

УДК 621.396

А. С. Мазманишвили¹, В. А. Пуляев²

¹Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут»

²Інститут Іоносфери НАН і МОН України, Харків

Разработка информационных технологий оценки параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн

Надійшла до редакції 16.05.03

Розглянуто задачу виконання чисельних експериментів зі статистичною моделлю багатопараметричної системи. На основі побудованого статистичного алгоритму проведено моделювання з метою з'ясування впливу методів обробки на точність та вірогідність оцінки іоносферних даних. Приведено приклади побудови залежностей для обраних висотних профілів автокореляційної функції іоносферної плазми. Отримано оцінки температур іонної та електронної складових разом з похибками оцінювання.

ВВЕДЕНИЕ

Исчерпывающая информация об околоземной плазме — ионосфере — может быть получена с помощью радиолокационного метода некогерентного рассеяния (НР) радиоволн [8]. Особенностью метода является то, что получение геофизической информации с его помощью базируется на непараметрической статистике. Физические эксперименты основываются на первоначальном измерении сигнальных функций $f(x)$, образуемых из откликов ионосферы на зондирующие сигналы $x(t)$. Сигнальные функции связаны с вектором ионосферных параметров θ , последующее определение которых и является целью измерений. В результате исходной задачей в процессе информационных преобразований сигнала рассеяния является вычисление некоторых его характеристик и статистическое усреднение результатов наблюдений, например высотного временного распределения автокорреляционных функций (АКФ) или соответствующих спектров. Последующая задача подразумевает уже интерпретацию полученных АКФ с целью оценки соответствующего высотного—временного распределения элект-

ронной плотности и других физических параметров, определяющих ход наблюдаемых процессов в ионосфере [5].

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Изучение литературных источников позволяет сделать заключение, что в настоящее время при анализе корреляционных или спектральных данных применяются различные методы оценки параметров исследуемой среды, и эти методы основаны на сравнении экспериментальных функций с теоретическими функциями, полученными из физических представлений об ионосферной плазме. Обычно подобные процедуры реализуются на базе различных алгоритмов спуска. Это довольно медленная и трудоемкая процедура вычислений. Оптимальность процесса вычислений, или использование наиболее быстрых и объективных алгоритмов определения геофизических параметров в автоматизированном режиме, является одним из основных требований ионосферного мониторинга с помощью он-лайнных радарных систем.

В методе НР известны решения, в рамках которых при прикладном корреляционном анализе используются элементы ускоренного статистического подхода к вычислительным процедурам. В работе [3, 4] приведены примеры усовершенствования алгоритмов обработки и принятия решений с целью их оптимизации с точки зрения практически значимых критериев качества при рассмотрении функционирования системы автоматизированного анализа геофизических временных рядов. В этом случае суть параметрической идентификации заключается в том, что исследуемый высотный диапазон условно разбивается на d интервалов с центрами на h_i . В пределах каждого интервала вычисленной АКФ ставится в соответствие свой параметрический вектор θ , который в общем случае принимается равным [4]

$$\theta(P^j) = \{N_e, T_i, T_e, f_m^+, \delta P^j\}, \quad (1)$$

где j — число параметров P в таком составе: N_e — электронная плотность плазмы, T_i и T_e — ионная и электронная температуры заряженных частиц, f_m^+ — относительные плотности для каждого из m вариантов ионного состава (комбинаций кислорода, водорода, гелия, тяжелых ионов и др.), δP^j — доверительные интервалы для каждого параметра как функция статистического усреднения результатов.

При принятых допущениях процесс определения плазменных параметров методом поиска минимума среднего квадратичного отклонения $\chi^2(\theta)$ между экспериментальной АКФ и задаваемым набором S модельных АКФ сводится к реализации выражения вида

$$\chi_{e \in S}^2(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=0}^k \left[\frac{r_o(\tau_i, \theta) - r_m^e(\tau_i, \theta)}{\sigma(\tau_i)} \right]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где r_o — экспериментально измеренные АКФ для ее k ординат; σ — расчетная неуверенность измерения, или вес ординат; $\tau_i = i\Delta\tau$ — значения задержек (с дискретностью $\Delta\tau$) для i -й ординаты АКФ.

В качестве модельных функций r_m принимаются огибающие нормированной АКФ, дискретные значения которых, например, в области F2 ионосферы определяются ионными температурами T_i и отношениями температур $t = T_e/T_i$ [7]:

$$\begin{aligned} r_m(\tau_i; T_i, t) = \\ = \frac{2(1+t)}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{\exp(-y^2) \cos(y\tau_i/\beta)}{[1+t(1-\varphi(y))]^2 + \pi t^2 y^2 \exp(-2y^2)} dy, \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$\beta = \frac{\lambda_0}{4\pi} \sqrt{\frac{m_i}{2\kappa T_i}}$$

— коэффициент нормирования, в котором m_i — масса ионов атомного кислорода O^+ ; λ_0 — длина зондирующей волны; κ — постоянная Больцмана;

$$\varphi(y) = 2y \exp(-y^2) \int_0^y \exp(x^2) dx$$

— зависимость, полученная в результате преобразования функции проводимости ионов и электронов.

Одна из вычислительных проблем, возникающая при функционировании процедуры, реализуемой на основе выражений (2) и (3), заключается в подборе оптимальных значений количества k ординат исследуемой АКФ, положения этих ординат на оси задержек и величины шага $\Delta\tau$. Выбор максимального k для определения отклонения $\chi^2(\theta)$ и, как следствие, наиболее точных значений ионосферных параметров в значительной степени ограничивается доступными вычислительными ресурсами. Кроме того, дальнейшее развитие информационных технологий предполагает, что требуемое качество конечного результата может быть достигнуто и без чрезвычайно больших затрат на получение промежуточных вычислений с чрезвычайно высокой точностью.

Схожие проблемы рассматривались в многих работах. Так, например, в [1] повышения качества обработки и достоверности интерпретации данных при дистанционном зондировании поверхностей в значительной степени удалось добиться за счет оптимизации промежуточных алгоритмов многоэтапной векторной фильтрации радиоизображений. В работе [6] при определении оптимальных параметров технических систем качество обработки улучшено за счет существенного сокращения объема вычислительных операций и экономии вычислительных ресурсов путем использования, по возможности, однократных вычислений в многопараметрических задачах. И наконец, в работе [2] обеспечено существенное сокращение времени поиска и анализа сигналов спутниковых систем выбором оптимального числа усредненных реализаций при соблюдении условия минимума требуемой итоговой производительности.

Целью нашей работы является оптимизация алгоритмов параметрической идентификации при оценке состояния ионосферной плазмы и частичное решение проблемы экономизации вычислительных ресурсов путем использования результатов матема-

тического моделирования процедуры обработки сигналов применительно к методу НР.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Использование приведенных выше выражений и реализация на их базе модели для проведения статистических испытаний вычислительных алгоритмов позволили осуществить различные экспериментальные исследования, результаты которых приводятся в настоящей работе. Например, было проведено многократное повторение процесса идентификации параметров на каждом из высотных участков, что позволило определить зависимость показателя эффективности системы идентификации от вида и количества привлекаемых для распознавания признаков P^j исследуемого сигнала.

Результаты в виде полученного множества случайных исходов решения дали возможность, опираясь на методы математической статистики, получать искомые оценки и определять при этом оптимальное соотношение между точностью оценок параметров вектора θ и значениями их доверительных интервалов. Результаты решения, полученные с помощью этой процедуры, позволят в дальнейшем решать проблемы, связанные с построением вычислительных систем, предназначенных для оптимальной обработки ионосферных сигналов.

Разработанная математическая модель системы статистических испытаний, имитирующая работу радара НР и функционирование алгоритмов оценки ионосферных параметров, изображена на рис. 1. Модель состоит из: блока 1 формирования (имитация ионосферы) высотного хода ($d = 15$) некоторых ее параметров в виде вектора θ ; блока 2 расчета с помощью формулы (3) (имитация реакции ионосферы на зондирующий сигнал) формы АКФ r_m ; блока 3 искажения (имитация действия аппаратуры приема и обработки) АКФ и вследствие этого преобразования ее в экспериментальную r_s с по-

мощью датчика 4 случайных чисел; блока 5 оценки параметров в виде вектора θ по минимуму критерия $\chi^2(\theta)$ с помощью библиотеки (блок 6) из модельных АКФ r_m ; блока 7 вычисления значений доверительных интервалов δP^j ; блока 8 оценки показателя степени совпадения исходных и найденных параметров.

Принцип действия модели следующий. В блоке 3 всем высотным вариантам параметрического вектора θ (в виде соответствующих им АКФ) задается количество и расстановка k исследуемых ординат АКФ. Затем с помощью датчика случайных чисел на каждом l -м шаге в серии из n испытаний имитируется результат воздействия на АКФ аддитивной помехи $u(t)$. Под аддитивной помехой в нашей модели будем понимать суперпозицию случайной функции, не связанной с сигналом возбуждения. Это могут быть шумы аппаратуры или сигналы, порожденные внешними источниками, и, таким образом, введенный в модель параметрический шум следует рассматривать как учет неизбежного искажения формы АКФ, связанный со многими реальными факторами. Блок 4 модели позволяет по линейному закону увеличивать интенсивность аддитивного шума по мере перебора ординат АКФ, а по экспоненциальному закону — дополнительно увеличивать его интенсивность по мере продвижения вдоль высоты.

Искаженные значения АКФ, представляющие наблюдаемую плазму в том виде, в каком ее воспринимает система, поступают на вход блока оценки 5, в котором методом покоординатного спуска определяется принадлежность этой функции к одному наиболее близкому (по среднему квадратичному отклонению) модельному значению (см. рис. 2) из общего библиотечного набора в блоке 6.

В конце испытаний зафиксированные на каждом l -м шаге параметры P^j в блоке 7 используются для вычисления искомых оценок θ_0 с доверительными интервалами δP^j следующего вида:



Рис. 1. Блок-схема системы статистических испытаний

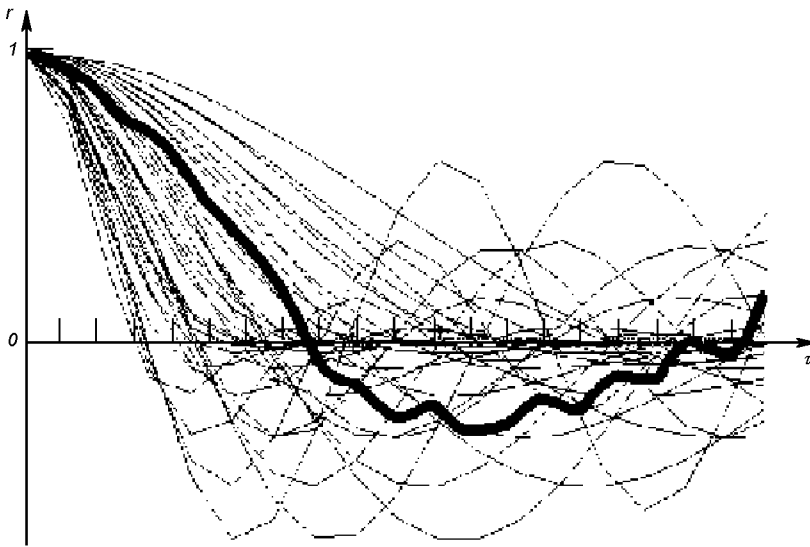


Рис. 2. Вид одной из экспериментальных АКФ на фоне модельных АКФ

$$[\bar{P}^j - \alpha \delta P^j, \bar{P}^j + \alpha \delta P^j], \quad (4)$$

где \bar{P}^j — выборочное среднее значение оценки j -го параметра; α — масштабный множитель доверительного интервала

$$\delta P^j = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{P}^j - P_i^j)^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

В блоке 8 происходит сравнение результатов оценки θ_0 с параметром θ , который задавался на этапе формирования АКФ. Число испытаний n определяется доверительным интервалом, задаваемым при формулировке задачи исследования.

Результаты моделирования, в частности при изменении T_1 и T_e для случая дневной ионосферы, представлены на рис. 3, а. Здесь приведен пример вычисления задаваемых с 68-процентной ($\alpha = 1$) доверительной вероятностью оценки кинетических температур в случае использования при идентификации максимального ($k = 45$) количества ординат АКФ. Ширина каждого доверительного интервала δP^j лежит в пределах от единиц процентов на высоте 290 км до 40 % на высоте 430 км. Фрагмент слева дает представление о степени зашумленности n экспериментальных АКФ, относящихся к верхнему участку.

Анализ на каждой высоте полученного выборочного среднего \bar{P}^j параметров (центральные линии) и его исходного значения (кружочки) в данном примере дает представление о возможности несмещенного оценивания параметров. Следует отметить, что требование несмещенности является ос-

новным, и если оно принято, то дальнейшая минимизация дисперсии уже не так важна. Более того, есть возможность уменьшения времени вычислений за счет сокращения числа исследуемых точек АКФ (а значит, и возможность минимизации объема аппаратуры для их вычислений) пусть даже и за счет увеличения дисперсии. Выбор комбинаций ординат имеет исключительно важное значение, поскольку связан не только с минимизацией затрат машинного времени, но и с объемом записей в базе данных. Слишком малое k неизбежно влечет за собой потерю информации, снижает точность и достоверность статистических расчетов. Слишком большое k содержит определенную информационную избыточность. А поскольку вычисления по статистическим алгоритмам имеют число шагов, прямо пропорциональное времени вычислений, и повторяются при числовой обработке до десятков тысяч раз, то имеется необходимость в поиске такого их значения, которое, не ухудшая точности расчетов, было бы минимальным.

На рис. 3, б приведен пример одного из таких испытаний, проведенного для оценки точности совпадения исходных и найденных параметров в случае уменьшения количества k привлекаемых к идентификации ординат АКФ и варьирования их местоположением. Представлен случай использования только восьми ординат, расположенных с равномерным шагом. Видно, что ширина интервалов δP^j в этом случае все так же начинается от единиц процентов в начале высотного диапазона, но на верхнем участке достигает уже 80 %. Смещенности оценки все еще не наблюдается, а это означает, что

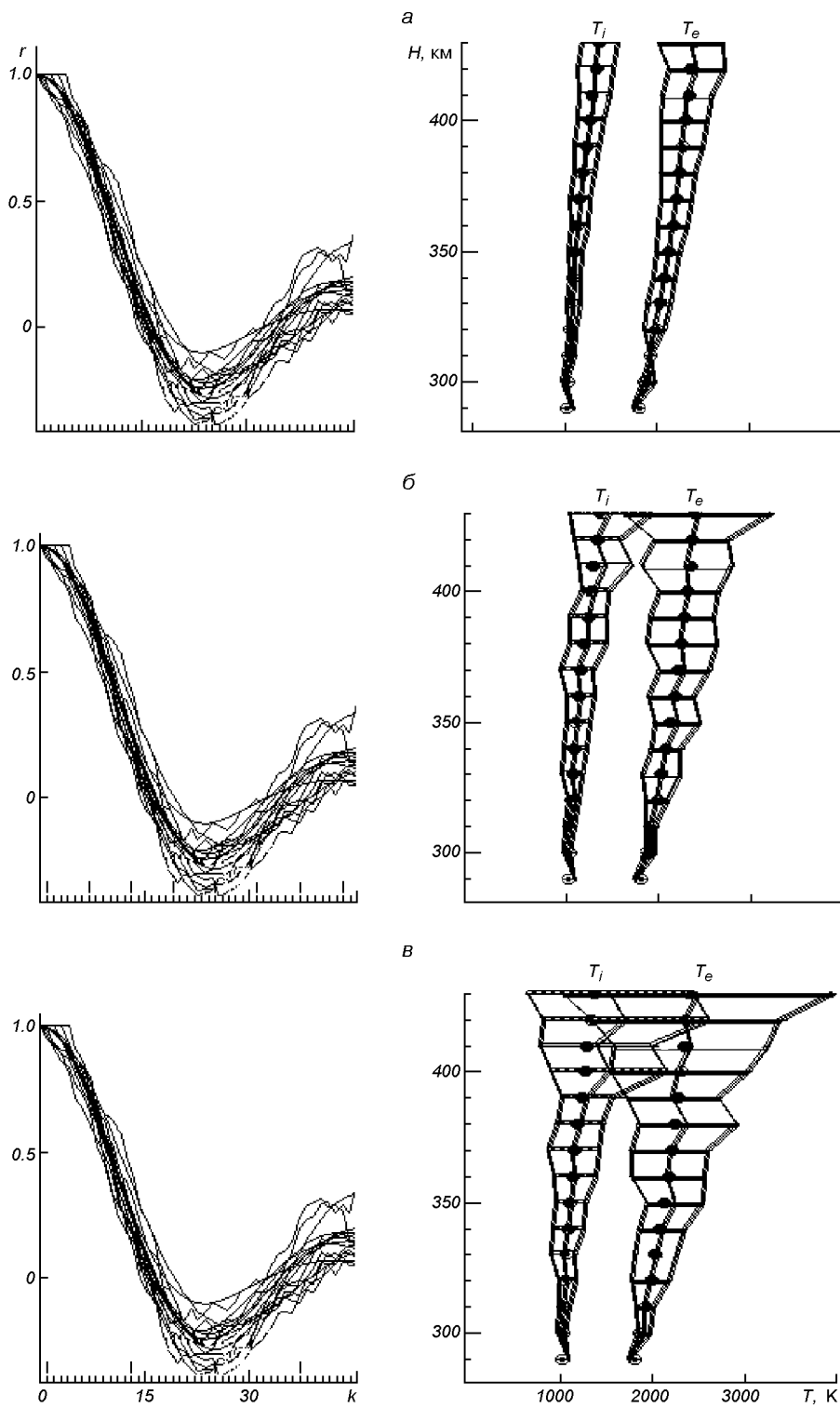


Рис. 3. Доверительные интервалы при вычислении кинетических температур ионосферной плазмы при различном (45, 8 и 4) числе используемых точек АКФ (выделены штифтиками)

при достаточной плотности высотных результатов возможно получение несмещенного математического ожидания (например, методом последующего скользящего сглаживания). В то же время длительность процесса идентификации параметров сокращена почти в шесть раз.

И наконец, на рис. 3, в представлен случай использования в обработке предельно малого числа (только четырех) ординат, но при экономии машинного времени в 11 раз. Доверительный интервал вырос на максимальной высоте до 100 %, стала заметной и появившаяся смещенность оценок, особенно ионной температуры T_1 с высот 390 км и выше, что указывает на нежелательность дальнейшего уменьшения количества используемых ординат АКФ в таком режиме идентификации. Графический анализ показывает, что в обработке без заметных искажений нельзя использовать менее пяти ординат в районе первых нулей АКФ. Для более строгих вычислений можно использовать анализ численных значений результатов.

Следует, однако, отметить, что нет методов обработки результатов радиофизических наблюдений, которые в той или иной степени не использовали бы априорных представлений о возможных изменениях значений сигнальных функций, участвующих в оценке составляющих параметрического вектора. В нашем случае значительный выигрыш в продолжительности вычислений удалось обеспечить за счет использования дополнительной априорной информации относительно границ вероятных положений первого и второго (наиболее информативных) нулей АКФ. Эта информация была заложена в теоретические АКФ при их расчете, и именно она способствовала использованию оптимального диапазона расположения ординат исследуемой сигнальной функции.

ВЫВОДЫ

Оцениваемая ширина доверительного интервала для заданной доверительной вероятности и момент появления смещения могут служить основой для выбора наиболее оптимального сочетания точности обработки, длительности времени вычислений и аппаратных ресурсов. Использование разработанной статистической модели позволяет решать задачи построения оптимальных алгоритмов и систем оценки при исследовании поведения любой

составляющей параметрического вектора, задействованного для идентификации состояния ионосферной плазмы. Получаемые на базе модели сведения являются исходными при выборе алгоритмов обработки, при определении состава технических средств наблюдения, при оптимальном распределении точностей по вычислительным средствам, которыми оснащается распознающая система.

1. Зиатдинов Ю. К. Методы определения оптимальных проектных параметров сложных технических систем при наличии ограничений // *Космічна наука і технологія*.—1996.—2, № 1-2.—С. 57—61.
2. Курекин А. А., Лукин В. В., Зеленский Л. А. Применение методов векторной медианной фильтрации при обработке многоканальных радиолокационных данных дистанционного зондирования // *Космічна наука і технологія*.—1996.—2, № 5-6.—С. 53—63.
3. Мазманишвили А. С., Рогожкин Е. В. Об эффекте смещения оценок параметров ионосферной плазмы при обработке данных некогерентного рассеяния // *Радіотехніка*.—1999.—Вип. 109.—С. 20—26.
4. Пуляев В. А. Вычислительные методы при обработке корреляционных функций сигнала некогерентного рассеяния // *Вестн. ХГПУ: Сб. науч. тр.* — Харьков: ХГПУ, 2000.—Вип. 103.—С. 94—96.
5. Пуляев В. А. Статистическое оценивание параметров ионосферы в методе некогерентного рассеяния радиоволн // *Радіотехніка*.—2002.—Вип. 129.—С. 98—102.
6. Рофварг Л. Я., Пискорж В. В. О процедуре ускоренного поиска сигналов спутниковых радионавигационных систем // *Космічна наука і технологія*.—1996.—2, № 3-4.—С. 62—65.
7. Farley D. T. Radio wave scattering from the ionosphere // *Meth. Exp. Phys.*—1971.—98.—P. 139—186.
8. Taran V. I., Bogovsky V. K., Lysenko V. N., et al. Investigation of circumterrestrial space by means of incoherent scatter radar // *Космічна наука і технологія. Додаток: Space Plasma Physics*.—2001.—7, № 2.—С. 42—46.

A DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGIES FOR RATING IONOSPHERICAL PLASMA PARAMETERS IN THE METHOD OF RADIO WAVES INCOHERENT SCATTERING

A. S. Mazmanishvili, V. A. Puliaev

We considered the problem of performance of numerical experiments with statistical model of a multiparametrical system. On the basis of a constructed statistical algorithm, a modeling is carried out to study the influence of methods of processing on the accuracy and reliability of rating ionospheric data. Some examples of the construction of dependences for chosen high-altitude structures of autocorrelation function of ionospheric plasma are given. Estimations of the temperature of the ionic and electronic components are determined together with estimations of errors of rating.