, характеризующая зависимости времени группового запаздывания и амплитуды сигнала от частоты (см. Рис. 1а).

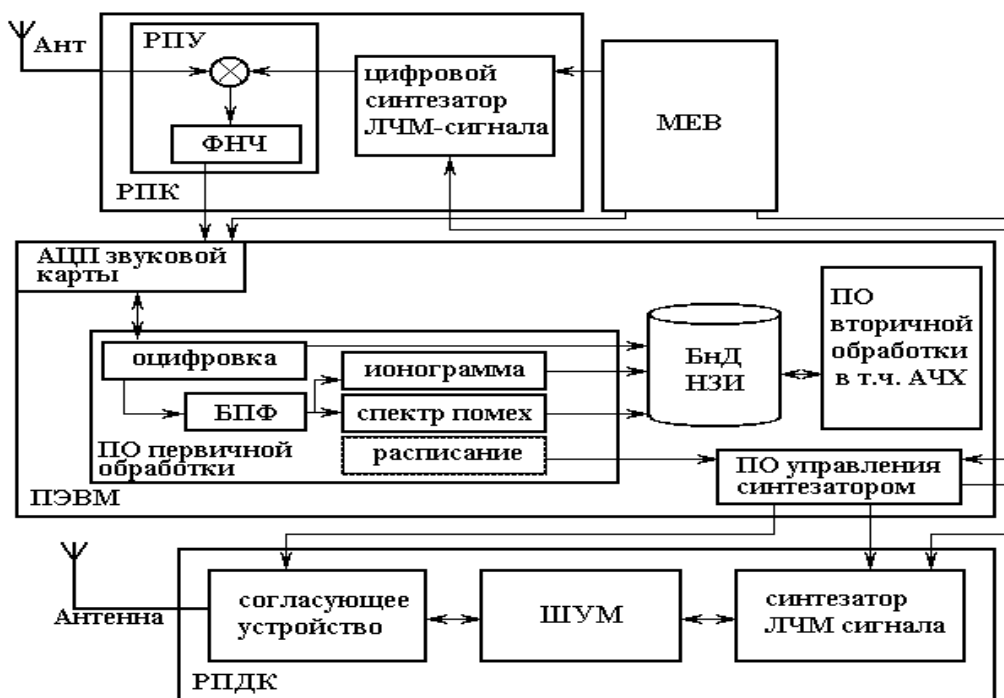


Рис. 2. Аппаратура комплекса диагностики ионосферы.

Разработанные аппаратно-программные комплексы диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний позволяют измерять в режимах наклонного зондирования ионосферы, вертикального зондирования ионосферы и панорамного измерения помех коротковолнового диапазона, при этом разработанное автором программное обеспечение комплексов позволяет не только управлять процессом измерений и регистрации данных, но и извлекать из сохранённых данных различную информацию [15-19]. Рассмотрим состав одного из вариантов исполнения комплекса. Его общая структурная схема представлена на Рис. 2. Он состоит из трех взаимосвязанных частей: радиоприемного комплекса (РПК), радиопередающего комплекса (РПДК) и ПЭВМ управления и обработки.

РПДК используется в режиме передачи диагностирующего сигнала и служит для формирования диагностирующего непрерывного ЛЧМ сигнала, его усилении по мощности и излучения. В состав РПДК входят:

- синтезатор непрерывного ЛЧМ сигнала;
- широкополосный усилитель мощности (ШУМ);
- согласующее устройство (СУ);
- передающая антенна.

РПК используется в приемном режиме, и служит для приема, корреляционной обработки, и демодуляции диагностирующего сигнала.

В состав РПК входят:

- синтезатор непрерывного ЛЧМ сигнала;
- радиоприемное устройство (РПУ);
- приемная антенна.

ПЭВМ управляет работой всех технических средств комплекса диагностики в режимах приема и передачи диагностирующего сигнала, а также обрабатывает результаты диагностики радиолиний. В ПЭВМ установлено ПО управления синтезатором ЛЧМ сигнала РПК и РПДК, построения ионограмм, их обработки и занесения в банк данных (БнД); ПО вторичной обработки. В ПЭВМ находится также модуль единого времени (МЕВ), являющийся источником точного времени.

Кроме того, в состав диагностирующего комплекса входит опорный генератор, формирующий высокостабильный опорный сигнал заданной частоты. Этот сигнал используется для формирования когерентных ЛЧМ сигналов. Также этот сигнал поступает в МЕВ для формирования импульса запуска аппаратуры в режиме диагностики и тактовых последовательностей управления электронными часами.

2. Две методики измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии

2.1. Первая методика

На основе математических моделей распространения КВ в приближении геометрической оптики получена модель АЧХ многолучевой КВ радиолинии. При этом используется известный подход разложения комплексной фазо-частотной характеристики в ряд Тейлора в окрестностях рабочей частоты и рассматриваются первые три члена разложения (допущения и условия применимости такого подхода также известны, и здесь достаточно сказать, что они выполняются при используемых нами частотно-временных параметрах режимов НЗИ). При этом новшество заключается в том,

что в одном из членов разложения производная фазы по частоте (называемая также групповым запаздыванием) заменяется полиномиальной аппроксимацией. В итоге, 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 . 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 . В результате аналитическое выражение для оценки АЧХ КВ радиолинии имеет следующий вид:

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

Модель АЧХ КВ радиолинии (2) строилась так, чтоб её параметрами были те величины, которые можно получить из реальной экспериментальной ионограммы НЗИ. Процесс получения этих параметров выглядит так. На ионограмме (вручную) 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. 1б). Амплитуда моды (АЧХ парциальной моды) находится по ионограмме (функция частоты и времени группового запаздывания), затем для удаления одиночных выбросов (вызванных, скорее всего, ошибкой выделения моды) подвергается медианной фильтрации. В качестве примера на Рис. 3, 4 показаны фрагменты АЧХ всей радиолинии, вычисленной по формуле (2), с разрешением 100 Гц и 50 Гц соответственно, причем Рис. 3 соответствует двухмодовому участку ионограммы,

а Рис. 4 – четырехмодовому. Такой характер поведения АЧХ соответствует современным теоретическим представлениям [10].

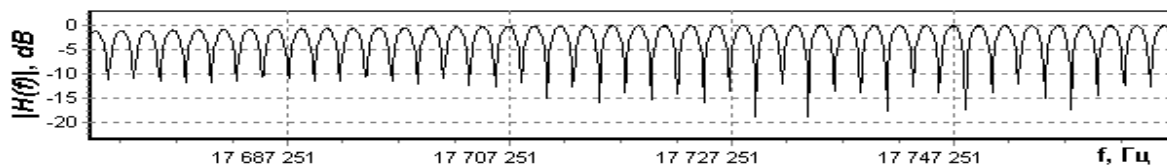


Рис. 3. Фрагмент АЧХ радиолинии с разрешением 100 Гц, двухмодовый участок.

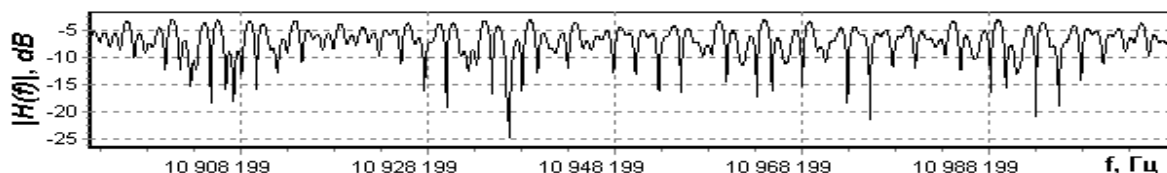


Рис. 4. Фрагмент АЧХ радиолинии с разрешением 50 Гц, 4-модовый участок.

Представленная методика обладает тем преимуществом, что вместе с АЧХ радиолинии в результате становится известна и модовая картина многолучевого распространения, что позволяет делать качественные выводы (важно для радиофизики и геофизики), а также применять классификации по ЭММЛ [15]. Однако этой методике присущи недостатки: ручной этап выделения треков мод, а также потеря части информации об энергии треков мод вследствие диффузности (размытости) следов треков мод на ионограмме. Первый недостаток в перспективе может быть преодолен средствами теории обучения машин (подробнее будет сказано ниже). Второй недостаток потенциально возможно преодолеть путем усложнения используемой модели АЧХ радиолинии, где будет учитываться и информация из диффузных областей [20]; диффузная многолучевость возникает потому, что ионосфера не является идеальной гладкой отражающей поверхностью: неоднородности в ионосфере приводят к возникновению частично диффузных отражений, когда радиолуч на выходе из ионосферы представляет собой пучок, содержащий множество элементарных лучей, и в место приема попадает множество элементарных лучей, относящихся к различным пучкам.

2.2. Вторая методика

2.2.1. Вычисление АЧХ многолучевой КВ радиолинии по сигнальным составляющим ионограммы НЗИ

Первая методика (выражение (2)) удобна для схематического представления характеристик многолучевого распространения (в частности позволила провести наглядное моделирование вида АЧХ) и хорошо стыкуется с используемой [15] методикой систематизации и классификации по ЭММЛ. Однако при практическом использовании для оценки АЧХ КВ радиолинии она обладает рядом недостатков (указанных выше), поэтому для автоматического вычисления АЧХ по данным наклонного зондирования потребовалась ее доработка до следующего вида:

$$H(\omega; t) = \sum_{i=1}^m H_i(2\pi \cdot f_o + 2\pi \cdot \dot{f} \cdot t; t) = \frac{2\pi}{a_o^2} \sum_{i=1}^m A_i(t) \cdot \exp[-j(\frac{\Omega_i^2}{4\pi \dot{f}})], \quad (3)$$

где: $\Omega_i = 2\pi F_{ди} - 2\pi \dot{f} \tau_i$; $A_i(t)$ – сигнал разностной частоты i -ой моды на выходе приемника ионозонда; ω – круговая частота, $\omega = 2\pi \cdot f_o + 2\pi \cdot \dot{f} \cdot t$; f_o – начальная частота излучения, a_o – амплитуда ЛЧМ сигнала; \dot{f} – скорость изменения частоты.

Отличие модели (3) от модели, представленной выражением (2) в том, что в (3) не требуется выделение трека (траектории моды), а достаточно лишь выделить спектральные компоненты полезного сигнала на ионограмме (и не решать вопрос о принадлежности их к трекам). И эта задача гораздо проще автоматизируется. Поэтому также для алгоритма автоматического измерения АЧХ КВ радиолинии был разработан алгоритм автоматического выделения спектральных составляющих сигнала (“полезного сигнала”) на ионограмме НЗИ.

2.2.2. Выделение составляющих сигнала на ионограмме

Как было указано выше, для практического применения второй методики автоматического измерения АЧХ КВ радиолинии нужен алгоритм

автоматического выделения спектральных составляющих сигнала (“полезного сигнала”) на ионограмме НЗИ.

Разработанный алгоритм основан на критерии обнаружения резко выделяющихся значений выборки [36], уже применявшегося нами для обнаружения сосредоточенных помех [14]. В указанной работе [36] предложена классификация симметричных законов распределения, основанная на использовании оценок эксцесса и энтропии распределения; показана эффективность энтропийных оценок при исследовании случайных погрешностей измерительных устройств. При таком подходе спектр сигнала рассматривается в рамках модели смеси двух распределений с существенно различающимися дисперсиями и в этом случае суммарное распределение имеет вид распределения с “утяжеленными концами”.

Очевидно, что для решаемой здесь задачи, метод должен применяться “наоборот”, т.е. резко выделяющиеся отсчеты выборки (спектра сигнала с выхода ионозонда) считаются полезным сигналом, оставшиеся зануляются. Математические выражения, описывающие метод, аналогичны [14], но обработка данных организована здесь совершенно иначе: обрабатываются спектры сигнала разностной частоты, а не сигнал разностной частоты (как это было в [14]), кроме того, резко выделяющееся наблюдение соответствует полезному сигналу, а не помехе. Покажем здесь основное выражение:

$$|a_k - \bar{a}| \leq \sigma \cdot (1,55 + 0,8\sqrt{E+2} \cdot \lg(N/10)), \quad (4)$$

где: $\bar{a} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i$, σ и E – соответственно СКО и эксцесс выборки a размером N .

Если для величины a_k выполняется условие (4), то нет оснований считать это значение значительно отличающимся от среднего, если же неравенство (4) для некоторого элемента не выполняется, то предполагается, что этот элемент относится к “полезному” сигналу.

Обработка производилась блоками, соответствующими одному спектру сигнала, т.е. одной вертикальной линии изображения ионограммы. Следует еще раз обратить внимание, что в отличие от [14] здесь обработка производится в частотной области.

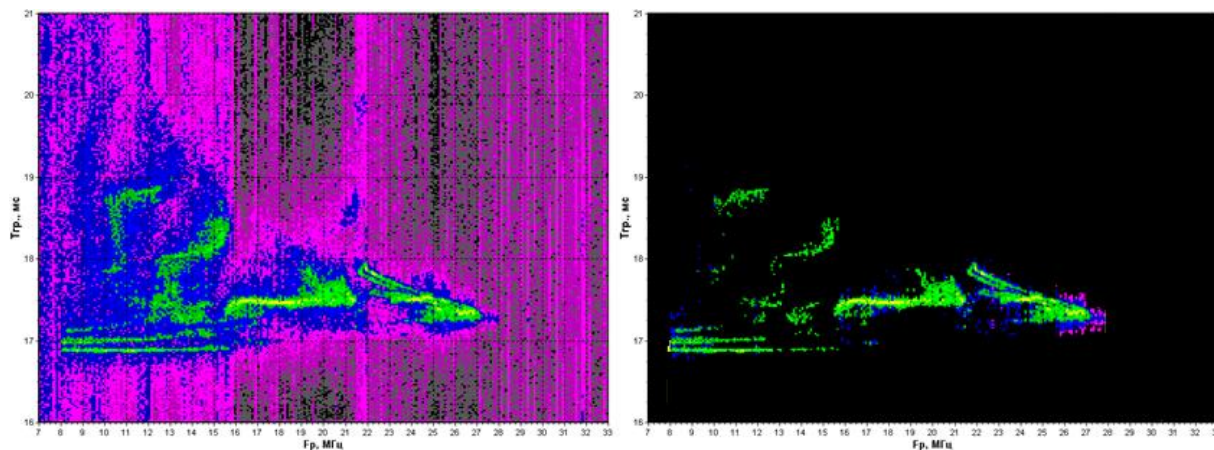


Рис. 5. Пример удаления зашумленного фона ионограммы.

Эффективность описанного алгоритма иллюстрирует Рис. 5, где приведен пример выделения на ионограмме НЗИ компонентов полезного сигнала (удаления с ионограммы всех спектральных компонентов, кроме компонентов полезного сигнала).

Предложенный алгоритм обладает рядом преимуществ перед известными ранее алгоритмами и методиками очистки ионограмм от помех и выделения полезного сигнала на ионограмме [21-29], важнейшие из которых: существенно меньшая вычислительная трудоемкость (примерно на порядок), позволяющая производить выделение полезного сигнала в реальном времени в течение сеанса зондирования; отсутствие параметров алгоритма, задаваемых оператором в зависимости от протяженности трассы, порядка мод, зашумленности и т.п., что позволяет полностью автоматизировать процесс обработки. Таким образом процесс вычисления АЧХ КВ радиолинии по ионограмме НЗИ полностью автоматизирован.

3. Верификация методик измерения АЧХ

Вообще, для АЧХ КВ радиолинии низкого разрешения (порядка 1 МГц) возможно сопоставление с результатами моделирования по существующим моделям напряженности поля в точке приема. Метод прогнозирования распространения КВ (Отчет МККР 894) состоит из прогноза МПЧ и средних значений напряженности поля. Он представляет собой комбинацию упрощенного метода из Отчета МККР 252 (для трасс протяженностью от 0 до 7000 км.) и метода FTZ (для трасс протяженностью более 9000 км.), и линейной интерполяции значений, полученных двумя вышеупомянутыми методами для трасс протяженностью от 7000 до 9000 км. Метод прогнозирования МПЧ взят из Отчета МККР 340; прогнозирование затухания и шума – из отчетов МККР 266 и 322 соответственно. Сопоставление показало высокую корреляцию (Пирсона) для участков основных мод (а редкие и аномальные моды не учитываются в методе моделирования напряженности в точке приема, по тем же причинам для вычисления АЧХ необходимо также было подбирать ионограммы классического т.е. типичного вида), значения корреляции составляли 0.6-0.95, то есть корреляция в диапазоне от значимой до очень сильной [15]. Однако важно отметить, что это верификация АЧХ с низкими разрешениями (порядка 1 МГц), в то время как основное достоинство разработанных методик вычисления АЧХ КВ радиолинии – в возможностях получения высоких разрешений по частоте.

Достоверность измерения АЧХ КВ радиолинии с высоким частотным разрешением была проверена [15] путем сопоставления с огибающей сигнала разностной частоты, т.к. огибающая согласно теоретическим соображениям [13] в случае отсутствия помех подобна АЧХ КВ радиолинии (в случае отсутствия помех задача оценки АЧХ КВ радиолинии, могла бы быть сведена к отысканию огибающей временного ряда сигнала разностной частоты).

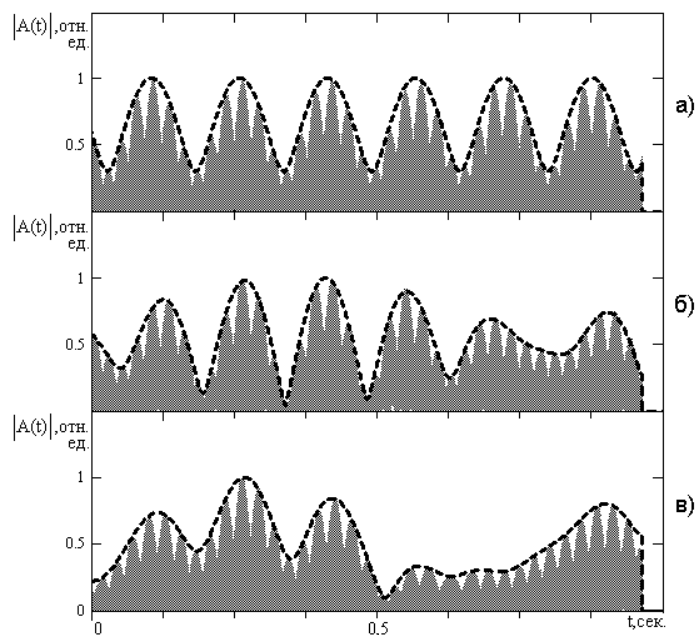


Рис. 6. Ионограмма наклонного зондирования и выделенные треки.

На каждом из рисунков ба, бб, бв для двухмодового, трехмодового и четырехмодового каналов соответственно, изображена зависимость $|A_{\text{вых}}(t)|$ (серым цветом) полученная в результате имитационного моделирования прохождения ЛЧМ сигнала (1) через радиоканал с передаточной функцией (3) и его соответствующей обработки, на этих же рисунках пунктирной линией изображена зависимость $|H(t)|$. Видно, что огибающая $|A_{\text{вых}}(t)|$ хорошо согласуется с вычисленной $|H(t)|$. Это говорит о том, что правильно определяются не только амплитуды отдельных мод, но и их фазы.

Заключение

В статье представлены две методики измерения АЧХ многолучевой ионосферной радиолинии. Первая методика обладает преимуществом, что вместе с АЧХ радиолинии в результате становится известна и модовая картина многолучевого распространения, что позволяет делать качественные выводы (важно для радиофизики и геофизики), а также применять классификации по ЭММЛ. Однако первой методике присущи недостатки: ручной этап выделения треков мод (в перспективе может быть автоматизирован средствами теории обучения машин), а также потеря части информации об энергии треков мод вследствие диффузности (размытости) следов треков мод

на ионограмме (в перспективе можно преодолеть путем усложнения используемой модели АЧХ радиолинии, где будет учитываться и информация из диффузных областей). Вторая методика, наоборот, даёт только оценку АЧХ многолучевой радиолинии без раскрытия модовой картины многолучевости, но делает это автоматически и без потери информации об энергетике размытых треков (качество учета информации о размытых треках зависит от качества алгоритма автоматического выделения компонент полезного сигнала на ионограмме).

Важнейшим достоинством обеих методик является вычисления АЧХ КВ радиолинии с высоким разрешением по частоте (десятки-сотни Гц). Таким образом, можно говорить о комплексном методе измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии, информационная диаграмма которого показана на Рис. 7.

Следует отметить, что модели и методики измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии имеют не только непосредственное прикладное значение, но и научно-прикладное – для более адекватного комплексного моделирования загоризонтных радиолокационных станций (РЛС) ДКМ диапазона [37], в т.ч. в разрабатываемой отечественной САПР РЛС [38].

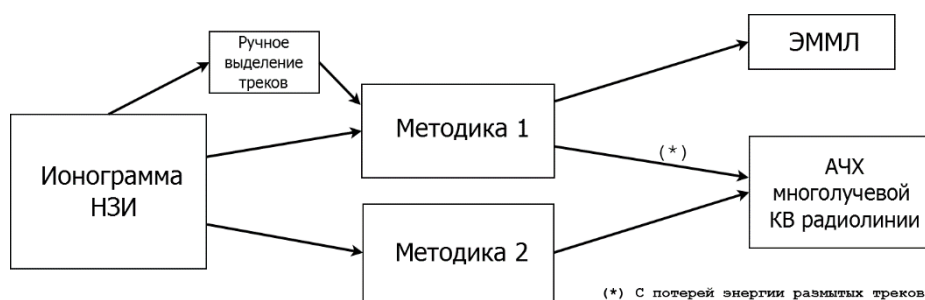


Рис. 7. Диаграмма комплексного метода измерения АЧХ многолучевой КВ радиолинии.

Направлением дальнейших исследований является применение теории обучения машин для совершенствования описанных методик измерения АЧХ КВ радиолинии. Наиболее перспективным видится применение глубокого обучения для подзадачи выделения сигнала на ионограммах НЗИ, что, однако, потребует размеченных обучающих выборок больших размеров (заметим, что в уже упоминавшихся работах [30-35] делаются попытки

применения нейронных сетей для выделения сигнала на ионограммах, но только для ионограмм ВЗИ, более простых для обработки и интерпретации). Причем для второй методики задача применения теории обучения машин проще, чем для первой, поскольку требуется только выделение сигнальных компонент на ионограмме, для первой же методики также требуется сегментация (группировка) выделенных сигнальных компонент по трекам мод, а в идеале (но это уже для задач геофизики и радиофизики) еще и идентификация этих треков мод. Нами произведена [18] предварительная апробация выделения компонент сигнала на ионограмме НЗИ посредством сверточных нейронных сетей (CNN), пока неглубоких, поскольку еще не размечены необходимые для глубоких сетей большие обучающие выборки.

Литература

1. Кеннеди Р. Каналы связи с замираниями и рассеянием. М.: Советское радио, 1973. 304 с.
2. Fabrizio G.A. High frequency over-the-horizon radar: fundamental principles, signal processing, and practical applications. McGraw-Hill Education, 2013.
3. А.с. 1305880 СССР, МПК Н 04 В 3/46. Способ измерения характеристики группового времени замедления и амплитудно-частотной характеристики канала связи / А.Д. Зорьев (СССР). – 4475118/24-09; Заявлено 08.08.88; Опубл. 07.10.90; Бюл. № 37.
4. А.с. 1305880 СССР, МПК Н 04 В 3/46. Способ контроля канала связи / Т.А. Золотухина, Крютченко Т.В. (СССР). 4481081/00-09; Заявлено 17.06.88; Опубл. 23.06.91; Бюл. № 23.
5. Вовк В.Я., Шумилов И.А. Измерение амплитудных характеристик многомодового сигнала при НЗ на субавроральной радиолнии // Тр. Аркт. и Антаркт. НИИ. 1991, №427. С.131–138.

6. Брянцев В.Ф., Стародубровский А.С. Измерения АЧХ при наклонном зондировании ионосферы широкополосными сигналами // Труды всероссийской научной конференции "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике". Муром, 2003. С. 263–266.
7. Михайлов С.Я. Моделирование отклика анализатора спектров вертикального ЛЧМ-иозонда и восстановление передаточной функции в области полупрозрачности Е-слоя ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 44, 2001, №8, С.641–652.
8. Куницин В.Е., Усачев А.Б. Амплитудно- и фазочастотные характеристики вертикального радиозондирования магнитоактивной ионосферы // Радиотехника. 1991, № 1. С. 8–10.
9. Куркин В.И. Моделирование, диагностика и прогнозирование характеристик КВ сигналов на основе метода нормальных волн: Дис. ... докт. физ.-мат. наук / ИСЗФ СО РАН. Иркутск, 1999.
10. Терехов Л.С., Шапцев В.А. Повышение точности радиозондирования ионосферы. Новосибирск: Изд. СО РАН, 1997. 131с.
11. Колчев А.А. Исследование ионосферных каналов распространения ДКМВ для сигналов с расширенным спектром: Дис. ... канд. физ.-мат. наук / КГУ. Казань, 1996.
12. Иванов В.А., Колчев А.А., Шумаев В.В. Аппаратно-программный комплекс для определения передаточной функции широкополосного КВ - радиоканала // Проблемы дифракции и распространения волн: Межвед. сб. М.: МФТИ, 1995. С.103–109.
13. Филипп Н.Д., Блаунштейн Н.Ш., Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Урядов В.П. Современные методы исследования динамических процессов в ионосфере. Кишинев: Штиинца, 1991. 286 с.
14. Колчев А.А., Щирый А.О. Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ зондировании ионосферы. Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2006, т.XLIX, № 9. С.751–759.

15. Щирый А.О. Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний: Дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербургский гос. университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, СПб, 2007.
16. Shiriy A.O. HF channel transmit function module measurement // Proceedings of 5th International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE2002. 5. 2002. pp. 365–369.
17. Колчев А.А., Щирый А.О. Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ-иозонда. Оптика атмосферы и океана. 2007. Т.20. № 7. С. 627–630.
18. Щирый А.О. Алгоритмы и программное обеспечение автоматизации процессов измерений и обработки данных оперативной диагностики ионосферы и ионосферных радиолиний. Журнал радиоэлектроники. – 2022. №10. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.10.4>
19. Колчев А.А., Щирый А.О., Недопекин А.Е. Математические модели и методики измерения АЧХ многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний: монография / Марийский гос. ун-т. Йошкар-Ола, 2013. 147 с.
20. Колчев А.А., Щирый А.О. Измерение АЧХ ионосферной КВ радиолинии с целью компенсации искажений, вносимых средой распространения // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2009. Т.9. №4. С.23–26.
21. Долгачева С.А., Макарова Л.Н., Николаев А.В. Обработка ионограмм высокоширотных станций вертикального зондирования с использованием нейронных сетей: E_c и Φ_2 слои // Physics of Auroral Phenomena. 2020. Т.43. №1. – С.105-108.
22. Патент РФ №2697433 С1. Цыбуля К.Г. Способ автоматического определения параметров ионосферных слоев по ионограммам. Дата заявки: 26.10.2018. Дата публикации: 14.08.2019.

23. Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В., Михайлов С.Я. Обработка и интерпретация ионограмм вертикального и наклонного зондирования для диагностики ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда. Вестник СибГАУ им. акад. М.Ф. Решетнева. 2013. № 5(51). С. 163–166.
24. Зыков Е.Ю., Акчуринов А.Д., Сапаев А.Л., Шерстюков О.Н., Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Учён. зап. Казан. гос. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки, т.150, № 3, Изд-во Казанского ун-та, Казань, 2008, С.36-45.
25. Мочалов В.А., Мочалова А.В. Применение глубокого обучения для распознавания ионограмм // Труды XXVI Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (РРВ-26), 2019, Казань, Том II, С. 413-417.
26. Егосин А. Б. Автоматизированная система адаптивной обработки сигналов со сверхбольшой базой для радиозондирования ионосферных радиолиний: Дис. ... канд. техн. наук / МарГТУ. Йошкар-Ола, 2003.
27. Pulinets S.A. Automating vertical ionogram collection, processing and interpretation // Ionosonde networks and stations. Proceeding of Session G6 at the XXIV General Assembly of the International Union of Radio Science (URSI). Kyoto, Japan, National Geophysical Data Center, 1995. pp.37–43.
28. Galkin I.A., Reinisch B.W. The new ARTIST 5 for all digisondes // Ionosonde Network Advisory Group Bulletin. 2008. vol.69. №8. pp.1-8.
29. Fagre M., Prados J.A., Scandalariis J., Zossi B.S., Cabrera M.A., Ezquer R.G. Elias A.G. Algorithm for automatic scaling of the F-layer using image processing of ionograms // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2020. vol.59. №1. pp.220-227. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.2996405>
30. Thanakulketsarat T., Sapon T., Phakphisut W., Hozumi K., Wongtrairat W. Ionograms scaling by using the convolutional neural network // 9th International Electrical Engineering Congress (iEECON). IEEE, 2021. pp.245-248.

31. Guo L., Xiong J. Multi-Scale Attention-Enhanced Deep Learning Model for Ionogram Automatic Scaling // Radio Science. 2023. vol.58. №3. p.e2022RS007566. <https://doi.org/10.1029/2022RS007566>
32. Lu Z., Hua C., Wei N., Feng J., Lou P., Liu W. Research on classification of vertical ionogram based on deep convolution neural network // Progress in Geophysics. 2022. vol.37. №5. pp.1834-1839. <https://doi.org/10.6038/pg2022GG0073>
33. Xiao Z., Wang J., Li J., Zhao B., Hu L., Liu L. Deep-learning for ionogram automatic scaling // Advances in Space Research. 2020. vol.66. №4. pp.942-950. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.05.009>
34. Li H., Zhang C., Yin B., Jia X., Xu J., Xue J., Ma M. A Method for Separating the O/X Mode Signals in Vertical Ionograms Based on Improved U-Shaped Encoder–Decoder Network // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2023. vol.61. pp.1-13.
35. De la Jara C., Olivares C. Ionospheric echo detection in digital ionograms using convolutional neural networks // Radio Science. 2021. vol.56. №8. pp.1-15.
36. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.:Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. 304 с.
37. Щирый А.О. Проблемы создания комплексного испытательного моделирующего стенда загоризонтных радиолокационных станций декаметрового диапазона, включая адаптацию к геофизической обстановке // Труды IX Всероссийской научно-технической конференции «Дальняя радиолокация на службе Отечеству» / НИИДАР, РТИ им.акад.А.Л.Минца. М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2023. С.182-193.
38. Арутюнян А.А., Конопелькин М.Ю., Щирый А.О. Уровни и этапы проектирования и исследования перспективных радиолокационных станций в отечественной специализированной САПР // Журнал радиоэлектроники. 2022. №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.5.3>

Для цитирования:

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>