

УДК 621.371.25

О СВЯЗИ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КВ СИГНАЛОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ И НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

*В. А. Алимов, Л. М. Ерухимов, Л. Ф. Мироненко, Л. А. Скребкова,
А. В. Рахлин, В. П. Урядов, К. И. Юрин*

Приводятся некоторые результаты комплексного эксперимента по ВЗ и НЗ ионосферы. Эквивалентность статистических параметров при ВЗ и НЗ ионосферы выполнялась лишь в незначительном числе сеансов наблюдений, что связано с временной и пространственной нестационарностями процесса рассеяния коротких волн в ионосфере. Показано отсутствие определенных закономерностей в частотных зависимостях основных статистических параметров КВ сигналов и различие статистик сигналов для E - и F -ионосферных отражений.

Флуктуационные явления при ионосферном распространении коротких волн изучались в целом ряде работ. В некоторых из них проводился анализ полученных результатов с точки зрения существующих представлений о неоднородной структуре ионосферы. При этом, как правило, определялись параметры ионосферных неоднородностей в предположении стационарности и однородности процесса рассеяния коротких волн в ионосфере [1]. Сравнительно часто для этих целей использовалась среднестатистическая модель ионосферы в виде фазового экрана [2]. В модели фазового экрана предполагается, что на выходе слоя с неоднородностями (экране) существуют только флуктуации фазы волны, прошедшей этот слой. В дальнейшем, при распространении волны в свободном пространстве до точки наблюдения, фазовые флуктуации сигнала частично трансформируются в амплитудные. Следуя [3, 4], легко показать эквивалентность основных статистических параметров КВ сигналов (индекса флуктуаций F , коэффициентов временной корреляции $\rho(\tau)$) при вертикальном и наклонном под углом ϑ_0 падении волны на неоднородный слой при условии, что $f_b = f_n \cos \vartheta_0$ (f_b , f_n — частоты сигналов при ВЗ и НЗ ионосферы соответственно).

Так, например, хорошо известно, что индекс флуктуаций сигнала связан с набегом фазы на неоднородностях простым соотношением (в предположении зоны Фраунгофера для рассеивающих неоднородностей) [4]:

$$F = 1 - \exp(-2\bar{s}^2). \quad (1)$$

Выражение для случайного набег фазы волны на выходе неоднородного слоя при наклонном падении волны на слой имеет вид [5]

$$s_n = k_n \int_0^{z_n} \frac{\varepsilon_{1n}(x, y, z) dz}{\sqrt{\varepsilon_n(z) - \sin^2 \vartheta_0}}. \quad (2)$$

Соответствующее выражение для случая вертикального зондирования:

$$s_b = k_b \int_0^{z_b} \frac{\varepsilon_{1b}(x, y, z) dz}{\sqrt{\varepsilon_b(z)}}. \quad (3)$$

Здесь $k_{н, в} = 2\pi f_{н, в}/c$ — волновые числа, $z_{н, в}$ — высоты отражения сигналов при НЗ и ВЗ ионосферы, $\varepsilon_{1н, в}$ и $\varepsilon_{н, в}$ — флуктуационные и регулярные составляющие диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы соответственно на частотах f_b и f_n . Учитывая, что при условии $f_b = f_n \cos \vartheta_0$, $z_n = z_b$ [3], и, кроме того, используя известное соотношение

$$\varepsilon = 1 - \frac{e^2 N}{\pi m f^2}$$

(m , e — масса и заряд электрона, N — концентрация электронов плазмы), в результате несложных преобразований соотношений (2) и (3) получаем равенство $2\overline{s_n^2} = \overline{s_b^2}$.

Таким образом, при условии $f_b = f_n \cos \vartheta_0$ среднеквадратичные значения набегов фаз волн при ВЗ и НЗ ионосферы равны $2\overline{s^2}$ и $\overline{s^2}$, а следовательно, равны и соответствующие значения индексов флуктуаций принимаемых сигналов лишь при $\overline{s^2} \gg 1$ ($F \sim 1$).

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке концентрации эквивалентности статистических параметров КВ-сигналов при ВЗ и НЗ ионосферы и, в частности, проверке его основного положения — существования однородности и стационарности процесса рассеяния коротких волн ионосферными неоднородностями.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Летом 1973 г. в экспедиционных пунктах г. Малмыж, Кировская обл., и с. Тюлячи, Татарская АССР, осуществлялся прием сигналов ионосферной станции г. Москвы. Одновременно на полигоне НИРФИ в Зименках (Горьковская обл.), расположенном в средней подыоносферной точке трасс Москва—Малмыж и Москва—Тюлячи, работала станция вертикального зондирования ионосферы ИС-5. Кроме того, во время эксперимента в Зименках в дежурном режиме снятия ионограмм ВЗ ионосферы (один раз в пятнадцать минут) функционировала станция АИС. Московский передатчик работал в импульсном режиме (длительность импульса — 100 мкс) на ряде фиксированных частот в диапазоне 5—20 МГц сеансами по 10—30 минут. По такому же расписанию работала и станция ИС-5 в диапазоне 2,5—5,5 МГц. При этом за счет использования схемы смещения сигналов двух генераторов ГСС-6 с заданным относительным смещением частот на входе передатчика ИС-5 в Зименках осуществлялось одновременное излучение сигналов двух частот в полосе 20—200 кГц.

В состав приемо-регистрирующей аппаратуры экспедиционных пунктов входили отдельные комплексы аппаратуры с фоторегистрирующими приставками для приема сигналов коротковолновых станций [2]. Схема приема и регистрации сигналов станции ИС-5 в Зименках была эквивалентна соответствующей схеме работы [6].

Использование для НЗ ионосферы широкополосных сигналов позволяло разделять импульсы, отраженные от различных ионосферных слоев. Предварительные наблюдения за КВ сигналами на трассах Москва—Малмыж и Москва—Тюлячи показали, что, как правило,

в дневное время суток в пунктах приема присутствуют три импульса, отраженные от E -, F_1 - и F_2 -слоев ионосферы, в ночное время — два (E - и F_2 -отражения) с относительными задержками 1 — 1,5 мс*. В описываемом эксперименте основное внимание было уделено изучению статистики F -слоя ионосферы. В связи с этим наряду с покадровой регистрацией всех наблюдаемых сигналов кинокамерой РФК-5 в пунктах наблюдения проводилась запись стробированного сигнала, отраженного от F -области ионосферы, на непрерывную лентопротяжку фотопроставки ФП.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Обработка полученных записей во всех трех пунктах наблюдения состояла в вычислении индексов и коэффициентов временной корреляции флуктуаций КВ сигналов $\rho(\tau)$. Корреляционной обработке было подвергнуто 50 записей КВ сигналов, полученных в г. Малмыж, 20 записей из с. Тюлячи и 40 записей полигона Зименки.

Каждая запись сигнала в экспедиционных пунктах проводилась на частоте f_n , удовлетворяющей приближенному равенству $f_b = f_n \cos \vartheta_0$ (для F_2 -отражения на выбранных трассах $\cos \vartheta_0 = 0,6$). Соответствующая запись сигнала на частоте f_b в Зименках осуществлялась в тот же самый временной интервал, что и запись КВ сигнала на частоте f_n в экспедиционных пунктах. Однако, в основном, из-за существенно различной сложной помеховой обстановки в пунктах наблюдения таких полностью синхронных качественных записей сигналов ВЗ и НЗ ионосферы было получено только десять. При этом только в двух из десяти случаев индексы были $F \sim 1$ и характерные длительности флуктуаций сигналов τ_0 (τ_0 определялось по уровню 0,3 для $\rho(\tau)$) при ВЗ и НЗ ионосферы оказались практически идентичными (отличие менее 20%). В остальных случаях имелись существенные различия между значениями статистических параметров сигналов при вертикальном и наклонном падении волн на ионосферу. Одной из основных причин отсутствия эквивалентности величин статистических параметров сигналов при ВЗ и НЗ ионосферы являются, по-видимому, нестационарность и пространственная неоднородность процесса рассеяния коротких волн в ионосфере**.

Прямым доказательством существования такой нестационарности может служить значительное (более 100%) различие между величинами F и τ_0 для нескольких последовательных пяти — десяти-минутных интервалов во время длительных записей КВ сигналов в г. Малмыж. На возможную пространственную неоднородность процесса рассеяния коротких радиоволн в ионосфере указывают результаты частотно-разнесенного приема сигналов станции ИС-5 в Зименках. В подавляющем большинстве (в $\sim 75\%$ случаев) синхронных записей сигналов с двух частотных каналов при разнесении до 200 кГц отмечалось существенное различие в величинах основных статистических параметров сигналов. В качестве примера на рис. 1 представлены дифференциальные распределения амплитуд для синхронной записи двух сигналов с разнесением $\Delta f = 100$ кГц.

* Этот вывод был сделан после сравнения экспериментально наблюдаемых сигналов (и их задержек) с расчетными значениями числа сигналов и соответствующих задержек для данных трасс по нонограммам станции АИС.

** Вообще говоря, в отдельных случаях это несоответствие значений статистических параметров при НЗ и ВЗ может быть связано с невыполнением исходных соотношений (2) и (3).

Для записей сигналов ВЗ ионосферы была проведена дополнительная обработка полученных данных о параметрах F и τ_0 для отдельных сеансов наблюдений. Именно, была проведена группировка полученных величин за все время наблюдения по частоте с интервалом $\Delta f = 0,5 \text{ МГц}$ и вычислены соответствующие средние величины \bar{F} и τ_0 в зависимости от частоты f . Зависимость $\bar{F}(f)$ приведена на рис. 2. Из рисунка видно отсутствие какой-либо определенной закономерности в поведении функции $\bar{F}(f)$ *. Это обстоятельство, по-видимому, тоже является следствием

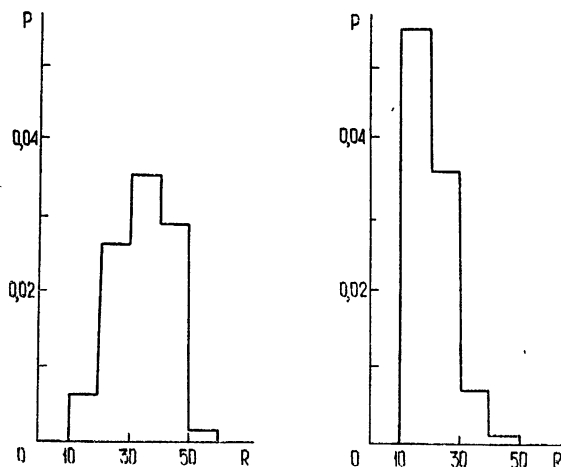


Рис. 1.

существования нестационарности процесса рассеяния коротких волн в ионосфере, поскольку при наличии стационарности исследуемого процесса следовало ожидать проявления характерных закономерностей в поведении частотной зависимости индекса флуктуаций сигнала [4].

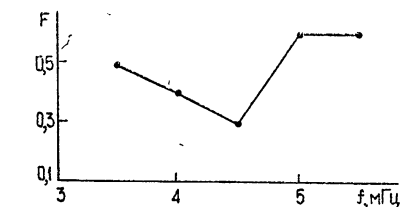


Рис. 2.

Сравнительный анализ статистических характеристик для E -, F_1 - и F_2 -отражений по отдельным записям КВ сигналов, полученным с помощью РФК в г. Малмыж в июне 1973 г., не выявил определенной закономерности. Однако усредненные по десяти сеансам синхронных наблюдений соответствующие величины индексов и характерных длительностей флуктуаций сигналов (для F -отражения— $F \approx 0,9$, $\tau_0 \approx$

≈ 20 с; для E -отражений— $\bar{F} \approx 0,6$, $\tau_0 \approx 10$ с) указывают на более глубокие и длительные замирания сигналов, отраженных от F -слоя ионосферы по сравнению с E -отражениями. Это, очевидно, связано с крупномасштабной пространственной неоднородностью процесса рассеяния коротких волн в ионосфере (большой относительной стабильностью E -слоя ионосферы).

На рис. 3 и 4 приведены распределения индексов F и характерных длительностей флуктуаций τ_0 F -отражений сигналов при НЗ (Малмыж—Тюлячи, рис. 3 а, 4 а) и ВЗ (Зименки—рис. 3 б, 4 б) ионосферы. Отметим, что соответствующие распределения флуктуаций сигналов для НЗ ионосферы во время летнего эксперимента 1971 г. [2] заметно отли-

* Этот вывод справедлив и для зависимости $\tau_0(f)$.

чаются от представленных на рис. 3, 4 а. В основном это обстоятельство связано с существенным различием исследуемых статистик флуктуаций КВ сигналов в двух экспериментах. В настоящем эксперименте — это статистика F -отражений сигналов, в [2] существенная роль принадлежала статистике E_s -отражений КВ сигналов.

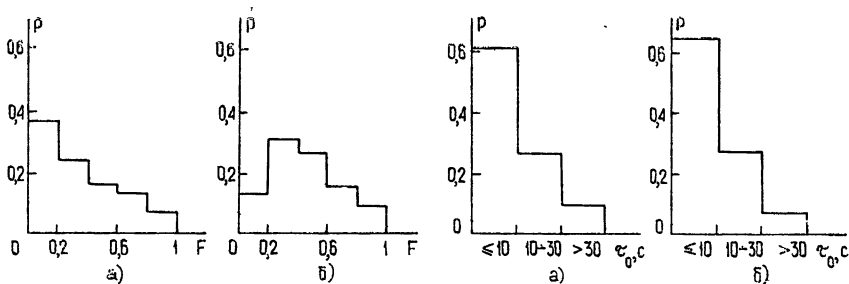


Рис. 3, 4.

Различия в распределениях F и τ_0 для случаев НЗ и ВЗ ионосферы, по-видимому, есть следствие отмеченной выше нестационарности процесса рассеяния коротких волн в ионосфере. Наиболее отчетливо эти различия выражены в F -распределениях флуктуаций сигналов. В усредненных τ_0 -распределениях соответствующие различия практически отсутствуют.

Таким образом, проведенные исследования показали, что эквивалентность статистических параметров сигналов при ВЗ и НЗ ионосферы выполнялась лишь в незначительном числе сеансов наблюдений. Это обстоятельство связано с явлением временной и пространственной нестационарности процесса рассеяния коротких волн в ионосфере. Явление нестационарности нашло свое прямое отражение в значительном различии между статистическими параметрами для нескольких последовательных интервалов длительных записей КВ сигналов на трассах НЗ ионосферы и для сигналов с частотным разнесением при ВЗ ионосферы. Следствием существования нестационарности процесса рассеяния коротких волн в ионосфере является и отсутствие определенных закономерностей в частотных зависимостях основных статистических параметров КВ сигналов и различие статистик сигналов при отражении их от E - и F -слоев ионосферы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Л. Альперт, Распространение радиоволн и ионосфера, изд АН СССР, М., 1960.
2. В. А. Алимов, Ю. Д. Вдовин, Г. Г. Гетманцев и др., Геомагнетизм и аэронавигация, 14, № 4, 651 (1974)
3. В. Л. Гинзбург, Распространение электромагнитных волн в плазме, изд Наука, М., 1967
4. В. А. Алимов, Л. М. Ерухимов, Т. С. Пыркова, Геомагнетизм и аэронавигация, 9, № 5, 790 (1971).
5. В. А. Алимов, Геомагнетизм и аэронавигация, 12, № 3, 548 (1972)
6. В. А. Алимов, Л. М. Ерухимов, Л. Н. Рубцов и др., Изв. высш. уч. зав. — Радиофизика, 16, № 10, 1482 (1973).

THE RELATION BETWEEN STATISTICAL SW SIGNAL PARAMETERS IN
VERTICAL AND OBLIQUE SOUNDING OF THE IONOSPHERE

*V. A. Alimov, L. M. Erukhimov, L. F. Mironenko, L. A. Skrebkova,
A. V. Rakhlin, V. P. Uryadov, K. I. Yurin*

Some results of the complex experiment on vertical (VS) and oblique sounding (OS) of the ionosphere are given. Statistical parameters with VS and OS of the ionosphere were equivalent only in a small number of sessions that was associated with time and spatial nonstationarity of ionosphere short wave scattering. The absence of definite regularities in frequency dependences of basic statistical SW signal parameters and the difference of signal statistic for ionospheric reflection from *E* and *F* region are shown.
