

В. Н. ЛЫСЕНКО, канд. физ.-мат. наук, **А. Ф. КОНОНЕНКО**,
Ю. В. ЧЕРНЯК, н. с., Институт ионосферы (г. Харьков)

КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Спосіб некогерентного розсіювання дозволяє по кореляційній або спектральній функції розсіяного сигналу визначити основні параметри іоносфери. Для їхнього визначення в реальному часі створений програмований корелятор. Він складається з багатоканального АЦП, персонального комп'ютера на процесорі Pentium-III, паралельного інтерфейсу і вбудованого синхронізатора. Вимірюються висотні залежності від 6 до 19 затримок комплексної функції кореляції в інтервалі висот 100 - 1500 км з висотним розрізненням 10 - 120 км.

The method of incoherent scattering (IS) allows on correlation or spectral functions of IS signal to determine basic ionosphere parameters. For it's measurements in real time the programmed correlator is created. One consists of a two-channel analog-to-digital converter (ADC), personal computer (PC) on the Pentium-III processor, parallel interface between ADC and PC and built-in synchronizer. The altitude dependence 19 samples of complex correlation function of a IS signal in a heights interval 100 - 1500 km with an altitude resolution 10 - 120 km are measured.

Введение. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния (НР) радиоволн позволяет экспериментально определить основные параметры ионосферы, такие как электронная концентрация N_e , ионная T_i и электронная T_e температуры, скорость дрейфа V_z ионосферной плазмы, ионный состав. По ним рассчитываются дополнительные параметры, которые необходимы для создания и развития ионосферных моделей и в прикладных разработках. Метод реализуется с помощью прецизионного измерительного устройства – радара НР, в состав которого входит система первичной обработки – коррелятор или спектроанализатор. От точности измерения высотных зависимостей параметров НР сигнала зависит достоверность определения параметров ионосферной плазмы. Из-за этого развитие методов и средств дистанционного измерения параметров ионосферной плазмы в спокойном и возмущенном состоянии является актуальной задачей радиофизики. Целью работы является методическая, программная и аппаратная реализация методов измерения параметров ионосферной плазмы и экспериментальное подтверждение достоверности полученных результатов. Научная новизна заключается в определении уникальных временных зависимостей электронной концентрации, температур заряженных частиц и других параметров ионосферы во время сильной магнитной бури и солнечного затмения.

1. Аппаратурная реализация системы обработки. Обычно для обработки НР сигнала и определения параметров ионосферной плазмы в реальном времени применяются специализированные устройства [1, 2]. В связи со значительным повышением производительности персональных компьютеров

(ПК), простотой подключения к ним внешних устройств и наличия разветвленного программного обеспечения стало возможным реализовать коррелятор или спектроанализатор радара НР на программно-аппаратном комплексе, выполненном на основе ПК. Компьютер управляет синхронизацией процессов ввода радиолокационных данных и вычисления высотных зависимостей значений корреляционных функций (КФ), т.н. профилей задержек [3], производит их коррекцию и определение по ним N_e , T_b , T_e , V_z и ионного состава [4].

Для обработки НР сигнала в Институте ионосферы создан программируемый коррелятор, который состоит из многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП), персонального компьютера (ПК) на процессоре Pentium-III с тактовой частотой 800 МГц, параллельного интерфейса между АЦП и ПК и встроенного синхронизатора (ВС). Для связи АЦП и ВС с ПК используется встроенный в материнскую плату ПК параллельный интерфейс, работающий в режиме EPP (улучшенный параллельный порт). Главной отличительной чертой интерфейса является выполнение внешней передачи данных за время одного процессорного цикла ввода-вывода. Это позволяет достичь скорости обмена 0.5 - 2 МБайт в секунду. Т.к. ширина спектра смеси НР сигнала и шума на входах АЦП не превышает 15 КГц то, в соответствии с теоремой Котельникова, применяется частота квантования входного сигнала около 30 кГц. Структурная схема коррелятора показана на рис. 1.

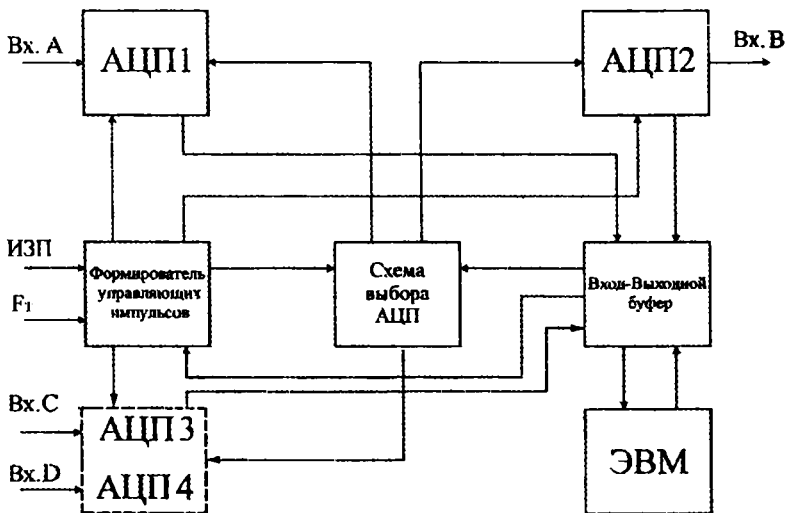


Рис.1. Структурная схема коррелятора

На входы коррелятора подаются сигналы с выходов синфазного и квадратурного каналов приемника (соответственно, каналы А и В). Предусмотрена возможность подключения к выходному буферу выходов цифрового

приемника, который используется в качестве усилителя промежуточной частоты и двусенного синхронного детектора.

Синхронность работы коррелятора и радара НР обеспечивается подачей в ВС импульса запуска передатчика (ИЗП), тактовой частоты и одного дополнительного синхроимпульса. В имеющихся измерительных системах на цифровых процессорах сигналов TMS320C10, которые работают более 10 лет [2], объем буферного запоминающего устройства составляет 24 кБ, что ограничивает возможность применения новых алгоритмов обработки и восстановления ионосферной информации [3]. Применение аппаратных и программных средств ПК снимает такие ограничения, а производительности процессора с тактовой частотой 800 - 2000 МГц достаточно для обработки большого массива ионосферных данных на низкой частоте в широком диапазоне высот 60 - 1500 км.

Программа первичной обработки начинает работу с опроса сигнала «Флаг 1», который формируется по импульсу запуска ИЗП. Если выставлен «Флаг 1» то программа записывает «1» на соответствующую шину регистра управления, чем разрешается прохождение тактовой частоты F_T на коррелятор. По F_T запускаются АЦП. После окончания преобразования очередного отсчета аналогового сигнала в цифровой код выдается сигнал «конец преобразования» по которому формируется сигнал «Флаг 2». По этому сигналу происходит чтение данных с первого, а затем с последующих АЦП и запись значений цифрового сигнала в два массива. Таким образом, преобразуется от 680 до 1800 отсчетов входного аналогового сигнала в каждом канале на каждом периоде повторения зондирующих импульсов. После полного завершения очередного цикла ввода происходит расчет авто и взаимно корреляционных функций для квадратурных каналов А и В за время, не превышающее период повторения зондирующих радиоимпульсов. Возможно также определение мощности сигналов в двух дополнительных каналах. Далее программа переходит в режим ожидания сигнала «Флаг 1». Длительность одного сеанса измерения выбирается заданием количества ИЗП. Обычно она составляет 1 - 1.5 минуты. Общее количество сеансов за сутки составляет 960 - 1440.

Разработанное программное обеспечение также позволяет записывать в течение нескольких суток отсчеты входных сигналов без обработки их в реальном времени (2×1024 числа на периоде повторения ИЗП, около 8.5 Гбайт в сутки). Это необходимо для отладки новых режимов обработки и во время работы радара НР в сложной помеховой обстановке.

2. Алгоритмы обработки НР сигнала в основных режимах излучения зондирующих сигналов. В режиме излучения зондирующих импульсов (ЗИ) без внутримпульсной модуляции большой длительности $T \approx 800$ мкс ($T > \tau_{\text{корр}}$, $\tau_{\text{корр}}$ – интервал корреляции рассеивающей среды) часто используется следующая оценка КФ, записанная ниже в интегральном представлении:

$$R^*(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \frac{1}{b-a} \sum_{n=1}^N \int_a^b u_n(x) u_n(x + \tau_k) dx \quad (1)$$

Здесь t_j – время запаздывания относительно переднего фронта зондирующего радиопульса, τ_k – временная задержка КФ, j – номер отсчета сигнала на периоде повторения ЗИ, k – номер задержки: $\tau_k = k \cdot \Delta\tau$, $\Delta\tau$ – дискретность по задержке, $\tau_{\text{корр}}$ – интервал корреляции НР сигнала, N – количество периодов повторения зондирующих радиопульсов.

Значения a и b зависят от вида оценки КФ. Если $a = t_j$, $b = t_j + T - \tau_k$, получим наиболее “старую” оценку. Для нее характерно разрешение по высоте, равное $\Delta H = cT$, где c – скорость света. Дисперсия такой оценки ухудшается с ростом задержки. Если для этого случая к выражению (1) применить прямое преобразование Фурье, то получим оценку спектральной плотности мощности (СПМ), эквивалентную спектру, вычисленному по значениям сигнала, взятых на интервале $(t_j, t_j + T)$.

Если $a = t_j - m\Delta\tau - \tau_k$, $b = t_j + m\Delta\tau$, $m = 0, 1, 2, \dots$, то получим оценку для т.н. трапецидального суммирования [3], варианты реализации и погрешности оценок которого получены в [3]. Для этой оценки дисперсия КФ не ухудшается с ростом задержки, а высотное разрешение при небольших m равно $\Delta H \approx cT/2$. При больших длительностях импульса, для высот внешней ионосферы наиболее эффективна именно эта оценка.

Если в выражении (1) поменять местами операции сложения и интегрирования, то получим оценку

$$R^*(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \frac{1}{b-a} \int_a^b \sum_{n=1}^N u_n(x) u_n(x + \tau_k) dx. \quad (2)$$

В разработанном корреляторе применяется именно такая оценка. Сумма, которая стоит под знаком интеграла, для каждого сеанса измерений вычисляется в режиме реального времени и записывается в базу данных. Подынтегральная сумма, деленная на N , является КФ парных выборок в моменты t_j и $t_j + \tau_k$. Предварительный расчет оценок (2) и вычисление по ним параметров ионосферы производится в период между сеансами. Для равенства результатов, полученных согласно выражениям (1) и (2), над суммами не должны производиться операции округления и усечения. Применение такой структуры данных позволяет после измерений вычислять различные оценки корреляционных и спектральных функций для больших и малых высот, а также применить метод восстановления высотных зависимостей мощности и КФ НР сигнала.

Определение тепловых и динамических параметров ионосферы требует вычисления комплексной КФ НР сигнала. Для этого в реальном времени определяются авто-

$$[R_A(t, \tau)]^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{A,n}(t)u_{A,n}(t + \tau), \quad (3a)$$

$$[R_B(t, \tau)]^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{B,n}(t)u_{B,n}(t + \tau), \quad (36)$$

и взаимно-корреляционные

$$[R_{AB}(t, \tau)]^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{A,n}(t)u_{B,n}(t + \tau), \quad (4.a)$$

$$[R_{BA}(t, \tau)]^* = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N u_{B,n}(t)u_{A,n}(t + \tau) \quad (4.6)$$

функции парных выборок в синфазном (А) и квадратурном (В) каналах. По ним рассчитываются действительная

$$[R_{Re}(t, \tau)]^* = \left([R_A(t, \tau)]^* + [R_B(t, \tau)]^* \right) / 2 \quad (5)$$

и мнимая

$$[R_{Im}(t, \tau)]^* = \left([R_{AB}(t, \tau)]^* - [R_{BA}(t, \tau)]^* \right) / 2 \quad (6)$$

части КФ входного сигнала коррелятора. В выражениях (3) – (6) $t = t_j, \tau = \tau_k$.

В режиме зондирования периодической последовательностью одиночных и двояных радиоимпульсов длительностью $T = 65$ мкс или $T = 130$ мкс, комплексная КФ также вычисляется по измеренным в каналах А и В отсчетам сигнала. Составляющие КФ, из которых образуется комплексная КФ в этом режиме определяются согласно выражению:

$$R(t_j, 0) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} u(t_{m+jM})u(t_{m+jM}),$$

$$R(t_j, \tau_k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} u(t_{m+jM})u(t_{m+jM-3(k+6)}) \quad (7)$$

Здесь $\tau_k = \Delta\tau(k+6)$ – задержка для которой вычисляется КФ, численно равная временному интервалу между двояными радиоимпульсами, $\Delta\tau = 3\Delta t, k = 1 -$

6, $M = 5$, $\Delta t = t_{m+1} - t_m = 13$ мкс – период квантования по времени. Т.е. изменяются мощность и 6 значений комплексной КФ, которые для высот 100 - 5 км лежат в области ее наиболее информативных значений. Суммирование по времени и по множеству осуществляются в реальном времени.

Входной сигнал коррелятора представляет собой аддитивную сумму НР сигнала и шумов на выходе приемного устройства. Зависимости значений КФ НР сигнала $R_{IS}(t_j, \tau)$ от времени запаздывания t_j (или высоты $h = ct_j/2$) при фиксированных задержках $\tau = \tau_k$

$$R_{IS}(t_j, \tau) = R(t_j, \tau) - R_{NS}(\tau),$$

где $R_{NS}(\tau)$ – усредненная КФ шума, которая определяется при времени запаздывания, соответствующего большим высотам (более 2000 км), на котором рассеянный сигнал не обнаруживается радаром.

При расчете КФ сигнала учитывается, что мнимая часть КФ шума при идентичных характеристиках синфазного и квадратурного каналов равна нулю. Т.е. применяя цифровой приемник или синхронный детектор, включенные в обоих каналах идентичные фильтрующие цепи и имеющие один АЧХ на входе, нет необходимости вычитать мнимую часть КФ шума. Если применяются аналоговые детекторы и два АЦП, то коэффициенты передачи в каналах могут отличаться. При определении скорости дрейфа необходимо разделить мнимую часть КФ на действительную. Если коэффициенты передачи напряжению первого и второго каналов равны, соответственно, K_A и K_B , получится уменьшенное в $(K_A^2 + K_B^2)/2K_AK_B$ значение. Для исключения такой погрешности действительная часть КФ нормируется на мощность шума

$$R_{N1}(0) = 0.5[R_{NSA}(0) + R_{NSB}(0)],$$

мнимая часть – на $R_{N2}(0) = \sqrt{R_{NSA}(0)R_{NSB}(0)}$

Отношение сигнал/шум $q(t_j) = R_{IS}(t_j, 0)/R_{N1}(0)$.

В радаре НР применяется антенный переключатель (АП), выполненный на газовых разрядниках. Время их восстановления достигает 1.5 мсек. Для коррекции искажений высотных зависимостей значений КФ измеряется характеристика восстановления (по мощности) АК $K_{SW}(t_j)$. В режиме зондирования радиоимпульсами большой длительности скорректированная КФ будет равна

$$R_{ISC}(t_j, \tau) = R_{IS}(t_j, \tau) / \sqrt{K_{SW}(t_j)K_{SW}(t_j + \tau)}$$

В выражении (9) принято, что обе составляющие КФ $R_{IS}(t_j, \tau)$ уже нормированы на свои мощности шума (при $\tau = 0$ получается отношение сигнал/шум, а не мощность).

В режиме двояных импульсов определяется характеристика восстановления АП в функции от времени запаздывания и времени задержки $K_{SW}(t_j, \tau_k)$. Измеренные КФ НР сигнала делятся на этот коэффициент.

С помощью выражений (2) и (9) получаем интегральную оценку, которая применяется как для действительной, так и для мнимой составляющей КФ НР сигнала.

$$R^*(t_j, \tau_k) = \frac{1}{N} \frac{1}{b-a} \int R_{ISC}(x, \tau_k) dx,$$

$$R^*(t_j, \tau_k) = q^*(t_j, \tau_k) r^*(t_j, \tau_k) \quad (10)$$

Здесь $q^*(t_j)$ – оценка отношения сигнал/шум, $r^*(t_j, \tau_k)$ – оценка нормированной на мощность сигнала КФ (НКФ).

Для интегрирования, а при необходимости и сглаживания оценки, разработана сплайн-квадратурная формула на основе сглаживающих сплайнов Шенберга и Рейнша.

При зондировании ионосферы радиоимпульсами большой длительности из-за изменения мощности сигнала в импульсном объеме (в направлении распространения) возникает смещение полученных оценок КФ рассеивающей среды и рассчитанных по ней температур заряженных частиц. Применяя методику коррекции измеренных КФ, описанную в [3], которая учитывает длительность и форму зондирующего радиоимпульса, изменение мощности рассеянного сигнала в импульсном объеме и алгоритм интегрирования КФ парных выборок можно получить достоверные результаты в этом режиме в диапазоне высот 200-1500 км. Обычно в таком режиме можно получить только параметры внешней ионосферы (выше максимума слоя F2).

Оценка нормированной КФ равна

$$r^*(t_j, \tau_k) = R^*(t_j, \tau_k) / q^*(t_j) K(t_j, \tau_k),$$

(11)

$$K(t_j, \tau) = \frac{\Delta P(t_j, \tau)}{\Delta P(t_j, 0)},$$

$$\Delta P(t_j, \tau) = \frac{1}{(\tau + \Delta T(t_j))} \int_{t_j - \tau - \Delta T(t_j)}^{t_j + \Delta T(t_j)} \int_0^{T - \tau} P_{ini}(t-x) U(x) U(x + \tau) dx dt.$$

Здесь $P_m(t) = R(t_j + \alpha T, 0)$, $\Delta T(t_j) = m(t_j)\Delta\tau$, $m=0,1,2,\dots$, $K(t_j, \tau)$ – высотная зависимость коэффициента коррекции. Запись коэффициента m как функции запаздывания означает, что его можно увеличивать с высотой для компенсации роста дисперсии оценки КФ с уменьшением отношения сигнал/шум.

Оценка нормированной КФ дифференциального сечения рассеяния равна $r_{r\tau}^*(t_j, \tau_k) = r^*(t_j + \alpha T, \tau_k)$, $\alpha = \alpha_0(1 - |\tau_k|/T)$, $\alpha_0 = 0.6 - 0.7$ при длительности зондирующего импульса около 800 мкс. В литературе по НР обычно принимается $\alpha_0 = 0.5$ (т.е. отсчет запаздывания (и пропорциональной ему высоты) производится от середины зондирующего импульса. Сравнение данных, полученных в режимах излучения импульсов длительностью 800 и 65 мкс, а также с модельными расчетами показали, что из-за изменения мощности сигнала в импульсном объеме это приводит к неправильному определению высоты максимума ионизации на 15 - 20 км (неопределенность по высоте).

Оценка спектра НР сигнала

$$S(t_j, f_i) = 1 + 2 \sum_{k=1}^{K_{max}} [R_{Re}(t_j, \tau_k) \cos 2\pi f_i \tau_k - R_{Im}(t_j, \tau_k) \sin 2\pi f_i \tau_k]$$

Оценка огибающей НКФ

$$r_{env}^*(t_j, \tau) = \sqrt{[r_{Re}^*(t_j, \tau)]^2 + [r_{Im}^*(t_j, \tau)]^2} \quad (12)$$

Действительную и мнимую части НКФ можно представить так

$$r_{Re}(t_j, \tau) = r_{env}(t_j, \tau) \cos \Omega_d(t_j) \tau,$$

$$r_{Im}(t_j, \tau) = r_{env}(t_j, \tau) \sin \Omega_d(t_j) \tau.$$

Здесь $\Omega_d = 2\pi f_d = 2\pi C_V V_z$; f_d доплеровская частота, V_z скорость дрейфа в радиальном направлении. Для радара с длиной волны около 2-х метров, эта частота не превышает 10...50 Гц для магнитно-спокойных условий. При этом отношение $r_{Im}(t_j, \tau)/r_{Re}(t_j, \tau) \ll 1$. Учитывая это, получим:

$$r_{env}(t_j, \tau) = r_{Re}(t_j, \tau) \sqrt{1 + \left[\frac{r_{Im}(t_j, \tau)}{r_{Re}(t_j, \tau)} \right]^2} \approx r_{Re}(t_j, \tau) \left(1 + 0.5 \left[\frac{r_{Im}(t_j, \tau)}{r_{Re}(t_j, \tau)} \right]^2 \right). \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что знак $r_{env}(t_j, \tau)$ определяет составляющая КФ $r_{Re}(t_j, \tau)$. Этот вывод дает возможность восстановить знак огибающей КФ на всем ее протяжении.

Для расчета температур обычно применяется сравнение измеренной НКФ $r_{cm}(h, \tau)$ с рассчитанными в соответствии с теоретическим выражением корреляционными функциями тепловых флуктуаций электронной плотности $r_T(\tau, T_i, T_e)$ [5]. Задача нахождения температур сводится к нахождению минимума невязки в соответствии со среднеквадратическим критерием:

$$f(h_j, T_e) = \min_{(T_i, T_e) \in T_i \times T_e} \sum_{k=1}^K \frac{1}{D[r(h, \tau_k)]} \left[r_{env}(h_j, \tau_k) - r_T(h_j, \tau_k, T_i, \beta) \right]^2 \quad (14)$$

Здесь подразумевается, что элемент T_i принадлежит множеству T_i , а элемент T_e множеству T_e , $\beta = T_e/T_i$, $D[r(h, \tau_k)]$ – дисперсия оценки НКФ, которая используется в качестве весового коэффициента.

Для определения минимума нелинейной функции нескольких переменных, сначала она преобразуется в функцию одной переменной – номера КФ, а затем применяется метод координатного спуска, который позволяет решить задачу минимизации функции одной переменной без расчета производных. Рассчитаем N корреляционных функций рассеивающей среды:

$$r_T(\tau, n) = r_T(\tau, T_{il}, \beta_m) \quad (15)$$

Эти функции охватывают возможные комбинации ионной температуры и отношения температур, взятых с шагом соответственно ΔT_i и $\Delta \beta$, начальными значениями $T_{i \text{ нач}}$ и $\beta_{\text{нач}}$. Максимальное количество элементов для ионной температуры положим равным L , для отношения температур – M . Максимальное количество рассчитанных КФ равно $N = LM$. При расчете КФ значения элементов выбирается согласно следующему условию:

$$\begin{cases} T_i(l) = T_{i \text{ нач}} + (l - 1)\Delta T_i, l = 1, 2, \dots, L. \\ \beta(l, m) = \beta_{\text{нач}} + (m - 1)\Delta \beta, m = 1, 2, \dots, M. \end{cases} \quad (16)$$

Для этого алгоритма в выражении (14) заменим $f(h, T_i, T_e)$ на $f(h, n)$ и НКФ $r_T(h, \tau_k, T_i, \beta)$ в соответствии с выражением (15). После определения теоретической функции с номером n^* , соответствующей минимуму, значения физических параметров можно найти согласно выражениям (16), где l и m определяются по полученным из (16) формулам:

$$l = \text{INT}\left(\frac{n^* - 1}{M}\right) + 1, \quad m = n - \text{INT}\left(\frac{n^* - 1}{M}\right) \cdot M$$

Здесь $\text{INT}()$ – операция усечения числа до целого. Электронная температура будет равна $T_e = T_i \beta$. Так как $n^* = n_j$ локализована в интервале $[n_{j-1}, n_{j+1}]$,

то погрешность в определении T_i и β не превышает шага по соответствующему параметру, а в благоприятном случае половины этого значения.

Методика определения электронной концентрации (N_e) основана на зависимости мощности (отношения сигнал-шум) НР сигнала от N_e [6]

$$N_e(h) = 1.24 \times 10^{10} \frac{q(h)h^2 [1 + T_e(h)/T_i(h)]}{q(h_0)h_0^2 [1 + T_e(h_0)/T_i(h_0)]} (f_0 F_2)^2$$

где h_0 – высота максимума слоя F_2 , q – отношение сигнал-шум.

Скорость дрейфа ионосферной плазмы определяется по частоте Доплера $f_z(t_j)$: $2\pi f_z(t_j) = \Delta\varphi(t_j, \tau_k)/\tau_k$, где $\Delta\varphi(t_j, \tau_k)$ – приращение фазы при $\tau = \tau_k$ относительно фазы при $\tau = 0$. При разных задержках рассчитанная скорость одинакова с точностью до статистических флуктуаций. Оценка частоты в этом случае может быть взята как среднее при разных k , а оценка скорости дрейфа [7]

$$V^*(t_j) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{K_{\max}} \frac{\sum_{k=1}^{K_{\max}} \Delta\varphi(t_j, \tau_k)}{\tau_k} \quad (17)$$

На радарх НР (Миллстоун-Хилл, США), ИСЗФ РАН [8], Институт ионосферы) применяется также оценка скорости, полученная методом наименьших квадратов:

$$V^*(t_j) = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{1}{K_{\max}} \frac{\sum_{k=1}^{K_{\max}} G_k \Delta\varphi(t_j, \tau_k)}{\sum_{k=1}^{K_{\max}} G_k \tau_k^2} \quad (18)$$

Здесь G_k – весовые коэффициенты,

$$\Delta\varphi(t_j, \tau_k) = \arctg(r_{\text{Im}}^*(t_j, \tau_k) / r_{\text{Re}}^*(t_j, \tau_k)). \quad (19)$$

Заметим, что для среднеширотной ионосферы вертикальная составляющая скорости дрейфа обычно не превышает 100 - 200 м/сек. В используемом интервале задержек τ отношение мнимой и действительной составляющих получается не более 0.3. В этом случае из выражения (19) получим

$$\Delta\varphi(t_j, \tau_k) \approx r_{\text{Im}}^*(t_j, \tau_k) / r_{\text{Re}}^*(t_j, \tau_k). \quad (20)$$

Применение выражения (20) при малых отношениях сигнал/шум более предпочтительно, т.к. из-за больших флуктуаций мнимой составляющей применение нелинейного равенства (19) в выражении (17) может вызвать смещение оценки скорости дрейфа.

3. Применение составного зондирующего сигнала. Составной зондирующий сигнал предназначен для улучшения разрешения по высоте измеренной электронной концентрации в нижней ионосфере. Он состоит из двух частотных элементов с большой (около 0.7 мс) и малой (около 0.1 мс) длительностями, обеспечивающими необходимое разрешение по высоте и возможность определения 18 отсчетов КФ НР сигнала. Мощность НР сигнала, полученная при рассеянии зондирующего сигнала малой длительности используется также в качестве $P_{in}(t)$ для расчета коэффициента коррекции в выражении (11).

Т.к. температуры заряженных частиц изменяются медленнее, чем электронная концентрация, то можно получить параметры ионосферы с приемлемым высотным разрешением в диапазоне высот 80 - 1200 км и более. Мощность, рассеянная при излучении короткого радиоимпульса, измеряется дополнительным квадратурным приемным каналом, выходы которого подключены ко двум дополнительным АЦП коррелятора. Квантование сигналов в основных и дополнительных каналах происходит одновременно, а ввод в ПК последовательно.

4. Результаты измерения основных параметров ионосферной плазмы.

На рис.2 приведено высотное распределение НКФ, а на рис.3 высотные зависимости сечения рассеяния в основном (разрешение по высоте 90 км) и дополнительном (разрешение по высоте 10 км) каналах при зондировании ионосферы составным сигналом. На рис. 3 хорошо видно слоистую структуру ионосферы, сглаженную при зондировании импульсом большой длительности.

На рис. 4 показан суточный ход электронной концентрации, ионной и электронной температур во время отрицательной ионосферной бури, вызванной сверхсильной магнитной бурей 30 мая 2003 г. (индекс K_p изменялся от 8 до 4 в течении суток). Буря была вызвана солнечными вспышками в ночь с 27 на 28 мая 2003 г. На рисунках видно, что в ночное время в несколько раз уменьшилась электронная концентрация и резко увеличился нагрев ионосферной плазмы: ионная температура увеличилась до 1500К, электронная температура – до 2500К на высоте 308 км, примерно в 1.8 раза возросло отношение электронной и ионной температур (по сравнению с невозмущенной ионосферой, когда в ночное время это отношение равно 1).

На рис.5 и рис.6 показаны суточные хода тех же параметров во время частичного затмения Солнца 31 мая 2003 г. (степень покрытия диска Солнца лунной составляло около 0.46). Хорошо видна быстрая реакция значений электронной температуры на изменение фазы затмения Солнца.

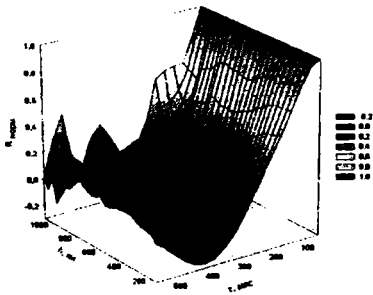


Рис 2 Высотное распределение НКФ

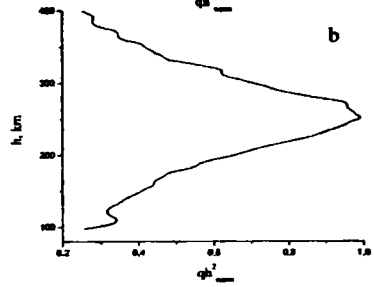
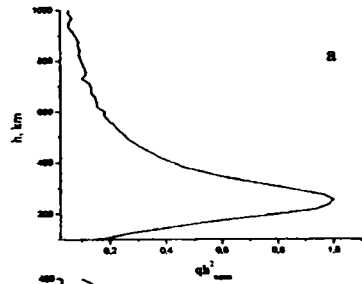


Рис 3. Высотное распределение сечения рассеяния $qh^2_{\text{пор}}$ в основном (а) и дополнительном (б) каналах

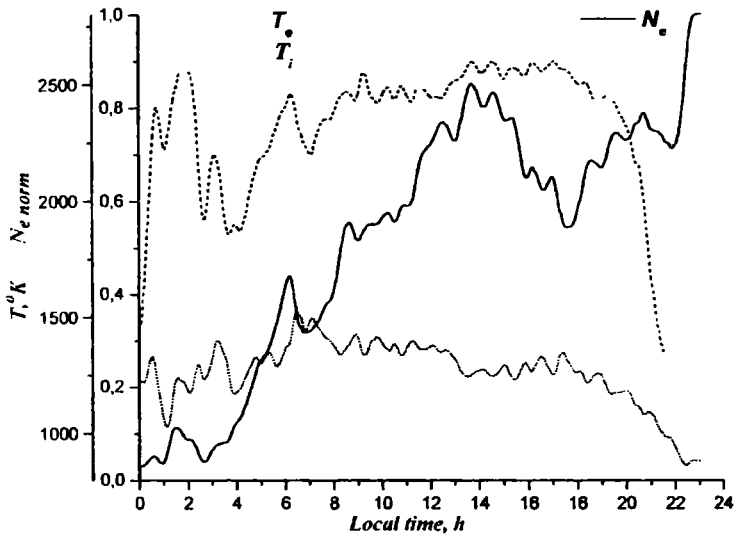


Рис.4. Суточный ход основных параметров ионосферы во время сильной магнитной бури 30.05.2003 г. Высота 308 км

Уменьшение электронной температуры на высоте 308 км составило 500 - 600 К. Охлаждение ионов малозаметно.

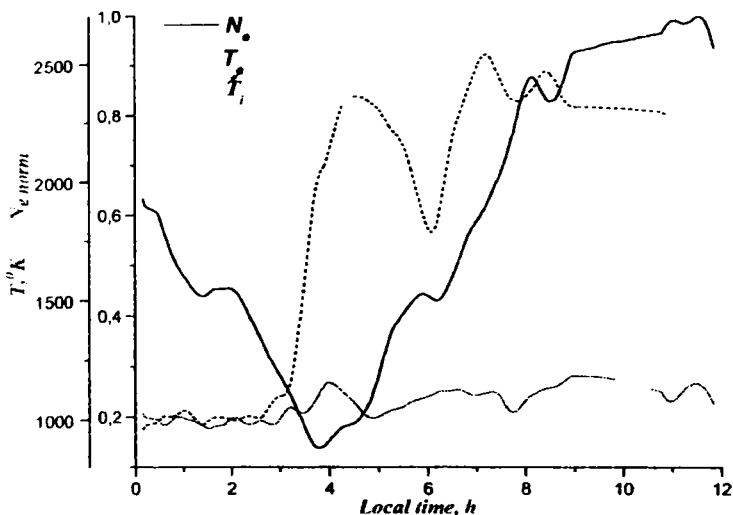


Рис. 5. Временные зависимости основных параметров ионосферы 31.05.2003 г. Высота 250 км.

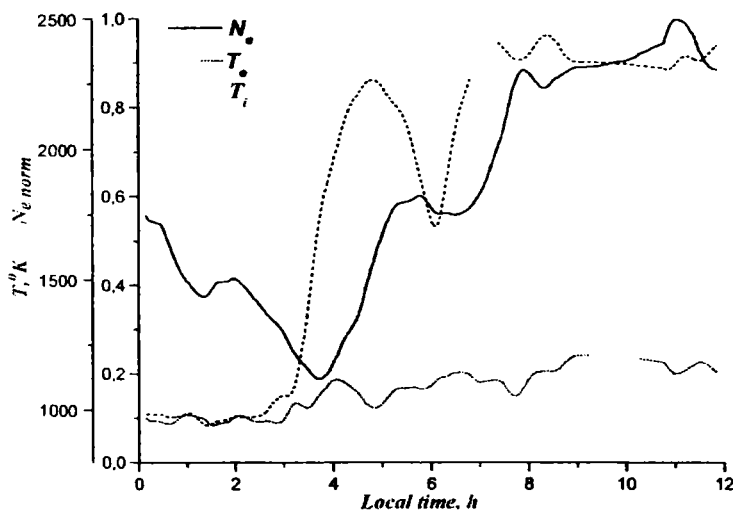


Рис. 6. Временные зависимости основных параметров ионосферы 31.05.2003 г. Высота 308 км.

Наблюдается также небольшое уменьшение электронной концентрации. Отличие от затмения 1999 г., которое происходило в магнитоспокойной обстановке, в дневной период состоит в том, что в 2003 г. затмение совпало с восходом Солнца над измерительной установкой и окончанием магнитной

бури. Данные, показанные на рис.4 – 6 получены при обработке КФ НР с нала, измеренных в режиме излучения радиоимпульсов большой длительности. Временные зависимости строились в реальном времени. Время накопления равно 1 мин. Полученные зависимости дополнительно обрабатывались сглаживающими сплайнами. Одновременно измерялась скорость дрейфа иносферной плазмы. Из данных исключены результаты воздействия отражений от летательных аппаратов. При вторичной обработке производится суммирование высотных зависимостей КФ за время, равное 15 мин. и вычисление по ним электронной концентрации, температур заряженных частиц, скорости дрейфа и ионного состава. При этом статистическая погрешность измерения, например, температур в дневное время уменьшается от 50 - 70 К до - 20 К (без сплайнового сглаживания).

Выводы. Разработана новая измерительная система многоканальной программируемый коррелятор на персональном компьютере, методика и программы первичной обработки НР сигнала, образованного при зондировании ионосферы сигналами различной длительности. По измеренным корреляционным и спектральным функциям НР сигнала рассчитаны высотные зависимости основных параметров ионосферы в реальном масштабе времени. Разработанная методика коррекции измеренных КФ позволяет определить характеристики рассеивающей среды с точностью, достаточной для геофизического анализа. С помощью коррелятора получены достоверные данные о поведении ионосферы во время сверхсильной магнитной бури и солнечного затмения. Данные о поведении ионосферы во время ионосферной бури и солнечного затмения можно применить для геофизического анализа и создания модели ионосферы в возмущенном состоянии.

Список литературы: 1. Г. А. Балл. Аппаратурный корреляционный анализ случайных процессов – М. Энергия, 1968, 160 с. 2. Лысенко В.Н. Кочергин А.Г. Измерение параметров ионосферы методом НР с использованием аппаратуры обработки на цифровых процессорах // Тез. докл. X конференции по распр. радиоволн. Ульяновск: УлПИИ. 1993, С. 72. 3. Holt J.M., Rhoda D. Tetenbaum D. and van Eyken A.P. Optimal analysis of incoherent scatter radar data // Radio Science 1992.- Vol. 27, № 3, P. 435 - 447. 4. Лысенко В.Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки НР сигнала // Радиофизика и электроника. Сб. науч. тр. Харьк. Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины. 2002, Т. 7, № 1, С. 82 - 88. 5. The use of the quist theorem in general quasi - equilibrium situations // Journ. of Geophysical Research.- Vol. 1979, P. 1930 - 1932. 6. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР радиоволн // ТИИЭР. 1969, Т. 57, № 4, С. 139 - 175. 7. Лысенко В.Н. Измерение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. 2001, Т. 41, № 3, С. 365 - 368. 8. Штынев Б.Г., Заруднев В. Кушнарев Д.С., Медведев А.В. Особенности корреляционной обработки сигналов НР на радиостанции ИСЗФ // Тр. XX всеросс. научн. конф. "Распространение радиоволн" Нижний Новгород НИРИ РАН. 2002, С. 50 - 51.

Поступила в редакцию 20. 04. 0