

А.О. ЩИРЫЙ, канд. техн. наук, доц., МарГУ, Йошкар-Ола, Россия
А.Е. НЕДОПЕКИН, ст. преп., МарГУ, Йошкар-Ола, Россия

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСА ЛЧМ-ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

В работе описаны математические методики обработки зондирующего радиосигнала и их реализация в программной части комплекса, предназначенного для исследований многолучевых ионосферных коротковолновых радиолиний и изучения ионосферной плазмы при дистанционном радиозондировании.

In this paper mathematics methods of treatment of radio-signal and program realization for chirp-sounding complex are described. Methods base on statistical properties of examine data. Complex provides possibility for research of ionosphere and multi-beam short-wave radio lines.

Введение. При помощи зондирования ионосферы радиосигналами декаметрового (ДКМ) диапазона можно получить информацию о состоянии ионосферной плазмы и происходящих в ней процессах [1]. Получаемые данные радиозондирования ионосферы имеют большое значение для обеспечения работы систем коротковолновой (КВ) связи и загоризонтной радиолокации [2] для определения оптимальных рабочих частот, оценки передаточной функции радиоканала и учета ионосферных искажений сигнала. В связи с этим существует необходимость в специальном программном обеспечении (ПО), включающем в себя автоматическую регистрацию данных, их индикацию и сохранение в ЭВМ, а так же анализ.

Анализ литературы. В настоящее время в качестве зондирующего сигнала перспективным является использование линейно-частотно-модулированного сигнала (ЛЧМ) [3]. Комплекс ионосферного зондирования позволяет осуществлять измерения в режимах наклонного зондирования (НЗИ) ионосферы [4, 5]. Исходя из конфигурации используемого комплекса [5], следует, что ПО первичной обработки должно быть реализовано для двух операционных систем (ОС): Linux и MS Windows, а вторичная обработка должна являться общей для всех реализаций комплекса.

Цель работы – разработка подсистем первичной и вторичной обработки для комплекса ЛЧМ-зондирования ионосферы.

Методики первичной и вторичной обработки. Экспериментальные данные комплекса образуют иерархию, состоящую из нескольких уровней. Данные большего по номеру уровня получаются из данных меньшего уровня: 1 – оцифрованный сигнал (отсчеты) с выхода приемника ионозонда; 2 – ионограммы (см. рис. 1), спектры помех; 3 – треки мод, спектр фонового шума, характеристики станционных помех; 4 – амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) КВ радиолиний, модели многолучевости,

оптимальные рабочие частоты, отношение сигнал/шум и др.; 5 – статистика вариаций данных уровня 4.

Установлено, что в случае обработки сжатием в частотной области широкополосного сигнала ионосферного распространения наблюдается не только высокая переменчивость параметров законов распределения, но и высокая переменчивость самих законов распределения [6]. Отсутствие одного преобладающего закона распределения для сигнала свидетельствует о том, что обработка ЛЧМ сигнала проходит в условиях априорной непараметрической неопределенности, которая наблюдается во временной и частотной областях. Это создает определенные трудности при работе с уровнями данных 1 и 2 и получения данных уровней 3 и 4 при подавлении сосредоточенных по спектру помех посторонних радиотехнических устройств (РПУ), попадающих в частотную полосу зондирующего сигнала, обнаружении и выделении сигнала. Две основных задачи, которые могут решаться при работе с данными уровней 1 и 2 – это ослабление сосредоточенных помех во временной области и выделение на фоне шума зондирующего сигнала в частотной области.

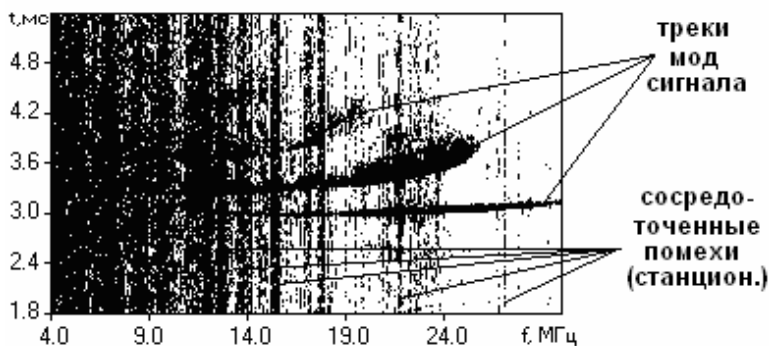


Рис. 1 – Пример изображения ионограммы

В рамках предложенной статистической модели [6, 7] признаком отсчета, соответствующего спектральному отсчету выделяемого сигнала в частотной области или элементу во временной области, соответствующему сосредоточенной помехе, является большое удаление отсчета от центра распределения рассматриваемой выборки. Значимость различий между отсчетами предложено оценивать по критерию обнаружения грубых ошибок в экспериментальных измерениях: отсчеты, принадлежащие выделяемым сигналам, считаются аномальными, а для разделения отсчетов используется цензурирование выборки.

В рамках модели [6] для выделения сигнала в частотной области возможен такой подход: задача выделения сигнала сводится к нахождению

границной точки в вариационном ряду, разделяющей распределение сигнала и распределения шума. Условие принадлежности шуму можно выразить так:

$$x < x_\gamma + k\sigma, \quad (1)$$

где x – анализируемый отсчёт, x_γ – граничная точка, квантиль порядка γ , k – энтропийный коэффициент, σ – среднее квадратическое отклонение. Произведение $k\sigma$ задаёт верхнюю границу доверительного интервала для граничной точки. Невыполнение неравенства для некоторой тестируемой величины свидетельствует о принадлежности ее к отсчету аномальному для данной выборки, то есть выделяемому в данной задаче сигналу. В частотной области с использованием полуэмпирического моделирования были получены зависимости изменения ряда статистических параметров от отношения сигнал/шум, в том числе для случаев неразличимого сигнала, когда отношение сигнал/шум было много меньше единицы. В качестве порядка квантиля в формуле (1) было выбрано значение 0,95. После выделения сигнала можно провести определение наименьшей наблюдаемой частоты (ННЧ) и максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ).

В случае ослабления сосредоточенных помех (режекции) в качестве анализируемых отсчетов выступали среднее квадратические отклонения элементов малой длительности, соответствующих полосе ЛЧМ сигнала 200 – 250 Гц. Элементы, чьи среднее квадратические отношения признавались аномальными, обнулялись. При этом порог цензурирования выбирался по критерию:

$$|\sigma_k - \bar{\sigma}| \leq s \cdot (1,55 + 0,8\sqrt{\varepsilon - 1} \cdot \lg(K/10)), \quad (2)$$

где $\bar{\sigma} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \sigma_i$, s – среднее квадратическое отклонение для отсчетов σ_k , K – число анализируемых элементов сигнала малой длительности, для которых вычислялись σ_k , ε – эксцесс.

Так как далеко отстоящие наблюдения могут существенно изменить оценки σ_k , ε и $\bar{\sigma}$, то их вычисление и расчет границы цензурирования производился без учета тех отсчетов, которые наиболее удалены от центра. В работе для расчета числовых характеристик использовались первые 70% отсчетов вариационного ряда. После определения границ цензурирования изъятие из исходной выборки наиболее удаленных от центра отсчетов проводилось с учетом этих границ, и расчет всех оценок повторялся заново. То же относится к рассмотрению выборок в частотной области при решении задачи выделения сигнала, только при этом первоначальный расчет параметров осуществляется по первым 90% анализируемого вариационного ряда.

Первичная обработка данных. ПО первичной обработки состоит из двух основных подсистем: подсистемы управления и подсистемы регистрации данных. Подсистема регистрации реализована в двух вариантах: на основе стандартной звуковой карты ПЭВМ, и на основе

специализированных АЦП. Подсистема управления является общей, независимо от используемых устройств оцифровки.

Для обеспечения гибкости, переносимости и расширяемости подсистема управления разделена на следующие слои:

1. низкоуровневые ОС-зависимые процедуры доступа к портам ПЭВМ;
2. классы для работы с субблоками комплекса низкоуровневыми командами субблоков;
3. классы для работы с функциональностью субблоков комплекса в терминах их функций (классы “виртуальных устройств”);
4. сеансы режимов измерений.

Сеансы работы с соответствующими параметрами задаются в расписании, которое может быть представлено в виде таблицы. Каждому задаваемому параметру соответствует столбец. Задание и редактирование параметров удобнее осуществлять прямо в таблице. В расписании указывается название передающего пункта (приемный пункт – текущий, определяется или задается при старте программы); время запуска $t_{\text{пуска}}$ с точностью до секунд; задержка Δt , относительно старта, компенсирующая время распространения сигнала в ионосфере; начальная, конечная частота и скорость ЛЧМ сигнала и другие параметры.

Для программного управления работой по расписанию реализован отдельный программный поток (thread), вычисляющий по расписанию время ближайшего старта $t_{\text{расп}}$ и засыпающий до момента времени $t_{\text{подг}}$ ($t_{\text{подг}} < t_{\text{расп}}$). После пробуждения в $t_{\text{подг}}$, этот поток создает объект сеанса, заданного в расписании (с параметрами заданными в расписании). Объект сеанса, в соответствии с заданными в расписании параметрами и спецификой заданного режима измерений, управляет объектами виртуальных устройств, которые, в свою очередь, через 2 и 1 слои управляют соответствующими субблоками комплекса.

Пользовательский интерфейс разработан на основе библиотеки Qt, имеющей реализации как для ОС Linux, так и для ОС Microsoft Windows. ОС-зависимые процедуры управления аппаратурой реализованы для каждой из этих ОС отдельно.

Во время сеанса происходит отображение текущих получаемых данных. Так, в режиме НЗИ-приема в окне программы первичной обработки выводится спектр мощности текущего блока данных, выводится ионограмма – графическое изображение, представляющее собой двумерную развертку принимаемого сигнала в частотной области с течением времени. По оси абсцисс откладывается частота сигнала, по оси ординат – задержка принятого сигнала, вызванная распространением в ионосфере, цвет показывает амплитуду отсчетов (рис. 1).

В уменьшенном масштабе ионограмма строится по всей полосе частот разностного сигнала (т.е. по всему диапазону межмодовых задержек) и в масштабе 1:1 – ионограмма в заданной полосе частот разностного сигнала.

Непосредственно во время записи данных может происходить режекция (ослабление) сосредоточенных помех, а сразу по построении ионограммы – определение ННЧ и МНЧ после выделения сигнала в частотной области.

Вторичная обработка данных. Вторичная обработка экспериментальных данных подразумевает обработку после эксперимента, в отличие от первичной обработки, проводящейся во время эксперимента в реальном масштабе времени.

Основным типом исходных данных, которые подвергаются вторичной обработке, являются оцифрованные отсчеты сигнала с выхода РПУ (сигнала разностной частоты ЛЧМ-ионозонда или сигнала уровня помех КВ диапазона), т.е. данные уровня 1. Вообще же, исходными данными могут быть данные уровней 1...4 для получения данных большего по номеру уровня.

ПО вторичной обработки включает следующие основные функции:

- ПО построения ионограмм с заданными параметрами спектральной обработки (весовые окна, перекрытие спектров, число точек БПФ и др.), а также с возможностью предварительного подавления сосредоточенных помех;

- ПО построения панорамы и оценки характеристик различных видов помех КВ диапазона;

- ПО оценки тонкой структуры АЧХ и ее характеристик.



Рис. 2 – Информационная диаграмма исследования характеристик моделей МЛ

ПО вторичной обработки предоставляет также возможности просмотра полученных данных, поиска, группировки. Это необходимо для просмотра

сохраненных данных, причем с удобной для человека скоростью, используя функции навигации по выбранному файлу данных (прокрутка вперед, назад, в начало, в конец, изменить масштаб и др.).

ПО вторичной обработки предназначено для работы с иерархией экспериментальных данных, включая возможности регенерации производных данных и возможности просмотра имеющихся данных. Кроме того, оно обеспечивает программную инфраструктуру для реализации, отладки и апробации новых алгоритмов обработки данных зондирования.

В качестве примера рассмотрено функционирование ПО вторичной обработки при сборе статистики вариаций межмодовых задержек (разностей времен группового запаздывания различных мод распространения КВ), амплитудно-частотных характеристик мод, а также классификации этих данных по т.н. эмпирическим моделям многолучевости (МЛ) [8]; основные этапы этого процесса показаны на рис. 2.

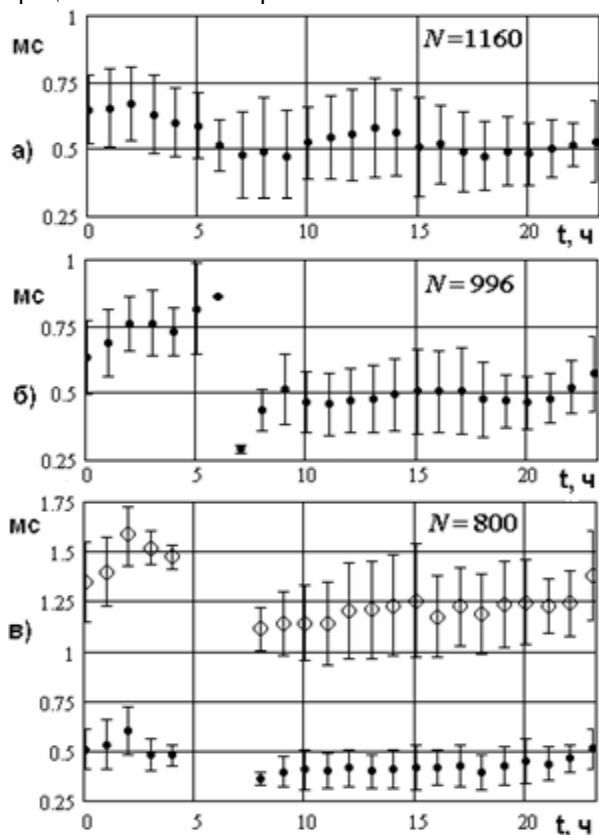


Рис. 3 – Суточные вариации межмодовых задержек

Пример обработки массива ионограмм – суточные вариации межмодовых задержек (разностей времен группового запаздывания) для радиолинии Инскип (Великобритания) – Йошкар-Ола (3100 км) – показан на рис. 3 [9]. Римскими цифрами обозначены эмпирические модели многолучевости – сочетания определенных типов мод радиосигнала: II – $1F_2$, $1F_{2n}$; IV – $1F_2$, $2F_2$; X – $1F_2$, $2F_2$, $3F_2$. В названиях мод подстрочными литерами “n” обозначены так называемые Педерсеновские моды [2]. Для трехмодовой модели X приведено по два графика (разности второй и третьей задержек относительно первой). Буквой N обозначено число ионограмм по которым получен каждый график (и на которых присутствовала данная модель многолучевости).

Также ПО может быть использовано для получения новых радиофизических данных, в том числе для исследования диффузной многолучевости, эффектов магнитоионного расщепления КВ радиоволн, рассеяния КВ радиоволн на ионосферных неоднородностях и других исследований, требующих, подобно перечисленным исследованиям, достижения высокого разрешения по частоте и времени группового запаздывания радиоволн, а также требующих возможностей оперирования большими объемами разнообразных экспериментальных данных [4, 9 – 11].

Выводы. Разработанные методики и программное обеспечение позволяют производить обработку нестационарного сигнала ЛЧМ-иозонда на выходе системы сжатия в частотной области. Регистрация данных и первичная обработка реализуется автоматически в реальном времени. ПО вторичной обработки предоставляет возможности для работы с иерархией экспериментальных данных, пакетную обработку больших массивов данных для получения и исследования статистических характеристик многолучевых ионосферных радиолиний.

Список литературы: 1. *Богута Н.М.* Использование ЛЧМ иозонда в адаптивной системе КВ радиосвязи / *Н.М. Богута, В.П. Урядов, В.В. Шумаев* // Радиотехника. – 1993. – № 4. – С. 77 – 79. 2. *Иванов В.А.* Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона / *В.А. Иванов, Н.В. Рябова, В.В. Шумаев* – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с. 3. *Иванов В.А.* ЛЧМ иозонд и его применение в ионосферных исследованиях. / *В.А. Иванов, В.И. Куркин, В.Е. Носов, В.П. Урядов, В.В. Шумаев* // Известия вузов. Радиофизика. – 2003. – Том XLVI, № 11. – С. 919 – 946. 4. *Щирый А.О.* Программное обеспечение управления базовой станцией ионосферного мониторинга / *А.О. Щирый* // Известия Белорусской инженерной академии. – 2005. – № 2(20)/1. – С. 204 – 207. 5. *Колчев А.А.* Измерительный комплекс для исследования эффектов многолучевого ионосферного распространения коротких волн / *А.А. Колчев, В.В. Шумаев, А.О. Щирый* // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2008. – Т.51, № 12. – С. 73 – 78. 6. *Колчев А.А.* Экспериментальное подтверждение априорной непараметрической неопределённости для сигнала ЛЧМ-иозонда в спектральной области / *А.А. Колчев, А.Е. Недопекин* // Вестник НТУ “ХПИ”. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”. – 2011. – № 44. – С. 91 – 100. 7. *Колчев А.А.* Режекция сосредоточенных по спектру помех при ЛЧМ-зондировании ионосферы / *А.А. Колчев, А.О. Щирый* // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 9. – С. 751 – 759. 8. *Колчев А.А.* Наиболее вероятные модели многолучевости при распространении коротких волн на магистральных среднеширотных радиолиниях / *А.А. Колчев, В.В. Шумаев, А.О. Щирый* // Информационные технологии моделирования и

управления. – 2007. – № 1(35). – С. 70 – 76. **9. Щирый А.О.** Разработка и моделирование алгоритмов автоматического измерения характеристик ионосферных коротковолновых радиолиний / *А.О. Щирый* // Автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.12.04; Санкт-Петербургский гос. ун-т телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича. СПб., 2007. – 19 с. **10. Щирый А.О.** Разработка алгоритмов для повышения точности измерения и расширения возможностей традиционного применения наклонного ионозонда / *А.О. Щирый* // Системы управления и информационные технологии. – 2007. – № 1.1(27). – С. 202 – 204. **11. Колчев А.А.** Восстановление частотной зависимости комплексного коэффициента отражения по данным наклонного ЛЧМ ионозонда / *А.А. Колчев, А.О. Щирый* // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20, № 7. – С. 627 – 630.

Поступила в редколлегию 24.09.2012