

# Аналитическая методика оценки влияния ионосферы на помехоустойчивость систем космической связи

В. П. Пашинцев, А. Д. Сапожников, Л. Л. Вититлов

Представлена методика получения аналитического соотношения для оценки помехоустойчивости некогерентного приема широкополосных сигналов в системах космической связи в зависимости от частотных параметров передаваемых сигналов и физических параметров ионосферы.

Известно [1], что дисперсионные и рассеивающие свойства возмущенной ионосферы могут вызывать значительные энергетические потери при некогерентном приеме широкополосных сигналов (ШПС) в системах космической связи (СКС). Для оценки влияния указанных свойств ионосферы на помехоустойчивость широкополосных СКС используется методика [2, 3], основанная на применении численных методов расчета на ЭВМ реализаций поля принимаемой волны и вероятности ошибки ( $P_{ош}$ ), обеспечиваемой при этом некогерентным приемником. Данная методика отличается сложностью вычислений и ограниченностью получаемых результатов конкретными значениями исходных данных.

Цель статьи — разработка аналитической методики оценки влияния рассеивающих и дисперсных свойств ионосферы на помехоустойчивость некогерентного приема ШПС в СКС. В соответствии с этой методикой требуется получить функциональную зависимость величины  $P_{ош}$  от значений частотных параметров передаваемых ШПС (несущей частоты  $f_0$  и ширины спектра  $\Delta f_0$ ) и физических параметров ионосферы (средней электронной концентрации  $N_e$  и интенсивности неоднородностей  $\beta$ ), определяющих ее рассеивающие и дисперсионные свойства.

При обосновании подхода к разработке методики учитывались следующие обстоятельства.

1. В статистической теории связи разработаны [4] аналитические методы оценки помехоустойчивости некогерентного приема сигналов в каналах связи (КС) с рассеянием, устанавливающие взаимосвязь  $P_{ош}$  со статистическими параметрами их передаточных характеристик: мощностью регулярной  $\alpha^2$  и флуктуационной  $2\sigma^2$  составляющих коэффициента передачи КС, либо его двухчастотной функцией корреляции  $K(\Delta\Omega)$ .

2. Используемый в рамках этой теории научно-методический аппарат (НМА) построения феноменологических многолучевых моделей КС не учитывает реальных рассеивающих свойств неоднородностей среды распространения радиоволн (РРС). Поэтому для получения требуемой зависимости  $P_{ош} = \psi(f_0, \Delta f_0, N_e, \beta)$  необходимо, прежде всего, установить взаимосвязь статистических параметров  $\alpha^2$ ,  $2\sigma^2$ ,  $K(\Delta\Omega)$  с частотными параметрами передаваемых сигналов ( $f_0$ ,  $\Delta f_0$ ) и физическими параметрами ионосферных неоднородностей ( $N_e$ ,  $\beta$ ).

3. Данная взаимосвязь может быть установлена путем сравнения аналитических выражений для статистических характеристик принимаемых сигналов, получаемых методами построения феноменологических моделей для трансionoсферных КС, и принимаемых полей, получаемых радиофизическими методами теории дифракции волн на неоднородностях ионосферы.

4. Для оценки влияния одновременно с рассеивающими и дисперсионными свойствами ионосферы (определяемых в основном  $N_e$ ) на величину  $P_{ош}$  необходимо при разработке радиофизического и многолучевого методов расчета статистических характеристик принимаемых полей и сигналов учесть в них результаты хорошо известного НМА исследования дисперсионности ионосферы.

Таким образом, для разработки искомой аналитической методики предлагается подход, основанный на комплексном использовании методов статистической радиофизики и теории связи, который включает в себя последовательное решение следующих частных задач:

разработку радиофизического метода расчета статистических характеристик поля принимаемой волны при ее трансionoсферном распространении;

разработку метода учета рассеивающих и дисперсионных свойств ионосферы в многолучевых моделях трансionoсферных КС;

получение требуемой функциональной зависимости  $P_{\text{out}} = \psi(f_0, \Delta f_0, N_e, \beta)$ .

Из радиофизических методов аналитического расчета наиболее известным является метод фазового экрана (МФЭ) [5]. Однако необходима его модификация в направлениях учета, помимо дифракционных (т. е. рассеивающих), и дисперсионных свойств ионосферы, а также обобщения результатов его применения на случай передачи модулированных волн.

Для одновременного учета дифракционных и дисперсионных свойств ионосферы предлагается распределение электронной концентрации (ЭК) в ней описывать комплексной моделью, которую можно представить в виде совокупности однородного слоя с эквивалентной толщиной  $z_s$  ( $\sim 5,1 \cdot 10^5$  м) и максимальной средней ЭК  $N_e$  [1] и расположенного над ним тонкого слоя неоднородностей (фазового экрана), характеризующегося флуктуациями интегральной ЭК  $\Delta N_T(\rho)$  с нулевым математическим ожиданием и постоянной дисперсией [5].

Для обобщения МФЭ на случай передачи модулированной волны целесообразно сначала качественно описать процесс ее распространения через ионосферный слой, представленный комплексной моделью, выражением для фазового фронта волны с частотой  $\omega_i = \omega_0 + \Omega_i$  на выходе этого слоя

$$\varphi(\omega_i, \rho, z_s) = \omega_0 [z_s/c + \bar{\tau} + \Delta\tau(\rho)] + \Omega_i [(z_s/c) + \bar{\tau} + \Delta\tau(\rho)] + \Delta\Phi(\Omega_i), \quad (1)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме;  $\bar{\tau} = 40,4 (2\pi)^2 z_s N_e / (\omega_0^2 c)$  — среднее значение группового времени задержки волны в ионосферном слое;  $\Delta\tau(\rho) = 40,4 (2\pi)^2 \times \Delta N_T(\rho) / (\omega_0^2 c)$  — флуктуации группового времени задержки различных участков фронта выходной волны относительно  $\bar{\tau}$ ;

$$\Delta\Phi(\Omega_i) \approx -40,4 (2\pi)^2 \Omega_i z_s N_e / (\omega_0^2 c) \quad (2)$$

— фазовый сдвиг частоты  $\omega_i$  относительно  $\omega_0$ , обусловленный дисперсионными свойствами ионосферы.

Решение задачи дифракции волн в свободном пространстве за фазовым экраном, описываемым (1), позволяет получить соотношение для однопозиционной двухчастотной функции взаимной когерентности поля принимаемой волны при ее трансфокусированном распространении:

$$\dot{I}_0 = F_0 \exp[-(\Delta\Omega/\Delta\Omega_k)^2] \exp[i\Delta\Omega(z/c - \bar{\tau}) \exp\{i[\Delta\Phi(\Omega_1) - \Delta\Phi(\Omega_2)]\}], \quad (3)$$

где  $F_0$  — множитель ослабления в свободном пространстве;  $\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$ ;

$$\Delta\Omega_k = \sqrt{2}\omega_0/\sigma_\varphi = \sqrt{2}/\sigma_\tau = 2\pi\Delta f_k; \quad (4)$$

$$\sigma_\varphi^2 \approx 2 (80,8\pi/c)^2 L_0 z_s (\beta N_e / f_0)^2 \quad (5)$$

— дисперсия флуктуаций фазового фронта волны на выходе ионосферного слоя (здесь  $L_0 \sim 3 \cdot 10^4$  м — наибольший масштаб ионосферных неоднородностей);  $\sigma_\tau$  — среднеквадратическое отклонение  $\Delta\tau(\rho)$  относительно  $\bar{\tau}$ ;

$$\Delta f_k = f_0^2 / (80,8\pi \sqrt{L_0 z_s \beta N_e}) \quad (6)$$

— полоса когерентности ионосферы, обусловленная ее рассеивающими (дифракционными) свойствами.

При равномерном спектре излучаемой волны в полосе  $\Delta\Omega_0 = 2\pi\Delta f_0$  аргумент последнего сомножителя в (3) можно представить в виде:  $\Delta\Phi(\Omega_1) - \Delta\Phi(\Omega_2) = 2\pi\Delta f_0/\Delta f_k$ , где

$$\Delta f_k = f_0^2 / (40,4\Delta f_0 z_s N_e) \quad (7)$$

— полоса когерентности ионосферы, обусловленная ее дисперсионными свойствами.

Полученное соотношение (3) позволяет определить аналитические выражения для расчета таких статистических характеристик поля принимаемой волны, как средняя интенсивность и ее регулярная и флуктуационная составляющие:

$$\overline{I(t)} = F_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_1) \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_2) \exp[-(\Delta\Omega/\Delta\Omega_k)^2] \times \exp(-i\Delta\Omega t') d\Omega_1 d\Omega_2; \quad (8)$$

$$I_p(t) = F_0 \exp(-\sigma_\varphi^2) \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_1) \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_2) \exp(-i\Delta\Omega t') d\Omega_1 d\Omega_2; \quad (9)$$

$$I_\Phi(t) = F_0 \iint_{-\infty}^{\infty} \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_1) \dot{V}_{I\kappa}(\Omega_2) \{ \exp[-(\Delta\Omega/\Delta\Omega_k)^2] - \exp(-\sigma_\varphi^2) \} \exp(-i\Delta\Omega t') d\Omega_1 d\Omega_2; \quad (10)$$

где  $\dot{V}_{in}(\Omega_i) = \dot{V}_i(\Omega_i) \exp [i \Delta \Phi(\Omega_i)]$  — спектр комплексной огибающей излучаемой волны  $V_i(\Omega_i)$  с учетом его дисперсионных искажений;  $t' = t - (z/c) - \tau$ .

Решение второй частной задачи базируется на представлении процесса транссионосферного РРВ в точку приема в виде традиционной для теории связи совокупности множества лучей, образованных на поверхности фазового фронта волны, описываемого (1). В результате построения многолучевых моделей для транссионосферных КС с дисперсионными искажениями и замираниями различных типов установлено, что выражения для средней мощности принимаемых сигналов и ее регулярной и флуктуационной составляющих идентичны по виду с результатами определения интенсивности поля модулированной волны в точке приема при ее транссионосферном распространении модифицированным МФЭ (8) — (10). Это позволяет:

1) учесть влияние рассеивающих свойств ионосферы в многолучевых моделях транссионосферных КС путем установления взаимосвязи статистических параметров последних с частотными параметрами передаваемых сигналов и физическими параметрами ионосферных неоднородностей через величину  $\sigma_\varphi^2$ :

$$\alpha^2 = F_0 \exp(-\sigma_\varphi^2); \quad (11)$$

$$2\sigma^2 = F_0 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)]; \quad (12)$$

$$K(\Delta\Omega) = 2\sigma^2 K_n(\Delta\Omega) \approx F_0 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)] \exp[-(\Delta\Omega\sigma_\varphi/\sqrt{2}\omega_0)^2], \quad (13)$$

где  $K_n(\Delta\Omega) = \exp[-(\Delta\Omega\sigma_\varphi/\sqrt{2}\omega_0)^2] = \exp[-(\Delta\Omega\sigma_\tau/\sqrt{2})] = \exp[-(\Delta\Omega/\Delta\Omega_k)^2]$  — нормированная двухчастотная функция корреляции;

2) учесть влияние дисперсионных свойств ионосферы на искажения спектра  $\dot{S}_U(\Omega_i)$  нормированной комплексной огибающей передаваемых через нее сигналов:

$$\dot{S}_{U_A}(\Omega_i) = \dot{S}_U(\Omega_i) \exp[-i\Delta\Phi(\Omega_i)], \quad (14)$$

где  $\Delta\Phi(\Omega_i)$  определяется согласно (2);

3) записать выражение для средней мощности принимаемых сигналов в транссионосферных КС с дисперсионными искажениями и замираниями различных типов в обобщенном виде:

$$\begin{aligned} \overline{P_r(t)} = & E_i F_0 \exp(-\sigma_\varphi^2) |\dot{U}_{in}(t')|^2 + E_i F_0 [1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)] \times \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{S}_{U_A}(\Omega_1) \dot{S}_{U_A}(\Omega_2) \exp\left[-\left(\frac{\Delta\Omega}{\Delta\Omega_k}\right)^2\right] \exp(i\Delta\Omega t') \frac{d\Omega_1}{2\pi} \frac{d\Omega_2}{2\pi}, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $E_i$  — энергия передаваемого сигнала;  $\dot{U}_{in}(t')$  — его нормированная комплексная огибающая с учетом дисперсионных искажений;  $t' = t - (z/c) - \tau$ .

Применение результатов решения второй частной задачи (11) — (15) в качестве исходных данных для известных методов оценки помехоустойчивости позволяет получить аналитические соотношения для оценки  $P_{osh}$  при некогерентном приеме ШПС с дисперсионными искажениями и замираниями различного типа и записать их в обобщенном виде

$$P_{osh} = \frac{\gamma^2 + 1}{\eta_a \eta_n \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left[-\frac{\eta_a \eta_n \gamma^2 \bar{h}_0^2}{\eta_a \eta_n \bar{h}_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)}\right], \quad (16)$$

где  $\bar{h}_0^2 = E_i F_0 / N_0 = \bar{E}_i / N_0$  — отношение средней энергии принимаемых сигналов к спектральной плотности шума, а коэффициенты  $\gamma^2$ ,  $\eta_a$  и  $\eta_n$ , характеризующие соответственно глубину общих замираний принимаемых сигналов и энергетические потери при некогерентной обработке ШПС из-за их дисперсионных искажений и частотно-селективных замираний (ЧСЗ), непосредственно связаны с физическими параметрами ионосферы ( $N_2$ ,  $\beta$ ) и частотными параметрами передаваемых сигналов ( $f_0$ ,  $\Delta f_0$ ) следующими функциональными зависимостями:

$$\gamma^2 = \alpha^2 / 2\sigma^2 = 1 / [\exp(\sigma_\varphi^2) - 1], \quad (17)$$

где  $\sigma_\varphi^2$  определяется согласно (5);

$$\eta_a = \pi C^2(y) / 2y, \quad (18)$$

где  $C(y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^y \cos x^2 dx$  — интеграл Френеля,  $y = 2\pi \Delta f_0 / \Delta f_s$ , а  $\Delta f_s$  находится

$$\eta_n = F\left[\sqrt{2\pi} \left(\frac{\Delta f_s}{\Delta f_0}\right)\right] \left[1 + \frac{1}{2\pi^\gamma} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta f_s}\right)\right] - \frac{1}{\pi\sqrt{\pi}} \left(\frac{\Delta f_0}{\Delta f_s}\right) \left\{2 - \exp\left[-\pi^\gamma \left(\frac{\Delta f_s}{\Delta f_0}\right)^2\right]\right\}, \quad (19)$$

где  $F[a] = \frac{2}{\sqrt{2\pi}b} \int_0^a \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$  — функция Крампа, а  $\Delta f_c$  рассчитывается по (6).

Приведем несколько примеров, подтверждающих возможность практического использования результатов разработки (16) — (19) для оценки влияния рассеивающих и дисперсионных свойств ионосферы на помехоустойчивость некогерентного приема ШПС в СКС.

Если в трансionoсферных КС выполняется условие отсутствия дисперсионных искажений  $\Delta f_0 \ll \Delta f_d$ , то согласно (18) значение  $\eta_c \approx 1$ . Тогда в зависимости от изменения соотношения между величиной  $\sigma_\varphi$  (определяющей рассеивающее свойство ионосферы) и значениями частотных параметров передаваемых сигналов  $f_0$ ,  $\Delta f_0$  обобщенное выражение (16) преобразуется к известным видам, характерным для оценки помехоустойчивости некогерентного приема сигналов КС без замираний, с общими замираниями райсовского или релеевского типа, ибо КС с ЧСЗ:

при  $\sigma_\varphi = 0$  значения  $\gamma^2 = \infty$ ,  $\eta_c = 1$  и  $P_{\text{ош}} = \exp(-h_0^2/2)/2$ ;

при  $\sigma_\varphi \ll 1$  значения  $0 < \gamma^2 < \infty$ ,  $\eta_c = 1$  и

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{h_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left[-\frac{\gamma^2 h_0^2}{h_0^2 + 2(\gamma^2 + 1)}\right];$$

при  $1 \ll \sigma_\varphi \ll \sqrt{2}f_0/\Delta f_0$  значения  $\gamma^2 = 0$ ,  $\eta_c = 1$  и  $P_{\text{ош}} = 1/(2 + h_0^2)$ ;

при  $\sigma_\varphi \gg \sqrt{2}f_0/\Delta f_0$  значения  $\gamma^2 = 0$ ,  $\eta_c < 1$  и  $P_{\text{ош}} = 1/(2 + \eta_c h_0^2)$ .

Следует отметить, что приведенные соотношения между  $\sigma_\varphi$  и  $f_0$ ,  $\Delta f_0$  могут быть представлены в видах, аналогичных известным условиям возникновения соответствующих типов замираний в многолучевых КС. Например, исходя из (4) соотношение  $1 \ll \sigma_\varphi \ll \sqrt{2}f_0/\Delta f_0$  можно представить в виде  $1/f_0 \ll 2\sigma_\varphi \ll \sqrt{2}/\Delta f_0$ , который согласуется с условием возникновения релеевских замираний в многолучевых КС  $1/f_0 \ll \Delta \tau_i \ll 1/\Delta f_0$ .

Полученные в соответствии с разработанной методикой аналитические выражения (16) — (19) совместно с (5) — (7) позволяют установить требуемую функциональную зависимость  $P_{\text{ош}} = \Psi(f_0, \Delta f_0, N_e, \beta)$ .

Целесообразно проведение дальнейших исследований, связанных с выяснением дополнительного влияния дифракции свободного пространства на помехоустойчивость СКС.

## Литература

1. Тепляков И. М. — Радиотехника, 1984, № 8.
2. Непи Д. Л. — ТИИЭР, 1983, т. 71, № 6.
3. Богуш Р. Л. и др. — ТИИЭР, 1983, т. 71, № 6.
4. Кириллов Н. Е. Помехоустойчивая передача сообщений по линейным каналам связи со случайно изменяющимися параметрами. — М.: Связь, 1971.
5. Гунцзе Е., Чжаохань Лю. — ТИИЭР, 1982, т. 70, № 4.

поступила 10 апреля 1991 г.

\*\*\*\*\*

Продолжение. Начало на с. 37)

- |    |                                     |  |
|----|-------------------------------------|--|
| I  | data carrier input                  | ввод с носителя данных   |
|    | digital data line control interface | интерфейс блока управления цифровой линией передачи данных                   |
|    | direct coupled isolation            | непосредственно связанные слои изоляции, базисный элемент резистивной логики |
| IB | data communication input buffer     | входной буфер системы передачи данных  |
| L  | direct communication link           | прямая линия связи   |
|    | direct coupled logic                | логика с непосредственными связями   |
|    | direct current leakage              | утечка по постоянному току   |
| M  | digital circuit module              | модуль цифровой схемы  |
|    | direct comparison method            | метод прямого сравнения (при измерении)                                      |

(Продолжение на с. 108)