

Нижегородский научно-исследовательский радиофизический институт
Министерства науки, высшей школы и технической политики
Российской Федерации

П р е п р и н т № 359

МЕТОД КОРРЕЛЯЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

С. Н. Мияков

Е. Н. Сергеев

Нижегород 1993

М и г я к о в С. Н., С е р г е е в Е. Н.

МЕТОД КОРРЕЛЯЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ // Препр я н т
№ 359. - Нижний Новгород: НИРФИ, 1993. - 25 с.

В работе описан метод корреляционного зондирования, основанный на измерении взаимной корреляции прямого и отраженного от ионосферы радиосигнала. Описана функциональная схема корреляционного приемника. Приведены результаты исследования тонкой структуры отраженного от ионосферы сигнала.

І. ВВЕДЕНИЕ

Современные методы обработки сигналов при физических измерениях весьма разнообразны. Общепринятыми являются фильтрация, Фурье-анализ, синхронное детектирование, корреляционный анализ и многие другие /1/. В настоящее время в связи с применением персональных компьютеров открываются качественно новые возможности по обработке сигналов. Высокое быстродействие, большой объем памяти ЭЭМ типа IBM PC позволяет реализовывать очень сложные, не доступные ранее методы и методики обработки сигналов, что находит применение в самых разнообразных областях науки и техники и, в частности, в задачах радиолокации.

Но наряду с такими гибкими обрабатывающими комплексами традиционное развитие приобретает и жесткие одноалгоритмические системы, построенные на аналоговых или цифровых устройствах (элементы жесткой логики, микропроцессоры). Такие жесткие системы обычно имеют преимущества (быстрота, надежность) при работе в реальном времени при достаточно простых алгоритмах обработки. Одним из таких алгоритмов является корреляционный анализ сигналов /2/, который в задачах локации, например, сводится к снятию функции корреляции между излучаемым и отраженным от объекта исследования сигналом в зависимости от его задержки. Использование этого метода для зондирования ионосферы не получило широкого распространения.

При зондировании ионосферы обычно используются импульсные сигналы /3, 4/, основной недостаток которых заключается в том,

что они переносят с собой очень малую долю энергии. Увеличение энергии сигнала возможно либо с увеличением импульсной мощности (например, у ионозвонда "Сойка" мощность передатчика составляет 40 кВт /5/), либо с удлинением импульса. При этом самую большую энергию, очевидно, будет переносить непрерывный сигнал. Дальнейшее увеличение мощности установки импульсного зондирования приводит к увеличению размеров и стоимости зондирующей аппаратуры, ухудшению ее электромагнитной совместимости с аппаратурой связи. С другой стороны, при использовании импульсного зондирования увеличение мощности за счет роста длительности импульса неизбежно приводит к ухудшению пространственного разрешения.

Решение данной проблемы может быть найдено путем применения непрерывных или квазинепрерывных сигналов со сложным спектром /1, 2/. В этой связи существенный прогресс в развитии средств диагностики был достигнут благодаря применению для зондирования непрерывных радиосигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) /6, 7/. Эксперименты по зондированию ионосферы ЛЧМ-радиосигналами были начаты в 1980 г. совместно Марийским политехническим институтом (МПИ) и НИРФИ. Применяемая методика "сжатия" ЛЧМ-сигнала по частоте /8/, высокая степень линейности позволяют получать достаточно хорошее временное и пространственное разрешение при достаточно низкой ($\sim 10 + 100$ Вт) мощности зондирующего передатчика.

Предлагаемая авторами методика является еще одним примером применения непрерывного сигнала для зондирования ионосферы. Речь идет о "корреляционном" зондировании, суть которого заключается в снятии функции корреляции прямого и отраженного сигнала. Известно, что наилучшими корреляционными свойствами обладает белый шум. Поэтому в качестве зондирующего целесообразно использовать непрерывный сигнал, модулированный белым шумом по амплитуде или по частоте в полосе порядка нескольких килогерц. Расчеты показывают, что использование частотной модуляции взамен амплитудной дает энергетический выигрыш в два раза. Мы, однако, будем рассматривать случай амплитудной модуляции белым шумом, что значительно проще методически.

Отметим, что конфигурация аппаратурного комплекса определя-

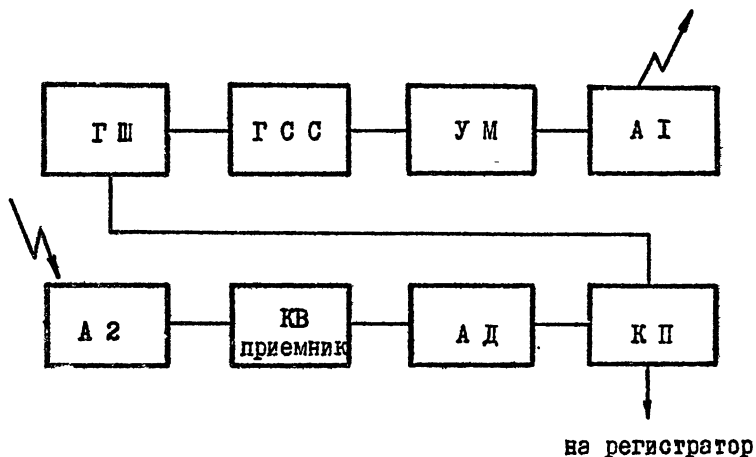
ется решаемой задачей. В работе описана аппаратура для зондирования ионосферы на одной фиксированной частоте. При этом для мощности зондирования ~ 1 Вт удается достичь разрешения по времени ~ 3 с и по высоте ~ 2 км при приеме на узконаправленную антенну ($G \sim 100$). Описанный комплекс можно легко модернизировать для работы на нескольких частотах или в режиме многочастотного ионозонда. Об этом будет сказано подробнее в разделе 2.4. Отметим, что для снятия ионограммы потребуется значительно большая мощность передатчика ($0,1 + 0,5$ кВт), что обусловлено широкополосностью приемной антенны и наличием помех. Описанная в работе методика адаптивной обработки принимаемой информации позволяет существенно увеличить разрешение по высоте. В гл.4 приведены результаты использования предложенного метода "корреляционного" зондирования применительно к ионосфере. Исследована тонкая структура временных вариаций эффективной высоты отражения зондирующего сигнала.

В заключении приведены основные результаты работы и предложены возможные области применения метода.

2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДА "КОРРЕЛЯЦИОННОГО" ЗОНДИРОВАНИЯ

2.1. Схема эксперимента

На рис.1 приведена блок-схема эксперимента. Задатный генератор (ГСС), работающий в диапазоне от 1 до 10 МГц, имеет вход внешней амплитудной модуляции (АМ), на который подается белый шум с генератора шума (ГШ) в полосе $\Delta F = (0 + F_{cp})$, где $F_{cp} \sim 5 + 10$ кГц. Сигнал со 100-процентной амплитудной модуляцией подается на усилитель мощности (УМ), имеющий выходную нагрузку 50 Ом и хорошо согласованный с передающей антенной А1. Приемный тракт состоит из антенны (А2), супергетеродинного КВ-приемника, линейного амплитудного детектора (АД), корреляционного приемника (КП) и регистрирующей аппаратуры (осциллографа и самописца). Низкочастотный шум в качестве опорного сигнала подается с ГШ в приемный тракт и используется для снятия функции корреляции.



Р и с. I

Схема эксперимента

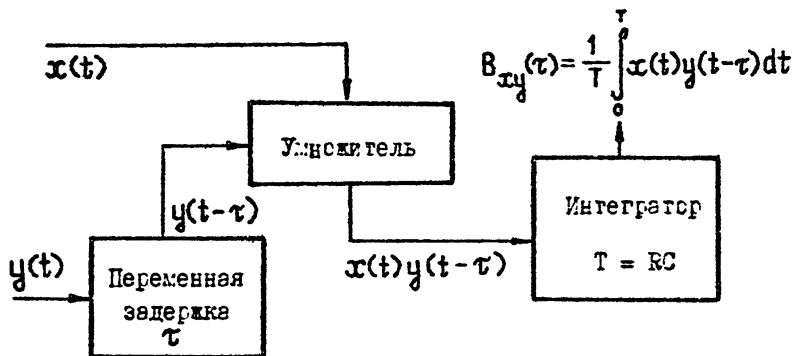
2.2. Корреляционный анализ

Рассмотрим оценку корреляционной функции $V_{xy}(\tau)$ случайных сигналов $x(t)$ и $y(t)$. Для непрерывных сигналов

$$V_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^{\tau} x(t) y(t-\tau) dt. \quad (I)$$

Согласно /I/, оценка корреляционной функции сводится к измерению ее значений. В результате корреляционная функция $V_{xy}(\tau)$ получается в виде ряда значений $V_{xy}(0)$, $V_{xy}(\tau_1)$, $V_{xy}(\tau_2)$, ..., $V_{xy}(\tau_{m-1})$. Если нельзя измерить сразу все m значений корреляционной функции в точках $0, \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{m-1}$, то приходится применять следующую процедуру: сначала устанавливается сдвиг τ_k и измеряется $V(\tau_k)$, затем устанавливается сдвиг τ_j и измеряется $V(\tau_j)$ и т.д. (рис.2). При измерении последовательно во всех m точках общее время не снятие зависимости $V(\tau)$ составляет mT , где T - время интегрирования. Это время может существенно превышать характерные времена нестационарности процессов $x(t)$ и $y(t)$,

что приведет к существенной потере информации. Применение параллельных коррелометров (одновременно измеряющих корреляцию и ну функцию во всех m каналах) затруднено из-за значительного усложнения аппаратуры. Альтернативным вариантом является последовательно-параллельный анализ. Его суть заключается в многократном быстром сканировании по τ с последующим синхронным накоплением информации в m -канальном анализаторе (см. разд. 3.3).



Р и с. 2

Блок-схема простейшего последовательного коррелятора

В экспериментах по зондированию использовался радиосигнал, промодулированный по амплитуде белым шумом в полосе несколько кГц (полоса приема ограничена уровнем помех и возможностью приемной аппаратуры). В качестве ВЧ приемника использовался супергетеродинный приемник КАТРАН, имеющий на выходе сигнала промежуточной частоты (215 кГц) "гауссовый" фильтр с полосой ~ 4 кГц. При этом на выходе линейного детектора выделяется "розовый" шум, имеющий гауссову автокорреляционную функцию. Использование других фильтров для белого шума приводит к появлению в автокорреляционной функции нескольких максимумов, что приводит к неоднозначности оценки высоты отражения сигнала. Таким образом, кросскорреляционная функция падающего $y(t)$ и отраженного от ионосферы $x(t)$ сиг-

нала имеет один максимум в точке $\tau = \tau^*$, соответствующей значению эффективной высоты отражения.

Немало методических трудностей возникает в том случае, если передающая А1 и приемная А2 антенны (рис.1) расположены в непосредственной близости друг от друга. Если интенсивности "земной" и отраженной от ионосферы волны на входе приемника одного порядка, то можно измерять автокорреляционную функцию сигнала $x(t)$:

$$B_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau) dt. \quad (2)$$

В этом случае имеет два максимума функции B_{xx} : в нуле и в точке $\tau = \tau^*$.

2.3. Оценки разрешающей способности метода

Будем рассматривать несколько идеализированный случай, когда зеркальное отражение падающей волны происходит от одной высоты, а помехи практически отсутствуют. В этом случае при определении эффективной высоты отражения временное разрешение определяется постоянной времени интегрирования, а высотное разрешение - полосой приемника или шириной функции корреляции, если спектр принимаемого сигнала не искажается приемником:

$$\Delta Z = \frac{c\tau_0}{2}, \quad (3)$$

где $\tau_0 = \frac{1}{\Delta F}$ - полуширина максимума функции корреляции (для "розового" шума с полссей ΔF). Если $\Delta F = 4$ кГц, то $\Delta Z \approx 20$ км. Величина ΔZ , тем не менее, не является предельной разрешающей способностью. Легко показать, что абсолютная погрешность по высоте при параллельном анализе определяется погрешностью определения корреляционной функции, которая, в свою очередь, определяется полосой ΔF и временем интегрирования T/T :

$$\epsilon_B = \frac{B_{xx}(0)}{\sqrt{\Delta F T}}. \quad (4)$$

Абсолютная погрешность определения высоты в этом случае равна

$$\epsilon_z = \frac{\Delta z}{\sqrt{\Delta f T}} \quad (5)$$

При $\Delta f \approx 4$ кГц, $T \sim 3$ с, $\Delta z \approx 20$ км абсолютная погрешность $\epsilon_z \approx 0,2$ км. При последовательном анализе (режим линейного сканирования по времени задержки τ) приведенные оценки имеют место лишь для случая

$$T \ll \frac{\epsilon_z}{\dot{z}}, \quad (6)$$

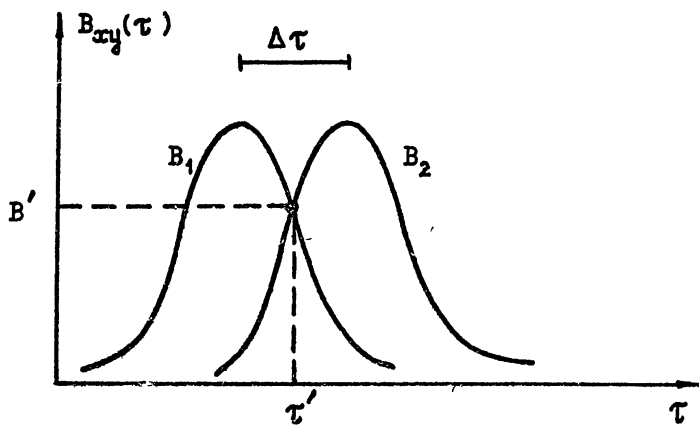
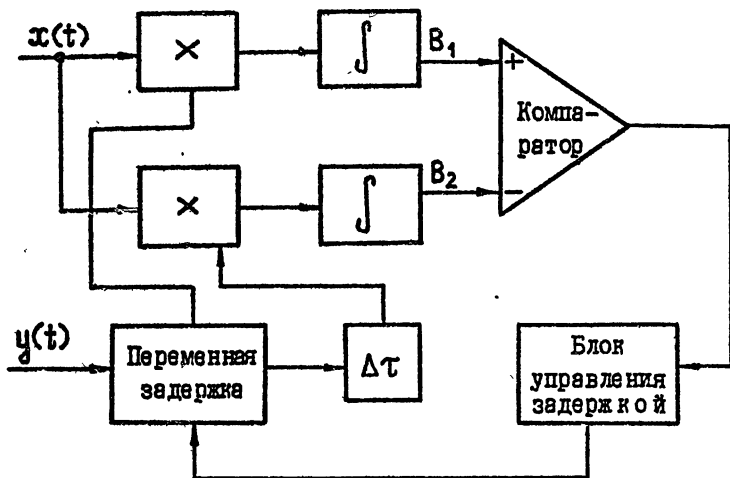
где $\dot{z} = \frac{z_{\max} - z_{\min}}{T_{\text{общ}}}$ - скорость перестройки по высоте (по за-

держке), $T_{\text{общ}}$ - полное время перестройки. Неравенство (6), однако, выполнить достаточно сложно, поскольку постоянная времени T ограничена снизу наличием помех, а скорость перестройки \dot{z} нестабильна из-за отраженного сигнала (фединги, "замирания", доплер, биения с "земной" волной). Перечисленные факторы приводят к уменьшению разрешения и по времени, и по высоте.

Авторами реализован метод адаптивной обработки информации. Задача состоит не в снятии всей функции корреляции в зависимости от τ (последовательный анализ), а в определении максимума функции корреляции и "слежении" за ним (автоподстройка). Методически это выглядит следующим образом. Имеется два канала, задержки в которых могут меняться и отличаются друг от друга на фиксированный сдвиг $\Delta\tau$ (рис.3). На выходе двух интеграторов имеем две корреляционные функции, сдвинутые друг относительно друга. При некотором $\tau = \tau'$ значения корреляционных функций сравниваются (как показано на рисунке):

$$B_1(\tau) = B_2(\tau') = B' \quad (7)$$

Если ввести обратную связь, то можно поддерживать равенство (7) путем уменьшения (или увеличения) задержки. При этом $B'(t)$ дает информацию о временных вариациях амплитуды, а $\tau'(t)$ - высота отраженного сигнала. Рассуждения же о разрешающей способности здесь практически такие же, как и для параллельного анализа. Ав-



Р и с. 3

Блок-схема и
 пояснения механизма автоподстройки

топодстройка более детально рассмотрена в п.3.2.3.

2.4. Режим ионозонда. Энергетические оценки

До сих пор рассматривался случай корреляционного зондирования на фиксированной частоте. Такой режим работы оправдан в ряде случаев, если информация о полном $N-H$ -профиле не нужна, а требуются измерения высоты отражения на одной или нескольких частотах с хорошим временным и пространственным разрешением. Хотя в разд.3 и 4 рассмотрен одночастотный приемник, его можно использовать и в режиме снятия ионограммы. Для этого необходимо вести синхронную перестройку задающего генератора и КВ приемника, а корреляционный приемник перевести в режим автоподстройки на максимум функции корреляции. С перестройкой частоты будут меняться величины B' и τ' (максимум функции корреляции и задержка, соответствующая ему). Зависимость $\tau'(\omega)$ и является аналогом высотно-частотной характеристики. В режиме ионограммы помехи оказывают значительно большее воздействие на прием отраженного сигнала, поэтому здесь требуется существенно большая мощность (примерно на два порядка), чем при работе на фиксированной частоте.

Приведем сравнительный анализ энергетических возможностей трех методов: метода импульсного зондирования, ЛЧМ метода и метода корреляционного зондирования. В монографии /8/ приведено сравнение импульсного и ЛЧМ ионозондов. Энергетический выигрыш ЛЧМ зонда осуществляется за счет "сжатия" по частоте. При этом полоса анализа ΔF определяется условием приема всех мод отраженного сигнала:

$$\Delta F = \dot{f} (t_{гр.н} - t_{гр.1}), \quad (8)$$

где \dot{f} - скорость перестройки частоты, $t_{гр.1}$ и $t_{гр.н}$ - задержки первой и последней моды ионосферного сигнала, проходящего в точку приема. Если $t_{гр.н} - t_{гр.1} \sim 3$ мс и при $\dot{f} = 100$ кГц/с, $\Delta F = 300$ Гц. Если диапазон перестройки составляет $\Delta f \sim 10$ МГц, то энергетический выигрыш при одинаковой разрешающей способности ЛЧМ ионозонда по сравнению с импульсным определяется степенью "сжатия" и составляет

$$m_1 = \frac{\Delta f}{\Delta F} \approx 3 \cdot 10^4. \quad (9)$$

При сравнении импульсного и корреляционного ионозондов по лоса частотного обзора уже не играет роли. Если предположить, что разрешающие способности методов одинаковы и определяются полосой приема (время снятия одной ионограммы соответственно $T_{\text{имп}}$ и $T_{\text{кор}}$), а также учесть число импульсов N в точке для импульсного ионозонда и коэффициент $\eta = \sqrt{\Delta F_{\text{п.ч}} T} \approx 100$, увеличивающий разрешение корреляционного зонда в режиме автоподстройки, то энергетический выигрыш корреляционного ионзонда по отношению к импульсному составляет

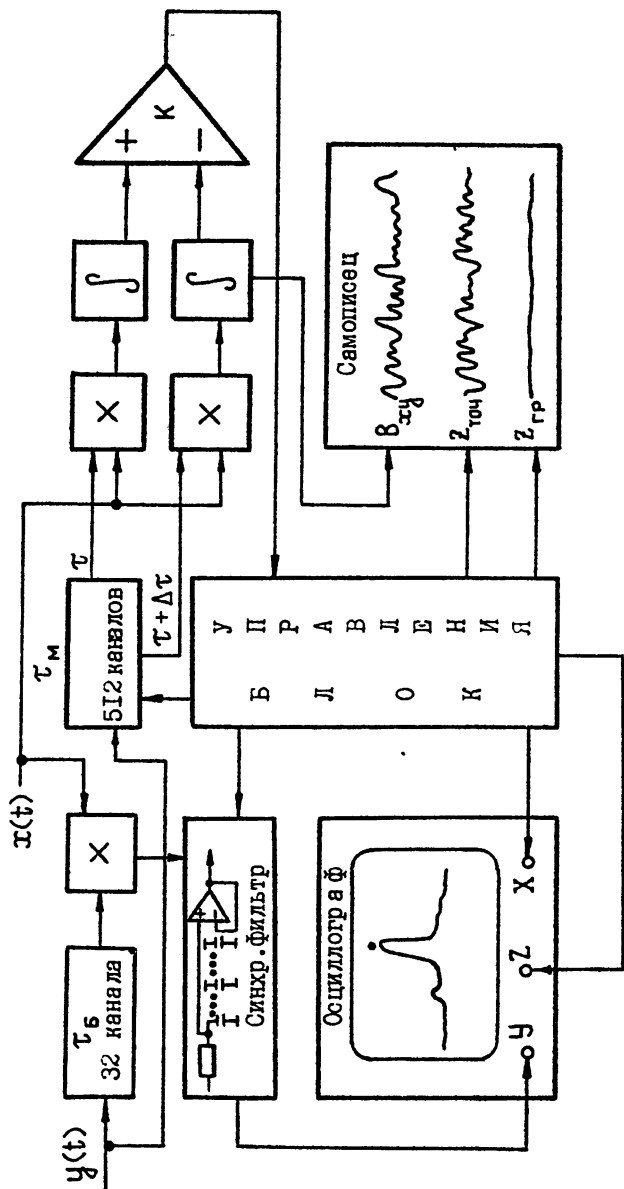
$$m_2 = \frac{Q}{2} \frac{T_{\text{имп}}}{T_{\text{кор}}} \frac{\eta}{N}, \quad (10)$$

где Q - скважность импульсного зондирования. Если $Q \approx 2 \cdot 10^3$, $\frac{T_{\text{имп}}}{T_{\text{кор}}} \approx \frac{1}{5}$; $N = 5$, то $m_2 \approx 10^4$.

3. ОПИСАНИЕ И ОСНОВНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ПРИЕМНИКА

3.1. Функциональная схема

На рис.4 приведена функциональная схема корреляционного приемника, применяемого при корреляционном зондировании. Предусмотрены работы: быстрого и медленного анализа. В "быстром" режиме производится последовательно-параллельный корреляционный анализ. Цель его - получить достаточно грубую картину (32 канала по τ , разрешение по высоте ~ 15 км) в реальном времени. Задержка мeняется линейно от 0 до τ_{max} (высота соответственно от 0 до 512 км) в течение 20 мс. Производится синхронное накопление зависимости $V_{xy}(\tau)$ и вывод ее на осциллограф. Номер канала фиксируется с помощью яркостной метки. В "медленном" режиме возможна ручная установка исследуемой высоты от 0 до 512 км с дискретом 1 км,



Р и с . 4
Блок - схема
корреляционного приемника

линейное сканирование по τ (полный скан за $2 + 10$ мин), а также автоподстройка под максимум функции корреляции. На самописец выводится значение B , а также высота Z ($0 + 512$ км), пропорциональная задержке. Для расширения динамического диапазона предусмотрено два канала вывода высоты: "грубо" ($0 + 512$ км) и "точно" (32 км на всю шкалу).

3.2. Медленный анализ

Это — основной режим работы корреляционного приемника. Линия задержки строилась на элементарных элементах, представляющих собой фазовые фильтры первого порядка $/10/$. Для обеспечения 512 градаций по задержке (1 элемент задержки $\tau_0 \approx 6,7$ мкс соответствует 1 км по высоте) была предложена система коммутации, согласно которой в тракт линии задержки включались или отключались элементы τ_0 , $\tau_1 = 2\tau_0$, $\tau_2 = 2^2 \cdot \tau_0$, ..., $\tau_8 = 2^8 \cdot \tau_0$ в зависимости от двоичного кода исследуемой высоты. Задержанный и \bar{y} сигнал $u(t)$ подавался на умножитель, где он умножался на сигнал $x(t)$, пришедший из ионосферы. На выходе интегратора, постоянная времени которого равнялась $T = RC = 1$ с, 3 с или 10 с, выделялась корреляционная функция $B_{xy}(\tau)$ и выводилась на самописец. Одновременно выводилась величина задержки, пропорциональная высоте в "грубом" и "точном" каналах.

3.2.1. Ручной режим. В этом режиме задержка устанавливается вручную и не изменяется вплоть до дальнейшей установки. На передней панели имеются кнопки "+1" и "-1" для увеличения (уменьшения) исследуемой высоты на 1 км (индикация текущей высоты осуществляется с помощью семисегментных индикаторов).

3.2.2. Режим медленного сканирования. Задержка меняется линейно от τ_1 до τ_2 (соответствующие высоты Z_1 и Z_2 устанавливаются на передней панели колесными переключателями). Скорость сканирования меняется в широких пределах: v_0 , $2v_0$, $2^2 v_0$, ..., $2^7 v_0$, где $v_0 = 4$ км/с. При достижении максимальной высоты сканирование повторяется. Это — режим последовательного коррелометра.

3.2.3. Режим автоподстройки. Кроме основного канала задержки включается дополнительный, отличающийся от основного на постоянный сдвиг $\Delta\tau$. Величина $\Delta\tau$ выбирается таким образом, чтобы выравнивание корреляционных функций (см. рис.3) приходилось на точку с максимальным градиентом $V_{\tau'}$, что обеспечивает максимальную точность. На выходе компаратора появляются сигналы "+I" или "-I" в зависимости от знака величины $\delta = V_1 - V_2$. Обратная связь позволяет соответственно увеличивать или уменьшать на единицу код линии задержки, обеспечивая, тем самым, режим автоподстройки. Скорость подстройки зависит от постоянной времени интегратора T и может меняться в тех же пределах, что и в предыдущем случае (п.3.2.2). Точность установки высоты при малом уровне шумов соответствует дискрету изменения τ (то есть 1 км). Постоянная времени T, определяющая временное разрешение, может меняться от 1 до 10 с. На самописец выводится амплитуда отраженного сигнала (пропорциональная $V_{\text{отр}}(\tau')$) и высота отражения ("грубо" и "точно") в зависимости от времени.

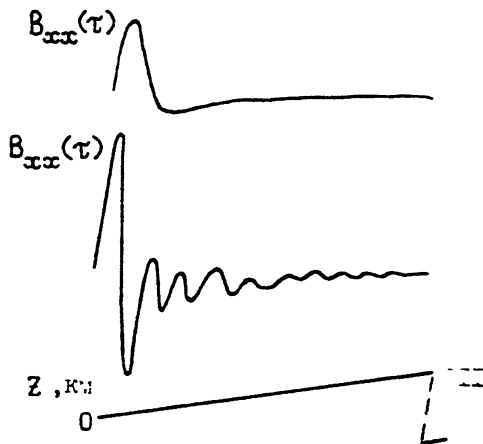
3.3. Быстрый анализ

Это - грубая оценка обстановки. На осциллограф выводится сразу вся зависимость $V(\tau)$, что является аналогом параллельного анализа. Однако умножитель один, а задержка меняется линейно с дискретом 16 км (всего 32 канала). С выхода умножителя сигнал подается на 32-канальный синхронный фильтр, управление которым осуществляется синхронно с линией задержки. Таким образом, имеется 32 интегратора (RC-цепочки), в которых синхронно накапливается информация. Постоянная времени одного канала меняется в пределах $RC = 0,3; 1; 3$ или 10 с. Для удобства работы на ось Z осциллографа выводится яркостная метка, соответствующая значению текущей высоты, зафиксированному на индикаторе передней панели. Метку можно передвигать вручную с помощью кнопок "+I" и "-I". Режим быстрого анализа особенно полезен при одновременной работе в медленном режиме "автоподстройки", поскольку осуществляет дополнительный контроль качества автоподстройки (яркостная метка не должна выходить из зоны максимума). Быстрый режим обеспечивает точность установки высоты ~16 км и может функционировать параллельно

тельно с любым из медленных.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ОТРАЖЕННОГО ОТ ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛА

Эксперименты по корреляционному зондированию проводились в 1989-90 гг. в Душанбе и Горьком. На рис.5 представлен вид автокорреляционной функции для белого шума, пропущенного через гауссовый и П-образный фильтр. Из рисунка видно преимущество гауссового фильтра, дающего один максимум функции корреляции. Так же картинка наблюдалась для кросскорреляционной функции, только максимум был сдвинут на τ -задержку, соответствующую высоте отражения зондирующего сигнала. В дальнейшем все измерения проводились с использованием гауссового фильтра полосой 4 кГц.



Р и с. 5

Влияние формы сигнала на вид корреляционной функции:

Разумным было предположение о возможности использования вещательных станций для диагностики волновода "Земля - ионосфера". Для этого необходимо подобрать геометрию системы, обеспечивающую приход двух лучей от станции в точку приема. Так, недалеко от

Душанбе есть станция, работающая одновременно в УКВ и КВ диапа- зонах. Это позволяет принимать "земную" и "отраженную" волны и проводить их корреляционный анализ с целью выявления суточных вариаций высоты отражения. Эта методика имеет, тем не менее, ряд существенных недостатков. Во-первых, сложности с геометрическим выбором точки приема. Во-вторых, нерегулярность работы станции. В-третьих, нестационарный уровень мощности и спектр излучаемого сигнала, существенное отличие от белого шума, что приводит к ухудшению его корреляционных свойств. Тем не менее, в ряде случаев корреляционный анализ дал сравнительно хорошие результаты. Пример подобной записи приведен на рис.6 для станции, работающей на частоте 1062 кГц. Прием и автокорреляционный анализ проводился в Зименках, близ Горького. На рисунке видно наличие и прямого и отраженного сигналов от высоты $Z_g \sim 315$ км, о чем свидетельствуют два максимума автокорреляционной функции (один в нуле, другой - на задержке, соответствующей Z'_g).



Р и с. 6

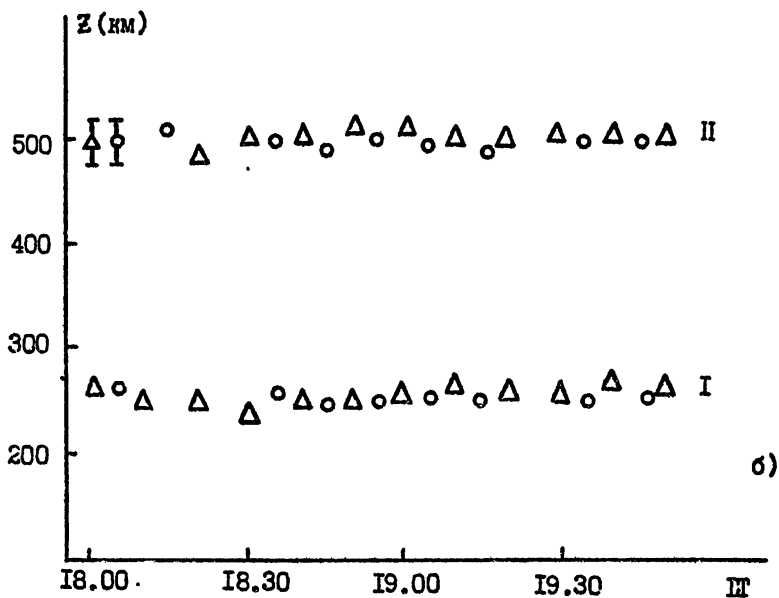
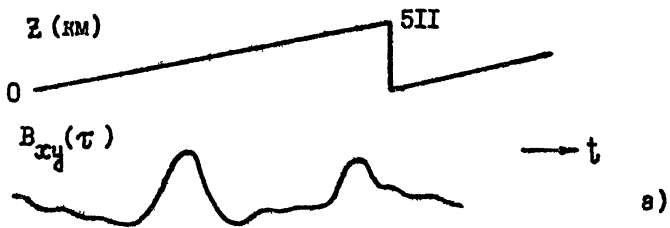
Пример записи прямого и отраженного сигналов
при работе вещательной станции

Для обработки методики использовался и мощный нагревный КВ передатчик "Грсм", расположенный в Институте астрофизики АН Таджикистана.

ССР (Душанбе). Приемный пункт располагался примерно в 15 км от передатчика. Опорный сигнал (белый шум) транслировался с передатчика на приемный пункт по УКВ каналу. На рис.7а приведен пример записи кросскорреляционной функции $V_{xy}(\tau)$. Два максимума соответствуют первому и второму отражению волны на частоте $f = 4013$ кГц. На рис.7б представлен фрагмент зависимости высоты I и II отражения от времени (t). На этом же рисунке приведены кривая, снятая по данным импульсной ионосферной станции (Δ), эксперименты с мощным передатчиком показали достаточный энергетический запас метода корреляционного зондирования и позволили перейти к измерениям на малой мощности.

В конце 1989 г. и в 1990 г. были проведены эксперименты в Зименках. В качестве передатчика использовался обычный ГСС (Г4-154), имеющий выход 10 В на нагрузке 50 Ом и вход внешней амплитудной модуляции, на который подавался белый шум. Выход генератора был согласован с передаткой антенной ($G \sim 5$). Прием осуществлялся на узконаправленную антенну ($G \sim 100$), имеющую резонансную частоту приема $\sim 5,75$ МГц. Влияние направленности антенны видно из рис.8а. Максимум кросскорреляционной функции в нуле виден на всех трех осциллограммах рис.8а, соответствующих различным излучаемым частотам. Это говорит о наличии "земной" волны на входе приемника. Второй, полезный максимум, который несет информацию о высоте отражения, присутствует только на третьей осциллограмме, где частота излучаемого сигнала ($f = 5746$ кГц) практически совпадает с резонансной частотой приемной антенны. Отметим, что работа с мощностью $P \sim 1$ Вт проводилась на пределе чувствительности аппаратуры. Поэтому наличие помехи (например, станции) на частоте излучения приводило к существенному ухудшению отношения сигнал/шум на выходе (это хорошо видно из рис.8б). Несмотря на это, удавалось найти "окна", где помеха отсутствовала в течение длительного времени, что позволило проводить измерения в режиме "автоподстройки". На рис.9 приведен фрагмент зависимости эффективной высоты отражения сигнала от времени для частоты $f = 5817$ кГц. Разрешение по времени составляло ~ 3 с, по высоте ~ 2 км. Видны сильные флуктуации высоты с периодом 5-7 мин и более мелкие вариации. На рис.10 приведен пример зависимости $Z(t)$, где в течение часа эффективная высота отражения умень-

Душанбе. 30 мая 1989 г.
 Мощный передатчик (РГ ~ 100 кВт)
 с модуляцией белым шумом



Р и с.7

Пример записи (а) и временной ход (б)
 отраженного сигнала (есть два отражения)

Горький. Зименки 14 ноября 1989 г.

$P = 1 \text{ Вт}$, $G_{\text{приема}} \approx 100$

$f = 9000 \text{ кГц}$

$f = 4000 \text{ кГц}$

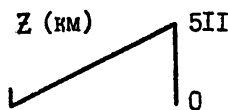
$f = 5746 \text{ кГц}$

$V_{xy}(\tau)$



а)

$Z \text{ (км)}$



Помехи нет

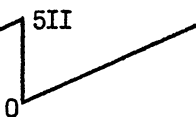
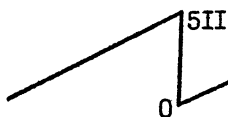
Есть помеха (станция)

$V_{xz}(\tau)$



б)

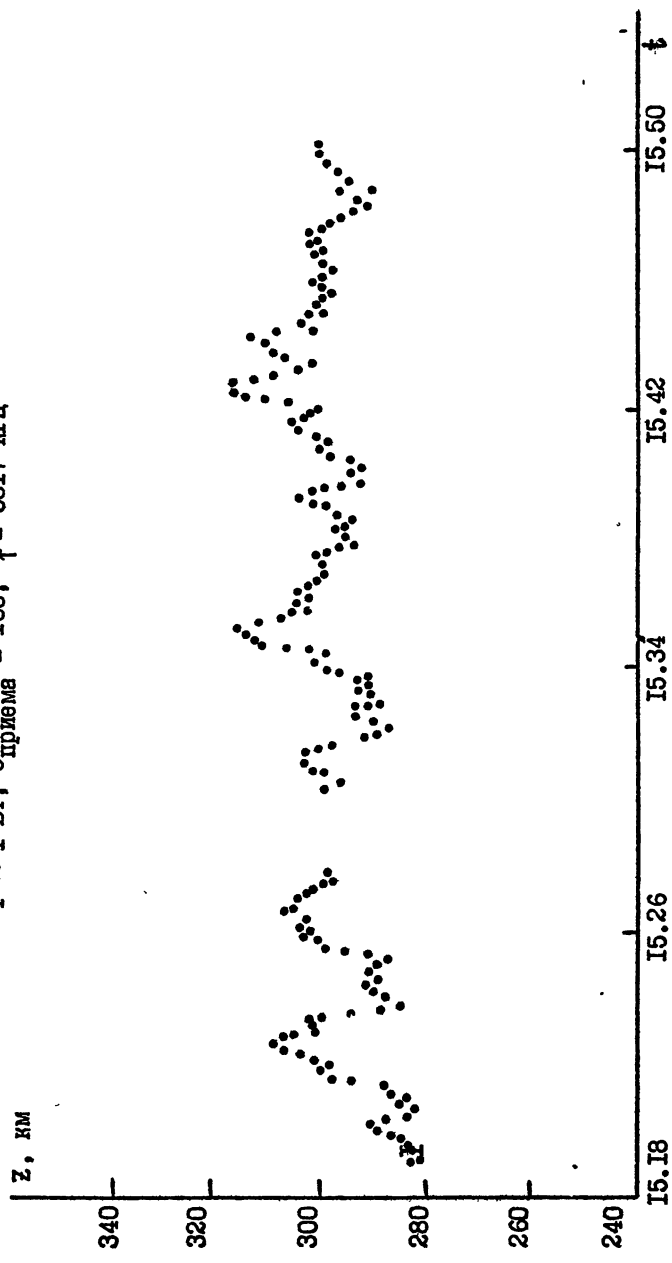
$Z \text{ (км)}$



Р и с.8

Влияние направленности
приемной антенны (а) и наличия
помехи (б) при работе на малой мощности

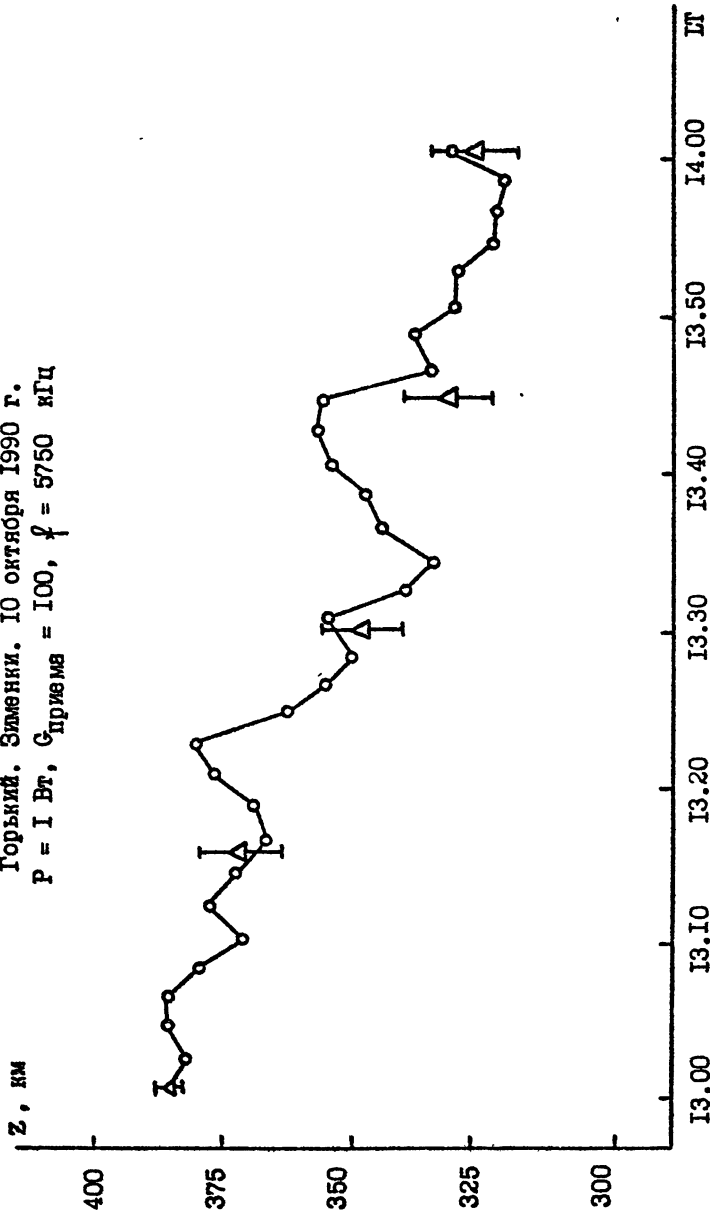
Горький. Зименки. 14 ноября 1989 г.
 $R \approx 1$ Вт, $G_{\text{приема}} = 100$, $f = 5817$ кГц



Р и с.9

Фрагмент временного хода эффективной высоты отражения сигнала

Горький. Зменни. 10 октября 1990 г.
 $R = 1 \text{ Вт}$, $G_{\text{прямая}} = 100$, $f = 5750 \text{ кГц}$



Р и с. 10

Пример записи зависимости $Z(t)$ по данным
 корреляционного зондирования (o) и обычной моноферной станции (Δ)

шилась примерно на 50 км (от 380 до 330 км). Зондирование проводилось на частоте 5750 кГц, а измерения высоты — в режиме "автоподстройки". Для сравнения приведены значения эффективной высоты по данным импульсной ионосферной станции (измерения проводились 1 раз в 15 мин). На фоне общего уменьшения высоты видны флуктуации $Z(\uparrow)$ с периодом ~ 10 минут.

Приведенные данные дают основание использовать предложенную методику корреляционного зондирования с применением "автоподстройки" для исследования тонкой структуры отраженного от ионосферы сигнала. Исследование спектра флуктуаций эффективной высоты отражения дает дополнительные сведения о прохождении внутренних гравитационных волн и других динамических процессов в ионосфере.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение приведем основные результаты работы и обсудим направление дальнейших исследований.

Предложен новый метод корреляционного зондирования ионосферы, основанный на непрерывной работе передатчика в режиме амплитудной модуляции белым шумом и корреляционном анализе отраженного сигнала. Метод может быть эффективно использован и в режиме ионосферной станции, где по энергетике он лишь немного уступает ЛЧМ методу, и в режиме зондирования на одной или нескольких частотах для исследования тонкой структуры отраженного сигнала.

Предложена методика адаптивной обработки в реальном времени корреляционной функции прямого и отраженного от ионосферы сигнала, суть которого сводится к ее автоподстройке по максимальному значению. Это позволяет существенно улучшить временное (~ 1 с) и пространственное (~ 1 км) разрешение метода.

Создан аппаратный комплекс для корреляционного зондирования, оригинальной частью которого является корреляционный приемник. Приемник позволяет реализовывать одновременно режимы "медленного" и "быстрого" анализа с выводом информации соответственно на самписец и осциллограф. "Медленный" анализ проводится в одном из трех режимов: ручная установка, сканирование, автоподстройка. Анализ проводится в диапазоне высот от 0 до 512 км, с

дискретом 1 км. Динамический диапазон приемника ~ 35 дБ по входу и ~ 70 дБ по выходу при снятии автокорреляционной функции. Это означает, что если на входе есть земная и отраженная волна и земная больше отраженной на 35 дБ (примерно в 50 раз), то на выходе можно уверенно выделить высоту отражения.

Проведены эксперименты по корреляционному зондированию с использованием вещательных станций, нагревного стенда и маломощного (~ 1 Вт) передатчика. Исследована тонкая структура отраженного сигнала. Приведенные результаты свидетельствуют о наличии и флуктуаций эффективной высоты отражения с периодами 4-10 минут, а также более мелких. Исследование более крупномасштабных вариаций (часовых и более) предполагается провести в дальнейшем при проведении суточных сеансов. Подобные измерения, проведенные на двух или нескольких частотах зондирования одновременно, а также в разнесенных пунктах, могут дать весьма богатый материал о динамических процессах в ионосфере который может быть использован в областях физики ионосферы, распространения радиоволн в метеорологии, сейсмологии и других смежных областях. Относительная простота предложенного метода, низкая стоимость аппаратуры могут служить основанием для создания сети станций для проведения долговременных наблюдений за параметрами отраженного сигнала.

Кроме задач, связанных с зондированием ионосферы, предложенная методика корреляционного анализа и сам приемник могут быть использованы и в других областях. Так, при генерации сигналов комбинационных частот (СКЧ, "эффект Гетманцева") используется мощная радиоволна, промодулированная по амплитуде /11/. При приеме низкочастотных полей СКЧ на Земле для обработки принимаемого сигнала на частоте модуляции (синусоидальный сигнал) обычно используется методика фильтрации и когерентного накопления. При работе с импульсным сигналом СКЧ по запаздыванию можно определить высоту источника /12/. Если использовать модуляцию белым шумом и последующую корреляционную обработку с накоплением, то энергетически это эквивалентно работе с синусоидальной модуляцией и с последующим синхронным детектированием. Кроме этого, предложенная методика позволяет находить высоту источника низкочастотного излучения, но по сравнению с импульсным методом имеет

энергетический выигрыш в Q раз (Q - оскважность):

Наконец, корреляционный приемник, обладающий достаточно высокими техническими данными, надежностью и простотой, может быть эффективно использован во многих областях науки и техники, не связанных с ионосферой, где необходимы корреляционные измерения (например, в геологии, медицине и др.). Предложения о возможных совместных работах по описанной методике с использованием разработанного авторами корреляционного приемника можно направлять по адресу: 603024, Нижний Новгород, ул. Б. Печерская, 25/14, НИРФИ, Сергееву Евгению Николаевичу, т. 36-01-88.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. I и 2 т. - М.: Мир, 1983.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. - М.: Высшая школа, 1988.
3. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я. Волновые явления в ионосфере и космической плазме. - М.: Наука, 1984.
4. Бркенелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. - М.: Наука, 1988.
5. Мирохин А.Н., Кольцов В.В., Лобачевский А.А. Цифровой комплекс "Сойка-6000" // Распространение радиоволн в ионосфере. - М.: Наука, 1983. - С. 53-61.
6. Беленов А.Ф., Зиничев В.А., Иванов В.А. и др. Зондирование ионосферы квазинепрерывными сигналами // XII Всесоюзная конференция по распространению радиоволн. - М.: Наука, 1981. - С. 12-13.
7. Иванов В.А., Фролов В.А., Шумаев В.В. Зондирование ионосферы непрерывными ЛЧМ радиосигналами // Изв. вузов. - Радиофизика. - 1986. - Т. 29, № 2. - С. 235.
8. Ерухимов Л.М., Иванов В.А., Мзтяков Н.А., Урядов В.П., Фролов В.А., Шумаев В.В. ЛЧМ метод диагностики ионосферного канала КВ связи. - ВИНТИ, 1986.
9. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. - М.: Сов. радио, 1971. - 246 с.
10. Титце У., Пенк К. Полупроводниковая схемотехника. - М.: Мир, 1982.

11. Беляев П.П., Котик Д.С., Митяков С.Н., Поляков С.В., Рапо - порт В.О., Трахтенгерц В.Д. Генерация электромагнитных сигналов комбинационных частот в ионосфере//Изв.вузов. - Ра - диофизика. - 1987. - Т.30, № 2. - С.248.
12. Митяков С.Н. Исследование динамики нижней ионосферы с по - мощью сигналов комбинационных частот//Диссертация. - Горь - кий, 1987.

Дата поступления статьи

8 января 1993 г.