

ОБРАБОТКА СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЙЯНИЯ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Пуляев В. А.

Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков

Описаны алгоритмы обработки ионосферных данных, получаемых в методе некогерентного рассеяния радиоволн с помощью харьковского радара. Проанализирована процедура получения и анализа геофизических параметров с позиций теории статистических решений. В свете этого для решения проблемы повышения точности и надежности показателей при расчете параметров ионосферной плазмы рассматриваются некоторые аспекты развития методик их статистического оценивания. Предложены вычислительные процедуры статистического анализа, позволяющие рассчитать как температуру ионосферной плазмы, так и ее ионный состав, в том числе и на высотах при очень низких, до нескольких процентов, отношениях сигнал/шум.

В настоящее время происходит быстрое накопление экспериментальных данных, получаемых в процессе изучения околоземного космического пространства. Потенциальная научная и практическая ценность этих данных очень высока; современные исследовательские установки обеспечивают высокую точность и надежность получаемых результатов, а компьютерные возможности хранения и переработки информации делают их доступными любому исследователю. Среди разнообразия информации следует отметить сведения, получаемые об ионизированной части космического пространства - верхней и нижней ионосфере Земли, о ее электронной концентрации, электронной и ионной температурах, о дрейфе плазмы и наличии в ней таких сортов ионов, как гелий, водород, кислород, тяжелые ионы и др.

Определение всего спектра параметров из перечисленных выше в виде высотных (в диапазоне 100...1500 км) и временных (в интервале от минут до суток) зависимостей возможно при использовании одного из наиболее информативных и точных радиолокационных методов — метода некогерентного рассеяния (НР) радиоволн. Начиная с 1998 г. подобные ионосферные измерения регулярно проводятся в Институте ионосферы НАН и МОН Украины (г. Харьков) на базе радара, снабженного неподвижной антенной диаметром 100 м, направленной вертикально вверх [1]. Радар имеет несколько режимов зондирования, которые обеспечивают хорошее отношение сигнал/шум выше максимума ионизации, где доминируют ионы H^+ и He^+ . Фиксация результатов измерений происходит после получения высотных зависимостей автокорреляционных функций (АКФ) сигнала НР.

Разработка новых методов научных исследований ставит перед собой цель создания вычислительно эффективной и статистически оптимальной технологии обработки данных и в методе НР. Конечная задача — обеспечение функционирования сети алгоритмов, которые, используя элементы статистического оценивания, предполагали бы автоматизацию рутинных процессов обработки с одновременным повышением точности и объективности получаемых результатов.

Анализ результатов в настоящее время подразделяется на 2 этапа: оперативный и детальный. Первый из них включает простейшие преобразования результатов наблюдений для их наглядного представления с целью контроля правильности функционирования технических систем радара. На втором этапе, предназначенном для тщательной интерпретации полученных АКФ и вычисления на их основе параметров ионосферной плазмы, до сих пор применялись специализированные, но не статистические методы оценки данных. Наиболее же перспективным направлением этого этапа анализа в настоящее время является дальнейшее усовершенствование и оптимизация вычислительного процесса, который позволяет функционировать более точным и объективным статистическим процедурам. Так как одним из полезных теоретических инструментов при синтезе алгоритмов обработки на этом этапе следует использовать теорию статистических решений, то рассмотрим некоторые аспекты по ее применению для случая обработки геофизических данных в методе некогерентного рассеяния.

Одной из проблем данного метода является то, что к настоящему времени не получены аналитические выражения для непосредственного вычисления параметров ионосферы по экспериментальным АКФ, а используется процедура их оценивания по модельным представлениям с помощью алгоритмов спуска. Эта процедура, известная как реализация решения "обратной" задачи электродинамики, состоит в следующем. Параметрический вектор $\bar{\theta}$ в методе НР для высот выше 200 км в простейшем случае принимается равным

$$\bar{\theta} = \left\{ T_i, T_e, f_{H^+}, f_{He^+} \right\}, \quad (1)$$

где T_i и T_e — ионная и электронная температуры заряженных частиц; f_{H^+} и f_{He^+} — относительные плотности ионов для H^+ и He^+ соответственно. Некоторые параметры, как менее существенные для данного эксперимента (например, отличия в температурах разновидностей ионов и др.) не включаются в эту стадию анализа и опускаются.

На базе таких допущений определяются плазменные параметры как наиболее пригодные при фиксации на каждом высотном интервале с центром на h_i минимума среднеквадратического отклонения $\chi^2_{\text{мод}}(\bar{\theta})$ между экспериментальной и рядом модельных АКФ для параметрического вектора $\bar{\theta}$, т. е. отыскивается минимум вида [2]

$$\chi^2_{\text{мод}}(\bar{\theta}) = \sum_{\tau} \left[\frac{r_{\text{эксн}}(\tau) - r_{\text{мод}}(\tau, \bar{\theta})}{\sigma(\tau)} \right]^2, \quad (2)$$

где $r_{\text{эксн}}$ — измеренные реальные части АКФ; $r_{\text{мод}}$ — модельная функция; σ — расчетная неуверенность измерения, или вес ординат АКФ; индекс τ представляет задержку. На рис. 1 (см. штриховые линии) представлен высотный ход ионосферных параметров, определенных по такому принципу над Харьковом 7.01.2000 г., 06:45, LT.

Как показывает опыт, эта процедура выдает хорошие результаты, если изменения индивидуальных параметров в пределах вектора $\bar{\theta}$ остаются независимыми относительно друг друга. Однако для некоторых значений параметров в случае исследования плазмы с тремя и даже двумя сортами ионов эта независимость практически утеряна, и за эффектами изменений в одном параметре появляется компенсация путем изменения в другом. Можно проследить этот эффект "сцепления" параметров, используя таблицу, полученную при сравнении одной из экспериментальных АКФ с наиболее похожими модельными. Различие параметров в этой таблице, как индикатор потенциальных неопределенностей, указывает на относительную степень зависимости между ними, когда изменение одного параметра модели, объединенное с уменьшением или увеличением других, приводит почти к идентичным результатам при поиске $\chi^2_{\text{mod}}(\bar{\theta})$.

Отсюда неутешительный вывод — даже в отсутствии помехи однозначное решение "обратной" задачи довольно затруднительно. К тому же накладывается условие, что все основные выводы в теории некогерентного рассеяния сделаны в предположении об однородности плазмы в рассматриваемом объеме и ее стационарности, что не всегда соответствует реальным условиям измерений. Что уж говорить о случае, когда и точность измерений экспериментальных АКФ из-за статистической погрешности, связанной с наличием шумов при приеме, да и с самой шумовой природой исследуемого сигнала НР недостаточно высока. Увеличивая продолжительность статистического накопления АКФ, можно лишь частично повысить последующую параметрическую точность оценки, однако неоднозначность все так же будет иметь место.

Одна из возможностей частичного решения проблемы неоднозначности, основанная на усовершенствовании алгоритмов оценивания, состоит в следующем.

Нет методов обработки результатов радиофизических наблюдений, которые в той или иной степени не использовали бы априорные представления о возможных изменениях значений параметров, подлежащих оценке. В случае поиска экстремума оптимизируемой функции очень важно задать как априорные распределения оцениваемых параметров, так и их априорное математическое ожидание. При этом желательно иметь малую дисперсию априорного распределения, ведь уменьшение дисперсии практически означает сужение области, в которой требуется отыскать абсолютный максимум критерия.

Для решения такого рода задач, когда для целей эксперимента важно как можно точнее указать область, в которой предположительно должно находиться истинное значение параметра, в работе [3] предложен метод регуляризации, основанный на учете дополнительной информации самого общего характера (например, обязательной монотонности оцениваемых функций), который позволяет находить устойчивые решения. Если рассмотреть вопрос использования этого метода для оптимизации процесса статистического оценивания параметров в методе НР, то оказывается, что в случае неоднозначности оценки метод поиска минимума среднеквадратичного отклонения все же

можно обеспечить способом уникального выбора $\bar{\theta}$. Для этого используется дополнительная информация относительно границ вероятных значений ионосферных параметров. Если выразить эту априорную информацию о физическом ограничении на плазменные параметры $\bar{\theta}$ в виде дополнительной функции $\chi^2_{дон}(\bar{\theta})$, то функционал (2) преобразуется в следующий вид:

$$\chi^2_T = \chi^2_{мод}(\bar{\theta}) + k \chi^2_{дон}(\bar{\theta}). \quad (3)$$

Параметр k в правой части этого функционала будет задавать вес дополнительной функции ограничения и может быть приспособлен для контроля эффективности этой дополнительной функции при выборе наилучших заключительных параметров. Этот параметр иногда называют стабилизирующим функционалом, а его введение с учетом дополнительной априорной информации приводит к устойчивости решения задачи.

Таким образом, для реализации формулы поиска $\chi^2_{дон}(\bar{\theta})$ используется ограничение на пределы изменения параметров, что идентично сглаживанию, в данном случае - температурных профилей вдоль высотного диапазона. Это ограничение заключается в том, что мы предполагаем достаточную достоверность найденных температур при обработке предыдущих высот h_{i-2} и h_{i-1} (особенно в области максимума отношения сигнал/шум). Учитывая же монотонный характер в высотных изменениях параметров, эти достоверные результаты используются для уточнения значений перебираемых параметров на вышележащей высоте h_i . Эту процедуру и обеспечивает учет дополнительной функции, если ее представить в виде

$$\chi^2_{дон}(\bar{\theta}) = \left[Te(h_i) - \left\{ Te(h_{i-1}) + [Te(h_{i-1}) - Te(h_{i-2})] \cdot \frac{h_i - h_{i-1}}{h_{i-1} - h_{i-2}} \right\} \right]^2 + \left[Ti(h_i) - \left\{ Ti(h_{i-1}) + [Ti(h_{i-1}) - Ti(h_{i-2})] \cdot \frac{h_i - h_{i-1}}{h_{i-1} - h_{i-2}} \right\} \right]^2. \quad (4)$$

Таким образом, хотя метод наименьших квадратов предполагает использовать экспериментальные данные только от текущей высоты, в нашем случае он также будет ориентирован информацией о тепловом режиме ионосферы и на предыдущих высотах. Графики же высотного хода как температур, так и ионного состава приобретут более сглаженный вид (рис. 1, тонкие линии), без аномальных выбросов, связанных с неоднозначностью в данном случае решения задачи на высотных интервалах в районе 500, 1000 и 1400 км.

Важно обратить внимание, что хотя на ионный состав не накладывалось никакого прямого ограничения, параметрическая температурная зависимость, упомянутая ранее, все же оказала косвенный стабилизирующий эффект и на него. Это ограничение представлено на очень слабом уровне, с помощью вариаций значений k , и так, чтобы вклад

ограничивающего уравнения в полный среднеквадратичный минимум χ^2_T был во много раз меньше, чем вклад $\chi^2_{\text{mod}}(\bar{\theta})$. На этом уровне ограничение влияет только на выборы в перечнях параметров, когда метод поставлен перед двумя или более одинаково привлекательными моделями, удовлетворяющими данные, т. е. в тех случаях, когда поверхности испытывают недостаток рельефно определенных минимумов.

Проведем еще один анализ. Найденные с помощью выражения (3) среднеквадратические отклонения вектора $\bar{\theta}$ в виде функции невязки (ФН) при изменении модельных параметров T_i и T_e представим как некоторую поверхность, образованную значениями χ^2_T [4]. Взяв теоретическую АКФ для случая, например, $T_i = T_e = 2000$ К, $O^+ = 100$ % и вызывая для эффекта приближения к экспериментальной разную степень ее зашумленности, можно увидеть, как с ростом дисперсии АКФ постепенно "размывается" и форма ФН. На рис. 2 представлен пример таких поверхностей χ^2_T , образуемых в виде ФН при малой (а) и большой (б) дисперсии АКФ. Подобно реальным измерениям, когда с высотой на фоне сигнала все больше и больше доминирует случайный шум и вследствие этого искажаются результаты обработки, эта зашумленность вызвала эффект смещения глобального минимума на фоне рельефно обозначенных вторичных, локальных минимумов.

С целью выявления первоначального положения минимума на фоне появившейся многозначности проведем статистический анализ некоторой ограниченной их совокупности. В результате предварительно проведенной регуляризации координаты минимумов образуют довольно симметричное пятно на координатной сетке, а это позволяет с помощью статистического усреднения вычислить геометрический центр этого пятна, а значит и математическое ожидание места расположения "размытого" шумами глобального минимума. Преимущество такой процедуры состоит в том, что она позволяет учесть смещение результата, которое становится тем больше, чем сильнее будет зашумлена АКФ. Ошибка может достигать сотен градусов, но поддается коррекции, если использовать алгоритм подобного статистического распознавания места привязки искомым T_i и T_e к геометрическому центру пятна.

Аналогично, проанализировав форму ФН при изменении остальных параметров, можно отыскать геометрические центры для правильного определения относительной концентрации ионов H^+ и He^+ . В результате такого статистического анализа при обработке будет получен эффект в виде еще одного дополнительного сглаживания высотных графиков (рис. 1, жирные линии).

Таким образом, в реальных условиях ионосферных измерений методом некогерентного рассеяния при определении характеристик ионосферных параметров имеется вполне осуществимая возможность улучшения точности и надежности их оценки. Реализация вычислительных процедур с элементами статистического оценивания, приближающая нас к однозначному решению "обратной" задачи, дает возможность с дос-

таточной степенью точности рассчитать большинство параметров ионосферной плазмы, в том числе на высотных участках с очень малым соотношением сигнал/шум. Использование предложенных методик статистического оценивания для получения высотных зависимостей ряда параметров позволяет при высокой степени достоверности получать их с погрешностью не более 10–30 %, что является вполне приемлемым при обработке сигнала ИР вплоть до высот 1000 км и выше.

Для организации подобной статистической обработки в Институте ионосферы разработаны пакеты прикладных компьютерных программ по реализации предложенных выше методов. Они позволяют представлять результаты наблюдений в наглядной форме с помощью таблиц и графиков, что облегчает исследователю задачу выявления более глубоких закономерностей в наборах данных и подбор способов для их последующего анализа.

1. Таран В. И. Исследование ионосферы с помощью радаров некогерентного рассеяния в Харькове // Вестн. ХГПУ. Харьков, 1999. Вып.31. С.3–9.
2. Пуляев В. А. Вычислительные методы при обработке корреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния // Вестн. ХГПУ: Сб. науч. тр. Харьков: ХГПУ, 2000. Вып.103. С.94–96.
3. Ватулин В. А., Телевинова Т. Н., Чистяков В. П. Вероятностные методы в физических исследованиях. –М.: Наука, 1985. 207с.
4. Пуляев В. А. Алгоритм анализа функций невязки в процессе расчета ионосферных параметров по АКФ сигнала некогерентного рассеяния // Вестник НТУ "ХПИ": Сб. науч. тр. Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. Вып.4. С.216-218.

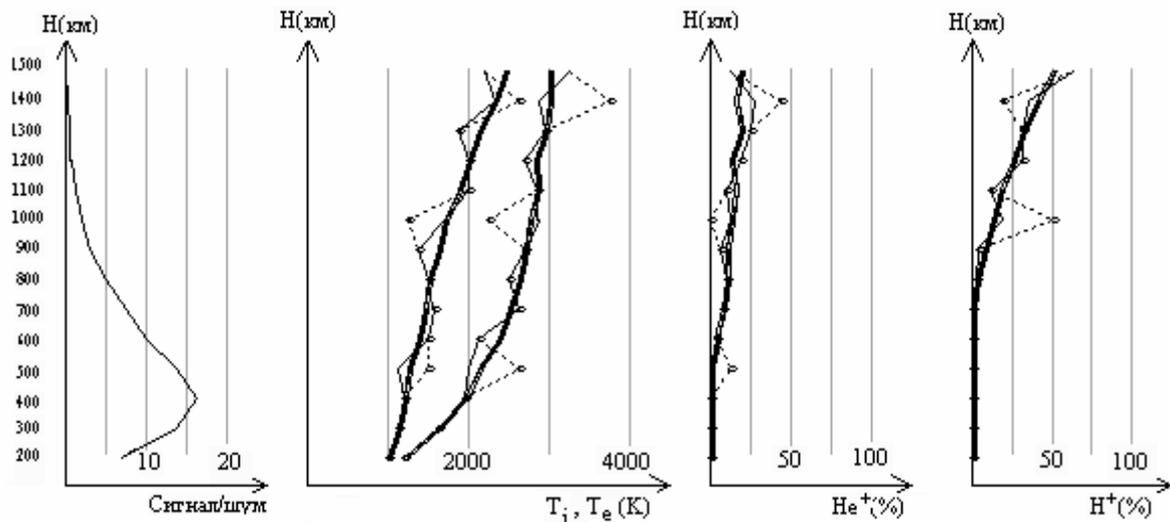


Рис. 1. Высотный ход температур и ионного состава

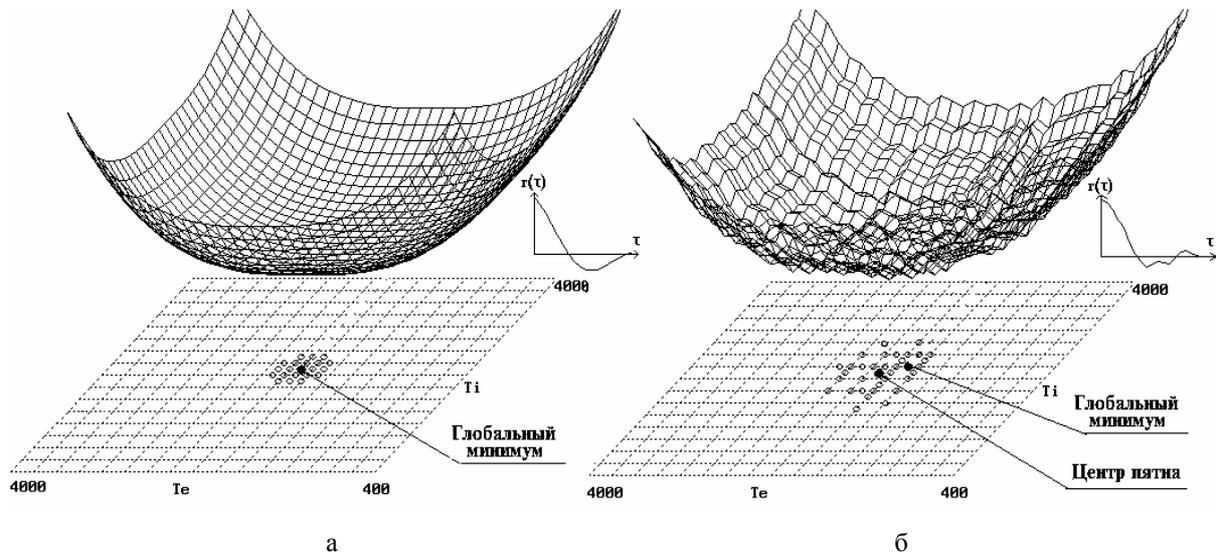


Рис.2. Пример поверхностей χ^2_T , образуемых в виде ФН при малой (а) и большой (б) дисперсии АКФ