ИЗМЕРЕНИЕ МЕТОДОМ КОГЕРЕНТНЫХ ЧАСТОТ НЕРЕГУЛЯРНОЙ Составляющей набега фазы сигналов исз за счет неодкородкостей ионосферы

В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, В. М. Мигунов, Г. А. Бирюков, М. Н. Чалая,

Харьков

Методом когерентных частот с высокой точностью измерена нерегулярная составляющая набега фазы δΔφ сигналов ИСЗ «Электрон-1», «Космос-93» и «Космос-95», обусловленная влиянием неоднородностей ионосферы, расположенных между спутником и наземным пунктом наблюдения.

Получены гистограммы интенсивностей $\delta \Delta \varphi$ и эффективных размеров неоднородностей *d* вдоль орбит спутников в различное время суток для интервалов высот 400 --- 500 км.

Рассчитан также коэффициент корреляции между δΔφ и d.

Исходные соотношения и методика обработки. Для непосредственно измеряемой приведенной разности фаз Ф когерентных радиоволн, излучаемых передатчиками спутников и геофизических ракет, известно [1] общее приближенное соотношение геометрической оптики

$$\Phi = k\Delta \varphi + \Phi_{\rm or} \tag{1}$$

где

$$\Delta \varphi = -k_0 \Delta L - \tag{2}$$

набег фазы волны в ионосфере.

$$\Delta L = \frac{1}{2} \int_{0}^{R} \alpha \, dR - \tag{3}$$

фазовое запаздывание радиоволн в ионосфере на расстоянии R между точкой наблюдения A и излучателем B;

k — константа, зависящая от соотношения когерентных частот;

 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ — волновое число для вакуума;

*Φ*₀ — неизвестное начальное значение *Φ*, относящееся к началу регистрации.

Величина а определяет коэффициент преломления для ионосферы $n(n = \sqrt{1+\alpha})$ и в рассматриваемом случае при $|\alpha| \ll 1$ с точностью до малых порядка $|\alpha|^2$ принято $n \approx 1 + \frac{\alpha}{2}$.

В пренебрежении соударениями и влиянием геомагнитного поля

функция « связана с электронной концентрацией ионосферы N и частотой f радиосигнала соотношением

$$a = -k_1 N f^{-2}, \tag{4}$$

Ъ

Рис. 1

(9)

где k_1 — коэффициент, зависящий от выбора единиц (для N в единицах. $10^5 \ \mathfrak{s}_A \cdot \mathfrak{c}_M^{-3}$ и f в $M\mathfrak{e}_{\mathfrak{q}}; k_1 = 8,07$).

В выражении (3) величина а, а следовательно, и N, является функцией трех координат и времени, а также может содержать регулярную

и нерегулярную (δ) составляющие. В силу линейных связей (1) — (4) между величинами Φ , ΔL , α и N нерегулярной δN составляющей электронной концентрации, обусловленной неоднородностями N ионосферы, будут соответствовать нерегулярные (δ) составляющие этих величин, входящие в (1), (2), (3) аддитивно. Следовательно, формулы для нерегулярных (δ) составляющих $\delta \Phi$, $\delta \Delta \varphi$, $\delta \Delta L$ и $\delta \alpha$ будут иметь тот же вид (1) — (4), если всюду заменить α на $\delta \alpha$

$$\delta \Phi = k \, \delta \Delta \varphi = - k_0 k \, \delta \Delta L; \tag{5}$$

$$\delta\Delta L = \frac{1}{2} \int_{0}^{R} \delta \alpha \, dR = -\frac{k_1}{2f^2} \, \delta N_{0L} \,, \qquad (6)$$

где

$$\delta N_{0L} = \int_{0}^{R} \delta N dR -$$
 (7)

нерегулярная составляющая полного содержания электронов в трубке единичного сечения на участке между *A* и *B* (рис. 1). Из последних соотношений очевидно следуют выражения для дисперсий величин, например:



где

 $K = \delta \overline{N_1} \delta \overline{N_2} -$

корреляционная функция флуктуаций электронной концентрации ионосферы (индексы 1 и 2 относятся к произвольным точкам на прямой между точкой наблюдения и излучателем). Величины $\delta \Phi$ (или ($\overline{\delta \Phi^2}$) могут быть измерены методом когерентных частот с весьма высокой точностью [2]; с этой же точностью может быть измерен и нерегулярный набег фазы в ионосфере $\delta \Delta \varphi$, (или ($\overline{\delta \Delta \varphi}$)²).

По регистрациям длительности флуктуации $\delta t = \frac{d}{v}$ легко определяется ее эффективный размер d (или $\sqrt{d^2}$) вдоль орбиты ИСЗ по извествой из орбитных данных скорости спутника v, которую в пределах d(за δt) всегда можно считать постоянной. Более характерной, чем d_{t} . величиной является угловой размер $\delta \varepsilon$ (угол B_1AB_2 на рис 1) (или $V(\overline{c\varepsilon})^2$) флуктуаций $\delta\Delta \varphi$. Среднеквадратичное значение ее также может быть $\delta_k \Delta \varphi = V(\overline{\delta \Delta \varphi})^2$. Величина $\delta \varepsilon$ ($\delta_k \varepsilon$) при известных орбитных данных легко определяется через d ($\delta_k d$), а следовательно, через δt , получаемое из экспериментальных кривых $\Phi(t)$.

Как известно, ионосфера статистически анизотропная и статистически неоднородная среда. Обычно чем больше d, тем существенней влияние анизотропии на эфректы. вызываемые неоднородностями (в том числе и на $\delta\Delta\varphi$).

Параметры анизотропии неоднородностей ионосферы, как и корреляционная функция K, изучены пока крайне недостаточно, поэтому иногда ограничиваются некоторым эффективным размером a, считая приближенно ионосферу статистически однородной и изотропной, а корреляционную функцию в (8) соответственно априори гауссовой [3]

$$K = K_{M}e^{-\frac{d_{R_{1,2}}^{2}}{a^{*}}},$$
 (10)

здесь $K_M = \delta \overline{N^2}$, когда обе точки 1 и 2 на луче лежат в ионосфере



Рис. 2

(в области, занятой неоднородностями) и $K_M = 0$, когда хотя бы одна из этих точек лежит вне области неоднородностей. После подстановки (10) в (8) получаем

$$(\overline{\delta\Delta L})^2 = 16,24 \sqrt{\pi} f^{-4} d_R a \, (\overline{\delta N})^2, \tag{11}$$

где

$$d_{R} = \begin{cases} R_{k} - R_{0} & \text{при } R > R_{k} \\ R - R_{0} & \text{при } R_{0} < R < R_{k} \end{cases} -$$
(12)

расстояние, пройденное волной в неоднородностях (в ионосфере); R_0 и R_* расстояние от A до ионосферы и верхней границы ее соответственно (f, Meu; $\sqrt{\delta N^2}$, 10⁵ эл.см⁻³). Приближенная формула (11) получена в предположении, что $d_R \gg a$ с использованием формул для дисперсии $(\delta \Delta \varphi)^2$ и функции корреляции флукгуаций фазы вида

$$(\overline{\delta\Delta\varphi})^{2} = \frac{\sqrt{\pi} k_{0}^{2}}{4} (\overline{\delta\alpha})^{2} ax \begin{cases} R - R_{0} & \text{при } R < R_{k} \\ R_{k} - R_{0} & \text{при } R > R_{k} \end{cases},$$
(13)

$$\overline{\delta\Delta\varphi_1\,\delta\Delta\varphi_2} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \overline{(\delta\alpha)^2} e^{-\frac{d_{R_{1,2}}^2}{a^2}},\tag{14}$$

полученных в [3] с учетом дифракции.



Рис. 3

В важном для ионосферы случае крупных анизотропных неоднородностей, число которых на луче между *A* и *B* обычно недостаточно для применения статистического подхода по ансамблю, этот вопрос будет являться предметом другой работы.



Результаты измерений. Ниже приводятся некоторые результаты опытов, полученные при помощи ИСЗ «Электрон-1», «Космос-93» и «Космос-95» при низкой активности Солнца в различное время суток, включая восход Солица. Прежде всего отметим характер первичных данных, непосредственно полученных из эксперимента. На рис. 2 даны типичные образцы графиков приведенной разности фаз когерентных волн в функции времени пролета ИСЗ. Из графиков рис. 2 видны нерегулярные отклонения $\delta \Phi$ фазы Φ от регулярного хода, обусловленные наличием неоднородностей ионосферы.

Рис. 3 и 4 иллюстрируют спектры нерегулярных отклонений $\delta \Phi$ и размеров *d* неоднородностей для различного времени суток в феврале — марте 1964 г. («Электрон-1»). Характер изменения спектров $\delta \Phi$ и *d* в

зависимости от времени суток сходен, что свидетельствует о наличии положительной корреляции между $\delta \Phi$ и *d*. В утренние часы имеется сстрый максимум в спектрах. К полудню значения $\delta \Phi$ и *d* возрастают, достигая больших значений ($\delta \Phi \approx 10^2$ рад, $d \approx 330$ км).

Естественно, что сравниваемые спектры построены для сходных положений спутника и состояний ионосферы.

Измеренные значения оф приведены к частоте 20 Мгц.

Рассчитан коэффициент корреляции между отклонениями фазы $\delta \phi$ от регулярного хода Φ и размерами неоднородностей d по данным наблюдений за спутниками «Электрон-1» ($Z_B \approx 420-500 \ \kappa m$) и «Космос-93, 95» ($Z_B \approx 250-300 \ \kappa m$) для различного времени суток. Коэффициент этот оказался равным 0,88 и почти не зависит от времени суток. Расчет коэффициентов корреляции производился графически]4].

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Мисюра, Г. К. Солодовников, В. М. Мигунов. Космические исследования», 111, 4, 1965, 595.

2. Я. Л. Альперт, В. Б. Белянский, А. Ф. Кутяков. Геомагнетизм и аэрономия, З, 1, 1963, 157.

3. Л. А. Чернов. Распространение воли в среде со случайными неоднородностями. Изд-во АН СССР, М, 1953.

4. А. Уорсинг, Д. Гефнер. Методы обработки экспериментальных данных. Изд-во иностр. лит-ры, 1953.