

Нижегородский научно–исследовательский радиофизический
институт
Государственного комитета РФ по высшему образованию

П р е п р и н т N 414

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ СТАТИСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОВОЛН ПРИ
ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ И
НАЗЕМНОМ ПРИЕМЕ МВ-ДМВ СИГНАЛОВ
ОРБИТАЛЬНЫХ ИСЗ "ТРАНЗИТ"

В. А. Алимов Ф. И. Выборнов А. В. Рахлин

Нижний Новгород
1995

Алимов В. А., Выборнов Ф. И., Рахлин А. В.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОВОЛН
ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ
И НАЗЕМНОМ ПРИЕМЕ МВ-ДМВ СИГНАЛОВ ОРБИТАЛЬ-
НЫХ

ИСЗ "ТРАНЗИТ". *Препринт N 414.* – Нижний Новго-
род: НИРФИ, 1995. – 17 с.

УДК 621.371.25

Изложены основы методики исследований статистики ра-
доисигналов при вертикальном зондировании ионосферы и
наземном приеме МВ-ДМВ сигналов орбитальных ИСЗ "Тран-
зит". Показано, что метод синхронных экспериментальных
исследований статистических характеристик радиоволн при
ВЗ ионосферы и наземном приеме МВ - ДМВ сигналов ор-
битальных ИСЗ позволяет получить информацию о модели
турбулентной ионосферы и статистических характери-
стиках ДКМВ - ДМВ радиоволн при распространении их в усло-
виях среднеширотного F-spread.

1. ВВЕДЕНИЕ

Проведение экспериментальных исследований статистических характеристик радиоволн при ВЗ ионосферы и наземном приеме МВ-ДМВ сигналов орбитальных ИСЗ типа "Транзит" (на когерентных частотах 150 и 400 МГц) во время существования в ионосфере явления F-spread предполагается на радиофизическом полигоне НИРФИ в Зименках Нижегородской области. На этом полигоне развернуты следующие приемо-передающие и измерительные комплексы: станция ВЗ ионосферы типа "Сойка-6000" на базе УВК М6000, приемный комплекс для проведения измерений сигналов орбитальных ИСЗ системы "Транзит" на когерентных частотах 150 и 400 МГц, стенд нагрева ионосферы мощным КВ излучением – "Ястреб". Станция "Сойка" позволяет проводить вертикальное и наклонное зондирование ионосферы импульсным радиосигналом длительностью от 50 до 800 мкс с частотой повторения до 100 Гц в диапазоне частот от 300 кГц до 40 МГц. Комплекс антенн с разными коэффициентами усиления и шириной диаграммы направленности для вертикального зондирования делают станцию уникальным измерительным инструментом. Приемо-измерительный комплекс сигналов ИСЗ "Транзит" предназначен для приема сигналов бортовых передатчиков ИСЗ на частотах 150 и 400 МГц с их последующей регистрацией

на самописец и магнитограф. Использование антенн обратного излучения позволяет выбрать необходимый угловой сектор траектории ИСЗ.

Нагревный стенд "Ястреб" позволяет осуществлять воздействие на ионосферу в диапазоне 4÷6 МГц с эффективной мощностью до 10 МВт в непрерывном режиме. Максимальная выходная мощность передатчика 100 кВт. Вертикальная диаграмма (12° по уровню половинной мощности) направленности антенны формируется фазированными антенными решетками (4x5 широкополосных скрещенных вибраторов). Излучается "о" или "х"-компонента.

В основе планируемых по проекту 95-02-03716 РФФИ экспериментальных исследований лежит идея использования ионосферы как натурной радиофизической лаборатории для одновременного (синхронного) исследования неоднородной структуры ионосферы и особенностей распространения в ней ДКВМ-ДМВ радиоволн во время существования в среднеширотной ионосфере явления F-spread естественного и искусственного (при воздействии на ионосферу мощным КВ излучением) происхождения. Подобные исследования возможны с применением адекватных радиофизических методов исследования неоднородной структуры ионосферы и распространения в ней радиоволн. В нашем случае такими методами являются метод рефракционного рассеяния радиоволн (РРР) [1, 2] и метод мерцаний [3, 4]. Физические основы этих методов изложены ниже.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА РЕФРАКЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН И МЕТОДА МЕРЦАНИЙ

Метод РРР [1, 2] заключается в определении статистических характеристик распространения радиоволн в толстом слое с сильными (средний квадрат флуктуаций набега фазы волны в слое $\overline{s^2}$ много больше единицы) крупномасштабными (внешний масштаб турбулентности l_0 много больше характерного раз-

мера зоны Френеля F для данной трассы) флуктуациями показателя преломления с помощью соответствующих расчетов этих характеристик при дифракции излучения в свободном пространстве за эквивалентным фазовым экраном (средний квадрат набега фазы на экране $\overline{s^2}$, внешний масштаб неоднородностей на экране l_0). Метод мерцаний (или метод фазового экрана (ФЭ)) широко используется при расчетах статистических характеристик радиоволн, дифрагированных на крупномасштабных случайных неоднородностях ионосферной плазмы [3, 4]. Фактически метод РРР суть некоторая специфическая разновидность общего метода ФЭ, в котором расчеты статистических характеристик радиоволн, прошедших неоднородный слой (в нашем случае ионосферу), сводятся к расчетам статистических характеристик за эквивалентным фазовым экраном, свойства которого отражают особенности слоя с неоднородностями и распространения радиоволн внутри этого слоя.

Метод ФЭ довольно подробно описан в работах [3, 4]. Здесь мы приведем лишь некоторые основные расчетные формулы для статистических характеристик радиоволн за фазовым экраном, которые представляют непосредственный (практический) интерес с точки зрения исследования неоднородной структуры ионосферы и распространения в ней МВ-ДМВ радиоволн (при радиопросвечивании ионосферы сигналами орбитальных ИСЗ).

Средний квадрат флуктуационного набега фазы волны в ионосферном слое с крупномасштабными неоднородностями [3, 4]:

$$\overline{s^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_s(\kappa_x, \kappa_y) d\kappa_x d\kappa_y, \quad (1)$$

где $P_s(\kappa_x, \kappa_y)$ – двумерный спектр флуктуаций фазы волны на выходе из ионосферного слоя;

$$P_s(\kappa_x, \kappa_y) = 2\pi(r_e \lambda)^2 L P_N(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z = 0), \quad (2)$$

$P_N(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z = 0)$ – двумерный спектр флуктуаций электронной концентрации ионосферной плазмы; L – длина пути сигнала в

ионосферном слое с неоднородностями; r_e – классический радиус электрона; λ – длина волны излучения. В случае слабых флуктуаций волны в ионосферном слое спектры флуктуаций интенсивности (амплитуды) и фазы принимаемого излучения равны:

$$P_I(\kappa_x, \kappa_y) = 4P_A(\kappa_x, \kappa_y) = 4P_s(\kappa_x, \kappa_y) \sin^2(\kappa^2/\kappa_{\Phi P}^2), \quad (3)$$

$$P_\varphi(\kappa_x, \kappa_y) = P_s(\kappa_x, \kappa_y) \cos^2(\kappa^2/\kappa_{\Phi P}^2), \quad (4)$$

где $\kappa^2 = \kappa_x^2 + \kappa_y^2$; $\kappa_{\Phi P} = 4\pi/(\lambda z)^{1/2}$ – френелевское число; $z = z_1 z_2 / (z_1 + z_2)$ – наклонная (приведенная) дальность от источника до точки наблюдения; $z_{1,2}$ – наклонные дальности от точек излучения и наблюдения соответственно.

Индекс флуктуаций интенсивности принимаемого излучения:

$$S_4 = \frac{\overline{(I - \bar{I})^2}}{\bar{I}^2} = \int \int_{-\infty}^{+\infty} P_I(\kappa_x, \kappa_y) d\kappa_x d\kappa_y. \quad (5)$$

Следует заметить, что из (3),(4) можно получить соотношение

$$P_N(\kappa_x, \kappa_y) \propto P_A(\kappa_x, \kappa_y) + P_\varphi(\kappa_x, \kappa_y). \quad (6)$$

Другими словами, одновременное измерение спектров амплитудных и фазовых флуктуаций принимаемого излучения может позволить определить спектр флуктуаций электронной концентрации в неоднородном ионосферном слое.

Выражения для некоторых других статистических характеристик принимаемого излучения при дифракции его на фазовом экране приведены в [3, 4].

Метод РРР довольно интенсивно развивался в последние годы (см., например, [1, 2] и цитированную там литературу). Наибольший интерес этот метод представляет с точки зрения исследования неоднородной структуры ионосферы и распространения в ней коротких радиоволн при ВЗ ионосферы [5]. В [5] построена стохастическая модель явления F-spread в ионосфере с использованием модели РРР. Поэтому соответствующие расчетные

формулы для статистических характеристик коротких радиоволн при ВЗ ионосферы могут быть взяты непосредственно из [5] (см. также цитированную там литературу). Ниже мы в качестве иллюстрации приведем лишь некоторые из этих соотношений.

Средний квадрат флуктуаций фазы волны при ВЗ ионосферы [8]:

$$\overline{\varphi^2} \simeq k_0^2 \int \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_\epsilon(\kappa_\xi, \kappa_\eta, \kappa_l) F(\kappa_l) d\kappa_\xi d\kappa_\eta d\kappa_l, \quad (7)$$

где $\Phi_\epsilon(\vec{\kappa})$ – трехмерный спектр флуктуаций диэлектрической проницаемости ионосферы; $\kappa_\xi, \kappa_\eta, \kappa_l$ – компоненты спектра по лучевым координатам ξ, η, l ;

$$F(\kappa_l) = |f(\kappa_l)|^2 = \left| \int_0^{l_{\text{отр}}} \frac{1}{\sqrt{\bar{\epsilon}(l)}} e^{-i\kappa_l l} dl \right|^2 \quad (8)$$

$\bar{\epsilon}(l)$ – средний профиль диэлектрической проницаемости ионосферного слоя; $l_{\text{отр}}$ – уровень отражения волны в ионосфере ($\bar{\epsilon}(l_{\text{отр}}) = 0$).

Выражение для спектра фазовых флуктуаций при ВЗ ионосферы соответственно имеет вид:

$$P_\varphi(\nu) = k_0^2 \int \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_\epsilon\left(\frac{\nu}{v}, \kappa_\eta, \kappa_l\right) F(\kappa_l) d\kappa_\eta d\kappa_l, \quad (9)$$

где v – скорость горизонтального дрейфа (вдоль оси $\vec{\xi}$) неоднородностей в ионосфере; ν – спектральная частота.

Частотная корреляция флуктуаций фазы волны для i -луча в многолучевом сигнале при отражении от ионосферного слоя

$$\overline{(\varphi_{\omega_1} - \varphi_{\omega_2})_i^2} \simeq k_0^2 (4\delta L_{oi})^2 (\overline{\Delta\epsilon}_{oi})^2 (2\pi)^2 \int_0^\infty \kappa^2 V_{ei}(\kappa) |f_{oi}(\kappa)|^2 d\kappa. \quad (10)$$

Здесь $L_{oi} = \left(\frac{\partial \bar{\epsilon}_o}{\partial l}\right)_i^{-1}$ – продольный (вдоль направления луча) градиент регулярной диэлектрической проницаемости ионосферы

в области отражения i -го луча с частотой ω_o ; $V_{\epsilon_i}(\kappa)$ – одномерная спектральная плотность флуктуаций диэлектрической проницаемости ионосферы в области распространения i -го луча;

$$f_{0i}(\kappa) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [\bar{\epsilon}_{0i}(l)]^{-1/2} \exp(-i\kappa l) dl \quad (11)$$

$\overline{(\Delta\epsilon)_{0i}^2}$ – средний квадрат флуктуаций диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы в области распространения i -го луча;
 $\delta = (\omega_2 - \omega_1)/\omega_o$.

Индекс флуктуаций интенсивности отраженного КВ сигнала существенно зависит от структуры многолучевости принимаемого излучения. Соответствующие соотношения приведены в [5].

Заметим также, что более детальные сведения о спектральных характеристиках отраженных КВ сигналов в условиях ионосферной турбулентности приведены в [6]. Причем, именно в этой работе обращено внимание на трудности интерпретации измерений статистических характеристик отраженных КВ сигналов в плане диагностики ионосферного слоя с неоднородностями. Поэтому, очевидно, более перспективным методом исследований собственно неоднородной структуры ионосферы является радиопросвечивание ионосферы с борта ИСЗ сигналами в МВ-ДМВ диапазоне радиоволн. А затем, используя информацию о модели турбулентной ионосферы, извлеченной из этих исследований, можно с применением метода РРР рассчитать статистические характеристики отраженных КВ радиоволн и сравнить с экспериментально измеряемыми характеристиками ВЗ во время синхронных наблюдений за сигналами ИСЗ. В этом и состоит основная идея синхронных наблюдений за МВ-ДМВ сигналами орбитальных ИСЗ "Транзит" и измерений статистических характеристик отраженных КВ сигналов при ВЗ во время существования в ионосфере явления F-spread. При таком комплексном подходе к исследованию явления F-spread существенно упрощается наиболее последовательная экспериментальная проверка

стохастической модели явления F-spread в среднеширотной ионосфере [5]. Хотя, конечно, остается возможность косвенной проверки теоретической модели [5] путем непосредственных измерений основных статистических характеристик отраженных КВ сигналов во время F-spread и сравнения их с теоретическими расчетами [5], основанными на некоторых обобщенных сведениях о турбулентной структуре верхней ионосферы, которые и были заложены в модели [5] при ее построении.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Проведению экспериментов по синхронным исследованиям статистических характеристик радиоволн предшествует предварительный расчет моментов времени нахождения ИСЗ "Транзит" в зоне радиовидимости. Кроме временных характеристик элементов орбит ИСЗ вычисляются азимут, угол места и координаты подионосферной точки луча на поверхности Земли на каждую минуту полета ИСЗ. Так как измерения проводятся с использованием антенн обратного излучения (ширина диаграммы направленности $\Theta = 60^\circ$), ориентируя антенны в нужном направлении до сеанса наблюдений удастся свести к минимуму интерференционные искажения сигналов из-за переотражений от близко расположенных КВ антенн АИС "Сойка" и стенда "Ястреб".

Блок-схема стенда по приему сигналов ИСЗ приведена на рис. 1. Сигнал от ИСЗ "Транзит" на частотах 150 и 400 МГц принимается антеннами обратного излучения и усиливается усилителями высокой частоты (УВЧ) на 20 дБ. Усиленный сигнал по коаксиальному кабелю подается на вход радиоприемника Р313М2, выполняющего роль конвертера. Сигнал, преобразованный в частоту 25 МГц, поступает на вход радиоприемного устройства (РПУ) Р399А, далее детектируется амплитудным детектором (АД) с постоянной времени 0.1 с. Регистрация сигналов производится как на многоканальный самописец, так и на магнитограф Н067. Частота настройки каждого канала корректируется в процессе

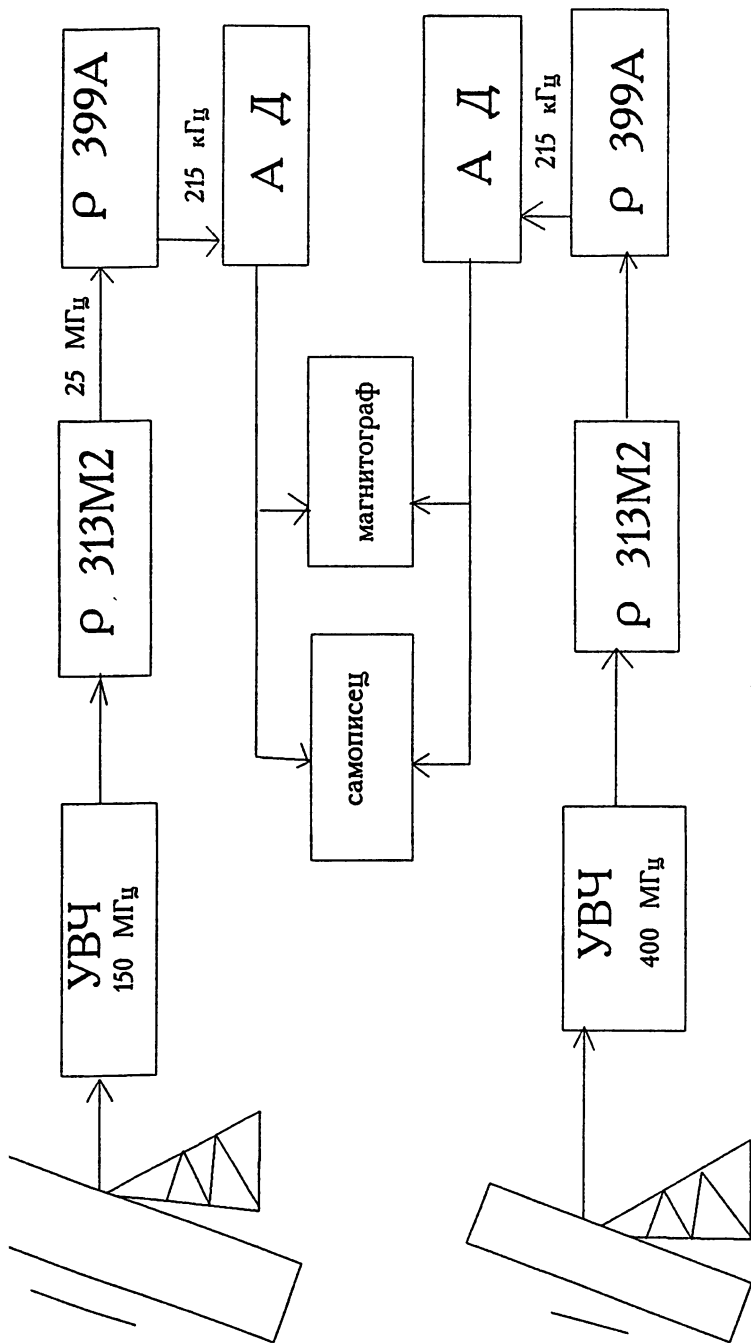


рис. 1

регистрации с целью учета доплеровского смещения частоты сигналов ИСЗ.

Синхронно с регистрацией сигналов бортовых передатчиков ИСЗ "Транзит" производится зондирование ионосферы импульсным КВ сигналом. Перед сеансом регистрации проводится снятие высотно-частотной характеристики (ВЧХ) ионосферы и определяются критическая частота, наличие F-spread и его тип. Зондирование во время сеанса проводится на частоте примерно на 10% меньшей критической, что позволяет наблюдать диффузные сигналы частотного F-spread (характерного для средних широт) при достаточном уровне сигнала (в области критических частот часто наблюдается аномальное ослабление, кроме того, из-за волнообразного или регулярного хода критических частот возможен их уход на 100–300 кГц за время регистрации сигналов ИСЗ (около 15 минут)). Снятие ВЧХ и регистрация отраженного от ионосферы сигнала производятся с помощью комплекса "Сойка-6000". Блок-схема используемой аппаратуры приведена на рис. 2. Рабочей антенной передатчика является широкодиапазонная логопериодическая антенна. Отраженный от ионосферы сигнал принимается антенной и через РПУ Р399А подается на блок регистрации импульсного сигнала (БРИС), где детектируется. Синхронизация БРИСа производится формирователем импульсов. Продетектированный сигнал отображается на экране осциллографа для оперативного контроля и записывается на магнитный и бумажный носитель. В настоящее время АИС "Сойка-6000" может использовать несколько антенн: логопериодическую ($\Theta = 60^\circ$) и антенное поле стенда "Ястреб" ($\Theta = 12^\circ$) – на передачу и скрещенный диполь ($\Theta = 60^\circ$), антенное поле из 3-х скрещенных диполей ($\Theta = 20^\circ$) и антенное поле стенда "Ястреб" – на прием.

При проведении нагревных экспериментов с целью исследования явления искусственного F-spread, включение стенда "Ястреб" производится за 7-10 минут до момента кульминации орбиты ИСЗ на "о"-компоненте с максимальной мощностью. Как пока-

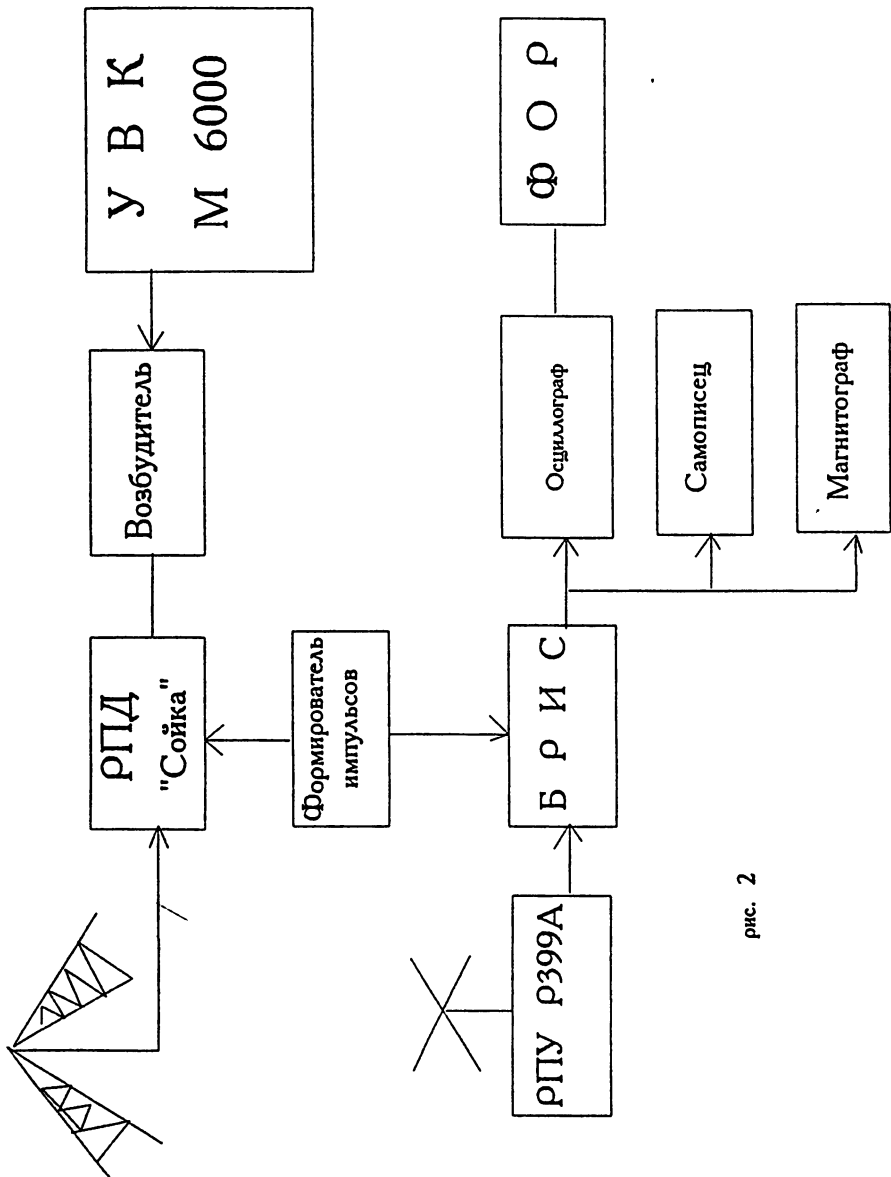


рис. 2

зали пробные измерения , при временах воздействия меньших 7 минут и эффективной мощности 10 МВт на "о"-компоненте диффузность не возникает (частотный F-spread в условиях слабого поглощения). Воздействие на "x"-компоненте при такой-же мощности не приводит к диффузности и при больших временах воздействия.

4. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка полученных экспериментальных данных проводится с помощью ЭВМ. По записям амплитуд сигналов ИСЗ с использованием стандартных программ [4] вычисляются индекс мерцаний $S_4 = \frac{(I - \bar{I})^2}{\bar{I}^2}$, коэффициенты автокорреляции флуктуаций для той части траектории, которая попадает в диаграмму направленности приемной и передающей антенн АИС "Сойка-6000".

Аналогично обрабатываются записи амплитуд отраженных импульсных сигналов. Так как БРИС может регистрировать до 6-ти различных высотных отметок, вычисление индекса мерцаний и $\rho_I(\tau)$ отраженного сигнала проводится отдельно для каждого уровня отражения (фронта, центральной части импульса, хвостовой части) для о- и x-компонент. Дополнительной информацией для индекса мерцания является измерение длительности отраженного импульса по уровню шумов (при фиксированной длительности излучаемого) и фоторегистрация его формы.

Для определения спектра флуктуаций электронной концентрации в неоднородном ионосферном слое (см. формулы (3), (4), (6)) проводится спектральная обработка записей сигналов бортовых передатчиков ИСЗ. Эта обработка осуществляется по стандартной методике (см., например, [7]).

Для определенного таким образом спектра флуктуаций электронной концентрации по формулам [5] рассчитываются статистические характеристики отраженных КВ сигналов в ситуации, синхронной с наблюдениями за сигналами орбитальных ИСЗ. В

результате экспериментов рассчитанные статистические характеристики должны быть сопоставлены с результатами соответствующих прямых измерений их при ВЗ ионосферы в условиях F-spread.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, наиболее последовательным методом экспериментальных исследований статистических явлений во время существования F-spread в среднеширотной ионосфере является метод синхронных экспериментов по измерению статистических характеристик радиоволн при ВЗ ионосферы и наземном приеме МВ-ДМВ сигналов орбитальных ИСЗ. Он позволяет получить информацию о модели турбулентной ионосферы и статистических характеристиках ДКМВ-ДМВ радиоволн при распространении их в условиях среднеширотного F-spread. Если же по каким либо причинам проведение синхронных наблюдений за МВ-ДМВ сигналами орбитальных ИСЗ и КВ сигналами ВЗ ионосферы будет невозможно, то акцент должен быть сделан на непосредственных измерениях основных статистических характеристиках отраженных КВ сигналов во время F-spread и сравнение их результатов с результатами соответствующих теоретических расчетов по стохастической модели явления F-spread в среднеширотной ионосфере [5].

Настоящая методика экспериментальных исследований разработана при поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (проект 95-02-03716 РФФИ).

Литература.

1. Booker Н. V. Indian J., Radio Space Phys., 15, N 5-6, 197, 1986
2. Алимов В. А., Изв. ВУЗов. Радиофизика, 1995 (в печати)
3. Алимов В. А., Рахлин А. В., Ионосферные сцинтилляции радиосигналов, Препринт N 132, НИРФИ, Горький, 1979

4. Гершман Б.Н., Ерухимов Л.М., Яшин Ю.Я., Волновые явления в ионосфере и космической плазме - М. Наука, 1984
5. Алимов В.А., Ерухимов Л.М., Изв. ВУЗов - Радиофизика, 1995 (в печати)
6. Алимов В.А., Изв. ВУЗов Радиофизика, 1994 (в печати)
7. Выборнов Ф.И., Ерухимов Л.М. и др., Изв. ВУЗов - Радиофизика, **29**, N 4, 491, 1986
8. Алимов В.А., Рахлин А.В., Изв. ВУЗов Радиофизика, 1995 (в печати)