

УДК

КОМПЛЕКСНЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова,
А.Б. Егошин, А. Р. Лашевский, А.В. Мальцев

*Поволжский государственный технологический университет
г. Йошкар-Ола*

Предложен и исследован комплексный адаптивный метод обработки ионограмм, обеспечивающий удаление помех с ионограмм вертикально-наклонного зондирования ионосферы и включающий новый алгоритм обнаружения сигнала в вектор-столбцах матрицы-ионограммы в условиях полной априорной неопределенности, а также – алгоритм фильтрации ионограмм в том числе с применением метода Канны. Рассмотрен развивающийся в настоящее время метод восстановления профиля электронной концентрации с использованием модели IRI по ионограммам вертикального зондирования ионосферы.

Ключевые слова: адаптивный метод, ионограмма, ионосфера, помеха, вертикально-наклонное зондирование, линейно-частотно модулированный сигнал, профиль концентрации.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время прогнозирование и мониторинг атмосферы Земли и ее ионизированной компоненты - ионосферы относятся к критическим технологиям. Поэтому развитие методов радиофизического зондирования ионосферы является актуальной научной проблемой. По ионограммам определяются различные характеристики ионосферы и линий КВ связи. При этом считается, что зондирование не должно создавать помех другим радиотехническим системам КВ диапазона. Это возможно только при уменьшении мощности зондирующего сигнала. Для зондирующих систем военного назначения уменьшение их мощности будет приводить к повышению энергетической скрытности, что является важным положительным качеством.

При цифровой обработке зондирующих сигналов ионограмма представляет собой матрицу, которая является упорядоченным множеством (многомерным вектором) векторов-столбцов. Наряду с компонентами, содержащими полезный сигнал, этот вектор содержит и компоненты, представляющие сигналы помех. Это может быть и широкополосный шум и по-

мехи от вещательных станций. Во всех случаях отношение сигнал/шум в вектор - столбце ионограммы прямо пропорционально произведению импульсной мощности сигнала на его базу, которая равна $D=BT$ (B - полоса частот, а T - длительность сигнала или его элемента). Поэтому при снижении мощности сигнала для уменьшения негативного влияния на другие системы КВ диапазона, приемлемое отношение сигнал/шум можно получить, увеличивая его базу. Физической причиной увеличения отношения сигнал/шум в этом случае является эффект сжатия сигнала во временной или частотной областях, величина которого также определяется базой сигнала. Необходимо учитывать, что вектор – столбцы из-за изменчивости ионосферы и шумовой обстановки представляют собой стохастические величины, а ионограммы – изменяющиеся во времени изображения. Это требует усреднения компонент вектор – столбцов и создания адаптивных алгоритмов обработки ионограмм.

Зондирование ионосферы является разновидностью радиолокации, когда объект носит распределенный в пространстве характер. Обычно в радиолокации увеличение базы сигнала связывают с увеличением полосы его ча-

стот, а сами сложные сигналы называют широкополосными. Увеличение полосы сигнала приводит к росту разрешающей способности локатора по времени группового запаздывания. Однако, при зондировании ионосферы данный подход является неприемлемым из-за дисперсионных свойств среды распространения (ее показатель преломления зависит от частоты), когда спектральные компоненты сигнала распространяются с различной фазовой скоростью, что приводит к его дисперсионным искажениям, тем более значительным, чем шире полоса их спектра. По рекомендациям URSI приемлемые дисперсионные искажения сигналов имеют место, когда их полоса частот не превышает 15-20 кГц при вертикальном и 30-40 кГц - при наклонном зондировании. По причине дисперсионных искажений база зондирующего сигнала может быть увеличена только за счет увеличения его длительности. Поэтому сложные зондирующие сигналы разумно назвать «длинными».

Отметим, что из всего множества сложных сигналов для зондирования нашли применение лишь два, а именно сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) и с фазо-кодовой манипуляцией (ФКМ). По причинам технического характера в настоящее время самыми «длинными» сложными сигналами являются сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Например, длительность ЛЧМ сигнала (сжимаемого элемента) составляет $\sim 0,5$ с, в то время как длительность зондирующего ФКМ сигнала ~ 500 мкс [1]. Поэтому его база в 1000 раз больше базы ФКМ сигнала. Это обеспечивает ЛЧМ ионозондам более высокое качество получаемой информации (с меньшим отношением сигнал/шум) при меньшей мощности излучаемого сигнала. Большая длительность зондирования (~ 5 мин) дает возможность эффективно «усреднять» элементы вектор – столбцов ионограммы, что важно для решения задачи автоматического обнаружения сигнала. Однако, большая длительность не позволяет исследовать ионосферные процессы, протекающие быстрее 5 мин. Поэтому при выборе ионозонда следует учитывать общие требования с радиотехническим системам зондирования и задачи, которые предстоит решать с его помощью.

Принципиальным является реализация в ионозондах процедуры автоматической цифровой обработки ионограммы, которая может быть решена при условии эффективного обнаружения сигнала и выделения его на ионограмме.

К настоящему моменту в ЛЧМ ионозондах применяется несколько методов обнаружения и выделения полезного сигнала: с фиксированным порогом, с динамическим порогом, медленной фильтрации и распознавания изображений [1-4,8]. Однако применение данных методов обработки по отдельности не решает задачи эффективного выделения полезного сигнала (очистки ионограммы от помех), поскольку ионограммы представляют собой меняющиеся во времени изображения при полной априорной неопределенности уровня помех и спектра принимаемого сигнала. Проведенные исследования [1,2,4] показали, что решение данной проблемы связано с созданием адаптивного комплексного алгоритма, позволяющего осуществлять его настройку (адаптацию) к условиям распространения КВ радиоволн на соответствующей радиолинии.

Цель работы - представить разработанный комплексный адаптивный метод обнаружения и выделения полезного сигнала, «очистки» ионограмм и построения треков, относящихся к различным механизмам распространения, на ионограммах вертикально-наклонного зондирования ионосферы.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ИССЛЕДОВАНИЙ

Представленные ниже исследования требовали экспериментальной апробации разработанных методов и алгоритмов автоматической цифровой обработки ионограмм вертикально-наклонного зондирования ионосферы. Для этих целей использовался мобильный ЛЧМ ионозонд представленный на рис.1, который был разработан в лаборатории распространения радиоволн и физики атмосферы Поволжского государственного технологического университета (ПГТУ - в прошлом Марийского государственного технического университета) – г. Йошкар-Ола. Его диапазон частот 1,5 – 30 МГц, скорость изменения частоты 50-1000 кГц/с, мощность не выше 100Вт.

Использовалась также база экспериментальных данных, полученных в ПГТУ с 1993 года и по настоящее время, которые охватывали различные геофизические условия распространения КВ радиоволн, трассы различной протяженности и географической ориентации, включая квазивертикальные [1,2].

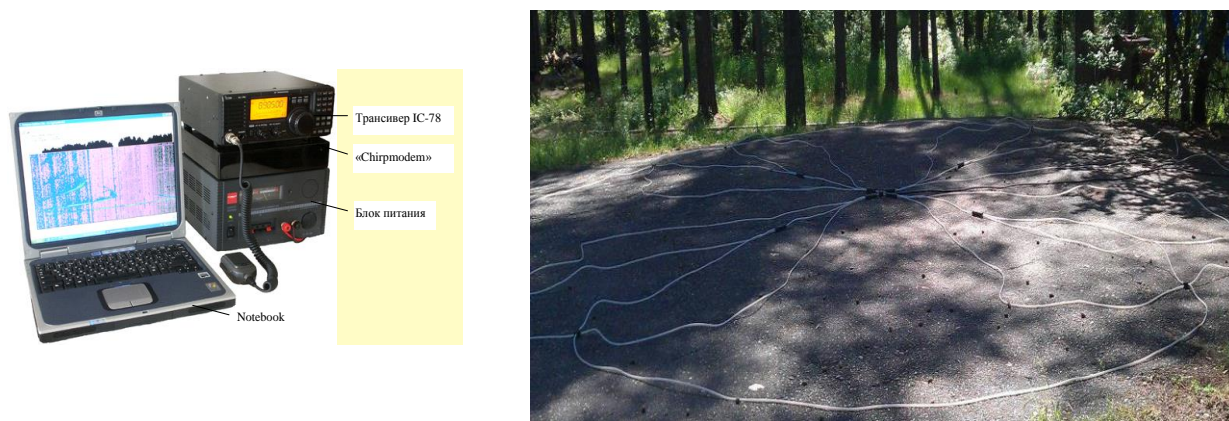


Рис. 1. Внешний вид ЛЧМ ионозонда и мобильной приемо-передающей КВ антенны, работающей с поверхности земли

ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА ИОНОГРАММ ЛЧМ ИОНОЗОНДА ПУТЕМ РЕЖЕКТИРОВАНИЯ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПОМЕХ

Основным источником помех в КВ диапазоне являются работающие радиостанции. Рассмотрим их воздействие на импульсный и ЛЧМ ионозонды, используя результаты работ [например, 2]. Воздействие станционных помех на различные типы ионозондов иллюстрирует рис. 2.

Ионозонд с простым импульсным сигналом имеет полосу пропускания обратную длительности зондирующего импульса. Для типичных значений $T_{\text{и}} \sim 66,6$ мкс полоса приемника составляет $\Delta f_{\text{и}} \sim 15$ кГц. У ЛЧМ приемника при скорости изменения частоты 100кГц/с, его полоса пропускания будет составлять всего ~ 500 Гц.

Рисунок 2 иллюстрирует, как все станционные помехи попадают в полосу пропускания импульсного ионозонда одновременно, из-за чего подавить их практически невозможно. В приемнике ЛЧМ ионозонда за время сжатия АЧХ приемника медленно (со скоростью ~ 100 кГц/с) «натывается» на помехи, превращая их в импульсный шум, который в ионозонде ПГТУ подавляется путем режектирования. Это приводит к значительному улучшению качества исходных ионограмм.

Достаточно широкая полоса пропускания приемника импульсного зонда и малое значение базы сигнала ($B \sim 1$) требует значительных мощностей зондирующего сигнала. Поэтому для получения ионограмм приемлемого качества в ионозондах «Авгур», «Циклон», «Вертикаль», «Сойка», «Базис», НАИС и др. исполь-

зуются передатчики мощностью 5-30 кВт (в режиме вертикального зондирования). Это приводит к значительным размерам ионозондов, требуют систем охлаждения, высокой электрической прочности фидеров и антенны. Что негативно отражается на себестоимости устройств и их электромагнитной совместимости с системами КВ связи. Действительно, импульсный ионозонд, излучающий сигнал длительностью $T_{\text{и}}$, имеет спектр вида $\sin x/x$. Ширина его центрального лепестка составляет $1/2 T_{\text{и}}$. При мощности ионозонда 10кВт до десяти и более боковых лепестков создают значительное излучение. Поэтому спектр импульсного сигнала, одновременно «накрывает» все связные каналы в полосе частоты не менее 100 кГц. ЛЧМ ионозонд на небольшом интервале времени излучает узкополосный квазигармонический сигнал, спектр которого достаточно медленно (со скоростью 50-100 кГц/с) перемещается со временем по оси. Поэтому ЛЧМ сигнал "проходит" через связные каналы последовательно и в определенные моменты времени может находиться только в одном связном канале.

Экспериментальная апробация алгоритма режектирования и ограничения сосредоточенных помех с оценкой эффективности проводилась на различных среднеширотных радиолиниях. Выбирались ионограммы с разной загруженностью помехами и относящиеся к различным геофизическим условиям: времени суток, сезонам года. Всего их было обработано около 60. В совокупности эти матрицы - ионограммы содержали свыше 15200 вектор - столбцов. Размер выборки в данном случае определяется числом последних, так как алгоритм обрабатывает отсчеты сигнала разностной частоты блоками соответствующего размера и

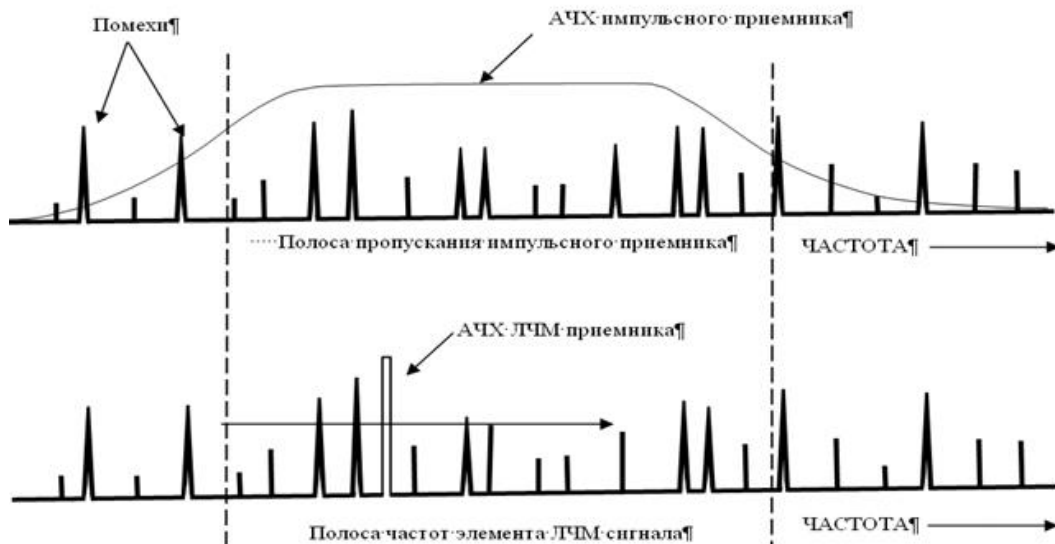


Рис. 2. Воздействие сосредоточенных помех на импульсный и ЛЧМ ионозонды

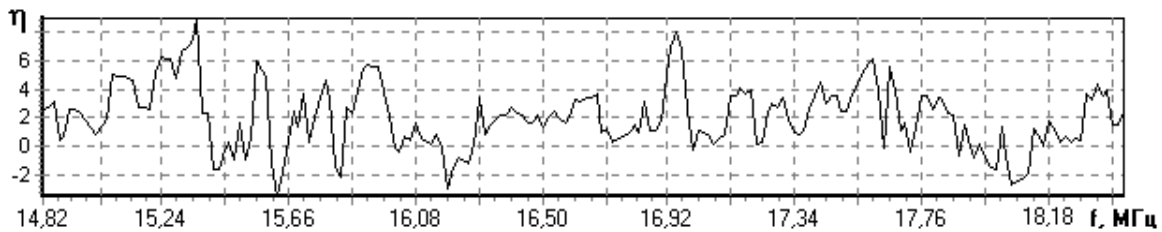


Рис. 3. Выигрыш в отношении сигнал/шум после режектирования помех

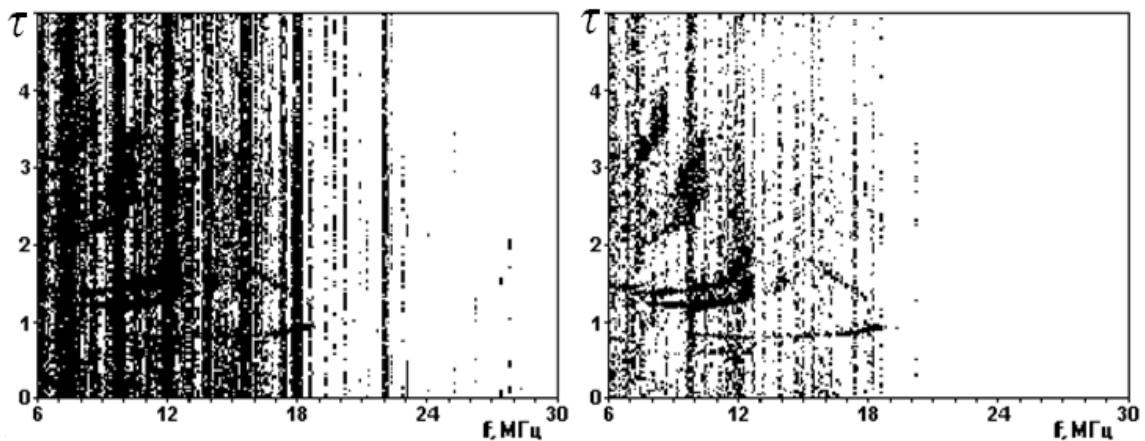


Рис. 4. Экспериментальная ионограмма наклонного зондирования: а – до режектирования, б – после режектирования сосредоточенных помех

эффективность алгоритма оценивается для каждого столбца отдельно. Для количественной оценки эффективности разработанного алгоритма был введен коэффициент $\eta = 10 \lg[\text{SNR}/\text{SNR}_0]$, где SNR - отношение сигнал/шум для исходной ионограммы, а SNR_0 - для ионограммы, полученной после применения к первой алгоритма режектирования сосредоточенных помех. На рисунке 3 в качестве

примера представлена частотная зависимость коэффициента η для одного мода, регистрируемого на ионограмме наклонного зондирования. Как видно, в данном случае средний выигрыш η составлял 2,5 дБ, а максимальный - достигал 9,5 дБ. На рисунке 4 для сравнения приведен пример экспериментальной ионограммы а - до и б - после режектирования. Видно, что применение данного алгоритма

позволяет эффективно осуществить предварительную очистку ионограммы от шумов.

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО СИГНАЛА В МАТРИЦЕ-ИОНОГРАММЕ И ПОСТРОЕНИЯ ТРЕКОВ МОДОВ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

Для решения задачи выделения в матрицах - столбцах элементов с полезными сигналами экспериментально были исследованы различные методы: пороговые, низкочастотной фильтрации и др. В результате установлено, что метод, с фиксированным для всех столбцов значением порога, прост в реализации, но дает неудовлетворительные результаты, когда существенным оказывается остаточное действие от сосредоточенных помех. Был сделан вывод о том, что порог должен определяться отдельно для каждого столбца или области ионограммы. Такой подход относится уже к методам сегментации, применяемым при обработке изображений [1,2].

Применение метода сегментации требует разделения исходного изображения на области, каждая из которых удовлетворяет некоторому критерию схожести [2,4], в частном случае критерию однородности. Действительно, на ионограмме характерным признаком наличия объекта является перепад яркости. В данном случае разделение по яркости двух объектов изображения [2,4,8] производится по порогу, который определяется по точке минимума между двумя пиками на гистограмме яркости. Считаем, что один мод гистограммы соответствует определенному объекту - либо полезному сигналу, либо шуму. Зная, что средний уровень шума ниже среднего уровня полезного сигнала, критерий однородности для шума можно определить как принадлежность значения яркости точки к первому моду гистограммы. Значения яркости, которые относятся к другим модам, соответствуют полезному сигналу. Отсюда следует, что для надежного выделения сигнала фрагмент изображения, должен иметь фон с унимодальной гистограммой распределения яркости.

Статистический анализ фрагментов экспериментальных ионограммы, содержащих фоновый шум, полезный сигнал, стационарные помехи, а так же различные сочетания этих объектов, показал, что для ионограммы таким фрагментом является лишь один вектор - столбец. Этот результат является эксперименталь-

ным обоснованием того, что порог для выделения сигнала необходимо определять для каждого столбца. В этой связи, применяя принципы сегментации изображения на основе распределения значений яркости точек, рассмотрим предлагаемый ниже оригинальный метод автоматического определения порога выделения полезного сигнала для отдельного спектра.

Анализ экспериментальных спектров, содержащих все наиболее вероятные сочетания объектов ионограммы, также показывает, что на гистограмме распределения амплитуд спектральных составляющих не всегда возможно выделить два мода для нахождения минимума между ними. Это значит, что в этих случаях классическим методом порог по гистограмме определить невозможно. Поэтому необходим другой, более универсальный метод автоматического определения порога, который был бы применим при всевозможных сочетаниях сигнала и помехи в столбце. Для решения задачи определения порога рассмотрим плотности вероятностей распределения $P(u)$ амплитуд в столбцах.

На рис. 5 показан график, где по оси абсцисс отложены значения амплитуд u для спектральных элементов в единицах от 0 до 255, а по оси ординат - количество точек, попадающих в заданный интервал значений. Кривая (3) на рисунке описывается формулой $y=N-P(u)$.

Она имеет следующий смысл. Если некоторое значение амплитуды $u=U_{\text{пор}}$ рассматривать как пороговое, то кривая (3) показывает число элементов в столбце со значениями, превышающими этот порог. Из графика видно, что с превышением порога $U_{\text{пор}}$ производная функции распределения меняется очень резко. Этот эффект объясняется тем, что выше порога $U_{\text{пор}}$ лежат точки, не принадлежащие полезному сигналу, а таких в столбце, как правило, в 3 и более раз больше, чем элементов, содержащих полезный сигнал.

Оптимальный порог $u=U_{\text{пор}}$ находится из рассуждений, которые поясняет рис. 5. В заданной системе координат строится прямая [2,4]:

$$y = -\frac{N}{255} \cdot u + N \quad (1)$$

где N – число элементов в спектре.

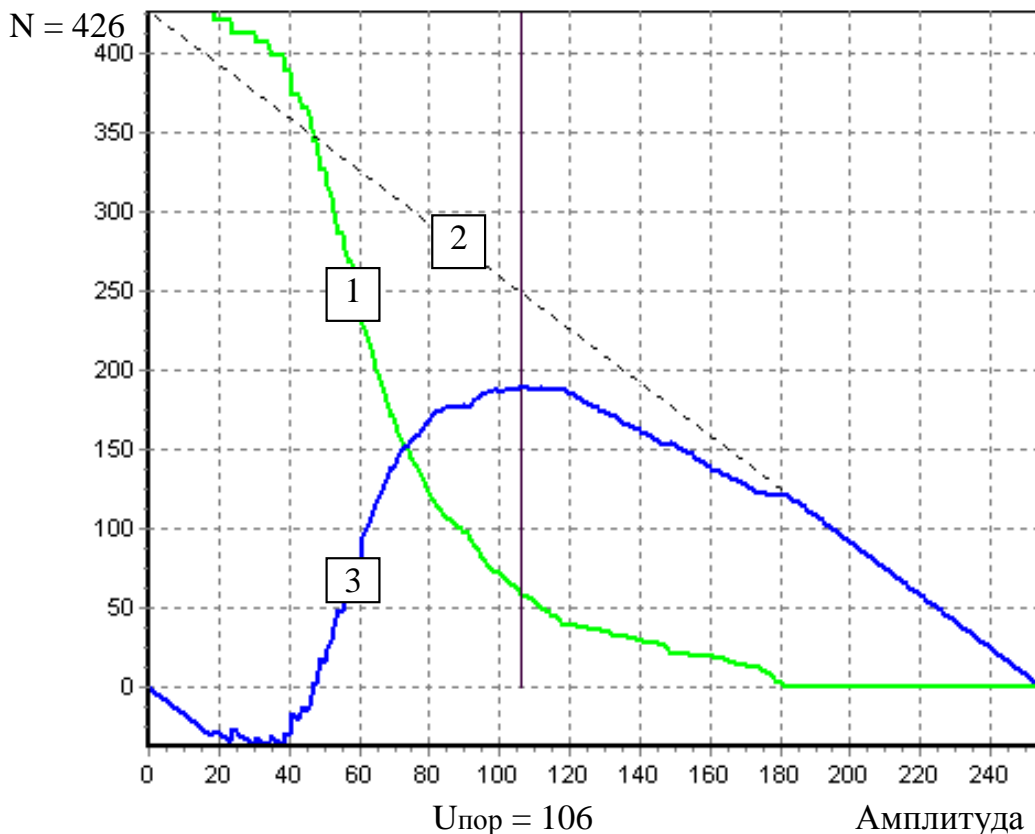


Рис. 5. Нахождение значения динамического порога $U_{\text{пор}}$

Эта прямая соответствует функции распределения для равномерного закона распределения амплитуд. Затем на кривой для экспериментальной функции распределения находится точка, расстояние от которой до прямой максимально. Это будет также точка максимума для функции, изображенной на рис. 5 цифрой 3, которая описывается следующей формулой:

$$y = -\frac{N}{255} \cdot u + P(u) \quad (2)$$

Абсцисса вертикальной линии на рис. 5 будет давать значение оптимального порога $U_{\text{пор}}$. Таким образом, для тех элементов столбца, где амплитуда превышает найденное пороговое значение, принимается гипотеза о выделении сигнала, а где ниже его - гипотеза о выделении шума. При очистке ионограммы элементы, для которых выделен шум обнуляются. Обработав, таким образом, все спектры, получим ионограмму, очищенную не только от естественного шума, но и от мощных стационарных помех.

Рисунок 6 иллюстрирует эффективность разработанного метода динамического порога. Экспериментально было установлено, что алгоритм наиболее эффективен при обработке сильно «зашумленных» столбцов матрицы -

ионограммы. Однако, он не лишен и некоторых недостатков. Во-первых, он не удаляет одиночные «выбросы» в столбцах (шумовые точки на ионограмме). Во-вторых, принцип действия алгоритма предполагает наличие в столбце элементов, содержащих полезный сигнал (гистограмма должна иметь более одного максимума), что влечет за собой плохую работу для столбцов, содержащих только шум. Отметим, что эта проблема решается путем совместного применения алгоритма обнаружения сигнала по коэффициенту асимметрии и обнуления столбцов, не содержащих полезный сигнал.

Поскольку существует задача удаления светящихся (шумовых) точек на ионограмме, то она была исследована нами подробно. Как показал анализ литературы, данная задача может быть решена с применением низкочастотной фильтрации изображений прямоугольным окном с перекрытием. Дело в том, что сглаживающие фильтры будут «размывать» объекты ионограммы, имеющие малые размеры притом, что они создаются в большинстве случаев случайными выбросами в вектор - столбцах.

На практике обычно используются фильтры скользящего среднего, весовые фильтры, медианные фильтры и др. Параметры низкочастотного фильтра для ионограммы выбирались на основе следующих соображений. Поскольку

(это было отмечено выше) полезный сигнал НЗ представляет на ионограмме, как правило, протяженные по горизонтали треки, а остатки станционных помех отображаются в виде вертикальных линий, то для эффективной работы фильтра он должен представлять вытянутый по горизонтали прямоугольник, горизонтальные размеры которого равны $2h+1$, а вертикальные $2v+1$ (где $h > v$). Функция фильтра может быть представлена следующей формулой:

$$z_{i,j} = \frac{1}{(2v+1) \cdot (2h+1)} \sum_{m=-v}^v \sum_{n=-h}^h x_{i+m,j+n} \quad (3)$$

Параметры фильтра $(2h+1)$ и $(2v+1)$ определяются на основе следующих требований: обеспечения заданного разрешения ионозонда; учета соотношения мощностей помехи и сигнала; учета вида изображения сигнала на ионограмме, поскольку линейные размеры окна должны выбираться, исходя из конфигурации и формы треков, с целью как можно меньше «размыть» при фильтрации изображение полезного сигнала; обеспечение минимальных вычислительных затрат (большой размер окна требует больших вычислительных ресурсов).

Нужно отметить, что применение описанного выше метода подавления одиночных выбросов приводит к ряду нежелательных эффектов. Во-первых, это размывание границ треков, что фактически понижает разрешающую способность ионозонда по задержке. Во-вторых, возможна потеря «тонких» треков с малыми амплитудами. Поэтому в случаях, когда необходимо сохранить тонкие треки, целесообразно применять алгоритм фильтрации без размывания границ объектов. От простого сглаживания прямоугольным окном с перекрытием данный метод отличается тем, что при расчете нового значения центральной точки окна рассматриваются не все точки окна, а только подобласть (окно меньшего размера, которое двигается внутри внешнего окна) с максимальной дисперсией. Для этого метод имеет два дополнительных параметра – линейные размеры внутреннего окна.

Как показали проведенные эксперименты по апробации модифицированного метода, он позволяет значительно снизить яркость вертикальных линий от станционных помех и «светящихся» точек, практически не влияя на уровень полезного сигнала и не размывая границ его изображений. Установлено, что на заключительной стадии очистки эффективен метод фильтрации бинарных изображений. Он не учитывает значения амплитуд точек и осно-

ван на анализе только линейных размеров объекта. Подсчитывается количество ненулевых точек в пределах окна ($m \times n$). Если количество ненулевых точек в окне меньше заданного порогового значения, то центральная точка окна удаляется с ионограммы (удаление одиночных выбросов). Напротив, если количество точек больше или равно заданному порогу, то центральная точка окна остается или восстанавливается, если она была удалена на предыдущих стадиях очистки (восстановление пропусков внутри треков). При этом, как и в описанных выше методах, используется окно, вытянутое по горизонтали.

Поскольку полезный сигнал на ионограмме представляется в виде треков, то был разработан эффективный алгоритм выделения контуров изображений, основанный на методе Канни [5-8], который является оптимальным для выделения контрастных перепадов. В отличие от методов выделения полезного сигнала в вектор-столбцах анализу подвергается все изображение ионограммы. Это позволяет выделить границы между различными объектами ионограммы, и разделить их. В методе Канни в качестве критериев оптимальности применяются критерии высокой вероятности детектирования, высокой точности локализации, единственности отклика.

Разработанный алгоритм включает следующие этапы [7,8]: низкочастотную фильтрацию изображения. При этом, исходное изображение $I(x,y)$ сглаживается с помощью свертки с гауссианом:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right), \text{ где}$$

σ – параметр степени сглаживания; вычисление градиента изображения в вертикальном g_v и горизонтальном g_h направлениях с помощью операторов первой производной. Определение модуля градиента:

$$E(i, j) = \sqrt{g_v(i, j)^2 + g_h(i, j)^2}; \text{ уточнение найденных на предыдущем шаге контуров путем}$$

обнуления значений градиента, соответствующих тем элементам изображения, которые не находятся в максимуме градиента. Для этого применяются два порога $T1$ и $T2$, причем $T1 > T2$. Анализ начинается из точки, значение градиента которой больше $T1$, и продолжается до тех пор пока значение локального максимума не станет меньше порога $T2$.

Результат применения алгоритма Канни представлен на рис.7. На рисунке 7а изображена исходная ионограмма. На рисунке 7б – ионограмма после использования детектора границ Канни, при том, что предварительно для

очистки ионограммы применялись алгоритмы режектирования, динамического порога и низкочастотной фильтрации, позволившей уменьшить общее количество одиночных выбросов. Для устранения незамкнутых контуров использовалась морфологическая операция удаления ответвлений, а также удаления одиночных объектов. Как видно из рисунка, с помощью данного подхода надежно выделяются границы треков полезного сигнала. Поскольку полезный сигнал представлен контурными объектами, то на следующем этапе осуществляется заполнение полученных контуров треков. Для этого производится перемножение исходного изображения ионограммы с результатом, полученным после ее морфологической обработки. Конечный результат обработки ионограммы представлен на рис. 7 в.

Итак, применение метода Канни позволяет представить полезный сигнал на ионограмме в виде математического объекта – контура. Поскольку каждой области частот ВЧ диапазона соответствуют свои механизмы распростране-

ния сигнала, то этим механизмам на ионограмме будет соответствовать свой контурный объект.

КОМПЛЕКСНЫЙ АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ

Описанные выше алгоритмы обработки ионограммы каждый в отдельности не решают задачи полной очистки ионограммы от помех для последующей автоматической обработки. Поэтому, как правило, для полной очистки изображения ионограммы от шумовой составляющей последовательно применяют несколько различных алгоритмов.

В результате теоретических и экспериментальных исследований [1,2,4,7-9] различных сочетаний рассмотренных алгоритмов был построен комплексный алгоритм обработки ионограммы, показывающий хорошую эффективность в большинстве случаев.

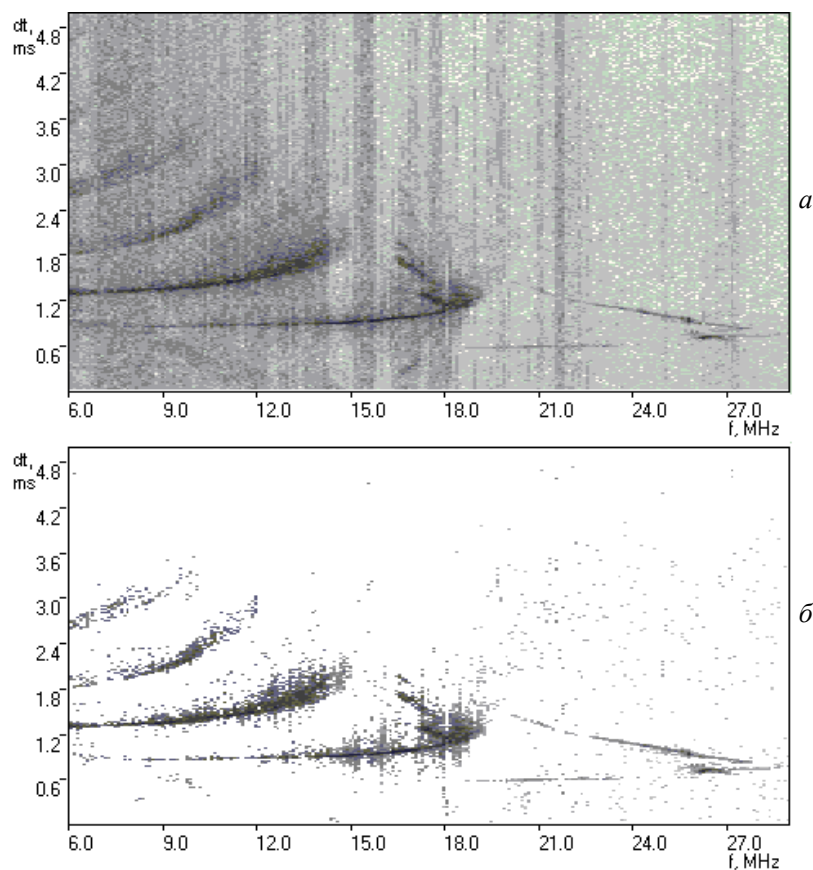


Рис. 6. Ионограмма до очистки (а) методом динамического порога и после применения метода (б)

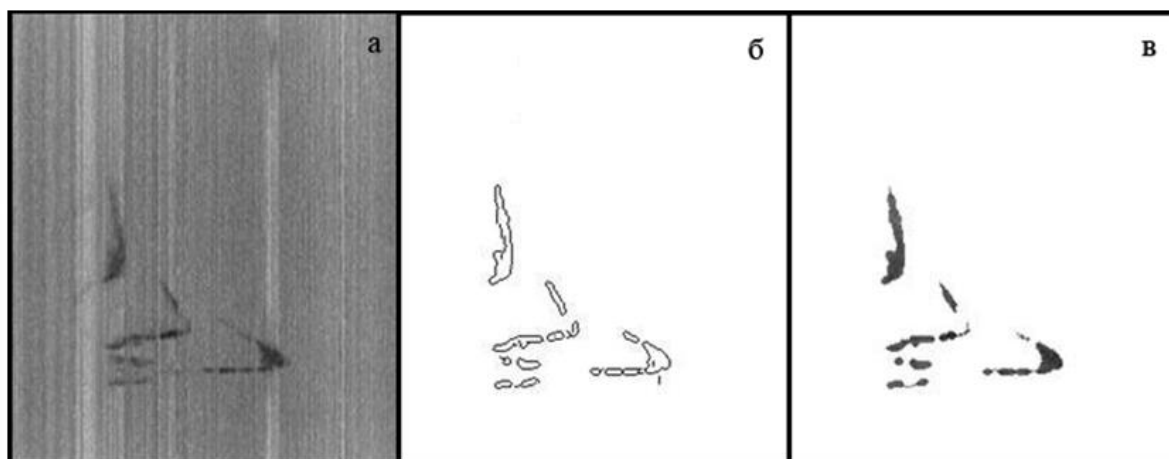


Рис. 7. Результаты выделения треков модов распространения сигнала на ионограмме

Он включает в себя следующую базовую последовательность алгоритмов: режектирование и ограничение сосредоточенных помех; обнаружение столбцов, содержащих полезный сигнал, по коэффициенту асимметрии и обнуление столбцов, содержащих только шум; выделение сигнала на фоне комплекса помех методами динамического порога и пространственной низкочастотной фильтрации вытянутым по горизонтали прямоугольным окном; удаление одиночных выбросов и восстановление пропусков в треках при помощи низкочастотных фильтров бинарных изображений; выделение контуров изображения треков методом Канни.

Для достижения максимального эффекта необходима настройка (адаптация) разработанного комплексного алгоритма к конкретным условиям путем установки параметров входящих в него процедур. В некоторых случаях требуются изменения последовательности применения входящих алгоритмов.

Программный комплекс, разработанный в ПГТУ, реализующий описанный выше комплексный алгоритм обработки ионограмм, необходим для автоматического вычисления параметров радиолинии в реальном масштабе времени. При этом точность расчета радиотехнических параметров зависит от эффективности процедуры очистки ионограммы от помех. Экспериментальная проверка эффективности разработанных процедур проводилась в составе алгоритма автоматического определения максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ). Использовались данные, полученные на радиолиниях: Инскип - Йошкар-Ола, Шпицберген - Йошкар-Ола, Кипр - Йошкар-Ола, всего было обработано 3128 ионограмм. Эффективности комплексного адаптивного алгоритма

определялась точностью измерения МНЧ, которая оценивалась путем сравнения результатов автоматической обработки с результатами экспертных оценок, которые принимались за эталон. Проведенный статистический анализ отклонений двух результатов показал высокую эффективность разработанного комплексного алгоритма обработки ионограммы (корреляция значений МНЧ полученных обоими способами заключалась в диапазоне от 0,94 до 0,994).

На рис. 8 представлен результат обработки вечерних ионограммы НЗ трассы Йошкар-Ола – Воронеж за 20.06.2011 с использованием адаптивного алгоритма. Отметим высокую эффективность разработанного алгоритма.

ОБРАБОТКА ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ. ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

После очистки проводится анализ ионограммы ВЗ (Рис. 8) с целью получения треков, соответствующих различным ионосферным слоям. На первом этапе ионограмма разделяется на две области E и F. В качестве границы раздела выбирается высота равная 150 км. Для полученных областей строятся высотные и частотные гистограммы. Затем для удаления случайных выбросов гистограммы подвергаются обработке медианным фильтром. На втором этапе проводится интерпретация гистограмм E-области. На соответствующей высотной гистограмме находится максимум. От него вверх и вниз по высоте ищутся высоты, для которых сигнал отсутствует. Для полученного диапазона высот строится локальное частотное распределение. Максимальная частота в этом распреде-

лении, на которой присутствует сигнал, интерпретируется как критическая частота E-слоя (f_kE). Для отсчетов, попавших в локальное распределение, также определяется минимальная высота с сигналом и она принимается в качестве начальной высоты E-слоя (h_0E).

Если на высотной гистограмме найдется еще один максимум, то для него проводится обработка аналогичная приведенной выше, а полученные параметры имеют смысл критической частоты (f_kE_s) и минимальной высоты (h_0E_s) Es-слоя. На следующем этапе проводится поиск параметров F1 и F2 слоев. На высотной гистограмме F-области находится глобальный максимум. Вниз от него по высотному распределению ищется точка перегиба. Высота соответствующая этой точке принимается в качестве начальной (h_0F2_0) для обыкновенной компоненты F2-слоя. Вверх от найденной высоты на гистограмме проводится поиск локального максимума. Затем вниз от него по высоте находится точка перегиба, а высота ей соответствующая интерпретируется как начальная высота (h_0F2_x) необыкновенной компоненты F2-слоя. Для высот от h_0F2_0 до максимальной высоты на ионограмме строится

локальное частотное распределение. В полученном распределении максимальная частота, на которой присутствует сигнал, имеет смысл критической частоты (f_kF2_x) необыкновенной компоненты F2-слоя. В этом же распределении на расстоянии $0,7 \pm 0,5$ МГц слева от f_kF2_x находится максимальная частота, содержащая сигнал, и она интерпретируется как критическая частота (f_kF2_0) обыкновенной компоненты слоя F2. На этом анализ параметров слоя F2 завершен.

Для диапазона высот от 150 км до h_0F2_0 строится локальное высотное распределение, по которому определяются параметры обыкновенной (h_0F1_0 , f_kF1_0) и необыкновенной компонент (h_0F1_x , f_kF1_x) слоя F1 в соответствии с алгоритмом, приведенным выше для F2-слоя. На заключительном этапе анализа параметров ионосферных слоев определяется минимальная частота для каждой компоненты ($f_{min}E$, $f_{min}E_s$, $f_{min}F1_0$, $f_{min}F1_x$, $f_{min}F2_0$, $f_{min}F2_x$). Для каждого слоя в качестве таковой принимается минимальная частота из соответствующего локального частотного распределения, на которой присутствует сигнал.

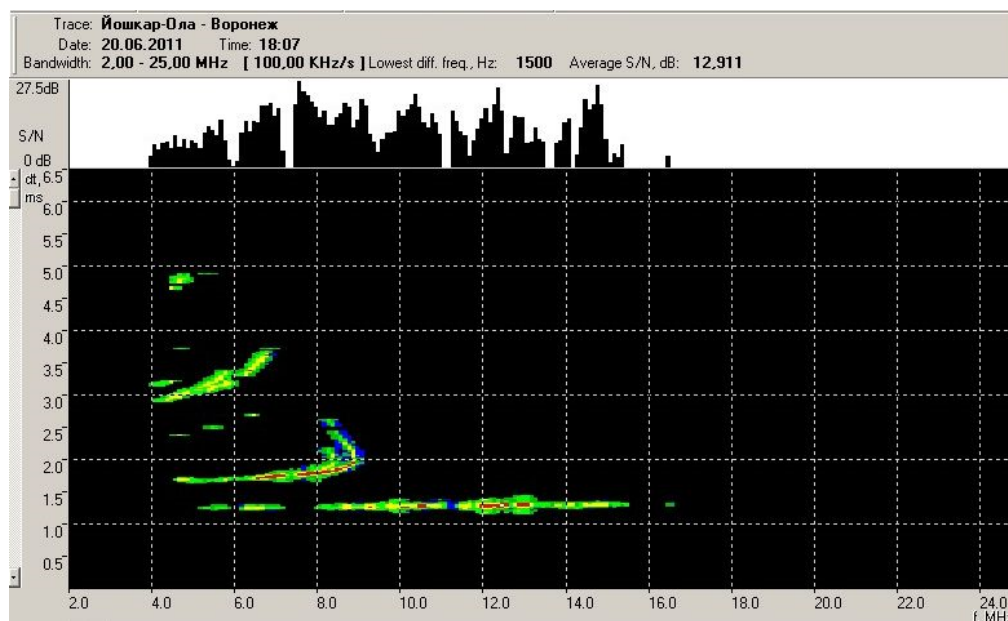


Рис.8. Ионограмма для ночного времени суток для радиотрассы Йошкар-Ола – Воронеж после автоматической обработки с помощью комплексного алгоритма

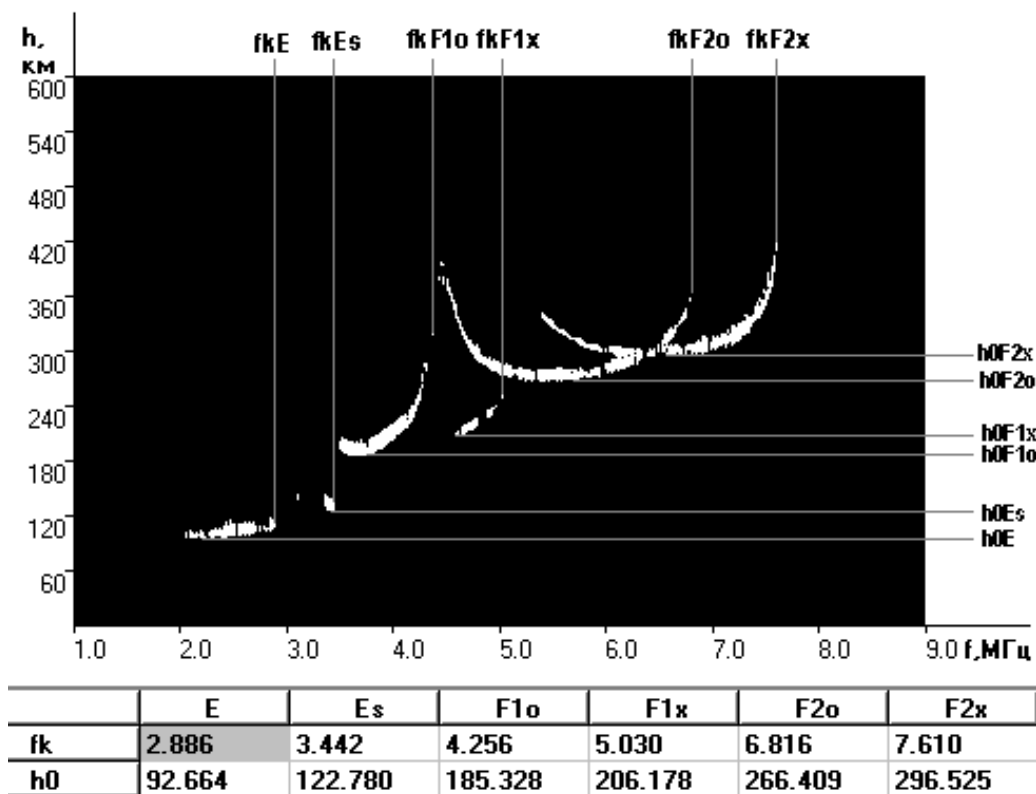


Рис. 9. Иллюстрация автоматического выделения треков и определения параметров ионосферы

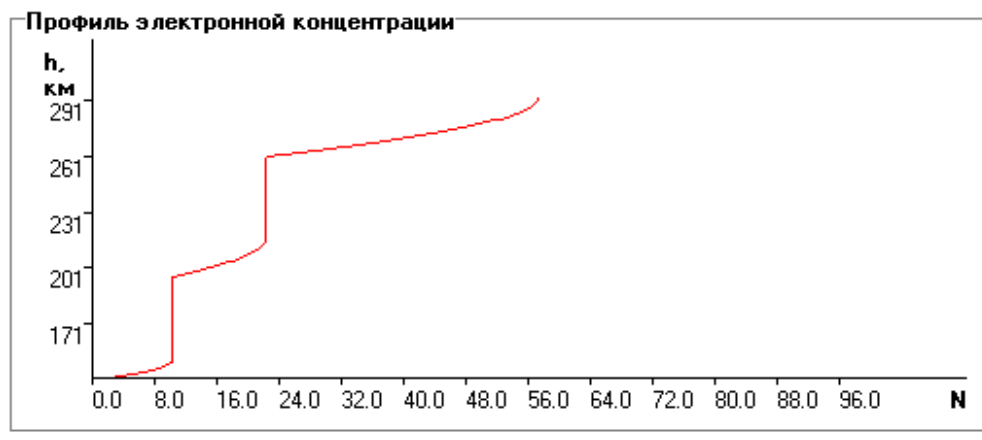


Рис. 10. Синтезированный автоматически по ионограмме ВЗ профиль электронной концентрации

Следует отметить, что поиск параметров осуществляется только для тех слоев, присутствие которых на ионограмме определено априорно в соответствии с сезонными и суточными наблюдениями. Сам процесс выделения треков состоит в разбиении отсчетов ионограммы на группы соответствующие определенным ионосферным слоям, согласно найденным параметрам. Для E-области процесс выделения треков сводится к нахождению отсчетов с сигналом, попадающих в прямоуголь-

ное окно, вертикальные границы которого соответствуют минимальной и критической частотам слоя, а вертикальные минимальной высоте выделяемого слоя и максимальной высоте E-области (150 км).

Для F-области нахождение треков в основном аналогично поиску треков в E-области. Исключение составляет интерпретация по высоте. Для трека задается изначально некоторая ширина (по умолчанию 5 отсчетов). Поиск трека начинается с критической частоты слоя в

направлении минимальной частоты слоя. Для нескольких первых (по умолчанию пяти), из рассматриваемых спектров, строится по методу наименьших квадратов парабола. Отсчеты с сигналом, находящиеся в следующем спектре ионограммы выше и ниже параболы на расстоянии в три отчета заносятся в список отсчетов трека, а парабола корректируется с учетом этих новых отсчетов. Затем процесс повторяется для каждого следующего трека и так до тех пор, пока не будет достигнут спектр, соответствующий минимальной частоте анализируемого слоя.

Иллюстрация работы алгоритма автоматического выделения треков и определения параметров ионосферных слоев приведены на рис.9.

СИНТЕЗ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ИОНОГРАММАМ

Для решения этой задачи используется активно разрабатываемый в последнее время подход, в котором профиль электронной концентрации синтезируется путем сравнения экспериментальных и модельных ионограмм, т.е. он подбирается в автоматическом режиме таким образом, чтобы модель ионограммы была близка к экспериментальной ионограмме. Полученный в результате этого результат является профилем, соответствующим данному сеансу зондирования.

В качестве начальных значений параметров профиля берутся значения, вычисленные с помощью международной справочной модели ионосферы IRI для времени и места зондирования.

Модель профиля электронной концентрации задается в виде суммы параболических слоев, соответствующих областям E, F1 и F2 ионосферы, с постоянной долиной между этими областями, концентрация электронов в которой равна концентрации в максимумах в E и F1 областях, соответственно (рис. 10) [1].

Представленный алгоритм позволяет восстанавливать профиль электронной концентра-

ции ионосферы не только в точке вертикального зондирования, но и в средней точке наклонного зондирования, при этом ионограмма наклонного зондирования редуцируется в ионограмму вертикального зондирования в средней точке радиотрассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты реализации современного подхода в решении задачи удаления помех с ионограмм вертикально-наклонного зондирования ионосферы с учетом ситуации, возникающей при сжатии элементов непрерывного ЛЧМ сигнала в частотной области. Показано, что представленный и исследованный комплексный алгоритм обработки в сочетании с методом режектирования сосредоточенных помех на выходе системы сжатия и методом Канни обеспечивает практически полное удаление помех различной природы на ионограмме и дает возможность ее дальнейшей обработки в автоматическом режиме. Выявлены факторы, влияющие на составляющие комплексного алгоритма: протяженность зондируемой радиолинии, время суток, солнечная активность и сезон года. Даны рекомендации по составлению комплексного адаптивного алгоритма. Представлен развиваемый в последнее время эффективный алгоритм восстановления профиля электронной концентрации ионосферы, основанный на использовании модели IRI.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 11-07-00420-а; 12-02-31734 мол_а; 13-07-00371; 13-02-00524; ФЦП: ГК №14.132.21.1418; АВЦП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011; 8.2346.2011.

V.A. Ivanov, D.V. Ivanov, N.V. Ryabova, A.B. Egoshin, A.R. Laschevsky, A.V. Maltsev

Complex adaptive processing method ionograms providing eliminates noise with ionograms of vertical - oblique sounding of the ionosphere and including a new algorithm for detecting a signal in the column vector matrix ionograms in full prior uncertainty, and - filter algorithm ionograms including the method Kani is proposed and investigated. Method of electron density profile reconstruction using the IRI model for ionograms vertical sounding of the ionosphere is considered

KEYWORDS: ADAPTIVE METHOD, IONOGRAM, IONOSPHERE, NOISE, VERTICAL-OBLIQUE SOUNDING, CHIRP SIGNAL, ELECTRON DENSITY PROFILE

ЛИТЕРАТУРА

1. В.А.Иванов, Д.В.Иванов, Рябова Н.В., Лыонг Вьет Лок, Рябова М.И. Синтез, анализ и прогнозирование характеристик ионосферных линий декаметровой радиосвязи. Научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – 178 с.
2. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровой радиосвязи: научное издание / А.Б. Егошин, В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. 2006. -323 с.
3. Бернгардт О.И., Носов В.Е., Рудых Т.Ю. Способы подавления помех в ЛЧМ ионозонде// сб. Байкальская школа по фундаментальной физике: тексты докладов БШФФ. - Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 1999.
4. Рябова Н.В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых ДМВ радиоканалов: Научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 292 с.
5. Canny J.F. Finding edges and lines in images. // Master's thesis, MIT. - Cambridge, USA, 1983.
6. Arıkan F., Arıkan O., Salous S. A new algorithm for high-quality ionogram generation and analysis// Radio Science, 2002, vol. 37, No. 1.
7. Ivanov V.A., Maltsev A.V., Ryabova N.V. Filtrimg of station noises on ionogram chirp sounding with use of method Canny. 8th International Conference "Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies" (PRIA-8-2007): Conferece Proceedings. Vol.1. – Yoshkar-Ola, 2007, P. 118-121.
8. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Мальцев А.В.. Адаптивное обнаружение и выделение широкополосного сигнала с линейной частотной модуляцией при сжатии его в частотной области. // Электромагнитные волны и электронные системы. - 2009. – Том 14, №8. - С. 34-45.
9. Иванов В.А., Рябова Н.В., Царев И.Е. Диагностика функции рассеяния декаметровых узкополосных стохастических радиоканалов // Радиотехника и электроника. - 2010. – Том 55, №3. - С.285-291.
- 10.